

**Sedimentbilanzierung in Mittelgebirgen:
Historische Bodenerosion mesoskaliger Einzugsgebiete
am Beispiel des Speyerbachs, Pfälzerwald**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften
vorgelegt beim Fachbereich 11 Geowissenschaften/Geographie
der Johann Wolfgang Goethe — Universität
in Frankfurt am Main

von
Helga Förster
aus Halle/Saale

Frankfurt am Main (2012)

D30

Vom Fachbereich 11 Geowissenschaften/Geographie der
Johann Wolfgang Goethe — Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Robert Pütz

1. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Wunderlich (Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt)
2. Gutachter: Prof. Dr. Markus Fuchs (Universität Bayreuth)
3. Gutachter: Dr. Markus Dotterweich (Universität Mainz)

Datum der Disputation: 25.03.2011

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Zusammenfassung	XIV
Abstract	XV
1. EINFÜHRUNG IN DEN WISSENSCHAFTLICHEN HINTERGRUND UND DIE FORSCHUNGSFRAGEN	16
1.1 Stand der Forschung	18
1.1.1 Prozessorientierte Bodenerosionsforschung	19
1.1.2 Landschaftsgenetische Bodenerosionsforschung	25
1.1.3 Sedimentbilanzierung	29
1.2 Forschungsdefizite und Ziele der Arbeit	33
1.3 Untersuchungsgebiet	35
1.3.1 Geologie	36
1.3.2 Geomorphologie	38
1.3.3 Klima und Hydrologie	39
1.3.4 Landnutzung	42
1.3.5 Böden	42
1.3.6 Teileinzugsgebiete	43
1.4 Methodik	45
1.4.1 Bestimmung der Berechnungsgrundlage für die Sedimentbilanzierung	45
1.4.2 Bilanzierung	46
1.4.3 Sensitivitätsanalyse	49
2. SEDIMENTBILANZ I: ÖFFENTLICH VERFÜGBARE DATEN	50
2.1 Datengrundlage und -aufbereitung	51
2.1.1 Bodendaten	51
2.1.2 Landnutzungsdaten	54
2.2 Ergebnisse der Sedimentbilanz I	56
2.2.1 Ergebnis der Sedimentbilanz Ia	56
2.2.2 Sensitivitätsanalyse zur Sedimentbilanz Ia	57
2.2.3 Ergebnis der Sedimentbilanz Ib	59
2.2.4 Sensitivitätsanalyse zur Sedimentbilanz Ib	60
2.3 Räumliche Differenzierung der Ergebnisse	62
2.4 Diskussion	63
2.3.1 Interpretation der Sedimentbilanz I	64
2.3.2 Diskussion im Literaturkontext	73

2.5 Abschätzung des aktuellen Abtrags mittels ABAG	74
2.6 Zusammenfassung	79
3. LANDNUTZUNGSWANDEL UND KLIMAGESCHICHTE	81
3.1 Verwendete Archive und Quellen	81
3.2 Transitland Pfälzerwald – Neolithikum bis Römisches Kaiserreich.....	85
3.3 Machtzentrum Pfälzerwald – Entwicklung bis zum Spätmittelalter	86
3.4 Hinterland Mittlerer Pfälzerwald – 16. bis beginnendes 18. Jahrhundert.....	90
3.5 Industriegebiet Pfälzerwald während des 18. und 19. Jahrhunderts.....	93
3.6 Das größte Waldgebiet Deutschlands – Der Pfälzerwald in der späten Neuzeit...	105
3.7 Zusammenfassung und Diskussion.....	110
4. SEDIMENTBILANZ II: EIGENE GELÄNDEERHEBUNG	113
4.1 Datengrundlage und -aufbereitung	113
4.1.1 Bodenprofildaten	113
4.1.2 Kartengrundlage	116
4.2 Sedimentbilanz II	120
4.2.1 Ergebnisse der Sedimentbilanz II	120
4.2.2 Sensitivitätsanalyse der Sedimentbilanz II	121
4.3 Räumliche Differenzierung	124
4.4 Diskussion der Sedimentbilanz II	127
4.5 Zeitliche Differenzierung von Sedimentationsphasen	138
4.5.1 Ausgewählte Standorte.....	138
4.5.2 Datierungsergebnisse.....	149
4.5.3 Diskussion der zeitlichen Differenzierung der Sedimentationsphasen.....	153
4.6 Zusammenfassung	162
5. SYNOPSIS	163
6. FAZIT UND AUSBLICK.....	172
Literaturverzeichnis.....	174
Lebenslauf und Akademischer Werdegang.....	191
Anhang	192
Dank	213

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Überblickskarte über das Untersuchungsgebiet des Speyerbachs zwischen Kaiserslautern und Neustadt an der Weinstraße, Rheinland-Pfalz, Deutschland.....	36
Abb. 2: Lithologische Karte nach U. Steinrücken auf Grundlage der GK sowie unterliegend die GK 25, Stand 2001, im Speyerbach-Einzugsgebiet.....	38
Abb. 3: Hangneigungskarte mit dem Gewässernetz des Speyerbachs.....	38
Abb. 4: Mittlere, mittlere maximale und mittlere minimale Lufttemperatur in °C an den Stationen Pirmasens (Pfälzerwald, 398 m NN) und Neustadt an der Weinstraße (Haardtrand, 161 m ü. NN) (MÜLLER 1979: 51,52)	40
Abb. 5: Mittlerer Niederschlag und Maximaler Niederschlag in mm an den Stationen Pirmasens (Pfälzerwald, 398 m NN) und Neustadt an der Weinstraße (Haardtrand, 161 m ü. NN) (MÜLLER 1979: 51,52).....	40
Abb. 6: AKTIS-Landnutzungskarte 1:25 000, Stand 2001, im Speyerbach-Einzugsgebiet....	41
Abb. 7: Verbreitung der Bodenformengesellschaften im Speyerbach-Einzugsgebiet nach Bodenkundlicher Karte 1:50 000	41
Abb. 8: Beispiele für typische Bodentypen im Speyerbach-Einzugsgebiet: a) Podsol am Westhang des Steinkopfs bei Fischbach, b) podsoliierte Braunerde am Nordhang des Westlichen Heiligenbergs und c) Braunerde mit rAp am Nordhang bei Speyerbrunn (eigene Grabungen).....	43
Abb. 9: Kartengrundlage der Sedimentbilanz Ia: disaggregierte Bodenkundliche Karte 1:50 000 für das Speyerbach-Einzugsgebiet und Punktdaten des Kartendatensatzes (Datenquelle: Landesamt für Geologie und Bergbau 2006).....	52
Abb. 10: Flächenanteil der Landnutzungsarten in der Klassifikation nach Bodenfachinformationssystem (BoFA), laut Landesamt für Geoinformationen (LVG) und nach der Autorin (HF).....	55
Abb. 11: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario K_O auf Grundlage der BoFA reklassifizierten ATKIS-Daten, mit $h_{BG} = 60$ cm für Hauptlagen und 105 cm für Parabraunerden und einer Trockendichte von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ (BG: Berechnungsgrundlage, HF: nach der Autorin reklassifizierte ATKIS-Daten)	58
Abb. 12: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario G_O basierend auf dem Mittelwert des Grunddatensatzes, nach Autorin reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 70$ cm bzw. 105 cm und $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ bzw. $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$	61
Abb. 13: Räumliche Verteilung der Punkte mit 60 bzw. 70 cm Hauptlagenmächtigkeit des Grunddatensatzes (keine Erosion)	65
Abb. 14: Hangposition der 57/21 Standorte mit 60/70 cm Hauptlagenmächtigkeit des Grunddatensatzes (keine Erosion)	65
Abb. 15: Histogramm der Mächtigkeiten der akkumulierten Sedimente des Karten- und Grunddatensatzes, je nach angewendeter Interpretation der Rohdaten	67
Abb. 16: Darstellung der BFG der BK 50 des Speyerbachs, in denen Gleye (Blautöne) oder Kolluvien (Brauntöne) in unterschiedlichen Flächenprozenten (Helligkeit) Anteil haben.	68

Abb. 17: Aufschlüsselung der Flächen- und Mächtigkeitsverhältnisse der Sedimente im Hochspeyerbach-Einzugsgebiet.....	69
Abb. 18: Semivariogramm zum Pointkriging (Sphärisches Model, Nugget = 228,22; Partial Sill = 60,217; RMS = 16,27) mit dem Grunddatensatz der Sedimentbilanz Ib.....	70
Abb. 19: Ergebnisse der Korrelation der Hauptlagenmächtigkeiten mit den verfügbaren Reliefparametern, die aus dem 20x20m DGM abgeleitet wurden.....	72
Abb. 20: Vergleichende Darstellung der <i>catchment sediment delivery rate</i> (SDR) der Sedimentbilanz I mit weiteren, die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets erhoben worden sind. (Daten von ^{\$} HOFFMANN ET AL. 2007, ⁺ HOUBEN ET AL. 2007, [*] NOTEBAERT ET AL. 2009 und [#] ROMMENS ET AL. 2005)	74
Abb. 21: Vergleich der Ergebnisse der ABAG-Szenarien auf Acker (A) bzw. auf Acker- und Grünlandflächen (A/G) für das Speyerbach-Einzugsgebiet (links oben) und Darstellung der prozentualen Flächenanteile und Erosionssummen pro Erosionsklasse für das Schwarzbrache-Szenario (rechts oben), das Schwarzbrache mit Erosionsschutz-Szenario (links unten) und das Gras-Szenario (rechts unten). Die Balken stellen die Flächenanteile dar, die Linien die potentielle Erosionsmenge pro Klasse.	77
Abb. 22: Vergleich der Altersstrukturen der Bestände im Elmsteiner Wald auf der Grundlage der Waldbeschreibungen von 1785, 1810 und 1853 (nach FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 82, 186, 253).....	94
Abb. 23: Vergleich der Baumartenzusammensetzung der Bestände im Elmsteiner Wald auf der Grundlage der Waldbeschreibungen von 1785, 1810, 1812 und 1853 (nach FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 89, 118, 174, 252)	95
Abb. 24: Digitalisierte historische Landnutzung im Speyerbach-Einzugsgebiet aus den Jahren 1797 und 1801-28 (von links nach rechts).....	99
Abb. 25: Fließgewässerentwicklung zwischen 1797 und 1801-28 im Speyerbach-EZG (G-Gewässerlänge).....	100
Abb. 26: Landnutzungswandel und Änderungen im Gewässernetz zwischen 1797 und 1801-28 in Ausschnitten: Ackerflächen bei Hochspeyer (links) und Wald bei Erfenstein (rechts). Orange: immer Ackerflächen, durchscheinend orange: erst 1801-28 Ackerflächen geworden, dunkelgrün: immer Wald, hellgrün: immer Grünland, durchscheinend Grün: Grünland, das 1801-28 als Wald ausgewiesen wurde, hellblau: 1797 kartierte Bachläufe, die 1801-28 nicht mehr ausgewiesen worden, dunkelblau: 1801-28 kartierte Bachläufe, die 1797 noch nicht kartiert worden waren.....	101
Abb. 27: Von der Autorin zusammengetragene publizierte Hochwässer im Pfälzerwald, in anderen Regionen Deutschlands, der Schweiz und Tschechiens (von oben nach unten) nach Daten von BRAZDIL (1998), DEUTSCH (1998), DEUTSCH (2000), GEES (1997), GERBER (1989), GLASER (1998), HIMMLER (2010), KARCH (1968), RIEGER & VINGERT (2000), RÖTTCHER ET AL. (2000), SCHMIDT (2002) und SCHOLZ ET AL. (2000). Der Abbildung liegen keine eigenen Recherchen in Primärquellen zugrunde und sie erhebt deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Lücken müssen – nicht zuletzt deshalb – nicht heißen, dass in den ausgewählten Gebieten keine Hochwasser stattgefunden haben.....	104
Abb. 28: Digitalisierte historische und quasi-aktuelle Landnutzung im Speyerbach-Einzugsgebiet aus den Jahren 1797, 1801-1828, 1915 und 2001 (von links nach rechts)	106

Abb. 29: Niederschlagsdaten der Messstation Merzalben, der Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt für den Zeitraum vom 1.1.1988 bis zum 31.12.2006 (Quelle: Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt). Der rote Punkt markiert das sommerliche Gewitter, das zur Bildung des <i>gully</i> im Mückental geführt hat.	109
Abb. 30: Mächtigkeitskarten der Hauptlagen und holozänen Sedimente des Tiergartentälchens und des Mückentalgrabens.....	117
Abb. 31: Abgeleitete Reliefeinheitenkarte für das Speyerbach-Einzugsgebiet nach einem Konzept von NAGEL (2009), überarbeitet und verändert von der Autorin.....	118
Abb. 32: Gegenüberstellung der Flächenanteile der Reliefeinheiten an der Gesamtfläche des Speyerbachs und der Volumina, die für diese Flächen mit der Sedimentbilanz II berechnet wurden.....	122
Abb. 33: Disaggregation der Karteneinheit Plateau der semi-automatisiert abgeleiteten Reliefeinheitenkarte in 22 Teilflächen am Beispiel des Erlenbach-TEZG.....	122
Abb. 34: Vergleich der Bilanzterme des Erlenbach-TEZG in verschiedenen Stadien der Flächendifferenzierung.....	123
Abb. 35: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario E_0 auf Grundlage der Reliefeinheitenkarte, mit $h_{BG} = 78$ cm für Hauptlagen und 140 cm für Parabraunerden und einer Trockendichte von 1,28 bzw. 1,33 g cm ⁻³ (BG: Berechnungsgrundlage).....	124
Abb. 36: Übersicht über die Bilanzergebnisse der Sedimentbilanz II für das Speyerbach-Einzugsgebiet, die Teileinzugsgebiete Hochspeyerbach und Erlenbach und die zwei Kleinst-Einzugsgebiete Tiergartentälchen (im Hochspeyer-TEZG) und Mückentalgraben (im Erlenbach-TEZG). Für die Sedimentbilanz des Mückentalgrabens wurden zwei Berechnungsgrundlagen verwendet, die Erklärung findet sich in Kap. 4.5.3.	125
Abb. 37: Zusammenfassende Darstellung der HSDR-Ergebnisse der Sedimentbilanz II und CSDR-Ergebnisse der Sedimentbilanzen Ib, Ib, II für den Speyerbach und die untersuchten Teileinzugsgebiete (Erl – Erlenbach, Hsp – Hochspeyerbach, Mü – Mückentalgraben, Sp - Speyerbach).....	127
Abb. 38: Detailkarten der historischen Landnutzung von 1797, 1801-21, 1915 und 2001 im Bereich des Tiergartentälchens (Legende: lila Kreuz – vorgeschichtlicher Fund, Fragezeichen – unbekannt, blaue Raute – neolithischer Einzelfund, roter Punkt – Tiergartenprofil, rotes Dreieck – Rammkernbohrung, orange – Acker, hellgrün – Grünland, dunkelgrün – Wald).....	130
Abb. 40: Detailkarten der historischen Landnutzung von 1797, 1801-21, 1915 und 2001 im Bereich des Mückentalgrabens (Legende: roter Punkt – Mückentalgrabenprofil, hellgrün – Grünland, dunkelgrün - Wald).....	131
Abb. 40: Vergleichende Darstellung der <i>hillslope sediment delivery rate</i> (HSDR), die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets mit der APU-Methode erhoben worden sind, zusammen mit denen der Sedimentbilanz II (Daten von *NOTEBAERT ET AL. (2009) und #ROMMENS ET AL. (2005)).....	133
Abb. 41: Vergleichende Darstellung der <i>catchment sediment delivery rate</i> (HSDR), die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets mit der APU-Methode erhoben worden sind, zusammen mit denen der Sedimentbilanz II (Daten von *NOTEBAERT ET AL. (2009), #ROMMENS ET AL. (2005) und &VAN HOOFF & JUNGERIUS (1984)).....	134

Abb. 42: Lage des Profils Mückentalgraben, nordwestlich von Mückenwiese, Gemeinde Elmstein (Rheinland-Pfalz) mit Kartenausschnitten zur Hangneigung (grün: 0 bis rot: 52,6°), Lithologie (dunkelbraun: Rehbergsschichten (sm), hellbraun: Karlstalschichten (sm), hellblau: fluviale Sedimente) und der Landnutzung (dunkelgrün: Wald, hellgrün: Grünland).....	140
Abb. 43: Profilskizze, Altersangaben und Laborergebnisse (Korngrößen, organische Substanz, pH-Werte, Eisen- und Mangan-Verhältnisse) für das Mückentalgrabenprofil, Gemeinde Elmstein	142
Abb. 44: Korngrößenverteilung, Eisen- und Mangangehalte, organische Substanz und pH-Werte von ausgewählten Bändern und den sie umgebenden Horizonten im Mückentalgrabenprofil (links) und ein Fotodetail aus der Profilwand zwischen 85 - 130 cm (rechts)	143
Abb. 45: Dünnschliffausschnitte aus dem Dünnschliff MÜG 2 entnommen aus dem V Bv-Horizont in 104 - 115 cm Tiefe: von links nach rechts: Bereich ohne Bänderung, Ton-Schluff-Band, Vergrößerung der Toneinspülung (Fotos von Dipl.-Geogr. Susann Müller)	143
Abb. 46: Lage des Profils Tiergartentälchen, nördlich von der Gemeinde Hochspeyer (Rheinland-Pfalz) mit Kartenausschnitten zur Hangneigung (grün: 0° bis rot: 52,6°), Lithologie (blaßgelb: Lösslehm, hellbraun: Trifelsschichten (sm), hellblau: fluviale Sedimente) und der Landnutzung (dunkelgrün: Wald, hellgrün: Grünland, orange: Ackerland, schwarz: Siedlungen)	145
Abb. 47: Profilskizze, Altersangaben und Laborergebnisse (Korngrößen, organische Substanz, pH-Werte, Eisen- und Mangan-Verhältnisse) für das Tiergartenprofil, Gemeinde Hochspeyer. Das mit * gekennzeichnete Holzkohlealter stammt aus einem Holzkohlenest in der linken Profilwand, das aus lose im Sand verteilten, recht großen Holzkohlestücke besteht.	147
Abb. 48: Schwermineralzusammensetzung der untersten vier Horizonte des Tiergartenprofils: V Bv in 75-110 cm Tiefe, VI Bv in 110-160 cm Tiefe, VII Bv-Cv in 160-175 cm Tiefe und VIII Cv in 175-200 ⁺ cm Tiefe	148
Abb. 50: Schwermineralzusammensetzung ausgewählter Deckschichtenprofile im Pfälzerwald bei Ramberg, Vorderweidenthal und Münchweiler, wie sie von BRAUKÄMPER (1990) publiziert worden sind.	149
Abb. 50: Mächtigkeiten der Hauptlagen in den Profilen und die dazugehörigen Flächenmittelwerte im Mückentalgraben, links: undifferenziert, rechts: ohne Profile und Flächen in den Tiefenlinien	156
Abb. 51: Sedimentkarte mit Profilangaben erbohrter Mächtigkeiten holozäner Sedimente im Mückentalgraben	158
Abb. 52: Kennwerte zur Eisenverarbeitung in der Kurpfalz: (a) Kohlholzlieferungen an Gienanth'sche Werke, (b) Kohlholzverbrauch der Eisenwerke kombiniert mit den Holzkohlepreisen pro Fuder und den Waldan- und -verkäufen der Fam. Gienanth, (c) Produktion der Hochöfen in den Werken kombiniert mit der Roheiseneinfuhr in das Gebiet des dt. Zollvereins (Quelle: CLOER & KAISER-CLOER 1984); Datenlücken bedeuten nicht Ausfall der Anlagen, sondern Überlieferungslücken.	204

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleichende Zusammenstellung einiger Kenngrößen des Speyerbach-Einzugsgebiets und der zwei Teileinzugsgebiete Hochspeyerbach und Erlenbach	44
Tab. 2: Mächtigkeitsangaben für Hauptlagen in verschiedenen Regionen in Deutschland und der Schweiz. Den Publikationen zum Pfälzerwald folgen Angaben aus Sandsteingebieten, gefolgt von Werten aus anderen geologischen Regionen Deutschlands und der Schweiz (*LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001).....	46
Tab. 3: Übersicht über die digital verfügbaren Bodenkarten unterschiedlicher Maßstäbe in Deutschland, die nach Kartieranleitung bis 2005 erstellt worden sind bzw. bis 2010 werden sollen. (Daten vom Staatliches Amt für Statistik 2005, aus BEHRENS & SCHOLTEN 2006: 435).....	50
Tab. 4: Ergebnis der holozänen Sedimentbilanz I für den Kartendatensatz mit BoFA reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 60$ cm für Hauptlagen und 105 cm für Parabraunerden und mit einer Trockendichte von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ (Bezugsszenario K_O)	56
Tab. 5: Ergebnisse der Sedimentbilanz Ib für das Speyerbach-Einzugsgebiet berechnet mit dem Mittelwert des Grunddatensatzes, HF reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 70$ bzw. 105 cm und $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ bzw. $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ (Bezugsszenario G_O)	59
Tab. 6: Sedimentbilanz Ia – Terme für das Speyerbach-EZG (Sp), den Hochspeyerbach (Hsp) und den Erlenbach (Erl) mit $h_{BG} = 60$ bzw. 105 cm	62
Tab. 7: Sedimentbilanz Ib – Terme für das Speyerbach-EZG (Sp), den Hochspeyerbach (Hsp) und den Erlenbach (Erl) mit $h_{BG} = 70$ bzw. 105 cm	63
Tab. 8: Erosion dargestellt in 10 cm Klassen für den Kartendatensatz (blau) und den Grunddatensatz (grün), $n_{gesamt}/n_{erodiert}$ – Gesamtstichprobe/Anzahl der erodierten Profile und Flächen pro Datensatz; h_{BG} – Berechnungsgrundlage (= Wert des 0,95 Quantils) für die Sedimentbilanz des Speyerbach-EZG.....	64
Tab. 9: Datengrundlage der ABAG-Abschätzung des mittleren Bodenabtrags auf den landwirtschaftlichen Flächen des Speyerbach-Einzugsgebiets.....	76
Tab. 10: Mittels ABAG ermittelte mittlere jährliche Erosion im Speyerbach-EZG (A – Acker-Szenario, A/G – Acker und Grünland-Szenario).....	78
Tab. 11: Übersicht über die verfügbaren historischen und aktuellen Karten mit Landnutzungsinformationen für das Speyerbach-Einzugsgebiet mit Bewertung hinsichtlich der Verwendbarkeit für eine digitale Auswertung, zur Verfügung gestellt vom Vermessungsamt Rheinland-Pfalz ¹ , Baden-Württemberg ² und dem Naturpark Pfälzerwald/Vogesen ³	83
Tab. 12: Niederschlagstrend in Deutschland, verändert aus SCHÖNWIESE (2002: 74).....	85
Tab. 13: Flächenanteile der Landnutzungsklassen der in Abb. 24 dargestellten Karten in Prozent	99
Tab. 14: Flächenanteil der Landnutzungsklassen der in Abb. 29 dargestellten Karten in Prozent	107
Tab. 15: Aus der Schmitt'schen Karte von SW-Deutschland (1797), der Preußischen Generalstabskarte (1801-28) und den ATKIS-Daten (2001) geschätzte Länge des Wegenetzes in Metern. Erläuterungen siehe Text	108
Tab. 16: Aus dem DGM 20 x 20 des Speyerbach-Einzugsgebiets mittels verschiedener Reliefparameter abgeleitete geomorphologische Einheiten mit Flächenanteilen und	

Klassifikationsgenauigkeit (*in ArcGIS: <i>spatial analyst</i> und <i>arc scan</i> , K_{Horn} – Krümmung nach Horn, t_{sd} – Abstand von der Tiefenlinie (vgl. Kapitel 4.1.2)).....	119
Tab. 17: Ergebnisse der holozänen Sedimentbilanz II für das Speyerbach-Einzugsgebiet berechnet auf Basis der semi-automatisiert abgeleiteten Reliefeinheitenkarte, $h_{BG} = 78$ bzw. 140 cm, $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ und $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ (Bezugsszenario E_0 , HSDR – <i>hillslope sediment delivery ratio</i>)	121
Tab. 18: Erosions- und Sedimentationsvolumen sowie <i>sediment delivery ratio</i> (SDR) verschiedener internationaler Studien zur Sedimentbilanzierungen in Millionen Tonnen oder Kubikmeter (*Kolluvien, ¹ Bilanz über letzte 7500 Jahre; [#] seit Hochmittelalter; [°] Frühes Holozän bis zum Hochmittelalter, ³ Jubilee-TEZG, ⁴ New Cliftonthorpe-TEZG).	135
Tab. 19: Liste der OSL datierten Bodenproben und der ermittelten Altersangaben (Daten des OSL-Datierungslabors der HU Berlin: yr – Jahre)	152
Tab. 20: Liste der ¹⁴ C-datierten Holzkohleproben und der ermittelten Altersangaben des AMS- ¹⁴ C-Labors Erlangen. Die mit * gekennzeichneten Proben stammen aus Holzkohlenestern (TL- in der Tiefenlinie vor der Profilwand). Die Kalibrierungsergebnisse befinden sich in Anhang 12.....	153
Tab. 21: Ergebnisse der holozänen Sedimentbilanz II für den Mückentalgraben mit $h_{BG}=91$ bzw. 69 cm als lokale Berechnungsgrundlagen und mit $h_{BG}=78$ cm als speyerbachweitem Wert (mit $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ und $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$)	157
Tab. 22: Ergebnisse der ABAG-Modellierung für die potentielle mittlere flächenhafte Erosion im Speyerbach-EZG für das Holozän (10 000 Jahre), die letzten 7 500 und die letzten 1 100 Jahre (A – Acker-Szenario, A/G – Acker und Grünland-Szenario, m.E. – mit Erosionsschutz).....	166
Tab. 23: Gegenüberstellung der Erosion und Sedimentation am Hang für das Speyerbach- und das Dijle-Einzugsgebiet	170

Abkürzungsverzeichnis

A1	Ackerland, BFG 1
AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
A-C-Profil	Oberboden-Ausgangsgestein, geringmächtige Böden
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung nach SCHWERTMANN et al. 1987
AD	Anno Domini
Ah-Horizont	humusreicher Oberboden
Al/Bt-Horizonte	lessivierte und tonangereicherte Oberbodenhorizonte
AMS	Accelerator Mass Spectrometry, Beschleuniger-Massenspektrometrie
Ap-Horizont	Pflughorizont im Oberboden
APU-Methode	Average per Unit-Methode zur Berechnung der Volumina
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
A6	Autobahn A6 zwischen Kaiserslautern und Grünstadt
cal. AD	kalibrierte Jahre nach Christi Geburt (Radiokarbonalter)
cal. BC/yr. BP	kalibrierte Jahre vor Christi Geburt / unkalibrierte Jahre vor 1950 n. Chr. (Radiokarbonalter)
BF	Bodenform
BFG	Bodenformengesellschaft
BG bzw. h_{BG}	Berechnungsgrundlage
BK 50	Bodenkundliche Karte 1: 50000
BoFA	Bodenformenarchiv
B-Horizont	Unterbodenhorizont
Bt-Horizont	mit Ton angereicherter Unterbodenhorizont, rBt reliktsch, fBt fossil
Btv-Bt-Horizont	Übergangshorizont, Bt-Horizont mit Restmerkmalen des Bvt-Horizonts
Bt-Sd-Horizont	wasserstauer Horizont mit Rost- und Bleichflecken mit Bt-Merkmalen
Bv-Horizont	verbraunter, verlehmtter Unterbodenhorizont
Bv-Cv-Horizont	Übergangshorizont vom verbrauchten Oberboden zum Untergrundhorizont
C-Faktor	Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor der ABAG
CSDR	catchment sediment delivery ratio
Cv-Horizont	an- oder verwitterter Untergrundhorizont
^{14}C	Radionuklid des Kohlenstoffs mit 6 Protonen und 8 Neutronen
^{137}Cs	künstliches radioaktives Cäsiumisotop mit 55 Protonen und 82 Neutronen
DGM	Digitales Gelände Modell
DLM	Digitales Landschaftsmodell
EZG	Einzugsgebiet
Erl	Erlenbach
E_0	Bezugsszenario des Erosionsdatensatzes
$\text{Fe}_{o/d}$	oxalat- o. dithionitlösliches Eisen
G1	Grünland, BFG 1
GIS	Geographisches Informationssystem
GK	Geologische Karte
G_0	Bezugsszenario des Grunddatensatzes
ha	Hektar, Flächeneinheit
h,,f	holozäne, fluviale Sedimente

HF	Klassifizierung nach der Autorin (Helga Förster)
HSDR	hillslope sediment delivery ratio
Hsp	Hochspeyerbach
Hzk	Holzkohle
IRSL	Infrarot stimulierte Lumineszenz
k	Keuper
K	Kolluvium (z.B. ρ_K -Trockendichte der Kolluvien)
KA 4	Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. verbesserte und erweiterte Auflage
K-Faktor	Bodenerodierbarkeitsfaktor der ABAG
K_{Horn}	Krümmung nach Horn
K_O	Bezugsszenario des Kartendatensatzes
L 499	Landesstraße 499
LGB	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
LH	Kürzel für Hauptlage nach KA 4 (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996, z.B. ρ_{LH} -Trockendichte der Hauptlagen)
LL	Kürzel für Parabraunerde nach KA 4 (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996, z.B. (h_{LL} -Berechnungsgrundlage für Parabraunerden)
LS-Faktor	kombinierter Faktor der Hangneigung und -länge für die ABAG
LUCIFS	Land Use and Climate Impacts on Fluvial Systems, Working Group innerhalb des Fokus 4 (human-climate-ecosystem interactions) von PAGES
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
LVG	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation
MAA	multiple aliquot additive dose-Protokoll zur Bestimmung der Äquivalenzdosis bei der OSL-Datierung
MAR	multiple aliquot regenerative dose-Protokoll zur Bestimmung der Äquivalenzdosis bei der OSL-Datierung
Max.	statistisches Maximum einer Stichprobe
M-Horizont	holozän sedimentierter Mineralbodenhorizont infolge von Erosion und fluvialem Transport
Min.	statistisches Minimum einer Stichprobe
Mio.	Millionen
$Mn_{o/d}$	oxalat- o. dithionitlösliches Mangan
MTG	Mückentalgrabenprofil
mu	Unterer Muschelkalk
MUSLE	Modified universal soil loss equation
MÜG	Probennummerbezeichnung der Proben aus dem Mückentalgrabenprofil
m ü. NN	Meter über Normal Null - Höhenangaben
MW	Mittelwert
n	Stichprobenumfang
N/NW/NO	Nord/Nordwest/Nordost
n. Chr.	nach Christi Geburt
N _{„Lo}	Lössablagerungen
N _{so}	Niederschlag im hydrologischen Sommerhalbjahr
O	Ost
OSL	Optisch stimulierte Lumineszenz
PAGES	PAST GLOBAL CHANGES, internationales Projekt des International Geosphere-Biosphere Programms

P-Faktor	Erosionsschutzfaktor der ABAG
,R	Karbon
R ²	Bestimmtheitsmaß
R-Faktor	Regen - und Oberflächenabflussfaktor der ABAG
rm	Raummeter (Würfel von x Meter Seitenlänge geschichteter Holzscheite) = 1 Ster
RMS	Root mean square, quadratisches Mittel
(g,m,f)S	Grob-, Mittel-, Feinsandfraktion im Korngrößenspektrum (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 132)
S/SW/SO	Süd/Südwest/Südost
SAR	single aliquot regenerative dose-Protokoll zur Bestimmung der Äquivalenzdosis bei der OSL-Datierung
SB	Sedimentbilanz
SDR	sediment delivery ratio: Sedimentaustragsverhältnis (Austrag zur Gesamterosion in %)
Sl2	schwach lehmiger Sand (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 135)
sm	Mittlerer Buntsandstein
so	Oberer Buntsandstein
Sp	Speyerbach
SRTM	Fernerkundungsdaten der Shuttle Radar Topography Mission
su2	Unterer Buntsandstein
Su3-4	Mittel bis stark schluffiger Sand (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 135)
T	Tonfraktion im Korngrößenspektrum (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 132)
TEZG	Teileinzugsgebiet
TGD	Tiergartenprofil
tsd	Abstand von der Tiefenlinie
(g,m,f)U	Grob-, Mittel-, Feinschlufffraktionen im Korngrößenspektrum (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 132)
Uu	reiner Schluff (Korngröße nach AD-HOC-AG BODENKUNDE (1996: 135))
Uh	Unterhang
Us	sandiger Schluff (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 135)
USLE	Universal soil loss equation
W	West
WATEM/ SEDEM	spatially distributed hillslope soil erosion model/sediment delivery model (VAN OOST et al. 2000)

Zusammenfassung

Sedimentbilanzen haben sich als Methode zur Quantifizierung von Sedimentflüssen in Raum und Zeit in den Geowissenschaften etabliert. Sie eröffnen die Möglichkeit, differenzierte Aussagen über die Erosions- und Sedimentationsdynamik von Einzugsgebieten zu treffen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die holozäne Erosions- und Sedimentationsentwicklung im mesoskaligen Mittelgebirgseinzugsgebiet des Speyerbachs im Pfälzerwald zu erfassen, und räumlich und zeitlich möglichst differenziert darzulegen. Um Langzeit-Sedimentbilanzen für den Speyerbach zu berechnen wurden verfügbare Daten zum Boden, eine eigene Kartierung der Erosion und Sedimentation sowie eine intensive (OSL und ^{14}C -) Datierung zweier Standorte durchgeführt. Die Sedimente wurden durch eine direkte Kartierung erfasst. Die Erosionstiefe errechnet sich aus der Subtraktion der aktuellen Mächtigkeit der Hauptlagen und der Parabraunerden vom initialen Zustand (= Berechnungsgrundlage).

Die Sedimentbilanz I basiert auf öffentlich zugänglichen bodenkundlichen Punkt- und Flächendaten und hat eine Erosion von ~ 27 Mio. m^3 mit einem Einzugsgebiets-Sedimentaustragsverhältnis (CSDR) von 31,5 % ergeben. Die Sensitivitätsanalyse belegt eine hohe Abhängigkeit des Ergebnisses von der Wahl der Berechnungsgrundlage. Aufgrund fehlender Daten sind eine höhere räumliche Auflösung sowie Aussagen zur zeitlichen Entwicklung nicht möglich.

Die Berechnung der Sedimentbilanz II erfolgte auf der Grundlage eigens erhobener Punkt- und Flächendaten, womit die Anwendung eines *nested approach* möglich wurde: Neben der Gesamtbilanz für den Speyerbach (sechste Strahler-Ordnung) wurden Bilanzen für Teileinzugsgebiete erster und vierter Strahler-Ordnung erstellt, anhand derer die Skalenabhängigkeit der Sedimentdynamik diskutiert werden konnte. Es wurden ~ 109 Mio. m^3 und ein CSDR von 5 % errechnet und ebenfalls eine hohe Sensitivität gegenüber der Änderung der Erosionstiefen festgestellt.

Die erfolgreiche Datierung von periglazialen Deckschichten zweier Bodenprofile unterstützt die Ergebnisse der Landnutzungsrekonstruktion aus Literaturdaten und historischen Karten und zeigt, dass in den Tälchen erster Ordnung Erosion verstärkt in der Neuzeit stattfand. Nur in den lösslehmbeeinflussten Gebieten hat sich die Besiedlung im Frühmittelalter in der Ablagerung von Bodensedimenten abgebildet. Es wurden frühholozäne Umlagerungsprozesse am Hang identifiziert. Aufgrund der guten Datierungseigenschaften der sandigen periglazialen Lagen wäre das Untersuchungsgebiet geeignet, der Frage nach der Parallelisierung der frühholozänen Umlagerungen von Hangsedimenten mit Klimaschwankungen nachzugehen.

Die vorliegende Arbeit liefert mit den erstellten Sedimentbilanzen und der Darlegung der Landnutzungsverhältnisse ein regionales Beispiel für Mittelgebirgsräume im Rhein-Einzugsgebiet. Die mikro- bis mesoskaligen Ergebnisse folgen der generellen Tendenz anderer weltweiter Studien, wonach die Sedimentaustragsverhältnisse mit steigender Einzugsgebietsgröße abnehmen. Die Werte der Sedimentbilanz II liegen jedoch deutlich unter denen der Lössgebiete und belegen, dass sich die Zwischenspeicherung in der Mittelgebirgsregion höher ist. Die räumliche Differenzierung zeigt regionale Unterschiede, die auf der Zugänglichkeit, der administrativen Zugehörigkeit und die naturräumliche Ausstattung zurückzuführen sind. Arbeiten in anderen Sandsteinregionen Deutschlands sind derzeit im Gange und werden in Zukunft eine Einschätzung der vorliegenden Untersuchung zulassen.

Abstract

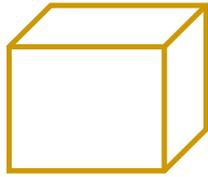
Today sediment budgets are the state of the art method within geosciences to quantify sediment flux. This method allows differentiating the catchment erosion and sedimentation dynamics in time and space. The goal of this project was to create Holocene sediment budgets for the meso-scale mountain catchment of the Speyerbach (Palatinate Forest) in south-western Germany, with special emphasis on high resolution in time and space. The analysis is based on commonly available official soil and relief data, historical land-use information, as well as on a field survey on the characteristics of erosion and sedimentation, and the radiocarbon and OSL-dating of two selected soil profiles. For the estimation of the Holocene erosion a hypothetical soilscape model of the initial Holocene depths of the upper periglacial cover bed was used. Therefore erosion was derived by the difference between this hypothetical depth and the actual mapped depths. Accumulated Holocene sediments were mapped directly.

A first sediment budget was calculated based on available official soil maps and a soil profile database (Sedimentbilanz I). The budget resulted in $\sim 27 \cdot 10^6$ m³ erosion and a catchment sediment delivery rate (CSDR) of 31.5 %. The sensitivity analyses showed a high dependency of the chosen soilscape model. This budget is an integrating Holocene meso-scale one, which could not be differentiated in time or space due to a lack of data.

A second budget was calculated using the field survey data for erosion and sedimentation maps (Sedimentbilanz II). Because of the own mapping, data are available for two first-order valleys, two fourth-order catchments as well as for the whole Speyerbach catchment. The calculated budget terms are higher than the one of the first budget (Erosion $\sim 109 \cdot 10^6$ m³, CSDR: 5%) and are very sensitive to a variation of the truncation depths.

OSL and ¹⁴C-dating of sediments and charcoal pieces underpin the reconstruction of the historical land done by historical maps and publications from historical geography and environmental history. Locally colluviation started within the first settlement period within the early mediaeval times. But not until the Modern period did the expansion of agricultural areas and intensification of agriculture and forest management result in regional erosion and sedimentation features. OSL-Dating identified two phases of early Holocene displacements of slope deposits, which should be analysed in detail, because of the suitable dating properties of the sandy material of the region.

This work presents an example of a mountain region within the river Rhine catchment, for which only a low intensity of human interference is documented. The sediment delivery ratio of the estimated sediment budgets are in agreement with the general trend of a decreasing ratio with an increasing catchment size as were shown for several catchments worldwide. Nevertheless, the values are lower than the ones from loess-covered parts of the Rhine catchment. The nested approach shows regional variation, which are based on the accessibility, administrative regimes and the natural settings. Other studies within mountain regions of the Rhine catchments are being carried out at the moment, but have not yet been published, so that it will soon be possible to judge the results of the Speyerbach case study.



1. Einführung in den wissenschaftlichen Hintergrund und die Forschungsfragen

Das Einzugsgebietsmanagement mitteleuropäischer Fließgewässer spielt nicht nur für die Vorhersage von Hochwässern und die Schadensvermeidung bei solchen eine große Rolle, sondern, aufgrund des hohen Ausbaugrads, auch für das Management von Staustufen, Talsperren und die Schiffbarkeit der Flüsse. In diesem Kontext kommen meist physikalisch-basierte Modelle zur möglichst prozessgetreuen Simulation und Vorhersage von Hochwässern verschiedener Stärken und sich in Talsperren oder auf Überflutungsflächen akkumulierenden Sedimenten zum Einsatz. Ein immer noch ungelöstes Problem stellt dabei die Modellierung der Sedimentfrachten dar. Defizite in der physikalisch basierten Modellierung von Sedimentfrachten für Flusseinzugsgebiete spiegeln nach NEARING (1998) und YU (2003) mangelndes Systemverständnis der Teilprozesse von Bodenerosion durch Wasser wider, insbesondere was den Einfluss des Menschen betrifft. Dieses schon 1983 von Walling postulierte „*sediment delivery problem*“ stellt nach CROKE ET AL. (2005) noch immer eine aktuelle Herausforderung der geomorphologischen Forschung dar. Während in den letzten Jahrzehnten der Fokus auf der Untersuchung von Ablösemechanismen wie der Erosivität von Niederschlägen (VENTURA 2004), physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften (BOARDMANN 2002; RIENKS 2000) und bodenkonservierenden Bearbeitungsformen (BARTON 2004) lag, richtet sich die Aufmerksamkeit aktueller Forschungsarbeiten nunmehr auf den Einfluss z. B.

- der sich wandelnden Landnutzung (ASSELMAN ET AL. 2003; JORDAN ET AL. 2005; KLIMEK & LATOCHA 2007; LATOCHA 2009; MITASOVA ET AL. 2001; O'NEAL ET AL. 2005; SCHMITT ET AL. 2003),
- der Transportmechanismen (BOARDMAN & FAVIS-MORTLOCK 1999; CROKE ET AL. 1999; RUSTOMJI & PROSSER 2001; VALENTIN ET AL. 2005; VAN OOST ET AL. 2003; VAN OOST ET AL. 2005),
- der Konnektivität (FRYIRS & BRIERLEY 1999; FRYIRS ET AL. 2007; HARVEY 2001).

Eine Möglichkeit diese Systemkomponenten zu analysieren, bietet die Methode der Sedimentbilanzierung, die sich als Methode zur Quantifizierung von Sedimentflüssen in verschiedensten Raum-Zeit-Skalen in den Geowissenschaften etabliert hat (z. B. DE MOOR & VERSTRAETEN 2008; HOUBEN in Vorber.; NOTEBAERT ET AL. 2009; PASSMORE & MACKLIN 2001; ROMMENS ET AL. 2005; TRIMBLE 1999; WALLBRINK ET AL. 2002 und WALLBRINK 2004). Sie eröffnet bei entsprechender Datenlage die Möglichkeit, die Systemantworten von Einzugsgebieten für die Erosions- und Sedimentation über verschiedene Zeitabschnitte zu betrachten und damit den Istzustand eines Systems vor dem Hintergrund seiner landschaftsgeneetischen Entwicklung zu bewerten. Betrachtet man die Beispiele, die SLAYMAKER (2003) als Meilensteine in der Sedimentbilanzierung aufführt, so fällt auf, dass unterschiedliche Konzepte der Bilanzierung verwendet wurden. Während sich ASHMORE (1993), CHURCH & SLAYMAKER (1989) und OWENS ET AL. (1997) auf die Suspensionsfracht von Flüssen und Seen stützten, kartierten JÄCKLI (1957) und RAPP (1960) Erosions- und Sedimentationsflächen direkt im Feld während ROBERTS & CHURCH (1986) dasselbe aus Satellitenbildern extrahierten. OWENS & SLAYMAKER (1992) werten Seesedimente für die Bilanzierung aus. JORDAN & SLAYMAKER (1991) griffen auf eine Kombination verschiedener Ermittlungsmethoden für die Sedimentation zurück. Dabei kommt der als Grundlagenforschung anzusehenden Sedimentbilanzierung auch Bedeutung für die angewandte Umweltforschung zu z. B. bei der Dimensionierung und Pflege von Staubecken und Talsperren sowie einem integrierten Flussgebietsmanagement im Kontext des Klimawandels, wie zusammenfassend SLAYMAKER (2003) und z. B. die Arbeiten von WALLING ET AL. (2000) oder ROTH & VISSER (2003) zeigen.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Sedimentbilanzierung vorgestellt, die basierend auf einer Annahme zur initialen Mächtigkeit der periglazialen Hauptlage vor den ersten Eingriffen des Menschen in die Landschaft, den aktuellen Mächtigkeiten der periglazialen Hauptlage und den Mächtigkeiten kartierter Kolluvien die historische Bodenerosion quantifiziert. Es werden im Folgenden Bilanzen auf der Basis zweier verschiedener Datensätze erstellt. Zum einen werden Daten aus der bodenkundlichen Landesaufnahme verwendet. Zum anderen wurde eine eigene Kartierung der Kappung von Böden und Sedimentation von erodiertem Bodenmaterial (Kolluvien) durchgeführt, um einen unabhängigen Datensatz als Vergleichsbasis zu haben. Für die Abschätzung des Erosionspotentials dieser Mittelgebirgslandschaft wurde eine ABAG¹-Modellierung vorgenommen. Die OSL²- und Radiokarbon(¹⁴C)-Datierung von

¹ ABAG – Allgemeine Bodenabtragsgleichung nach SCHWERTMANN et al. (1987)

Sedimenten und Holzkohlen an zwei exemplarischen Bodenprofilen führt zu einer zeitlichen Differenzierung der Kolluvien und einer räumlichen Differenzierung der Intensität der Landschaftseingriffe. Die Ergebnisse der Berechnungen und der Datierungen werden in den Kontext der Landnutzungs- und Klimageschichte gestellt, die mittels historischer Karten, Pollenanalysen und Holzkohlespektren sowie umwelt- und klimahistorischen Analysen und forstgeschichtlichen Auswertungen für den Speyerbach und die Region des Mittleren Pfälzerwaldes rekonstruiert wird. Die in dieser Fallstudie erarbeiteten Ergebnisse werden im Rahmen der Sedimentbilanzen, die für das Rhein-Einzugsgebiet oder dessen Teilregionen erarbeitet wurden, diskutiert. Dabei liegt der Fokus auf dem Vergleich von Mittelgebirgsstandorten.

1.1 Stand der Forschung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Quantifizierung der Bodenerosion durch Wasser. Auf Winderosion wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da heute im Untersuchungsgebiet nur 1 % der Fläche landwirtschaftlich genutzt wird. Bei der Bodenerosion durch Wasser wird davon ausgegangen, dass Bodenpartikel vom Wasser an der Geländeoberfläche aus einem Aggregat gelöst, im Wasser transportiert und gegebenenfalls zwischengelagert werden bzw. die Untersuchungsfläche als Sedimentfracht des Abflusses verlassen. Die Analyse aller dabei stattfindenden Teilprozesse und der daran beteiligten Faktoren ist Forschungsgegenstand systemanalytischer und prozessorientierter Messungen im Labor, auf experimentellen Plots oder auf der Feldskala in der Bodenkunde, (Forst-)Hydrologie und Geomorphologie von den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts bis heute. Eine Ergänzung dieser Herangehensweise bietet die landschaftsgenetische Rekonstruktion der Landnutzungsverhältnisse und Genese der Oberflächenformen anhand historischer Dokumente, Datierungen (^{14}C , OSL, Beryllium, etc.) und Proxydaten (Pollen, Holzkohlespektren, Hochwassermarken, Dendrochronologie etc.). Mit der Sedimentbilanzierung kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu: Die Stoffflüsse werden nun einzugsgebietsbezogen und je nach Datenlage möglichst differenziert über das Holozän dargestellt und geben damit einen Einblick in die räumliche und zeitliche Dynamik der Stoffflüsse im Einzugsgebiet. Im Folgenden wird ein Überblick über den Stand der Forschung in diesen drei Forschungsgebieten gegeben. Dabei stehen die Forschungsarbeiten im Pfälzerwald, im Rhein-Einzugsgebiet und anderen deutschen Mittelgebirgen im Vordergrund.

² OSL – Optisch stimulierte Lumineszenz

1.1.1 Prozessorientierte Bodenerosionsforschung

Grundlage der Betrachtung von Langzeit-Sedimentdynamiken ist das prozessbasierte Verständnis der Bodenerosion durch Wasser und der sie steuernden Faktoren. GROTE (2008: 11) verweist darauf, dass Bodenerosion durch Wasser auf der Prozessebene als ein Phänomen der Landwirtschaft aufgefasst wird. Hierbei spielen der Verlust von Nährstoffen und deren Eintrag in Gewässer mit den daraus folgenden gewässerökologischen Problemen eine Rolle. Die prozessorientierte Bodenerosionsforschung im Feld wurde daher traditionell in Lössgebieten betrieben. Die Tatsache, dass diese Lössgebiete schon früh besiedelt waren und intensiv archäologisch untersucht wurden, hat schon bald den Fokus von der experimentellen Bodenerosionsforschung auf die historische Dimension dieser Prozesse gelenkt (z. B. BORK 1983; CLEMENS & STAHR 1994; KADEREIT & KÜHN 2009; LANG & HÖNSCHIEDT 1999; LANG 2003).

Wenngleich es Studien zur Oberflächengenese des Pfälzerwaldes (LIEDTKE 1968; PLEWE 1938), der Vorderpfalz (STÄBLEIN 1968; PLEWE 1938) und des Oberrheingrabens (HAGEDORN 2004) gibt und BRAUKÄMPER (1990), LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (2005) und LOTHHAMMER (1996) die Bodengeographie und Eigenschaften der Böden behandeln, liegen keine expliziten prozessorientierten Untersuchungen zur Bodenerosion im Pfälzerwald vor. Bei den Ausführungen des LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (2001) sind am Beispiel des Saarlandes die gängigen prozessbasierten Argumentationen zum Vorkommen von Bodenerosion durch Wasser zu finden:

1. Bodenerosion findet nur auf landwirtschaftlich genutzten Flächen statt (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001: 15): „... eine Dezimierung der Hauptlage korrespondiert überwiegend mit Bereichen starker Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Standorten und ist damit eng mit der Bodennutzung verknüpft.“
2. Unter Wald wird die Abnahme der Hauptlagenmächtigkeit als Relikt periglazialer Abtragungsprozesse angesehen (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001: 18): „Die Mächtigkeit des jungtundrenzeitlichen Decksediments dünnt in den vorwiegend forstwirtschaftliche genutzten Arealen [des Buntsandsteins und der Kreuznach-Formation des Oberrotliegenden] nur in exponierten Kuppen und Rücken oder herauspräparierten Einzelformen aus.“
3. Komplementär dazu liest sich die Verbreitung von korrelaten Sedimenten, welche auf Ackerflächen zu finden sind (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001: 39): „Mächtige kolluviale Bildungen kommen bevorzugt in ackerbaulich genutzten Gebieten mit

erosionsanfälligen Substraten vor und sind ein Indikator für anthropogen verstärkte Bodenerosion. Die selektive Abtragung wird insbesondere bei Substraten mit einem hohen Schluff- und Feinsandanteil wirksam.“

Darüber hinaus wird beschrieben, dass Kolluvien in Buntsandsteingebieten weit verbreitet sind: „Eine besondere Flächenrelevanz erlangen sie [die Kolluvien] im Bereich des Buntsandsteins und Rotliegenden, wo vorrangig sandige Kolluvien vorliegen, sowie in Gäulandschaften mit ihrer langen agrarischen Nutzungstradition, wo schluffreiche Kolluvien dominieren.“ (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001: 39).

Die Feststellung, dass unter Wald keine Erosion auftritt, nährt sich aus aktualistischen, prozessorientierten hydrologischen Studien, die gezeigt haben, dass aufgrund der hohen Interzeptions- und Infiltrationskapazität der Baum- und Humusschicht, der Intensitätsminderung beim Durchtropfen der Laubschicht, der durch Beschattung verzögerten Schneeschmelze, der stark ausgeprägten Mikrotopographie sowie dem hohen Anteil an Makroporen Niederschlagsereignisse gewöhnlich nicht zu Oberflächenabflussbildung führen (BOTT 2002: 62f; GROTE 2008: 11; SCHWARZ 1974: 65ff). Nach Auswertung von Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes wurde erst bei hundertjährigen Starkniederschlagsereignissen Oberflächenabflussbildung unter Wald beobachtet (SCHWARZ 1985) – sie ist damit aber möglich. Unabhängig von solchen Extremereignissen sind Forststraßen und Erschließungswege aus der generellen Erosionsfreiheit unter Wald auszunehmen, wie GROTE (2008) und BOTT (2002: 65ff) gezeigt haben.

Oberflächenabfluss kann bei hohen Niederschlagsintensitäten durch das Übersteigen der Infiltrationskapazität (Horten'scher Oberflächenabfluss), durch einen Sättigungsüberschuss (Sättigungsabfluss) oder durch eine sehr starke Hydrophobizität infolge starker Austrocknung (*water repellency*) entstehen (BOTT 2002: 10). Die Bildung von Oberflächenabfluss ist dabei von vielen Parametern abhängig, die ihrerseits miteinander verknüpft sind. So werden die Bodeneigenschaften, vor allem die Porosität und damit die Infiltrationskapazität, von der Durchwurzelung beeinflusst, die je nach Bestockung variiert. Die Humusmenge und –zusammensetzung spielt neben der Korngröße eine wichtige Rolle bei der Ausprägung der Hydrophobizität der Oberböden. Im Folgenden werden die wichtigsten Parameter aufgeführt:

a) Bodeneigenschaften

Eine substratbedingte Stauung durch geringe Wasserdurchlässigkeiten des Untergrunds scheidet bei den schwach schluffigen Braunerden- und Podsol-Deckschichtenprofilen des Buntsandsteins als Faktor für die Oberflächenabflussbildung aus (BOTT 2002: 48, SCHWARZ 1974: 57f). Kahlschläge würden jedoch zu einer Überstauung durch Erhöhung des Wassergehaltes des Bodens führen (BURSCHEL & HUSS 2003: 112).

SCHWARZ (1974: 101-104) gibt minimale Infiltrationskapazitäten von 89 bis 280 cm d⁻¹ für unterschiedlich stark podsolierte Braunerden aus Hauptlage über verschiedenen Geologien für das Bieber-Einzugsgebiet (Buntsandstein-Spessart) an. Die Werte wurden zwischen April und Juni 1972 in schwach lehmigen Sanden mit einem Doppelring-Infiltrometer gemessen. BOTT (2002: 30) hat für Waldböden im lehmigen Sanden des Mittleren Buntsandsteins am Mühlberg bei Merzalben, Pfälzerwald, im Jahr 2000 mit dem Doppelring-Infiltrometer Werte von 163 cm d⁻¹ ermittelt. Dabei versickerte auf ungestörten Böden unter Wald jede Beregnungsmenge (max. Intensität 75 mm h⁻¹) ohne Zwischenabflussbildung. BOTT (2002) konnte anhand einer Regensimulationen auf einem 35° geneigten Steilhang am Floßbach südwestlich von Johanniskreuz (bei Leimen im Pfälzerwald) eine Differenzierung der Infiltrationswerte für unterschiedliche Arten von Forstwegen vornehmen. Daraus wird eine hundertprozentige Abflusswirksamkeit für Fahrwege und eine fünfzigprozentige Abflusswirksamkeit für Rückegassen abgeleitet. Auf befestigten Wegen lagen die Abflussanteile bei 80 bis 100 % (Asphalt und Schotter), Erdwege führten den Niederschlag zur Hälfte als Oberflächenabfluss ab, in Rückegassen nahm der Abfluss 0 bis 30 % der Niederschlagsmenge ein (BOTT 2002: 30ff).

b) Infrastruktur

Die Zusammenstellung der Forschungsergebnisse aus amerikanischen Gebirgsregionen von EISENBIES ET AL. (2007: 84) zeigt, dass Forststraßen die effektive Entwässerungsdichte eines Einzugsgebietes um 40 bis 100 % erhöhen können. Bei kleinen und mittleren Niederschlagsereignissen wirken sich Forststraßen mit einer Erhöhung des Abflussvolumens und der Häufigkeit sowie der Magnituden von Überschwemmungen deutlicher in mikroskaligen Einzugsgebieten als in großen Einzugsgebieten aus (auch CROKE ET AL. 2005). Damit tragen vor allem im steilen Relief die ausgesprochen kleinflächigen Merkmale des Einzugsgebiets

einen unproportional hohen Anteil zum Oberflächenabfluss bei, was durch *gully*³-Bildung und *piping* verstärkt werden kann (SIDLE ET AL. 2006: 214f).

Wie aus den forsthydrologischen Arbeiten abzuleiten ist, kann das Forstwegenetz aufgrund der Bodenverdichtung und Absenkung der Infiltrationskapazität sowie der Abflusskonzentration zur linienhaften Erosion unter Wald führen. Nach anfänglicher Loslösung der Bodenpartikel bestimmen neben dem Gefälle wiederum linienhafte Strukturen die Konzentration und Fließrichtung des Oberflächenabflusses. Ein Wechsel der Vegetation, konkave Hangbereiche sowie Linienelemente quer zur Strömung können der temporären oder finalen Zwischenspeicherung des erodierten Sediments dienen und dabei je nach Charakter des Niederschlagsereignisses zwischen 7 und 20 % des Abtrags auffangen (VOGES 1999: 56, 78). Die Zwischenspeicherung ist neben der Abflussintensität, der Infiltrationskapazität und dem Speicherzustand von der Anbindung der Transportpfade an die Fließgewässer abhängig. Dies ist ein räumlich und zeitlich variables Phänomen, das in der Intensität je nach Ereignis variiert. VOGES (1999: 126) hat in seinen prozessbasierten Untersuchungen im Leinebergland die Faktoren Entfernung vom Gewässer, Abflussspende und Abtragsmenge als wichtige Steuerung der Gewässeranbindung identifiziert, wohingegen die Hangform und -neigung von geringerer Bedeutung waren. Des Weiteren zeichnet sich die Bodenbedeckung als ein Parameter aus, der sich umgekehrt proportional zur Anbindung an die Fließgewässer verhält (VOGES 1999: 184). Die Vegetationsbedeckung spielt also nicht nur als wichtigster Faktor für die Erosion eine Rolle, sondern greift auch steuernd beim Transport und der Sedimentation ein.

c) Vegetation

Die Vegetation nimmt auf die Oberflächenabflussbildung in vielfältigem Maße Einfluss. Unterschiede innerhalb des Waldes (Interzeptionsleistung von Nadel- und Laubwäldern) bestehen vor allem beim Landregen; bei Starkregenereignissen spielen sie hingegen keine Rolle. CASPER (2002) hat einen über zwei Jahre gemittelten wöchentlichen Interzeptionsverlust von 28 % des Niederschlags für einen Fichtenbestand auf Buntsandstein bestimmt. Das Wasserrückhaltevermögen jedes Bestands, auch mit niedrigem Bedeckungsgrad, ist höher als das einer Kahlfläche. Das Holzentnahmeverfahren hat durch die Stärke des Eingriffs einen Einfluss auf den Überschirmungsgrad, d. h. die Bedeckung des Bodens durch das

³ *gully*: Eine durch konzentrierten Oberflächenabfluss mit Tiefenerosion entstandene Grabenstruktur, zu dessen Entwicklung rückschreitende Erosion des Stirnbereiches, gravitative Massenbewegung an den übersteilten Wänden und teilweise Aufsedimentierung des erst geschaffenen Bettes gehören (SIDORCHUK et al. 2003: 26).

Kronendach. Dies wirkt sich hauptsächlich auf den Anteil an freifallendem Niederschlag aus, der bei großflächigen Fehel- und Schirmhieben bis auf die Menge des Freilandniederschlags anwachsen kann. Die Verbesserung des Bodenwasserhaushalts an diesen Freiflächen beschleunigt die Naturverjüngung, so dass die Bestandslücke schnell wieder mit Bodenvegetation bewachsen wird (BURSCHEL & HUSS 2003: 132f).

Kulturwechsel und Umwidmung in Ackerland sind von besonderem Interesse für flächenhafte Erosion, weil der Abbau bzw. Austrag von organischem Kohlenstoff im Oberboden (OWENS ET AL. 1999; STEVENS & WESEMAEL 2008; USSIRI & JOHNSON 2007) nach SIEGRIST (2004) zum Anstieg der Erodibilität des Oberbodens führt. CUNNINGHAM ET AL. (1999) haben in einem devonischen Sandsteingebiet in Irland starke Podsolisierungs- und Hydromorphierungsprozesse auf einer seit 1600 ± 50 n. Chr. entwaldeten Fläche nachgewiesen. Durch die Umwidmung sind durchlässige Böden von einer Abnahme der Interzeption, der biologischen Aktivität und der Basensättigung betroffen, die zur Anreicherung in der organischen Auflage und der Podsolisierung bis hin zur Bildung von Ortstein führt. Eine organische Auflage von mehr als 4 cm Mächtigkeit hat laut der Studie von HEGG ET AL. (2004: 18) zur Entstehung von hydrophobiebedingtem Oberflächenabfluss von bis zu 20 % der Berechnungsmenge (60 l m^{-2}) geführt. Dabei ist der Hydrophobie-Effekt bei Nadelstreu (bzw. Rohhumus) am größten. Unterstützt wird der Hydrophobie-Effekt von den bodennahen Temperaturen, die auf Kahlflächen an Strahlungstagen auf bis zu 70°C steigen können (BURSCHEL & HUSS 2003: 110).

d) Gebietscharakteristika

Die Gestalt der Einzugsgebiete kann vor allem bei nahezu runden Einzugsgebieten mit Tributären, die ungefähr an gleicher Stelle in die Vorflut münden, zur Aufsummierung der Abflüsse und damit zur Hochwasserbildung im Vorfluter führen. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn der Niederschlag gleichmäßig über das ganze Einzugsgebiet verteilt ist (SCHWARZ 1974: 48f). Extreme Niederschlagsereignisse infolge konvektiver Zellen sind meist räumlich eng begrenzt und können in kleinen Gebieten damit kurzfristig hohe Abflussspenden hervorrufen (SCHWARZ 1974: 46). Auch NIEHOFF (2001) und CYFFKA (1991) kommen zu der Aussage, dass mit der Größe des Einzugsgebiets die Bedeutung konvektiver Niederschläge abnimmt, was sich auch in der Abflussganglinie der Flüsse widerspiegelt. BOTT (2002: 40) spricht von einem generellen Muster pfälzischer Bäche: Da sie grundwassergesteuert sind, führen sie ganzjährig und verstärkt im Winter Wasser, das Entwässerungsnetz ist stabil, die

Dämpfung der Abflussspitzen bei hohem Niederschlagsereignissen ist deutlich, so dass nur ein kleines Nebenmaximum im Abflussgang im Sommer auftritt.

Eine Abhängigkeit der Hochwasserbildung von der Hangneigung konnte bisher nicht klar ermittelt werden (u. a. SCHWARZ 1974: 62; BOTT 2002: 49f). PROSSER & ABERNETHY (1999) sehen aber einen Zusammenhang zwischen der beitragenden Fläche und der Hangneigung in Abhängigkeit vom Forstwegenetz. Je größer die beitragende Fläche und die Neigung ist, desto größer die erosive Wirkung bei einem Niederschlagsereignis.

CASPER (2002) führte für den Dürreychbach im Nordschwarzwald eine Raumgliederung nach Abflussdynamik durch, die in einer fünfstufigen Gliederung mündete. Danach ist bei trockenen Vorbedingungen bei kleinen Niederschlagsereignissen (hohe Frequenzen, geringe Magnituden) nur die Bachauflüsse abflussaktiv, auf allen anderen Flächen im Einzugsgebiet infiltriert der Niederschlag vollständig. In gradueller Abstufung der Häufigkeit springen danach als Erstes geringmächtigere Sättigungsflächen auf Hochlagen und bei länger anhaltenden Niederschlägen auch einige Hänge mit *Interflow*⁴-Bildung in oberflächennahen Schichten (z. B. durch Ortsteinbildung oder Bt-Horizonte) an. Mit einer jährlichen Auftretswahrscheinlichkeit kommt es zur Bildung von schnellem bis sehr schnellem *Interflow* auf allen vorfluternahen Hängen und der Anbindung von Sättigungsflächen an den Vorfluter durch hohen Grundwasserstand. Erst bei nassen Vorbedingungen und zusätzlichen lang anhaltenden Niederschlägen entstehen Abflussereignisse mit Jährlichkeiten über 100 Jahren, zu denen dann der Großteil der Fläche abflusswirksam beiträgt. Dies kann zu *pipe flow*, Abtrag durch Oberflächenabfluss, linearer Erosion bis hin zu Hangrutschungen, Überschwemmungen und Laufverlegungen des Bachs führen (CASPER 2002: 98-107). Auch BADOUX ET AL. (2006) und HEGG ET AL. (2004) haben mit Beregnungsversuchen von der Bodenprofilebene bis zur Subeinzugsgebietsskala auf zwei bewaldeten Standorten im Emmental (Schweizer Mittelland) zeigen können, dass die Gewässerdichte, gewässernahe Standorte mit hoher Vorfeuchte sowie Gebiete mit flachgründigen Böden größeren Einfluss auf die Bildung bzw. Bildungsdauer der Abflussspitze während Starkregenereignissen hatten, als der Schaden in der Bedeckung durch den Sturm Lothar. Bei lang anhaltenden, weniger intensiven Niederschlägen war dagegen die Verteilung der feuchten Standorte ausschlaggebend.

⁴ *interflow*: Abflussbildung in der ungesättigten Bodenzone auf einer geneigten, stauenden Schicht, z. B. der Basislage

e) **Zusammenfassung**

Auch im Dürreychbach-Einzugsgebiet, das sich nach CASPER (2002) anhand der weiten Verbreitung von Podsolen von der Untersuchung durch BOTT (2002) unterscheidet, sind die Infiltrationskapazitäten der Hänge so hoch, dass ohne nasse Vorbedingungen oder Extremereignisse kein Oberflächenabfluss auf diesen Hängen entsteht. Die prozessorientierten bodenhydrologischen Untersuchungen im Pfälzerwald und anderen Buntsandsteingebieten deutscher Mittelgebirge unterstützen somit die These, dass sich im Pfälzerwald unter Waldbedeckung selten Oberflächenabfluss bildet und damit wenig Bodenerosion stattfinden sollte. Allerdings wird in den genannten Arbeiten darauf hingewiesen, dass diese Theorie nicht für Forstwege gültig ist und mit intensiver werdender Bewirtschaftung der Forstflächen nur noch bedingt zutrifft.

Eine Möglichkeit, das Erosionspotential dieses Mittelgebirgsgebietes auf der reinen Prozessebene grob abzuschätzen, bietet die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) nach SCHWERTMANN ET AL. (1987). Ungeachtet der methodischen Schwierigkeiten dieses Modells bietet sich damit die Gelegenheit einer groben Abschätzung, wie viel Boden im langfristigen Mittel unter den in verschiedenen Szenarien vorgegebenen naturräumlichen Gegebenheiten eines Untersuchungsgebiets durch Wasser erodiert werden würde.

1.1.2 Landschaftsgenetische Bodenerosionsforschung

Aufbauend auf dem Prozessverständnis der Bodenerosion durch Wasser ist es für eine Langzeit-Sedimentbilanz unerlässlich, die historische Entwicklung der Oberflächenformen in Mittelgebirgen zu verstehen. HOUBEN (2008) hat am Beispiel des Rockenberg-Untersuchungsgebiets in der lössbedeckten Wetterau mit seinen spezifischen Umständen (trockene Verhältnisse und sehr kleine Feldgrößen) zeigen können, dass die Sedimentverbreitung in der heutigen Lösslandschaft in stärkerem Maße von der 7500 Jahre alten Besiedlungs- und Bewirtschaftungsgeschichte beeinflusst worden ist, als von den Relieffaktoren. Daher werden im Folgenden Ergebnisse der Erforschung historischer Bodenerosion vorgestellt, wobei der Fokus auf den vorhandenen Studien zur historischen Bodenerosion durch Wasser liegt, die in deutschen Mittelgebirgen durchgeführt worden sind.

Für eine Quantifizierung der Bodenerosion wird in den deutschen Mittelgebirgen auf die Kappung der periglazialen Lagen Bezug genommen. Dabei gehen alle Autoren implizit von mindestens zweischichtigen Profilen aus: Ist nur noch die Basislage vorhanden, ist die Haupt-

lage erodiert worden (RAAB & VÖLKELE 2005) bzw. nimmt man an, dass dort, wo die Hauptlage nicht die gebietstypische konstante Mächtigkeit aufweist, Erosion stattgefunden hat (FRÖHLICH & OPP 2005). Die Definition der korrelativen Sedimente ist schwierig, denn nicht immer sind die Unterscheidungsmerkmale zwingend. FRÖHLICH & OPP (2005) weisen auf die Schwierigkeiten der Unterscheidung zwischen Hauptlage und Kolluvien hin, vor allem wenn es sich um Kolluvien aus mittelalterlicher Zeit handelt. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn nicht nur humoses Material von Ah- oder Ap-Horizonten, sondern auch Material von Bv-Horizonten umgelagert wird. Das Vorhandensein von Holzkohle ist kein hinreichendes Kriterium wenn deren Alter unbekannt ist, da sie auch bei frühholozänen Waldbränden entstanden sein kann. Sind Oberflächenformen wie Holzkohlemeiler, Runsen, Wölbäcker, Lesesteinhaufen, alte Handelswege o. ä. im Umfeld erkannt worden, so werden holzkohlereiche, skelettarme Sedimente als Kolluvien eingestuft. Ist dies nicht der Fall, geht man von Hauptlagen aus. Die zeitliche Differenzierung von Erosionsphasen stützt sich dabei auf Radiokohlenstoffdatierungen, archäologische Befunde und OSL-Datierungen. Wie die Studien aus deutschen Mittelgebirgen im Folgenden zeigen, wird die Gewichtung der Kriterien auch anhand weiterer Proxy-Daten getroffen, die Aussagen zur Landnutzung zulassen.

Für den Pfälzerwald liegt durch LIEDTKE (1968) eine geomorphologische Untersuchung zur Genese des Reliefs vor. STÄBLEIN (1968) untersuchte die Vorderpfalz und HAGEDORN (2004) rekonstruierte die Entwicklung und den Sedimentaufbau des Oberrheingrabens. Ausführungen zur Bodenerosionsformen und -prozessen fehlen in diesen drei Werken.

BORK (1988) hat sich neben seinem Hauptuntersuchungsgebiet, der Rhume in Südniedersachsen, der Untersuchung zweier Nebentäler im Pfälzerwald gewidmet. Er datiert deren Entstehungszeit aufgrund von Keramikfunden in der kolluvialen Verfüllung auf die Frühe Neuzeit. In der Gesamtbetrachtung für das Rhume-Gebiet haben die Erosionsereignisse im 18. Jahrhundert nur 15 % Anteil an der Gesamterosion (seit dem 10. Jahrhundert), die des 14. Jahrhunderts dagegen rund 50 %. Dabei geht BORK (1988) von kleinräumiger aber flächenhafter und kontinuierlicher Erosion vom Neolithikum bis zur römischen Eisenzeit aus. Darauf folgt eine erosionsarme Zeit bis zum 14. Jahrhundert, welches mit dem Extremereignis von 1342 n. Chr. die stärkste Erosion gebracht hat.

HARD (1970) berichtet über verfüllte Gräben und Schluchten unter Waldbedeckung in Lothringen, der Westpfalz und im Saarland. Er kartierte im Verbreitungsgebiet des Unteren Muschelkalks im Zweibrückener Westrich inaktive Gräben, die z. T. verfüllt waren und auch durch rezente Erosionsprozesse nicht wieder aktiviert wurden. Aufgrund von archivalischen Quellen ist belegbar, dass diese linienhaften Erosionsformen während einer historischen

Beackerung der Flächen zwischen 1760 und 1850 entstanden sind. Später entstandene Grabensysteme auf Ackerland sind laut HARD (1970) aufgrund der Technisierung nicht mehr sichtbar, da sie wieder zugezogen worden sind. Der Zeitraum von 1750 bis 1850 wird als Agrarrevolution bezeichnet, da sich die Landwirtschaft intensiviert und auf zeltengebundene Dreifelderwirtschaft (mit Schwarzbrache) umgestellt wurde. In diese Zeit fällt die Landvermessung und -neuordnung, die Zunahme der niedrig bemittelten Bauernschaft sowie die erhöhte Niederschlagshäufigkeit zum Ende der Kleinen Eiszeit (HARD 1970: 298ff).

Eine dezidierte Untersuchung zur Ursachen der Entstehung von Runsen⁵ im östlichen Taunus hat BAUER (1993) vorgelegt. Die Kartierung, Klassifizierung und Beschreibung der Geländebefunde wird durch eine Analyse des historischen Archivmaterials und die Datierung von Holzkohlen ergänzt, um das Alter der Runsensysteme zu bestimmen. Als Phasen erhöhter morphodynamischer Aktivität mit Runsenbildung sind für den östlichen Taunus der hochmittelalterliche Landesausbau und die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts belegbar. Dabei soll die zweite Phase vor allem zu einer Reaktivierung der schon bestehenden Runsensysteme geführt haben. Obwohl BAUER (1993) auch Profilverkürzungen und Sedimentmächtigkeiten in den Akkumulationszonen kartiert hat, ist keine Bilanzierung des Erosionsausmaßes vorgenommen worden.

Die Entstehung von Gräben im Aar-Einzugsgebiet des westlichen Hintertaunus war Gegenstand der Untersuchungen von STOLZ (2005). Das Gebiet wird von devonischen Tonschiefern dominiert und ist heute etwa mit 50 % Wald bedeckt. Die Zertalung der Hänge konzentriert sich auf den unteren Mittellauf und den Unterlauf der Aar. Der Oberlauf ist praktisch runsenfrei. Die Gräben treten verstärkt auf nordost- und ost-exponierten Hängen auf. Die Datierung von acht Runsensystemen zeigt, dass alle Runsen seit der Agrarrevolution (ab 1750) aktiv waren, auch die fünf, deren Entstehungszeit schon im Hochmittelalter lag (STOLZ 2005: 209). Grundlage der zeitlichen Bestimmungen sind Radiokarbondatierungen von Holzkohlen, Holzkohlestratigraphien und archivalische Quellen. Damit sind die angegebenen Alter lediglich Maximalangaben. Obwohl STOLZ (2005) archivalische Belege für ein Hochwasser 1342 n. Chr. im Aar-Einzugsgebiet gefunden hat, sieht er darin keine Ursache für die Entstehung von Runsen (STOLZ 2005: 236). Auffällig ist dagegen die Häufung der Runsendichte in der Umgebung der Michelberger Hütte und deren Eisengruben bei Aarbergen, die einen hohen Holzkohlverbrauch zwischen 1750 und 1860 hatte (STOLZ 2005: 245ff). Mitte

⁵ Runsen: Auch als Kerben, Schluchten oder Tilken bezeichnete Hohl- und Kleinformen, die durch lineare Bodenerosion mithilfe von Wasser entstanden, durch ihren tiefen, meist v-förmigen Einschnitt in das liegende Substrat gekennzeichnet und bis heute unter Wald erhalten sind (BAUER 1993: 13ff).

des 19. Jahrhunderts kam es auch in diesem Gebiet zur großflächigen Umwandlung von Grünländern in Wald. Die Umwandlung der Äcker in Grünland erfolgte erst nach 1945.

Der im Sandsteingebiet bei Bamberg zertalte Wolfgraben hat nach DOTTERWEICH ET AL. (2003) eine zweiphasige Bildung. Die erste Eintiefung erfolgte im 15. Jahrhundert. Darauf folgte eine Aufsedimentierung durch Massenbewegungen und Sedimenteinträge von den Hängen. An der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert schuf die zweite Einschneidung das heutige Relief. Die gesamte holozäne Erosion für dieses Gebiet beziffern DOTTERWEICH ET AL. (2003: 148) auf 70 mm, die letztmalige Einschneidung erodierte ein Volumen von 1180 m³.

RICHTER & SPERLING (1967) haben sich mit der Entwicklungsgeschichte von Schluchten und Dellen im nördlichen Odenwald befasst. In dem Übergangsbereich zwischen dem Kristallinen Odenwald und der lössbedeckten Reinheimer Bucht konnten sie nachweisen, dass die betroffenen Flächen ackerbaulich genutzt wurden, bevor die Zerschlungung einsetzte. Des ist z. T. seit dem 15. Jahrhundert belegbar. Die Zerschlungung wird nicht intensiven Beackerungsperioden zugeschrieben, sondern den Zeiten von Verbuschung und Wiederbewaldung infolge starken Bevölkerungsrückgangs. Die Wechselbewirtschaftung der Ackerflächen im 17. und 18. Jahrhundert wird als Ursache für neuzeitliche Eintiefung angesehen.

MACHANN & SEMMEL (1970) haben Profilverkürzungen durch Bodenerosion auf Flächen im Tonstein-Keuper des Steigerwalds kartiert. Die dort verbreiteten Pelosole weisen Mächtigkeiten von 0 bis max. 40 cm auf. Die Referenzprofile weisen dagegen Mächtigkeiten von 40 bis 50 cm auf. Weit verbreitet ist auf den zwei Untersuchungsflächen eine Profilverkürzung von 10 bis 20 cm bzw. ein 20 cm mächtiger Ap-Horizont. Leider wird keine zeitliche Einordnung der Bodenerosionsformen vorgenommen. MACHANN & SEMMEL (1970) gehen von flächenhafter und linienhafter Erosion im Umkreis von Flurwüstungen aus.

HILDEBRANDT (2004) verdeutlicht am Beispiel der Wüstung Horb, dass die stärkste Erosion in diesem Bereich des Steigerwalds während der hochmittelalterlichen Siedlungsphase stattfand, allerdings offensichtlich als flächenhafter Abtrag und nicht durch linienhaften Abtrag. Als Ursache macht er die unter Dauerbeackerung genommenen Flurstücke aus, die schräg bis parallel zur Gefällrichtung angelegt worden waren und keine Terrassierung aufwiesen.

Kleinmaßstäbige Untersuchungen des oberflächennahen Untergrunds im Dill-Einzugsgebiet (Rheinisches Schiefergebirge, FRÖHLICH & OPP 2005) sowie in einem Trockental der Vils (östliche Frankenalb, RAAB & VÖLKELE 2005) haben gezeigt, dass die periglazialen Deckschichten aufgrund der intensiven Holznutzung für die Eisenindustrie in historischer Zeit stark erodiert sind. Dabei war die Erosion an der Vils so stark, dass teilweise sogar die

Basislagen fehlen und auf den Plateaus nur noch A-C-Profile entwickelt sind. An den Hängen sind nur in Mittelhangverflachungen Reste der Hauptlage erhalten. Alle beprobten Standorte entlang der Catenen weisen kolluviale Überdeckungen auf (RAAB & VÖLKELE 2005: 136,138). Wie die aufgeführten Beispiele zeigen, hat das Wirtschaften des Menschen in den Mittelgebirgsräumen zu einer Überformung des Reliefs geführt. Unterschiede gibt es hinsichtlich der ersten Eingriffe, der Phase mit der stärksten Erosion und der Dominanz linien- oder flächenhafter Erosionsprozesse. Das sich daraus ergebende Muster aus verkürzten Profilen scheint dabei von der Nähe zu Siedlungen, Industriestandorten oder Ackerflächen beeinflusst zu werden und kann Maximalwerte von bis zu 20 cm enthalten. Aufsedimentierte Profile sind mit ähnlicher Schwankungsbreite flächendeckend zu finden. Daher ist es konsequent nun die erfolgte Erosion und Sedimentation an den Hängen einer deutschen Mittelgebirgsregion zu quantifizieren. Die sich dazu anbietende Methode der Sedimentbilanzierung wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

1.1.3 Sedimentbilanzierung

Methodisch stützt sich diese Arbeit auf den Sedimentbilanz-Ansatz, um eine differenzierte Aussage zur Dynamik der Erosions- und Akkumulationsprozesse im Einzugsgebiet zu machen. Dieser Massenbilanz-Ansatz umfasst die Identifizierung und, wenn möglich, eine zeitlich differenzierte Quantifizierung von Sedimentquellen und -senken bezogen auf eine definierte Raumeinheit, z. B. ein Flusseinzugsgebiet, und einen begrenzten Zeitraum, z. B. das Holozän (z. B. BREWER & PASSMORE 2002; CONSULTANTS & STOKES 2003; PASSMORE & MACKLIN 2001; ROVIRA ET AL. 2005; TRIMBLE 1983; TRIMBLE 1999; VAN BALEN ET AL. 2000). Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Massenbilanz handelt, bei der in der Summe der Input immer dem Output entspricht (SLAYMAKER 2003). Statt einer einfachen 1:1 Input-Output-Beziehung wird für das Einzugsgebiet eine zeitliche Verzögerung des Transports durch Ablagerungen am Hang mit berücksichtigt (WALLBRINK 2004). Damit ist es möglich, die vierdimensionale Komplexität von Erosions- und Ablagerungsprozessen sowie die wechselnde Dynamik eines Speichers am Bohrpunkt zu betrachten. Ausgehend von den Zustandsänderungen der Speicher können die Stoffflüsse erfasst werden. Durch Bohrungen entlang von Transekten und die Kartierung der Kolluvien konnte z. B. TRIMBLE (1983 und 1999) durch die für die Einzugsgebietsteilflächen "Zuflüsse", "oberes Haupttal" und "unteres Haupttal" getrennt berechneten Sedimentbilanzen zeigen, dass sich die Speicher räumlich nichtlinear verhalten. Dem auf der Kartierung von gekappten Bodenprofilen und Kolluvien

basierenden Bilanzansatz stehen gegenwärtig auch Bilanzierungen mit Hilfe von Tracern gegenüber (POLYAKOV ET AL. 2004; ROYALL 2001; SCHIMMACK ET AL. 2002; WALLBRINK ET AL. 2002). Dieser aktualistische Ansatz lässt jedoch keine Aussage über die (prä)historische Erosion, die Erosionsdynamik oder den damit verbundenen Landschaftswandel zu. Wie aber in verschiedenen Studien gezeigt wurde, haben die Landnutzung und insbesondere deren Wandel einen grundlegenden Einfluss auf die Sedimentspeicher und die Stoffflüsse im Einzugsgebiet (ASSELMAN ET AL. 2003; BORK ET AL. 2001; GABRIS ET AL. 2003; HILDEBRANDT 2004; KÜSTER 1995; SCHMITT ET AL. 2003; STANKOVIANSKY 2003; THIEMEYER ET AL. 2005). Neben Rodung und ackerbaulicher Nutzung gehört die damit einhergehende Erosion zu einem festen Bestandteil der Landschaftsgeschichte seit der Besiedlung durch den Menschen (BORK & LANG 2003; SCHMITT et al. 2003). Dabei bestimmt die räumliche und zeitliche Variabilität menschlicher Aktivitäten in der Landschaft die Intensität der Nutzung und den Landnutzungswandel.

Um eine Sedimentbilanz für ein fluviales System zu ziehen, werden unterschiedliche **Vorgehensweisen** angewendet. Wenn man über Zeitreihen von Messwerten verfügt, können Erosion, Sedimentation und Austrag direkt bestimmt werden. Ein solches Vorgehen ist vor allem dann aussichtsreich, wenn Daten aus ausreichend langen Zeiträumen vorliegen. Die Situation, die TRIMBLE (1999) dazu befähigte eine Sedimentbilanz für den Coon Creek aufzustellen, war einzigartig. Er konnte auf eine Vermessung verschiedener Querschnitte des Coon Creeks von 1853 und 1938 zurückgreifen und anhand eigener Einmessung der Querschnitte 1975 und 1993 eine zeitlich aufgelöste Sedimentbilanz seit der Besiedlung erstellen, ohne auf gängige Datierungsmethoden oder Bodenlandschafts-Modellannahmen angewiesen zu sein.

Im Falle von holozänen Sedimentbilanzen sind solche Daten nicht verfü- oder erhebbbar. Daher wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze verfolgt, um einen wahrscheinlichen Wert zu ermitteln, der den initialen Zustand der Oberfläche am Beginn des Holozäns charakterisieren soll. Ein häufig verwendeter Ansatz versucht, ausgehend von der heutigen Oberfläche, über das Erfassen der gesamten Sedimentauflage die **Paläogeländeoberflächen** zu rekonstruieren. SCHROTT ET AL. (2003) passen, z. B. zur Rekonstruktion des postglazialen Felsuntergrunds im Reintal (Alpen), Polynomialfunktionen höherer Grade an mehrere Querprofile an und interpolieren zwischen den Querprofilen die initiale Talform. Hierbei gilt die Annahme, dass durch den Gletscherrückzug das Tal vollständig ausgeräumt wurde, sich also am Beginn des Holozäns noch kein Sediment im Tal befand. Diese Annahme ist außerhalb glazial überprägter Gebiete nicht möglich.

In Lössgebieten setzt man an der holozänen Entwicklungstiefe der Parabraunerden an. Da die in dem Lockersubstrat entwickelte Bodenlandschaft relativ einheitlich aus Parabraunerden, Pseudogleyen und ihren Erosionsstadien besteht, wird als Berechnungsgrundlage die mittlere Untergrenze der Bt-Horizonte aller Parabraunerden gewählt (HOUBEN ET AL. 2006; ROMMENS ET AL. 2005). Ein solcher **sedimentologisch-bodenkundlicher Ansatz** kann auch in den periglazial überprägten Mittelgebirgen verfolgt werden. Da die Bodenlandschaft in Mittelgebirgen weitaus differenzierter aufgebaut ist, liegt der Fokus hier nicht auf einem Bodentyp, sondern auf den periglazialen Deckschichten als bodenbildendem Substrat. Betrachtet man die Böden der Mittelgebirge, so wird von verschiedenen Autoren seit Beginn der sechziger Jahre postuliert, dass sie sich in periglazialen Sedimenten entwickelt haben (BÜDEL 1937; SAUER 2002; SCHILLING & WIEFEL 1962; SEMMEL 1964; VÖLKELE 1995). Dabei ist auffällig, dass der zumeist oberflächlich anstehenden Hauptlage eine weitgehend konstante Mächtigkeit zugeschrieben wird (HÜLLE ET AL. 2009; MAILÄNDER & VEITH 2001; RAAB ET AL. 2007; SEMMEL 2002; VÖLKELE 1995). Ihr Entstehungszeitraum wird noch immer diskutiert und auch die Datierungsversuche von HÜLLE ET AL. (2009) und VÖLKELE & MAHR (2001) lassen noch keine eindeutigen Aussagen zu. Während die Untersuchungen von SEMMEL (1964), SEMMEL & PETSCHICK (2006) und SEMMEL & TERHORST (2010) ein jungtundrenzeitliches Alter (zumindest der Einmischung des Lösses) vermuten lassen, haben VÖLKELE & LEOPOLD (2001) ein über der Hauptlage entwickeltes Moor auf $11\,550 \pm 260$ yr BP datiert, womit für die Bildung der Hauptlage das Bölling oder die Ältere Tundrenzeit in Frage käme. Zwar unterstützen die OSL-Datierungen von HÜLLE ET AL. (2009) eher die Jüngere Dryas-These von SEMMEL & TERHORST (2010), allerdings betonen sie ausdrücklich, dass die präzisen Ergebnisse nicht genau genug wären, um diese Frage zu beantworten und fordern weitere Datierungsstudien. RAAB ET AL. (2007) weisen darauf hin, dass bei der Interpretation der Datierungsergebnisse auch immer mögliche Verzerrungen durch Bodenerosion in Betracht gezogen werden müssen. Es wird angenommen, dass die Hauptlage zu Beginn des Holozäns durch die Wiederbewaldung in ihrer Mächtigkeit stabilisiert wurde, ohne bis zum Beginn der Besiedlung und Nutzung der Mittelgebirge signifikant erodiert worden zu sein (SAUER 2002; VÖLKELE & LEOPOLD 2001).

Neben der Bestimmung des initialen Zustands der Oberfläche ist die Erstellung einer **Kartengrundlage** für die Erosion und Sedimentation Voraussetzung für die Volumenberechnung. Anhand der folgenden Beispiele zur Erstellung regionaler Sedimentbilanzen im Rahmen des

PAGES⁶ Projektes LUCIFS⁷ werden verschiedene Techniken dazu vorgestellt. Innerhalb des LUCIFS-Teilprojekts RheinLUCIFS sind in den letzten Jahren Sedimentbilanzen für das Rhein-Einzugsgebiet und dort vor allem für lössbedeckte Gebiete erstellt worden. HOUBEN ET AL. (2006) haben in einem 10 km² großen Einzugsgebiet in der Wetterau (Hessen) Bodenprofile beschrieben und aus der Kappung von Parabraunerden und der Ablagerung von kolluvialen Horizonten eine holozäne Sedimentbilanz für das Rockenberg-Einzugsgebiet erstellt. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass die zugrunde liegende Erosionskarte interpoliert und die Sedimentkarte expertenbasiert erstellt wurde. Auch ROMMENS ET AL. (2005) haben unterschiedliche Interpolationsverfahren getestet, um die notwendigen Flächeninformationen zu erhalten, die für die Bilanzierung des Nodebais-Einzugsgebiets (belgischer Lössgürtel) notwendig waren. Sie vergleichen die *Inverse Distance to a Power* mit einem *Point Kriging*- (mit einem einfachen linearen Variogramm) und einer *Average per unit*-Methode (APU), bei der die Flächen einer geomorphometrischen Karte verwendet wurden.

HOFFMANN ET AL. (2007) müssen sich für die Berechnung des SDR für das Rhein-Einzugsgebiet, exklusive des alpinen Teils, eines anderen Vorgehens bedienen. Da die Sedimente des Deltas und der Auen bestimmt werden konnten, die Vorgänge auf den Hängen auf dieser Skala jedoch nicht, nehmen sie verschiedene **Einzugsgebiets-SDR** an (CSDR von 0, 10 und 30 %). Die Auengebiete sind relativ einfach über Höhenmodelle kartierbar. Schwieriger ist es, Daten zu Mächtigkeiten holozäner Auensedimente zu bekommen: In Deutschland sind die einzigen überregional verfügbaren Datenquellen dafür die geologischen Karten. Die Arbeit von HOFFMANN ET AL. (2007) stützt sich deshalb für die Ausweisung des Auensedimentvolumens auf die geologischen Karten (GK) 1:200 000 und 1:25 000 sowie SRTM-Geländemodelle. Aus Profildaten wurde eine durchschnittliche Sedimentmächtigkeit für die Auen berechnet, die auf die ganze Fläche angewendet wurde. Für die Volumenberechnung des Deltas wurde aus den Profildaten die Paläooberfläche zu Beginn des Holozäns und aus Laseraltimeterdaten die heutige Oberfläche errechnet, und dann voneinander subtrahiert.

Auch die Massenbilanzen für das Elz und Möhlin-Einzugsgebiet von SEIDEL (2004) wurde über ein solches Vorgehen bestimmt: Die Sedimentationsräume wurden aus der geologischen Karte ermittelt, die Mächtigkeiten über Bohrungen und Aufschlüsse erhoben, und die

⁶ PAGES - PAST GLOBAL CHANGES, internationales Projekt des International Geosphere-Biosphere Programm (<http://www.pages-igbp.org/>)

⁷ LUCIFS - Land Use and Climate Impacts on Fluvial Systems, Working Group innerhalb des Fokus 4 (human-climate-ecosystem interactions) von PAGES (<http://www.lucifs.uni-bonn.de/>)

Erosionsflächen aus dem DGM (Hangneigung $> 2^\circ$) abgeleitet (SEIDEL 2004: 99). Für die Bestimmung der Erosionsraten wurden auch hier verschiedene SDRs angesetzt.

Diese Beispiele zeigen, dass in Abhängigkeit der zu betrachtenden Raumskala und der Datenverfügbarkeit verschiedene Methoden für eine Sedimentbilanzierung zur Auswahl stehen. Reine Mittelgebirgsstandorte sowie Buntsandsteinlandschaften sind jedoch innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets noch nicht untersucht worden; hier bietet sich jedoch ein sedimentologisch-bodenkundlicher Ansatz an.

1.2 Forschungsdefizite und Ziele der Arbeit

Wie die Ausführungen zum Stand der Forschung gezeigt haben, sind Untersuchungen von (Forst-)Hydrologen zur Bodenerosion auf aktualistische Prozessforschungen (meist auf Plot-skala) fokussiert (z. B. BOTT 2002; CROKE & NETHERY 2006; GROTE 2008; HEGG ET AL. 2004). Sedimentologische Analysen an Mittelgebirgsbächen sind hingegen rar. Die vorgestellten landschaftsgenetischen Arbeiten beschäftigen sich meist nur mit ausgewählten Aspekten der Bodenerosion durch Wasser oder beziehen sich auf enge Zeiträume. Es fehlt eine Quantifizierung und Charakterisierung der holozänen Sedimentationsgeschichte bezogen auf das ganze Einzugsgebiet. Aus der Einführung in die Thematik der Sedimentbilanzierung leitet sich ab, dass es einer eigenständigen Studie zur Sedimentationsgeschichte für Mittelgebirge bedarf, die der Zwischenstellung zwischen Altsiedelgebieten in den lössbedeckten Tiefebene und Hochgebirgsgebieten Rechnung trägt und typische Merkmale der naturräumlichen Ausstattung und der Landschaftsgeschichte deutscher Mittelgebirgsregionen aufweist.

Aufgrund der umfangreichen Datenlage und Verfügbarkeit von Bodenprofilen (rund 800 Profilbeschreibungen) und Bodenkarten aus der bodenkundlichen Landesaufnahme (BK 50) mit Substratinformationen zu den periglazialen Lagen, kam das Speyerbach-Einzugsgebiet im Mittleren Pfälzerwald (Rheinland-Pfalz) in die engere Wahl für eine Untersuchung. Es stellt ein Beispiel für lössarme Mittelgebirgsregionen dar, auf die das periglaziale Lagenkonzept angewendet werden kann. Wie für die meisten lössarmen Mittelgebirge liegen für den Mittleren Pfälzerwald keine dezidierten Studien zur Bodenerosion und nur wenige Arbeiten zur Landschafts- und Landnutzungsgeschichte vor. Als Teileinzugsgebiet des Rheins können die Ergebnisse dieser Studie in den Kontext der im RheinLUCIFS-Projekt erarbeiteten

Erkenntnisse gestellt werden und ergänzen diese um eine Fallstudie aus den Buntsandsteingebieten.

Aus den bisherigen Darlegungen lassen sich folgende Forschungsfragen für die Erstellung eines holozänen Sedimentbudgets für das Speyerbach-Einzugsgebiet im Pfälzerwald ableiten:

1. Wie stellt sich die Sedimentbilanz in einem heute vollkommen bewaldeten Mittelgebirgseinzugsgebiet dar? Welchen zeitlichen Rahmen umfassen die Sedimentationsphasen? Sind die räumlichen und zeitlichen Dimensionen mit Ergebnissen aus den Lösstiefländern vergleichbar?
2. Eignen sich historische Karten, um die Änderung des räumlichen Musters von Landschaftsveränderungen abzubilden? Was kann man aus schriftlichen historischen Dokumenten zur Sedimentationsgeschichte des Gebiets ableiten? Ist eine Unterscheidung der Wirkung von klimatischen von anthropogenen Einflüssen möglich?
3. Ist es ausreichend, mit öffentlich verfügbaren Bodendaten eine holozäne Sedimentbilanz zu erstellen, oder bedarf es einer gesonderten Kartierung von Erosion und Sedimentation?
4. Wie lässt sich der Pfälzerwald umweltgeschichtlich in den regionalen Kontext und hinsichtlich seiner Sedimentationsgeschichte in das Rheineinzugsgebiet einordnen?

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, mit einem bodenkundlich-sedimentologischen Ansatz eine holozäne Sedimentbilanz für das Speyerbach-Einzugsgebiet zu erstellen. Darüber hinaus wird eine unabhängige Abschätzung der Erosion mit der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG, nach SCHWERTMANN ET AL. 1987) vorgenommen, um einen Eindruck vom Erosionspotential unter aktuellen Bedingungen zu erhalten. Durch einen Datensatz aus einer eigenen Kartierung wird eine Einschätzung der aus öffentlich verfügbaren Daten erstellten Sedimentbilanz möglich. Die Geländeerhebung ermöglicht bei der Bilanzierung die Verwendung eines *nested approach*: Es kann eine eigenständige Bilanz für ausgewählte (Teil-)Einzugsgebiete erster, vierter und sechster Strahler-Ordnung erfolgen. Dieses Vorgehen gestattet Einblicke in die räumliche Heterogenität der holozänen Sedimentdynamik innerhalb des mesoskaligen Untersuchungsgebiets. Die Interpretation der Sedimentbilanzen stützt sich auf die Rekonstruktion der Landnutzungsgeschichte aus schriftlichen Quellen, historischen Karten und Proxydaten.

Die genannten Arbeitsschwerpunkte lassen sich wie folgt umreißen:

1. Bilanzierung holozän umgelagerter Sedimente im Speyerbach-Einzugsgebiet mittels öffentlich zugänglicher bodenkundlicher Daten (Sedimentbilanz I). Das Ergebnis wird sowohl für das Gesamteinzugsgebiet als auch für zwei Teilräume

hinsichtlich seiner Plausibilität geprüft. Des Weiteren wird der Sedimentbilanz I für eine erste Einordnung der potentielle mittlere jährliche Bodenabtrag gegenübergestellt, der mittels der ABAG berechnet wird.

2. Erfassung der holozänen Landschaftsveränderungen im Mittleren Pfälzerwald zur Erarbeitung potentieller Erosionsphasen. Dieser Teilschritt umfasst die Analyse des Wandels der Landnutzung auf der Grundlage historischer Karten sowie eine Literaturoauswertung zur holozänen Klima- und Vegetationsentwicklung und Besiedlungsgeschichte im Speyerbach-Einzugsgebiet. Hieraus wird die Bedeutung des Landnutzungswandels auf die Sedimentdynamik abgeleitet.
3. Bilanzierung holozän umgelagerter Sedimente anhand eigener Geländedaten zur Erosion und Sedimentation (Sedimentbilanz II). Die räumliche Differenzierung ermöglicht es, die Dynamik in Abhängigkeit des Charakters und der Raumskala der Untersuchungsgebiete zu testen. Die zeitliche Dimension der Sedimentationsgeschichte wird ergänzend zu Kapitel 3 durch Datierungen zweier exemplarischer Standorte untersucht.

1.3 Untersuchungsgebiet

Der Pfälzerwald liegt im Süden des Bundeslandes Rheinland-Pfalz zwischen der Saar-Nahe-Senke im Norden und dem Oberrheingraben im Osten (Abb. 1). Im Süden schließen sich die Vogesen an. Die naturräumliche Einheit des Mittleren Pfälzerwaldes, zwischen Kaiserslautern im Nordwesten und Neustadt an der Weinstraße im Südosten gelegen, wird eingerahmt vom Nordpfälzer Bergland im Norden, vom Haardtrand und der Vorderpfalz im Osten sowie dem Wasgau im Süden (Abgrenzung nach HEITELE & KÄRCHER 1997: 5). Sie wird vom Speyerbach nach Osten zum Rhein hin entwässert.

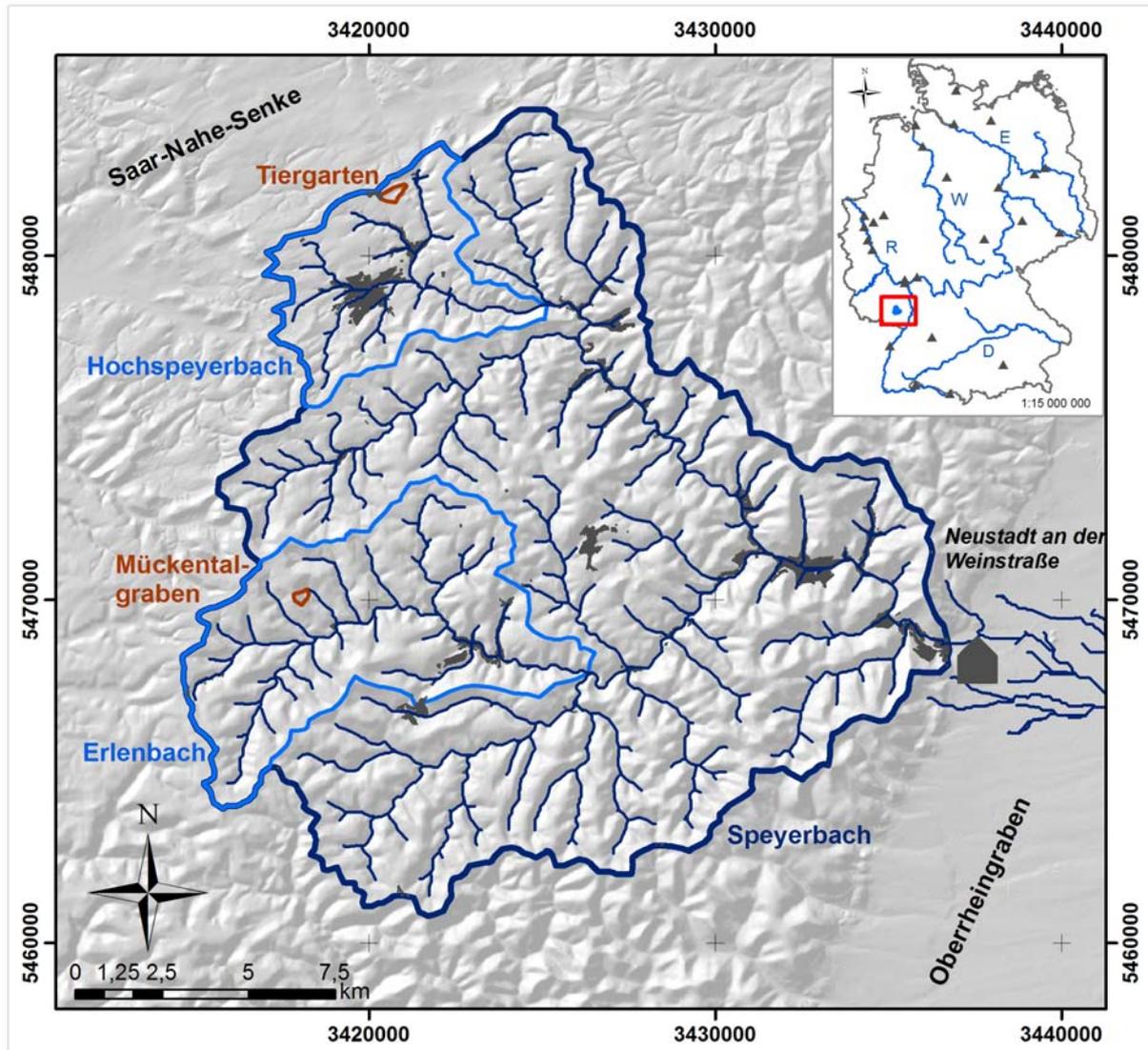


Abb. 1: Überblickskarte über das Untersuchungsgebiet des Speyerbachs zwischen Kaiserslautern und Neustadt an der Weinstraße, Rheinland-Pfalz, Deutschland.

1.3.1 Geologie

Der Pfälzer Wald ist Teil der permotriassischen Pfälzer Mulde, deren Achse zwischen Hochspeyer – Zweibrücken verläuft und nach Südwesten abtaucht. Die letzte Hebung und Verkipfung der Bruchscholle erfolgte im Eozän mit dem Absinken des Oberrheingrabens (LOTHHAMMER 1996: 184). Ursache der starken Stufenbildung im Buntsandstein des Pfälzerwaldes sind die kieseligen oder tonigen Bindemittel in den geröllführenden Sandsteinen bzw. Konglomeraten des Mittleren Buntsandsteins (Rehbergschichten, Karlstal-Felszone) und Oberen Buntsandsteins (LOTHHAMMER 1996: 186). Der Untere Buntsandstein weist intensiv rot gefärbte Sandschichten auf, die in die dünnbankigen Mergel, Tonsteine und Dolomite des Unteren Zechsteins übergehen (FISCHER 1989: 54). Nach Westen streicht der Obere Buntsandstein mit den Voltziensandstein aus und geht in den Unteren Muschelkalk über. Charak-

teristische Landschaftsmerkmale sind kleinflächige Blockschutthalden unterhalb der verwitterungsresistenten Felsbänke der Rehberg-Schichten (LOTHHAMMER 1996: 188).

Die geologischen Karten 1:25 000 sind im Untersuchungsgebiet zwischen 1890 und 1920 n. Chr. kartiert worden. Demnach treten im Untersuchungsgebiet der Obere, Mittlere und Untere Buntsandstein der Pfälzer Mulde auf, sowie Lösslehminseln im Norden des Untersuchungsgebiets. Auf der Spitze der Kalmit ist noch ein Rest des Unteren Muschelkalks erhalten. Darüber hinaus sind auf Blatt 6614 entlang der Störungen am Haardttrand auch Keuper und Karbon (undifferenziert) kartiert worden. Gemäß der stratigraphischen Neugliederung nach Dittrich (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2005) sind die Flächen des Muschelkalks nun der Röt-Folge des Oberen Buntsandsteins zuzurechnen und die Stauf-Schichten (su) dem Zechstein (vgl. Lithologische Karte in Abb. 2).

Der Speyerbach hat sich mit einem ausdifferenzierten Entwässerungssystem in die Buntsandsteinschichten in tiefen und steilen V-Tälern eingeschnitten (Abb. 3). Die dabei erodierten Sedimente bauen zwischen Neustadt an der Weinstraße und Speyer einen weitläufigen Schwemmfächer auf (LOTHHAMMER 1996: 186). In der Bohrung "Speyer" beziffert HAGEDORN (2004: 163) die quartären Lokalschüttungen aus dem Pfälzerwald mit ca. 86 m, deren obersten grobsandig-feinkiesigen 25 m sich deutlich von den Schluffen, Tonen und Feinsanden der tieferen Lagen der Schwemmfächersedimente des Speyerbachs abheben. Eine holozäne Fazies hält HAGEDORN (2004) nicht aus.

1.3.2 Geomorphologie

Das Landschaftsbild des Speyerbach-Einzugsgebiets ist relativ einheitlich. Es dominieren die steilen, stark zerschnittenen Schichtstufen des Buntsandsteins im südöstlichen Bereich des Einzugsgebiets zwischen Johanniskreuz und Neustadt an der Weinstraße. Nur im Nordwesten um Hochspeyer, am Übergang zur Saar-Nahe-Senke verändert sich das Bild hin zu relativ flacheren und geringer zertalten lösslehmbedeckten Flächen. Den Übergang zum Oberrheingraben bildet das tertiäre Bruchschollenhügelland der Haardt. Riedel und Zeugenberge sind markante Bestandteile dieses Landschaftsraumes (FISCHER 1989: 48ff). Die durchschnittlichen Höhen liegen zwischen 300 und 400 m ü. NN. Die höchsten Erhebungen sind die Kalmit mit 673 m ü. NN und der Eschkopf mit 610 m ü. NN. Die Reliefenergie schwankt zwischen 140 und 500 m. STÄBLEIN (1968: 157) weist zwei tertiäre Rumpfflächenniveaus aus: das „Höhenniveau“ aus dem Oligo-Miozän und die „Dahner Flächen“ aus dem Pliozän.

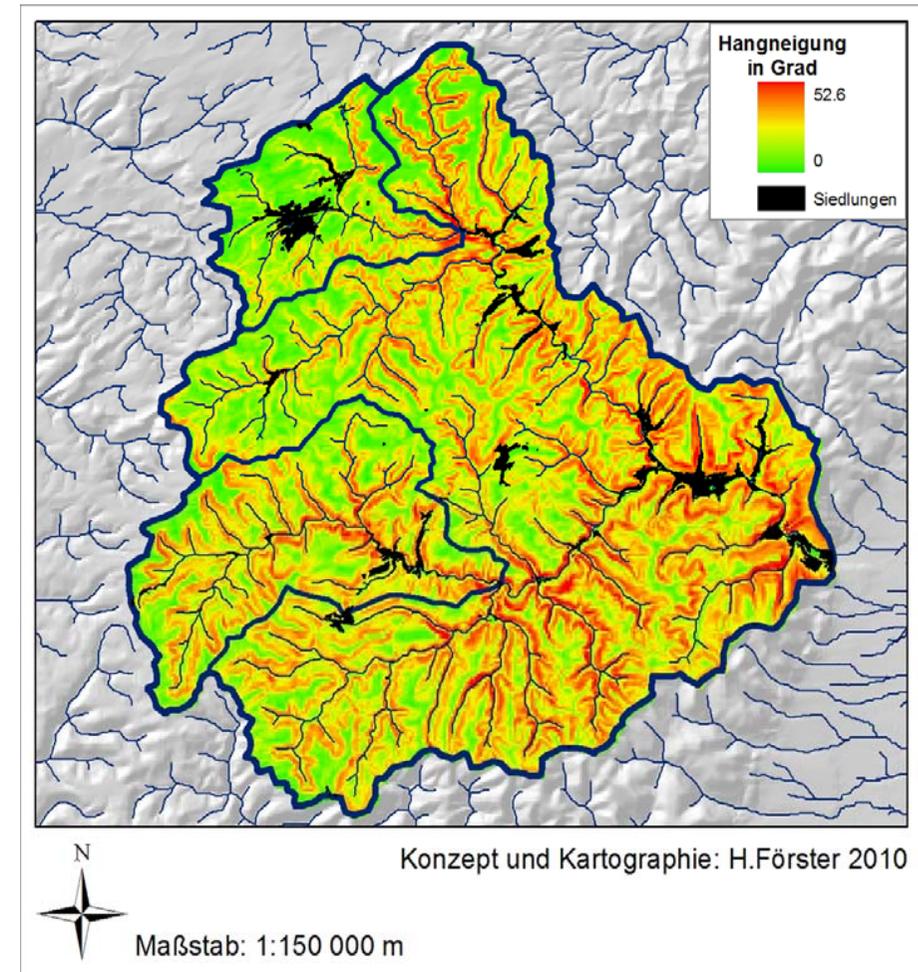
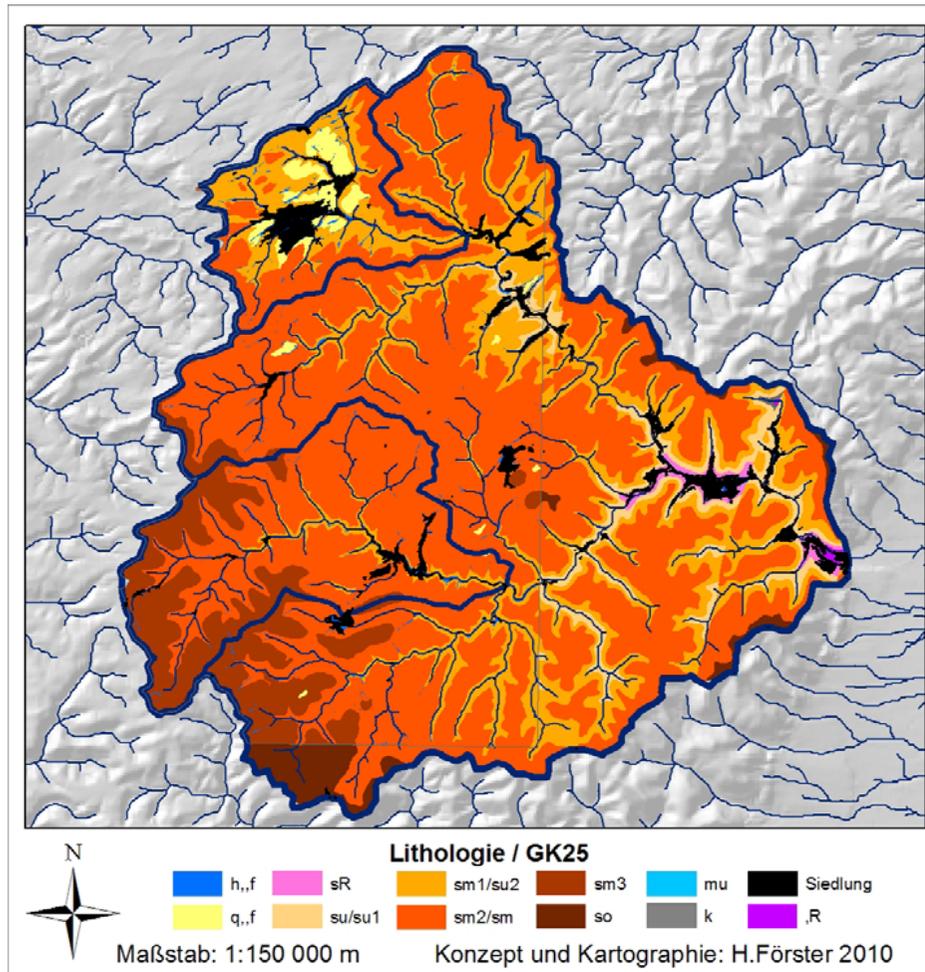


Abb. 2: Lithologische Karte nach U. Steinrücken auf Grundlage der GK sowie unterliegend die GK 25, Stand 2001, im Speyerbach-Einzugsgebiet.

Abb. 3: Hangneigungskarte mit dem Gewässernetz des Speyerbachs.

Die naturräumliche Einheit des Mittleren Pfälzerwaldes, zu der das Untersuchungsgebiet zählt, ist nach LIEDTKE (1968: 105ff) das am stärksten gehobene Stück des Pfälzerwaldes. Er unterscheidet die Rehbergländterrasse nördlich von Elmstein, das Stelzenbergniveau und die Karlstalstufe. Die ersten zwei sind an der Elmsteiner Verwerfung um rund 100 m versetzt. Die Karlstalstufe steigt von Kaiserslautern nach Südosten leicht an und wird vom Speyerbach zwischen Elmstein und Johanniskreuz zerlegt. Auslieger dieser Stufe sind z. B. Hoher Oselkopf und Krottenbuckel nordwestlich von Elmstein. Alle Stufen sind im Zuge der Hebung verbogen worden. Nach LIEDTKE (1968) ist die Elmsteiner Verwerfung altpliozänen Alters. Westlich davon war die Hebung stärker als östlich. Im Gegensatz zu STÄBLEIN (1968) lehnt LIEDTKE (1968: 112) eine pliozäne Rumpffläche im Mittleren Pfälzerwald ab. Er geht von einer tektonischen Aufwölbung, gefolgt von einer pliozänen Eintiefung und weiteren en bloc-Hebungen im Quartär aus.

Durchquert man das Speyerbachtal von Neustadt an der Weinstraße im Osten nach Hochspeyer im Nordwesten oder Elmstein im Westen, so dominieren die gestreckten und steilen Mittelhänge das Landschaftsbild (Abb. 3). Die Oberhänge sind sehr kurz und die flachen Plateaulagen nehmen von Südosten nach Nordwesten in ihrer Erstreckung zu. Dem nach LOTHHAMMER (1996) nicht so stark wie im Rheinischen Schiefergebirge saprolithisierten Gesteinen liegen periglaziale Deckschichten auf, die sich in die Basis- und die Hauptlage aufgliedern. Pleistozäne Terrassenreste sind nach LIEDTKE (1968) nur noch stellenweise und kleinflächig im Speyerbachtal vorhanden. Holozäne Auensedimente in sandig-schluffiger Korngröße sind vor allem in den Talweitungen im Südosten des Einzugsgebiets verbreitet, worin sich Gleye und Vegen entwickelt haben (Abb. 7).

1.3.3 Klima und Hydrologie

Das Untersuchungsgebiet ist durch ein typisches gemäßigtes, ozeanisch geprägtes Klima von Mittelgebirgsregionen gekennzeichnet. Die Klimastation Pirmasens weist eine mittlere Jahreslufttemperatur von 8,9 °C für den Pfälzerwald aus (MINISTERIUM FÜR UMWELT UND ERNÄHRUNG 2001: 19) (Abb. 4). Kaltluftseen, quer verlaufende Kaltluftströmungen und Inversionswetterlagen sind häufige Erscheinungen in den höheren Regionen des Pfälzerwaldes (FISCHER 1989: 79f).

Die mittleren Niederschläge der hydrologischen Jahre 1931 bis 1960 liegen im Untersuchungsgebiet zwischen 800 mm a⁻¹ und 900 mm a⁻¹. Nur in den Höhenlagen steigen die Niederschläge bis zu 1050 mm a⁻¹ an. Nach Osten fallen die Niederschlagssummen Richtung

Oberrhein graben schnell auf 650 bis 600 mm a⁻¹ (Station Landau) ab (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT WEINBAU UND FORSTEN 1982: Blatt 51ff).

Die mittleren Jahresniederschläge variieren räumlich zwischen Hochspeyer mit 650 mm a⁻¹, Elmstein mit 830 mm a⁻¹ (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 12) und Johanniskreuz mit 900 mm a⁻¹. Die Verteilung im Jahresgang ist zweigipflig: Neben zyklonalen Niederschlägen in der Winterhälfte treten im Sommer konvektive Niederschlagsereignisse auf (Abb. 5). Dabei dominiert der Regen; Schnee wird durchschnittlich nur an 50 Tagen des Jahres verzeichnet (BOTT 2002: 24f).

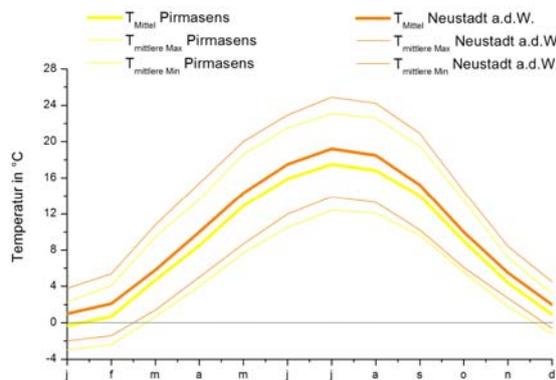


Abb. 4: Mittlere, mittlere maximale und mittlere minimale Lufttemperatur in °C an den Stationen Pirmasens (Pfälzerwald, 398 m ü. NN) und Neustadt an der Weinstraße (Haardtrand, 161 m ü. NN) (MÜLLER 1979: 51,52).

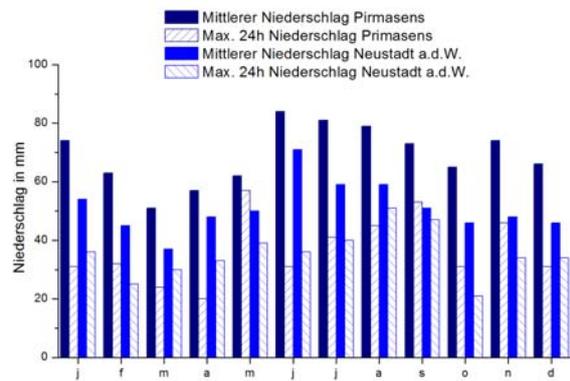


Abb. 5: Mittlerer Niederschlag und Maximaler Niederschlag in mm an den Stationen Pirmasens (Pfälzerwald, 398 m ü. NN) und Neustadt an der Weinstraße (Haardtrand, 161 m ü. NN) (MÜLLER 1979: 51,52).

Der mittlere jährliche Abfluss im Pfälzerwald beträgt maximal 500 mm a⁻¹ und nimmt zum Haardt bis auf 200 mm a⁻¹ ab (MARCINEK & SCHMIDT 2002: 163). Das Abflussverhalten der Bäche im Pfälzerwald ist nach BOTT (2002) im Jahresgang stark vom Grundwasser geprägt, so dass die höchsten Mengen im Winter gemessen werden und eine starke Dämpfung bei Niederschlagsereignissen auftritt. Die Schüttung erfolgt kontinuierlich und das Gewässernetz zeigt keine Veränderungen im Jahresgang.

Das Gebiet des Pfälzerwaldes ist durch eine Reihe von Schicht- und Verwerfungsquellen gekennzeichnet, die meist ganzjährig schütten. Ursache sind die hohen Grundwasserneubildungsraten (25 % des mittleren Jahresniederschlags) und lithologische Unterschiede, vor allem im Mittleren Buntsandstein (FISCHER 1989: 91; HEITELE & KÄRCHER 1997: 17).

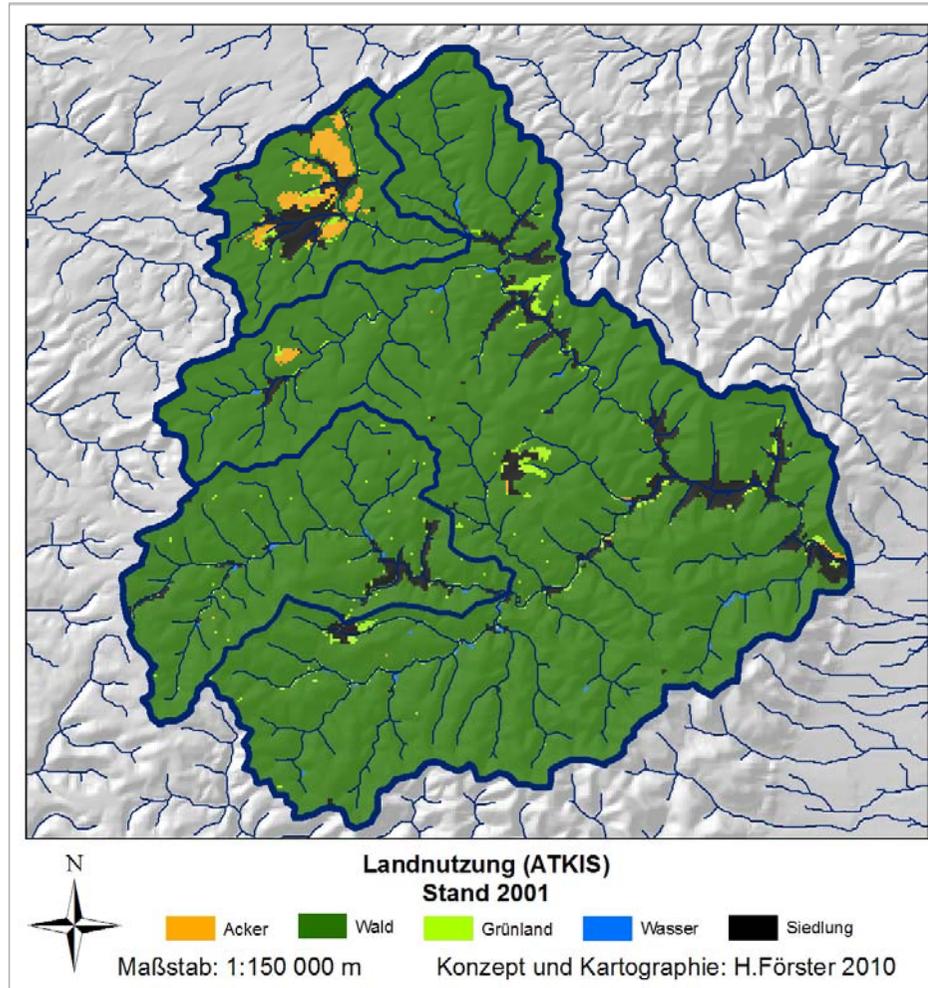


Abb. 6: AKTIS-Landnutzungskarte 1:25 000, Stand 2001, im Speyerbach-Einzugsgebiet.

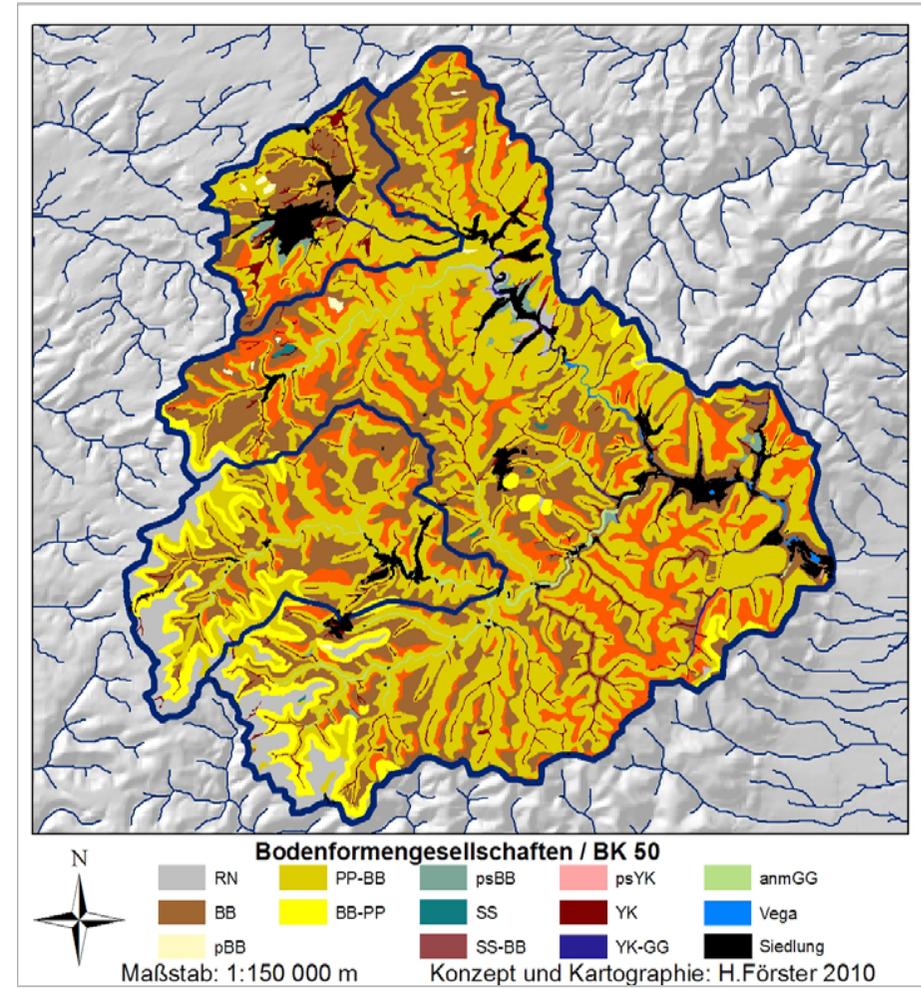


Abb. 7: Verbreitung der Bodenformengesellschaften im Speyerbach-Einzugsgebiet nach Bodenkundlicher Karte 1:50 000.

1.3.4 Landnutzung

Entsprechend der Flächenberechnungen der zur Verfügung stehenden ATKIS-Daten zur Landnutzung wiesen 2001 94 % der Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet eine forstwirtschaftliche Nutzung auf (Abb. 6). Es dominieren Buchen und Buchen-Kiefer-Mischbestände. Vor allem in südexponierten Unterhängen stehen Kiefern, vermehrt auch Douglasien und Europäische Lärchen. Nach FISCHER (1989: 97) bestand die natürliche potentielle Vegetation vor der Bewirtschaftung des Pfälzerwaldes aus Eichenmischwäldern.

Lediglich 1,2 % der Fläche des Untersuchungsgebiets werden heute landwirtschaftlich genutzt. Bevorzugt in den Tallagen findet auf 2 % der Gesamtfläche Grünlandbewirtschaftung statt. Die restlichen 2,8 Flächenprozent entfallen auf Siedlungs- und Wasserflächen.

1.3.5 Böden

Die bodenbildenden Substrate sind im Buntsandstein meist schwach lehmige, lösslehmfreie bis lösslehmarme Sande der Hauptlagen mit einer Mächtigkeit zwischen 50 und 70 cm. Vereinzelt sind auch schuttführende sandige Basislagen das Ausgangssubstrat (BRAUKÄMPER 1990; LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2005: 292; LOTHHAMMER 1996). Bimsminerale der Laacher-See-Tephra sind nur in Spuren vorhanden, der Skelettgehalt ist gering und wird von Grus dominiert. Die effektive Lagerungsdichte ist eher niedrig (LOTHHAMMER 1996: 189).

Charakteristisch für das Buntsandsteingebiet sind die darin entwickelten Braunerden (BB) und Podsole (PP) und deren Übergangsformen (Abb. 7). Die Leitbodenform ist die schwach schluffige (Ton: 3,9-5,5 % und Schluff: 11,5-12,6 %) und skelettreiche Braunerde, die teilweise vergleyt oder podsoliert mit geringer bis mittlerer Basensättigung (bis 15 %) auf Unterem und Mittlerem Buntsandstein ansteht. Die teilweise skelett- und blockreichen Podsole (Abb. 8) kommen in den orographisch höchsten Bereichen des Untersuchungsgebiets vor und weisen pH-Werte $< 3,3$ auf. Podsolierte Braunerden (pBB) finden sich dagegen auch an Mittel- und Unterhängen der Trifels- und Karlstal-Schichten (LOTHHAMMER 1996: 191ff). Aufgrund des hohen Anteils von Buchen wird die Humusform von Moder dominiert, nur 30 % der Flächen weisen Rohhumus auf.

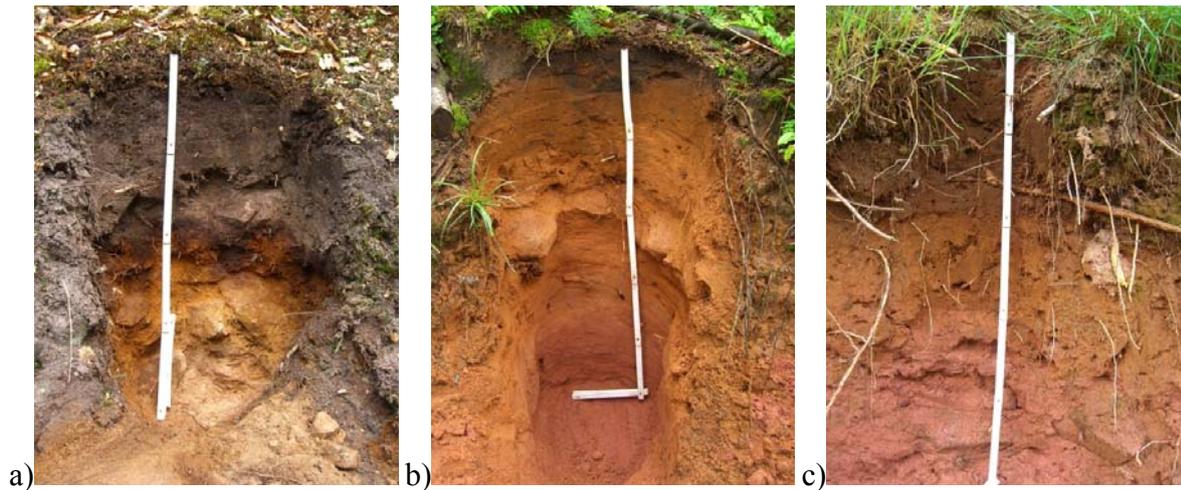


Abb. 8: Beispiele für typische Bodentypen im Speyerbach-Einzugsgebiet: a) Podsol am Westhang des Steinkopfs bei Fischbach, b) podsolierte Braunerde am Nordhang des Westlichen Heiligenbergs und c) Braunerde mit rAp am Nordhang bei Speyerbrunn (eigene Grabungen).

An erosionsanfälligen Standorten und über dem Hauptkonglomerat tritt eine Vergesellschaftung mit Rankern (RN) und Syrosemen auf (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2005: 292, LOTHHAMMER 1996: 192). Auf Lösslehminseln in Plateaulagen über dem Unteren und Mittleren Buntsandstein im Norden des Untersuchungsgebiets haben sich Parabraunerden (LL) entwickelt, die in unterschiedlichen Erosionsstufen sowie vergleyt vorkommen (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2005). In den Auen sind Gleye (GG) vertreten und im südöstlichen Speyerbachtal zwischen Lambrecht und Neustadt an der Weinstraße sind Veges entwickelt. In den Trockentälern dominieren (vergleyte) Kolluvien (YK) (Abb. 7).

1.3.6 Teileinzugsgebiete

Für die Vorbereitung der Geländekampagnen wurden durch Auswertung der bodenkundlichen Verhältnisse, der aktuellen Landnutzung und der Reliefeigenschaften des Gesamteinzugsgebiets (EZG) zwei Teileinzugsgebiete (TEZG) ausgewählt, die die Bandbreite der im gesamten Speyerbach auftretenden landschaftlichen Merkmale aufweisen. Dabei fiel die Wahl auf die Teileinzugsgebiete des Hochspeyerbachs im Norden und des Erlenbachs im Westen des Speyerbach-Einzugsgebiets (Tab. 1).

Der Hochspeyerbach (29 km² Einzugsgebietsfläche, Hsp) vertritt den Nordwesten des Untersuchungsgebiets, eine flachere Region, in der vorwiegend Ackerbau auf den erodierten Parabraunerden und Braunerdeböden betrieben wird. Das Teileinzugsgebiet ist durch breite Kastentäler mit flachen Talflanken und runden Kuppen bei Hochspeyer und durch enge Kerbtäler östlich und südlich davon charakterisiert, die zum größten Teil mit Lösslehm bedeckt

sind. Der Hochspeyerbach mäandriert über die Talbreite, ohne seine Sedimente auszuräumen; er ist heute als transportlimitiertes Subsystem anzusehen. Das 54 km² große Teileinzugsgebiet des Erlen- bzw. oberen Speyerbachs (Erl) im Südosten des Speyerbach-Einzugsgebiets ist durch steile Kerbtäler und große geschlossene Waldflächen geprägt. Stellenweise weitet sich das Tal, dann ist deutlich eine Auenverfüllung des Kerbtals erkennbar. Untergeordnete Zuflüsse wie der Enkenbach, der Große Legelbach und der Oselbach erodieren sich streckenweise ins Gestein ein. Der Erlenbach ist demnach teilweise ein material-limitiertes Subsystem.

Tab. 1: Vergleichende Zusammenstellung einiger Kenngrößen des Speyerbach-Einzugsgebiets und der zwei Teileinzugsgebiete Hochspeyerbach und Erlenbach.

	Speyerbach	Hochspeyerbach	Erlenbach
			
Größe	311,6 km ²	28,9 km ²	53,8 km ²
Landbedeckung	94 % Wald, 1,2 % Acker, 2 % Grünland	78,3 % Wald, 11,2 % Acker, 4 % Grünland	96,5 % Wald, <0,1 % Acker 1,8 % Grünland
höchster Reliefgradient	500 m	140 m	388 m
Geologie	h,,f, (mu), so, sm, su2, ,R, k	h,,f, sm, su2, vereinzelt jungpleistozäne Sande und Kiese,	(mu), so, sm, su2
historische Nutzung	Holzverarbeitendes Gewerbe, Köhlerei, Jagd	Ackerbau, Holztrift	14. Jh. bis 1906 Holztrift
Besonderheiten		größtenteils lössbedeckt	steile Mittelhänge
Herrschaftsverhältnisse		Kondominium ⁸	kurpfälzisch

⁸ Hochspeyer ist eine leiningsche Gründung, wurde 1416 n. Chr. zu einem Kondominium (von mehreren Herrschaften regiertes Gebiet) bis 1797 n. Chr. (1680 und 1764 n. Chr. schied jeweils eine Herrschaft aus) (LUDT 1959: 57).

1.4 Methodik

Zur Volumenbestimmung von Erosion und Sedimentation bedarf es der Bestimmung des initialen Zustands der Oberfläche vor beginnender Erosion. Im Folgenden wird dargelegt, wie im Falle des Speyerbachs aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten vorgegangen wurde. Die Bestimmung der Berechnungsgrundlage erfolgte jeweils lokal, d. h. mit dem verfügbaren Punktdatensatz je Flächenbezug (EZG, TEZG, etc.). Die Beschreibung der Kartengrundlage für die Sedimentbilanzen I und II erfolgt in Kapitel 2 und 4, da in beiden Fällen jeweils unterschiedlich verfahren wurde.

1.4.1 Bestimmung der Berechnungsgrundlage für die Sedimentbilanzierung

Erfragt man in einem Gespräch mit Bodengeographen die maximale Mächtigkeit von Hauptlagen, so wird oft der Wert von 60 cm genannt. Vergleicht man diese mündlichen Aussagen von mehreren Fachwissenschaftlern mit wissenschaftlichen Arbeiten, die sich mit den Eigenschaften der Hauptlage beschäftigt haben, so schwanken die Mächtigkeitsangaben zwischen 30 und 70 bzw. 100 cm (SEMMELE & TERHORST 2010 und Tab. 2). Überwiegend flachgründige Profile mit max. 40 bzw. 45 cm mächtigen Hauptlagen sind im Saale-Holzland (MÜLLER 2004), im Thüringer Wald (SCHILLING & WIEFEL 1962), in Franken (SCHILLING 1990) und im Bayrischen Wald (VÖLKELE 1995) beschrieben worden. Dagegen liegen die Untergrenzen der Hauptlagenmächtigkeiten aus dem Harz (FRÜHAUF 1990), dem Rheinischen Schiefergebirge (SAUER & FELIX-HENNINGSSEN 2004), dem Saarland (LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001), dem Taunus (SEMMELE 1964), dem Pfälzerwald (BRAUKÄMPER 1990; LOTHHAMMER 1996), dem Odenwald (FRIED 1984), dem Schwarzwald (STAHR 1979) und dem Schweizer Tafelland (MAILÄNDER & VEITH 2001) zwischen 30 und 50 cm, die Obergrenzen werden mit 60, 70 oder 100 cm angegeben.

Da das Speyerbach-Einzugsgebiet Teil der Buntsandsteinregion des Pfälzerwaldes ist, liegt ein Vergleich mit anderen Sandsteingebieten nahe. In allen bearbeiteten Gebieten in Buntsandsteinlandschaften Deutschlands (Tab. 2) liegen die maximalen Mächtigkeiten der Hauptlagen bei 60 bzw. 70 cm, egal, ob jurassische oder triassische Sandsteingebiete untersucht worden sind. Die Untergrenze der Hauptlagenmächtigkeiten schwankt dagegen zwischen 20 und 40 cm. Mit 40 bis 60 cm Schwankungsbreite liegen die Werte von BRAUKÄMPER (1990)

für den Pfälzerwald innerhalb der maximalen Schwankungsbreite in Deutschland. Auch die Angaben von LOTHHAMMER (1996) mit 50 bis 70 cm Mächtigkeit liegen innerhalb der Obergrenzen Deutschlands und der Schweiz und sind vergleichbar mit Messungen aus dem Taunus, dem Odenwald, dem Schwarzwald und dem Bayerischen Wald.

Tab. 2: Mächtigkeitsangaben für Hauptlagen in verschiedenen Regionen in Deutschland und der Schweiz. Den Publikationen zum Pfälzerwald folgen Angaben aus Sandsteingebieten, gefolgt von Werten aus anderen geologischen Regionen Deutschlands und der Schweiz (*LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001).

Autor Jahr	Untersuchungsgebiete	Hauptlagenmächtigkeit
Braukämper 1990	Pfälzerwald, mesozoische Sandsteine	40 – 60 cm
Lothhammer 1996	Pfälzerwald, mesozoische Sandsteine	50 – 70 cm
Fried 1984	Odenwald, mesozoische Sandsteine	30 – 70 cm
Müller 2004	Saale-Holzland, mesozoische Sandsteine	20 – 40 (60) cm
LAU 2001*	Saarland, allgemein	50 ± 20 cm
Schilling 1990	Franken, jurassische Sandsteine	30 – 45 (70) cm
Mailänder & Veith 2001	Schweizer Tafelland, Tertiäre Molasse, Moränenablagerungen	50 cm
Frühauf 1990	Harz, devonische Granite	50 – 70 cm
Sauer & Felix-Henningsen 2004	Rheinisches Schiefergebirge, devonische Schiefer und Quarzite	50 ± 20 cm
Schilling & Wiefel 1962	Thüringer Wald, devonische Metamorphite	30 – 40 cm
Semmel 1964	Taunus, devonische Metamorphite	40 – 70 cm
Völkel 1995	Bayrischer Wald, devonische Metamorphite	40 (60) cm
Stahr 1979	Schwarzwald, präkambrische Metamorphite, devonische und permische Plutonite und Granite	40 – 100 cm

Die für die Ermittlung der Berechnungsgrundlage (95 %-Perzentil) der Sedimentbilanzen des Speyerbachs durchgeführte statistische Analyse der Punktdaten des bodenkundlichen Karten- und Grunddatensatzes (Anhang 1a und b) ergibt initiale Mächtigkeiten von 60 cm (Kartendatensatz) bzw. 70 cm (Grunddatensatz), welche den Obergrenzen der in Tabelle 2 aufgeführten Hauptlagenmächtigkeiten entsprechen. Akzeptiert man das 95 %-Perzentil als Maß für die

initiale Mächtigkeit der Hauptlage, bedeutet eine Überschreitung dieses Wertes (welche maximal in 5 % der Stichprobenfälle stattfinden kann) reliefbedingte Sonderfälle oder mehrphasige Hauptlagen. Alle Messpunkte, die größer und gleich dem Mächtigkeitswert des 0,95 Quantils sind, hätten somit keine Erosion erfahren. Alle geringeren Werte weisen auf erodierte Standorte hin.

Vergleicht man die im Speyerbach-Einzugsgebiet kartierten Hauptlagenmächtigkeiten mit den in Tabelle 2 dargestellten, so handelt es sich um „typische“ Mächtigkeiten. Die kartierten Mächtigkeiten geben die Messwerte zum Zeitpunkt der Aufnahme der Profile bzw. zum Zeitpunkt der Untersuchung an. Ruft man sich dazu die in Kapitel 1.1.2 dargelegten Studien zur Landschaftsentwicklung deutscher Mittelgebirge in Erinnerung, so wird deutlich, dass es sich bei den aktuellen Mächtigkeiten teilweise auch um erosiv verkürzte Profile handelt.

Da in keiner der in Tabelle 2 aufgeführten Forschungsarbeiten eine Vorstellung über die initiale Mächtigkeit der Hauptlage am Beginn des Holozäns geäußert wird und keine theoretischen Kenntnisse zur maximalen Hauptlagenmächtigkeit am Beginn des Holozäns vorliegen, werden in dieser Arbeit die Werte des 0,95 Quantils der Punktdatensätze als Berechnungsgrundlage verwendet.

1.4.2 Bilanzierung

Die Bilanzierung setzt die Identifizierung der Hauptlagen, holozäner Schichten sowie verschiedener bodenkundlicher Horizonte voraus. Die Hauptlage zeichnet sich durch eine feinkörnige Matrix mit Blockschutt aus, die sowohl durch Erosion und Wiederaufarbeitung der Mittel- und Basislage als auch durch Lössmischungen entstanden ist (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996; FRÜHAUF 1996; SEMMEL 1968). Sie bildet häufig das bodenbildende Ausgangssubstrat und bestimmt mit ihrer Entwicklungstiefe die Entwicklung der A- und B-Horizonte (KÖSEL 1996; MÜLLER 2007; RAAB ET AL. 2007; STAHR 1979; THIEMEYER & VEITH 1993). Damit stellt die Hauptlage das lithogene Lockermaterial bzw. Sediment dar, in welchem sich seit der Bewaldung zu Beginn des Holozäns ein Boden entwickelte.

Der Kappungsbetrag der Böden ergibt sich aus der Differenz zwischen der aktuellen Hauptlagenmächtigkeit eines Bohrprofils und der Berechnungsgrundlage. Die Höhe der Sedimentation wird in der bodenkundlichen Interpretation des Datensatzes durch Aufsummierung der Mächtigkeiten der kolluvialen Horizonte pro Bohrpunkt berechnet. Dazu werden über den M-Horizonten ausgewiesene Ap-Horizonte addiert (Variante Horizonte). Die Mächtigkeit akkumulierter Sedimente kann aber auch auf eine andere Weise ermittelt werden: Mit einem

sedimentologischen Fokus stützt man die Berechnungen auf die Untergrenze der holozänen Schichten, die zur Beschreibung der bodenbildenden Substrate verwendet werden (Variante „Holozäne Schichten“). Hierbei werden neben den M-Horizonten alle Ap-Horizonte sowie alle Horizonte von Veges und Gleysen und somit alle holozänen Auenfüllungen bis zwei Meter berücksichtigt. Die Untergrenze von zwei Metern liegt in der deutschen bodenkundlichen Praxis begründet. Gewöhnlich reichen Pürckhauerbohrungen nur bis in einen Meter Tiefe. In Auen werden gegebenenfalls auch Zweimeterprofile aufgenommen, tiefer wird jedoch meist nicht gebohrt. Aus diesen Gründen wird die sedimentologische Variante für die weiteren Betrachtungen als Bezugsszenario ($K_0/G_0/E_0$) verwendet.

Die errechneten Erosionsverluste stellen das Pendant zur Sedimentationshöhe dar und beide müssen im nächsten Schritt mit den dazugehörigen Flächen multipliziert werden. Zur Berechnung der Masse wird zusätzlich eine Angabe zur Trockenrohdichte der Böden gebraucht. Wenn keine Laborwerte für die Trockendichte zur Verfügung standen, wurde ein Standardwert aus der Literatur herangezogen: Aus den Schwankungsbreiten von sandigen Substraten, die bei SCHACHTSCHABEL ET AL. (1998: 143) angegeben werden, wurde der Mittelwert ($1,43 \text{ g cm}^{-3}$) gebildet.

Eine Bilanzierung von Erosion und Sedimentation setzt die Ermittlung folgender Terme voraus:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n ((h_{\text{BG}} - h_{\text{LHi}}) * A_i * \rho_{\chi}) \quad (1)$$

$$S_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (h_{ki} * A_i * \rho_{\chi}) \quad (2)$$

$$A_{\text{total}} = E_{\text{total}} - S_{\text{total}} \quad (3)$$

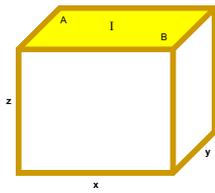
mit

E_{total}	Erosionsbetrag (t),
h_{BG}	initiale Mächtigkeit der Hauptlage (Berechnungsgrundlage, BG) (m),
h_{LHi}	aktuelle Mächtigkeit der Hauptlage i (m),
h_{ki}	aktuelle Mächtigkeit des kolluvialen Horizontes i (m),
A_i	Fläche der zugehörigen Kartiereinheit i (m^2),
ρ_{χ}	Mittelwert der Trockendichten der Sedimente (10^3 t m^{-3}),
S_{total}	Sedimentationsbetrag (t),
A_{total}	Austrag aus dem Einzugsgebiet (t).

Ausnahmen von diesem Vorgehen stellen die Parabraunerden dar, die sich in den Lössgebieten vorrangig um Hochspeyer entwickelt haben. Hier wird von einer mittleren initialen Mächtigkeit der Al/Bt-Horizonte (BG_{LLSp}) von 105 cm bzw. 140 cm ausgegangen. Diese Berechnungsgrundlagen für Parabraunerden entsprechen dem 95 %-Perzentil der Stichprobe des Grund- bzw. des Erosionsdatensatzes. Parabraunerde-Entwicklungstiefen, mit denen Sedimentbilanzen in der Wetterau (HOUBEN ET AL. 2006) und dem Belgischen Lössgürtel (ROMMENS ET AL. 2005) ermittelt wurden, haben Werte von 100 bis 150 cm. Die Erosionstiefe wird durch die Subtraktion der Mächtigkeiten des Al/Bt- bzw. rBt-, fBt-, Bt-Sd- oder Btv-Bt-Horizontes vom Wert der Berechnungsgrundlage ermittelt.

1.4.3 Sensitivitätsanalyse

Da keine Fehlerbereiche zu den Punktdaten angegeben sind, kann keine konventionelle Fehlerbetrachtung für die Bilanzierungen durchgeführt werden. Stattdessen wird anhand einer Sensitivitätsanalyse, wie sie z. B. in der Hydrologie für die Modellkalibrierung verwendet wird, versucht, die Güte der Bilanzierung abzuschätzen. Bei einer klassischen Sensitivitätsanalyse wird ein Parameter unter Konstanthaltung aller anderen verändert, um so seinen Einfluss auf das Modellergebnis zu ermitteln (ANDERSON & BURT 1995; BÄSE 2005; DE ROO 1993; SCHRÖDER 2000). Den Ergebnisdarstellungen in Kapitel 2 und 4 werden deshalb Sensitivitätsanalysen der Parameter Berechnungsgrundlage, Mächtigkeit, Fläche und Trockendichten nachgestellt.



2. Sedimentbilanz I: Öffentlich verfügbare Daten

Der Sedimentbilanz I liegt die Auswertung der von Landesämtern vorgehaltenen geologischen und bodenkundlichen Daten zugrunde. Charakteristischerweise gehören zu den bodenkundlichen Karten im Maßstab 1:50 000 auch Erläuterungsbände, die die Herstellung dokumentieren und fachliches Hintergrundwissen vermitteln. Auf Anfrage kann man auch die dazugehörigen Punktdatensätze und Laborergebnisse erwerben. Der Vorteil dieser Daten liegt in der zwar maßstabsabhängigen, aber auf mittleren Maßstäben relativ hohen Verfügbarkeit in Deutschland (Tab. 3). Mit diesen allgemein verfügbaren Daten wurde die Sedimentbilanz Ia berechnet (Kap. 2.2.1).

Tab. 3: Übersicht über die digital verfügbaren Bodenkarten unterschiedlicher Maßstäbe in Deutschland, die nach Kartieranleitung bis 2005 erstellt worden sind bzw. bis 2010 werden sollen. (Daten vom Staatlichen Amt für Statistik 2005, aus BEHRENS & SCHOLTEN 2006: 435).

Federal State	km ² *	Scale					
		large 1:5,000; 1:10,000		medium 1:25,000; 1:50,000		small 1:100,000 – 1:300,000	
		2005	2010	2005	2010	2005	2010
Baden-Württemberg	35.752	0	0	25	90	100	100
Bavaria	70.549	0	0	60	100	30	100
Berlin	892	0	0	100	100	100	100
Brandenburg	29.478	0	0	4	40		
Hamburg	755	0	0	0	0	75	100
Hesse	21.115	0	0	100	100	100	100
Lower Saxony/Bremen	47.620 / 404	85	85	100	100	100	100
Mecklenburg-Western Pomerania	23.179	0	0	30	100	10	100
North Rhine-Westphalia	34.084	47	70	96	100	50	100
Rhineland-Palatinate	19.853	0	0	65	100	100	100
Saarland	2.569	0	0	5	5	100	100
Saxony	18.415	0	0	30	70	100	100
Saxony-Anhalt	20.446	0	0	80	100	100	100
Schleswig-Holstein	15.763	1	1	40	50	99	100
Thuringia	16.172	0	0	10	65	100	100
Germany	357.046	16	18	57	87	76	100

Der Sedimentbilanz Ib (Kap. 2.2.3) liegen neben derselben Kartengrundlage die originalen Profilbeschriebe zugrunde, die noch nicht aggregierte Informationen enthalten. Das Kapitel soll mit einem Vergleich dieser zwei Sedimentbilanzen zur Sensibilisierung für die Problema

tik der Qualität von Daten beitragen. Mittels der in Kapitel 2.5 erfolgten Abschätzung des potentiellen mittleren Bodenabtrags, berechnet mit einer ABAG-Modellierung, wird eine Charakterisierung des Erosionspotentials des Mittelgebirgseinzugsgebiets angestrebt.

2.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Für die Berechnung einer Sedimentbilanz für das Speyerbach-Einzugsgebiet auf Grundlage von offiziellen bodenkundlichen Daten werden Flächen- und Tiefenangaben für die kartierten Sedimente und erodierten Böden benötigt. Die vom zuständigen Landesamt herausgegebenen Bodenkarten sind geeignet, wenn sie neben den Bodentypen auch Informationen über den Aufbau der periglazialen Deckschichten beinhalten. Für die Bodenkundliche Karte 1:50 000 (BK 50) von Rheinland-Pfalz, die für die Auswertung zur Verfügung standen, ist dies der Fall. Darüber hinaus wurden für die Ableitung der Einzugsgebietsgrenzen und die Interpretation der Ergebnisse behördliche Relief- und Landnutzungsdaten verwendet, die, wie sich bei der Berechnung im Nachhinein herausstellte, auch für die Disaggregation der Bodenkarten (Kap. 2.3) notwendig waren. Nach Beschaffung der Daten konnte mit Hilfe eines digitalen Geländemodells und der daraus berechneten Höhenlinienkarte das Einzugsgebiet des Speyerbachs bis zum Pegel Neustadt an der Weinstraße extrahiert werden.

2.1.1 Bodendaten

Die bodenkundlichen Flächen- sowie Punktdaten werden in Form von Datenbankauszügen vom *Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz* herausgegeben. Die Bodenkundliche Karte 1:50 000 liegt blattschnittfrei für den Ausschnitt des Speyerbach-Einzugsgebiets vor; in ihr werden Bodenformengesellschaften (BFG)⁹ dargestellt. Aus der BK 50 wurden die Grenzen der Bodenformengesellschaften extrahiert, sowie die Fläche der jeweiligen Bodenformengesellschaft berechnet und als Grundlage für die Sedimentbilanzen Ia und Ib (Kap. 2.2.1 und 2.2.3) herangezogen (vgl. Abb. 9).

⁹ Bodenformengesellschaften sind nach Kartieranleitung eine Aggregation von verschiedenen Bodenformen (BF), den kleinsten Kartiereinheiten, die sich aus einem Bodentyp und dem jeweiligen Ausgangssubstrat zusammensetzen (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 273). Innerhalb einer Bodenform werden einheitliche bodenbildende Bedingungen angenommen, die nur mikroklimatisch oder durch den Menschen modifiziert werden. Bodenformengesellschaften umfassen mehrere Bodenformen, die eine ähnliche Bodenentwicklung zeigen, die aber in der Bodenart, dem Relief oder der Wasserversorgung leichte Variationen aufweisen (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 273). Diese Aggregation ist dazu geeignet, auf der regionalen Skala Übersichtlichkeit zu gewährleisten und die charakteristischen Unterschiede hervorzuheben.

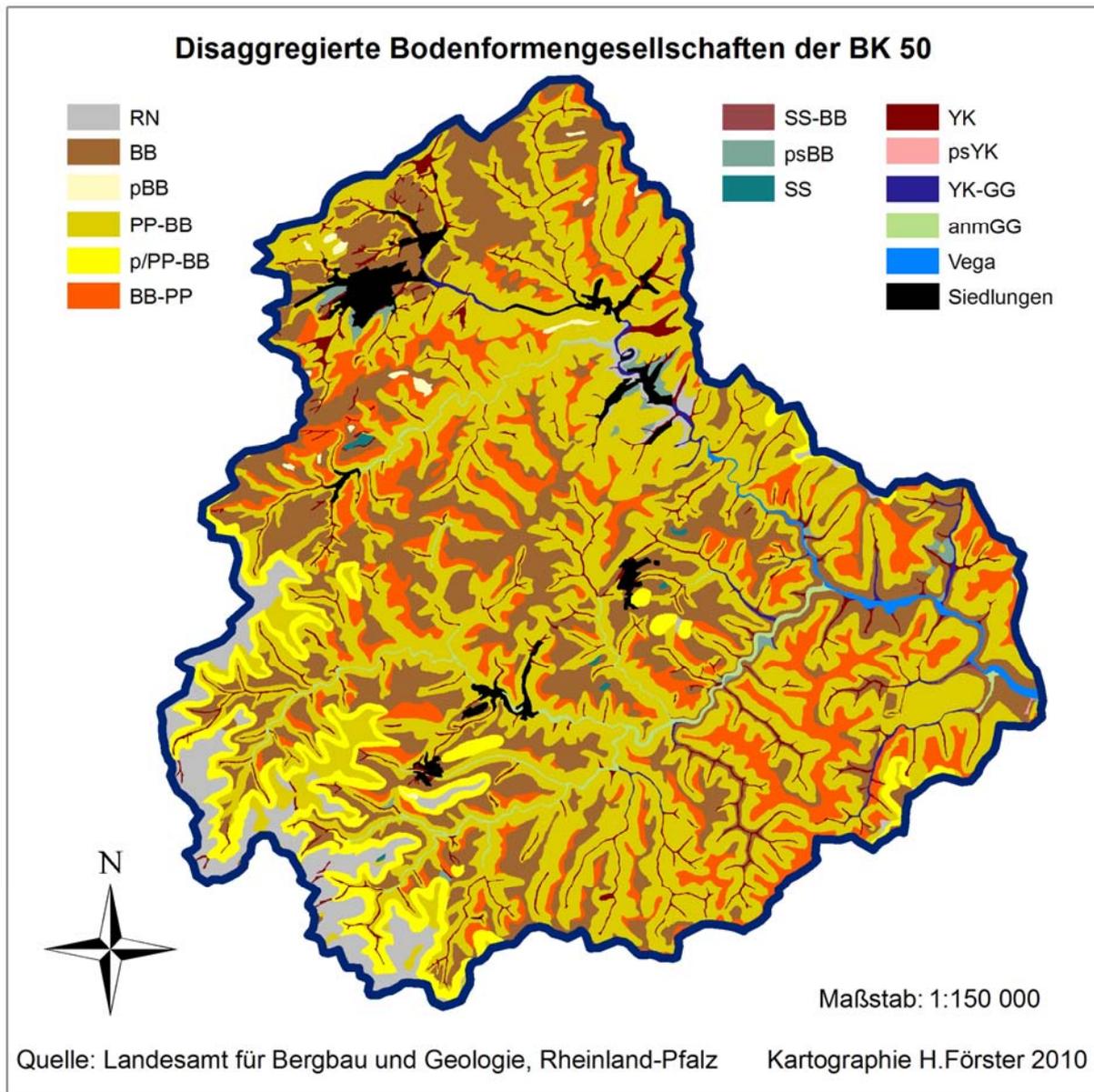


Abb. 9: Kartengrundlage der Sedimentbilanz Ia: Disaggregierte Bodenkundliche Karte 1:50 000 für das Speyerbach-Einzugsgebiet und Punktdaten des Kartendatensatzes (Datenquelle: Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz 2006).

Bei den öffentlich zugänglichen bodenkundlichen Punktdaten handelt es sich um Profildaten, die vom Landesamt im Bodenformenarchiv (BoFA), einem Teil des Fachinformationssystems Boden von Rheinland-Pfalz, zu den Flächendaten der BK 50 vorgehalten werden:

- Prof.dbf enthält die Nummercodierung der BFG und der zugehörigen BF, die Namen, Landnutzungsanteile und Landnutzungsart je BF und Angaben zur Grund-, Stau- und Hangnäse pro BF.
- Horiz.dbf beinhaltet: Nummer der BF, Horizontsymbol, Horizontuntergrenze (cm), Horizontmächtigkeit (cm), Bodenfarbe, Bodenart und Skelettanteil.

- Schi.dbf enthält Angaben zur Kennzeichnung der Schichten und Substrate, aus denen sich im Laufe der Bodenbildung die Horizonte entwickelten. Die Tabelle umfasst die Nummer der Bodenform, Schichtuntergrenze (cm), Schichtmächtigkeit (cm), Stratigraphie und Petrographie der jeweiligen Schicht sowie Art und Anteil der Feinkomponente.

Der sich daraus ergebende Punktdatensatz mit Relief- und Landnutzungsdaten, Profil- und Schichtangaben wird im Folgenden **Kartendatensatz** genannt. Mit ihm wird die Sedimentbilanz Ia (Kap. 2.1.1) berechnet.

Für die vorliegende Arbeit wurde vom *Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz* des Weiteren ein analoger Punktdatensatz zur Verfügung gestellt, der die originalen Profilbeschreibungen des Kartierers umfasst, die für die Erstellung der BK 50 zwischen 1997 und 2003 im Speyerbach-Einzugsgebiet erhoben wurden. Hierbei handelt es sich um dieselben bodenkundlichen Kenngrößen, allerdings liegt keine Zuordnung der einzelnen Punkte zu den jeweiligen Bodenformen vor. Man muss sich eines Umweges bedienen: Über die *Point-in-Polygon*-Abfrage im GIS ist es möglich, Punkte den kombinierten Nutzungs-/BFG-Polygonflächen zuzuordnen. Dafür gibt es Koordinaten sowie Relief- und Landnutzungsdaten. Der sich daraus ergebende Punktdatensatz wird im Folgenden **Grunddatensatz** genannt. Mit ihm wird die Sedimentbilanz Ib (Kap. 2.2.3) berechnet.

Die für die Sedimentbilanzierung relevanten Angaben sind die Mächtigkeitsangaben der Hauptlagen (schi.dbf), die Mächtigkeiten der Al/Bt- bzw. rBt-, fBt-, Bt-Sd- oder Btv-Bt-Horizonte (horiz.dbf) und die Untergränze der tiefsten holozänen Schichten (Schi.dbf). In die holozänen Schichten sind auch Ap-Horizonte einbezogen, auch wenn sie streng genommen nicht nur durch Wasser sondern auch durch Bodenbearbeitungen umgelagert wurden.

Für die Sedimentbilanz Ib lagen Trockendichte-Messwerte von zehn Profilen vom *Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz* im Bereich der Kartenblätter Elmstein und Hochspeyer vor. Aus den Werten für die Ap- und M-Horizonte wurde ein Mittelwert von $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $0,13 \text{ g cm}^{-3}$ für die kolluvialen Sedimente ($n = 5$) berechnet. Der Mittelwert der Trockendichte aller 29 Horizonte, die in einer Hauptlage entwickelt sind, beträgt $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ mit einer Standardabweichung von $0,13 \text{ g cm}^{-3}$.

Damit die bodenkundlichen Punktdaten ausgewertet werden konnten, wurden sie im Falle des Grunddatensatzes digitalisiert und auf Konsistenz geprüft. Dabei traten in beiden Datensätzen Duplikate auf. Wenn einer Bodenform zwei gleiche Mächtigkeiten für Hauptlagen gegeben wurden, so wurde ein Wert gelöscht. Wenn zwei unterschiedliche Mächtigkeitsangaben auftraten wurden beide Einträge gelöscht, da nicht bestimmbar ist, bei welchem Wert es sich um

den richtigen handelt. Aus dem 356 Hauptlagenwerte umfassenden Kartendatensatz wurden auf diese Weise 22 Mächtigkeitenangaben für die Hauptlagen ausgeschlossen (7 %). Zieht man von den übrig bleibenden 330 Werten nur diejenigen in Betracht, die im Speyerbach-Einzugsgebiet liegen, so sind 184 Hauptlagenmächtigkeiten verfügbar. 90 kolluvial geprägte Profile gingen in die Sedimentbilanz Ia des Speyerbach-Einzugsgebiets ein.

Im Grunddatensatz mussten Punkte ausgeschlossen werden, die entweder keine Koordinaten aufweisen, innerhalb von Siedlungsflächen oder außerhalb des Einzugsgebiets liegen. Aus dem 542 Punkte umfassenden Datensatz wurden auf diese Weise 4,4 % der Beschriebe entfernt. 518 Hauptlagenmächtigkeiten und 152 Profile mit kolluvialen Horizonten wurden für die Berechnung der Sedimentbilanz Ib verwendet.

2.1.2 Landnutzungsdaten

Die verwendeten ATKIS-Daten sind nach BoFA reklassifizierte Landnutzungsinformationen, die vom *Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation* (LVG) regulär auf Länderebene zur Verfügung stehen (Basis-DLM). Es handelt sich um eine Landnutzungskarte im Maßstab 1:25 000, die 2001 das letzte Mal mit Orthophotos aktualisiert wurde. Diese Karte umfasst 14 Klassen, darunter eine vegetationslose, drei Wald-, zwei Grünland-, zwei Acker-, eine Gewässer-, vier Siedlungsklassen und Siedlungsfreiflächen. Werden diese in die Kategorien Wald, Grünland, Wasser, Siedlung sowie Siedlungsfreiflächen zusammengefasst, so ergeben sich für den Speyerbach die in Abbildung 10 dargestellten km²-Flächenanteile der Nutzungsklassen nach LVG. Im Vergleich dazu wurde bei der BoFA-Reklassifizierung alles was nicht Wald oder Grünland ist (also Gewässer und Siedlungsflächen) der Klasse Acker zugeordnet. Da diese Klassifizierung für die vorliegende Arbeit nicht geeignet scheint, wurden alle Siedlungs- und Verkehrsflächen im weiteren Sinne in der Klasse Siedlung summiert. Auch Gewässerflächen bleiben als eigene Klasse bestehen. Beide Klassen gehen nicht in die Sedimentbilanzierung ein. Siedlungsfreiflächen wurden dem Grünland zugeordnet (vgl. Abb. 10: Klassifizierung nach HF).

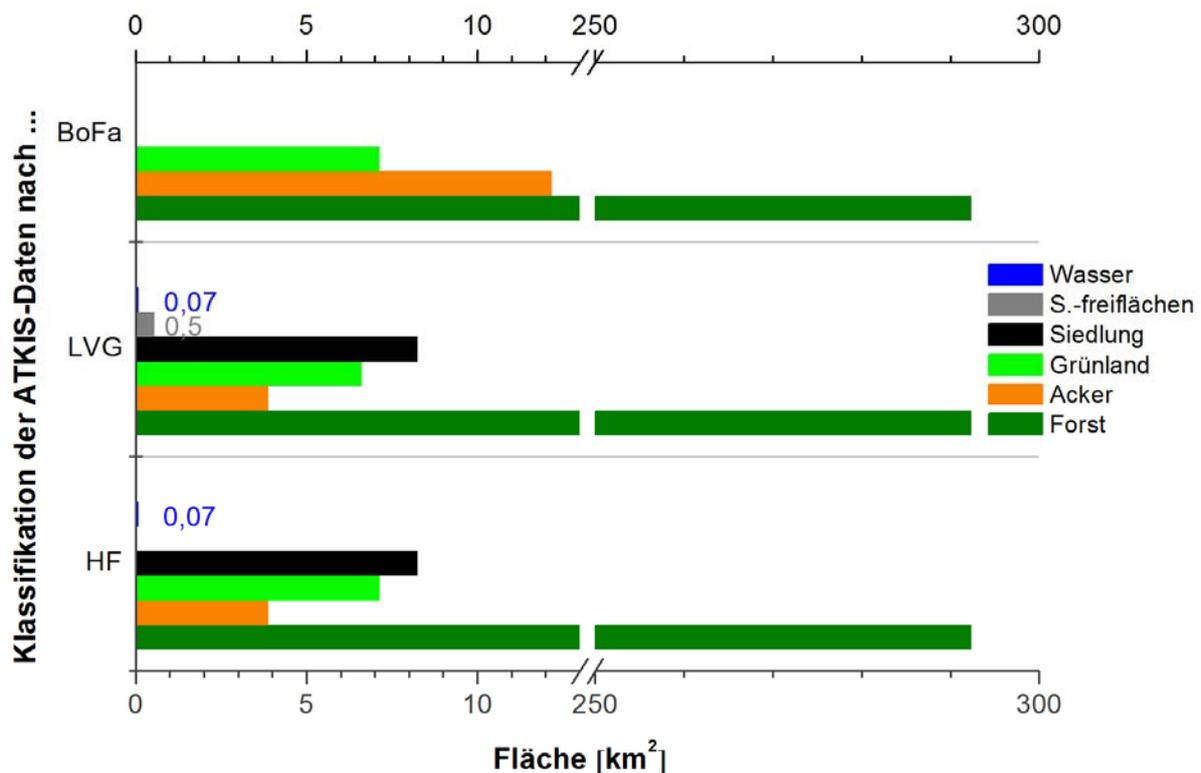


Abb. 10: Flächenanteil der Landnutzungsarten in der Klassifikation nach Bodenfachinformationssystem (BoFA), laut Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation (LVG) und nach der Autorin (HF).

Für die Volumenberechnung ist ein weiterer Arbeitsschritt notwendig, der sich aus dem Charakter der Bodenkarte ergibt. Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, stellt die BK 50 die Flächen von Bodenformengesellschaften dar. Da die Profildaten der BoFA-Datenbank jedoch Bodenformen zugeordnet sind, ist eine Disaggregation der BK 50 notwendig, die die Aggregation von Bodenformen zu einer Bodenformengesellschaft rückgängig macht.

Die Disaggregation der Flächen der BFG ist unter Zuhilfenahme von Landnutzungsdaten und der prof.dbf Datei möglich, da im BoFA nicht nur die Zugehörigkeit einer Bodenform zu einer Bodenformengesellschaft sondern auch deren Flächenanteil in Prozent pro Nutzungsklasse enthalten ist (Anhang 2). Im Einzelnen wurde wie folgt verfahren:

Als erstes wurde für den Kartendatensatz eine Reklassifizierung der ATKIS-Klassen nach BoFA vorgenommen und die BK 50 damit verschnitten. Es entstand eine Datei mit nach Nutzung geteilten Flächen der Bodenformengesellschaften. Diese Polygone wurden mit dem Symbol der Nutzungsklasse und der Nummer der Bodenformengesellschaft gekennzeichnet (z. B. A1, F1, G1, A2, F2, etc.). Bis hierhin konnte die Disaggregation räumlich im GIS nachvollzogen werden (s. Anhang 2). Nun mussten die Teilflächen anhand des Flächenanteilschlüssels der prof.dbf in die jeweiligen Bodenformflächen aufgeteilt werden. Dies konnte nur

noch rechnerisch erfolgen. Aus den errechneten Flächenprozenten und den disaggregierten Teilflächen wurden nun die Flächen der Bodenformen bestimmt (vgl. Anhang 3). Hierbei lag nicht für jede der disaggregierten Flächen ein Zuordnungsschlüssel vor. Dies kann daran liegen, dass die ATKIS-Landnutzungsdaten nicht mehr die Nutzung widerspiegeln, die bei der Kartierung bestand. Auch Siedlungsflächen wurden ausmaskiert, so dass insgesamt 4,07 % (12,7 km²) der Einzugsgebietsfläche aus den Berechnungen ausgeschlossen wurden.

2.2 Ergebnisse der Sedimentbilanz I

2.2.1 Ergebnis der Sedimentbilanz Ia

Die Bilanzierung der holozänen Erosion und Sedimentation aus den öffentlich verfügbaren Daten des Landesamtes (Sedimentbilanz Ia, im Folgenden SB Ia) ergibt für den **Kartendatensatz** des Speyerbach-Einzugsgebiets folgende Kennwerte:

Tab. 4: Ergebnis der holozänen Sedimentbilanz I für den Kartendatensatz mit BoFA reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 60$ cm für Hauptlagen und 105 cm für Parabraunerden und mit einer Trockendichte von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ (Bezugsszenario K_0).

	Volumen (10^6 m^3)	Masse (10^6 t)
Erosion	27,11	38,76
Sedimentation	18,57	26,56
Austrag	8,53	12,20
SDR %	31,48	31,48

Bezüge man die Volumina auf die Gesamtfläche des Speyerbach-Einzugsgebiets so wären 9 cm m⁻² erodiert und 6 cm m⁻² sedimentiert worden. Zu diesem Ergebnis kommt man, wenn man über den oben beschriebenen Kartendatensatz, die BK 50 und die ATKIS-Daten verfügt und als Berechnungsgrundlage eine initiale Sedimentmächtigkeit von $h_{LHSp} = 60$ cm bzw. $h_{LLSp} = 105$ cm ansetzt. Wie aus diesen Werten erkennbar ist, wurden im Einzugsgebiet rund zwei Drittel des erodierten Materials sedimentiert (Tab. 4). Da der Austrag aus der Differenz von Erosion und Sedimentation berechnet wird, müssen fast ein Drittel der Sedimente das Einzugsgebiet bei Neustadt an der Weinstraße verlassen haben. Leider liegen für den Speyer-

bach keine aktuellen Sedimentfrachtmessungen vor, so dass nicht abgeschätzt werden kann, ob der ermittelte Austrag zumindest unter aktuellen Messbedingungen plausibel ist.

2.2.2 Sensitivitätsanalyse zur Sedimentbilanz Ia

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Sedimentbilanz Ia, getrennt nach variierenden Parametern diskutiert.

a) Einfluss der Berechnungsgrundlage auf das Ergebnis

Für den Kartendatensatz wurde ein Wert von 60 cm als initiale Hauptlagenmächtigkeit ermittelt. Vergleicht man die damit berechneten Bilanzterme mit den Ergebnissen auf Grundlage des Grunddatensatzes ($h_{LHSp} = 70$ cm), so erhöht sich der Erosionsbetrag auf das Doppelte (Abb. 11). Bei dieser Betrachtung bleibt die Sedimentationsmenge konstant. Daraus folgt ein um das Vierfache höherer Austrag, das Verhältnis von Austrag zur Erosion (SDR) steigt dadurch auf 66 %. Die Auswahl der Berechnungsgrundlage beeinflusst demnach massiv die Erosion und damit den Austrag aus dem Einzugsgebiet.

b) Einfluss der Tiefen bzw. Mächtigkeitsangaben auf das Ergebnis

Für Tiefenangaben werden in Deutschland keine Fehlerbereiche angegeben, dennoch sagen bodenkundliche Kartierer gewöhnlich, dass es auf 5 cm bei der Horizontgrenze nicht ankommt. Dahinter verbirgt sich die Ansicht, dass das Auf- oder Abrunden in 5 cm Intervallen gegenüber der kleinräumigen Variabilität im Gelände nicht ins Gewicht fällt bzw. durch den Bezug eines Punktwertes auf die Fläche sich mehr oder weniger ausgleicht. Veranschlagt man diesen Wert für ein Minimum- und Maximum-Szenario so ergeben sich bei der Bilanzierung sehr starke Abweichungen im Volumen (Abb. 11). Während sich beim Minimum-Szenario die Erosion um rund 52 Prozentpunkte erhöht, verringert sich die Erosion beim Maximum-Szenario auf 66 % von K_O . Dass die prozentualen Abweichungen zwischen Minimum und Maximum pro Term nicht gleich sind, hängt damit zusammen, dass sich die Erosion unproportional zur Sedimentation verhält. Durch eine Addition von x cm zur aktuellen Hauptlagenmächtigkeit nehmen der Kappungsbetrag und damit auch der Erosionsbetrag ab und teilweise entfallen ganze Flächen aus den Berechnungen. Aufgrund gleich bleibender Sedimentationsabweichungen entstehen die großen Unterschiede im Austrag und der SDR. Mit rund 275 % von K_O verdreifacht sich der Austrag beim Minimum-Szenario, während der Wert beim Maximum-Szenario negativ wird (-16 % von K_O).

c) Einfluss der Flächen auf das Ergebnis

Durch die unterschiedliche Aktualität der Landnutzungsdaten kann es bei der Disaggregation der Bodenkarte zu Änderungen in den Flächengrößen kommen. Wie in Kapitel 2.1.2 erklärt wurde, ist die BoFA-Reklassifizierung sehr grob. Verwendet man stattdessen bei der Disaggregation der BFG-Flächen die Reklassifikation nach HF so werden 2 % der Einzugsgebietsfläche von den Berechnungen ausgeschlossen, weil es sich um Siedlungs- oder Wasserflächen handelt. Zwischen den zwei verschiedenen Landnutzungs-klassifikationen sind die Schwankungen der Bilanzterme nur unwesentlich und liegen vor allem im Sedimentationsterm. Der SDR verändert sich jedoch nur gering, es wird demnach 27 % mehr Material ausgetragen. Durch die Kombination der HF-Reklassifikation mit den ± 5 cm Szenarien verstärken sich die Abweichungen vom Bezugsszenario. Am stärksten ändern sich Austrag und SDR des HF-Minimum-Szenarios. Sie betragen 300 bzw. 198 % des K_O -Werts (Abb. 11).

d) Zusammenfassender Vergleich

Abbildung 11 gibt einen Überblick über alle berechneten Sensitivitätsszenarien für den Kartendatensatz. Dabei zeigt sich, dass die Differenz von 10 cm in der Berechnungsgrundlage die größte Abweichung des Austrags und des SDR vom Bezugsszenario bewirkt.

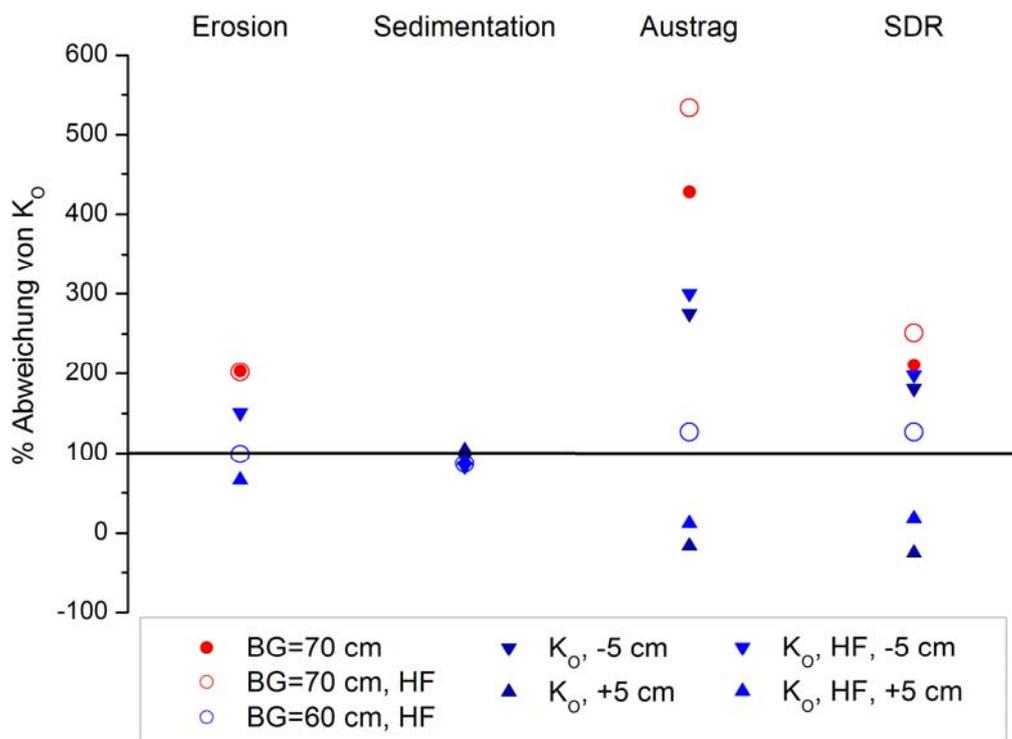


Abb. 11: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario K_O auf Grundlage der BoFA-reklassifizierten ATKIS-Daten, mit $h_{BG} = 60$ cm für Hauptlagen und 105 cm für Parabraunerden und einer Trockendichte von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ (BG: Berechnungsgrundlage, HF: nach der Autorin reklassifizierte ATKIS-Daten).

Auch die Simulation mit um 5 cm veränderten Hauptlagenmächtigkeiten verursacht noch Abweichungen bis zu 275 %. Dabei werden beim Maximum-Szenario die Austrags- und damit auch die SDR-Werte negativ. Am geringsten ist der Einfluss der Fläche. Bei der Verwendung der HF-Reklassifikation der ATKIS-Daten schwanken die Bilanzterme lediglich bis zu 27 %.

2.2.3 Ergebnis der Sedimentbilanz Ib

Da für den Grunddatensatz keine Zuordnung der Profildaten zu den Flächendaten der Bodenformen vorliegt, wird ein Umweg bestritten: Über die *Point-in-Polygon*-Abfrage im GIS ist es möglich, Punkte den kombinierten Nutzungs-/BFG-Polygonflächen zuzuordnen. Ist diese Zuordnung erfolgt, kann man sich aus der Stichprobe der in einer Fläche liegenden Punkte die Verteilung der Hauptlagenmächtigkeiten ansehen und Mittelwert-, Minimum- und Maximum-Bilanzen aufstellen. Lagen für eine Fläche sowohl Hauptlagenprofile als auch Parabraunerde-Profile vor, so wurden die Erosionstiefen der Parabraunerden für die Berechnung verwendet. Dadurch wird der Erosionsterm in der Gesamtbilanz maximiert. Für die Vergleichbarkeit mit den Kartendatensatz-Ergebnissen wird das arithmetische Mittelwert-Szenario mit einer Berechnungsgrundlage (h_{LH}) von 70 cm für Hauptlagen-Profile und 105 cm für Parabraunerden (h_{LL}) sowie einer Trockendichte von $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ für die erodierten und $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ für die kolluvialen Sedimente vorgestellt (Tab. 5).

Tab. 5: Ergebnisse der Sedimentbilanz Ib für das Speyerbach-Einzugsgebiet berechnet mit dem Mittelwert des Grunddatensatzes, HF reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 70$ bzw. 105 cm und $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ bzw. $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ (Bezugsszenario G_0).

	Volumen (10^6 m^3)	Masse (10^6 t)
Erosion	193,22	247,23
Sedimentation	171,58	228,21
Austrag	21,63	19,11
SDR %	11,20	7,73

Bezieht man die Volumina auf die Gesamtfläche des Speyerbach-Einzugsgebiets so wären 65 cm m^{-2} erodiert, aber 57 cm m^{-2} sedimentiert worden. Die errechneten Erosions- und Sedimentationsmengen sind viel höher als die der Sedimentbilanz Ia. Aber auch der Austrag ist höher als bei der Sedimentbilanz Ia und daher ist der SDR niedriger. Hierbei gilt zu

beachten, dass die Berechnungsgrundlage 70 cm beträgt, die Werte also nicht direkt vergleichbar sind.

2.2.4 Sensitivitätsanalyse zur Sedimentbilanz Ib

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Sedimentbilanz Ib (im Folgenden SB Ib) in Abhängigkeit von den variierenden Parametern diskutiert. Das Mittelwertszenario wird zum Bezugsszenario gewählt.

a) Einfluss der Berechnungsgrundlage

Setzt man zur Berechnung der Sedimentbilanz Ib die Berechnungsgrundlage auf 60 cm (dies entspricht der des Kartendatensatzes), so verringert sich die Erosion um 4 %, der Austrag beträgt dann rund 14 Mio. m³, der SDR nur noch 8 %.

b) Einfluss der Mächtigkeiten auf die Bilanz: Rundung des Mittelwertes

Als erstes wurde der Einfluss des Auf- oder Abrundens des Mittelwertes auf Zehner- und Fünferwerte berechnet. Allein dieser Schritt führt zu einer Abweichung von rund 3 % bei Erosion und Sedimentation und von 17 bis 33 % im Austrag bzw. dem SDR. Dieser Schritt ist nur bei den gegebenen Daten möglich, zeigt aber, wie sich die Auf- oder Abrundung, die die Kartierer meist schon im Gelände vornehmen, auf die Sedimentbilanzierung im Einzugsgebiet auswirkt (Abb. 12).

Subtrahiert bzw. addiert man nun noch von diesem gerundeten Mittelwert 5 cm zu den aktuellen Hauptlagenmächtigkeiten, wie bei der Sensitivitätsanalyse des Kartendatensatzes, so ergeben sich abweichende Austräge von über 200 % (Abb. 12). Hier sind die Abweichungen beim Erosionsterm erneut größer als beim Sedimentationsterm.

c) Einfluss der Mächtigkeiten auf die Bilanz: Minimum und Maximum

Anstelle des systematischen Fehlers der Mächtigkeiten von ± 5 cm wurden die statistischen Minimum- und Maximum-Werte der Stichprobe für die Hauptlagenmächtigkeiten und die kolluvialen Sedimente gewählt. Wie in Abbildung 12 dargestellt, sind die Abweichungen vom Bezugsszenario bei dieser Vorgehensweise noch stärker als beim Kartendatensatz. Die höchsten Abweichungen vom Bezugsszenario sind auch hier beim Minimum-Szenario zu verzeichnen. In dieses Szenario geht das Minimum der Hauptlagen und Sedimentmächtigkeiten je disaggregierter Bodenformenstichprobe ein. Die Erosion wird so im Bezug auf die anderen zwei Szenarien maximiert, die Sedimentation minimiert und damit ein fast fünffacher

Austrag erreicht. Das Maximum-Szenario ergibt sich aus den höchsten Hauptlagenmächtigkeiten, also sehr geringen Erosionstiefen, sowie den höchsten Sedimentationswerten pro disaggregierter Bodenform. Daraus ergibt sich eine stark negative Bilanz (SDR = -45 %) (vgl. Abb. 12).

d) Einfluss der Trockendichten auf die Bilanz

Für den Vergleich wurde das Grunddatensatz-Bezugsszenario mit Trockendichten von $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ und $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$ sowie der Trockendichte der Sedimentbilanz Ia ($1,43 \text{ g cm}^{-3}$) berechnet. Die Abweichungen, die durch die Verwendung unterschiedlicher Trockendichten entstehen, bewegen sich zwischen maximal 12 % bei Erosion bzw. Sedimentation und maximal 162 % bei Austrag und SDR (Abb. 12). Damit ist der Einfluss der Trockendichten auf die Berechnung der Tonnagen größer als der der Rundung des Mittelwertes bei der Volumenberechnung.

e) Einfluss der Fläche

Der Einfluss der Flächenänderung ist im Vergleich zu den anderen Tests sehr gering. Die Verwendung der BoFA-reklassifizierten ATKIS-Daten für die Berechnung führt nur zu Abweichungsbeträgen im Nachkommabereich.

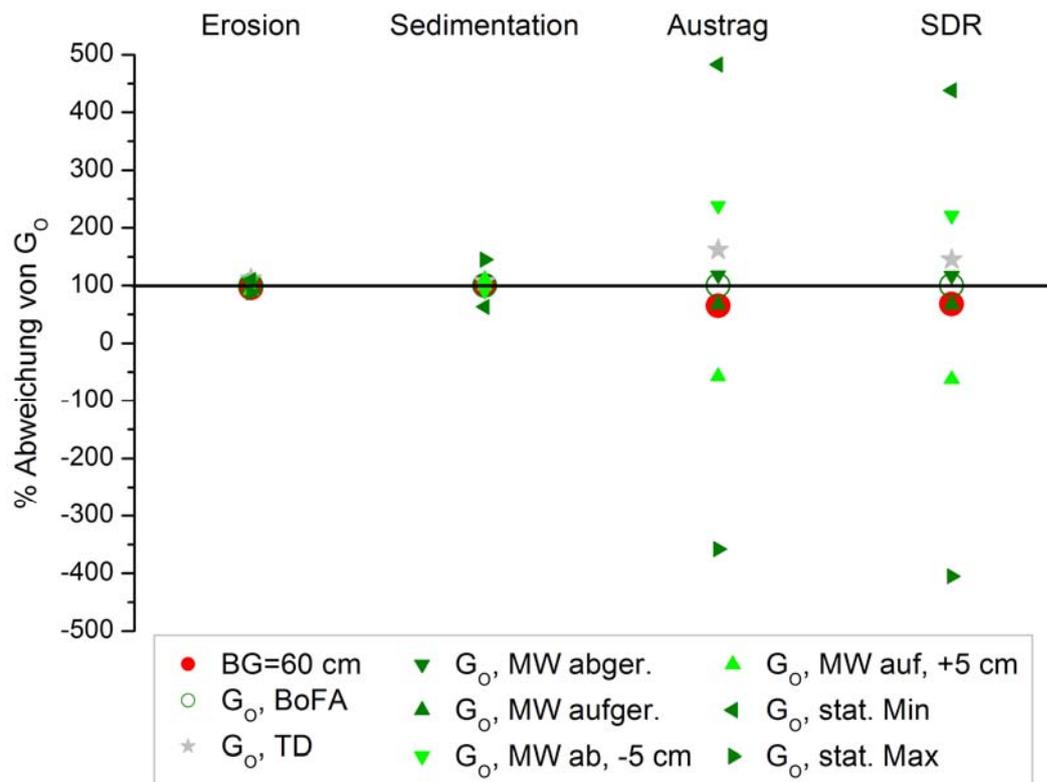


Abb. 12: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario G_O basierend auf dem Mittelwert des Grunddatensatzes, nach Autorin reklassifizierten ATKIS-Daten, $h_{BG} = 70 \text{ cm}$ bzw. 105 cm und $\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ bzw. $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$.

f) Zusammenfassender Vergleich

Aus der Sensitivitätsanalyse des Grunddatensatzes lässt sich für das Speyerbach-Einzugsgebiet folgende Reihung für den SDR aufstellen: Flächenänderung < $MW_{abger.}$ < $MW_{aufger.}$. $BG = 60 \text{ cm} < MW_{auf+5cm} < MW_{ab-5cm} < \text{stat. Max.} < \text{stat. Min.}$. In der Sedimentbilanz Ib hat die Flächenänderung keine Rolle gespielt. Das Auf- bzw. Abrunden von Messwerten hat einen geringeren Einfluss als die systematische Variation der Mächtigkeiten oder der Berechnungsgrundlage.

2.3 Räumliche Differenzierung der Ergebnisse

Wie in Kapitel 1.3.6 vorgestellt, wurden zwei Teileinzugsgebiete des Speyerbachs ausgewählt, um die räumliche Heterogenität der naturräumlichen Gegebenheiten in dieser Mittelgebirgslandschaft abzubilden. Im Folgenden wird anhand der Sedimentbilanzen Ia und Ib überprüft, ob sich diese Unterschiede auch in der Langzeitdynamik der Sedimentflüsse ausgewirkt haben.

Nach den Berechnungen der Sedimentbilanz Ia überwiegt die Erosion im Hochspeyerbach die Akkumulation nur knapp, so dass der SDR rund 10 % annimmt (Tab. 6). Die flachen Hänge und breiten kastenartigen Täler fungieren hier als Zwischenspeicher. Während die Erosion in diesem Teileinzugsgebiet rund ein Zehntel des gesamten Speyerbachs beträgt, ist die Sedimentation im Hochspeyerbach rund ein Sechstel des Speyerbach-Einzugsgebiets.

Tab. 6: Sedimentbilanz Ia – Terme für das Speyerbach-EZG (Sp), den Hochspeyerbach (Hsp) und den Erlenbach (Erl) mit $h_{LH} = 60$ bzw. $h_{LL} = 105 \text{ cm}$

Bodendaten	Kartendatensatz				
	BoFA-Reklassifizierung				
Landnutzung (ATKIS)	Sp	Hsp	% Sp	Erl	% Sp
Erosion (10^6 m^3)	27,11	2,71	10	4,74	17,5
Sedimentation (10^6 m^3)	18,57	2,45	13	2,34	13
Austrag (10^6 m^3)	8,53	0,26	3	2,40	28
SDR %	31,48	9,61	30,5	50,60	161

Im Erlenbach-Teileinzugsgebiet überwiegt die Erosion um rund das Zweifache die Sedimentation und es ergibt sich ein SDR von rund 51 %. Der SDR des Erlenbachs übersteigt die des Speyerbachs um rund das Zweifache. An der Gesamterosion im Speyerbach-Einzugsgebiet hat der Erlenbach rund ein Fünftel Anteil (Tab. 6).

Die Werte der Sedimentbilanz Ib sind eine Größenordnung höher als die der Sedimentbilanz Ia. Darüber hinaus bleibt das Ergebnis für den Erlenbach im selben Rahmen: Die Erosion beträgt ein Fünftel der Gesamterosion. Der $SDR_{\text{Erlenbach}}$ beträgt jedoch nur noch 26,2 % und ist damit um die Hälfte geringer als in der Sedimentbilanz Ia. Für das Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet wird die Sedimentbilanz Ib jedoch negativ (Tab. 7), obwohl die verwendeten Parameter die Erosion rechnerisch maximieren.

Tab. 7: Sedimentbilanz Ib – Terme für das Speyerbach-EZG (Sp), den Hochspeyerbach (Hsp) und den Erlenbach (Erl) mit $h_{BG} = 70$ bzw. 105 cm.

Bodendaten	Grunddatensatz				
	HF-Reklassifizierung				
Landnutzung (ATKIS)	Sp	Hsp	% Sp	Erl	% Sp
Erosion (10^6 m^3)	193,22	14,11	7	36,23	19
Sedimentation (10^6 m^3)	171,58	15,16	9	26,74	16
Austrag (10^6 m^3)	21,63	-1,05	-5	9,49	44
SDR %	11,20	-7,44	-66	26,20	234

2.4 Diskussion

Die sich im Folgenden anschließende Diskussion wird vor dem Hintergrund geführt, dass mit den offiziell verfügbaren Daten nur Sedimentbilanzen für das gesamte Holozän erstellt werden können. Die aus Bodendaten abgeleitete Erosion und Sedimentation kann demnach nur Spiegel kumulativer Prozesse sein, eine zeitliche Differenzierung der Prozessraten, Zwischenspeicherung und Reaktivierung von Material ist nicht möglich. Durch den Vergleich des gesamten Einzugsgebiets mit zwei in ihrer naturräumlichen Ausstattung verschiedenen Teileinzugsgebieten wird jedoch eine räumlich differenziertere Gesamtaussage angestrebt.

2.3.1 Interpretation der Sedimentbilanz I

Untersucht man genauer, wie die Erosionswerte in den Sedimentbilanzen Ia und Ib zustande kommen, so weisen 61 % der Fläche des Speyerbach-Einzugsgebiets bei der Sedimentbilanz Ia Erosion auf. Beim Grunddatensatz und der Sedimentbilanz Ib beträgt der Flächenanteil erodierter Flächen an der Gesamtfläche 94 %. Tabelle 8 gibt eine Übersicht, wie sich die Erosion, die an den Profilen berechnet wird, in der Fläche auswirkt. Es zeigt sich im Kartendatensatz (Tab. 8, blau), dass die Erosionsklassen 11 bis 20 und 31 bis 40 cm den gleichen Anteil an der Gesamterosion ausmachen, hier balancieren sich Erosionstiefe und Flächengröße aus. Stark erodierte Punkte haben dagegen einen vernachlässigbaren Effekt, da die davon betroffenen Flächen zu gering sind. Anders sieht es mit der kleinsten Erosionsklasse aus. Die von 1 bis 10 cm Erosion betroffenen Flächen machen rund ein Fünftel der Gesamterosion aus (Tab. 8, blau).

Tab. 8: Erosion dargestellt in 10 cm Klassen für den Kartendatensatz (blau) und den Grunddatensatz (grün), $n_{\text{gesamt}}/n_{\text{erodiert}}$ – Gesamtstichprobe/Anzahl der erodierten Profile und Flächen pro Datensatz; h_{BG} – Berechnungsgrundlage (= Wert des 0,95 Quantils) für die Sedimentbilanz des Speyerbach-EZG.

Erosion	Karten- datensatz	Erosion [%]	Erosion [10 ⁶ m ³]	Grund- datensatz	Erosion [%]	Erosion [10 ⁶ m ³]
h_{BG} (cm)	60			70		
$n_{\text{gesamt}}/n_{\text{erodiert}}$	184/155			518/485		
1 – 10 cm	79 Profile			78 Profile		
	63 Flächen	20,7	5,61	11 Flächen	0,1	0,2
11 – 20 cm	29 Profile			121 Profile		
	23 Flächen	30,7	8,32	27 Flächen	1,4	2,68
21 – 30 cm	32 Profile			129 Profile		
	23 Flächen	14,6	3,95	11 Flächen	1,4	2,61
31 – 40 cm	14 Profile			30 Profile		
	29 Flächen	29,8	8,09	19 Flächen	8,3	16,08
> 40 cm	1 Profile			127 Profile		
	30 Flächen	4,2	1,14	79 Flächen	88,8	171,65

Im Grunddatensatz (Tab. 8, grün) ist die Verteilung der Anteile der Erosionsklassen an der Gesamterosion stärker fokussiert. Hier liegen die meisten Erosionsprofile und davon betroffene Flächen in der Erosionsklasse >40 cm. Der Anteil der geringsten und höchsten Erosionsklasse ist gleichermaßen gering (Tab. 8, grün).

Betrachtet man die Anzahl der Profile, die bei der gewählten Berechnungsgrundlage (h_{BG}) nicht erodiert worden sind, so handelt es sich bei dem Kartendatensatz um 29 und im Grunddatensatz um 33. Von diesen 29 bzw. 33 Standorten weisen 6 bzw. 12 Hauptlagen auf, die 5 bis 30 bzw. 5 bis 45 cm mächtiger als 60 bzw. 70 cm ($= h_{BG}$) sind. Profile die keine Erosion aufweisen, wurden auf ihre räumliche Lage hin geprüft. Gerade in Schichtstufenlandschaften würde man erwarten, dass es auf den Plateaulagen nicht erodierte Gebiete gibt. Des Weiteren würde man prozess-aktualistisch annehmen, dass in Tiefenlagen und in Talschlüssen die Hauptlagen durch Sedimentation fossilisiert worden und somit in ihrer initialen Mächtigkeit erhalten geblieben sind. Die räumliche Verteilung der Standorte mit nicht erodierten Hauptlagen des Grunddatensatzes im Einzugsgebiet (Abb. 13 und Abb. 14) zeigt, dass sie sich nicht nur auf Wasserscheiden und Tiefenlagen beschränken.

Rund 50 % der nicht erodierten Punkte befinden sich in Mittel- oder Oberhangpositionen und hier sowohl in steilen als auch in flachen Bereichen. Standorte, die mächtigere Hauptlagen aufweisen als die Berechnungsgrundlage, liegen alle in Mittel- und Oberhangbereichen.

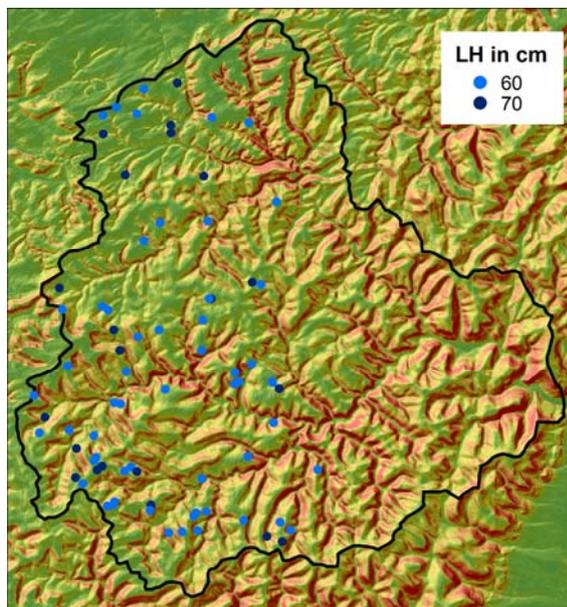


Abb. 13: Räumliche Verteilung der Punkte mit 60 bzw. 70 cm Hauptlagenmächtigkeit des Grunddatensatzes (keine Erosion).

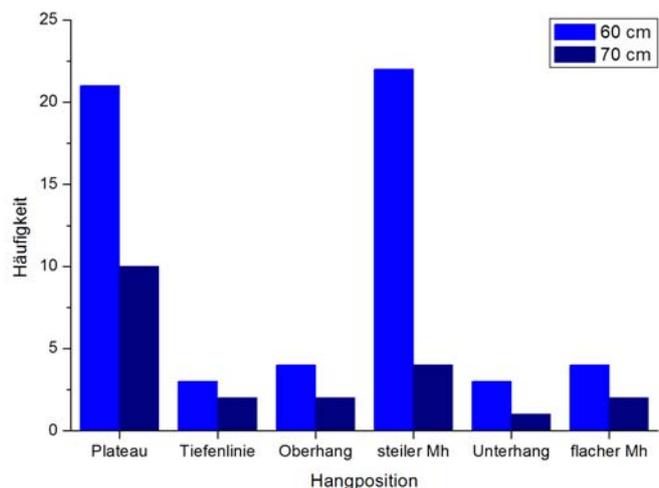


Abb. 14: Hangposition der 57/21 Standorte mit 60/70 cm Hauptlagenmächtigkeit des Grunddatensatzes (keine Erosion).

Da diese Profile gleichmäßig im Einzugsgebiet verteilt sind, an verschiedenen Tagen aufgenommen wurden und die aufgenommenen Profile an den Erhebungstagen breit streuen, ist es unwahrscheinlich, dass es sich hierbei um Kartierfehler handelt. Allerdings ist es auf dem gewählten Betrachtungsmaßstab 1:50 000 und angesichts der kleinen Stichprobe schwierig abzuschätzen, ob es sich hierbei um ein Phänomen kleinräumiger Variabilität handelt.

Andererseits muss aufgrund der geringen Anzahl nicht erodierter Standorte und der räumlichen Verteilung auch in Betracht gezogen werden, dass das simple Schema Erosion am Oberhang, Transport am Mittelhang, Sedimentation am Unterhang hier nicht ausreicht, um die Prozesse hinreichend zu beschreiben. Infolge der lokal intensiven Holznutzung des Pfälzerwaldes und der damit einhergehenden Verlagerung von Bodenmaterial ist es fragwürdig, ob diese Standorte als noch nicht erodiert anzusehen sind, oder ob sie nicht vielmehr im Moment der Bodenansprache wieder, und damit zufällig, 70 cm Mächtigkeit oder mehr aufweisen. Dies wäre der Fall, wenn verlagertes Material Hauptlagenmaterial wäre, das sich weder im Humus- noch im Skelettgehalt oder in der Lagerungsdichte von der Hauptlage unterscheidet. Eine solche Situation ist bei einer Pürckhauerbohrung im Gelände nicht von der Hauptlage zu unterscheiden und kann höchstens mithilfe von Indizien aus der Landnutzungsgeschichte, geochemischer Analysen oder Datierungen diskutiert werden.

Welche Aussagen kann man aus den Sedimentbilanzen, die mittels vorhandener bodenkundlicher Daten erstellt wurden, ableiten? Geht man dieser Frage mit Hilfe des allgemein zugänglichen Kartendatensatzes K_0 nach, so erhält man eine Sedimentbilanz für das Einzugsgebiet des Speyerbachs, die eine höhere Erosion (~ 27 Mio. m^3) als Sedimentation (~ 19 Mio. m^3) aufweist. Die Sedimentspeicherung im Untersuchungsgebiet überwiegt damit deutlich den Austrag aus dieser Mittelgebirgslandschaft (SDR ~ 31 %). Da keine Daten zur Sedimentfracht des Speyerbachs für das Einzugsgebiet vorliegen, kann keine Abschätzung vorgenommen werden, wie hoch der tatsächliche aktuelle Austrag des Speyerbachs ist. Aber auch, wenn dem so wäre, wäre eine Extrapolation über das gesamte Holozän gewagt.

Will man eine Einschätzung der Ergebnisse vornehmen, sollte man sich bei jedem Vergleich mit anderen Daten vergegenwärtigen, dass die bis jetzt vorgestellten Bilanzen auf bodenkundlichen Daten beruhen, die zum Zwecke einer bodenkundlichen Landesaufnahme erhoben worden sind. Zweck einer solchen Kartierung ist es in erster Linie, die Eigenschaften und räumliche Verteilung von Bodentypen oder -formen zu erfassen, nicht speziell Erosions- und Sedimentationsmerkmale. Dabei sind im Grunddatensatz mehr Erosions- und Sedimentationsmerkmale kartiert worden, als letztlich im aggregierten Kartendatensatz abgebildet werden. Zum Beispiel weisen die Ergebnisse der Sedimentbilanz Ia und Ib sowie Abbildung 15 darauf

hin, dass es sich bei der ermittelten Sedimentmenge der Sedimentbilanz Ia um einen Minimalwert handelt, der als Artefakt des Prozesses der Kartierung anzusehen ist. Wie das Diagramm zeigt, wurden wesentlich mehr kolluviale Lagen kartiert, als letztlich in den Kartendatensatz eingegangen sind.

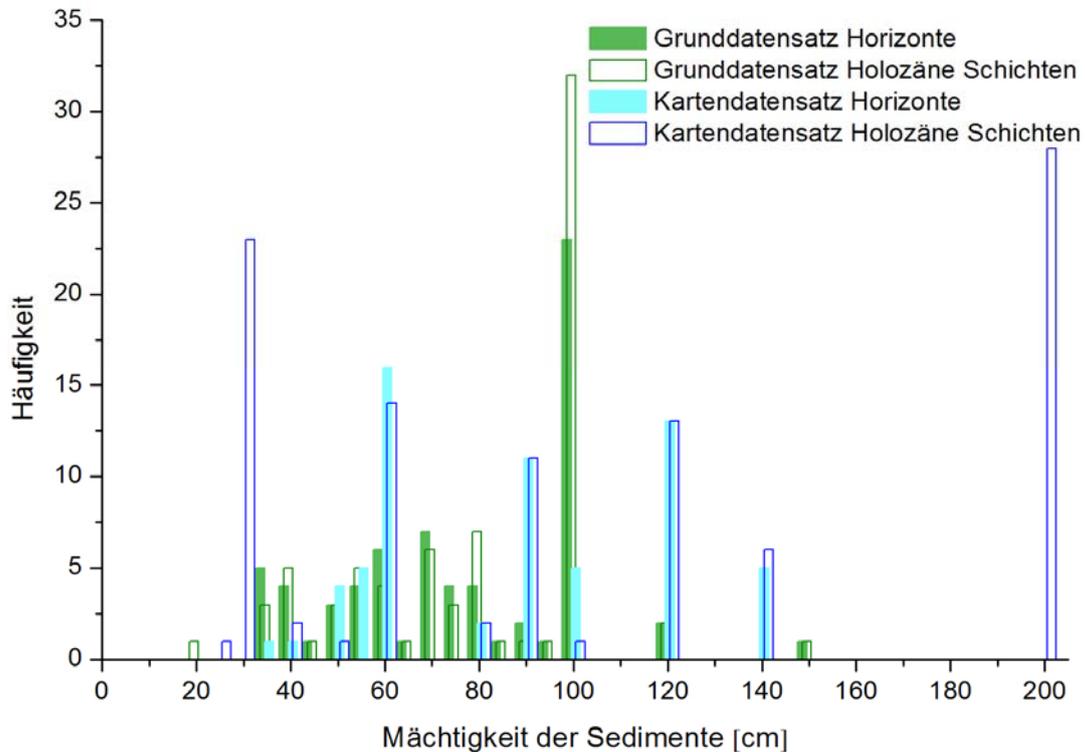


Abb. 15: Histogramm der Mächtigkeiten der akkumulierten Sedimente des Karten- und Grunddatensatzes, je nach angewandeter Interpretation der Rohdaten.

Woran liegt das? Die bodenkundliche Kartieranleitung KA4 (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996: 204) gibt vor, dass erst bei kolluvialen Horizontmächtigkeiten größer 40 cm ein Kolluvisol oder Übergangsbodentypen wie Gley-Kolluvisole oder Kolluvisol-Gleye ausgewiesen werden müssen. Sind die Mächtigkeiten geringer, so schlägt sich das in der Untereinheit Varietät nieder. Für die Erstellung der BK 50 werden dann mehrere Bodenformen zu einer Bodenformengesellschaft zusammengefasst. Dabei werden vor allem flächentypische Merkmale der Bodentypen und -formen erhalten, Besonderheiten und Eigenschaften von Varietäten gehen verloren. Allerdings wird die Entscheidung, welches Merkmal typisch ist, aus bodenkundlicher Sicht getroffen. Mächtige Sedimente sind in der BK 50 meistens nur in Trockentälern und Auenbereichen, in typischen Sedimentationsgebieten erfasst worden. Diese werden dann auch als eigene Kartiereinheit ausgewiesen (vgl. braune und blaue Flächen in Abb. 16).

Flächenprozent der Kolluvisole und Gleye je BFG im Speyerbach-EZG

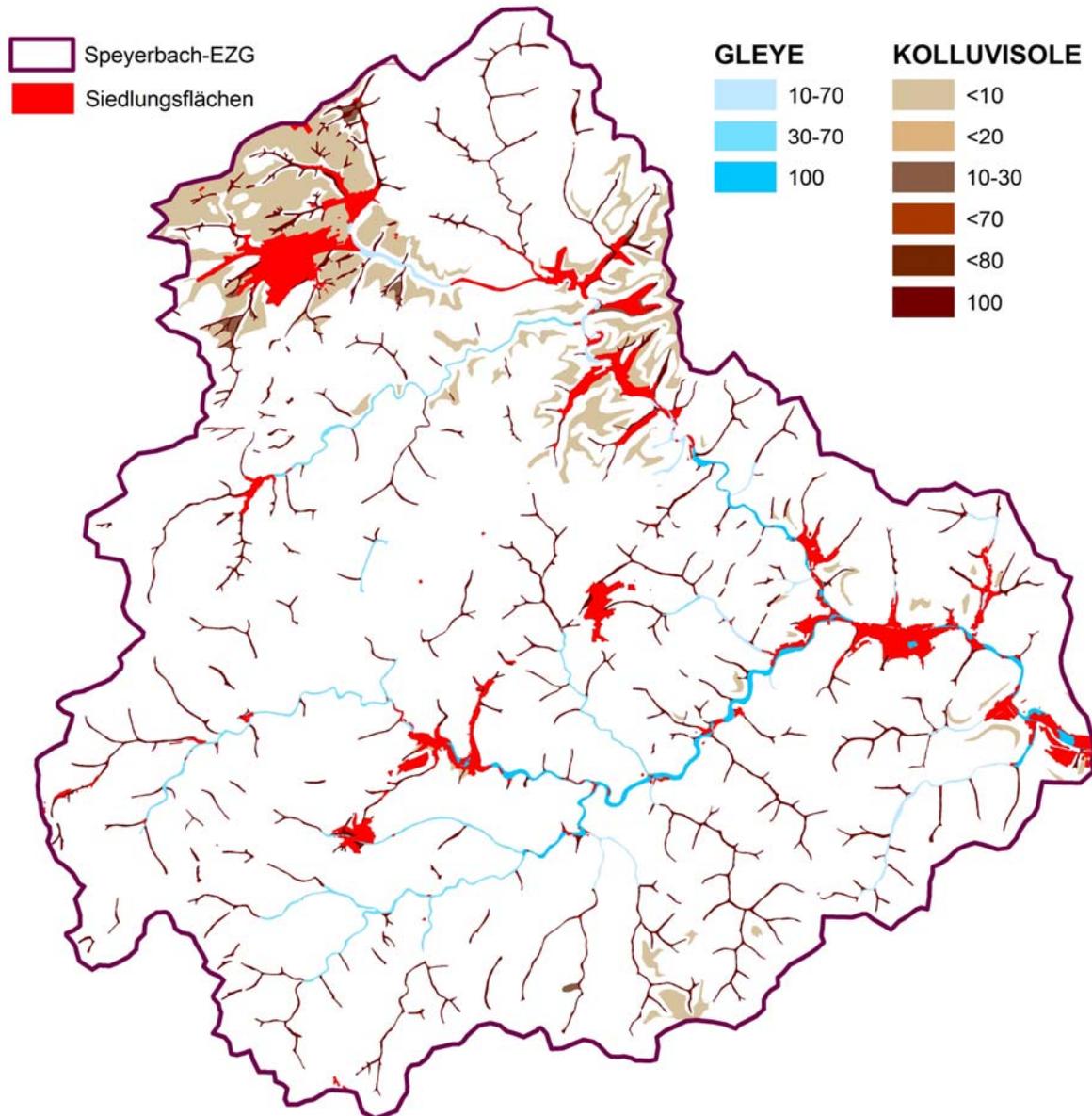


Abb. 16: Darstellung der BFG der BK 50 des Speyerbachs, in denen Gleye (Blautöne) oder Kolluvien (Brauntöne) in unterschiedlichen Flächenprozenten (Helligkeit) Anteil haben.

Auf den Hängen werden dagegen durch die BK 50 meist nicht kolluvial überprägte Hauptlagen-Profile ausgewiesen. Hier macht sich die Generalisierung bemerkbar. Der Kartierer identifiziert die kolluvial überdeckten Hauptlagenstandorte nicht als charakteristisch, sondern belegt die Kartiereinheit im Punktdatensatz mit einem Normalprofil. Ein solches Normalprofil repräsentiert die dominierenden Eigenschaften aller einzelnen Bohrungen einer Kartiereinheit. Dies ist in den wenigsten Fällen eine erodierte Braunerde. Die in der Sedimentbilanz I berechneten Akkumulationsvolumina sind demnach eine Minimumsschätzung der Realität.

Die Erosion wird in der Sedimentbilanz Ib eher überschätzt. In der Bilanz Ia konnte bodenformengenau entschieden werden, ob die Berechnungsgrundlage für Hauptlageprofile oder für Parabraunerden angewendet werden muss. Da in der Bilanz Ib dies nicht möglich ist, wurden, wenn für eine Bodenformengesellschaft Profile aus Hauptlagen und von Parabraunerden vorlagen, immer die Mächtigkeiten von Parabraunerden und die Berechnungsgrundlage von 105 cm initialer Bodenmächtigkeit zugrunde gelegt. Damit sind die Kappungsbeträge meist höher, als bei der Verwendung der Profile mit Hauptlagen. Somit wird der Erosionsterm der Sedimentbilanz Ib maximiert. Trotz dieses Schrittes reicht die Erosion im Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet nicht aus, um die kartierten und daraus berechneten Sedimente „zu produzieren“.

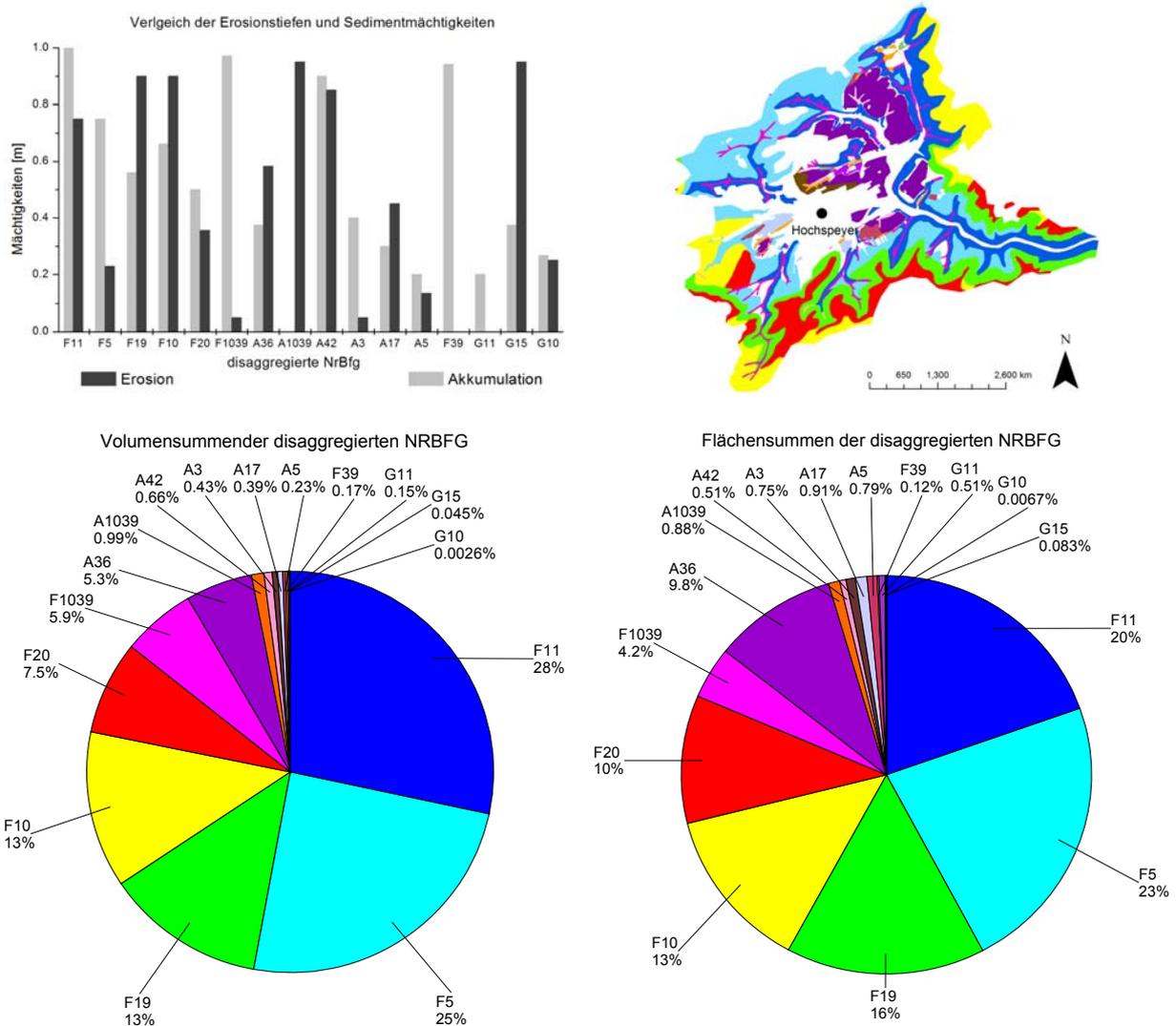


Abb. 17: Aufschlüsselung der Flächen- und Mächtigkeitsverhältnisse der Sedimente im Hochspeyerbach-Einzugsgebiet.

Betrachtet man Abbildung 17 genauer, sieht man, dass bei den drei Flächen F11, F5, F1039 und G11, die zusammen knapp 48 % der Teileinzugsgebietsfläche ausmachen, die Sedimen-

tationsmächtigkeiten höher sind als die Erosionstiefen. Diese Flächen liefern rund 59 % der Sedimente. Die Flächen F19, F10, A1039, A42, F11 und G15, bei denen die Erosionstiefe relativ hoch ist, liefern dagegen rund 65 % der Erosion, obwohl sie nur 50 % der Fläche einnehmen. Beim Vergleich der Ergebnisse von Sedimentbilanz Ia und Ib fällt vor allem der Größenordnungsunterschied auf. Während sich mit dem Kartendatensatz ein Erosionsvolumen von 27 Mio. m³ errechnet, beläuft sich die holozäne Erosion unter Verwendung des Grunddatensatzes auf rund 193 Mio. m³. Dies ist insbesondere daher verwunderlich, weil ja der Kartendatensatz aus dem Grunddatensatz abgeleitet wurde, beide also nicht unabhängig voneinander sind. Es muss deshalb diskutiert werden, ob es sinnvoll ist, die Mittelwertbildung auf die Flächen der disaggregierten Bodenformengesellschaften zu beziehen, oder ob man besser Erosions- und Sedimentationskarten mittels Interpolation erstellen sollte. HOUBEN ET AL. (2006) und ROMMENS ET AL. (2005) haben gezeigt, dass eine *kriging*-Interpolation der Erosions- und Sedimentationsoberflächen erfolgreich sein kann. Das Variogramm für die Hauptlagenmächtigkeiten des Grunddatensatzes (Abb. 18) verdeutlicht, dass dieses Verfahren für die gegebenen Daten keine sinnvollen Ergebnisse liefern wird, da keine Distanzabhängigkeit der Mächtigkeitsangaben existiert.

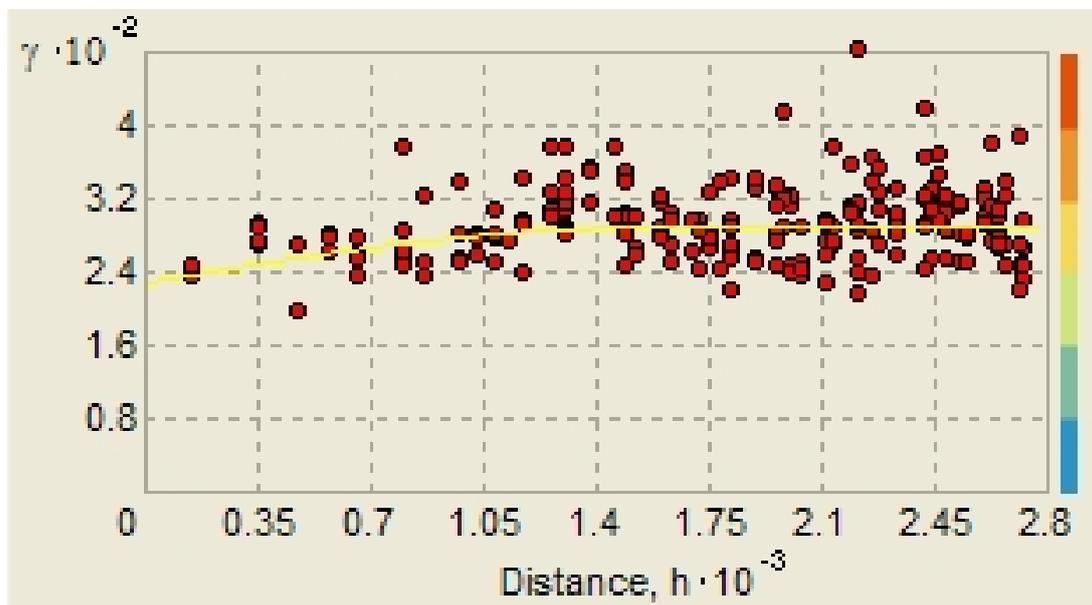


Abb. 18: Semivariogramm zum Pointkriging (Sphärisches Modell, Nugget = 228,22; Partial Sill = 60,217; RMS = 16,27) mit dem Grunddatensatz der Sedimentbilanz Ib.

Auch ein *cokriging* ist nicht möglich, da weder die Mächtigkeiten der Hauptlagen noch die der Kolluvien eine Korrelation mit Reliefparametern zeigt. Auch SCHOLTEN (2003) kann für Untersuchungsgebiete im Solling und im Osthartz keinen steuernden Einfluss der Höhe, Hangneigung, Exposition, relativen Hangneigungskrümmung oder der Höhe über Tiefenlinie auf die Mächtigkeiten der Hauptlage feststellen. DIETZE (2006) interpoliert Hauptlagenmächtig-

keiten in ausgewählten Bereichen des Tharandter Waldes, kann aber keine Reliefabhängigkeit erkennen. Seine Modellergebnisse weisen Fehler bis zu ± 20 cm auf. HERBST (2001: 54f) hat die Korrelation von Bodeneigenschaften mit Reliefparametern untersucht und nur für die Mächtigkeit des B-Horizontes eine Korrelation gefunden, die das *cokriging* erlauben würde.

RAAB & VÖLKE (2005) und FRÖHLICH & OPP (2005) kommen beide zu dem Schluss, dass der mikromorphologische Wechsel der Wölbung einen starken Einfluss auf die Zwischenspeicherung erodierten Materials hat. Die Korrelation der Hauptlagenmächtigkeit mit der Hangneigung, der Profil- und der Plankrümmung zeigt jedoch auch keine signifikante Abhängigkeit (FRÖHLICH & OPP 2005: 215). Die Autoren sehen darin ein Problem der Kartierdichte: Die Abhängigkeiten sind so kleinräumig, dass die aus dem 5 x 5 m DGM berechneten Reliefparameter für diese Auswertung zu grobe Werte liefern.

Auch HOUBEN (2008) kann keine Abhängigkeit der kartierten Sedimentmächtigkeiten von der aktuellen Hangneigung oder vertikalen Krümmung nachweisen ($R^2 = 0,08$). HOUBEN (2008) ist der Meinung, dass im landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet des Rockenbergs in der lössbedeckten Wetterau die mindestens seit dem 14. Jahrhundert eingerichteten Felder und Feldwege stark zur Gestaltung des aktuellen Reliefs beigetragen haben. Wie die Auswertung der historischen Entwicklung des Feldgrenzen und -wegenetzes im Rockenberggebiet gezeigt hat, spielt vor allem die Neuordnung der Feldgrößen eine große Rolle. Alte Feldwege und -grenzen verlieren dabei ihre Funktion und liegen innerhalb neuer Felder, werden damit zu Sedimentquellen für die Bearbeitungserosion.

BECKETT & WEBSTER (1971) geben an, dass R^2 größer als 0,7 bei räumlichen Daten sehr selten und $R^2 < 0,5$ üblich sind. Die aus den Hauptlagenmächtigkeiten des Grunddatensatzes und verschiedenen Reliefparametern berechneten Korrelationskoeffizienten schwanken zwischen 0,2 und -0,2 (Abb. 19) und sind damit im Vergleich mit dieser Angabe sowie den Prognoseergebnissen von Bodenmächtigkeiten mittels Reliefdaten von DAHLKE ET AL. (2009) sehr gering.

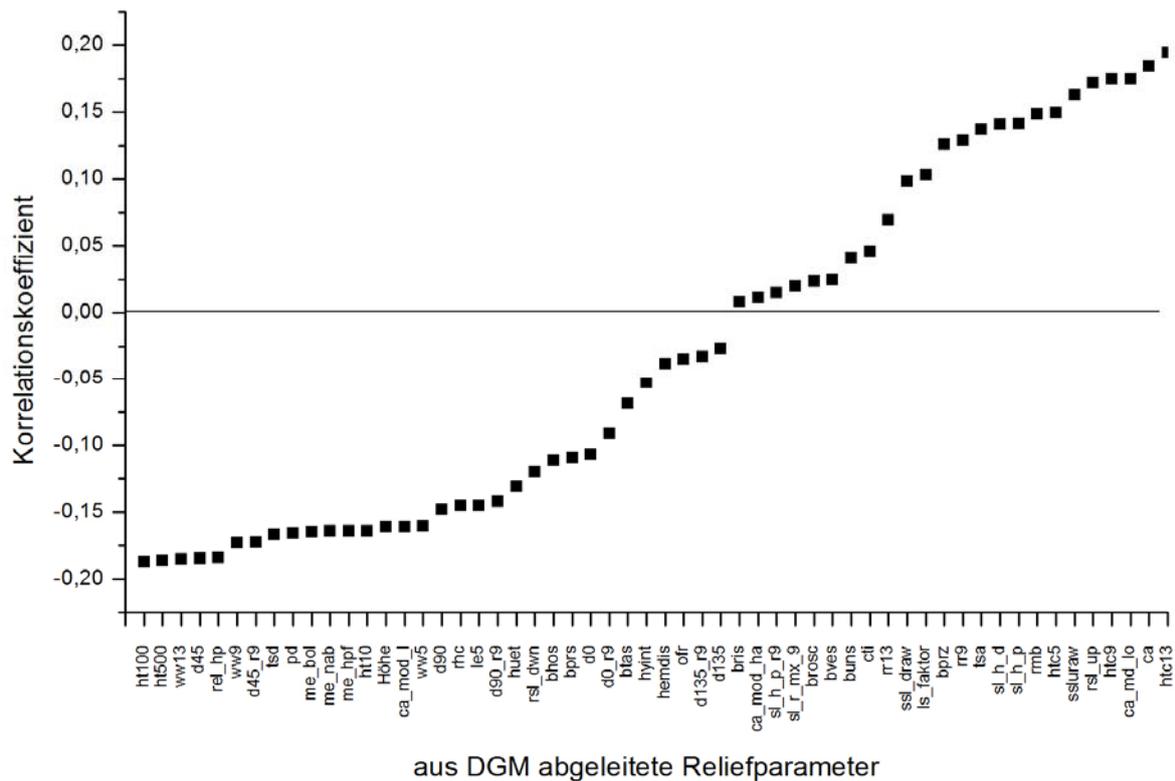


Abb. 19: Ergebnisse der Korrelation der Hauptlagenmächtigkeiten mit den verfügbaren Reliefparametern, die aus dem 20x20m DGM abgeleitet wurden.

DAHLKE ET AL. (2009) haben darüber hinaus bei ihren Untersuchungen zur Extrapolation von Bodentiefenangaben das arithmetische, das geometrische und das harmonische Mittel getestet, um Punktdaten einer Flächenklasse zuzuordnen. In ihrer Studie hatte das harmonische Mittel die höchste Prognosegüte erreicht. Bei der Berechnung der Hauptlagenmächtigkeiten pro disaggregierter Bodenformengesellschaft für das Speyerbach-Einzugsgebiet wurde mit dem arithmetischen Mittel gerechnet.

Ein Vergleich zwischen den verschiedenen Mittelwertbildungen zeigt, dass mit dem arithmetischen Mittel größere Mächtigkeiten erzielt werden. Damit wird die Erosionstiefe geringer und das berechnete Gesamtvolumen für die holozäne Bodenerosion am niedrigsten. Mit dem harmonischen Mittel sind die Mächtigkeiten am geringsten, was eine Erhöhung der Gesamterosion und einer Minimierung der Sedimentation zur Folge hat. Damit erhöht sich der Austrag um 240 %. Das bedeutet, dass das Ergebnis ebenso stark von der Wahl des Mittelwertes beeinflusst wird, wie von den Minimum- und Maximumszenarien.

Wie die Betrachtung zur Mittelwertbildung sowie die Sensitivitätsanalysen gezeigt haben, ist es höchst problematisch, die Punktwerte auf aggregierte Flächendaten zu beziehen. Im Kapitel 4 wird dieser Punkt noch einmal aufgenommen, wenn für die Sedimentbilanz II eine andere

Kartengrundlage und ein unabhängiger Profildatensatz verwendet werden. Über dieses methodenspezifische Problem hinaus, stellen die kartierten Kolluvien immer nur einen Minimalwert dar, da nicht zu ermitteln ist, wie viel Sediment nach der Ablagerung und vor der Überschüttung erodiert worden ist.

2.3.2 Diskussion im Literaturkontext

Das Verhältnis von Austrag zu Erosion in der Sedimentbilanz I zeigt mit 11 bzw. 31 %, dass ein Großteil des mobilisierten Sediments im Einzugsgebiet gespeichert wird. Diese Ergebnisse reihen sich in etwa in die Ergebnisspanne von 20 bis 29 % der Arbeiten in den Lössgebieten der Wetterau in Deutschland (HOUBEN ET AL. 2007) und dem belgischen Lössgürtel (ROMMENS ET AL. 2005) ein. Das ist umso überraschender, weil es sich in diesen Studien um wesentlich kleinere, flachere und stark landwirtschaftlich genutzte Untersuchungsgebiete handelt. Abbildung 20 verdeutlicht, dass die Ergebnisse der Sedimentbilanz I sich nicht ganz in den Trend einfügen, dass mit zunehmender Einzugsgebietsgröße der SDR abnimmt. Trotz der Bewaldung des Erlenbach-Teileinzugsgebiets wird mehr Sediment ausgetragen, als in den nicht so stark bewaldeten Teileinzugsgebieten der Dijle im Belgischen Lössgürtel.

Wie die Studie von ROMMENS ET AL. (2005) zeigt, sind die SDRs für das Nodebais-Einzugsgebiet, die auf der Grundlage von zwei verschiedenen Interpolationskarten berechnet wurden, sehr ähnlich, das *Average per Unit (APU)*-Ergebnis dagegen fast doppelt so hoch. ROMMENS ET AL. (2005) können keine Aussage treffen, welche Methode die beste ist, aber Bohrungen zeigen, dass die Sedimentation bei der APU-Methode bis auf Tiefenlinien überschätzt wurde, ebenso wie die Erosion.

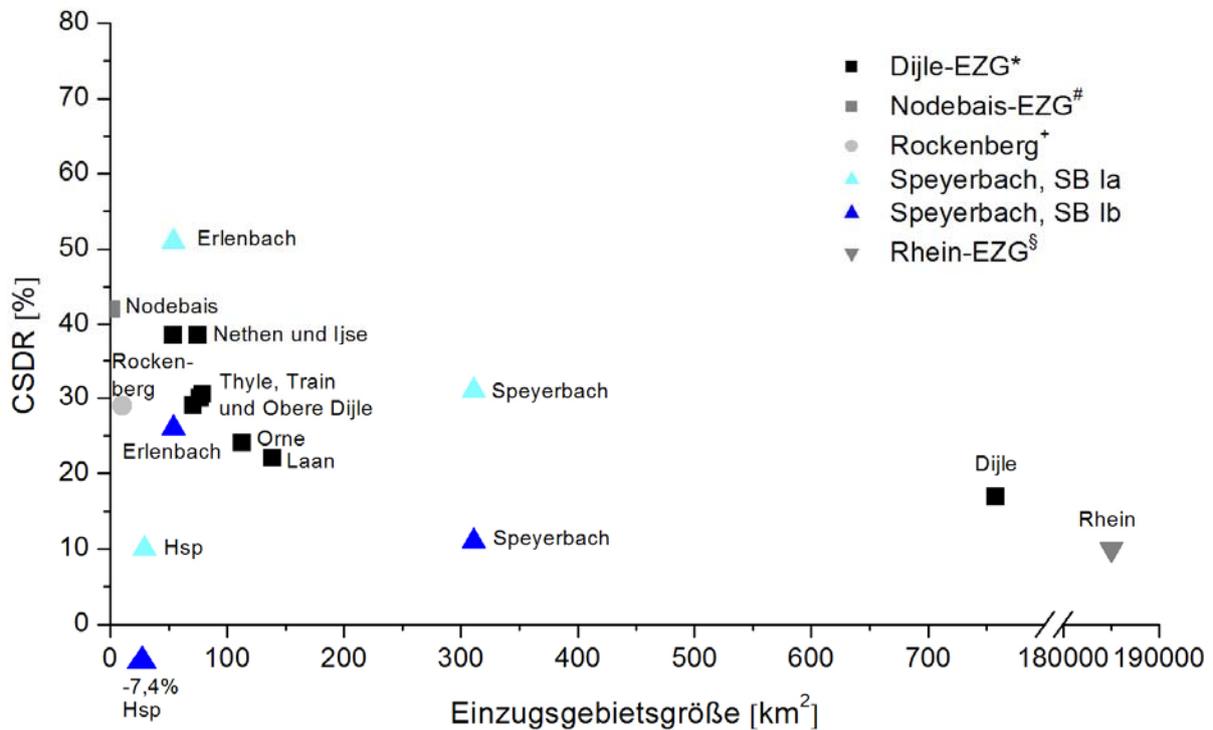


Abb. 20: Vergleichende Darstellung der *catchment sediment delivery rate* (CSDR) der Sedimentbilanz I mit weiteren, die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets erhoben worden sind (Daten von [§]HOFFMANN ET AL. 2007, ⁺HOUBEN ET AL. 2007, ^{*}NOTEBAERT ET AL. 2009 und [#]ROMMENS ET AL. 2005).

2.5 Abschätzung des aktuellen Abtrags mittels ABAG¹⁰

Abschließend wird der holozänen Sedimentbilanz eine grobe Abschätzung des potentiellen mittleren Bodenabtrags gegenübergestellt, um damit die Berechnungsergebnisse auf ihre Schlüssigkeit zu prüfen. Arbeiten zum Ausmaß der aktuellen Bodenerosion fehlen für den Pfälzerwald ganz. Eine Bodenerosionskarte für Flächen- und Rillenerosion in Deutschland, veröffentlicht von AUERSWALD ET AL. (2009: 190), weist den Pfälzerwald mit Beträgen von kleiner $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ als fast weißen Fleck aus. Auf Landesebene wurde für Rheinland-Pfalz im Rahmen eines Projektes zum nachhaltigen und vorbeugenden Hochwasserschutz eine allgemeine Bodenabtragsberechnung für alle Acker-, Sonderkultur- und Grünlandflächen von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser veröffentlicht (ERNSTBERGER 2005). Danach würden 52

¹⁰ ABAG – Allgemeine Bodenabtragsgleichung nach SCHWERTMANN et al. 1987

bzw. 50 % der Acker-/Sonderkulturflächen bzw. Grünlandflächen einen potentiellen Abtrag bei Schwarzbrache von 10 bis 100 t ha⁻¹ a⁻¹ aufweisen, 24 bzw. 39 % der Flächen sogar > 100 t ha⁻¹ a⁻¹. Integriert man einen C-Faktor von 0,001 für Acker und 0,003 für Sonderkulturen so ist der potentielle Abtrag auf 92 % der Fläche mit ≤ 1 t ha⁻¹ a⁻¹ um ein bis zwei Potenzen geringer (ERNSTBERGER 2005). Da die Berechnung auf Landesebene durchgeführt und damit über sehr unterschiedliche Naturräume integriert wurde, soll im Folgenden eine Modellierung des potentiellen Bodenabtrags durch Wasser für das Speyerbach-Einzugsgebiet erstellt werden. Dabei ist zu betonen, dass es sich hierbei um eine Abschätzung der Bedeutung der landwirtschaftlichen Nutzung im Rahmen der Sedimentmobilisierung handelt. Es ist klar, dass hierbei nur eine Schätzung der potentiellen mittleren flächenhaften Erosion vorgenommen wird und keine Aussagen über den Transport, den Austrag oder linienhafte Erosion getroffen werden können.

Auch im Speyerbach-Einzugsgebiet gibt es –wenn auch nur zu einem kleinen Flächenanteil– landwirtschaftliche Flächen (vorrangig im Hochspeyerbach-TEZG), von denen bei Sommergewittern in den letzten Jahren Bodenmaterial erodiert und über bestehende Tiefenliniensysteme dem Speyerbach und seinen Nebenbächen zugeführt wurde, wie aus eigenen Geländebeobachtungen und Einsatzprotokollen der Feuerwehren ersichtlich ist. Basierend auf den bereits im Kapitel 2 verwendeten Boden-, Relief- und Landnutzungsdaten wurden für verschiedene Bewirtschaftungen und Erosionsschutzmaßnahmen Szenarien erstellt, die sich auf die maximale Ausdehnung der landwirtschaftlichen Flächen beziehen, wie sie aus den zur Verfügung stehenden Kartenwerken digitalisiert werden konnten. Tabelle 9 führt die verwendeten Daten auf.

Es wurde je ein Schwarzbrache-, Schwarzbrache mit Erosionsschutz- und Gras-Szenario für die heutigen Ackerflächen berechnet. Vergleicht man die für das Speyerbach-Einzugsgebiet berechneten Szenarien, so zeigen erwartungsgemäß die Schwarzbrache-Szenarien die höchsten Erosionsmengen (Abb. 21).

Tab. 9: Datengrundlage der ABAG-Abschätzung des mittleren Bodenabtrags auf den landwirtschaftlichen Flächen des Speyerbach-Einzugsgebiets.

	Flächendaten	Maßstab	Kenndaten	Quelle
Flächen	ATKIS	1:25 000	Acker- und Grün- land	LVG
Siedlungs- maske	ATKIS, BK 50	1:25 000, 1:50 000	BoFA-Klasse Siedlung	LGB
R-Faktor	N _{So} , Nieder- schlag des Sommerhalbjahrs (1961-1990)	1 x 1 km Raster	$R = 0,08 \cdot N_{So} + 23,05$	LUWG, DIN9.3.2b
LS- Faktor	DGM	20 x 20 m Raster		LGB
K-Faktor	BK 50	1:50 000	BoFA-Daten	LGB
C-Faktor	abgeleitet	20 x 20 m Raster	$C_{Gras} = 0,004$ und $C_{Brache} = 1^{11}$	
P-Faktor	abgeleitet	20 x 20 m Raster	$P_{Schutz} = 0,01$ und $P_{ohneSchutz} = 1$	

Die berechneten Erosionsmengen der Erosionsschutz- und Gras-Szenarien unterscheiden sich dagegen kaum voneinander. In allen Szenarien tragen die höchsten Erosionsklassen aufgrund der geringen Flächenanteile nur sehr wenig zum potentiellen Gesamtabtrag bei. Mit 40 bis 50 bzw. 70 bis 80 % haben bei dem Schwarzbrache-mit-Erosionsschutz- bzw. Gras-Szenario die kleinsten Erosionsklassen den größten Anteil an der berechneten Gesamtmenge. Hier verfügen >75 bzw. >90 % der Flächen über einen potentiellen jährlichen Abtrag von 0 bis 1 t ha⁻¹. Beim Schwarzbrach-Szenario ohne Erosionsschutz hat diese Klasse jedoch einen geringeren Einfluss. 40 bis 50 % der Flächen weisen in diesem Szenario einen jährlichen potentiellen Abtrag von 10 bis 50 t ha⁻¹ auf, rund 30 % der Flächen 50 bis 100 t ha⁻¹. Mit 15 % der Flächen sind auch Flächen mit 100 bis 200 t ha⁻¹ a⁻¹ vertreten. Sowohl Flächen mit geringer Erodibilität sowie mit wesentlich höherer fallen jedoch aufgrund ihres geringen Vorkommens bei der Gesamtsumme nicht so stark ins Gewicht.

¹¹ vgl. auch GÜNDRA et al. (1995: 28)

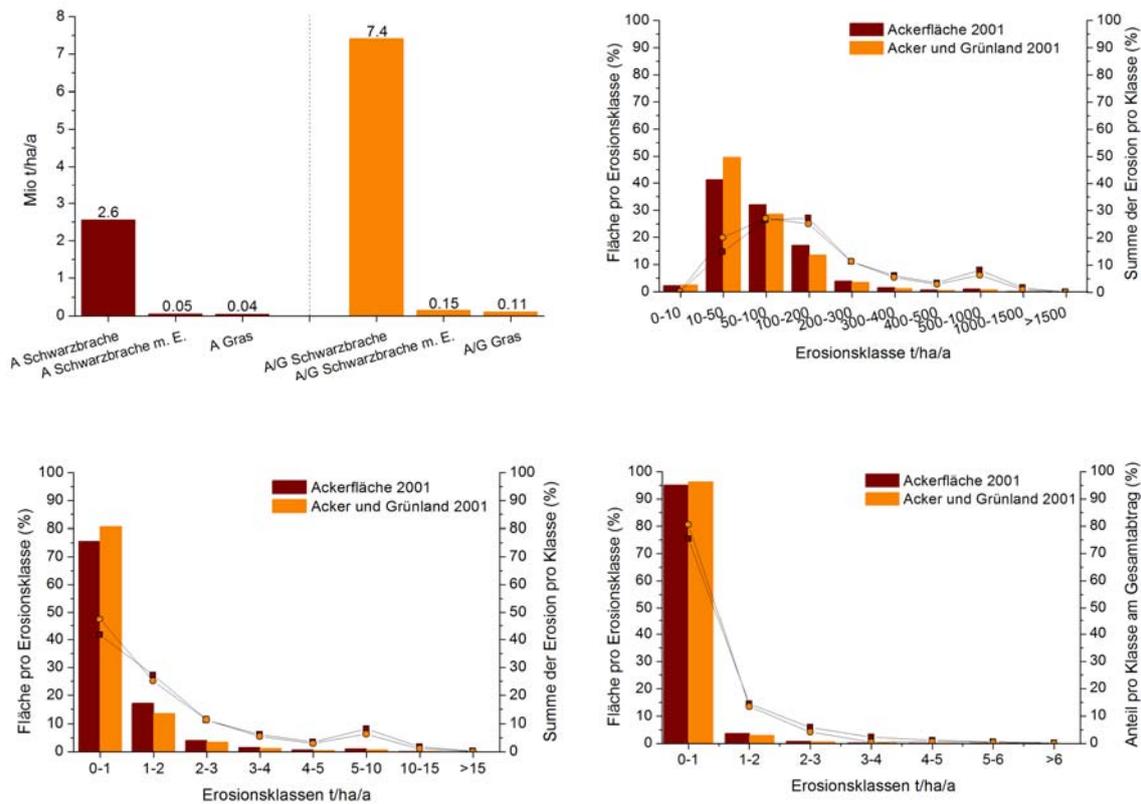


Abb. 21: Vergleich der Ergebnisse der ABAG-Szenarien auf Acker (A) bzw. auf Acker- und Grünlandflächen (A/G) für das Speyerbach-Einzugsgebiet (links oben) und Darstellung der prozentualen Flächenanteile und Erosionssummen pro Erosionsklasse für das Schwarzbrache-Szenario (rechts oben), das Schwarzbrache mit Erosionsschutz-Szenario (links unten) und das Gras-Szenario (rechts unten). Die Balken stellen die Flächenanteile dar, die Linien die potentielle Erosionsmenge pro Klasse.

GÜNDRA ET AL. (1995: 32) haben für den Schwarzwald und die Vorbergzone auf Ackerflächen Abträge bis zu $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ mit der ABAG (Schwarzbrache) errechnet. Die Verteilung der Abtragsklassen zeigt einen West-Ost-Anstieg innerhalb von 10 bis 15 km von 0 bis $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Oberrheingraben bis $>50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Schwarzwald. Vergleicht man die Zahlen mit den Schwarzbrache-Szenarien, so liegen die Werte in der gleichen Dimension, nur eine Einordnung der Extrem-Werte von 100 bis $200 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist nicht möglich, da GÜNDRA ET AL. (1995) diese Klasse nicht ausgewiesen haben. Als zweiter Schritt wurden die heutigen Acker- und Grünlandflächen als erodierbare Fläche angenommen. Diese Szenarien sollen einer verstärkten historischen Ackernutzung Rechnung tragen. Beim Flächenvergleich zwischen Acker sowie Acker- und Grünlandflächen ist eine Verdreifachung der Beträge erkennbar (Abb. 21).

Berechnet man auf der Grundlage der Rasterkarte das Volumen über das Holozän, das im Speyerbach-Einzugsgebiet mit diesen Szenarien erodiert werden würde, so kommt man zu folgenden Ergebnissen: Die simulierte Erosion beider Schwarzbrache-Szenarien hochgerechnet auf die letzten rund 10 000 Jahre übersteigt die Erosion der Sedimentbilanz Ia

(38,76 Mio. t) um mehr als das Zweihundertfache und das der Sedimentbilanz Ib mindestens um das Vierfache (Tab. 10). Die Werte des Schwarzbrache-mit-Erosionsschutz- und des Grasland-Szenarios auf heutigen Ackerflächen sind dagegen um zwei Drittel kleiner. Einzig das Grasland- und Schwarzbrache-mit-Erosionsschutz-Szenario auf den heutigen Acker- und Grünlandflächen liefern mit rund 34 bzw. 46 Mio. t Erosion einen Wert für die flächenhafte Erosion, der der Gesamterosion der Sedimentbilanz Ia nahe kommt. Die großen Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen eindrücklich, dass es bei der Betrachtung der mittleren langfristigen Erosion nicht so sehr auf die zugrunde liegende Ausdehnung der Ackerstandorte ankommt, sondern auf die Art und Weise der Bewirtschaftung.

Tab. 10: Mittels ABAG ermittelte mittlere jährliche Erosion im Speyerbach-EZG (A – Acker-Szenario, A/G – Acker und Grünland-Szenario).

Masseinheit	10⁶ t/a	10⁶ t/10 000a
A Schwarzbrache	0,0820	820
A Schwarzbrache m.E.	0,0015	15
A Gras	0,0012	12
A/G Schwarzbrache	0,7210	7210
A/G Schwarzbrache m.E.	0,0046	46
A/G Gras	0,0034	34

Die ABAG ist ein empirisches Modell, welches für die Berechnung der mittleren langfristigen Bodenerosion auf der Hangskala konzipiert wurde. Sie eignet sich daher nicht für die Abschätzung der Zwischenspeicherung (HEBEL 2003: 17). Da die ABAG alle lineare Erosionsprozesse wie sie in Mittelgebirgen bei Starkregenereignissen zu erwarten sind, z. B. verursacht durch stark verdichtete Forstwege sowie Bodenerosion durch Schneeschmelze, nicht berücksichtigt (GÜNDRA ET AL. 1995: 16), können die hier gewonnen Ergebnisse nur Indizien bleiben. Diese Berechnungen zeigen demnach das minimale Erosionspotential auf, das in diesem Mittelgebirgsgebiet herrscht. Wie die Untersuchung von HARD (1970: 297) auf den Flächen des Unteren Muschelkalks im Westrich gezeigt hat, sind Brachflächen seit der Agrarrevolution ab 1750 n. Chr. auch im Pfälzerwald vorhanden und bei sommerlichen Niederschlagsereignissen stärker von der Bodenerosion betroffen gewesen, als die bestanden Flächen. Andererseits zeigt der Vergleich des Schwarzbrache-Szenarios mit und ohne

Erosionsschutz, wie stark sich der Anteil der freien Bodenfläche auf die Erosion auswirkt. HILDEBRANDT (2004) betont, dass eine Schwarzbrache im Spätmittelalter nicht mit einer heutigen zu vergleichen sei, da die Bodenbedeckung durch Stoppeln und Unkräuter stärker war. Darüber hinaus war die Zeitspanne, in denen die Flächen ganz unbewachsen waren, laut HILDEBRANDT (2004) bis zur Umstellung der Feldgraswirtschaft auf die Dauerbeackerung in den Mittelgebirgen nur kurz (im Herbst nach Winterroggenbestellung und im Frühjahr nach Sommergetreideeinsaat). Daher scheint das Schwarzerde-mit-Erosionsschutz-Szenario am plausibelsten zu sein. Eine nähere Betrachtung der Entwicklung der Landnutzung und eine Recherche von klimatischen Extremereignissen werden vor diesem Hintergrund notwendig. Möglicherweise lassen sich daraus Indizien für die jeweilige Dominanz der Erosionsprozesse ableiten und die Erosionsdynamik im Speyerbach-Einzugsgebiet besser verstehen.

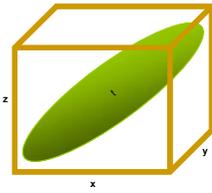
2.6 Zusammenfassung

Die Bilanzierung mittels Daten der bodenkundlichen Landesaufnahme zeigt in sich schlüssige Ergebnisse (Sedimentbilanz Ia). Die Beschreibung der räumlichen Heterogenität ist auf der Grundlage der Betrachtung von Teileinzugsgebieten möglich, geht jedoch nicht mit einer höheren Auflösung einher. Eine zeitliche Auflösung dieser Bilanz ist nicht möglich, da keine Datierungsergebnisse zur Verfügung stehen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Bilanz am stärksten von der Wahl der Berechnungsgrundlage sowie den Tiefenangaben abhängt.

Mit beiden Datensätzen sind für das Speyerbach-Einzugsgebiet positive Bilanzterme zu berechnen. Die wesentlich höheren Volumina der Sedimentbilanz Ib sind zumindest teilweise ein methodisches Artefakt. Das bedeutet, dass es nicht sinnvoll ist, die nicht aggregierten Punktdaten des Grunddatensatzes auf die BK 50 zu beziehen. Der Versuch, aus den vorliegenden Punktdaten eine interpolierte Karte zu erstellen, scheitert jedoch an der Distanzunabhängigkeit der Verteilung der Hauptlagenmächtigkeiten im Speyerbachgebiet. Die Ergebnisse der Sedimentbilanz Ib werden deshalb, obwohl die Punktdaten zu einer Ermittlung einer Bilanz geeignet wären, zurückgestellt. Die Sedimentbilanz Ia und Ib sind als Minimum- und Maximumwerte einer bestmöglichen Schätzung der holozänen Erosion mit bodenkundlichen Daten anzusehen.

Die Hochrechnungen des mittleren potentiellen Abtrags der ABAG-Werte auf das Holozän ergeben Werte, die zwischen 12 und $7\,210 \cdot 10^6 \text{ t } 10\,000 \text{ a}^{-1}$ schwanken. Würde man ständige Grünlandbewirtschaftung auf den heutigen Acker- und Grünlandflächen annehmen, so

näherte sich der ABAG-Wert mit 34 Mio. t den 39 Mio. t, die mit der Sedimentbilanz Ia errechnet wurden. Ohne die methodischen Schwierigkeiten der ABAG-Modellierung außer Acht zu lassen, zeigt diese Modellierung, dass die Bedingungen gegeben sind, um auf der relativ kleinen landwirtschaftlichen Fläche den für die letzten 10 000 Jahre mit der Sedimentbilanz Ia berechneten Abtrag zu verursachen. Selbst wenn man nur die letzten 7 500 Jahre, in denen überhaupt Ackerbau betrieben wurde, in Betracht ziehen würde, so würde es bei einer Bewirtschaftung der heutigen Acker- und Grünlandflächen mit Schwarzbrache mit Erosionsschutzmaßnahmen zu dem ermittelten Betrag kommen. Erosion auf den Waldflächen wäre damit vernachlässigbar. Inwieweit es zulässig ist anzunehmen, dass alle heutigen Ackerflächen seit 7 500 Jahren in dieser Mittelgebirgsregion ackerbaulich bewirtschaftet werden, ist eine Frage, die mit der Rekonstruktion der Landnutzungsgeschichte zu klären wäre. Dies ist Gegenstand des nächsten Kapitels.



3. Landnutzungswandel und Klimageschichte

Die Rekonstruktion des Landnutzungswandels und der Klimageschichte dient der Abschätzung der Frage, wann im Holozän erosionsbegünstigende Bedingungen existiert haben. Unter Umständen kristallisiert sich sogar aus den Archivalien direkt heraus, wann und wo genau starke Erosionsereignisse stattgefunden haben. Über die Pollendiagramme und das Archivmaterial zum Waldbild und Bestandesaufbau wird eine Abschätzung des Bedeckungsgrades der Waldböden durch das Kronendach vorgenommen. Anhand historischer Karten wird die Entwicklung der Landwirtschaftsflächen in der Neuzeit nachvollzogen. Dieses in sich geschlossene Kapitel wird in Kapitel 4.5 wieder aufgegriffen und in die Synopsis einfließen (Kap. 5).

3.1 Verwendete Archive und Quellen

Zur Rekonstruktion der Landnutzungsgeschichte werden die zur Verfügung stehenden archäologischen Funde, historischen Kartenwerke, Pollenarchive und Auswertungen von Archivalien herangezogen. Anhand der Ortschroniken aus dem Speyerbach-Einzugsgebiet und der Literatur zur Historischen Klimatologie wird ein Überblick der Klimageschichte und einigen bedeutenden Hochwässern der Pfalz gegeben.

Vegetationsgeschichtliche Informationen zum Kerngebiet des Pfälzerwaldes sind rar, da die hohe Durchlässigkeit des Buntsandsteins und die hohe Reliefenergie der Täler die Erhaltung von organischen Makroresten und Pollen erschwert und daher keine großflächige Moorbildung unterstützt (WOLTERS 2007: 140). Nur örtlich begrenzt finden sich in den Kuppen und Oberhanglagen in nächster Umgebung von Schichtquellen geringmächtige Sumpf- und Moorbildungen, die mit Erlen und Birken bewachsen sind. Um ein umfassendes Werk über die Vegetationsgeschichte der Wälder nördlich der Alpen zu entwickeln, sind auch Pollenanalysen aus den großen Moorflächen der Kaiserslauterner Senke (FIRBAS 1934) und des Pfälzer Hügellandes zwischen den Vogesen und dem Mittleren Pfälzerwald (FIRBAS ET AL.

1948) angefertigt worden. Zwei Pollenanalysen aus dem niederschlagsreichsten Gebiet des Mittleren Pfälzerwaldes in der Nähe von Johanniskreuz legte PRECHT (1953) mit dem Ziel vor, die Frage nach der Stellung der Kiefer im natürlichen Waldbild des Pfälzerwaldes zu beantworten, die in der damaligen Forstwirtschaft intensiv diskutiert wurde. In einer späteren Untersuchung analysierte WOLTERS (2007) nordwestlich von Johanniskreuz erstmals zwei Kleinstmoore¹² mit einer Mächtigkeit von einem knappen Meter. Auswertungen schriftlichen Quellenmaterials verschiedener Archive zur geschichtlichen Entwicklung der Wälder im Mittleren Pfälzerwald haben FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992), SCHMIDT (2002) und ZINTL (2006) vorgelegt, wobei sich FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) auf den Elmsteiner Wald und ZINTL (2006) auf die Waldgebiete um Johanniskreuz konzentrieren. Ergänzende Angaben lassen sich in den Ortschroniken der Siedlungen und bei BOISELLE (1998) finden. Die vier genannten Autoren sind Forstwissenschaftler, ihre Arbeiten in die Forstgeschichte einzuordnen. Im Gegensatz dazu haben sich ALLMANN (1989), ERNST (2000), GREWE (2004) und STURM (1959) aus der historischen Perspektive dieses Archivmaterials angenommen und die Quellen auf die Frage hin untersucht, ob es sich bei der im Industrialisierungszeitalter postulierten Holznot um einen echten Mangel oder eine prognostische Aussage handelt. ALLMANN (1989) und GREWE (2004) beziehen sich dabei direkt auf den Mittleren Pfälzerwald, aber auf unterschiedliche Zeitausschnitte, während ERNST (2000) und STURM (1959) vergleichbare Studien aus angrenzenden Gebieten (Eifel/Hunsrück sowie Nordpfälzer Bergland) liefern. Aus den umwelthistorischen Studien lassen sich somit regionale Vergleiche zur Entwicklung der Waldwirtschaft und Intensivität der Waldnutzung ziehen.

Die Arbeit von HILDEBRANDT ET AL. (2007) ist dagegen auf der lokalen Ebene anzusiedeln. Die Autoren haben bei der Untersuchung von Köhlerplätzen in den Trippstädter Waldungen (NO, W und SW von Johanniskreuz) die Holzkohlespektren in Zusammenhang mit den Pollendiagrammen von WOLTERS (2007) und mit eigenen Recherchen archivalischer Quellen ausgewertet. Dabei stand die Frage nach der Bestands- und Köhlereigeschichte in einem industriell bewirtschafteten Waldgebiet um Johanniskreuz im Zentrum des Interesses.

Vom *Landesamt für Archäologie* in Speyer wurde außerdem eine Übersicht über die archäologischen Funde im Untersuchungsgebiet zur Verfügung gestellt (Anhang 4). Es ist sehr deutlich, dass sich die Fundorte vor allem auf das Haupttal zwischen Hochspeyer und Neustadt an der Weinstraße sowie siedlungsnahen Regionen beschränken. Am auffälligsten ist das gehäufte Vorkommen von vorgeschichtlichen Hügelgräbern um Hochspeyer. Daneben

¹² Es handelt sich um ein mesotroph-saures Hang-Quellmoor bzw. eine Sickerquelle mit mesotroph-saurer Quellmoorbildung (WOLTERS 2007: 142).

sind nur sehr vereinzelt neolithische und bronzezeitliche Einzelfunde verzeichnet. Häufiger vertreten sind eisenzeitliche Straßen und Siedlungsfunde sowie mittelalterliche Siedlungsfunde. Nach HIMMELREICH (mündl. Mitteilung) stammen die Daten aus einzelnen Untersuchungen und Zufallsfunden, systematische Untersuchungen vor allem der entlegenen Bereiche existieren noch nicht.

Ergänzend wurden, soweit verfügbar, historische Kartenwerke für die Auswertungen schriftlichen Quellenmaterials herangezogen. Für eine Analyse des Landnutzungswandels im Pfälzerwald standen von den Vermessungsämtern Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg sowie von der Naturparkverwaltung des Biosphärenreservats Pfälzerwald/Vogesen historische Karten zur Verfügung (Tab. 11). Die Karten lagen plan vor, sie wurden gescannt, georeferenziert und entzerrt, bevor die Klassen Ackerland, Wald, Grünland/Wiese, Siedlung und Wasserflächen digitalisiert wurden.

Tab. 11: Übersicht über die verfügbaren historischen und aktuellen Karten mit Landnutzungsinformationen für das Speyerbach-Einzugsgebiet mit Bewertung hinsichtlich der Verwendbarkeit für eine digitale Auswertung, zur Verfügung gestellt vom Vermessungsamt Rheinland-Pfalz¹, Baden-Württemberg² und dem Naturpark Pfälzerwald/Vogesen³.

Erstellungszeitraum	Kartentitel	Verzerrung	Räumliche Abdeckung	Lesbarkeit/Information	Eignung
1702-13	Theatrum Belli Rhenani ^{1,2}	--	+	--	-
1797	Schmitt'sche Karte von SW-Deutschland¹	++	+	++	+
1801-28	Preußische Generalstabskarte, Blatt 61 Dürkheim¹	-	+	+	+
1821	Katasteraufnahme Neustadt ¹	++	--	+	-
1836-41	Topographische Aufnahmen der Pfalz, Positionsblätter ¹	-	-	-	-
1840	Reduktion der Kartenaufnahme der Rheinlande durch Tranchot ¹	-	+	--	-
1915	Topographische Karten³	++	++	++	+
2001	ATKIS¹	++	++	++	+

Aufgrund der schlechten Lesbarkeit einiger Karten sind nur vier Zeitpunkte miteinander vergleichbar: Der Zustand nach dem französisch-kurpfälzischen Krieg (1797), der Zustand zu Beginn der bayrischen Herrschaft (1801-28), die Verhältnisse nach dem Ersten Weltkrieg (1915), sowie die „aktuellen“ Verhältnisse von 2001. Zur Auswertung der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung sowie zur Entstehung von Landwirtschaft¹³, Gewerbe und Industrie wird im Folgenden auf Sekundärliteratur zurückgegriffen, die ihrerseits archivalische Quellen auswertet.

Die Rekonstruktion der Klimageschichte für den Mittleren Pfälzerwald wird auf der Grundlage der oben schon vorgestellten Pollenanalyse und historischen Dokumente vorgenommen, sofern dies aus Veröffentlichungen der Historischen Klimatologie möglich ist. Liegt das methodische Problem bei der Pollenanalyse darin, zwischen der Ferntransportkomponente und dem Nahanteil zu unterscheiden, bestehen die Probleme bei der Interpretation historischer Quellen in der Zugänglichkeit, Repräsentativität und dem kulturellen Kontext der Dokumente. Es muss dem Leser klar sein, dass der Anteil der Überlieferung immer mehr abnimmt, je weiter man in der Zeit zurückgeht. Darüber hinaus ist die Naturbeobachtung auch ein kultureller Akt, der in seiner Art, Intensität und Regelmäßigkeit dadurch beeinflusst wird, welchen Stellenwert dem beigemessen wird (PFISTER ET AL. 1988: 12). Die Humboldt'schen und daran anschließenden systematischen Naturbeobachtungen, die der Findung von Zusammenhängen dienten, unterscheiden sich in ihrer hohen Regelmäßigkeit, Häufigkeit und dem großen Detailgrad von den Aufzeichnungen mittelalterlicher Klöster oder Weinbauern, die ihre Erträge zur Berechnung des Zehnten notierten. Wenn also in historischen Quellen von Hochwässern in dem einen Jahr berichtet wird, in den folgenden aber nicht, so muss dies nicht heißen, dass es keine gab. Sie waren vielleicht nur nicht sehr stark und richteten nicht allzu viel Schaden an, so dass sie den Aufzeichnenden nicht erwähnenswert schienen. Eine Darstellung von überlieferten Hochwasserereignissen (in Anhang 5 und Abb. 27) oder eine Übersicht über die Witterungsverhältnisse wie in Anhang 6 kann deshalb nie vollständig sein (PFISTER ET AL. 1988: 11ff).

Dass eine Charakterisierung des aktuellen Klimas durch langjährige Mittelwerte, wie sie für die Pfalz in Kapitel 1.3.3 vorgestellt worden ist, ebenfalls mit einem methodischen Problem behaftet ist, zeigt die Arbeit von SCHÖNWIESE (2002). Eine solche Betrachtung stützt sich im Allgemeinen auf die hydrologische Referenzperiode von 1961 bis 90. Verändert man das

¹³ WEIDMANN (1968) fasst den Pfälzerwald, das südwestdeutsche Stufenland und das Nordpfälzer Bergland zur Westpfalz zusammen. Aussagen zur landwirtschaftlichen Entwicklung der Westpfalz sind deshalb nur mit größter Vorsicht auf das Untersuchungsgebiet zu beziehen!

zugrunde liegende Betrachtungsintervall (Tab. 12), so wandelt sich die Aussage vor allem, wenn man von der Zeitspanne von 1961 bis 90 zu 1971 bis 2000 wechselt (LAUTERBURG 1990; SCHÖNWIESE 2002). Deutliche Unterschiede zu diesen zwei Perioden bestehen auch, wenn man die lange Zeit von 1891 bis 1990 betrachtet. Hier ist bis auf den Sommer-niederschlag in allen anderen Jahreszeiten mehr Niederschlag gefallen, allerdings nicht so viel wie im Zeitrahmen 1971 bis 2000 (SCHÖNWIESE 2002: 74 und Tab.12).

Tab. 12: Niederschlagstrend in Deutschland, verändert aus SCHÖNWIESE (2002: 74).

Zeitspanne	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
1891-1990	+ 11 %	0 %	+ 16 %	+ 19 %	+ 9 %
1961-1990	- 9 %	- 8 %	+ 10 %	+ 20 %	+ 3 %
1971-2000	+ 13 %	+ 4 %	+ 14 %	+ 34 %	+ 16 %

3.2 Transitland Pfälzerwald – Neolithikum bis Römisches Kaiserreich

Nach HILDEBRANDT ET AL. (2007: 107) waren die Wälder im Inneren Pfälzerwald am Übergang vom Neolithikum (5400 - 2200 v. Chr.) zur Bronzezeit (2200 - 800 v. Chr.) durch Eichen, Haseln, Linden und Ahorn sowie Eschen entlang der Täler und Erlenbruchwälder in Quellenlagen dominiert; Buchen hatten einen relativ geringen Anteil. Den lichten Wäldern war auch die Kiefer beigemischt. WOLTERS (2007: 154f) und HILDEBRANDT ET AL. (2007: 110) gehen davon aus, dass die Wälder zur Bronzezeit in ihrer Struktur noch nicht wesentlich verändert waren und eventuelle Nutzungen bis dahin nicht mit großflächigen Holzentnahmen einhergingen. Zum Ende der Bronzezeit verdrängte die Buche die Linde; auch Eiche und Hasel gingen in ihren Anteilen zurück. Die bei Hochspeyer verbreiteten Hügelgräber sind nach HÄBERLE (1921) und LUDT (1959) bronze- bis eisenzeitlichen Alters und weisen auf eine verhältnismäßig dichte Besiedlung des Raums Enkenbach, Neukirchen bis zum Donnersberg hin. Die in der Eisenzeit belegte leichte Auflichtung und die etwas gestiegenen Siedlungsanzeiger werden aber als Ferneintrag aus der Rheinebene, dem Hunsrück oder der Eifel interpretiert, so dass HILDEBRANDT ET AL. (2007: 110) und WOLTERS (2007: 154f) anthropogenen Einfluss im Mittleren Pfälzerwald bis Christi Geburt ausschließen.

WOLTERS (2007: 145) stellt eine Auflichtung der von Buchen dominierten Wälder während der Römischen Kaiserzeit (1. Jahrhundert v. Chr. bis 4. Jahrhundert n. Chr.) durch erhöhte Buchenentnahme und erste landwirtschaftliche Nutzung (erhöhte Getreide und Ackerunkräuter-Werte) fest. Im Gegensatz dazu interpretieren HILDEBRANDT ET AL. (2007: 111) aufgrund des Fehlens archäologischer Siedlungsreste die pollenanalytischen Siedlungszeiger als Fernflug bzw. Zeiger für eine extensiv betriebene Wechselwirtschaft vom Waldweide und Niederwald. Sie gehen allenfalls von einer temporären oder sehr dünnen permanenten Besiedlung und einem den älteren Höhenwegen folgenden Straßensystem im Mittleren Pfälzerwald aus. Diese Annahme wird durch die archäologischen Befunde (Anhang 4) und BERNHARD (2001: 60) gestützt, der bei Kaiserslautern und Landstuhl den Nachweis kleiner römischer Gemeinwesen¹⁴ als erbracht sieht. Die ersten rekonstruierbaren Hinweise auf eine verkehrstechnische Erschließung des Pfälzerwaldes sind die vermutlich in der Römerzeit angelegten „Römerstraßen“, alte Höhenwege, deren genauer Verlauf heute nur teilweise rekonstruierbar ist (BERNHARD 2001: 53; KARCH 1968: 37; LUDT 1959; STUCKERT 1960: 249). Gewerbliche Strukturen, wie Steinbrüche, Tonindustrie o.Ä. sind aus dem Untersuchungsgebiet nicht überliefert, aber in der Umgebung des Untersuchungsgebiets belegbar (z.B. römerzeitlicher Steinbruch bei Dürkheim, Keramikproduktion in Rheinzabern, Tonabbau und Eisenerzgewinnung bei Eisenberg/Stumpfwald, Ramstein und Hettenleidelheim, s. BERNHARD 2001: 68). Die beschriebenen Hinweise auf die Landnutzung lassen es möglich erscheinen, dass die Bedeckung des Bodens durch die Baumschicht sowohl im Neolithikum als auch in der Römischen Kaiserzeit so weit aufgelichtet war, dass Erosion möglich wurde. Dezierte Informationen zu Niederschlagsereignissen bzw. Feuchtphasen liegen nach meinen Recherchen für das Gebiet des Pfälzerwaldes aus dieser Zeit nicht vor.

3.3 Machtzentrum Pfälzerwald – Entwicklung bis zum Spätmittelalter

Es gibt keine archäologischen Funde im Untersuchungsgebiet zwischen der Römischen Kaiserzeit (400 n. Chr.) und dem frühen Hochmittelalter (1100 n. Chr.). Obwohl unter dem Einfluss der fränkischen Könige das Machtzentrum mit dem Trifels und der Kaiserpfalz in

¹⁴ Im Bereich des Pfälzerwaldes wurden noch keine römischen Siedlungsreste gefunden. In der Vorderpfalz und am Haardtrand (Speyer, Rheinzabern, Eisenberg) sind sowohl vici als auch villae rusticae belegt (BERNHARD 2001: 54-65).

Kaiserslautern nicht weit entfernt war, war das Untersuchungsgebiet in dieser Zeit keinem bedeutenden Wandel unterworfen. Der Name Frankenweide für die Wälder um Elmstein am Speyerbach soll aus einer damaligen Königsgutschenkung stammen (HÄBERLE 1921: 39). HÄBERLE (1921) sieht diesen Zeitraum als Periode der Wiederbewaldung an. Erst in der Karolingischen Zeit wurde das Untersuchungsgebiet randlich durch Siedlungstätigkeit gestreift. In Alsenborn und Kaiserslautern (unmittelbare Umgebung des Untersuchungsgebiets) wurden Königshöfe errichtet (HUBER 1989: 230) und von den Ludolfingern im Forst Lautern sechs Königshufe (üblicherweise mit Niederwaldwirtschaft oder Rodungen verbunden) verschenkt (RANZI 1939). Der Siedlungsbau im Untersuchungsgebiet begann im 10. Jahrhundert und weist zwei Höhepunkte zwischen 1194 und 1209 sowie 1257 und 1279 n. Chr. auf (KARCH 1968). Die archäologischen Fundstellen weisen ebenfalls auf verstärkten Burgenbau und Siedlungsgründungen hin (Anhang 4). 1158 wurde in Kaiserslautern die Kaiserpfalz erbaut, 1276 wurde die Stadt zur Freien Reichsstadt (HUBER 1989: 230). Im Zuge des im 12. Jahrhundert forcierten Burgenbaus der Staufer wurde im Diemersteiner Tal die Diemersteiner Burg errichtet, die Burg Trifels bei Annweiler wurde als Reichsfeste erbaut (ROTHENBERGER 1989: 196). Aus dem Pollendiagramm lässt sich erst mit dem 12. Jahrhundert eine deutliche Veränderung des Waldbildes zugunsten von Eichen, Birken, Pappeln und Gräsern ablesen. Der Anteil von Kiefer und Buche ging zurück. Erstmals traten Getreidepollen und Ericaceen auf (WOLTERS 2007). FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992), HILDEBRANDT ET AL. (2007) und WOLTERS (2007) machen dagegen die beginnende Besiedlung des Gebiets für die Veränderungen im Waldbild verantwortlich. Nach WOLTERS (2007: 150) setzte mit dem 12. Jahrhundert die Rodung von Kiefer und Buche ein, die Holzkohleproduktion nahm zu und beide erfuhren den Höhepunkt zum hochmittelalterlichen Landesausbau. Das Pollendiagramm gibt zwar keinen Hinweis auf großflächig betriebene Landwirtschaft, allerdings kann man annehmen, dass eine Öffnung bzw. Auflichtung der Baumschicht stattfand.

HILDEBRANDT ET AL. (2007: 112ff) interpretieren aus den Befunden lichte Eichen-Hasel-Birken-Mischwälder mit vereinzelt Blößen. Aus dem Anstieg von Kräuter- und Süßgräserpollen sowie aus dem Ursprung des Wortes Frankenweide¹⁵ wird auf Waldweidenutzung¹⁶ geschlossen (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 126, ZINTL 2006: 47). Für den Zeitraum von 1250

¹⁵ Wird als Fernwaldweide seit der Frankenzeit gedeutet, gehört später zum kurpfälzischen Staatswald.

¹⁶ Einträge in den Urkundebüchern des Kloster Otterbergs weisen Waldweide für die Wälder der Frankenweide (um Elmstein, im zum Stüterhof gehörenden Wald) und im Wilensteiner Wald nach, wobei die Schmalzweide eigens genannt wird (HILDEBRANDT et al. 2007: 125f). Hier durften sämtliche Tiere (Pferde, Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen) jeden Alters geweidet werden.

bis 1350 wurde die stärkste Auflichtung der Wälder mit der Ausbreitung von lichtliebenden Gehölzen (Birke, Hasel, Pappel, Eberesche, Ilex, Gräser) verzeichnet. Hinzu kam der Anstieg von Holzkohle und Adlerfarn, beides Zeiger für Brandrodung/–wirtschaft und Waldweide. Es liegen erstmals hohe Werte von Roggen und anderem Getreide, Sauerampfer und Brennnessel als Zeiger für Landwirtschaft und verstärkten Nährstoffeintrag vor. In diese Zeit fielen u. a. die Ersterwähnungen des Stüterhofs, Elmsteins, Trippstadts, Mölschbachs. Iggelbach wurde 1466 erstmalig erwähnt, Appenthal erst 1493 (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 118).

HILDEBRANDT ET AL. (2007: 33) nehmen an, dass es ab 1100 n. Chr. Wanderköhlerei¹⁷ im Gebiet um Johanniskreuz gab, obwohl die Köhlerei in der Waldbeschreibung von 1600. nicht erwähnt wurde. Zu diesem Schluss kommen die Autoren aufgrund einzelner Holzkohlefunde entlang von Altstraßen. BOISELLE (1998) charakterisiert die Waldnutzung während der mittelalterlichen Rodungsphasen als eine Zeit, in der nur für die unmittelbaren Siedlungsflächen Kahlhiebe stattgefunden haben, ansonsten aber Einzelbaumentnahme (Plentern) vorherrschte. Allerdings existiert eine Verordnung zur Waldpflege von 1304 für die Frankenweide, die Auskunft über die jeweilige Holzeinschlagstechnik und die Aufzucht des Waldes gibt.

Auch FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) schließt einen deutlich umgestaltenden menschlichen Einfluss auf die Wälder vor dem hohen Mittelalter (1050 bis 1250) aus, da eine permanente Besiedlung des Speyerbach-Einzugsgebiets erst mit dem mittelalterlichen Burgenbau und den später entstandenen Siedlungen begann. Die Besiedlung und der Burgenbau vollzogen sich entlang der Täler des Mittleren Pfälzerwaldes. Das mindestens seit der Römischen Kaiserzeit auf den Höhenzügen verlaufende Straßensystem blieb weiterhin für den Transport und den Handel in Benutzung. Darüber hinaus entstanden Straßen in den Tälern: Neben dem Wegesystem belegen Quellen im Pfälzerwald schon seit dem Beginn des 14. Jahrhunderts eine Nutzung der Bäche als Transportwege. 1320 belegt eine Urkunde, dass in Neustadt a. d. W. schon ein Holzhof existiert hat und Flößer bezahlt wurden. 1403 wurde dem Speyerbach die Bachfreiheit zugestanden, die eine zollfreie **Trift**¹⁸ erlaubt (SCHMERER 1998: 47ff, ZINTL 2006: 149).

¹⁷ Die Wanderköhlerei ist gekennzeichnet durch Meilerplatzstreu mit kleinen Einzugsgebieten und gemischten Kohlholzspektren, die sich an den angewiesenen Schlägen orientierte. LUDEMANN (2008: 55) hat für zwei Standorte am südlichen Kammschwarzwald gezeigt, dass auch hier in der ersten Periode der Köhlerei die Verkohlung nach den Maßgaben des vorhandenen Holzes ohne Selektion erfolgte (im Schwarzwald allerdings schon in der Römerzeit).

¹⁸ Flößen von Holz von etwa 1m Länge in ungebundener Weise.

Die spätmittelalterliche Wüstungsperiode war auch im Pfälzerwald mit einer Abnahme der Siedlungstätigkeit verbunden (HÄBERLE 1921: 50) und führte im Mittleren Pfälzerwald zu einer Regeneration der Wälder mit Ausdehnung der Buchen und Kiefern auf Kosten von Eichen, Birken, Haseln und Gräsern. Das Ausbleiben von Holzkohle belegt laut WOLTERS (2007: 150f, 157), dass die Nutzung sich extensivierte. Die erstmal auftretenden Wacholderpollen zeigen jedoch, dass die Waldweide immer noch Bestand hatte (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 129f). Damit ist wahrscheinlich, dass weiterhin Holzkohleproduktion stattfand, sie jedoch nicht bis ins Moor transportiert wurde, weil die Erosionskraft des Abflusses nicht ausreichte bzw. Zwischenspeicherung auftrat. Die von PFISTER ET AL. (1988: 53) für die Schweiz belegte Erhöhung der mittleren Temperatur in der Vegetationsperiode im 13. Jahrhundert um 1,5 bis 1,7 °C könnte eine Ursache für die Veränderungen in der Vegetationszusammensetzung im 13. Jahrhundert sein bzw. die Ausbreitung der Landwirtschaft beeinflusst haben. Der Frühneuzeitliche Ausbau ab 1450 spiegelte sich im Wiedereinsetzen der Holzkohle sowie der Zunahme der Eichen-, Kiefern-, Birken-, Gräser- und Siedlungszeigerpollen im Pollendiagramm (WOLTERS 2007: 150f, 157).

Archivalische Hinweise auf extreme Erosionsereignisse sind nach meinen Recherchen nicht vorhanden. Die Zusammenstellung der mittleren und extremen Hoch- und Niedrigwässer am Mittelrhein von WITTE ET AL. (1995) macht deutlich, dass nur spärliche Informationen für das 11. bis 14. Jahrhundert zur Verfügung stehen (siehe Anhang 5). Allerdings konnten mehr Winterhochwässer als Sommerhochwässer rekonstruiert werden. Die Nutzung des Speyerbachs zur Trift seit dem 14. Jahrhundert legt allerdings nahe, dass große Hochwasserereignisse auch schon damals als Behinderung des Transportwesens wahrgenommen wurden. In der „Pfälzischen Geschichte“ (ROTHENBERGER ET AL. 2001) sowie in den Ortschroniken von Hochspeyer (LUDT 1959), Weidenthal (STUCKERT 1960), Lambrecht (COLLOFONG & FELL 1978), Neidenfels (KARCH 1968) und Elmstein (O. A. 2006) fehlt jedoch eine Erwähnung des im Einzugsgebiet des Mains und der Tauber eindrücklich belegten Hochwasserereignisses von 1342¹⁹ (GLASER & STANGL 2004). Auch BORK (1988) hat in den von ihm untersuchten Nebentalkerben im Pfälzerwald keine entsprechenden Sedimente datieren können. Daher ist in der Figur 9 von BORK (1988: 50), die die belegbaren Überschwemmungen von 1342 in Deutschland ausweist, der linksrheinische Teil des Oberrheins „weiß“. SEIDEL (2004: 107) konnte bei seinen Untersuchungen in den Einzugsgebieten der Elz und Möhlin im Schwarzwald ebenfalls keine Anzeichen auf ein Erosionsereignis durch ein Hochwasser um

¹⁹ Effektiver Niederschlag im Main/Tauber-Gebiet 1342: 175 mm über vier Tage, Schäden u. a. in Regensburg, Dresden, Frankfurt, Würzburg (BORK 1988: 50f, HAHN 1992)

1342 finden. HARD (1970: 300) ist der Meinung, dass die Westpfalz außerhalb des Gebiets liegt, in dem Vb-Wetterlagen auftraten. Ausschließen kann man die Existenz dieses Ereignisses im Pfälzerwald aber nicht, da auch Archivmangel, Datenlücken bzw. einen Erosionsdiskordanz in den untersuchten Sedimenten vorliegen könnte.

Die Landnutzungsentwicklung im Mittleren Pfälzerwald wurde also zwischen dem 12. und 15. Jahrhundert von einer deutlichen Veränderung geprägt, was die Bedeckung des Bodens durch Vegetation angeht. Neben der Rodung an sich, die, wie in Kapitel 1.1.1 c) beschrieben, zur Erhöhung der Erodibilität des Oberbodens führt, entstanden nun größere Flächen im Umkreis der Siedlungen, auf denen Ackerbau betrieben wurde. Aber auch im noch verbleibenden Wald ist von einer Auflichtung des Kronendaches durch die Wanderköhlerei und Waldweide auszugehen. Damit sind wichtige Voraussetzungen für eine Erosionsphase gegeben. Es sind jedoch keine archivalischen Belege für erosive Extremereignisse in dieser Periode im Pfälzerwald publiziert worden.

3.4 Hinterland Mittlerer Pfälzerwald – 16. bis beginnendes 18. Jahrhundert

Das 16. und 17. Jahrhundert war durch große gesellschaftliche Umbrüche geprägt. In Folge der Einführung der Reformation in der Markgrafschaft Baden-Durlach im Jahr 1556 gingen kirchliche Besitztümer an die kurpfälzische Regierung über. Dem Dreißigjährigen Krieg (1618 - 1648), der laut TROßBACH (1993: 2) Bevölkerungsverluste von mehr als 50 % bis hin zur Entvölkerung ganzer Gemeinden im Pfälzerwald (z.B. Elmstein und Iggelbach) mit sich brachte, schloss sich der Pfälzische Erbfolgekrieg an.

Gemäß den von Vellmann 1600 für den Elmsteiner Wald, den Lauberwald und den Stüterwald verfassten Beforchungen wurde das Waldbild von Eichen, Kiefern, Birken und Gräsern dominiert, wobei nun neben der Waldweide die Jagd an Bedeutung gewann. Es lassen sich in den archivalischen Quellen auch Hinweise auf Blößen oder stark degradiertes Weideland mit Ginster oder Heidekraut finden (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 132). Auch ALLMANN (1989) geht davon aus, dass die traditionelle Nutzung der Wälder²⁰ noch keiner räumlich fixierten

²⁰ Kleinteiliges Nebeneinander von lichten Hochwäldern mit Waldweide, Blößen, Niederwäldern und Ackerflächen sowie unberührten Waldgebieten.

Dynamik unterlag und auf den Erhalt der Ertragsfähigkeit²¹ abzielte. Trotz der sehr lichten Wälder, die aus den Pollendiagrammen für das Mittelalter aber auch für das 17. und 18. Jahrhundert rekonstruiert wurden, erwähnen die Waldbeschreibungen von 1600 und 1715 die Köhlerei als traditionelle Nutzungsart der Wälder nicht; allerdings wird erwähnt, dass das Gebiet zu entlegen und zu wenig erschlossen (durch Wege oder Triftgewässer) für eine derartige Verwendung war. Holzkohle mag damals zur Grundversorgung von Kleinstgewerben und dem täglichen Bedarf hergestellt worden sein. In Folge der Kriege des 17. Jahrhunderts scheint dieser Bedarf jedoch durch das Wüstfallen von Siedlungen gering gewesen zu sein (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 138).

Als Grundlage der Nahrungsversorgung bis in das 18. Jahrhundert hinein sieht WEIDMANN (1968: 33) Hafer und Gerste, die auf den meist ungedüngten Innenfeldern²² angebaut wurden. Der Anbau von Kartoffeln und Rüben und anderen Sonderkulturen erfolgte nur in den siedlungsnahen Gärten. Die Wiederbesiedlung des Pfälzerwaldes durch Einwanderer aus der Schweiz (z.B. in Elmstein, TROBBACH (1993: 2)) oder Wallonen (in Lambrecht, COLLOFONG & FELL (1978)) brachte lokale Veränderungen in den landwirtschaftlichen Anbautechniken mit sich. Der Kleeanbau wurde in den von Wallonen besiedelten Gebieten im 16. Jahrhundert eingeführt und ermöglichte mit den verbesserten Düngemöglichkeiten die Intensivierung und die Ausdehnung des Anbaus auf die vorherigen Brachflächen der Außenfelder²³. Die Ausbreitung des Kleeanbaus und der Übergang zur Stallhaltung erfolgten jedoch erst Ende des 18. Jahrhunderts. Die Kartoffel, die schon im 17. Jahrhundert in Dahn und Annweiler angepflanzt wurde, wurde zuerst nur als Viehfutter verwendet. Die von TROBBACH (1993: 6) aufgezählten, deutschlandweiten Hungerkrisen von 1660, 1680, 1691 bis 1693 und 1696 bis 1699 erwähnt WEIDMANN (1968) dagegen nicht.

Zu Beginn des 18. Jh. nahmen die Getreidepollen, Holzkohlefunde und Eichenbestände laut Pollendiagramm wieder zu, während der Buchenbestand abnahm, was auf die einsetzende Köhlereiwirtschaft zurückgeführt wird. In der Intensität erreichte der Waldumbau nicht mehr die Ausmaße des hochmittelalterlichen Landesausbaus. Laut der Waldverordnung von 1711 sollten die stärksten und geradesten Äpfel, Birnen, Elsbeeren, Eichen und Buchen vom Schlag verschont werden; die Überhälterbäume sollten als Samenspende so weit auseinander stehen, dass sich die Äste nicht berührten und Sonnenlicht den Boden erreichen konnte (BOISELLE

²¹ Mindestens seit 1568 n. Chr. wird das Setzen von 2 bis 4 Setzlingen pro gefällttem Baum angeordnet (ALLMANN 1989: 110).

²² Innenfelde sind intensiv genutzte und siedlungsnaher Landwirtschaftsflächen (BAUER 1993: 146).

²³ Außenfelder sind extensive genutzte Landwirtschaftsflächen mit Feld-Gras oder Feld-Wald-Wechsel (BAUER 1993: 146).

1998: 23). Diese Anordnung trägt vor allem den Bedürfnissen der Waldweide Rechnung und zeigt, dass die Baumschicht sehr licht gewesen war. Sie stellte die traditionelle Bewirtschaftung der Wälder dar, die sich an den Bedürfnissen der Eigentümer, der Bevölkerung und dem aktuellen Stand der Walderschließung orientierte, wie bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts praktiziert wurde (BOISELLE 1998: 23). Die häufigen Erwähnungen von Waldbränden in den Waldbeschreibungen von 1780, 1785 und 1810 für den Elmsteiner Wald, sind für das Gebiet um Johanniskreuz nicht zu finden. Es stellt sich auch hier die Frage, inwiefern es sich um äußerst lokal begrenzte Ereignisse handelte.

Das Gewerbe dieser Zeit war durch holz- und wasserintensive Branchen geprägt. Im Lambrecht Tal wurden wallonische Glaubensflüchtige angesiedelt (ROTHENBERGER 1989: 226), die das Tuchmacherhandwerk etablierten, welches sich bis 1966 in Lambrecht halten konnte. Nach ROTHENBERGER (1989) gab es um 1750 allein zwischen Franckeneck und Neustadt 20 Mühlen. Glashütten sind für das Speyerbach-Einzugsgebiet nicht belegt, obwohl angenommen wird, dass im Glastal des Diemersteiner Tals eine Hütte betrieben wurde. In Ratsprotokollen von Kaiserslautern aus den Jahren 1613 und 1635 wurden mehrere Glashütten bei Mölschbach erwähnt (DOLCH 2005: 12). Diese Hütten lagen westlich des Speyerbach-Einzugsgebiets. Die Pottasche- und Glasproduktion gewann seit dem 17. Jahrhundert an Bedeutung im Mittleren Pfälzerwald, hatte aber nur lokale Auswirkungen auf die Bestände gehabt (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 138).

Die unregelmäßige Einzelbaumentnahme bis auf die Überhälter führte prozessgeomorphologisch dazu, dass der Boden stärker Austrocknung und durchfallendem Niederschlag ausgesetzt war, die Wahrscheinlichkeit von Oberflächenabflussbildung aufgrund von Hydrophobizität oder direktem Aufprall des durchfallenden Niederschlages erhöht war. Die bereits beschriebene Eichen- und Kieferndominanz könnte man in Verbindungen mit den Ergebnissen von PFISTER ET AL. (1988) wieder als ein klimatisches Signal deuten: Die archivalische Auswertung zu Waldschäden durch Dürren belegt, dass seit dem frühen 16. Jahrhundert im Durchschnitt alle vier Jahre schwache und alle sieben Jahre starke Dürreereignisse auftraten, bei denen auch Waldschäden entstanden. Für die Dürre in der Schweiz von 1540 (fünfhundertjährige Wiederkehrwahrscheinlichkeit) lässt sich rekonstruieren, dass sich 10 bis 12 Monate lang der Subtropische Gürtel soweit in den Norden verschoben hatte, dass weniger als ein Drittel des Jahresniederschlags fiel (PFISTER ET AL. 1988). Eine ähnliche Analyse fehlt für den Pfälzerwald. Folgt man jedoch der Annahme, dass es sich um eine Verschiebung der Klimazonen handelt, so muss man davon ausgehen, dass die Wirkung auch in der Pfalz spürbar war.

Das 17. und beginnende 18. Jahrhundert brachten eine erneute Erholungsphase für die Waldbestände, womit auch der Bedeckungsgrad des Bodens stieg. Durch die zeitweise Entvölkerung wird es auch in landwirtschaftlich geprägten Regionen des Untersuchungsgebiets eine Ruhephase im Sinne der Erosion gegeben haben. Erst der Beginn der Industrialisierung und die Agrarrevolution von 1750 führen wieder zu einer Intensivierung der Landnutzung.

3.5 Industriegebiet Pfälzerwald während des 18. und 19. Jahrhunderts

Zwischen dem Saarkohlerevier und dem sich im 18. Jahrhundert entwickelnden Chemiezentrum in Ludwigshafen gelegen, ist der Pfälzerwald ein an holzverarbeitendem Gewerbe reiches Gebiet, das nur lokal begrenzt direkt von der industriellen Entwicklung im 18. Jahrhundert geprägt ist, z. B. die Eisenwerke der Familie Gienanth in Trippstadt. Mittelbar ist der Pfälzerwald jedoch von den politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen in Europa betroffen, die sich durch die wechselnden politischen Verhältnisse auch in der Gestaltung der Landnutzung bemerkbar machen.

Ab 1780 spiegelt das Pollendiagramm die Zusammensetzung der forstwirtschaftlich bewirtschafteten Wälder wieder, in denen Fichten, Lärchen, Weymouthskiefern, Douglasien und Weißtannen gefördert wurden (WOLTERS 2007: 152, 157). Ab 1800 waren die Wälder durch Eichen-, Birken- und Haselarmut sowie Buchen- und Kieferndominanz geprägt. Eberesche-, Pappel-, Wacholder- und Ginster- sowie Kräuter- und Farnpollen gingen zurück, was sich aus der verstärkten Anpflanzung und Ansaat auf Blößen erklärt und ein Zuwachsen der Bestände belegt. Zum Ende des 18. Jahrhunderts hin begann die systematische und intensive Nutzung und Umgestaltung der Buchen-Kiefern-Wälder zum starken Nachteil für die Eiche (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 146ff). Der Anstieg von Siedlungszeigern (Getreide, Brennnessel, Sauerampfer) ist nach HILDEBRANDT ET AL. (2007: 141) mit dem Entstehen von Waldarbeitersiedlungen verbunden (z.B. 1737 Schwarzbach, 1758 Waldleiningen, 1788 Erlenbach, 1824 Speyerbrunn). In der Waldbeschreibung von Dewarat aus den Jahren 1779/80 wurde die Umtriebszeit entgegen den normalerweise üblichen 35 bis 40 Jahren (typisch für vorrangiger Brennholznutzung und Mittel- oder Niederwaldwirtschaft) auf 60 Jahre festgelegt (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 48). Für die Holzentnahme wurde ein Großschirmverfahren in Kombina-

tion mit Femelhieben²⁴ empfohlen und auf Naturverjüngung gesetzt (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 54). Der erhöhte Bedarf sowohl an Bau- wie auch an Brennholz wurde durch Auslichten von Placken²⁵ gedeckt. Die Naturverjüngung war dadurch stärker gehemmt, die Bestände zeigten einen sehr unterschiedlichen Altersaufbau (Abb. 22) und geringere Qualitäten. Der steigende Holzbedarf konnte trotz Ausweitung nur durch Intensivierung der bereits bewirtschafteten Flächen gedeckt werden, in dem ab 1783 in der Kurpfalz der Plackenhiebs durch den Schirm- bzw. Kahlhieb auf großer Fläche (Schläge) ersetzt.

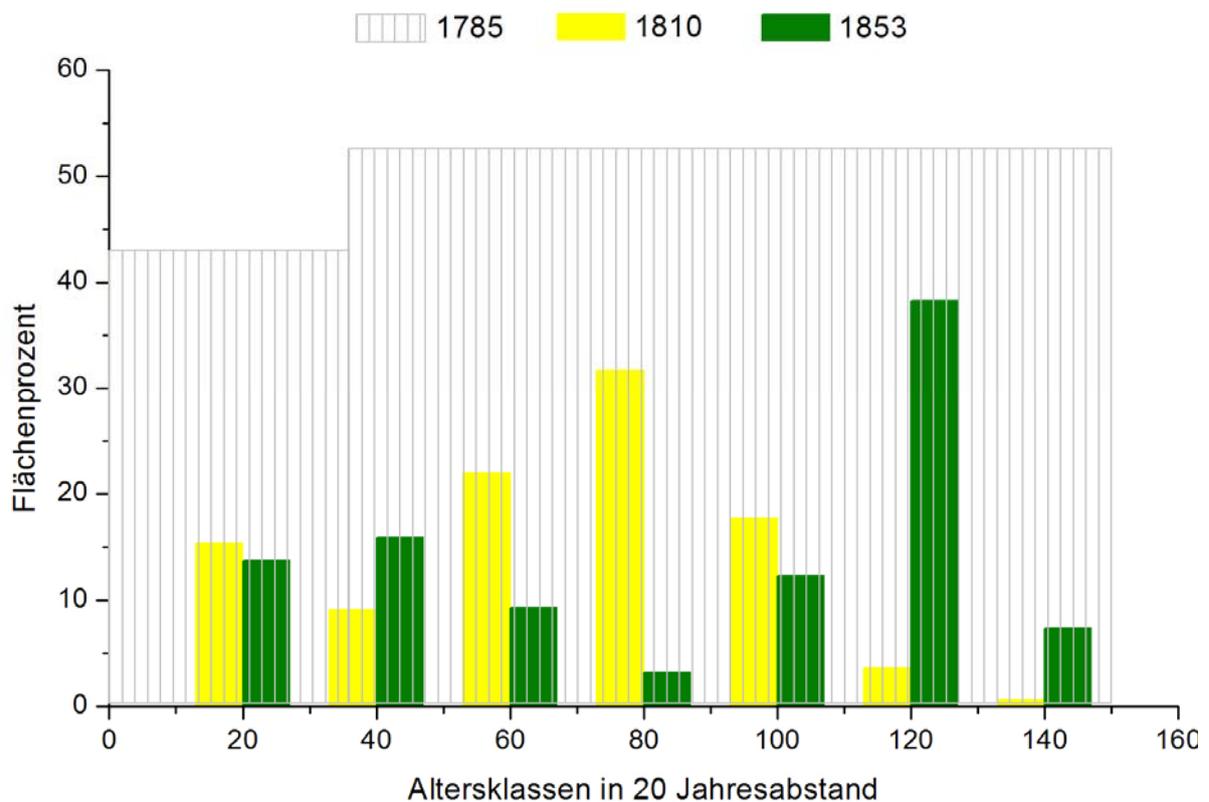


Abb. 22: Vergleich der Altersstrukturen der Bestände im Elmsteiner Wald auf der Grundlage der Waldbeschreibungen von 1785, 1810 und 1853 (nach FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 82, 186, 253).

1785 wurden verstärkt auch künstliche Ansaaten und Pflanzungen vor allem von Kiefern vorgenommen und die Umtriebszeit auf 80 bis 90 Jahre erhöht (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 94). Deutliche Folgen für den Wald hatte die Verstaatlichung des adeligen und geistlichen Besitzes zu Beginn der französischen Herrschaft 1792. Durch die besitzrechtliche Vereinheitlichung konnte der Ausbau des Trift- und Wegenetzes vorangetrieben werden.

²⁴ Femelhieb ist eine Betriebsart, bei der unregelmäßige, kleinflächige gruppenweise Auflichtung zum Aufbau von Mischbeständen aus schatten- und lichtbedürftigen Baumarten eingesetzt wird (BURSCHEL & HUSS 2003: 127).

²⁵ Placken sind „mehr oder weniger große Fläche[n]“, bei denen die Holzeinschlagsintensität des Auslichtens zwischen Schirm- und Freilage lag (BOISELLE 1998: 23).

Auch der politisch-administrative Wechsel der Rheinpfalz aus französischer in bayrische Verwaltung brachte praktische Folgen für die Forstwirtschaft mit sich. Mit dem Übergang in die bayrische Verwaltungshoheit ging die Entwicklung eines Ausbildungssystems für Förster und eines neuen Waldbildes einher. Angestrebt waren möglichst gleichaltrige reine Bestände aus Eiche, Buche oder Kiefer für die Produktion von Holzkohle, Weinbaugeräten, Bauholz und Holländerholz. Die Kriegsschäden des 18. Jahrhunderts haben, wie in den Archivalien, nicht aber in den Pollendiagrammen, nachvollzogen werden kann, zu einer starken lokalen Differenzierung geführt. Während im Elmsteiner Wald und teilweise im Kaiserslauterner Reichswald und Lauberwald bei Johanniskreuz am Ende des 18. Jahrhunderts noch intakte Bestände beschrieben wurden, hatten andere Flächen (im N, NO, O und NW des Lauberwaldes, im Aschbacher Wald) nur noch stark degradierte Walddeckung. Es bestand ein sehr kleinteiliges Mosaik unterschiedlicher Baumzusammensetzungen (Abb. 23) sowohl im Hinblick auf das Alter als auch auf die Arten und Nutzungsmöglichkeiten. Die Bestände waren meist zweistöckig aufgebaut.

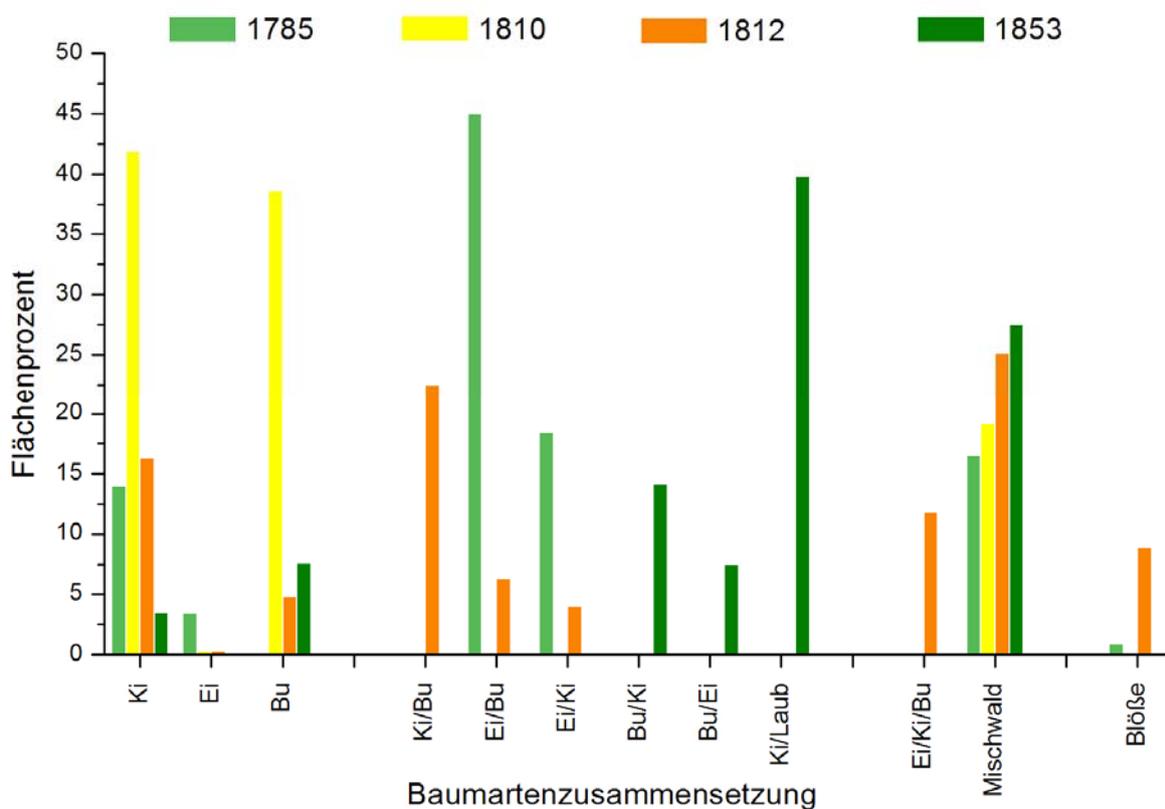


Abb. 23: Vergleich der Baumartenzusammensetzung der Bestände im Elmsteiner Wald auf der Grundlage der Waldbeschreibungen von 1785, 1810, 1812 und 1853 (nach FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 89, 118, 174, 252).

Erst 1843 wurden wieder Mischwälder und eine Kombination von Schirm- und Femelschlag angeordnet (BOISELLE 1998: 24f). Hinzu kam 1853 eine Erhöhung der Umtriebszeiten auf 144 Jahre für Buchen und 120 Jahre für Kiefern, da sich das Wirtschaftsziel verändert hatte. Die Zahl orientierte sich an dem schon 1853 vorhandenen Vorrat an alten Buchen und Kiefern und zeigt, dass diese beiden Arten zu den Zielbaumarten geworden waren. Aufgrund der Verfügbarkeit von Steinkohle als Energiequelle wurde die Forstwirtschaft ab 1850 auf die Erzeugung von Stammholz umgestellt. Auch die Hiebsart wurde korrigiert, der Femelschlag 1853 wieder erlaubt. 1884 wurden diese Regeln nachgebessert, vor allem was den Anbau von Bäumen angeht. Es folgte eine Mischung durch nachträglichen Unterbau mit Buche.

Die landwirtschaftliche Produktion erfuhr mit der Industrialisierung ebenfalls einen intensiven Wandel. Die Kartoffel wurde schon im 17. Jahrhundert in Dahn und Annweiler als Viehfutter angepflanzt. Mit Beginn des 18. Jahrhunderts wurde sie als Feldfrucht verwendet, die Anbauflächen wurden unter französischer Herrschaft ausgedehnt und seit den Hungerjahren von 1815 bis 1817 zählte sie vor allem bei der armen Bevölkerung, zur Grundnahrung. Auch Rüben wurden als Viehfutter angebaut, die Intensivierung des Anbaus 1811 und 1812 zur Herstellung von Zucker war jedoch nicht erfolgreich (WEIDMANN 1968: 116-120). Mit der Ausbreitung des Kartoffelanbaus erhöhte sich die Pflugtiefe. Unter der Prämisse nicht den tiefer liegenden unfruchtbaren Boden zu erreichen, hatten die Pfälzer in den Agrargebieten bis zum Ende des 18. Jahrhunderts nur sehr oberflächennah (8 bis 10 cm nach HARD 1970: 302) gepflügt und dazu den Göllheimer Pflug²⁶ bzw. den Heidelberger Pflug²⁷ verwendet. Zugtiere waren Ochsen oder Kühe, im Donnersberg-Gebiet entstand dadurch eine eigene Zugtierrasse. Die Verstaatlichung adeligen und geistlichen Eigentums unter Napoleon führte zur weitgehenden Befreiung der Bauern von Grundlasten. Die darauf folgende Nationalgüterversteigerung ermöglichte zwar einer Großzahl von bemittelten Bauern, ihr Land zu kaufen, weniger bemittelte Bauern wurden dadurch jedoch zu Tagelöhnern (WEIDMANN 1968: 54). WEIDMANN (1968: 76f) bezeichnet die Jahre 1770, 1796 und 1815 bis 1817 als Hungerjahre; erstere durch akuten Dungmangel (Beschlagnahmung des Viehs oder Viehseuchen), letztere durch Missernten und zu hohe Getreidepreise verursacht. Die von TROBBACH (1993: 6) genannte deutschlandweite Hungerkrise von 1739 bis 1741 erwähnt WEIDMANN (1968) dagegen nicht. Den durch Absatzschwierigkeiten infolge schlechter Transportwege verfallenden Preisen wurde durch Branntweinherstellung und Umstellung auf Sonderkulturen wie Tabak und Wein

²⁶ Der Göllheimer Pflug ist ein Wendepflug mit versetzbarem Scheidbrett.

²⁷ Der Heidelberger Pflug ist ein Reißpflug mit festem Scheidbrett.

in der Vorderpfalz begegnet. Die zollpolitisch bedingte Absatzkrise in den 1820er Jahren führte zu Zwangsversteigerungen, einer Auswanderungswelle und zum staatlichen Straßenbauförderungsprogramm der bayrischen Verwaltung (WEIDMANN 1968: 56).

Die Waldweide war Bestandteil jeder Waldbeschreibung und wurde auch 1853 als eine für die Versorgung der Bevölkerung im Elmsteiner Tal notwendige Wirtschaftsweise akzeptiert und unterstützt. In der Waldbeschreibung von 1853 war auch der Umfang der Streunutzung festgelegt. Wurden 1785 noch Flächen mit häufigen Waldbränden und Blößen (0,9 %) erwähnt, so war dies 1853 nicht mehr der Fall. Weder in der Waldbeschreibung für den Lauberwald von 1792 noch in den Auswertungen für den Elmsteiner Wald von FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) ist Verjüngung durch Stockausschlag (Niederwaldwirtschaft) für den Elmsteiner Wald belegt und es wird deutlich darauf hingewiesen, dass Stockausschlag bei der Verjüngung keine Rolle spielte. Für Teilbereiche der Trippstädter Waldungen ist dagegen die Niederwaldwirtschaft 1828 belegt, HILDEBRANDT ET AL. (2007: 41) gehen sogar davon aus, dass Stockausschlag im gesamten Bestand der Trippstädter Waldungen seit dem ausgehenden 18. Jahrhundert betrieben wurde. Die hohe Anzahl an Holzkohlefunden im Pollendiagramm zu Beginn des 19. Jahrhunderts ist zusammen mit der Zunahme von Buche in den Kohlenholzspektren der untersuchten Meiler um Johanniskreuz trotz der konstanten Buchenanteile im Pollendiagramm ein Beleg für die einsetzende Massenköhlerei (HILDEBRANDT ET AL. 2007: 150). Nach HILDEBRANDT ET AL. (2007: 12ff) gab es erst ab 1724, als im Karlstal die Eisenproduktion beginnt, einen Bedarf zur Massenproduktion von Holzkohle was sich in kleinräumiger Verdichtung oder Mehrfachnutzung der Meilerstandorte, dem Einsetzen von Nadel- und dem Aussetzen von Eichkohlholz niederschlug.

Die hohe Nachfrage nach Brennholz führte zur Intensivierung des Transportsystems der Trift Mitte des 18. Jahrhunderts. Nur für die Jahre von 1792 bis 1795 ist eine Unterbrechung der Trift bekannt. Die Blütezeit der Holztrift im Speyerbachtal war 1850 erreicht, 1906 wurde das letzte Mal Brennholz getriftet (SCHMERER 1998: 47ff; ZINTL 2006: 149). SCHMERER (1998: 57) vertritt die Auffassung, dass erst durch den Ausbau der Trift die Gründung der Siedlungen Waldleiningen und Frankeneck möglich wurde, in denen die Ansiedlung von Holzfällern und Flößern gefördert wurde. Auch JENTSCH & LUKHAUPT (1998: 42) heben die fördernden Folgen des Ausbaus der Trift zu Beginn des 19. Jahrhunderts für die Entwicklung der Bevölkerung von Elmstein hervor. Die Trift im Pfälzerwald unterscheidet sich von dem im Oberpfälzer Wald betriebenen Treideln dadurch, dass nur Holz transportiert wurde und die Trittpfade damit nur von Menschen und nur im Frühjahr benutzt wurden. Sie ist damit extensiver als das Treideln mit Zugpferden und Booten, wie sie von RICHARD (2005: 95, 92)

auf der Vils beschrieben wird. Die Trift von Brenn-, Dauben- und Stiefelholz bestand aus dem Holzeinschlag im Winter, dem Abtrocknen im Wald während des Sommers, dem Transport²⁸ auf die Bollerplätze in den Auen im Herbst. Erst im Frühjahr wurde dann das Schmelzwasser zum Transport zu den Holzhöfen in Neustadt, Mutterstadt, Speyer, Frankenthal oder Mannheim genutzt. Um die Trift möglichst reibungslos zu gestalten, wurden die Bachläufe verlegt. Die Bäche wurden fast vollständig mit Sandsteinquadern eingefasst und kanalisiert. Dabei wurde zu starkes Gefälle (>1,5 %) durch Stürze, Wehre, Überfälle ausgeglichen. Es wurden Stauwehre und Wooge zum Sammeln von Wasser, Rechen und Scheeren zum Sammeln des Holzes angelegt (JENTSCH & LUKHAUPT 1998: 35f; SCHMERER 1998: 47-57; ZINTL 2006: 147-149).

Der Ausbau der Triftbäche im Speyerbachtal ist demnach als großer Eingriff in die Auen zu werten, der mit Begradigungen, Verbreiterungen, Laufverlegungen und Einkastelung die Gewässer direkt betraf. Der Bau der Wooge, Wehre, Rechen, Scheeren etc. hat darüber hinaus die Auenflächen durch die Aufschüttung von Erdwällen und den Aushub während des Bauens oberflächennah umgestaltet. Dazu kommen die regelmäßigen Überflutungen der Auen und Wässerwiesen, die für die Trift erzeugt wurden und häufig zu Zerstörung bzw. Versandung der Wiesen führten. Man muss demnach spätestens seit 1403 von einer anthropogen bedingten, regelmäßigen Erosion der bachnahen Auensedimente und räumlich bzw. zeitlich unregelmäßigen Aufsandung anderer Bereiche der Auen ausgehen.

Mit der Industrialisierung wurde auch der Straßenaus- sowie Straßenneubau im 19. Jahrhundert verstärkt betrieben. Noch unter französischer Herrschaft erfolgte von 1806 bis 1811 der Bau der Kaiserstraße Saarbrücken–Kaiserslautern–Kirchheim–Alzey–Mainz (CLOER & KAISER-CLOER 1984: 49). Unter bayrischer Verwaltung wurden gepflasterte einspurige Straßen (4 bis 5 m breit) gebaut, die dem Abtransport des Holzes dienten. Daneben erfolgte über die 1838 schon existierenden zwölf Holzabfuhrwege hinaus die Anlage von Waldwegen durch Planierung oder Schotterung und der Bau von Schlittel- und Ziehweg-Anlagen (STUCKERT 1960: 254; ZINTL 2006: 128).

Was findet sich von den aus Archivalien zusammengetragenen Informationen im Kartenbild wider? Betrachtet man die Kartenausschnitte des Speyerbach-Einzugsgebiets (Abb. 24), so sind trotz dem französisch-kurpfälzischen Krieg (1792 bis 1797) die Wälder 1797 als geschlossene Waldgebiete kartiert worden. Die Plünderungen im Winter 1793/94 und das Wüstlegen der Siedlungen sowie die Hiebe für den Krieg haben demnach nicht zu einer

²⁸ Der Transport erfolgte per Fuhrwerk über Waldwege, lose über Riese und Spieken, oder mit dem Holzschlitten über Schlittelwege.

vollständigen Devastierung geführt, da die Flächen noch als Waldgebiet kategorisiert wurden. Auffällig sind die breiten Wiesen entlang der Bäche und in den Trockentälern, die nur an einigen Stellen als Ackerland genutzt wurden. Die starke Ausdehnung ist nach HAHN ET AL. (2000: 151) darauf zurückzuführen, dass eine Futterbasis für die während der französischen Besetzung verzeichnete Erhöhung der Viehbestände benötigt wurde.

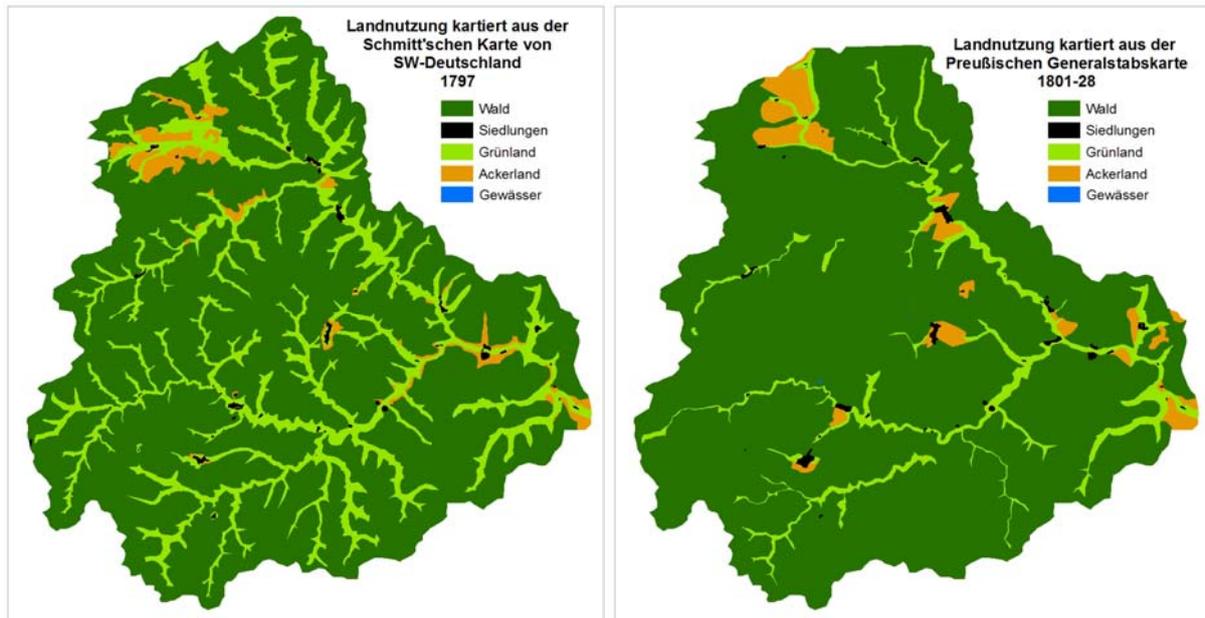


Abb. 24: Digitalisierte historische Landnutzung im Speyerbach-Einzugsgebiet aus den Jahren 1797 und 1801-1828 (von links nach rechts).

Tab. 13: Flächenanteile der Landnutzungsklassen der in Abbildung 24 dargestellten Karten in Prozent.

	1797	1801-1828
Acker	2,68	3,69
Grünland	16,75	6,58
Wald	80,1	89,14
Siedlung	0,47	0,58
Wasser		0,01

Der Flächenanteil der Ackerflächen stieg leicht an (Tab. 13). Die Grünlandflächen, die sich 1797 noch in allen Tälern vorfanden, nahmen zu Gunsten des Waldes um rund 60 % ab. Der Ackerbau wurde im 18. und 19. Jahrhundert vorwiegend auf den lössbedeckten Hügeln um Hochspeyer und in der unmittelbaren Umgebung der Siedlungen betrieben. Dabei wurden Auenflächen gemieden, Unterhänge nur im unteren Leinbachtal, bei Frankeneck, Lambrecht

und Neustadt a. d. W. genutzt. Betrachtet man sich die Ackerflächen genauer, so scheinen sie sich um 1900 vor allem auf meist süd- oder westexponierten Hängen von den Trockentälern und Unterhängen hangaufwärts ausgedehnt zu haben. Sie reichten auch in steilen Hängen bis zu Verebnungsflächen über 50 bis 100 Höhenmeter hinauf.

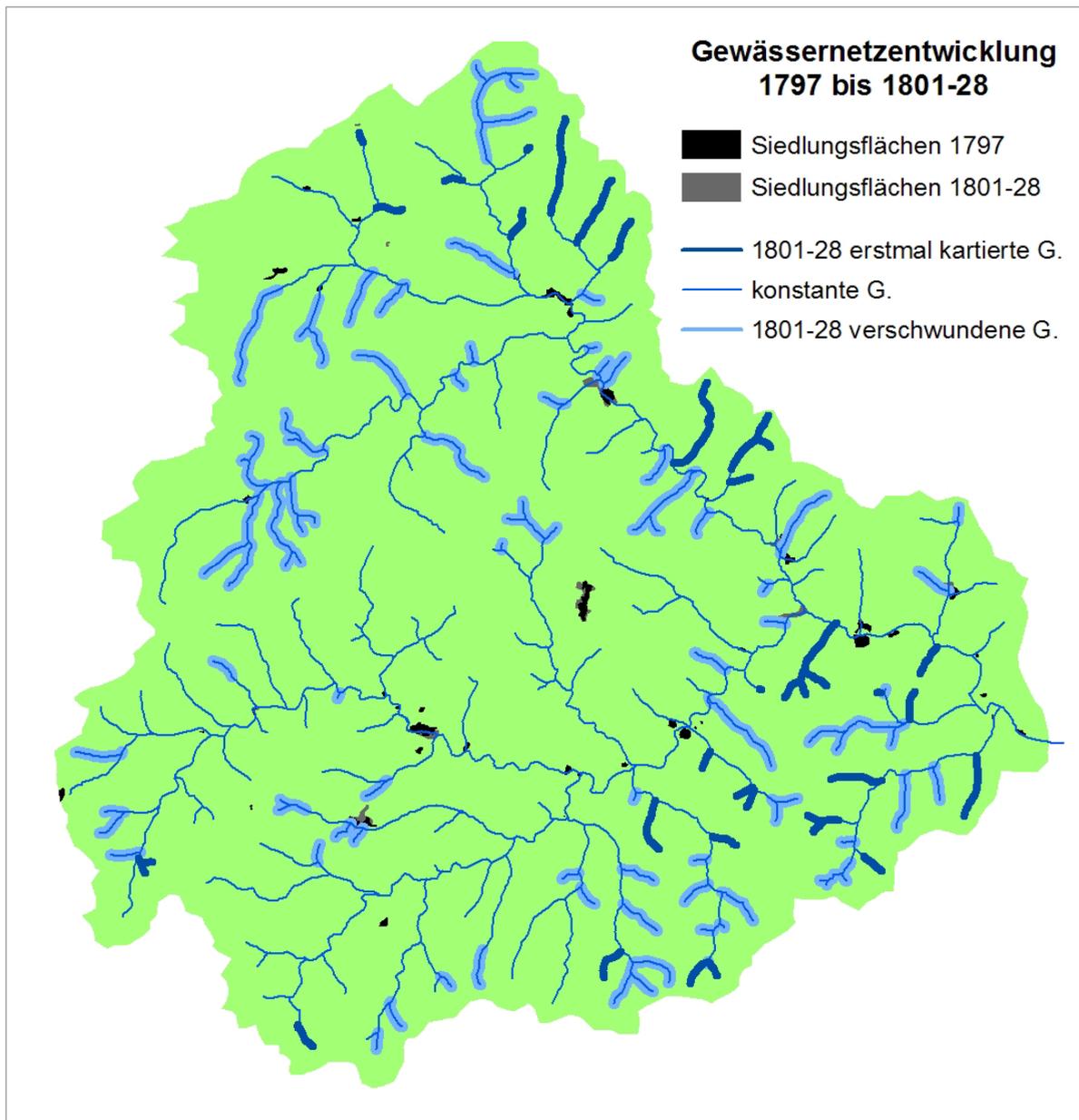


Abb. 25: Fließgewässerentwicklung zwischen 1797 und 1801 - 1828 im Speyerbach-EZG (Gewässerlänge).

Interessant ist auch die Veränderung des kartierten Gewässernetzes zwischen 1797 und 1801 - 1828 (Abb. 25). In der Schmitt'schen Karte von 1797 reichen die Fließgewässer tiefer in die Täler hinein. Hier wurden insgesamt 299,35 km kartiert, 23 % davon sind in der Preußischen Generalstabkarte (1801 - 1828) nicht mehr kartiert worden. In letzterer umfasst das Gewässernetz nur noch 255,85 km. Es gibt jedoch im südlichen und nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets Nebentäler, in denen erst 1801 - 1828 Fließgewässer kartiert wurden. Diese

bilden rund 10 % des kartierten Gewässernetzes von 1801 – 1828. Die meisten der trocken-gefallenen Täler lagen entweder in direkter Nachbarschaft zu einer Siedlung oder in den Tal-schlüssen in der Nähe der Wasserscheide. Auffällig ist, dass die neuen Fließgewässer vor allem im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets auftraten. Die Ausdehnung der Ackerfläche bis 1801 - 1828 könnte zum Anstieg des Grundwasserspiegels und damit zur Entstehung von Fließgewässern geführt haben. Dies scheint im Beispiel des Hochspeyerbachs bei Fischbach der Fall zu sein (Abb. 26, links).

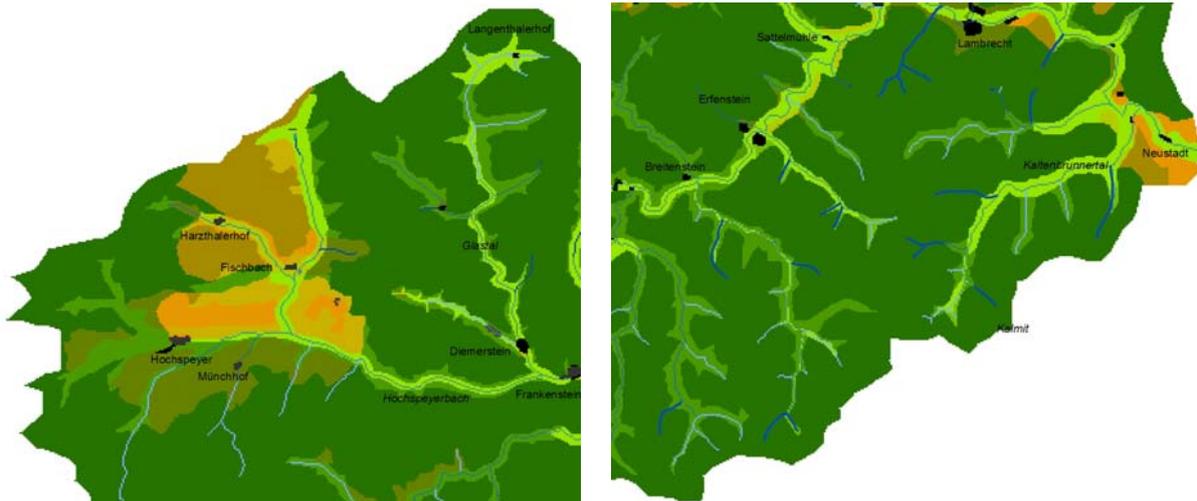


Abb. 26: Landnutzungswandel und Änderungen im Gewässernetz zwischen 1797 und 1801-28 in Ausschnitten: Ackerflächen bei Hochspeyer (links) und Wald bei Erfenstein (rechts). Orange: immer Ackerflächen, durchscheinend orange: erst 1801-28 Ackerflächen geworden, dunkelgrün: immer Wald, hellgrün: immer Grünland, durchscheinend Grün: Grünland, das 1801-28 als Wald ausgewiesen wurde, hellblau: 1797 kartierte Bachläufe, die 1801-28 nicht mehr ausgewiesen worden, dunkelblau: 1801-28 kartierte Bachläufe, die 1797 noch nicht kartiert worden waren.

Die Ackerflächen um Hochspeyer erstreckten sich 1797 viel stärker nach Süden und der Bereich von Fischbach bis zur Nordgrenze war noch bewaldet. Die Bäche im Süden verschwanden mit der Aufforstung, der Hochspeyerbach verlängerte sich 1801 - 28 infolge der Ackernutzung zur nördlichen Wasserscheide hin – vielleicht auch durch den Bau des Woogs²⁹. Auch das Glastal wurde im 19. Jahrhundert weniger als Weide genutzt – die Oberläufe versiegten. Gleichzeitig entstanden hier trotz der Ausdehnung des Waldes auch neue Bäche, ebenso in der Runse gegenüber von Fischbach (Abb. 26, links). Vergleicht man dazu das bereits 1797 walddominierte Gebiet südlich von Erfenstein und Lambrecht (Abb. 26, rechts), so wird klar, dass diese Argumentation nicht aufrechterhalten werden kann. Versiegten fast alle Oberläufe und Nebentäler der Seitentäler des Helm- oder Speyerbachs nach 1797, so wurden einige andere bis 1801 - 1828 aktiviert, ohne dass dabei ein räumliches Muster aus der Landnutzung ersichtlich wäre.

²⁹ Woog: künstlich angelegtes Staubecken, dass Wasser eines Fließgewässers zum Flößen von Trifholz aufstaut.

Die klimatischen Bedingungen lassen sich für die Neuzeit trotz Beginn der instrumentalen Aufzeichnungen nur bedingt rekonstruieren. Die in den Ortschroniken dokumentierten Niederschlagsereignisse sind häufig von extremem Charakter, allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Überschwemmungen festgehalten wurden. Für die Häufung der Unwetter im 18. Jahrhundert ist charakteristisch, dass es sich um Starkregenereignisse handelte, die von geringer Reichweite aber hoher Erosionswirksamkeit sind. Das von GLASER & STANGL (2004) 1784 für Heidelberg und das Rheingebiet beschriebene Eishochwasser im Spätwinter wird von WITTE ET AL. (1995:17) auch für die Mittelrheinregion 1740 und 1784 verzeichnet. HAHN (1992) kategorisiert das Hochwasser am Main und der Tauber 1784 als Jahrtausendhochwasser. In der „Geschichte der Pfalz“ von MOERSCH (1987: 437) wird die Situation von 1784 verdeutlicht: „[Die]...*extreme Witterung in den Jahren 1783 und 1784 – zuerst Überschwemmungen und Kälte, dann heiße Sommer mit Seuchen – [wird] zahlreiche Pfälzer veranlasst haben, in den fruchtbaren Regionen der ungarischen Tiefebene eine neue Existenz zu gründen.*“ Eine detaillierte Auswertung von Archivmaterial, wie sie von PFISTER ET AL. (1988) für die Schweiz vorgelegt wurde, existiert jedoch für den Pfälzerwald nicht. Extremste Ereignisse in der Schweiz fanden 1893 (Dürre) sowie in den Jahren 1879, 1880, 1893-97, 1909, 1911 (Windbruchereignisse) statt. In Deutschland dagegen wurden 1893, 1904, 1911, 1921, 1947, 1959 Windbruchereignisse und 1865 der zweittrockenste Sommer seit Messbeginn verzeichnet (PFISTER ET AL. 1988: 43, 46f). Im Folgenden werden die Niederschlagsereignisse vorgestellt, die den Ortschroniken der Siedlungen im Untersuchungsgebiet entnommen sind.

Weidenthal

In der Ortschronik wird von mehreren wolkenbruchartigen Unwettern berichtet, die tiefe lineare Erosionsschäden verursachten: **1834, 1835, 1882** und **1978**. Der Wolkenbruch von 1834 hat vor allem auf den Feldern großen Schaden angerichtet und die Brunnen verschüttet. 1835 waren, durch einen Wolkenbruch am 21. Mai, alle Seitentäler von Weidenthal betroffen. In die Äcker wurden bis zu vier Meter tiefe Gräben gerissen. Das Sensental wurde vier Meter tief eingeschnitten. Das größte Hochwasser Weidenthals im November 1882 wurde dagegen durch eine achttägige Regenperiode verursacht. Dabei kam es im Hochspeyerbachtal im Bereich des Mitteldorfes zu Überschwemmungen und im Sensen- und Weißenbachtal zu „*Erdrutschen*“ (STUCKERT 1960: 68-72).

Lambrecht

In der Ortschronik von Lambrecht wird ein Wolkenbruch besonders betont: Am 5. September **1792** begann um 1 Uhr nachts ein Gewitter mit heftigem Regen in „*verschiedenen Gegenden*“. Gegen 2 Uhr nachts „*verdoppelte sich der Regen mehr*“ und die Seitenzuflüsse des Speyerbachs schwollen an. „*[I]n Grevenhausen hat die Luhrbach einen 15 bis 20 Schuh tiefen Graben eingerissen, [...] sowie eine Reihe von Scheuern und Ställen ganz, mehrerer Häuser zum Teil eingerissen [...]*“ (COLLOFONG & FELL 1978: 258). Im Lambrechter Ortsteil „*staute sich das Wasser an der Brücke 15 Schuh hoch, [...] ein guter Theil der Clostergärten ist in dieser Höh mit Schlamm überflutet [...], das gantz Orth überschwemmt [...], Mauern eingestürzt [...], die Gemarckung unterhalb mit Treibgut, Geröll und Schlamm verwüstet [...]*“ (COLLOFONG & FELL 1978: 258).

Neidenfels

Die Ortschronik von Neidenfels berichtet von mehreren Schadensereignissen im 19. Jahrhundert, die jedoch trotz großer Zerstörung, die jeweils in dem Gebiet der Gemeinde entstand, nicht überregionaler Art gewesen zu sein scheinen. Danach brachte ein Gewitter mit wolkenbruchartigem Regen über dem Lichtensteiner Kopf, dem Schloß- und dem Flurberg am 13. August des Jahres **1858** die „*wohl größte Flutkatastrophe des Tales*“ (KARCH 1968: 210). Der Schaden wird wie folgt geschildert: „*Die mächtigen Wasser rissen Blockholz und Felsen zu Tal und zerstörten alle Wege. [...] Das Steingeröll staute den Floßbach [Speyerbach, Anm. d. A.] so hoch, dass seine Wasser die Talstraße überfluteten. Tagelang dauerten die Aufräumarbeiten.*“ (KARCH 1968: 210). Schon **1863** verursachte ein „*gewaltiger Hagel- und Gußregen*“ (KARCH 1968: 210) großen Hangabtrag, der aus Steinen, Geröll und Erdmassen bestehend die Straße verschüttete. Waldwege wurden dabei zerstört. Ein starker Gewitterregen 1871 reichte aus, dass der erst 1869 angelegte Vordertalerweg so stark beschädigt wurde, dass sechs Mulden zum Wasserauffang angelegt wurden. 1904 wurde der Weg gepflastert und mit einer Decke aus Kohleschlacke bedeckt, die „*der erste Regen wegwusch*“ (KARCH 1968: 214). Dagegen war es am 29. März **1872** tagelanger Regen, der die Quellen in den Seitentälern bei Neidenfels aktivierte: „*Das Wasser schoss aus den Seitentälern wie Wildbäche zu Tal, alles niederreißend, was sich in den Weg stellte. Der untere Teil des Vordertalerweges verwandelte sich in einen reinen Flutgraben.*“ (KARCH 1968: 210f) . Am 20. Juni **1877** wurden zwei bis drei Meter tiefe Gräben in Felder und Wiesen durch einen sommerlichen Wolkenbruch aufgerissen (KARCH 1968: 211).

Die Zusammenstellung der neuzeitlichen Hochwässer im Speyerbach-Einzugsgebiet nimmt sich spärlich aus, vergleicht man die Ergebnisse mit denen aus den Studien von BRAZDIL (1998), GEES (1997), GERBER (1989), GLASER (1998), für die Moldau, die Elbe, den Main

oder Schweizer Flüsse (siehe Abb. 27). Sie spiegelt aber das allgemein gehäufte Auftreten von Hochwässern zwischen 1750 und 1900 wieder.

Am Beispiel der Holznotdebatte während der Industrialisierung wird in Anhang 7 gezeigt, dass es trotz der gestiegenen Ansprüche von Bevölkerung und Industrie an den Wald nicht zur flächendeckenden Abholzung kam. Wenngleich die vorgestellte Auswertung von Betriebsunterlagen ein relatives Bild der (langfristigen) Verfügbarkeit einer Ressource liefert, können sie wenig über den realen Waldzustand oder gar die Bodenbedeckung aussagen.

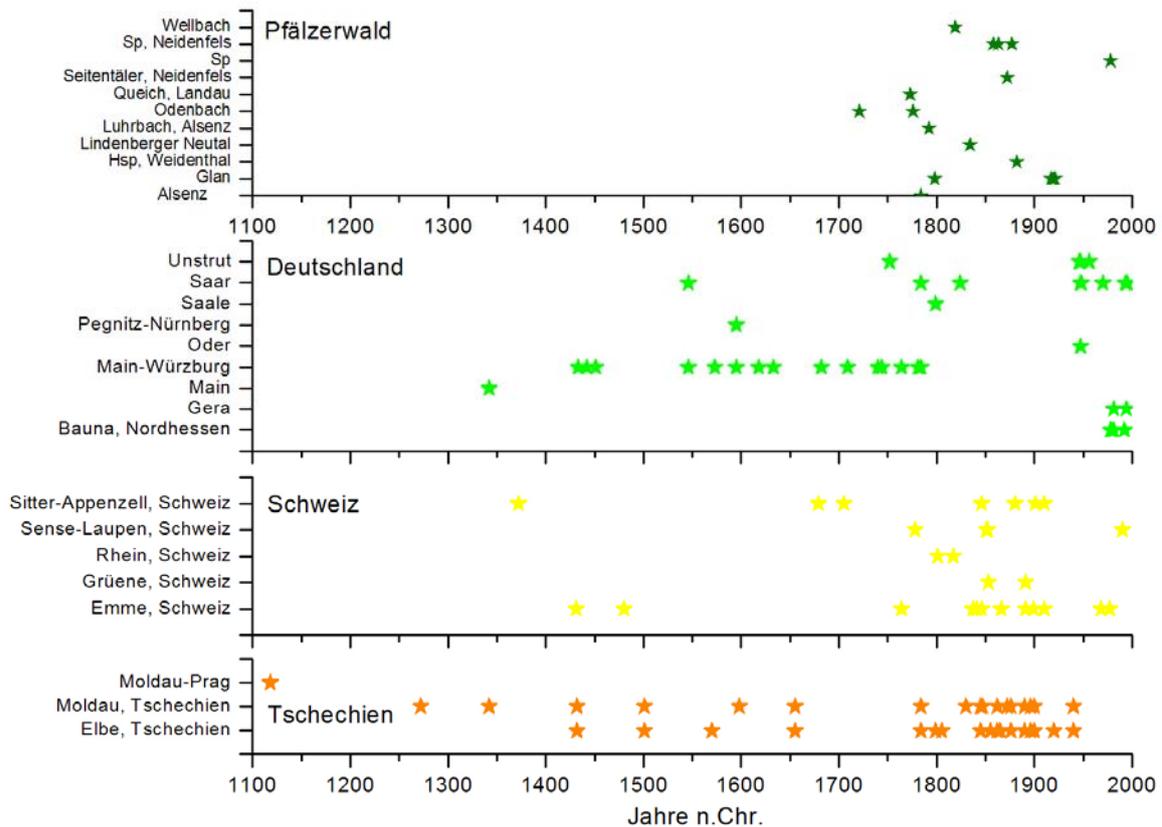


Abb. 27: Von der Autorin zusammengetragene publizierte Hochwässer im Pfälzerwald, in anderen Regionen Deutschlands, der Schweiz und Tschechiens (von oben nach unten) nach Daten von BRAZDIL (1998), DEUTSCH (1998), DEUTSCH (2000), GEES (1997), GERBER (1989), GLASER (1998), HIMMLER (2010), KARCH (1968), RIEGER & VINGERT (2000), RÖTTCHER ET AL. (2000), SCHMIDT (2002) und SCHOLZ ET AL. (2000). Der Abbildung liegen keine eigenen Recherchen in Primärquellen zugrunde und sie erhebt deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Lücken müssen – nicht zuletzt deshalb – nicht heißen, dass in den ausgewählten Gebieten keine Hochwässer stattgefunden haben.

Auch die Tatsache, dass nach HILDEBRANDT ET AL. (2007) im Kaiserslauterner Reichswald, Elmsteiner Wald und Lauberwald weiterhin intakte Bestände existierten, als der Aschbacher Wald schon stark degradiert war, ist ein weiterer Hinweis darauf, dass der neuzeitliche Energiebedarf ein kleinräumiges Muster der Intensitätsschwankungen in der Bodenbedeckung erzeugt hat. Aus diesem Beispiel ist auch abzuleiten, dass für andere Gewerbe (Glashütten, Pottaschesiederei, Landwirtschaft, Weinbau, Tuchmacherei) eigene Bedingungen und Bedürfnisse an Holzkohle bestanden haben, was das Mosaik weiter differenziert haben dürfte. Das in

der Frühen Neuzeit verstärkte Auftreten von starken Niederschlägen führte, wie anhand der Ortschroniken gezeigt werden konnte, zu Erosionsereignissen, die mehr oder weniger große Bereiche des Untersuchungsgebietes betrafen und auch zu linienhafter Erosion am Hang führten. Das dabei mobilisierte Material ist direkt in die Auenbereiche der Haupttäler transportiert worden.

3.6 Das größte Waldgebiet Deutschlands – Der Pfälzerwald in der späten Neuzeit

Der Mittlere Pfälzerwald verlor an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert seine Bedeutung als Industriestandort. Mit dem Niedergang der Eisenindustrie am Ende des 19. Jahrhunderts brach auch die Tuchmacherei in Lambrecht ein. Die letzten Fabriken wurden aber erst in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts geschlossen. Einzig die Papierproduktion findet auch heute noch in Neidenfels statt.

Die nach HARD (1970) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts beginnende Umwidmung der Ackerflächen in Grünland (z. T. mit den Übergangsstadien besömmerte Brache und Fruchtwechselwirtschaft) ist beim Vergleich der topographischen Karten von 1801-1828 und 1915 im Speyerbach-Einzugsgebiet noch nicht zu erkennen (Abb. 28 und Tab. 14). Im Untersuchungsgebiet nahm der Flächenanteil des Ackerlands bis 1915 noch einmal leicht zu, der des Grünlands dagegen stark ab. Erst seit 1915 entwickelten sich die Siedlungsflächen auf Kosten der Ackerflächen in Siedlungsnähe und Ackerland wird wieder in Grünland umgewidmet. Landwirtschaft wird 2001 nur noch um Hochspeyer und Fischbach betrieben. Vergleicht man diese Entwicklung mit historischen Photographien aus den Ortschroniken, so kann man davon ausgehen, dass diese Umwidmung erst nach dem zweiten Weltkrieg stattgefunden hat. Auf den Grünlandflächen wurden während der Geländearbeiten von 2006 bis 2008 vor allem Schafe, Kühe und Pferde gehalten.

Noch 1890 und 1911 wurden Korrekturen in den Verordnungen zur Waldpflege vorgenommen um Mischbestände zu sichern. Sie förderten, auf Kosten der Eiche, die Nadelgehölze, die künstliche Anlegung von Beständen und geboten eine minimale Bodenbearbeitung. 1925 wurden die heute gültigen Konzepte und Regeln aufgestellt, die die *„Erreichung dauernder höchster Massen- und Werterzeugung durch Ausnutzung aller natürlichen Kräfte des Waldes und Anwendung aller Mittel der waldbaulichen Technik“* (BOISELLE 1998: 26) anstreben. Mit ihnen wird Wert auf die Erhaltung der Bodenkraft gelegt; die Naturverjüngung

sollte möglichst ausgenutzt und mit Schattholzvoranbau kombiniert werden. Letzte Änderungen an den Waldbauregeln im Pfälzerwald wurden 1983 nach den „*Errungenschaften von Forschung und Erfahrungen*“ vorgenommen (BOISELLE 1998: 25).

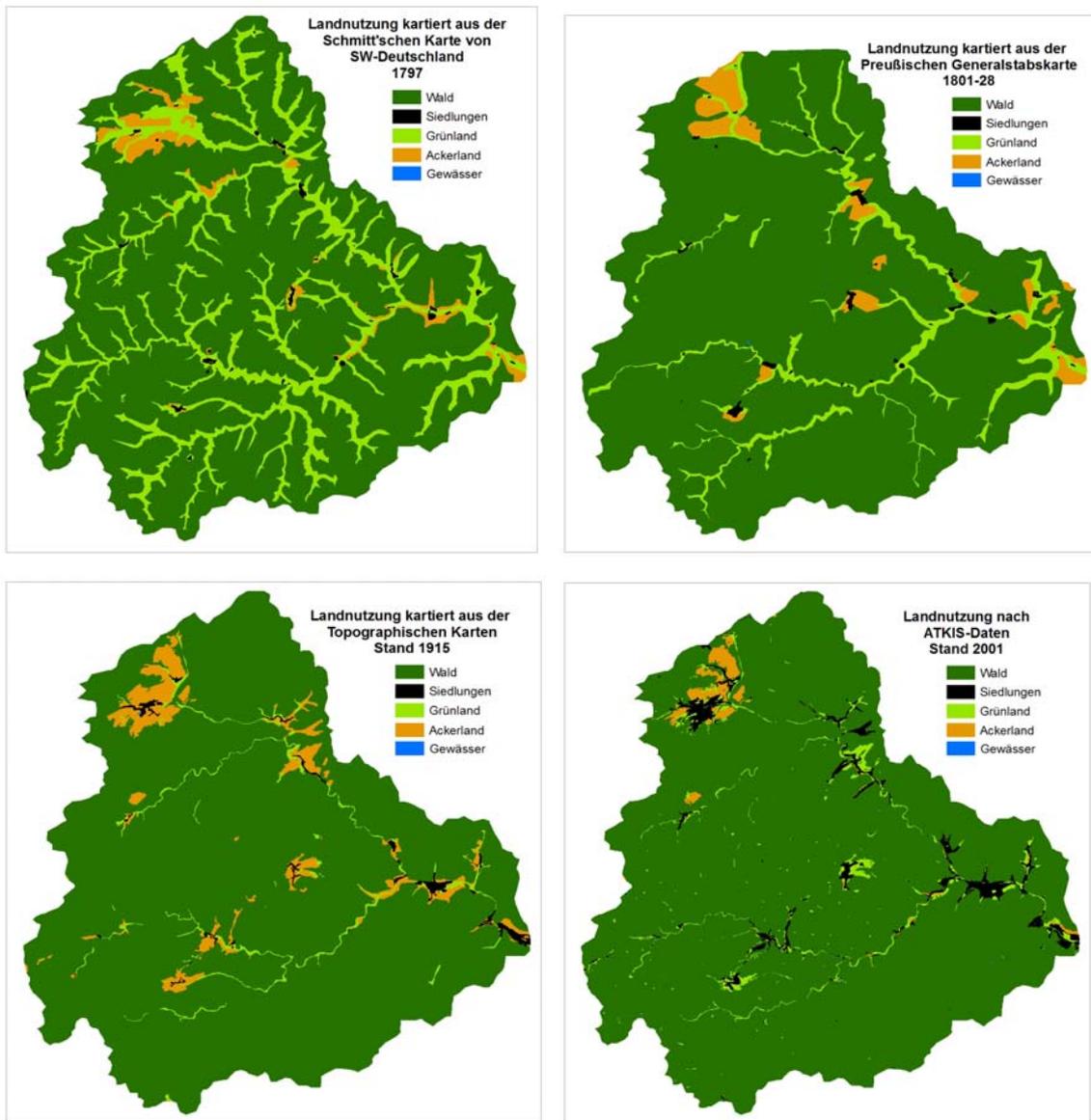


Abb. 28: Digitalisierte historische und quasi-aktuelle Landnutzung im Speyerbach-Einzugsgebiet aus den Jahren 1797, 1801-1828, 1915 und 2001 (von links nach rechts).

Tab. 14: Flächenanteil der Landnutzungsklassen der in Abbildung 28 dargestellten Karten in Prozent.

	1797	1801-1828	1915	2001
Acker	2,68	3,69	4,44	1,24
Grünland	16,75	6,58	1,55	2,29
Wald	80,1	89,14	93,18	93,81
Siedlung	0,47	0,58	0,82	2,64
Wasser		0,01	0,004	0,023

Wie Tabelle 15 darlegt, ist es vor allem der Ausbau der Waldwege, der die Ermöglichung der Bewirtschaftung nach dem Stand der Technik garantieren soll. Um die Entwicklung des Erschließungsgrades des Speyerbachs abzuschätzen, wurde aus der Schmitt'schen Karte von Südwestdeutschland, der Preußischen Generalstabskarte und den ATKIS-Daten³⁰ das Wegenetz im Speyerbach-Einzugsgebiet kartiert. Die Römerstraßenverläufe* sind nach den groben Angaben von BERNHARD (2001: 53), KARCH (1968: 37) LUDT (1959) und STUCKERT (1960: 249) bandartig kartiert worden und damit nur als Minimumwert zu verstehen. Die in Tabelle 15 dargestellten Fehler wurden aufgrund des Digitalisierungsverfahrens geschätzt. In der Schmitt'schen Karte wurden nur Wege einer Kategorie dargestellt, weshalb vermutet wird, dass Waldwege niedriger Ordnung fehlen. Der Fehler wird daher auf 50 % geschätzt. Der Fehler für die Karte von 1801 - 1828 ist kleiner, da schon zwei Kategorien Wege eingezeichnet sind. Bei den ATKIS-Daten handelt es sich um einen Schätzungsfehler des Anteils an Schrift und Nichtwege-Umrissen. Bei der Umrechnung der Fläche auf die Weglänge wurden zwei Werte angenommen: a) 6 m Wegbreite und b) 5 m Wegbreite. Nach Angaben der NAVLOG GmbH³¹ sind basierend auf den ATKIS-Daten 2202 km Waldwege 1. und 2. Ordnung des GEODAT-Standards kartiert worden. Damit sind mehr als zwei Drittel bzw. die Hälfte aller Wege im Speyerbach-Einzugsgebiet als LKW-fähige Wege, d.h. als 100 % abflusswirksam anzusehen.

³⁰ Aus dem Layer dtk25schw.tif wurden für das Gebiet des Speyerbachs die Anzahl der Pixel mit Inhalt ausgelesen und mit der Zellgröße multipliziert. Die Gesamtfläche dieses Inhalts wurde durch eine mittlere Straßenbreite von vier Metern dividiert. Da in dem Straßenlayer aber auch Schriftzüge und Hausumrisse, Stadien und städtische Plätze enthalten sind, wurden 20 Prozent der Gesamtlänge abgezogen.

³¹ Freundliche Mitteilung von S.Schnitzler, NavLog GmbH, vom 25.03.2011.

Tab. 15: Aus der Schmitt'schen Karte von SW-Deutschland (1797), der Preußischen Generalstabkarte (1801-1828) und den ATKIS-Daten (2001) geschätzte Länge des Wegenetzes in Kilometern, bei a) Wegbreite = 6 m, b) Wegbreite = 5 m. Erläuterungen siehe Text.

	alte Höhenwege* / „Römerstraßen“	1797	1801-1828	2001
Wegstrecke (km)	~120	~420	~565	a)~3350 b)~4020
geschätzter Fehler (%)	+100	±50	±25	±20
km Weglänge pro km ² Fläche	0,4	1,3	1,8	a) 10,8 b) 12,9

Wenngleich die in Tabelle 15 dargestellten Zahlen nur als Orientierungswerte anzusehen sind, so wird doch der qualitative Anstieg mit der Industrialisierung und der Intensivierung der Nutzung der Wälder im 19. Jahrhundert deutlich. Die derzeitige Verkehrswegdichte von rund 11 bzw. 13 km Wege pro km² Einzugsgebietsfläche ist damit um das Zehnfache größer als die Gewässerdichte im Untersuchungsgebiet (1,032 km km⁻²).

Die Moderne hielt in Deutschland wie auch in der Schweiz mit einer Folge von extremen Dürre-Ereignissen Einzug. Extremste Dürre-Ereignisse in der Schweiz fanden 1893, 1911 und 1947 statt, in Deutschland 1893, 1904, 1911, 1921, 1947 und 1959 (PFISTER ET AL. 1988: 43, 46). Die größten landwirtschaftlichen Schäden (aufgrund der im Vergleich zu 1540 sehr viel intensivierten Landwirtschaft) hat die Dürre von 1947 verursacht, die in ihrem Ausmaß seit 1540 einzigartig war. Nach einem nassen März folgten sechs Monate Trockenheit.

SCHÖNWIESE (2002) sieht in der winterlichen Zunahme der Niederschläge ein Indiz dafür, dass sich die Häufigkeit bzw. die Intensität der Hochwässer zwischen 1891 und 1990 erhöht hat. Diese Beziehung ist aber noch nicht belegt (SCHÖNWIESE 2002: 75). Räumlich konzentriert sich die winterliche Erhöhung der Niederschläge (1891-1990) im Südwesten. Die Pfalz ist im Jahr durch eine Veränderung des Mittelwertes um 10 bis 20 % betroffen. Im Frühling beträgt die Abweichung 20 bis 30 %, im Sommer 0 bis 10 %, im Herbst 10 bis 30 % und im Winter 20 bis 30 % (SCHÖNWIESE 2002: 76-80).

Die von Herrn Mack von der Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt bereitgestellten Niederschlagsdaten der Messstation Merzalben, die innerhalb eines Waldgebietes den Freilandsniederschlag misst, stellt exemplarisch die Niederschlagsverhältnisse von 1988 bis 2006 im Mittleren Pfälzerwald dar (Abb. 29).

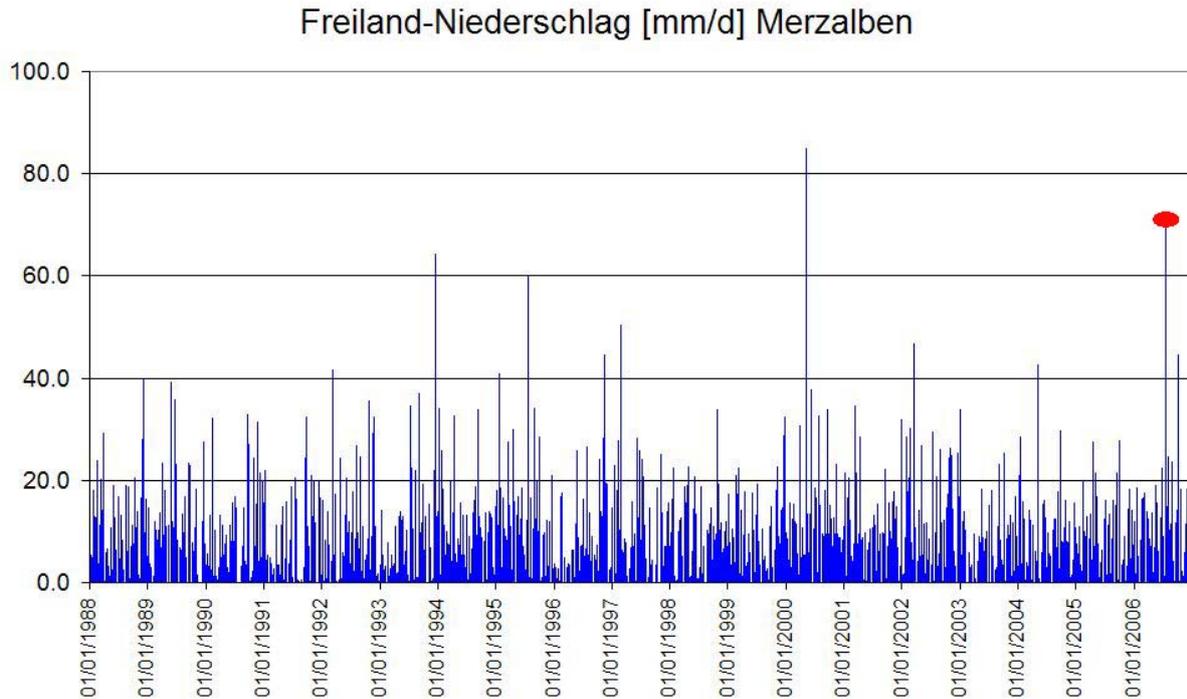


Abb. 29: Niederschlagsdaten der Messstation Merzalben, der Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt für den Zeitraum vom 1.1.1988 bis zum 31.12.2006 (Quelle: Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt). Der rote Punkt markiert das sommerliche Gewitter, das zur Bildung des *gully* im Mückental geführt hat.

Vergleicht man damit die Aussagen der Anwohner von Speyerbrunn, Hochspeyer und Fischbach, so wird der lokale Charakter der Niederschlagsereignisse mit Überschwemmungen und Versandung der Straßen deutlich. Auch aus den Einsatzprotokollen der Feuerwehr Neustadt a. d. W. ist zu entnehmen, dass es an den folgenden Tagen zu einer Überschwemmung mit Sedimentfracht infolge eines Gewitterregens kam:

Niederschlag an der Messstation Merzalben (mm d⁻¹)		
Hochspeyer	27.06.2003	0,1
Hochspeyer	13.07.2006	0
Mückental/Elmstein	21.07.2006	71,0
	22.07.2006	0
Hochspeyer	28.07.2006	1,3
	29.0.2006	14,8

Im Langetal bei Hochspeyer wurde am 16.8.2006 ein *gully* entlang eines Forstweges mit 24 m³ Erosion und 4 m³ differenzierbarer Akkumulation kartiert, der sich nach Aussage einer Anwohnerin während des Sommergewitters zwischen dem 20. und 22. Juli 2006 gebildet hat.

Sedimentkörper der Neuzeit können jedoch mittels Datierungsmethoden wie OSL oder ^{14}C nicht differenziert werden. Die OSL-Datierung der obersten 50 cm eines Profils ist wegen ungenügender Bleichung aufgrund häufiger Umlagerungen durch Pflügen oder fluviale Remobilisierung unmöglich. Die Radiokohlenstoffmethode ist nur für Alter zwischen 300 bis 50 000 yr BP (GEYH 2005: 69) geeignet. Daher wird auf eine ausführlichere Diskussion der Landschaftsgeschichte der Neuzeit verzichtet.

3.7 Zusammenfassung und Diskussion

Das Speyerbach-Einzugsgebiet im Mittleren Pfälzerwald ist aufgrund seiner schlechten verkehrstechnischen Erschließung bis ins 18. Jahrhundert hinein ein Gebiet geblieben, das immer abseits der geschichtliche Entwicklungsachsen lag. Nichtsdestotrotz scheinen im Neolithikum, während der Römischen Kaiserzeit sowie ab dem 12. Jahrhundert eine Auflichtung der Waldbestände existiert zu haben, so dass ein gewisses Bodenerosionspotential herrschte.

Im regionalen Vergleich sind die Wälder des Speyerbach-Einzugsgebietes jedoch auch noch während der Industrialisierung als ‚wenig genutzt‘ zu bezeichnen. In den Wäldern des Nordpfälzer Berglands ist nach der Arbeit von STURM (1959) der Anteil an Niederwaldwirtschaft und die Ausdehnung der Ackerflächen auf Kosten des Waldes größer als z. B. im Elmsteiner Wald. Ein Phänomen, das nur für die Wälder des Klosters Otterberg beschrieben wird, ist die Medumswirtschaft³². Auch die im Niederwald mit einer Umtriebszeit von 12 bis 20 Jahren betriebene Eichenschälwaldwirtschaft ist für den Mittleren Pfälzerwald nicht beschrieben worden. Die Vorderpfalz im Südosten des Untersuchungsgebiets weist Wälder mit starker Übernutzung auf (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992). Nach der Studie von HILDEBRANDT ET AL. (2007) haben innerhalb des relativ gering genutzten Waldkomplexes des Mittleren Pfälzerwaldes ausgewählte Flächen stärkerer Nutzung unterlegen, beispielsweise wurden die im Westen bei Johanniskreuz angrenzenden Wälder aufgrund der Zugehörigkeit zum Eisenwerk in Trippstadt stärker genutzt.

³² Die Medumswirtschaft ist eine Zwischenform zwischen Acker und Niederwald, die mit dem mittelalterlichen Wald-Feld-Nutzungssystem Ostfrankens, Hessens und der Rheinlande vergleichbar ist und bei der die ackerbauliche Bewirtschaftung überwog. Es handelt sich um „Außenfelder“ an der Grenze zwischen „Willierungen“ (Acker) und Wald auf schlechten Böden, die von jedem bebaut werden konnten, sobald der Vorgänger sie drei Jahre lang nicht bewirtschaftet hatte (STURM 1959: 161, 178).

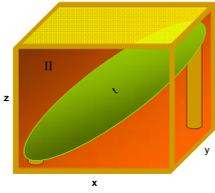
Allerdings ist das Untersuchungsgebiet mit dieser Abweichung von den Erkenntnissen aus anderen Mittelgebirgen kein Einzelfall. Wie HEUSER-HILDEBRANDT (2004) eindrücklich anhand der Holzkohlespektren und des Pollendiagramms für den Ebracher Forst im Steigerwald zeigen konnte, weicht dieser mit seinen intensiven Nutzungsspuren während der spätmittelalterlichen Wüstungsperiode auch von den Ergebnissen aus anderen Köhlereigebieten deutscher Mittelgebirge ab. Auch für dieses Gebiet zeichnet HEUSER-HILDEBRANDT (2004) aufgrund ihrer Befunde ein vielgestaltiges Bild: Lichtholzgebiete aus Niederwäldern und Kiefer-Plenterbeständen wechseln sich mit Altholzbeständen mit Buchenjungwuchs ab. STOLZ & GRUNERT (2008) beschreiben für drei 200 bis 300 km² große Flusseinzugsgebiete im Taunus und Westerwald sehr unterschiedliche Sedimentationsverhalten in der Aue. Während die zeitliche Dynamik sich ähnelt – beginnende Auensedimentation im Frühen Mittelalter und größtes Ausmaß in der Neuzeit – sind die sedimentierten Mächtigkeiten sehr verschieden.

Diese räumlichen Variationen, die stark von der wirtschaftlichen Entwicklung des Gewerbes gesteuert sind, werden von zeitlichen Intensivierungs- und Extensivierungsschüben überlagert: Zeiten starken Bevölkerungswachstums, Kriege und die beginnende Industrialisierung sind vor allem im Bereich der Vorderpfalz durch intensive Holzentnahmen und Auflichtungen bis hin zur Entstehung von Blößen und verstärkter Niederwaldwirtschaft gekennzeichnet. Bevölkerungsverluste durch Kriege, Krankheiten oder Auswanderungen, politisch stabile Phasen sowie die Schließung oder Verlagerung von Gewerbe- und Industriestandorten stellen Erholungszeiten für stark degradierte Wälder dar, in denen der Holzentnahme, z. B. durch die Verlagerungen des Nutzungsdrucks auf den Inneren Pfälzerwald mittels Intensivierung der Trift oder forcierter künstlicher Verjüngung der Bestände, entgegengewirkt wurde.

Zusammenfassend sind folgende Punkte zu betonen:

1. Im Mittleren Pfälzerwald haben immer Mischwälder bestanden, die vermutlich seit der Frankenzeit mit Waldweide-, Bau- und Brennholznutzungsrechten der Bevölkerung belegt waren.
2. Das räumliche Muster der Nutzungsintensität im Mittleren Pfälzerwald zeigt eine Distanzabhängigkeit von Siedlungen sowie vom Transportsystem. In Siedlungsnähe dominieren Acker- und Niederwaldwirtschaft, die mit weiterer Entfernung in Hau- und Bauwälder (nur noch Stammholzentnahme und Waldweide) übergehen. Diese Abfolge, die für alle Siedlungen des Untersuchungsgebiets gilt, wird von der geräumigeren Diskrepanz zwischen Vorderpfalz und Innerem Pfälzerwald überlagert und erfährt lokale Abweichungen aufgrund gesellschaftlicher Besonderheiten.

3. Als rodungsintensive Phasen sind im Mittleren Pfälzerwald das Hochmittelalter und die Frühe Neuzeit eindeutig belegbar. Hinweise der Proxydaten auf eine Auflichtung der Wälder während des Neolithikums und der Römischen Kaiserzeit werden kontrovers diskutiert.
4. Als Phase verstärkter Niederschlagsaktivität lässt sich aus den vorliegenden Daten mit Sicherheit nur Zeit zwischen 1750 und 1900 extrahieren. Es gibt keine archivalischen Hinweise auf ein Hochwasser am Speyerbach 1342 n. Chr. Über Niederschlagsereignisse an sich liegen keine Informationen für das Gebiet des Speyerbachs vor.
5. Während die waldbaulichen Methoden des Plenterwalds und Femelhiebs die Naturverjüngung gefördert haben, ist die Naturverjüngung durch Saat auf Kahlschlagsflächen oder unter leichtem Schirm (nach 1750) selten von Erfolg gekrönt gewesen. Die Bodenbedeckung war demnach in der Neuzeit geringer.



4. Sedimentbilanz II: Eigene Geländeerhebung

Die in Kapitel 2 ermittelte Sedimentbilanz I wurde mit Bodendaten des *Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz* erstellt. Da die verfügbaren Daten aus der bodenkundlichen Landesaufnahme der Landesämter stammen, sind sie stark auf die Eigenschaften der Böden fokussiert. Bei der Kartierung wird Erosion in der bodenkundlichen Praxis aufgrund des Aktualismus-Prinzips nur auf Ackerflächen dargestellt. Es ist anzunehmen, dass der Erosionszustand der Böden unter Wald in diesen Daten nicht die gleiche Beachtung fand. In diesem Kapitel wird dagegen ein eigener Felddatensatz vorgestellt, der eigens für die Sedimentbilanzierung erhoben wurde. Hierbei lag der Focus auf der Ermittlung des Erosionszustands der Böden und Substrate während der Geländekampagnen von 2006 bis 2008 in den zwei Teileinzugsgebieten Hochspeyerbach und Erlenbach. Somit stand für die folgende Auswertung ein unabhängiger und auf die Sedimentbilanz spezialisierter Vergleichsdatensatz zur Verfügung.

4.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Für die Erzeugung der Flächendaten aus den Geländeerhebungen konnte aufgrund des fehlenden räumlichen Trends kein Interpolationsverfahren angewendet werden. Als Vorlage diente eine Reliefeinheitenkarte. Im Folgenden werden die Daten, die für die Berechnungen der Sedimentbilanz II verwendet wurden, vorgestellt.

4.1.1 Bodenprofilaten

Geht man an die Bodenkartierung mit dem Ziel, explizit Kolluvien zu kartieren, so ist eine Unterscheidung des verlagerten Materials von dem autochthonen Solum nicht immer eindeutig möglich. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den unterschiedlichen Definitionen, die in der Literatur zu finden sind, wider:

Nach DOTTERWEICH (2008) und LEOPOLD & VÖLKELE (2007) unterscheidet sich der Sprachgebrauch des Wortes „Kolluvium“ bzw. „colluvium“ im deutschen und angelsächsischen Sprachraum. Im Englischen wird der Begriff weiter gefasst als im Deutschen, wie die Definition von KWAAD & MÜCHER (1979) zeigt, die sich auf verschiedene Veröffentlichungen seit 1951 (u. a. Soil Survey Staff, 1951 und Soil Science Society of America, 1975) bezieht. Danach handelt es sich um eine: *„loose, non stratified, non or ill-sorted, heterogeneous mixture of various size grades, found on the lower parts or at the base of slopes; [...] the deposit may be formed by rain wash and/or gravitational processes (mass wasting)“* (KWAAD & MÜCHER 1979: 174 und vergleichbar bei BECKMANN 2007: 5). Im deutschen Gebrauch werden dagegen Massenbewegungen nicht miteinbezogen. Hier wird ein Kolluvium als korrelates Sediment der Bodenerosion angesehen, das durch anthropogen verstärkte Wassererosion mobilisiert, mit dem Wasser transportiert und insbesondere am Unterhang oder in der Aue sedimentiert wird (BECKMANN 2007; DOTTERWEICH 2008; FISCHER-ZUJKOV & SCHATZ 2002; VAN HOOFF & JUNGERIUS 1984).

Die Ansprache des Kolluviums ist im Gelände unter Umständen nicht eindeutig, was unter anderem an den geringen Textur- und Farbunterschieden, vor allem aber an dem geringen Kenntnisstand der Erosionsgeschichte und des Alters von Kolluvien unter Wald aufgrund bisher fehlender Datierungsmöglichkeiten liegt (SAUER 2002; VAN HOOFF & JUNGERIUS 1984). SAUER (2002) nutzt Unterscheidungskriterien für die Grenzziehung zwischen Kolluvium und Hauptlage, die im Gelände und insbesondere bei einer Bohrstockkartierung nicht ermittelbar sind. Danach sind sowohl Hauptlagen als auch rezente Kolluvien locker gelagert und gut durchwurzelbar. Die Hauptlage ist porenreich, was bei rezenten Kolluvien nicht der Fall ist – sie sind dafür in der Regel nährstoffreicher. Unter Wald sind sie dagegen nährstoffarm und lassen sich nicht immer von skelettarmen Hauptlagen trennen (SAUER 2002: 28f). VAN HOOFF & JUNGERIUS (1984) zählen folgende Eigenschaften auf, die in der Kombination die Klassifikation als Kolluvium ermöglichen: skelettarm, keine pedogenetische Differenzierung des Horizontes außer Hydromorphie, keine Struktur, krümelige Textur und unter Umständen das Vorhandensein von Holzkohle und archäologischen Artefakten. LANG (2003) weist auf die Problematik des Transports hin. Durch die Ablösung von Aggregaten und dem Transport kann das Bodenmaterial in seiner ursprünglichen Struktur sowohl chemisch als auch physikalisch verändert werden. Letztendlich kann nur der Fund von datierbaren anthropogenen Artefakten die letzte Gewissheit bringen, ob es sich um Ausgangsmaterial oder ein Kolluvium handelt. BECKMANN (2007) führt darüber hinaus eine höhere Lagerungsdichte und

fein verteilten Humus an und weist darauf hin, dass nur in Kombination mehrerer Kriterien die Abgrenzung möglich ist.

Ein Horizont wurde bei meinen Geländeansprachen immer dann als M-Horizont klassifiziert, sobald die folgenden Kriterien erfüllt wurden: deutliche Korngrößendifferenz im Feinboden, andere Lagerungsdichte und anderer Humusgehalt als in der Hauptlage. In den meisten Fällen weisen die kartierten Kolluvien auch einen geringeren Skelettgehalt auf. Das Vorhandensein von Holzkohle konnte nicht als Unterscheidungsmerkmal genutzt werden, da Holzkohlenfragmente in allen Horizonten und sedimentären Schichten im Untersuchungsgebiet auftreten (s. Tab. 16). Wie die Datierungen in den zwei Aufschlüssen Mückentalgraben und Tiergarten zeigen, können Holzkohlen in der Hauptlage auch spätglazialen oder frühholozänen Alters sein (vgl. Kap. 4.7.1 und 4.7.3). Die Hauptlagen grenzen sich im Pfälzerwald gegenüber den Basislagen durch einen deutlichen Farbwechsel von braun zu rosa bis violettrot, aber auch durch Humusfreiheit und einen Korngrößenwechsel hin zu reinen Sanden ab.

Zwischen 1. Juli 2006 und 31. Oktober 2008 wurden im Einzugsgebiet des Speyerbachs 429 Bodenprofile durch Pürckhauerbohrungen, Rammkernbohrungen und durch das Anlegen von Schürfen erhoben. Dabei wurde wie folgt verfahren: In den Kleinstzugsgebieten 1. Strahler-Ordnung wurde eine flächendeckende Kartierung der Mächtigkeiten der Hauptlagen und holozänen Sedimente durchgeführt (vgl. Abb. 30). Die Erfassung des Erosionszustands und der Sedimentationsmächtigkeiten innerhalb der zwei Teileinzugsgebiete 4. Strahler-Ordnung verfolgte das Ziel, für alle Reliefeinheiten mindestens drei Mächtigkeitswerte zu erheben. Auch hier wurde weitestgehende Flächendeckung angestrebt, wenngleich auch in einem viel größerem Maße. Der dadurch entstandene Datensatz wurde dann für die Berechnung der speyerbachweiten Sedimentbilanz verwendet.

Die Bodenansprache erfolgte zur besseren Vergleichbarkeit mit dem Karten- und Grunddatensatz nach der bodenkundlichen Kartieranleitung in der 4. Auflage (AD-HOC-AG BODENKUNDE 1996). Es erfolgte eine allgemeine Charakterisierung des Standorts, die Beschreibung aller Horizonte und der Schichten. Für die Berechnungen standen folgende Angaben zur Verfügung:

- Die Datei HF_Schichten.dbf enthält neben der Profilbezeichnung, dem Rechts- und Hochwert, der TK-Nummer und der Höhe Angaben zur Kennzeichnung der Schichten und Substrate, aus denen sich im Laufe der Bodenbildung die Horizonte entwickelten. Die Tabelle umfasst die Schichtuntergrenze (cm), Schichtmächtigkeit (cm) sowie die stratigraphische Stellung und Petrographie der jeweiligen Schicht.

Der sich daraus ergebende Punktdatensatz mit Relief- und Landnutzungsdaten, Profil- und Schichtangaben wird im Folgenden **Erosionsdatensatz** genannt. Mit ihm wird die Sedimentbilanz II berechnet.

Die für die Sedimentbilanzierung relevanten Angaben sind die Mächtigkeitsangaben der Hauptlagen, der Mittellagen und die Untergrenze der tiefsten holozänen Schicht. Für die Massenberechnungen wurden die vom *Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz* zur Verfügung gestellten Trockendichte-Messwerte und die daraus berechneten Mittelwerte verwendet ($\rho_{LH} = 1,28 \text{ g cm}^{-3}$ und $\rho_K = 1,33 \text{ g cm}^{-3}$) (vgl. Kap. 2.1.1.1).

Die Erbohrung der Sedimente in den Auen höherer Ordnung war aufgrund der starken Überbauung durch Siedlungen und Infrastruktur nicht immer möglich. Konsequenterweise wurden die Auenflächen ab der 2. Strahler-Ordnung aus der Kartengrundlage ausmaskiert. Da somit nur die Erosions- und Sedimentationsprozesse am Hang berücksichtigt wurden, kann für die Teileinzugsgebiete und den Speyerbach eine *hillslope sediment delivery ratio* (HSDR) ermittelt werden.

4.1.2 Kartengrundlage

Für den unabhängigen Punktdatensatz der Sedimentbilanz II wurde eine eigene Kartengrundlage entwickelt. Dabei wurde auf den räumlichen Skalen unterschiedlich verfahren:

- Für die Bilanz der Kleinstezugsgebiete wurde mit den Punktdaten eine expertenbasierte Ableitung der Karteneinheiten unter zusätzlicher Verwendung von Reliefinformationen und historischer Landnutzungsdaten durchgeführt.
- Für die Teileinzugsgebiete und den Speyerbach erfolgte eine semi-automatisierte Ableitung einer Reliefeinheitenkarte.

Da das Tiergartentälchen und der Mückentalgraben für die Sedimentanalyse II sehr engmaschig kartiert wurden, konnte für beide Gebiete jeweils eine Mächtigkeitskarte für die Erosion und Sedimentation erstellt werden (Abb. 30). Grundlage für die Ableitung einer Reliefeinheitenkarte für die Teileinzugsgebiete und das Speyerbach-Einzugsgebiet bildet das DGM des Landes Rheinland-Pfalz mit einer Rasterweite von 20 x 20 m.

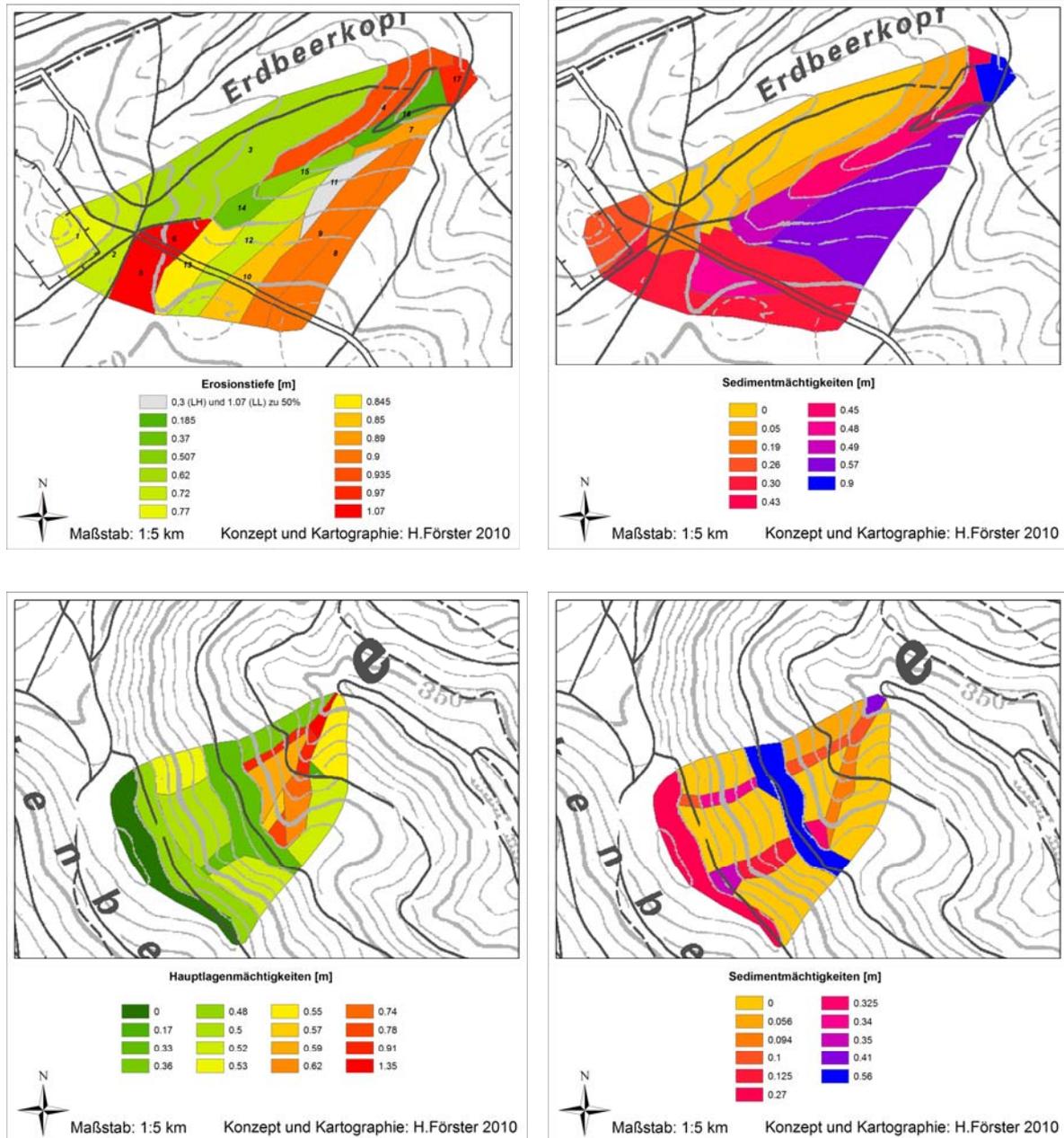


Abb. 30: Mächtigkeitskarten der Hauptlagen und holozänen Sedimente des Tiergartentälchens und des Mückentalgrabens.

Für die semi-automatisierte Kartierung der Reliefeinheiten wurden aus dem DGM unter Zuhilfenahme der *Spatial Analyst-Extension* von ArcGIS 9.0 die Reliefparameter *Höhe über NN*, *Hangneigung*, *plan* und *profile curvature* (nach ZEVENBERGEN & THORNE 1987) berechnet. Darüber hinaus wurden die Parameter *Abstand von der Tiefenlinie* und die *Krümmung nach Horn* (Beschreibung bei BEHRENS 2003) verwendet, da sich diese am besten für die Ausweisung der Plateaulagen und Talschlüsse eigneten (NAGEL 2009). In Anlehnung an eine Vorstudie von NAGEL (2009) im Rahmen einer von mir betreuten Diplomkarte am Institut für Physische Geographie der Goethe-Universität Frankfurt wurde die in Abbil-

Abbildung 31 dargestellte Karte nach den in Tabelle 16 dargelegten Kriterien erstellt. Wie schon im DGM erkennbar nehmen die Plateaus und Mittelhänge mehr als zwei Drittel der Einzugsgebietsfläche ein. Daher wurde eine Unterteilung der Mittelhänge nach Steilheitsgraden ($< 12,5^\circ$, $12,5 - 20^\circ$, $20 - 30^\circ$ und $> 30^\circ$) vorgenommen. In Tabelle 16 werden die Flächenanteile pro Einheit dargestellt. Da die Auen ab der 2. Strahler-Ordnung aus der Sedimentbilanzierung ausgeschlossen werden, bezieht sich die Sedimentbilanz des Speyerbachs auf eine Einzugsgebietsfläche von $305,7 \text{ km}^2$ (entspricht $98,1 \%$), die des Hochspeyerbachs auf $28,09 \text{ km}^2$ ($97,4 \%$) und die des Erlenbachs auf $53,02 \text{ km}^2$ (entspricht $98,5 \%$).

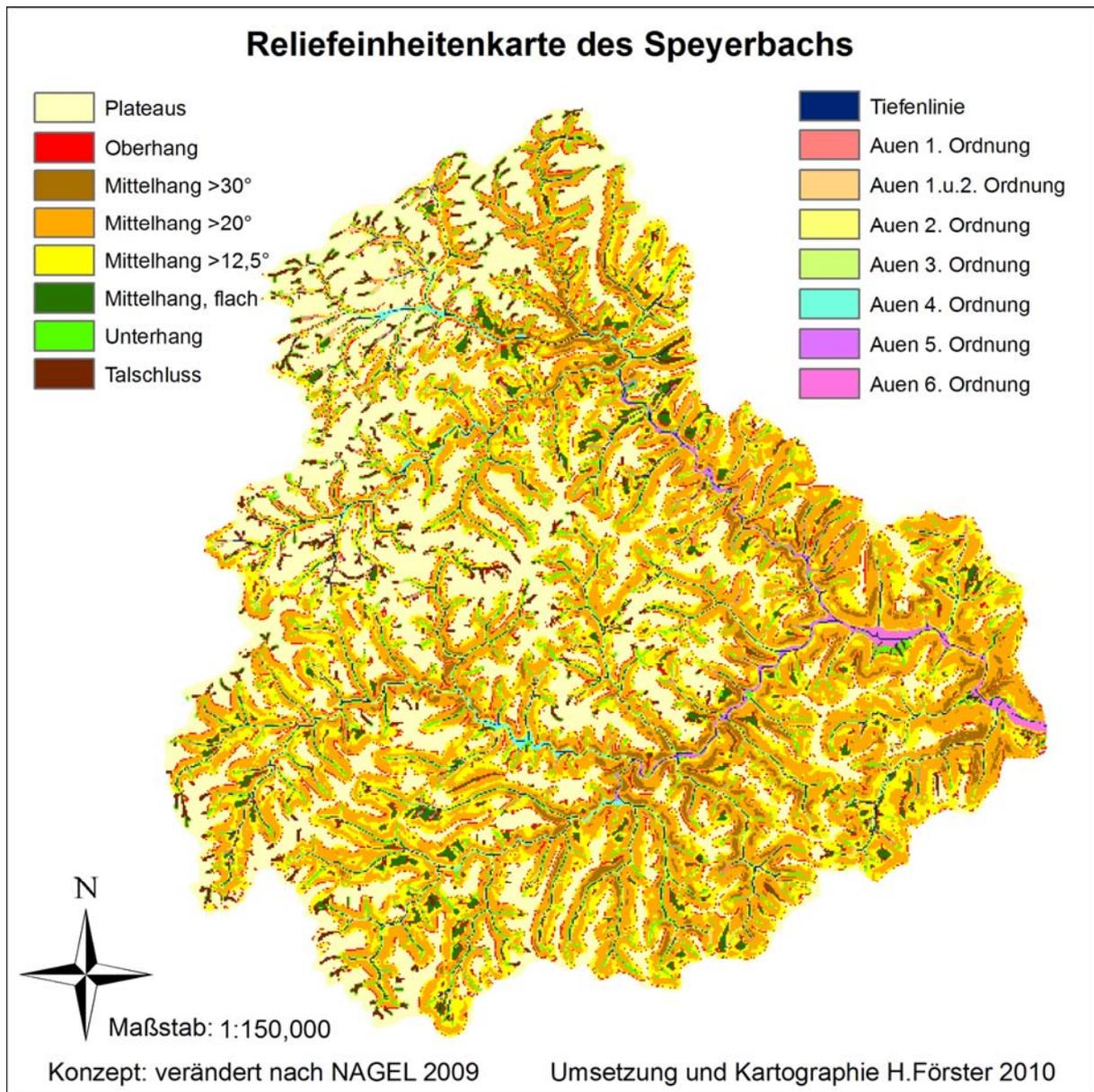


Abb. 31: Abgeleitete Reliefseinheitenkarte für das Speyerbach-Einzugsgebiet nach einem Konzept von NAGEL (2009), überarbeitet und verändert von der Autorin.

Tab. 16: Aus dem DGM 20 x 20 des Speyerbach-Einzugsgebiets mittels verschiedener Reliefparameter abgeleitete geomorphologische Einheiten mit Flächenanteilen und Klassifikationsgenauigkeit (*in ArcGIS: *spatial analyst* und *arc scan*, K_{Horn} – Krümmung nach Horn, *tsd* – Abstand von der Tiefenlinie (vgl. Kap. 4.1.2)).

Karteneinheit	Parameter, Schwellenwert	Operation*	Flächenanteil (%)	Klassifikations-Genauigkeit (%)
Plateaus	$K_{\text{Horn}} < 12,5^\circ$, Höhe > 225 m, <i>tsd</i> > 35 m, Auen = 0	Und, Nicht	28	92
Oberhänge	Profilkrümmung $< -0,4$, Plankrümmung $> 0,5$, Hangneigung $12,5^\circ - 13,5^\circ$	Oder, Majority-Filter, RegionGroup	5,5	1
Mittelhänge, steil	Hangneigung $> 12,5^\circ$, $> 20^\circ$, $> 30^\circ$	Combine	52 (20/29/3)	94,5/84/87
Mittelhänge, flach	Plateaus = 1	Erase ≤ 2 und ≥ 200 zusammenhängende Pixel, sowie Pixelgruppen an Wasserscheiden	2	78
Unterhänge	Hangneigung $< 12,5$, Plateaus = 0, Profilkrümmung $> 0,6$, Plankrümmung $< -0,5$	Nicht, Oder, Majority-Filter (8 Nachbarn)	5	48
Auen	Digitalisiert und in Strahler-Ordnung 1-6 untergliedert	-	4 (0,8/1,4/0,1/0,7/0,4/0,3/0,3)	-
Talschlüsse	<i>tsd</i> < 40 , Hangneigung $< 12,5^\circ$, Auen, Uh	Und, Nicht, Erase ≤ 10 zusammenhängende Pixel	2	3
Tiefenlinie	Aus DGM 20 abgeleitet, <i>flowacc</i> > 1000	Flow Direction, Flow Accumulation	2	-(100)

4.2 Sedimentbilanz II

Die Bilanzierung der Volumina erfolgte unter Verwendung der semi-automatisiert abgeleiteten Reliefeinheitenkarte und der kartierten Bodenprofile. Mit Hilfe der *Extract-Values-to-point*-Funktion bei ArcGIS 9.0 wurden die kartierten Bodenprofile den Karteneinheiten zugewiesen. Es folgten eine Mittelwert-, Minimum- und Maximum-Berechnung der Mächtigkeiten der Hauptlagen, Parabraunerdenreste sowie der holozänen Schichten.

Um ein konsistentes Vorgehen zu gewährleisten, wurde aus den Mächtigkeitsangaben des Erosionsdatensatzes der Wert des 0,95 Quantils als lokale Berechnungsgrundlage für die Sedimentbilanz II herangezogen. Bezieht man alle kartierten Punkte in die Statistik ein, so ergibt sich für den Speyerbach mit einer Stichprobe von 343 Hauptlagen-Mächtigkeiten eine Berechnungsgrundlage der Hauptlagen (h_{LHSp}) von 78 cm bzw. von 140 cm für die 30 Parabraunerden (h_{LLSp}). Der Wert der Berechnungsgrundlage ist größer als die Werte der Grund- und Kartendatensätze und liegt über den in Tabelle 4 aufgeführten Obergrenzen von Hauptlagenmächtigkeiten in deutschen Verbreitungsgebieten. Er stellt jedoch ein lokal ermitteltes Spezifikum dar. Trennt man den Datensatz nach Teileinzugsgebieten auf, so ergibt sich ein h_{HL} von 77 cm für das Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet ($n = 158$) und von 78 cm für das Erlenbach-Teileinzugsgebiet ($n = 185$) (Anhang 8). Die h_{LL} für das Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet beträgt 140 cm ($n = 28$).

4.2.1 Ergebnisse der Sedimentbilanz II

Wendet man die lokalen Berechnungsgrundlagen von $h_{LHSp}=78$ cm und $h_{LLSp}=140$ cm für den Erosionsdatensatz und die sedimentologische Interpretation der Kolluvien bei der Bilanzierung an, so ergibt sich eine positive Sedimentbilanz II (Tab. 17) mit einem HSDR von rund 13 %. Der Erosionsterm beträgt das Vierfache der Sedimentbilanz Ia und 57% der Sedimentbilanz Ib; der holozäne Austrag ist ausgesprochen gering. Ginge man für die Auen von einer mittleren Mächtigkeit der fluvialen Sedimente von 150 cm aus, so würde sich die Sedimentationsmenge auf 103,27 Mio. m^3 erhöhen und der CSDR beliefe sich nur noch auf 5 %.

Tab. 17: Ergebnisse der holozänen Sedimentbilanz II für das Speyerbach-Einzugsgebiet berechnet auf Basis der semi-automatisiert abgeleiteten Reliefeinheitenkarte, $h_{BG} = 78$ bzw. 140 cm, $\rho_{LH} = 1,28$ g cm⁻³ und $\rho_K = 1,33$ g cm⁻³ (Bezugsszenario E_0 , HSDR – *hillslope sediment delivery ratio*).

	Volumen (10 ⁶ m ³)	Masse (10 ⁶ t)
Erosion	108,8	139,27
Sedimentation	94,44	125,60
Austrag	14,37	13,67
HSDR %	13,20	9,81

4.2.2 Sensitivitätsanalyse der Sedimentbilanz II

Auch für die Sedimentbilanz II wird zuerst eine Sensitivitätsanalyse erfolgen, bevor die Ergebnisse mit den Sedimentbilanzen I und anderen Studien verglichen werden.

a) Einfluss der Berechnungsgrundlage auf das Ergebnis

Wendet man auf den Erosionsdatensatz die Berechnungsgrundlage der Sedimentbilanz Ib von 70 bzw. 105 cm an, so nimmt die Erosion auf rund 84 Mio. m³ ab; die Differenz beträgt 23 %. Da sich die Sedimentmenge nicht verändert, wird die Bilanz negativ: der Austrag beträgt -76 % vom Wert des Bezugsszenarios.

b) Einfluss der Mächtigkeiten auf die Bilanz

Das Auf- bzw. Abrunden der Mittelwerte auf fünfer und zehner Werte wirkt sich in einer prozentuellen Abweichung von bis zu 10 % bei Erosion und Sedimentation aus. Die dadurch verursachten Austräge belaufen sich auf 227 % (Abrunden) bzw. 14 % (Aufrunden) des Bezugswertes. Die Bilanzen bleiben jedoch positiv und es ergeben sich HSDR von 27,6 bzw. 2 %. Variiert man die gerundeten Ergebnisse um ± 5 cm, so sind die Abweichungen größer. Die Bilanzen bleiben positiv und die HSDR-Werte belaufen sich auf 34 bzw. 24 %, sind demnach größer als der des Vergleichswertes.

c) Einfluss der Flächen auf das Ergebnis

Um den Einfluss der Flächenanteile der Reliefeinheiten auf das Bilanzergebnis zu veranschaulichen, werden in Abbildung 32 die Flächenanteile mit den Volumenanteilen am Sedimentationsterm der Sedimentbilanz II des Speyerbach-Einzugsgebiets verglichen. Auch hier wird deutlich, dass der Einfluss der Auen aufgrund ihrer geringen Fläche sehr klein ist,

die geringmächtigen Kolluvien auf den Mittelhängen und Plateaulagen sich dagegen sehr stark im Endergebnis auswirken.

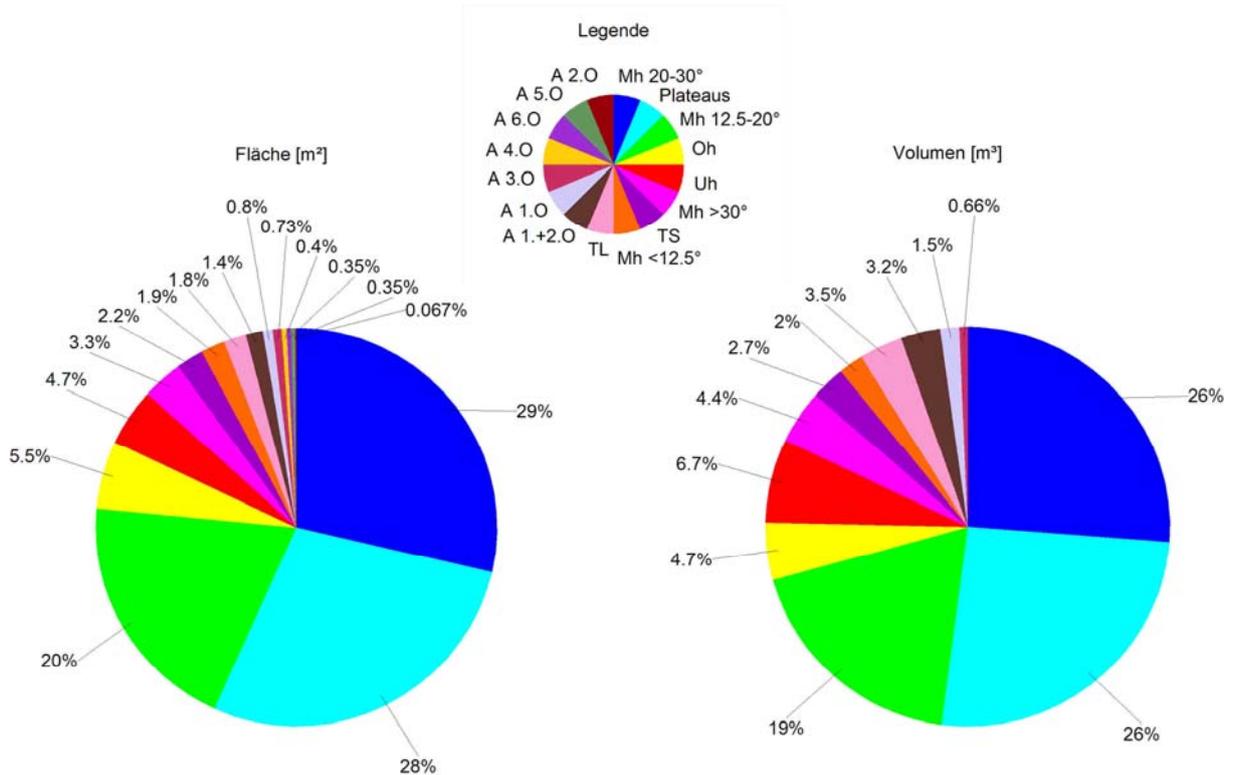


Abb. 32: Gegenüberstellung der Flächenanteile der Reliefeinheiten an der Gesamtfläche des Speyerbachs und der Volumina, die für diese Flächen mit der Sedimentbilanz II berechnet wurden.

Daher wurde im Erlenbach-Teileinzugsgebiet der Versuch unternommen, diese Fläche weiter zu differenzieren (Abb. 33). Die Karteneinheit „Plateaus“ wurden nach Zugänglichkeit und Zusammengehörigkeit in 22 Teilflächen unterteilt. Die Mittelwert-Bildung erfolgte daraufhin nur noch innerhalb der Stichprobe je Teilfläche.

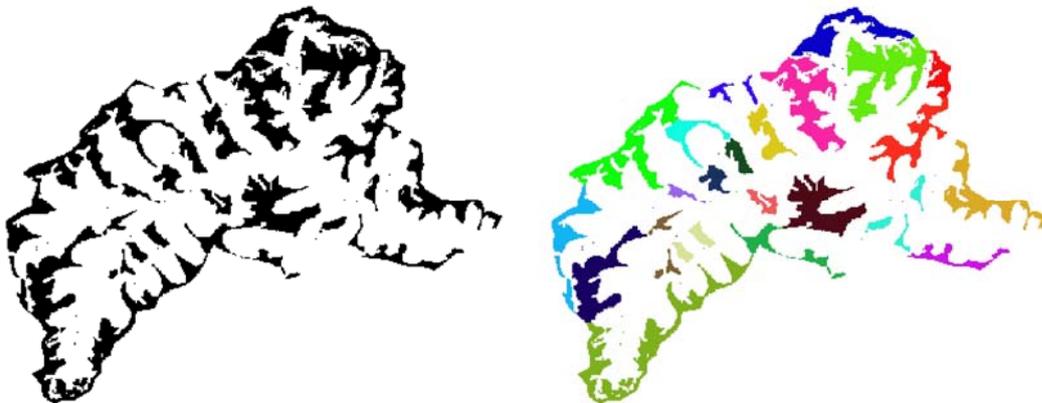


Abb. 33: Disaggregation der Karteneinheit „Plateaus“ der semi-automatisiert abgeleiteten Reliefeinheitenkarte in 22 Teilflächen am Beispiel des Erlenbach-TEZG.

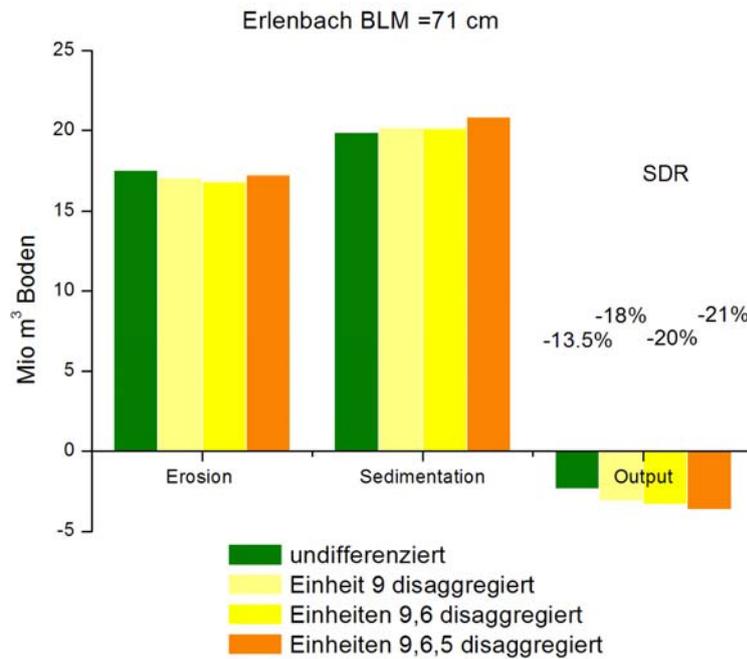


Abb. 34: Vergleich der Bilanzterme des Erlenbach-TEZG in verschiedenen Stadien der Flächendifferenzierung.

Abbildung 34 verdeutlicht, dass mit der Differenzierung der gegenteilige Effekt erreicht wird: Die Sedimentationsmenge bei der voll differenzierten Karte ist am höchsten und führt zu einer Abweichung des HSDR vom Bezugsszenario E_0 um 21 %.

d) Einfluss der Trockendichten auf die Bilanz

Setzt man die Trockendichte mit dem in der Sedimentbilanz Ia verwendeten Wert von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ an, so ergeben sich Abweichungen vom Bezugswert von max. 12 % bei Erosion und Sedimentation. Der Austrag beträgt damit 150 % und der HSDR 135 % des Vergleichswertes (Abb. 35).

e) Zusammenfassender Vergleich

Die Sensitivitätsanalyse für die Sedimentbilanz II zeigt, dass die Berechnung am unsensibelsten auf die Veränderung der Trockendichte reagiert (Abb. 35). Auch die Flächenänderung und die Rundung und Variation der Mittelwerte wirken sich im Vergleich zu den statistischen Extremwerten relativ gering aus. Die größten Abweichungen werden durch die Verwendung der Minima und Maxima der Erosions- und Sedimentationsmächtigkeiten erreicht.

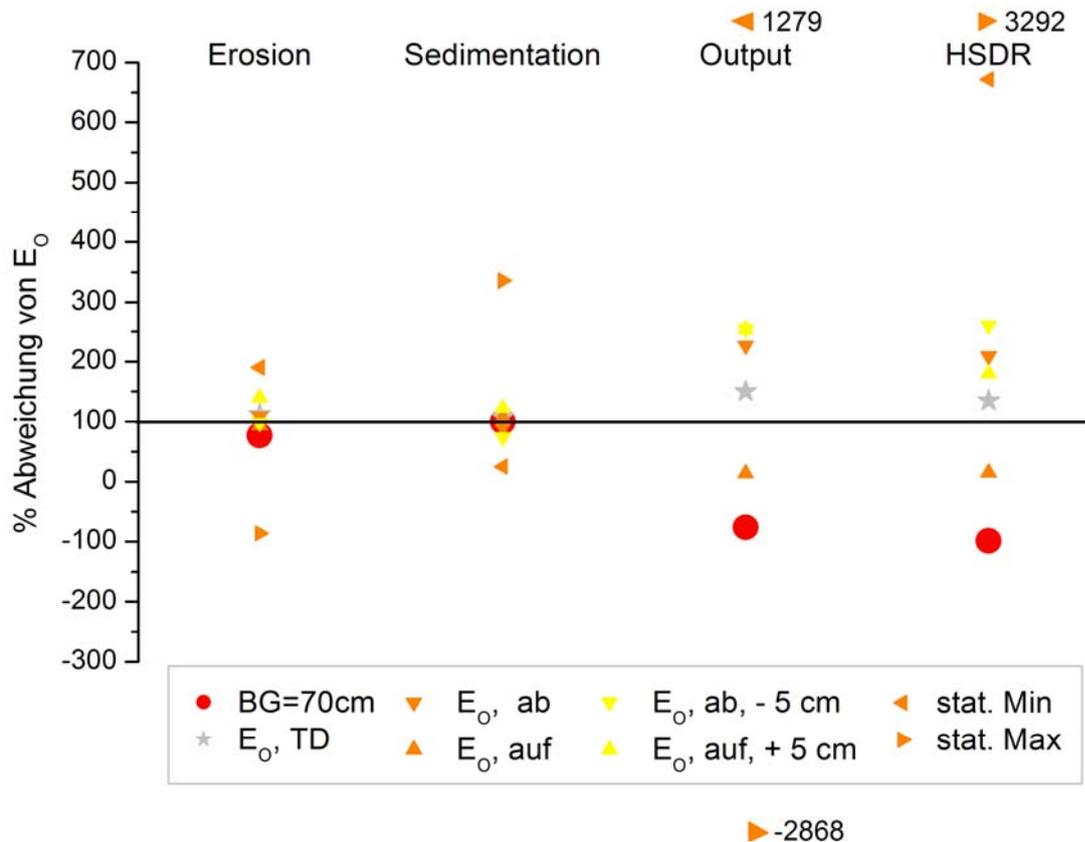


Abb. 35: Überblick über die prozentualen Abweichungen der Sensitivitätsergebnisse vom Bezugsszenario E_0 auf Grundlage der Reliefeinheitenkarte, mit $h_{BG} = 78$ cm für Hauptlagen und 140 cm für Parabraunerden und einer Trockendichte von 1,28 bzw. 1,33 $g\ cm^{-3}$ (BG: Berechnungsgrundlage).

4.3 Räumliche Differenzierung

Wie in Anhang 7 dargelegt wird, ist das Landnutzungsmuster sehr stark von der Verbreitung und Intensität der betriebenen Gewerbe- und Industriestandorte sowie von den politischen Verhältnissen abhängig, so dass man auch im Mittleren Pfälzerwald von einer sich mit der Zeit ändernden räumlichen Heterogenität ausgehen muss. Die schematische Übersicht über die Bilanzergebnisse in Abbildung 36 zeigt, dass sich diese regionalen Unterschiede auch in der Berechnung der Sedimentbilanz II auswirken. Der für das **Hochspeyerbach**-Teileinzugsgebiet berechnete *hillslope sediment delivery ratio* (HSDR) unterscheidet sich deutlich vom Erlenbach- und vom Gesamteinzugsgebiet. Zwar weist es im Vergleich die geringste absolute Erosion und Sedimentation auf, doch der mittlere Abtrag ist mit rund 47 $cm\ m^{-2}$ am höchsten. Trotz der relativ großen Erosionsmenge ist der SDR des **Erlenbachs** geringer als im Gesamteinzugsgebiet.

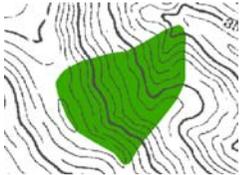
	Speyerbach	Hochspeyerbach	Erlenbach	Mückentalgraben	Tiergartentälchen
					
Größe	311,6 km ²	28,9 km ²	53,8 km ²	11,8 ha	20,9 ha
Landbedeckung	94 % Wald, 1,2 % Acker, 2,3 % Grünland	78,3 % Wald, 11,2 % Acker, 4 % Grünland	96,5 % Wald, <0,1 % Acker 1,8 % Grünland	100 % Wald	57 % Wald 40 % Acker 3 % Siedlung
Geologie	h,,f, (mu), so, sm, su2, R, K	h,,f, N,,Lo, sm, su2	(mu), so, sm, su2	so, sm	h,,f, N,,Lo, sm, su
gr. Reliefgradient	500 m	140 m	388 m	153 m	45 m
BG (h_{LH}/h_{LL})	78/140 cm	77/140 cm	78 cm	(91) 69 cm	(78) 107/140 cm
Erosion	108,8 Mio. m ³	13,09 Mio. m ³	17,51 Mio. m ³	0,032 Mio. m ³	0,16 Mio. m ³
Sedimentation	94,44 Mio. m ³	8,94 Mio. m ³	15,74 Mio. m ³	0,016 Mio. m ³	0,04 Mio. m ³
Output	14,37 Mio. m ³	4,15 Mio. m ³	1,77 Mio. m ³	0,016 Mio. m ³	0,12 Mio. m ³
HSDR	13,20 %	31,71 %	10,12 %	(72,16) 50,43 %	(64,93) 74,79 %
CSDR	5,09 %	22,98 %	3,07 %		
mittlerer Abtrag	35,2 cm	46,6 cm	33 cm	(48) 26,8 cm	(55) 77 cm

Abb. 36: Übersicht über die Bilanzergebnisse der Sedimentbilanz II für das Speyerbach-Einzugsgebiet, die Teileinzugsgebiete Hochspeyerbach und Erlenbach und die zwei Kleinst-Einzugsgebiete Tiergartentälchen (im Hochspeyer-TEZG) und Mückentalgraben (im Erlenbach-TEZG). Für die Sedimentbilanz des Mückentalgrabens wurden zwei Berechnungsgrundlagen verwendet, die Erklärung findet sich in Kap. 4.5.3.

Bei den in Abbildung 36 dargestellten Kleinsteinzugsgebieten Tiergartentälchen und Mückentalgraben handelt es sich um zwei heutzutage trocken gefallene Täler, deren Sedimentbilanzen auf der Grundlage eigenständiger Punkt- und Flächendaten und der daraus abgeleiteten lokalen Berechnungsgrundlagen (s. Anhang 8) erstellt wurden. Die Sedimentbilanz II für das **Tiergartentälchen** unterscheidet sich, wie aufgrund der Ergebnisse für den Hochspeyerbach zu erwarten war, deutlich von den anderen Ergebnissen. Von den rund 160 000 m³ erodiertem Solum werden rund 120 000 m³ in die Tiefenlinie ausgetragen. Der sich daraus ergebende HSDR von 75 % ist der höchste dieser Untersuchungen. Ist dieses Ergebnis plausibel? Als erstes fällt auf, dass die Berechnungsgrundlage der Hauptlagen mit 107 cm vergleichsweise hoch ist. Dies kommt dadurch zustande, dass zwei Profile in der Stichprobe aus der Tiefenlinie des Tälchens stammen und daher Mächtigkeiten von über 100 cm aufweisen. Schlösse man sie aus, so würde die lokale Berechnungsgrundlage dem speyerbachweiten Wert von 78 cm gleichen und das Tiergartentälchen einen HSDR von rund 65 % aufweisen. Dabei liegt auch dieser HSDR-Wert über allen anderen im Speyerbach-Einzugsgebiet. Vergleicht man die Ergebnisse mit der Sedimentbilanz II für das **Mückentalgrabenprofil** mit der lokalen Berechnungsgrundlage von 91 cm, so kommt man zu dem Schluss, dass die Aussagekraft des Sedimentaustragsverhältnisses sehr begrenzt zu sein scheint. Die HSDR-Werte beider Kleinsteinzugsgebiete liegen über 70 %, obwohl sich die absoluten Sedimentmengen um das Drei- bis Vierfache unterscheiden. Auch der mittlere Abtrag ist im Tiergartentälchen mit 77 cm deutlich höherer als im Mückentalgraben (48 cm). Bezieht man die sedimentierten Volumen auf die Flächen, so würden rund 20 cm Sedimentdecke auf der gesamten Fläche des Tiergartentälchens und 10 cm auf der Fläche des Mückentalgrabens liegen.

Im Folgenden wird eine Unterscheidung zwischen *hillslope* und *catchment sediment delivery ratio* vorgenommen, da in der Sedimentbilanz II für die Kleinsteinzugsgebiete nur der HSDR-Wert berechnet wurde. Eine Unterscheidung ist insofern wichtig, als DOTTERWEICH (2008), DREIBRODT ET AL. (2010) und VERSTRAETEN ET AL. (2009) gezeigt haben, dass die HSDR-Werte sensitiver gegenüber historischen Veränderungen der Landnutzung reagieren, als CSDR-Verhältnisse. Während die HSDR-Werte der Sedimentbilanz II mit einer exponentiellen Abbaukurve mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,86$ modelliert werden können, ist es für die CSDR-Werte statistisch nicht sinnvoll, da nur 3 Werte vorliegen (Abb. 37). Sehr eindrücklich wird in Abbildung 37 dargestellt, wie groß die Unterschiede der Ergebnisse der für den Speyerbach ermittelten Sedimentbilanzen sind. Im Gegensatz zu den Sedimentbilanzen I ist der HSDR des Erlenbachs geringer als der des Hochspeyerbachs.

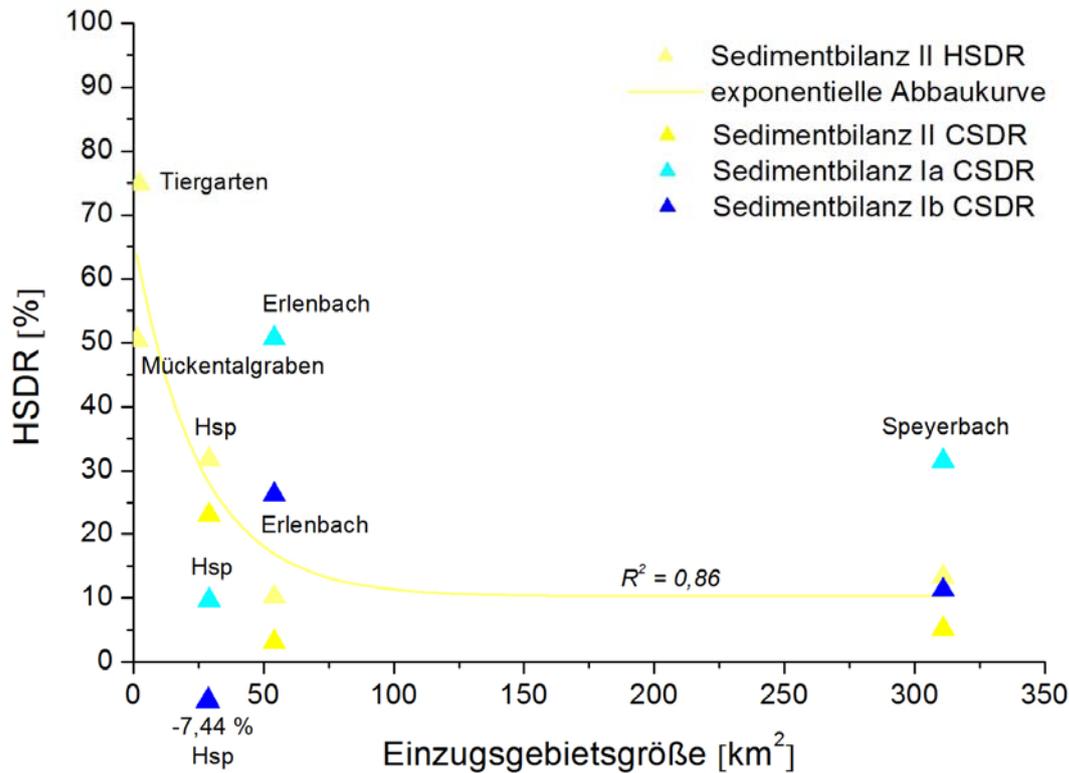


Abb. 37: Zusammenfassende Darstellung der HSDR-Ergebnisse der Sedimentbilanz II und CSDR-Ergebnisse der Sedimentbilanzen Ia, Ib, II für den Speyerbach und die untersuchten Teileinzugsgebiete (Erl – Erlenbach, Hsp – Hochspeyerbach, Mü – Mückentalgraben, Sp - Speyerbach).

4.4 Diskussion der Sedimentbilanz II

Die Erosion im Mittelgebirgseinzugsgebiet des Speyerbachs ist mit 109 Mio. m³ höher als die Sedimentation innerhalb des Untersuchungsgebiets mit 94 Mio. m³. Damit ist der holozäne Austrag mit rund 15 Mio. m³ sehr gering und der berechnete HSDR beträgt nur 13 %. Die erodierte Masse dieses Mittelgebirgsgebiets entspricht rund 139 Mio. t. NOTEBAERT ET AL. (2009) haben als holozäne Erosion für das Laan-TEZG (139 km²-Fläche) 161 Mio. t und für das 758 km² große Dijle-EZG im belgischen Lössgürtel 817 Mio. t bilanziert. Wie zu erwarten war, liegt das Ergebnis des Speyerbachs unter dem für das intensiv genutzte Lössgebiet, allerdings nur knapp.

Die Höhe der Sedimentmenge ist erstaunlich, vor allem da die Sedimente weniger in den klassischen Sedimentationsräumen (Unterhänge und Auen) vorliegen, sondern vor allem auf den Mittelhängen zu finden sind. Wie ist diese Situation zu deuten? Bei den bodenhydrologischen Untersuchungen von BOTT (2002) wurde gezeigt, dass die Hangneigung bei der Oberflächenabflusentstehung nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Einen größeren

Einfluss hat die Niederschlagsintensität und zeitliche Niederschlagsverteilung. Demnach ist von einer sehr heterogenen, ereignisabhängigen Verteilung der Erosionstiefen auszugehen. Der Transport des mobilisierten Materials ist dann davon abhängig, ob der Transportpfad entlang vorhandener Entwässerungsbahnen verlief oder über Flächen unbewirtschafteter Waldböden. Bei letzteren wird das Abflussgeschehen von den hohen Infiltrations- und Perkolationsraten und der Grundwasserneubildung dominiert (BOTT 2002: 52), es würde demnach schnell zur Ablagerung und Zwischenspeicherung des Sedimentes führen. ROBERTS & CHURCH (1986) haben in ihrer Studie gezeigt, dass sich der Anteil der kolluvialen Sedimentspeicherung gegenüber der alluvialen nach einer Abholzung fast verdoppelt. Auch in den Sedimentbilanzen von PHILLIPS (1991) hat die Speicherung am Hang zwischen 71 und 81 %³³ Anteil an der gesamten Sedimentationsmenge. Nach GROTE (2008: 5ff) kann man davon ausgehen, dass bis zum Ersten Weltkrieg und der beginnenden Elektrifizierung und Maschinerisierung die Anbringung des gefällten Holzes zu Lagerplätzen oder Transportwegen nur bei gefrorenem Boden im Winter erfolgte. Daher ist von minimalen Bodenschäden durch den Transport der Stämme auszugehen. Die Bringung per Ochse oder Pferd verursacht nach aktuellen Untersuchungen keine Bodenverdichtung oder starke Erosion. Der Transport auf Schlittel- oder Waldwegen verursacht dagegen die Bildung von Hohlwegen oder Runsensystemen (GROTE 2008: 7f). Im Unterschied zu den historischen Techniken überwiegt heutzutage die ganzjährige Befahrung der Waldflächen. Die seit den 1970er Jahren eingesetzten forstlichen Spezialmaschinen verursachen durch das Bearbeiten der Flächen von einer Fahrspur aus stark lineare Verdichtung und Bodenzerstörung und entwickeln damit präferentielle Fließpfade (GROTE 2008: 7ff). Dafür ist es mit der fortschreitenden Entwicklung der Maschinenteknik auch möglich geworden, vorher unbefahrbare (steile, nasse) Gebiete zu meistern; statische Auflasten zwischen 30 und 60 t sind zur Normalität geworden. Trotz der starken neuzeitlichen Verdichtung der Böden ist die Anzahl von Runsen- und Hohlwegsystemen im Speyerbach-Einzugsgebiet im Vergleich zu Lössgebieten gering. Linienhafte Erosion hat in den letzten Jahren bei intensivem Sommergewitter vor allem auf den stark verdichteten Forstwegen zu großen Erosionsschäden geführt, wie in Kapitel 3.5 anhand der Ortschroniken gezeigt wurde und wie in Kapitel 4.5.1 im Detail beschrieben wird.

Im geringen Reliefgradient, dem hohen Flächenanteil an lösslehmbedeckter Fläche, in der frühzeitigen Besiedlung sowie im seit dem 12. Jahrhundert betriebenen Ackerbau mögen die Gründe für die hohe Erosion aber auch Zwischenspeicherung im **Hochspeyerbach-TEZG**

³³ Bei diesen Werten muss man beachten, dass bei der Studie auch Rutschungen zu den kolluvialen Speichern gezählt werden.

liegen. Die trotz der hohen Reliefenergie und der gestreckten Hänge ohne Terrassierung relativ große Erosionsmenge im **Erlenbach-TEZG** ist plausibel, wenn man davon ausgeht, dass die Vegetation immer wieder den Weitertransport behindert hat und es nur zu kleinräumigen hangabwärtigen Umlagerungen gekommen ist. Dass man das annehmen kann, hat die Analyse der Landnutzungsentwicklung im Elmsteiner Wald, wie in Kapitel 3 nach FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) dargelegt, gezeigt, die keine Hinweise auf eine kontinuierliche Entwaldung der Flächen außerhalb der direkten Umgebung der Siedlungen erbracht hat. Die höchsten HSDR-Werte von 75 % bzw. 65 % ($h_{LHHsp} = 78$ bzw. $h_{LLHsp} = 107$ cm) wurden für das **Tiergartentälchen** errechnet. Deshalb wird im Folgenden die Landnutzungsgeschichte dieses Gebietes zwischen Enkenbach-Alsenborn und Fischbach bzw. Hochspeyer präzisiert. In Abbildung 38 zeigen die schon in Kapitel 3 verwendeten historischen Karten das Tälchen, das sich südöstlich des Erdbeerkopfes und unterhalb der A6 (Autobahnausfahrt Enkenbach-Alsenborn) zum Altenhof hin erstreckt. Der rote Punkt markiert die Lage des Tiergartenprofils in einer Verflachung in der oberen Hälfte des Talverlaufs. Das rote Dreieck markiert die Lage einer Rammkernbohrung, die am Auslass des Tälchens vorgenommen wurde.

Durch Abbildung 38 wird deutlich, dass die Einzugsgebietsfläche in dem dargestellten Zeitraum von einem Wechsel zwischen Acker und Wald geprägt war. Die Kartenausschnitte aus den historischen Karten zeigen, dass 1797 nur der Bereich der Talweitung hin zum Altenhof als Wiese bzw. Weide genutzt wurde und der Rest bewaldet war. Angaben über die Nutzung dieser Flächen aus früherer Zeit stehen leider nicht zur Verfügung. Bei den archäologischen Funden handelt es sich lediglich um Einzelfunde, welche nichts über die Flächennutzung aussagen. WEBER (1978: 51) leitet aus dem Wüstungsnamen Mühlborn bei Hochspeyer die Existenz einer Mühle während der fränkischen Landnahme (7.-9. Jahrhundert) ab. Auch bei Alsenborn nimmt er eine Mühle als Bestandteil des Königshofs an. Historisch belegbar ist die Landwirtschaft erst seit dem 12. Jahrhundert in der Gemeinde Hochspeyer. Großflächige landwirtschaftliche Nutzung scheint es aber erst in der Neuzeit gegeben zu haben. Eine Terrassierung ist am südöstlichen Unterhang im Oberlauf des Tälchens im Gelände noch zu erkennen. Aus welcher Zeit sie stammt, ist aus der vorhandenen Datenlage nicht zu sagen. Am steileren Nordwesthang liegt heute keine Terrassierung vor. Leider kann auch keine Aussage zur Durchgängigkeit des Einzugsgebiets gemacht werden, da Feldgrenzen und historische Wege unbekannt sind.

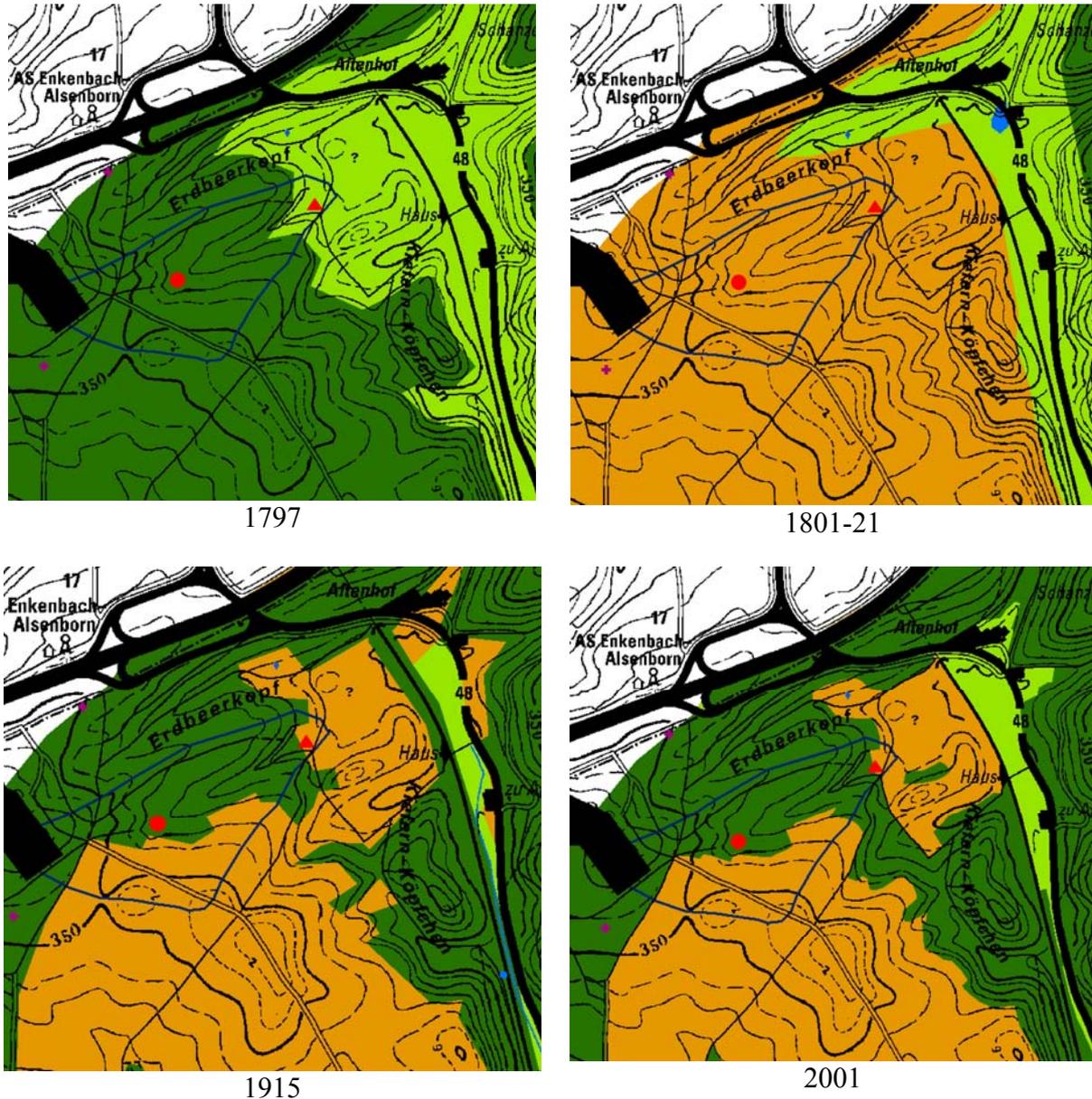


Abb. 38: Detailkarten der historischen Landnutzung von 1797, 1801-21, 1915 und 2001 im Bereich des Tiergartentälchens (Legende: lila Kreuz – vorgeschichtlicher Fund, Fragezeichen – unbekannt, blaue Raute – neolithischer Einzelfund, roter Punkt – Tiergartenprofil, rotes Dreieck – Rammkernbohrung, orange – Acker, hellgrün – Grünland, dunkelgrün – Wald).

Für das in der Neuzeit durchgängig bewaldete Kleinsteingugsgebiet des **Mückentalgrabens** (Abb. 39) erscheinen nach dem Prozessverständnis HSDR-Werte über 50 % als unlogisch. Daher ist zunächst von Interesse, woher die mit 91 cm ungewöhnlich hohe Berechnungsgrundlage und damit der hohe Erosionsterm und der hohe Austrag in der Bilanz II stammt. Ein Blick auf die Landnutzungsgeschichte vom Mückental zeigt, dass sich die Situation hier ganz anders als im Tiergartentälchen bei Hochspeyer verhält. Im gesamten Erlenbach-Teileinzugsgebiet sind keine archäologischen Funde verzeichnet. Auch die Waldbeschreibungen von FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) lassen vermuten, dass dieses Gebiet erst im Laufe der Indus-

trialisierung und Intensivierung der Waldwirtschaft seit dem 18. Jahrhundert stärker genutzt wurde. Die Auswertung der historischen Landkarten im Bereich des Mückentals ist leider wenig ergiebig. Das Mückental ist mindestens seit 1797 bewaldet gewesen, ohne dass weitere Informationen zur Bewirtschaftungsform und dem Baumbestand verfügbar sind. In der Forstrenovierungskarte von Dewarat von 1785 sind an Unter- und Mittelhängen der Nordost-, Ost- und Südhänge des Tals Laubwaldbestände mit einem Alter von null bis zehn Jahren kartiert worden, am Oberhang und auf dem Plateau über siebzigjähriger Misch- bzw. Laubwald. In den Jungflächen sind vereinzelt Stellen markiert, auf denen vermutliche Waldbrand-schäden (seit 1760) ausgewiesen sind (FENKNER-VOIGTLÄNDER 1992: 65A).

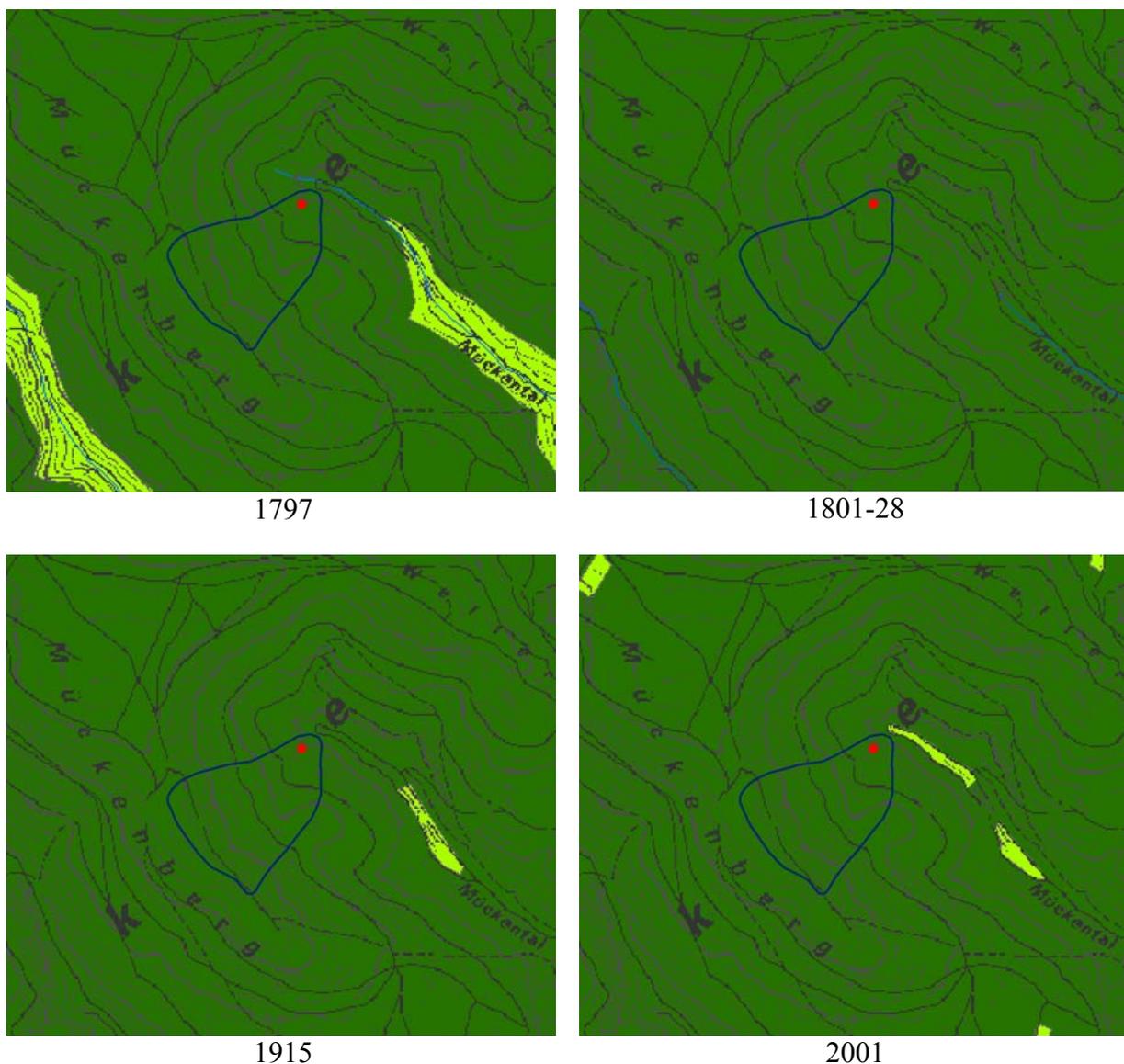


Abb. 39: Detailkarten der historischen Landnutzung von 1797, 1801-21, 1915 und 2001 im Bereich des Mückentalgrabens (Legende: roter Punkt – Mückentalgrabenprofil, hellgrün – Grünland, dunkelgrün - Wald).

Bei FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) liest man, dass 1810 Mückenwiese, der Stadtteil von Elmstein am Ausgang des Mückentals, fünf Haushalte mit 28 Einwohnern beheimatete. Die Nutzung der Aue schwankte, war aber wohl um 1797 am intensivsten. Heute sind die Wiesen Wildwiesen, die regelmäßig von Wildschweinen umgegraben werden. Leider sind weder bei UHLY (2006) noch bei FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) Belege für das historische Wettergeschehen in der Umgebung von Elmstein aufgeführt, so dass keine Aussagen über Starkregenereignisse und ereignisbasierte Erosionsprozesse gemacht werden können. Ebenso wenig wie die Landnutzungs- oder Klimageschichte Hinweise auf erosionsfördernde Bedingungen liefern, besteht am Mückenberg eine geologische oder geomorphologische Ausnahmesituation, die eine mit 91 cm signifikant höhere Berechnungsgrundlage rechtfertigen würde. Es ist demnach unwahrscheinlich, dass fast zwei Drittel des erodierten Materials von diesem Hang abgetragen und durch das Fließgewässer im Mückental ausgetragen wurde. Im Kapitel 4.5.3 wird dieser Punkt deshalb noch einmal aufgegriffen.

Vergleicht man das Ergebnis der Sedimentbilanz II mit den Ergebnissen der Sedimentbilanz I so fällt auf, dass mit dem Kartendatensatz der höchste SDR mit 31,5 % errechnet wird. Die SDR der Sedimentbilanz Ib und II unterscheiden sich dagegen weniger. Auch in Bezug auf die Sedimentbilanzen, die mit ähnlicher Methodik im Rheineinzugsgebiet erstellt worden sind, sind die Werte niedrig (vgl. Tab. 18).

ROMMENS ET AL. (2005) beziehen die Mächtigkeitenangaben von Bohrungen auf Reliefeinheiten im Nodebais-Einzugsgebiet, einem landwirtschaftlich genutzten Ausschnitt des belgischen Lössgürtels. Das mit 102 ha eher auf der Mikroebene anzusiedelnde Untersuchungsgebiet erzielt wesentlich geringere absolute Erosions- und Sedimentationsmengen und der HSDR-Wert ist mit 42 % geringer als der des Mückentalgrabens. Die Sedimentzwischen-speicherung ist demnach verhältnismäßig hoch (Abb. 40).

Die von NOTEBAERT ET AL. (2009) publizierten und mit der „Average per Unit“-Methode ermittelten HSDR-Werte für TEZG innerhalb des Dijle-EZG im belgischen Lössgürtel liegen dagegen deutlich über den für das Speyerbach-Einzugsgebiet ermittelten. Erosion und Sedimentation halten sich über das Holozän hinweg die Waage; teilweise überwiegt die Zwischenspeicherung etwas (Abb. 40). Der HSDR für das gesamte Dijle-EZG wird von NOTEBAERT ET AL. (2009) mit 60 % angegeben. Die von NOTEBAERT ET AL. (2009) publizierten CSDR-Werte sind dagegen in besserer Übereinstimmung mit denen des Speyerbachs (Abb. 41).

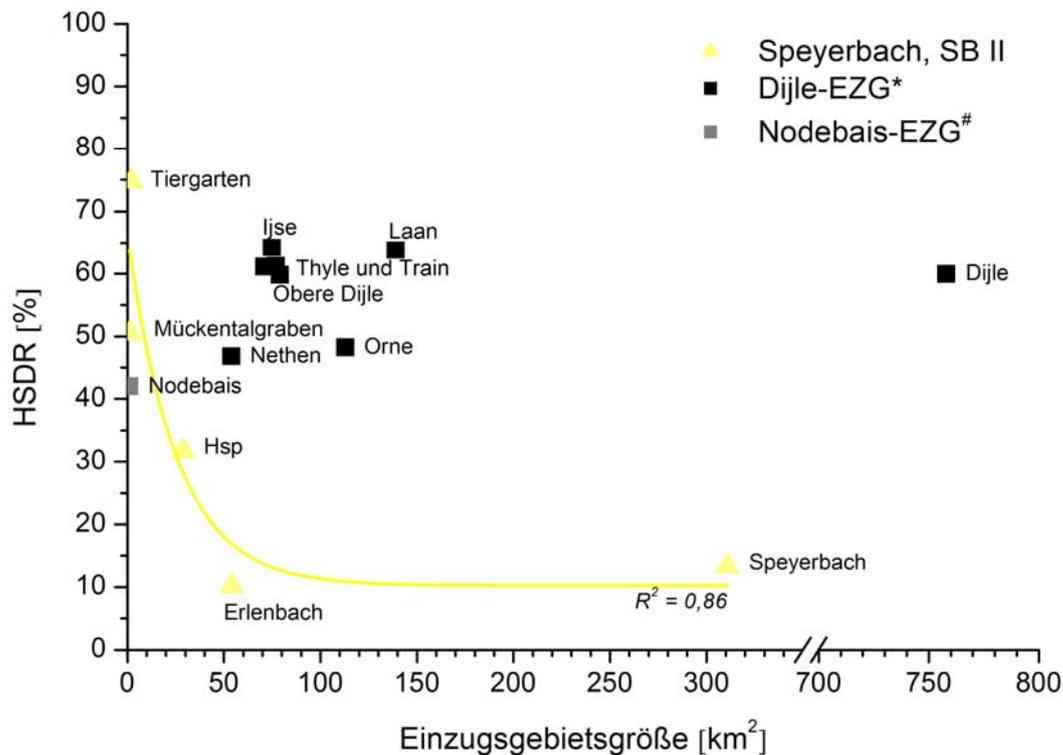


Abb. 40: Vergleichende Darstellung der *hillslope sediment delivery rate* (HSDR), die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets mit der APU-Methode erhoben worden sind, zusammen mit denen der Sedimentbilanz II (Daten von *NOTEBAERT ET AL. (2009) und #ROMMENS ET AL. (2005)).

Für die CSDR-Werte des Dijle-Einzugsgebiets von NOTEBAERT ET AL. (2009) kann man eine exponentielle Abbaukurve mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,85 annähern (Abb. 41). Da die von VAN HOOFF & JUNGERIUS (1984) untersuchten, landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiete im Keupermergelgebiet Luxemburgs alle in der gleichen Größenordnung liegen, ist eine skalenabhängige Betrachtung hier nicht möglich. Auffällig ist jedoch, dass die ermittelten CSDR weit streuen (zwischen 14 und 57 %, Abb. 41). Das über Kartierung von Kolluvien berechnete Gesamtsedimentvolumen ist mit rund 10 Mio. m^3 zwischen den Ergebnissen für den Hochspeyerbach (~9 Mio. m^3) und den Speyerbach (~16 Mio. m^3) anzusiedeln. Aber auch bei diesem stammen mehr als zwei Drittel der Sedimentmenge aus Kolluvien, der Anteil der Auensedimente ist gering.

Es liegen noch keine Ergebnisse aus anderen Sandsteingebieten Europas oder Deutschlands vor, denn aus den laufenden Arbeiten von KRANZ (mündl. Mitteilung) im Spessart sind bis jetzt noch keine Ergebnisse veröffentlicht worden. Von DOTTERWEICH (mündl. Mitteilung) ist die Veröffentlichung eines Sedimentbudgets aus dem Rotliegenden des südlichen Pfälzerwaldes geplant.

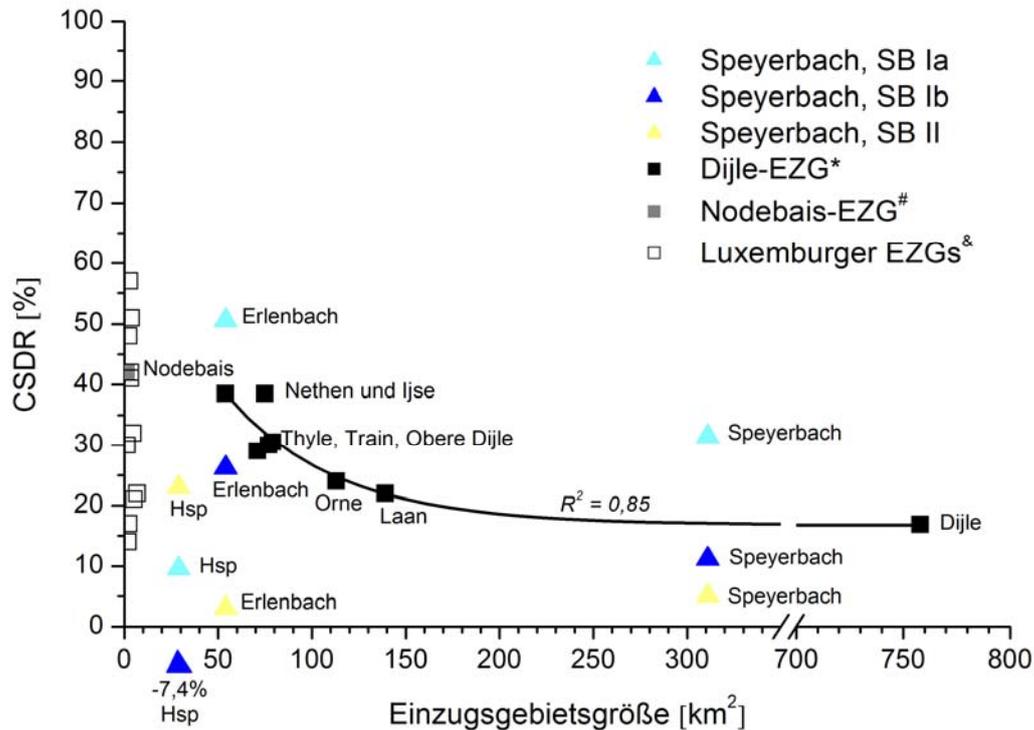


Abb. 41: Vergleichende Darstellung der *catchment sediment delivery rate* (CSDR), die innerhalb des Rhein-Einzugsgebiets mit der APU-Methode erhoben worden sind, zusammen mit denen der Sedimentbilanz II (Daten von ^{*}NOTEBAERT ET AL. (2009), [#]ROMMENS ET AL. (2005) und [&]VAN HOOFF & JUNGERIUS (1984)).

Andere Vorgehensweisen als die APU-Methode zur Erstellung der Kartengrundlage werden z. B. in den Studien von BORK (1983), DE MOOR & VERSTRAETEN (2008), HOFFMANN ET AL. (2007), HOUBEN ET AL. (2007) verwendet. NOTEBAERT ET AL. (2009) weist auf die Schwierigkeiten hin, die der Vergleich der Ergebnisse (Tab. 18) mit sich bringt. Neben den vielen natürlichen und historischen Faktoren, die die Sedimentdynamik eines Einzugsgebietes steuern, kommen methodische Unterschiede hinzu, so dass es letzten Endes nicht sinnvoll erscheint, die absoluten Volumina miteinander zu vergleichen. Schon die Tatsache, dass für den Hochspeyerbach zwei Berechnungsgrundlagen angesetzt werden und NOTEBAERT ET AL. (2009) stattdessen einen Korrekturfaktor für Waldgebiete verwendet, lässt auch diesen Vergleich als nicht ganz schlüssig erscheinen. Deshalb werden im Folgenden die SDRs diskutiert, deren Aussagekraft als Integral über alle Eigenschaften des Systems angesehen werden muss.

DE MOOR & VERSTRAETEN (2008) haben die Erosion und den CSDR mit Hilfe einer WATEM/SEDEM-Modellierung bestimmt, während die Sedimente im Geul-Einzugsgebiet, einem 380 km² großen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet im Lössgürtel an der Grenze zwischen Belgien und den Niederlanden, kartiert wurden. Sie können zeigen, dass sich der für die Periode Frühes Holozän bis Hochmittelalter errechnete HSDR deutlich von

dem des für die Periode Hochmittelalter bis heute berechneten unterscheidet (58 % und 17,9 %). Der berechnete CSDR für das Hochmittelalter bis heute ist mit 6,9 % sehr gering und vergleichbar mit dem CSDR der Sedimentbilanz II für den Speyerbach (Tab. 18). Auch VAN ROMPAEY ET AL. (2001) haben den Austrag über ein distributives hydrologisches Modell (SEDEM) ermittelt. Der dadurch errechnete CSDR für das Dijle-Einzugsgebiet liegt bei 18 %. Die von HOUBEN (2008) ermittelten CSDR und HSDR-Werte des Rockenberg-Einzugsgebiets, eines 10 km² Ausschnitts der lössbedeckten Wetterau, liegen mit 29 und 38 % zwischen den von ROMMENS ET AL. (2005) und für den Hochspeyerbach (SB II) angegebenen Werten. Den hohen Prozentsatz der Zwischenspeicherung führt HOUBEN (2008) auf die trockenen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet und das seit dem frühen Mittelalter bestehende enge Netz an Feldgrenzen und Feldwegen als effektive Sedimentfalle zurück.

BORK (1983) hat für das lössbedeckte Hügelland der Rhume in Niedersachsen einen SDR von 12,5 % errechnet. Die Erosionsmenge von 500 Mio. m³ Boden innerhalb des 280 km² großen Untersuchungsgebiets übersteigt die Erosionswerte der Sedimentbilanz Ib um mehr als das Doppelte, der SDR liegt aber innerhalb der Spanne von Sedimentbilanz Ib und Sedimentbilanz II.

Aus der Studie von WALLING ET AL. (2002) werden nur die Ergebnisse des Jubilee- (0,31 km²) und des New Cliftonthorpe-Teileinzugsgebiets (0,96 km²) vorgestellt. Hier wurden mittels ¹³⁷Cs, Sedimentfallen, Abfluss- und Suspensionsfrachtmessungen Sedimentations- und Erosionsraten bestimmt. Die absoluten Werte sind im Vergleich zu den anderen Studien am geringsten, während die SDRs mit Werten von 14,2 bis 26,7 % im Mittelfeld zwischen den Speyerbach-Ergebnissen und den anderen Studien rangieren.

PHILLIPS (1991) erstellte für vier Untersuchungsgebiete im North Carolina Piedmont mit Flächen von 1119 bis 4217 km² Sedimentbilanzen. Die Datengrundlage stammte vom U.S. Department of Agriculture. Die Erosion wurde über eine USLE-Modellierung und Geländekartierungen bestimmt, die Sedimentfracht der Vorfluter an einem Pegel gemessen und die Sedimentlieferung zum Vorfluter wurde aus Daten von Farmteichen und den Berechnungen der MUSLE zusammengetragen. Die SDR-Werte dieser Untersuchungen betragen 6,8 %, 7,6 %, 8,4 % und 15,8 %, wobei auch hier der hohe Anteil der Zwischenspeicherung auf den Hängen auffällig ist. PHILLIPS (1991: 238f) betont, dass seine Ergebnisse innerhalb der Spannweite anderer Studien liegen, die für Einzugsgebiete im Piedmont durchgeführt wurden und SDR-Werte von 3,5 bis 12 % aufweisen.

Tab. 18: Erosions- und Sedimentationsvolumen sowie *sediment delivery ratio* (SDR) verschiedener internationaler Studien zur Sedimentbilanzierung in Millionen Tonnen oder Kubikmeter (*Kolluvien, ¹Bilanz über letzte 7500 Jahre; [#]seit Hochmittelalter; [°]Frühes Holozän bis zum Hochmittelalter, ³Jubilee-TEZG, ⁴New Cliftonthorpe-TEZG).

	Erosion [Mio. m ³]	Erosion [Mio. t]	Sedimentation [Mio. m ³]	Sedimentation [Mio. t]	SDR [%]	HSDR [%]
Speyerbach SB Ia ¹	27,108	38,765	18,575	26,562	31,48	
Speyerbach SB Ib ¹	193,216	247,317	171,584	228,206	11,2	
Speyerbach SB II ¹	108,803	139,268	94,438	125,603	5,09	13,2
De Moor & Verstraeten 2008 ²		270,168		251,554	6,9[#]	17,9[#] (58°)
Van Rompaey et al. 2001					18	
Houben 2008 ¹		9,360		6,630 (5,79*)	29,2	38,1
Bork 1983	493,600		431,74		12,5	
Walling et al. 2002 ³		0,00015		109,9	26,7	
Walling et al. 2002 ⁴		0,0004309		369,6	14,2	
Phillips 1991 ¹		3,741 / 0,805		3,478 / 0,676	6,4 / 15,8	
Seidel 2004 ¹			447 / 73		0 - 40	
Hoffmann et al. 2007 ¹	37,600	53,900	41,900	59,500	10	

In der aktualistischen Studie von BANASIK ET AL. (2005) rangieren die SDRs zwischen 3 und 34 % für bewaldete Einzugsgebiete innerhalb der polnischen Mittelgebirge. Die Erosion wurde dabei über die USLE geschätzt und der Sedimentaustrag der Flüsse aus an Pegeln gemessenen Suspensionsfrachten abgeleitet.

SEIDEL (2004) hat für die Einzugsgebiete der Elz und der Möhlin die Sedimentvolumina anhand der Ausdehnung in der Geologischen Karte und von Profilmächtigkeiten ermittelt. Im 856 km² großen Einzugsgebiet der Elz werden demnach 447 Mio. m³ Sedimente gespeichert, 64 % davon als Kolluvien. Im 113 km² umfassenden Möhlin-EZG sind die Mengen geringer. Hier liegen 73 Mio. m³ Sedimente, wovon nur 37 % Kolluvien sind. Unter der Annahme, dass SDRs von 0 bis 40 % realistisch sind, errechnen sich daraus Erosionsraten von 46 bis 77 bzw. 53 bis 88 cm für die beiden Gebiete (SEIDEL 2004: 102). Der Vergleich mit den Ergebnissen des Speyerbachs fällt schwer. Die Einzugsgebiete sind vielfältiger in ihrem geologischen Aufbau und ihrer naturräumlichen Ausstattung, auch ist die Nutzungsgeschichte länger und intensiver. Zudem weicht das methodische Vorgehen zu stark von dem für das Speyerbach-Einzugsgebiet benutzten ab.

TRIMBLE (1999) hat mit seiner Arbeit im Coon Creek, einem 360 km² großen, seit der Besiedlung landwirtschaftlich bewirtschafteten Einzugsgebiet im Driftless Area in Wisconsin, sehr eindrücklich gezeigt, dass neben der Bestimmung der Volumina die zeitliche Entwicklung von Erosions- und Sedimentationsvorgängen ein Prozess ist, der die Dynamik und Adaptionfähigkeit eines Systems demonstrieren kann. Aus Kartierungen von Querprofilen seit 1835 war es ihm möglich, drei Zeitscheiben einzeln zu bilanzieren. Während sich die absolute Erosionsmenge seit 1853 verringerte, stieg der SDR von 8,6 % (1853-1935) über 15 % (1935-1975) auf 31,6 % (1975-1993) an. Dies konnte vor allem durch Erosionsschutzmaßnahmen auf der Fläche erzielt werden, denn auch die absoluten Werte der Sedimentation gingen zurück. Wenngleich dazu für den Pfälzerwald die Daten fehlen, wird im folgenden Kapitel die Differenzierung der holozänen Sedimentationsgeschichte im Pfälzerwald am Beispiel zweier exemplarischer Standorte demonstriert.

4.5 Zeitliche Differenzierung von Sedimentationsphasen

4.5.1 Ausgewählte Standorte

In jedem Teileinzugsgebiet wurde ein Standort für die exemplarische Untersuchung der zeitlichen Differenzierung der Sedimente ausgewählt. Im Erlenbach-Teileinzugsgebiet wurde dazu ein Anschnitt verwendet, der bei einem Sommergewitter am 22. Juli 2006 im Mückental durch die Erosion eines Forstwegs entstanden ist. Der dabei aufgerissene *gully*, der im Mai 2008 von mir vorgefunden wurde, spiegelte nur noch einen Teil der ursprünglichen Hohlform wieder, da davon ausgegangen werden muss, dass er sich über gravitative Bewegungen und Verfüllungen seit 2006 weiterentwickelt hat. Darüber hinaus ist der Bereich des Schwemmfächers beim Eintritt in das Mückental durch die Planierung der hintersten Wiese verändert worden. Nach Aussagen der Forstverwaltung wurde der Zufahrtsweg durch das Mückental zum Weltersberg vollkommen neu angelegt. Bei dem Niederschlagsereignis handelte es sich um eine Gewitterzelle, die nur im Mückental und bei Mölschbach einen solchen Schaden verursacht hat.³⁴ Charakter und Ausmaß des Niederschlagsereignisses werden aus dem Einsatzbericht der Polizei deutlich:

„Am späten Nachmittag des 22.07.06 wurde der Pfälzer Wald u. a. auch im Bereich Elmstein von einem starken Unwetter heimgesucht. Hagel, starker Regen und orkanartiger Wind zogen über die Ortsteile der Gemeinde hinweg. (...) Zeitgleich wurde auch die L 499 im Bereich Mückenwiese durch einen Erdrutsch überschwemmt. Hier war es nur noch für geländefähige Fahrzeuge möglich, die Straße zu passieren. Die Straßenmeisterei wurde verständigt und kümmerte sich um die Säuberung der Fahrbahn. Hierzu musste auch ein Radlader eingesetzt werden, der die Schlamm- und Geröllmassen von der Fahrbahn schob. Aufgrund des starken Niederschlages stieg der Pegel des Speyerbachs an, so dass dieser über die Ufer trat. Hierdurch wurden die bachnahen Grundstücke überflutet und Keller der anliegenden Häuser standen unter Wasser. Im Bereich Am Ehrenfelsen, Elmstein stieg der Pegel des Speyerbachs so hoch, dass auch die angrenzende L 499 (Hauptstraße) vollständig überflutet wurde.

³⁴ Persönliche Mitteilung von Herrn Mack, Forstliche Versuchsanstalt Trippstadt, mit freundlichem Dank für seine Unterstützung

Die Straße musste zeitweise voll gesperrt werden und der Verkehr wurde umgeleitet.“
(NEUSTADT 2006).

Die Intensität der Niederschläge ist schwer abzuschätzen, da sich in den betroffenen Gebieten keine Niederschlagsstation befindet. Am ehesten werden die Werte der Waldmessstation der Forstlichen Versuchsanstalt Trippstadt in Merzalben das Ergebnis beschreiben können, denn dort wurde am 21. Juli 2006 71 mm d^{-1} Niederschlag gemessen. Die Angaben weiterer Stationen zeigen, dass es sich um ein lokal beschränktes Phänomen handelte:

- Weidenthaler Kläranlage: 21. Juli: $0,28 \text{ mm d}^{-1}$, 22. Juli: $5,93 \text{ mm d}^{-1}$, 23. Juli: $3,63 \text{ mm d}^{-1}$,
- Landau/Taubensuhl: kein Niederschlag in diesem Zeitraum,
- Kaiserslautern: am 22. Juli: $0,12 \text{ mm d}^{-1}$ (Quelle: BÄNNJERRÜCK 2010).

Der Talschluss des Mückentals gabelt sich in drei Tiefenlinien auf, von denen nur die westliche von der Erosion betroffen war. Bei dem Gewitter schnitt sich unterhalb des höhenlinienparallel verlaufenden Forstwegs (der von beiden Seiten zu der Tiefenlinie hin leicht abschüssig ist) ein *gully* mehr als zwei Meter tief ein. Dies demonstriert eindrücklich die Eigenschaften der verdichteten Forstwege im hydrologischen Prozessgeschehen: Sie sammeln den Oberflächenabfluss und kanalisieren den Abfluss in einer präferentiellen Bahn. Damit wird das Erosionspotential erhöht. In dem 2006 entstanden und 2008 vorgefundenen Unterhangsanriss wurde kurz vor der Mündung ins Mückental eine Wand aufgegraben und alle Schichten beprobt und datiert (Abb. 42).

Das **Mückentalgrabenprofil** wurde bis zum anstehenden saprolithischen Zersatz aufgegraben und zeigt einen deutlichen Schichtaufbau. Dem steinfreien Saprolith (Wechselagerung von gelben und orangen schluffig-tonigen Lagen mit rosa Sanden) lagern stark skeletthaltige Schichten auf, die aufgrund der Korngrößenzusammensetzung, des hohen Verfestigungsgrads und der rosa Farbe als Basislage angesprochen wurden. Die darüber liegende Schicht ist grobskelettarm, braun, lockerer gelagert und wurde daher als Hauptlage angesprochen. Ihr lagert eine mittelgrusige, stark mit Ton-Schluff-Bändern durchzogene Schicht auf, die schwach humos ist und einige Holzkohlestücke aufweist; sie wurde im Geländebefund als Kolluvium angesprochen. Die nächste Schicht im Hangenden ist grusiger, stärker verfestigt und nicht mehr so humos und wurde deshalb als eigenständiges Kolluvium ausgeschieden. Ihr liegt eine mittel-humose Schicht mit Fließstrukturen und Sortierungsmerkmalen auf, in die teilweise Material des Liegenden eingearbeitet wurde. Auch dieses Kolluvium ist dicht gelagert und weist Holzkohlestücke auf. Die obersten 10 cm werden aus einem stark humosen, stark grusig-steinigen (Straßenschotter) Kolluvium aufgebaut.

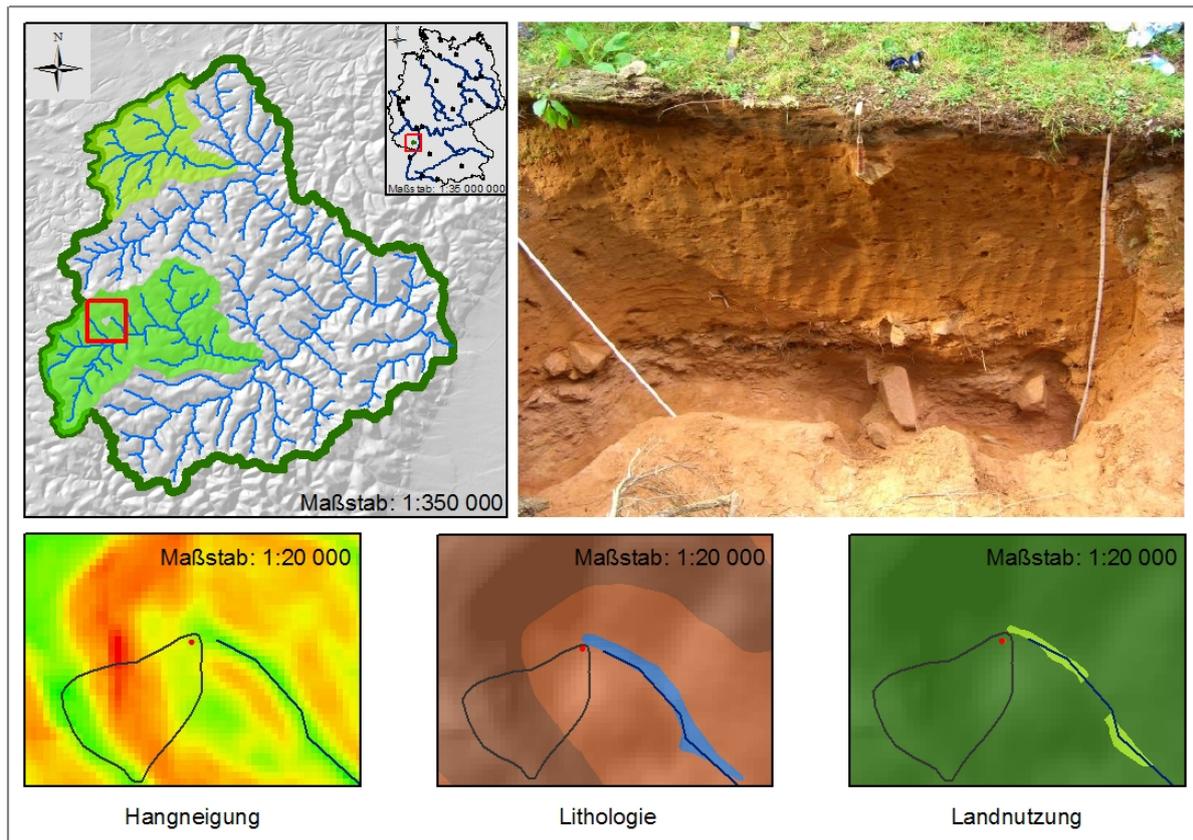


Abb. 42: Lage des Profils Mückenalgraben, nordwestlich von Mückenwiese, Gemeinde Elmstein (Rheinland-Pfalz) mit Kartenausschnitten zur Hangneigung (grün: 0 bis rot: 52,6°), Lithologie (dunkelbraun: Rehbergsschichten (sm), hellbraun: Karlstalschichten (sm), hellblau: fluviale Sedimente) und der Landnutzung (dunkelgrün: Wald, hellgrün: Grünland).

Inwieweit die Nutzung der Tiefenlinie als Forstweg zur Einschneidung und damit zur Erosion einer ehemaligen Talverfüllung geführt hat, ist aufgrund der Zerstörung der Fahrrinnen und angrenzenden Unterhänge an diesem Profil nicht mehr abzuschätzen.

Betrachtet man die Laborergebnisse³⁵ in Abbildung 43 und Anhang 9, so ist kein markanter Unterschied in der Korngrößenverteilung³⁶ zwischen der Hauptlage und den im Gelände als Kolluvien bezeichneten Horizonten erkennbar. Der Mittelsandanteil nimmt mit der Tiefe um rund 13 % ab, der Mittelschluffanteil steigt um 2 %. Ein deutlicher Unterschied ist dagegen bei der organischen Substanz³⁷ erkennbar. Weisen die ersten 20 cm Werte zwischen 1,1 und 1,4 % auf, so sinken die Werte auf unter 0,4 % in 30 cm Tiefe, und ab 180 cm Tiefe auf 0,1

³⁵ Die Laboranalysen wurden im Labor des Institutes für Physische Geographie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt.

³⁶ Korngrößenanalyse des Feinbodens, bestimmt nach DIN 19683, Teil 1 und 2 (1973) mit Humuszerstörung, Dispergierung der Aggregate mit 0,4 M $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, Nasssiegung der Fraktion $> 63 \mu\text{m}$, Sedimentationsanalyse nach Köhn zur Ermittlung der Anteile $< 63 \mu\text{m}$

³⁷ Messung des Gesamtkohlenstoffgehaltes nach E DIN ISO 10694 (1994) durch trockene Verbrennung, Infrarotdetektion am LECO RC-412, Multiplikation der C_{org} -Messwerte der karbonatfreien Proben mit dem Faktor 1,724

bis 0,2 % ab. Der pH-Wert³⁸ ist jedoch bis in den VI Cv-Horizont hinein größer 6, dann fällt er auf 5,5 ab (Abb. 43).

Beim Vergleich des Verhältnisses von oxalat-³⁹ und dithionitlöslichen⁴⁰ Eisen und Mangan fällt auf, dass der Quotient des Mangans sich bis in den IV Bv-Horizont hinein noch um 1 bewegt, im V Bv nur noch 0,5 beträgt und dann mit der Tiefe bis auf 0,3 abnimmt. Der Quotient des Eisens liegt dagegen im gesamten Profil unter 0,5, steigt vom III Bv bis zum V Bv-Horizont von 0,3 auf knapp 0,5 an, um dann wieder mit der Tiefe bis zu 0,13 abzunehmen. Der Verlauf dieser Werte zeigt, dass im Profil der Anteil dithionitlöslicher Oxidverbindungen überwiegt, d. h. dass der Anteil der aktiven und amorphen Bestandteile des Eisens geringer ist. Eine Verlagerung des Eisens hat also im gesamten Profil zu Gunsten der Fixierung in stabilen Verbindungen stattgefunden, während das beim Mangan in den ersten 100 cm unter der Geländeoberfläche noch nicht der Fall ist. In diesem Zusammenhang ist auch die starke Bänderung der Horizonte unterhalb von 45 cm zu sehen, die diese Verlagerung unterstreicht.

³⁸ pH-Wert-Bestimmung nach DIN 19684, Teil 1 (1977) in 0,01 M CaCl₂-Suspension

³⁹ Oxalatlösliche Oxide wurden nach DIN 19684, Teil 6 (1977) in oxalsaurem Ammoniumoxalat gelöst und gasvolumetrisch im Flammen-AAS (AAS Perkin-Elmer Analyst 300) gemessen

⁴⁰ Nach der Mörserung wurden dithionitlösliche Oxide nach Mehra & Jackson 1960 mit Dithionit-Citrat-Lösung gelöst und gasvolumetrisch im Flammen-AAS (AAS Perkin-Elmer Analyst 300) gemessen

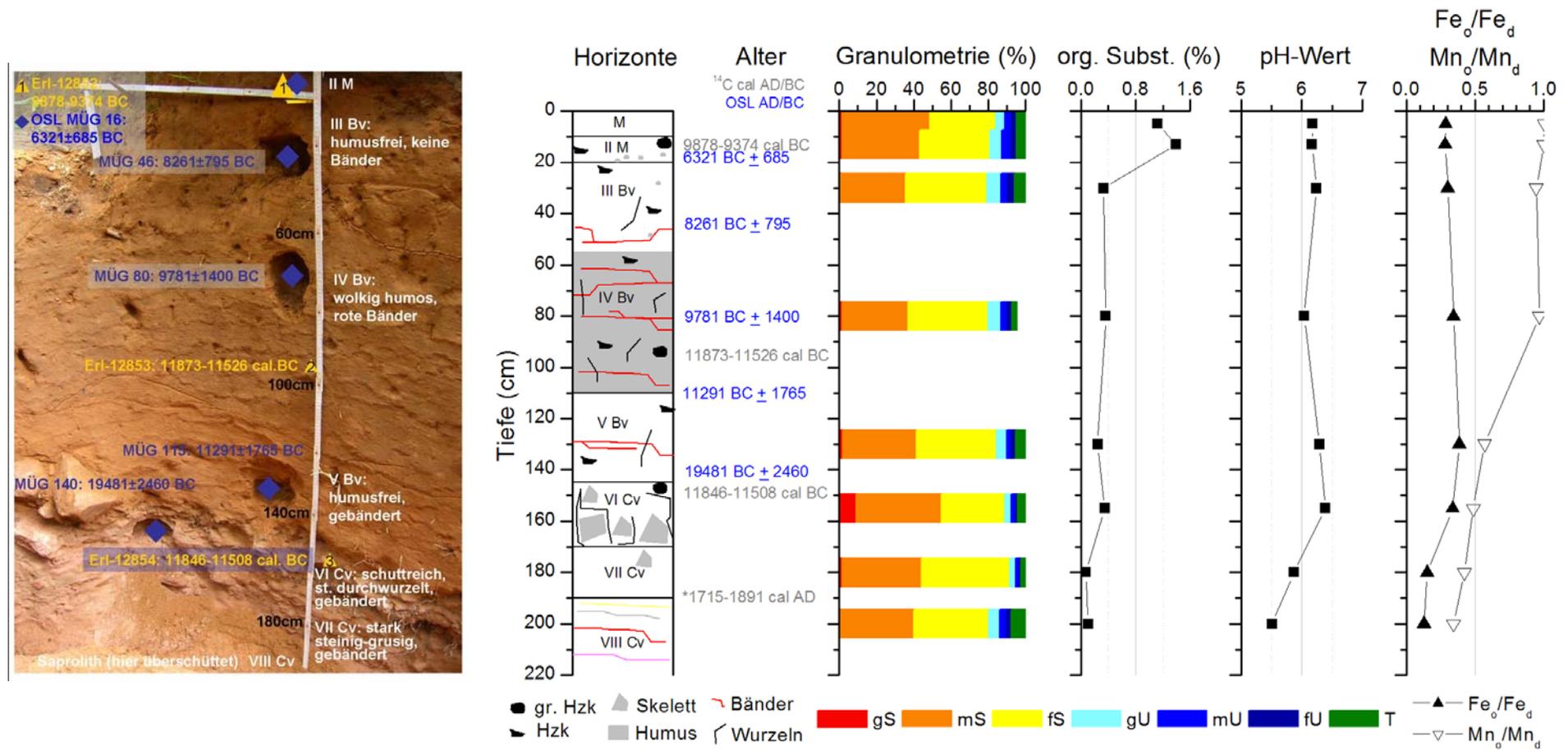


Abb. 43: Profilskizze, Altersangaben und Laborergebnisse (Korngrößen, organische Substanz, pH-Werte, Eisen- und Mangan-Verhältnisse) für das Mückentalgrabenprofil, Gemeinde Elmstein.

Die Korngrößenverteilung, Eisengehalte und Gehalte an organischer Substanz zeigen in den Bändern eine Anreicherung von Ton und Schluff, Eisen und organischer Substanz gegenüber der sie umgebenden Matrix (vgl. Abb. 44). Der Befund, dass bis auf das Band in 210 cm Tiefe die pH-Werte auch immer geringer sind als in den sie umgebenden Horizonten, ist ein Indiz dafür, dass es sich hierbei um eine Verlagerung von Ton-Humus-Eisenkomplexen im Sinne eines bodenbildenden Prozesses handelt und nicht um einzelne sedimentäre Einheiten. Gegen letzteres spricht auch, dass die Tonhumusbänder Schichtgrenzen überschreiten und nicht mit dem Gefälle einfallen, sondern horizontal verlaufen (Abb. 44).

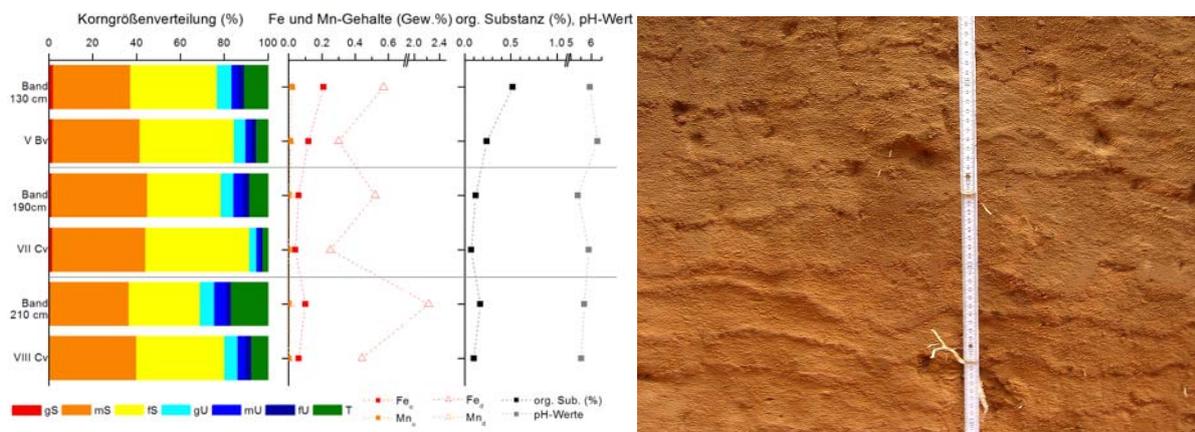


Abb. 44: Korngrößenverteilung, Eisen- und Mangangehalte, organische Substanz und pH-Werte von ausgewählten Bändern und den sie umgebenden Horizonten im Mückentalgrabenprofil (links) und ein Fotodetail aus der Profilwand zwischen 85 - 130 cm (rechts).

Diese makroskopischen Befunde werden auch von den mikromorphologischen Analysen zweier Dünnschliffe⁴¹ aus dem IV und V Bv-Horizonten unterstützt (Abb. 45). Die sehr feinkornarmen Mittel- und Feinsande sind im Bereich der Ton-Schluff-Bänder nicht stärker komprimiert, stärker sortiert oder mit ihren Längsachsen eingeregelt.

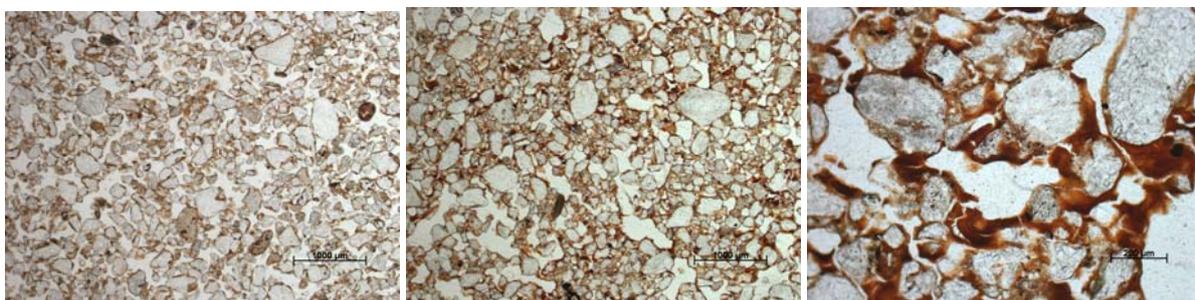


Abb. 45: Dünnschliffausschnitte aus dem Dünnschliff MÜG 2 entnommen aus dem V Bv-Horizont in 104 - 115 cm Tiefe: von links nach rechts: Bereich ohne Bänderung, Ton-Schluff-Band, Vergrößerung der Toneinspülung (Fotos von Dipl.-Geogr. Susann Müller).

⁴¹ Analysen und Fotos wurden freundlicherweise von Dr. Susann Müller am Institut für Physische Geographie der Goethe-Universität Frankfurt erstellt.

Die Tonhäutchen füllen oft die Porenräume unter den Sandkörnern, meniskenähnliche Strukturen sind erkennbar. Dabei fehlen außer in Wühlgängen Anzeichen für eine Umlagerung des Tons.

Diese Ergebnisse werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Während BERG (1984) die Entstehung von Tonbänderung in Sanden mit vertikaler Tonverlagerung erklärt, sehen AHL & MEYER (2001) in der Lamellenbildung eine Folge der Disproportionierung mit der Perkolations des Sickerwassers. Dabei entwickelt sich keine Tongehaltsänderung zwischen Horizonten, sondern eine kleinräumige Differenzierung (Distanzen von Millimetern bis zu Dezimetern) von Tonverarmung und Tonanreicherung auch über Horizontgrenzen hinweg. Diese Interpretation bietet sich auch in diesem Fall an, da die Tonbänder auch und verstärkt (nicht mehr viele dünne, sondern weniger aber dickere Bänder) in den Cv-Horizonten auftreten, es sich also nicht um eine Einwaschung von Ton aus den oberen Horizonten handeln kann. Allerdings ist die von AHL & MEYER (2001) als Voraussetzung für die Ausbildung der Bänder angeführte präpedogene Schichtung der Sedimente in den Dünnschliffen nicht erkennbar, da sowohl Einregelung als auch Sortierung fehlen. KEMP & MACINTOSH (1989) beschreiben Tonlamellenbildung in einer undifferenzierten Textur bzw. Schichtung eines sandigen Lehms, allerdings stimmen sie nicht der Hypothese von Bond (in KEMP & MACINTOSH 1989: 75) zu, der in einem Experiment herausfand, dass die Lamellenbildung gleichzeitig in verschiedenen Tiefen auftritt. Vielmehr sehen KEMP & MACINTOSH (1989) die Ursache für die Lamellen bis in große Tiefen in der Kombination von vorausgehenden Ablagerungsereignissen (an Dünen) und nachfolgender Perkolations in den aufsedimentierten Profilen. Dies mag angesichts der 7 m mächtigen Profile plausibel erscheinen und würde auch das unterschiedliche Alter der Tonbänder (BERG 1984) erklären. Jedoch bedeutet das gleichzeitig, dass eine Überprägung durch die rezenten Sickerwasserbewegungen ausgeschlossen wird.

Die Frage, ob es sich im Falle des Mückentalgrabens somit um Lamellen handelt, die sedimentäre Strukturen einzelner Ereignisse widerspiegeln, lässt sich nicht mit letzter Sicherheit klären. Die Tatsachen, dass sich Bänder verzweigen, über die Horizontgrenzen hinweg ziehen, dass sie in allen Horizonten auftreten und das Bodenmaterial sich ober- und unterhalb der Lamellen nicht stark voneinander unterscheidet, sprechen meines Erachtens jedoch dagegen. Für dieses Profil favorisiere ich deshalb die Disproportionalisierungs-Erklärung.

Dieser Exkurs in die Mikromorphologie hat gezeigt, dass die Sedimente im Mückentalgraben wenig durch Bioturbation gestört wurden. Dieses Zusatzwissen erleichtert die Einschätzung der Qualität der OSL-Alter, die in Kapitel 4.5.2 vorgestellt werden.

Der zweite beprobte und datierte Aufschluss **Tiergartenprofil** befindet sich im nördlichsten Bereich des Speyerbach-Einzugsgebiets, im Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet zwischen Fischbach und der Autobahn A6. Wie in Abbildung 46 gezeigt wird, wurde das Profil in einer Lichtung in der Talschlussmulde des Tälchens zwischen Erdbeerkopf und Kiefern-Köpfchen im Wald aufgegraben. Am Übergang zu den hangaufwärtigen Ackerflächen ist eine Waldrandstufe in einer Höhe von 50 cm ausgebildet. Das Einzugsgebiet dieser Talmulde erstreckt sich jedoch, wie am Höhenlinienverlauf in der topographischen Karte zu erkennen ist, noch bis auf den Höhenrücken, so dass auch die geteerte Straße heute eine Transportbarriere bildet. Da das Tälchen nicht verbaut und im Unteren Buntsandstein ausgebildet ist sowie Anschluss an die Lösslehmdecke des Tiergartens besitzt, wurde dieser Standort als beispielhaft für die intensiver genutzten landwirtschaftlichen Gebiete mit früher Besiedlung ausgewählt.

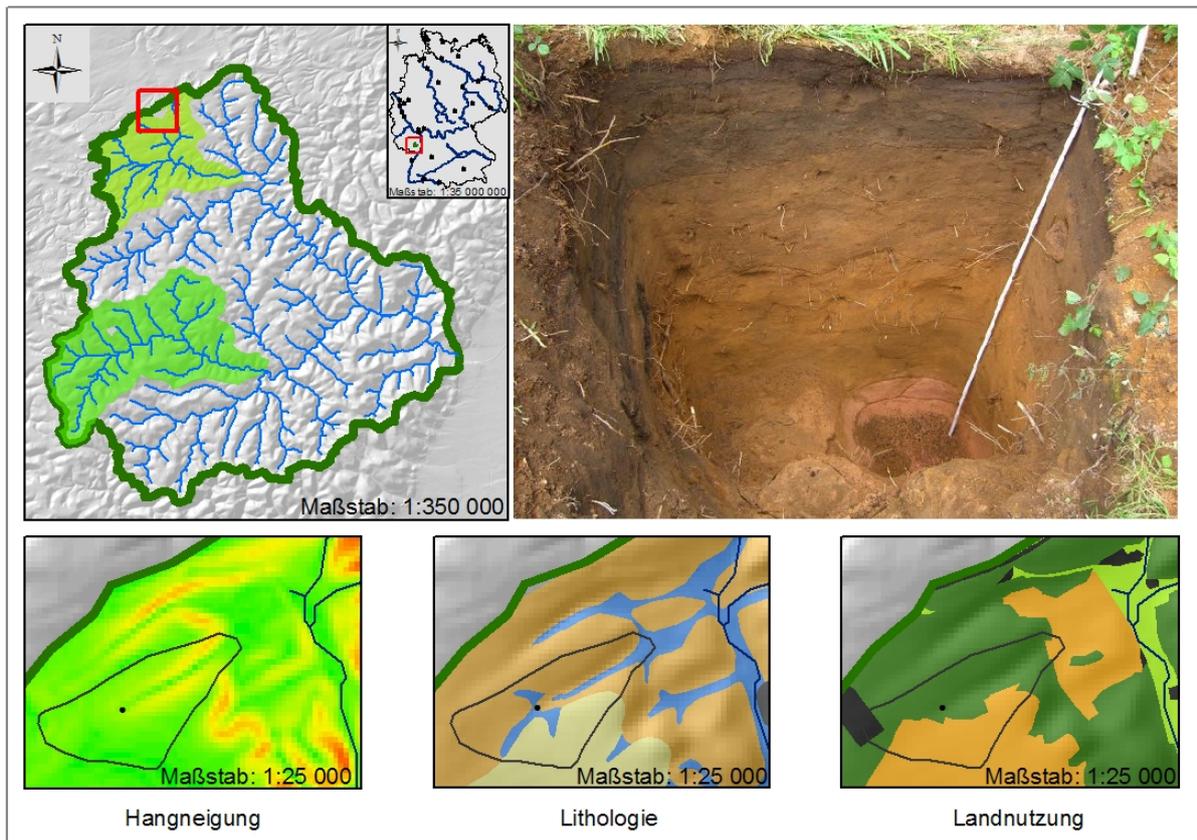


Abb. 46: Lage des Profils Tiergartentälchen, nördlich von der Gemeinde Hochspeyer (Rheinland-Pfalz) mit Kartenausschnitten zur Hangneigung (grün: 0° bis rot: $52,6^\circ$), Lithologie (blaßgelb: Lösslehm, hellbraun: Trifelsschichten (sm), hellblau: fluviale Sedimente) und der Landnutzung (dunkelgrün: Wald, hellgrün: Grünland, orange: Ackerland, schwarz: Siedlungen).

Nach LUDT (1959: 19ff) wurden bei Hochspeyer jungsteinzeitliche Steinbeile und Feuersteinklingen gefunden. Im unteren Leimbachtal ist ein steinzeitlicher Menhir belegt und zahlreiche Hügelgräber aus dem letzten Jahrtausend v. Chr. weisen auf keltische Besiedlung hin (LUDT 1959: 22). Der Altenhof nordöstlich des untersuchten Tälchens soll als Wirtschaftshof

schon seit frühester Frankenzeit bestanden haben. Der heutige Münchhof ist seit 1195 bzw. 1217 als landwirtschaftlicher Hof mit eigener Flur belegt (LUDT 1959: 26).

Die Profilwand wurde zwei Meter tief aufgegraben und ist deutlich differenzierter aufgebaut (Abb. 47) als der Mückentalgraben (Abb. 42). Die ersten 25 cm unter Geländeoberfläche sind durch eine starke organische Auflage und mittel bis stark humose schwach lehmige Mittelsande geprägt, die mit fein verteilten großen und kleinen Holzkohlestücken, Sandsteingrus und Kies durchsetzt sind. Im Liegenden folgen zwei Schichten, die sich gegenüber den darunter folgenden Sedimenten durch ihren Grauschleier deutlich absetzen. Die braunen Mittelsande sind nur schwach humos, weisen nur noch wenige kleine Holzkohlestücke auf und sind grusiger. Diese ersten fünf Horizonte wurden im Gelände als Kolluvien angesprochen. Im Liegenden wurde die folgende Schicht aufgrund ihrer Verbraunung, ihrer lockeren Lagerung und der endenden Durchwurzelung als Hauptlage angesprochen. Dabei setzt sich der untere Horizont bei der Geländeansprache durch einen olivfarbenen Farbstich und eine stärkere Verdichtung gegenüber dem hangenden Horizont ab. Die untersten 25 cm stellen mit den rosa gefärbten, skeletthaltigen Mittelsanden die Basislage dar.

Im Tiergartenprofil fällt auf, dass der Ton und Schluffanteil in der Basislage mit 3,3 % am geringsten ist (Abb. 47 und Anhang 9). Mit ~22 % und 18,5 % Feinbodenanteil kleiner als 0,063 mm heben sich die ersten zwei Horizonte nochmals deutlich von den anderen Horizonten ab (14 - 16 %). Betrachtet man das Einzugsgebiet dieser Talschluss-Verflachung, so ist auffällig, dass die Waldrandstufe am Übergang zum Rücken auch die Grenze zwischen lösslehmbedecktem Rücken und den steileren Hängen des Unteren Buntsandsteins (sandige Hauptlagen) bildet. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass es sich bei den oberen zwei Kolluvien im Schurf um einen größeren Anteil der Sedimentanlieferung von den Ackerflächen handelt, als es in den älteren Ablagerungen der Fall ist. Dies mag auf Veränderungen der Sedimentquellen, der Konnektivität oder der Intensität der Flächennutzung im lösslehmbedeckten Teil des Einzugsgebiets des Tälchens zurückzuführen sein. Der VI Bv-Horizont, der bei der Geländeansprache durch seine relativ höhere Dichte und den olivfarbenen Farbstich auffiel, zeigt in den Labordaten als einziger Horizont ein Mn_o/Mn_d -Verhältnis von 0,26, das kleiner als das Fe_o/Fe_d -Verhältnis (0,37) ist. Auch der Gehalt an organischer Substanz ist etwas größer als im darüber liegenden V Bv-Horizont (Abb. 47).

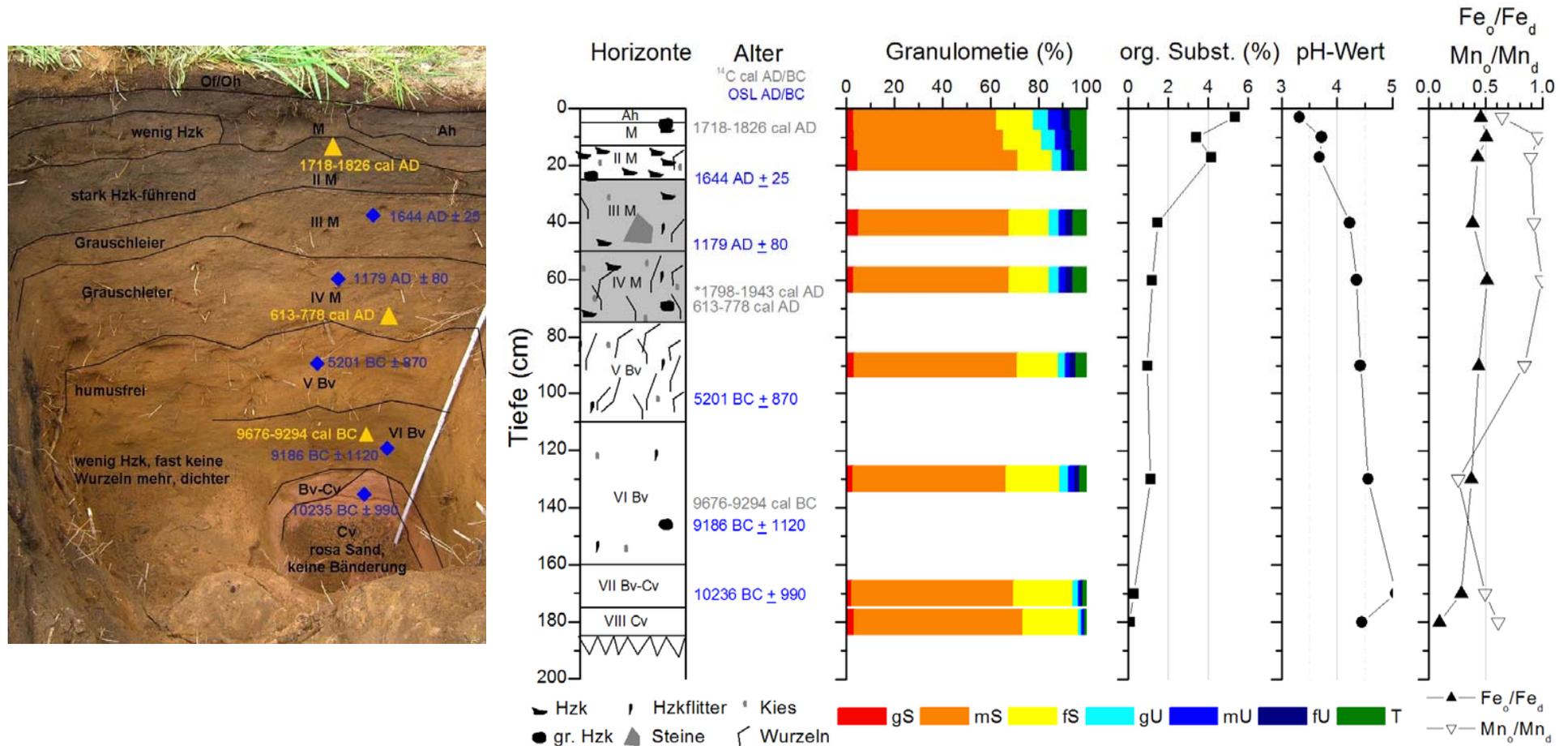


Abb. 47: Profilskizze, Altersangaben und Laborergebnisse (Korngrößen, organische Substanz, pH-Werte, Eisen- und Mangan-Verhältnisse) für das Tiergartenprofil, Gemeinde Hochspeyer. Das mit * gekennzeichnete Holzkohlealter stammt aus einem Holzkohlenest in der linken Profilwand, das aus lose im Sand verteilten, recht großen Holzkohlestücken besteht.

Um zu prüfen, ob die Olivstichigkeit dieses Horizonts aus einem hohen Gehalt an Laacher See Tephra resultiert, wurden die Schwermineralzusammensetzungen in der Feinsandfraktion⁴² der untersten vier Horizonte bestimmt. Die Untersuchungen zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen V Bv-/VI Bv- und VII Bv-Cv-/VIII Cv-Horizonten (Abb. 48). Der Übergangshorizont und der VIII Cv weisen die höchsten Werte an Zirkon, Turmalin, Rutil und Anastas auf. Der V Bv- und der VI Bv-Horizont weisen dagegen deutlich höhere Anteile an Augit, Brauner Hornblende und Titanit auf als der VII Bv-Cv- und der VIII Cv-Horizont. Diese Minerale gelten als typische Schwerminerale der Laacher See-Tuffe (THIEMEYER & VEITH 1993). Da davon ausgegangen wird, dass Laacher See-Tuffe bei der Bildung der Hauptlagen kryoturbar eingemischt wurden, können sie zur stratigraphischen Identifizierung dieser Horizonte als Hauptlage herangezogen werden.

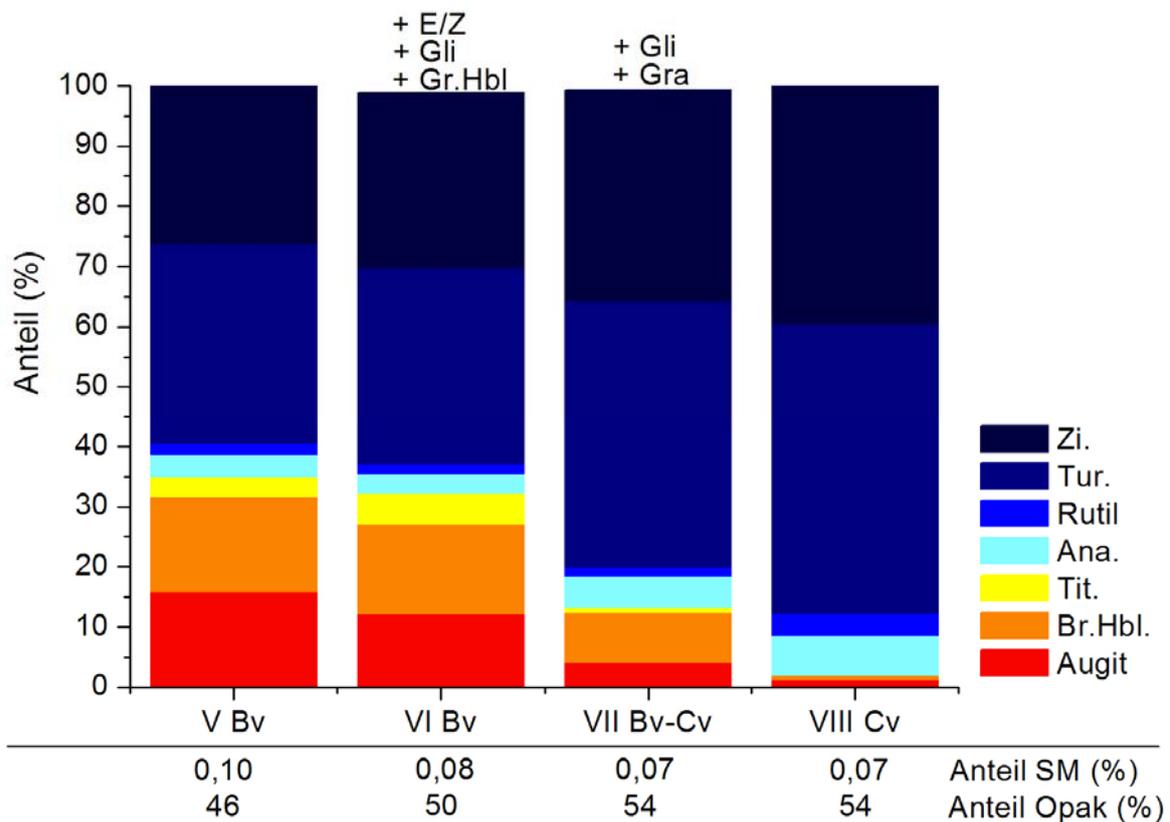


Abb. 48: Schwermineralzusammensetzung der untersten vier Horizonte des Tiergartenprofils: V Bv in 75 bis 110 cm Tiefe, VI Bv in 110 bis 160 cm Tiefe, VII Bv-Cv in 160 bis 175 cm Tiefe und VIII Cv in 175 bis 200⁺ cm Tiefe.

Wie Abbildung 48 zeigt, wird die Unterscheidung zwischen Haupt- und Basislage in der Schwermineralzusammensetzung deutlich sichtbar. Der Unterschied zwischen den beiden untersuchten Bv-Horizonten ist jedoch gering und betrifft vor allem die Augit und Zirkon-

⁴² Die Analysen wurden freundlicherweise von Frau Maria Guddat-Seipel im Auftrag des Instituts für Physische Geographie der Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt.

werte. Mit einem unterschiedlichen Anteil von Laacher See-Tephra im Sediment ist die Olivstichigkeit demnach nicht zu erklären. Auffälliger ist da schon das kleine Mangan-Verhältnis, das nur in diesem Horizont des Profils geringer als das Eisenverhältnis ist.

Eine Untersuchung zur Schwermineralzusammensetzung von Deckschichtenprofilen liegt von BRAUKÄMPER (1990) für vier Profile im Mittleren und Südlichen Pfälzerwald (Dahner Felsenland) vor, die auf Unterem Buntsandstein entwickelt sind. BRAUKÄMPER (1990: 36ff) konnte in seinen Profilen bei Ramberg, südwestlich von Edenkoben in den Annweiler Schichten und bei Münchweiler, in den Karlstal-Schichten Laacher Seetuff-Minerale nicht nachweisen (Abb. 49). Er zieht deutlich höhere Turmalin-Werte in den Hauptlagen und wesentlich höhere Zirkonwerte in den Basislagen zur Bestätigung der Lagenausbildung heran. Davon weicht allerdings das Profil bei Vorderweidental ab. Hier sind sowohl Augit, grüne und braune Hornblende in Basis- und Hauptlage vertreten und die Anteile von Turmalin sind geringer als in den anderen beiden Profilen, Zirkon tritt nur im Anstehenden mit großem Anteil auf.

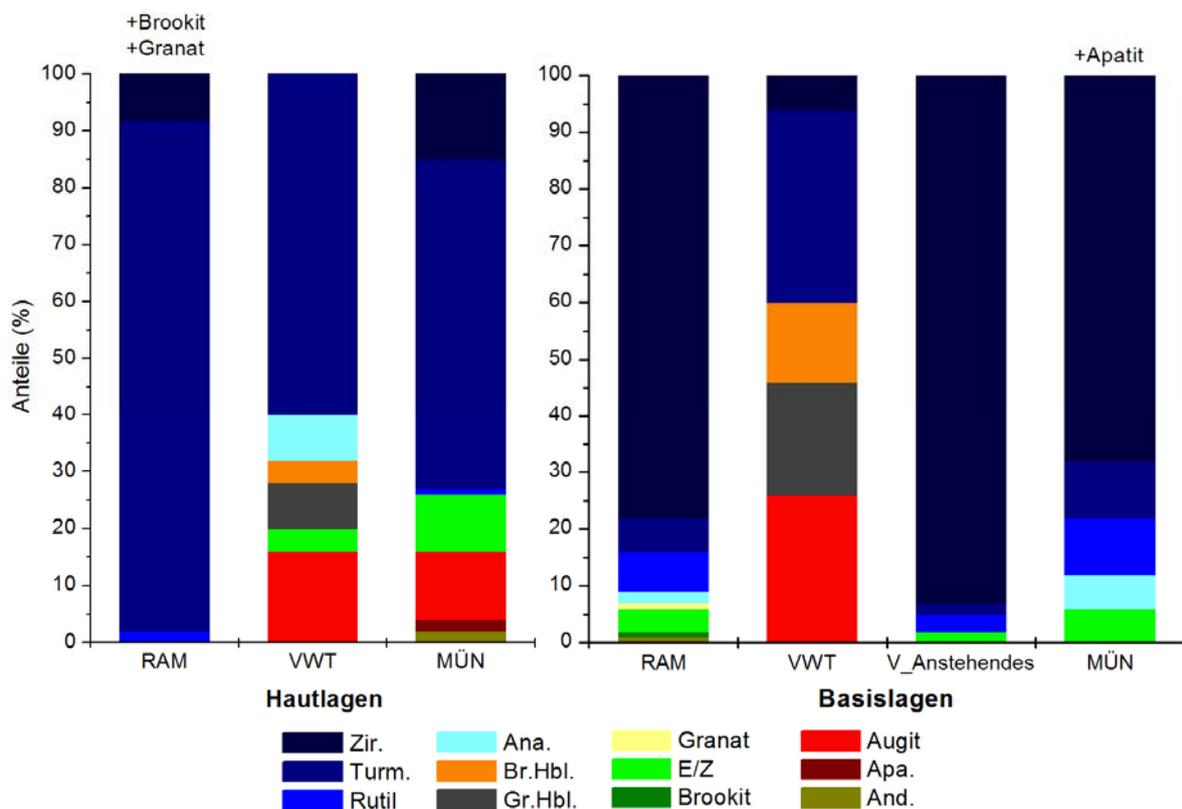


Abb. 49: Schwermineralzusammensetzung ausgewählter Deckschichtenprofile im Pfälzerwald bei Ramberg (RAM), Vorderweidental (VWT, V) und Münchweiler (MÜN), wie sie von BRAUKÄMPER (1990) publiziert wurden.

4.5.2 Datierungsergebnisse

Die zeitliche Differenzierung von Sedimentationsphasen erfolgt traditionell durch im Sediment eingebettetes datierbares Material wie archäologisch datierbare Scherben, Holzkohle, Knochen etc. Hierbei besteht aber aufgrund der Zeitspanne, die zwischen dem Absterben des organischen Materials, der Einbettung in ein Sediment sowie der Möglichkeit häufiger Remobilisierung und Umlagerungen liegt, immer eine Unsicherheit, die zur Überschätzung des tatsächlichen Sedimentationsalters führt (FUCHS & LANG 2009; GEYH 2001). Darüber hinaus sind vor allem in Böden vielfältige Kontaminationen von Holzkohle, Knochen oder organischen Lagen durch jüngeres organisches Material nicht auszuschließen (GEYH 2001: 68, 70, GEYH 2005: 72ff). Die Radiokarbondatierung von Holzkohlen ist eine akzeptierte Methode und nicht zuletzt aufgrund ihrer geringeren Kosten weit verbreitet. Bei der Interpretation der ^{14}C -Alter von Holzkohlen muss jedoch das „old-wood“-Problem beachtet werden – die Tatsache, dass, je nachdem welchen Teil des Baums die Holzkohle repräsentiert, der Kohlenstoff schon lange oder kurz vor der Verbrennung eingelagert worden sein kann (WAGNER 1998: 155f). Deshalb handelt es sich bei der Altersbestimmung auch bei präziser und genauer AMS-Bestimmung immer nur ein Maximalalter. GEYH (2001: 73, 63) weist darauf hin, dass der unkritische Vergleich von ^{14}C -Altern problematisch ist, da auch systematische Fehler zwischen den Laboren auftreten können. Ein Vergleich sollte zudem auch nur unter gleichen Materialien gemacht werden.

Um das Alter der Sedimente direkt bestimmen zu können, steht momentan u. a. die Optisch Stimulierte Lumineszenz-Methode (OSL) zur Verfügung. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die natürliche Radioaktivität bei zugänglichen Kristallen Strahlungsschäden produziert. Die Methode misst nun, wie viel Energie aufgewendet werden muss, um diese Schäden zu „reparieren“. Die Menge der Energie, die dafür nötig ist, wird dann in die Zeit umgerechnet, in der das Mineral diese Strahlung empfangen hat (LANG ET AL. 1998: 516).

Wie die Arbeiten von HÜLLE ET AL. (2009) und VÖLKEL & MAHR (2001) gezeigt haben, ist die OSL-Datierung von periglazialen Lagen schwierig. Erste Versuche mit der *multiple aliquote*-Methode (MAA) an polymineralischen Feinkörnern (Schluff) haben unpräzise und ungenaue Alter mit großen Schwankungsbereichen produziert (VÖLKEL & MAHR 2001). Die Ursache sehen die Autoren in einer unzureichenden Bleichung während des Transports in der Solifluktsdecke. Dieses Problem trat bei der Studie von HÜLLE ET AL. (2009) nicht auf. Sie wendeten verschiedene Methoden (SAR-IRSL, double SAR, MAA, MAR) an polymineralischen Feinkörnern, groben Kalifeldspäten und groben Quarzkörnern an. Bei diesem

methodischen Vergleich lieferten die *single aliquote*-Methoden (SAA) die kleinsten Fehler und die Altersbestimmung an Quarzkörnern war präziser (HÜLLE ET AL. 2009: 72, 76). Das größte Problem sehen die Autoren jedoch in der Bestimmung der richtigen Dosisrate, die momentan nur geschätzt werden kann. Sie raten deshalb, OSL-Alter immer mit unabhängigen Kontrollaltern zur vergleichen. Dies empfiehlt sich schon allein deshalb, weil postsedimentäre Durchmischung aufgrund von Bioturbation oder holozäner Bodenerosion nicht ausgeschlossen werden kann.

Im Gegensatz zu den Studien an Hauptlagen bewerten jedoch FUCHS & LANG (2009) und LANG & MAUZ (2006) das Potential von OSL zur Datierung von Kolluvien positiver. Während an Kolluvien schon mit der *multiple aliquote*-Methode gute Ergebnisse erzielt wurden (LANG 1994), hat sich in der Zwischenzeit das SAR-Protokoll und die Bestimmung an Quarzen durchgesetzt (FUCHS & LANG 2009: 24). ROMMENS ET AL. (2007) haben gezeigt, dass OSL aber nur dann erfolgreich eingesetzt werden kann, wenn es sich um ausreichend gebleichte Sedimente, also um Korrelate häufiger Ereignisse geringer Magnitude handelt. Bei seltenen Erosionsereignissen mit hoher Magnitude würden auch tiefer liegende Sedimente mobilisiert werden, die nicht gebleicht sind und damit das Alter verfälschen (ROMMENS ET AL. 2007).

Für die Datierung von Runsenfüllungen scheint die SAR-Methode in Kombination mit dem *Minimum Age Model* nach GALBRAITH ET AL. (1999) am besten geeignet zu sein. Die mit dieser Methode in der Untersuchung von LANG & MAUZ (2006: 2672) erzeugten Alter grober Quarzkörner werden von den Autoren als realistisch eingeschätzt. Aber auch LANG & MAUZ (2006) weisen auf das Problem der ungenügend gebleichten Sedimente hin (weil im Aggregat transportiert oder aus dem Unterboden stammend). Bei den an Kolluvien durchgeführten OSL-Datierungen handelt es sich bisher immer um Studien, die in stark landwirtschaftliche genutzten (Löss-)Gebieten durchgeführt worden sind (FUCHS ET AL. 2004; FUCHS & LANG 2009; KADEREIT ET AL. 2002; KADEREIT ET AL. 2006; LANG 1994; LANG & HÖNSCHEIDT 1999; LANG & MAUZ 2006; ROMMENS ET AL. 2007).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden OSL-Datierungen an Quarzkörnern und ¹⁴C-Radiokarbon-datierungen an Holzkohlen aus verschiedenen Horizonten durchgeführt. Die Lumineszenz-datierungen an den Sedimenten des Mückentalgrabens und des Tiergartenprofils sind an Quarz-Grobkörnern (*multiple aliquote*) mit der SAR-Methode nach MURRAY & WINTLE (2000) von Alexander Füllung (HU Berlin) 2009 durchgeführt worden (s. Tab. 19). Die der Altersbestimmung zugrunde liegende Berechnung der Dosisrate basiert auf den Umrechnungsfaktoren von ADAMIEC & AITKEN (1998). Die Voruntersuchungen zeigen, dass alle

Proben gute Datierungseigenschaften aufweisen und genügend gebleicht sind, um ein Alter abzuleiten, obwohl auch ungebleichte Körner vorhanden sind. Deren Anteil ist besonders bei den Proben TGD103, TGD 170, MÜG115, MÜG 140 auffällig. Aber nur bei den Proben TGD26 und TGD148 ist die Anzahl der ungebleichten Körner so stark, dass es zu einer ausgeprägten Mehrgipfligkeit der Wahrscheinlichkeitsdichtekurven kommt. In diesen beiden Fällen wurde der erste Peak zur Altersbestimmung genutzt (Anhang 10).

Der mittlere relative Fehler aller OSL-Alter liegt bei 9,9 % mit einer Schwankungsbreite zwischen 6,85 % (TGD 26) bis 13,3 % (MÜG115). Damit ist der mittlere relative Fehler geringer als in der Studie von HÜLLE ET AL. (2009: 11 %). Da es sich beim Mückentalgrabenprofil mit MÜG 115 und MÜG 140 um den Übergang von der Hauptlage (V Bv-Horizont) zur Basislage (VI Cv-Horizont) handelt, der in der Geländeansprache eindeutig ist, ist diese größere Unsicherheit der Altersangaben hier stratigraphisch kein Problem.

Tab. 19: Liste der OSL datierten Bodenproben und der ermittelten Altersangaben (Daten des OSL-Datierungslabors der HU Berlin: yr – Jahre).

Proben- bezeichnung	beprobter Horizont	Alter vor heute (2009)	Alter AD/BC (yr)	Fehler (yr)
TGD 26	III M	365	1644 AD	± 25
TGD 49	IV M	830	1179 AD	± 80
TGD 103	V Bv	7210	5201 BC	± 870
TGD 148	VI Bv	11195	9186 BC	± 1120
TGD 170	VIII Cv	12245	10236 BC	± 990
MÜG 16	II M	8330	6321 BC	± 685
MÜG 46	III Bv	10270	8261 BC	± 795
MÜG 80	IV Bv	11790	9781 BC	± 1400
MÜG 115	V Bv	13300	11291 BC	± 1765
MÜG 140	VI Cv	21490	19481 BC	± 2460

Allerdings kann das hohe MÜG 115 Alter im Vergleich zu MÜG 46 und 80 angezweifelt werden. Wie in Abbildung 43 zu sehen ist, nimmt die Durchwurzlung im VI Cv-Horizont stark zu, eine bioturbate Vermischung ist also wahrscheinlich. Wie die Laborergebnisse gezeigt haben, hat darüber hinaus auch in diesen Horizonten eine Verlagerung von Ton-

Humus-Komplexen stattgefunden, die eventuell zu einer Anreicherung älteren Materials geführt hat.

Aus allen Horizonten wurden bei der OSL-Beprobung auch Holzkohlestücke entnommen und zur AMS-Datierung an das AMS-¹⁴C-Labor Erlangen geschickt (Tab. 20). Die Radiokarbonmessergebnisse wurden mit dem Kalibrierungsdatensatz von REIMER (2004) kalibriert. Die Detailangaben zur Probenentnahme sowie die Kalibrierungsergebnisse sind in Anhang 11 und 12 zusammengestellt.

Tab. 20: Liste der ¹⁴C-datierten Holzkohleproben und der ermittelten Altersangaben des AMS-¹⁴C-Labors Erlangen. Die mit * gekennzeichneten Proben stammen aus Holzkohlenestern (TL - in der Tiefenlinie vor der Profilwand). Die Kalibrierungsergebnisse befinden sich in Anhang 12.

Profilkennung	beprobter Horizont	BP	BP Fehler	Laborcode
MÜG 15 cm	II M	10059	61	Erl-12852
MÜG 96 cm	IV Bv	11826	70	Erl-12853
MÜG 148 cm	VI Cv	11796	71	Erl-12854
MÜG 190 cm*	TL	157	47	Erl-12855
TDG 7 cm	II M	199	47	Erl-12856
TDG 70 cm*	IV M	122	48	Erl-12857
TDG 73 cm	IV M	1331	48	Erl-12858
TDG 140 cm	VI Bv	9963	56	Erl-12859

4.5.3 Diskussion der zeitlichen Differenzierung der Sedimentationsphasen

Die OSL-Datierungen von Quarzkörnern und AMS-¹⁴C-Datierungen von Holzkohlestücken ermöglichen in den beiden beprobten Profilen eine interpretierbare zeitliche Differenzierung der Sedimentkörper. Im Vergleich der OSL- mit den ¹⁴C-Altern ist festzustellen, dass in beiden Fällen die Altersangaben mit der Tiefe zunehmen (Ausnahme: unterste Holzkohleprobe im Mückentalgraben) und dass sie damit stratigraphisch stringent sind. Die Übereinstimmung zwischen den beiden Datierungsmethoden ist jedoch nicht so deutlich. Im Mückentalgraben sind alle datierten Holzkohlen mehr als 2000 Jahre älter als die OSL-Alter.

Als Ursache wird von einer Umlagerung alter Holzkohle im Zuge der Erosion am Hang ausgegangen. In allen drei Fällen handelt es sich um Holzkohlestücke frühholozänen Alters, so dass man annehmen kann, dass es im Pfälzerwald eine natürliche Waldbrandgeschichte gab, wie sie für die Schweiz (TINNER ET AL. 2005) und Großbritannien belegbar ist (INNES & SIMMONS 2000; MOORE 2000).

Mückentalgrabenprofil

Der oberste Horizont des Mückentalgrabens wurde nicht datiert (Abb. 43), ist aber von gleicher chemischer Zusammensetzung und Korngröße wie ein Fragment, das am Boden des *gully* freigelegt wurde, aus welchem eine Holzkohle stammt, die auf 1664 - 1950 cal. AD datiert wurde. Dieses stark verfestigte Fragment hat abgerundete Kanten und lag vor einem querstehenden Stein in der Tiefenlinie des *gully*. Es ist offensichtlich während der Einschneidung aus einer Köhlerplatte herausgelöst, durch den *gully* bis auf die Höhe des Profils transportiert, und vor der Profilwand abgelagert worden. Damit gibt es einen Hinweis auf die Nutzungsgeschichte des Waldes am Mückenberg und zeigt, dass im 17. Jahrhundert eine intensivere Nutzung, z. B. durch Köhlerei, auch in diesem Gebiet stattfand. Betrachtet man die historischen Kartenwerke, so sind jedoch keine großflächigen Entwaldungen seit 1797 dokumentiert. Daher nehme ich an, dass in dem steilen Gelände die Holzentnahme nur selektiv erfolgte, wodurch aber keine geschlossene Bodenbedeckung mehr gegeben war, so dass Erosion stattfand, wie das geringmächtige Kolluvium belegt. Ist das Kolluvium in der Profilwand nur 10 cm mächtig, weist das Profil Wildschweinwühlung in der Aue (oberste Wiese in Abb. 42) talabwärts schon 94 cm Kolluvium auf und das Profil Mückentalau beim Weiher (talabwärtige Wiese in Abb. 42) immerhin noch 63 cm, obwohl beide Profile durch das Erosionsereignis von 2006 überprägt worden sind. Das bedeutet, dass im Tal des *gully* die Erosion und der Durchtransport die Sedimentation überwogen haben.

Der M₂-Horizont, der durch eine Verzahnung des Bhv- mit dem Bv-Material gekennzeichnet ist, wurde mittels OSL auf ein Alter von 6321 BC ± 685 Jahre datiert. Die in diesen Horizont eingelagerte Holzkohle weist ein Alter von 9878 - 9374 cal. BC (mit 91 % Wahrscheinlichkeit) auf. Die während dieser Zeit stattfindende Verlagerung und Einarbeitung des Bhv- in das Bv-Material hat demnach auch zur Einlagerung von älteren Holzkohlebruchstücken geführt. Dass es sich hierbei um eine Erosionsphase handelt, die mit der neolithischen Besiedlung des Gebiets einherging, ist unwahrscheinlich. Zum einen lassen sich weiträumige Entwaldungen in den Pollendiagrammen nicht nachvollziehen, zum anderen ist das Alter für eine neolithische Besiedlung zu hoch. SPERBER (2001) geht davon aus, dass von den bandkeramik-

zeitlichen Siedlern zwischen 5400 und 5000 v. Chr. nur die lössbedeckten Gunsträume in der Pfalz besiedelt wurden. Hinzu kommt, dass das Alter des M₂-Horizonts in den Bereich der als Heinrich-Event bezeichneten Abkühlungsphase (8200 cal. BP) fällt, die mit einer deutlichen Abnahme von Hasel, Erle und Ulmenpollen in Südschweden und dem Baltikum einherging (SEPPÄ ET AL. 2007; VON GRAFENSTEIN ET AL. 1998). BUDJA (2007) beschreibt, dass die Abkühlungsphase mit einer geringen Jahresringbreite bei Eichen im Maintal aufgrund der kälteren und trockenen Bedingungen korrelierte. Allerdings geht BUDJA (2007: 193) davon aus, dass es nicht zu einer Auflichtung der Wälder gekommen ist und dass die neolithischen Kulturen erst nach der Abkühlung im Donaauraum ansässig wurden. Sowohl für das Einzugsgebiet der Moldau als auch für das Panonische Becken geht BUDJA (2007: 197) von höheren Abflüssen und häufigeren Überschwemmungen aus. Die im Profil gefundenen Sedimente scheinen demnach eher durch eine klimatisch bedingte Wassererosion mobilisiert worden zu sein, als durch die erste landwirtschaftliche Nutzung des Gebiets.

Der III Bv-Horizont unterscheidet sich vom Liegenden durch die fehlende Graufärbung, den höheren pH-Wert und einen höheren Anteil an Sandsteingrus, der im IV Bv-Horizont nur noch vereinzelt auftritt. Die dritte Schicht wurde mittels OSL auf ein Alter von 8261 BC ± 795 Jahre datiert. Die Vierte ist als jungtundrenzeitliche Hauptlage anzusprechen, in die eine mit 11873 - 11526 cal. BC (2σ) deutlich älter datierte Holzkohle eingearbeitet ist. Ein auffälliges Merkmal der vierten Schicht ist die Graufärbung, obwohl die Gehalte an organischer Substanz nur gering voneinander abweichen. Sie überlagert eine stärker verdichtete, hellbraune Hauptlage (V Bv), die grusfrei aber schwach steinig und stellenweise mit einem Steinband gegen die liegende Basislage abgegrenzt ist. Diese unterste Hauptlage ist dem OSL-Alter (11291 BC ± 1765 Jahre) nach im Alleröd-Interstadial abgelagert worden.

Damit sind im Mückentalgraben zwei Sedimentschichten aufgeschlossen, die mittels OSL auf 10,27 ka und 8,33 ka datiert wurden und damit in die Liste der frühholozänen Hangumlagerungen (10,3/9,5/8,2 ka) von DREIBRODT ET AL. (2010) fallen. Die von DREIBRODT ET AL. (2010) zusammengetragenen Studien aus Norddeutschland, Hessen und Süddeutschland stammen sowohl aus Kolluvien, als auch aus den Seesedimenten des Holzmaars. Die Frage, ob mesolithische Landnutzung damals schon als Auslöser fungierte, konnte in keiner dieser Arbeiten eindeutig beantwortet werden. Bezieht man das Wissen, das aus der Datierung des Mückentalgrabenprofils gewonnen wurde, in die Interpretation der Sedimentbilanz II für den Mückentalgraben mit ein, wird klar, wie der hohe Wert der Berechnungsgrundlage zustande kommt: In den unterhalb des mittleren Forstwegs deutlich morphologisch ausgeprägten Tiefenlinien wurden zumindest Teile der frühholozän umgelagerten Hauptlagensedimente

wieder abgelagert. Dies führt in der heutigen bodenkundlichen Ansprache zu Hauptlagenmächtigkeiten zwischen 70 und 135 cm (Abb. 50).

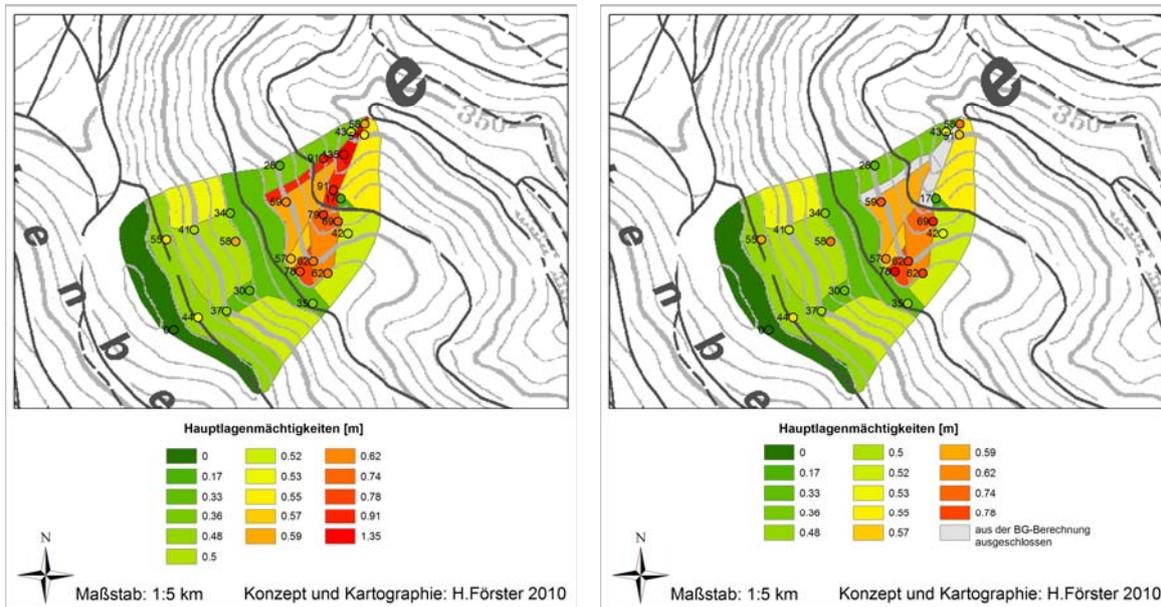


Abb. 50: Mächtigkeiten der Hauptlagen in den Profilen und die dazugehörigen Flächenmittelwerte im Mückentalgraben, links: undifferenziert, rechts: ohne Profile und Flächen in den Tiefenlinien.

Werden alle im Mückentalgraben kartierten Profile zur Ermittlung der Berechnungsgrundlage verwendet, so ergibt sich eine initiale Mächtigkeit der Hauptlagen von 91 cm (vgl. Anhang 8) und ein CSDR von 72 %. Mit dem Wissen, dass es sich bei den Verfüllungen der Tiefenlinien jedoch teilweise um frühholozäne Umlagerungsprodukte handelt, ist klar, dass hier zwei verschiedene Stichproben miteinander vermischt sind. Schließt man diese Werte aus der Stichprobe aus und erstellt auf der Basis dieses kleineren Datensatzes die Berechnungsgrundlage, so erhält man an den Hängen eine initiale Hauptlagenmächtigkeit von 69 cm. Die Sedimentbilanzterme, die aus dieser Annahme resultieren, sind in Tabelle 21 aufgeführt und schwanken, wie schon aufgrund der Sensitivitätsanalysen zu erwarten ist, deutlich.

Mit einer Berechnungsgrundlage von 69 cm halten sich Austrag und Zwischenspeicherung die Waage (CSDR = 50 %). Wendet man dagegen auf die Fläche des Mückentalgrabens den speyerbachweiten Wert von $h_{BG} = 78$ cm an, so liegt der SDR zwischen den beiden Werten (vgl. Tab. 21).

Tab. 21: Ergebnisse der holozänen Sedimentbilanz II für den Mückentalgraben mit $h_{BG}=91$ bzw. 69 cm als lokale Berechnungsgrundlagen und mit $h_{BG}=78$ cm als speyerbachweitem Wert (mit $\rho_{LH}=1,28$ g cm⁻³ und $\rho_k=1,33$ g cm⁻³).

	Volumen (m ³)	Volumen (m ³)	Volumen (m ³)
h_{BG}	91 cm	69 cm	78 cm
Erosion	56 245	31 586	41 555
Sedimentation	15 657	15 657	15 657
Austrag	40 588	15 929	25 898
CSDR (%)	72,16	50,43	62,32

Aufgrund der OSL-Datierungen und der Rekonstruktion der Landnutzungsgeschichte ist es demnach möglich, eine Korrektur der initialen Mächtigkeit der Hauptlagen im Mückentalgraben vorzunehmen. Mit einem SDR von 50,43 % grenzt sich das Kleinstezugsgebiet des Mückentalgrabens deutlich von dem des Tiergartentälchens ab. Der hohe Erosionsterm ist der Steilheit der Nordost exponierten Hänge geschuldet. Dem mittleren holozänen Abtrag von rund 27 cm m⁻² steht eine mittlere Sedimentdecke von rund 13 cm m⁻² gegenüber (Abb. 51). Dabei sind die Sedimente auf Verflachungen und in den Tiefenlinien mächtiger als auf den Hängen. Die Geländebeobachtungen während der Aufnahme des Profils zeigen, dass der mittlere und untere Forstweg zur Konzentration des Abflusses beigetragen hat. Der so erhöhte Abfluss wurde dann über die Tiefenlinie dem Mückental zugeführt. Dabei hat er Sedimente erodiert und in das Mückental ausgetragen, wo dieses vermutlich in der breiten Aue bald sedimentierte. Teile dieser Zwischenspeicherung sind noch in der hintersten Wiese des Mückentals (rund 300 m talabwärts des Mückentalgrabenprofils) erhalten geblieben. In dem hier erbohrten Profil sind die Kolluvien 2008, d. h. nach dem Einreißen des Grabens und dem Wegreißen der Forststraße 2006, noch 41 cm mächtig.

Die Datierungsergebnisse am Mückentalprofil zeigen aber auch, dass es sich bei sehr mächtigen Hauptlagen um frühholozäne Umlagerungsprodukte handeln kann. Schließt man solche Werte aus der Ermittlung der Berechnungsgrundlage aus, so spiegelt die daraus kalkulierte Sedimentbilanz nur die Periode der Bewirtschaftung des Pfälzerwaldes (rund 7500 Jahre incl. Neolithikum) bzw. 1100 Jahre belegbare Besiedlungsgeschichte wider. Die berechnete Sedimentbilanz ist demnach streng genommen keine holozäne Bilanz, da keine Quantifizierung der frühholozän umgelagerten Sedimente durchgeführt wurde.

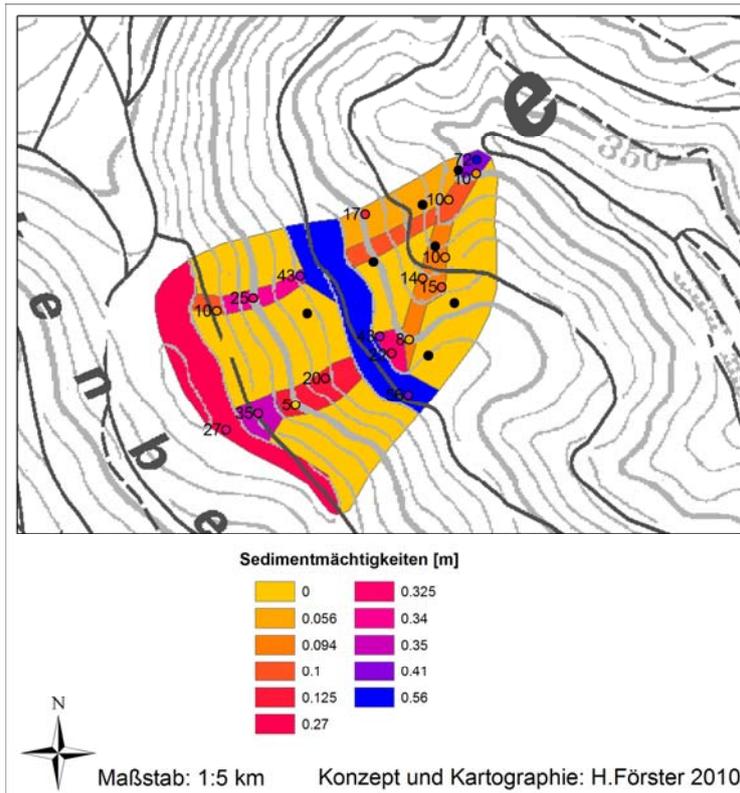


Abb. 51: Sedimentkarte mit Profilangaben erbohrter Mächtigkeiten holozäner Sedimente im Mückentalgraben.

Tiergartenprofil

Aus der Ortschronik von Hochspeyer ist zu entnehmen, dass Fischbach 1707 der Grafschaft Wartenberg angegliedert und Jagdgebiet des Grafen wurde, wodurch sich die Anzahl der Bewohner rasch steigerte. Neben den anfangs vier Erbbeständen auf dem Harzthalerhof, dem Altenhof, dem Frechtenthalerhof und dem Klaftherthalerhof haben sich 1790 14 weitere Erbbestände entwickelt, die eigenes Acker- und Weideland bewirtschafteten (LUDT 1959: 220f). Eine verstärkte Abholzung und Holznutzung lässt sich auch aus der Trift auf dem Hochspeyerbach (seit dem Bau des Franzosenwoogs 1816), der im Harzofen im Frohntal gegen Ende des 18. Jahrhunderts betriebenen Harzbrennerei (SEEBACH 1994) und dem Holzbedarf (35 000 rm/a) der seit 1880 in Hochspeyer betriebenen chemischen Fabrik herleiten.

Im Tiergartenprofil wurde aus den obersten, schluffreicheren Kolluvien nur eine Holzkohle entnommen. Sie wurde auf 1640-1950 cal. AD (2σ) datiert und ist damit jünger als das OSL-Alter des M₃-Horizonts im Liegenden. Die Auswertung historischer Kartenwerke (s. Abb. 38) zeigt, dass der Höhenrücken 1797 bis zum Erdbeerkopf bewaldet war und östlich davon die Hochspeyerbachaue als Weide genutzt wurde. Das gesamte Areal wird aber schon 1801 bis 1828 komplett ackerwirtschaftlich genutzt. Diese Nutzung setzt sich im südöstlichsten Teil des Einzugsgebiets des Tälchens bis heute fort. Damit ist es aufgrund der Holzkohledatierung, der Kartenauswertung und des höheren Schluffgehalts des M₁- und M₂-Horizonts wahrschein-

lich, dass es sich bei den beiden obersten Kolluvien im Tiergartenprofil um neuzeitliche Kolluvien handelt.

Das OSL-Alter des M₃-Horizonts (1644 AD ± 25 Jahre) fällt mit dem Dreißigjährigen Krieg von 1618 bis 1648 zusammen. In der Pollenzone 6 (14. bis 18. Jahrhundert) des Speßtalmoors, die an der Untergrenze auf 1443 bis 1631 datiert wurde, fehlen Holzkohlefunde ganz. Buchen-, Kiefer- und Pappel-Pollenanteile steigen in dieser Zone (WOLTERS 2007: 148f). Die aus den bewaldeten Hochlagen des Mittleren Pfälzerwaldes stammenden Pollenprofile und die daraus abgeleitete Formungsruhe nach Wiederbewaldung stehen damit im Widerspruch zu der Kolluvienbildung bei Hochspeyer. Allerdings ist der Ortschronik von Hochspeyer zu entnehmen, dass 1570 mit der Rodung von einem Morgen Leinbachwiese begonnen und die Fläche 1608, 1617 und 1719 auf vier bis fünf Morgen erweitert wurde. 1676 wurde auf dem Münchhof in Hochspeyer eine Ziegelbrennerei eröffnet, die mindestens bis 1751 bestand. Die Größe des Dorfs Hochspeyer wuchs von zwanzig Familien 1500 auf vierzig Familien 1606. Bis 1619 soll laut Chronik nichts vom Kriegsgeschehen des Dreißigjährigen Krieges zu bemerken gewesen sein, danach war Hochspeyer aber von Truppendurchzügen mit Plünderungen betroffen. „*In den Schreckensstunden des Durchmarschs bot der an das Dorf stoßende Wald für die entsetzte Bevölkerung willkommenen Schutz*“ (LUDT 1959: 101). Das Dorf wurde vermutlich 1635 (einem Pestjahr in der Grafschaft Leiningen) zerstört; bis 1659 lebten keine Menschen mehr darin, einige von ihnen waren in den Wald geflüchtet. Die Pflege der Äcker konnte wohl in dieser Zeit nicht gewährleistet werden. Man kann auch annehmen, dass die in den Wald Geflüchteten versuchten, Getreide o. ä. anzubauen, so dass zumindest vereinzelt eine verstärkte Nutzung des dorfnahen Waldes angenommen werden darf. Eventuell haben auch verstärkt Brände die Vegetation dezimiert; großräumige Abholzungen oder Waldbrände sind jedoch nicht belegt. Im Gegenteil, die ersten Neusiedler Frankensteins waren 1659 Harzbrenner, denen die Ausübung ihres Berufes erlaubt wurde. Laut einem Bericht des Amtstages in Hochspeyer von 1671 bekamen die Bewohner die Auflage, ihren Besitz „*zu putzen, d. h. von Gestrüpp zu reinigen*“ (LUDT 1959: 107). Demnach hat es auch hier Verbuschung und Wiederbewaldung früheren Acker- und Wiesenlandes gegeben.

Der M₄-Horizont wurde mittels OSL auf 1179 AD ± 80 Jahre datiert. Diese Sedimentationsphase mag damit das Resultat der Besiedlung des Hochspeyerbachgebiets sein, wie auch in der Chronik berichtet wird. Der im Süden von Hochspeyer gelegene Münchhof wird wohl seit 1185, auf jeden Fall aber seit 1270 als Ableger des Kloster Otterbergs mit eigener Flur bewirtschaftet. Der Altenhof im Nordosten des Profils soll damals als Wirtschaftshof schon

bestanden haben. Fischbach wird als Siedlung 1221 erstmals erwähnt (LUDT 1959: 25ff, 218). Aber auch von Hof und Burg Breidenborn (nordwestlich des Harzkopfs, nördlich der A6), den Höfen Milchborn und Buchholz (Gemeinde Enkenbach, nördlich der A6) nimmt man an, dass sie im 11. Jahrhundert bestanden haben. Zu den Höfen gehörten üblicherweise mehrere hundert Morgen Ackerland und Wiesen (LUDT 1959: 26f). Die aus dem Sediment stammende Holzkohle ist wesentlich älter (613-778 cal. AD) und somit offenbar umgelagert worden. Sie ist in die Zeit der Merowingischen Königsgüter einzuordnen. WEBER (1978) geht davon aus, dass die Wüstung Mühlenborn bei Hochspeyer auf die Existenz einer Mühle während des fränkischen Landesausbaus hindeutet. Er nimmt auch an, dass der Königshof bei Alsenborn eine Mühle hatte – eine Nutzung der Lösslehmböden für Ackerbau bzw. der Wälder zur Holzkohleherstellung ist also möglich.

Der humusfreie V Bv-Horizont wird dagegen durch das OSL-Alter von $5201 \text{ BC} \pm 870$ Jahre ins Neolithikum gestellt. Während SPERBER (2001: 2) die Wende von der Mittel- zur Jungsteinzeit um 5500 v. Chr. ansiedelt, setzt MOERSCH (1987: 15) sie erst um 4600 v. Chr. an. Zeugen mittelsteinzeitlicher Besiedlung des Pfälzerwaldes (Jägerlager und Wohnplätze) wurden bei Limburgerhof, Waldfischbach und auf der Kleinen Kalmit gefunden worden (MOERSCH 1987: 15f). SPERBER (2001) sieht darin jedoch noch keinen Hinweis auf Bevölkerungszunahme in der Pfalz. Er sieht in der Besiedlung durch die Bandkeramiker zwischen 5400 und 5000 v. Chr. die entscheidende Veränderung der Landschaft, vor allem in natürlichen Gunsträumen. Die Ausbreitung in für die Landwirtschaft weniger geeignete Gebiete schreibt SPERBER (2001: 6) jedoch erst den Nachfolgekulturen (5000-4500 v. Chr.) zu. Es ist demnach fraglich, ob es sich bei dem V Bv-Horizont um verlagertes Material handelt. Auffällig ist der geringe Humusgehalt. Die Textur der Schicht unterscheidet sich von der hangenden Schicht durch einen höheren Mittel- und Feinsandgehalt bei geringeren Schluff- und Tonanteilen. Zum Liegenden hin weist diese Schicht einen höheren Grobsandanteil, einen deutlich höheren Tongehalt und eine stärkere Durchwurzelung, aber keinen Unterschied im Skelettgehalt auf. Da das Tiergartentälchen am Rand der lösslehmbedeckten Kaiserslauterner Senke und in der unmittelbaren Nähe alter Wegesysteme gelegen ist, könnte man eine ackerbauliche Nutzung des Gebiets annehmen. Da die Bandkeramiker nachweislich vorrangig die Lösslehmgebiete beackert haben, hätte ein neolithisches Sediment in diesem Tälchen, das an seinem Kopf sowie dem Nordwesthang mit Lösslehm bedeckt ist, eher schluffig-tonig sein müssen. Da unabhängig davon das Sediment nicht humos ist, hätte eine komplette Erosion des Ah bzw. Ap-Horizonts erfolgen, das Material durch diese Sedimentfalle durchtransportiert werden, darüber hinaus Bv-Material erodiert und im Tälchen sedimentiert werden

müssen. Ein solcher Eingriff in die Landschaft steht im starken Kontrast zu den Pollendiagrammen des Mittleren Pfälzerwaldes, die keine Hinweise auf eine Änderung der Waldstruktur erkennen lassen (Kap. 3.2). Auch Holzkohlefunde fehlen in dieser Schicht ganz. Daher wird diese Schicht nicht als Kolluvium sondern als Hauptlage bezeichnet und es stellt sich die Frage, ob es sich hierbei um eine klimatisch bedingte Umlagerung ähnlich der frühholozänen Umlagerungen handelt.

Der liegende VI Bv-Horizont ist durch eine höhere Lagerungsdichte und eine geringe Durchwurzelung gekennzeichnet. Bei der Geländeansprache erscheint der Horizont olivgrünstichig. In die mit OSL auf ein Alter von 9186 ± 1120 BC datierte Hauptlage ist eine ältere Holzkohle (9676 - 9294 cal. BC, 2σ) eingearbeitet worden. Der Übergangshorizont VII Bv-Cv weist durch die Einarbeitung von Bv-Material aus der Hauptlage noch immer höhere Werte von Augit, Braune Hornblende und Titanit auf als der Liegende VIII Cv, zeigt aber auch schon die deutliche Dominanz der für Basislagen typischen Schwerminerale Zirkon und Turmalin.

Zusammenfassend wurden im Tiergartenprofil 20 bis 25 cm neuzeitliches Kolluvium kartiert, das sich aufgrund der höheren Schluffgehalte deutlich von den mittelalterlichen Kolluvien absetzt. Die Bodenart ist als schwach lehmiger mittelsandiger Sand (S12) anzusprechen. Reine schluffige Substrate (Uu) oder sandige Schluffe wurden an dieser Stelle nicht abgelagert. Zusätzlich zu dem Tiergartenaufschluss in der Verflachung am Beginn des Trockentals wurde in dessen Auslass auf einer relativ frischen Kahlschlagsfläche eine Rammkernsondenbohrung durchgeführt. Die in der Karte (Abb. 38) verzeichnete Grenze ist im Gelände durch eine 30 cm tiefe Wald-Acker-Stufe manifestiert.

Aus der Bohrung wurden keine Proben zur Datierung entnommen, aber es ist auffällig, dass an diesem Standort nur 46 cm Kolluvien abgelagert wurde. Im Liegenden sind 26 cm sehr schwach humoses und holzkohlehaltiges Hauptlagenmaterial kartiert worden. Die Kolluvien sind im Gegensatz zum Tiergartenprofil schluffig (Uu).

Dagegen sind alle im Einzugsgebiet des Trockentals auf den Hängen kartierten Kolluvien mittelsandig, maximal schwach bis mittel schluffig und mittel humos. In der Tiefenlinie sind an allen Bohrstandorten rein schluffige (Uu) und sandig schluffige (Us) Kolluvien über mittel bis stark schluffigen (Su3-4) Kolluvien erbohrt worden. Dies zeigt, dass es mindestens seit der neuzeitlichen ackerbaulichen Bewirtschaftung des Raums (vgl. Abb. 38) vor allem zum Abtrag des Lösslehms im südwestlichen und südlichen Teil des Tiergarten-Einzugsgebiets gekommen ist. Der erodierte Schluff ist teilweise im Trockental abgelagert worden. Die

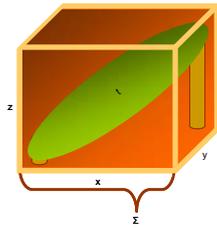
moderne landwirtschaftliche Nutzung des Ackers östlich des Erdbeerkopfs hat danach zur Erosion der Auensedimente um rund 30 cm geführt.

4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Sedimentbilanz II des Speyerbachs und seiner Teileinzugsgebiete dem generellen negativen Trend der Abnahme des SDR mit zunehmender Einzugsgebietsgröße folgen. Die SDRs für das Gesamteinzugsgebiet sind am ehesten mit den Ergebnissen für das Dijle-, das Geul- und das Rhume-Einzugsgebiet vergleichbar und rangieren zwischen deren Extremwerten. Die absoluten Volumina des Speyerbachs in der Sedimentbilanz II unterscheiden sich von der Sedimentbilanz Ib nur geringfügig, stärker jedoch von der Sedimentbilanz Ia.

Die Sensitivitätsanalyse der Sedimentbilanz II zeigt ein ähnliches Muster wie bei der Sedimentbilanz I. Am sensibelsten reagieren die Bilanzterme auf Veränderungen der Berechnungsgrundlage und Mächtigkeiten, vor allem auf die Anwendung der statistischen Minima und Maxima. Es wird damit deutlich, dass es sich bei der Sedimentbilanzierung im Speyerbach-Einzugsgebiet um eine bestmögliche Schätzung des wahren Wertes handelt. Demnach wäre die Sedimentbilanz Ia, die aus Daten der bodenkundlichen Landesaufnahme berechnet wurde, die Minimumschätzung der holozänen Erosion und Sedimentation des Speyerbachs, wogegen die Sedimentbilanz Ib und II eher die Obergrenze der tatsächlichen Erosion abbilden.

Im Bereich des Tiergartentälchens bei Hochspeyer sind Sedimentationsphasen seit dem Hochmittelalter sicher belegbar, eventuell haben auch im Neolithikum und während des fränkischen Landesausbaus Erosion und Sedimentation stattgefunden. Auf der bestehenden Datengrundlage im Tiergartentälchen ist ein Nachweis jedoch nicht zu führen. Im abgeschiedeneren Gebiet des Mückentales bei Elmstein ist erst seit der Neuzeit flächenhafte Erosion nachweisbar. Darüber hinaus fanden hier mindestens eine zweiphasige Hauptlagenbildung seit dem Alleröd sowie zwei frühholozäne Umlagerungsphasen statt.



5. Synopsis

Im Folgenden werden durch die Beantwortung der in Kapitel 1.2 aufgestellten Forschungsfragen die dargelegten Ergebnisse und Erkenntnisse der kapitelweisen Diskussionen in einer Synthese zusammengeführt.

Wie stellt sich die Sedimentbilanz in einem heute größtenteils bewaldeten Mittelgebirgs-einzugsgebiet dar?

Die in dieser Arbeit für den Pfälzerwald vorgestellten Sedimentbilanzen zeigen, dass auch in diesem heutzutage größtenteils bewaldeten Einzugsgebiet die Hangerosion zu einem mittleren Bodenabtrag von $9/65/36 \text{ cm m}^{-2}$ (SB Ia/Ib/II) geführt hat. Die berechneten Sedimentaustragsverhältnisse (SDR) variieren zwischen 11,2 und 31,5 %, je nach Datensatz und angenommener Initialmächtigkeit der Böden. Die Sedimentbilanz Ia, die mit Daten der bodenkundlichen Landesaufnahme erstellt wurde, weist den höchsten SDR, aber im Vergleich zur Sedimentbilanz II geringere absolute Werte der Erosion und Sedimentation auf. Je nachdem, ob die Sedimentbilanz II nur für die Hangerosion (HSDR) oder die einzugsgebietsweite Erosion (CSDR) aufgestellt wird, können 86 % (HSDR) bzw. 91 % (CSDR, alle $h_{BG} = 78 \text{ cm}$) der errechneten Sedimentaustragsverhältnisse mit der Einzugsgebietsgröße erklärt werden. Dies sind auch im Vergleich mit dem Ergebnis (85 %) von NOTEBAERT ET AL. (2009) hohe Werte. Dass der SDR-Wert für Aussagen zur Sedimentdynamik eine Black-Box darstellt, wird am Beispiel der HSDR-Werte des Mückentalgrabens und des Tiergartenälchens deutlich. Die zwei Einzugsgebiete mit denkbar unterschiedlicher Landnutzungsgeschichte und naturräumlicher Ausstattung weisen bei gleicher Berechnungsgrundlage ($h_{LH} = 78 \text{ cm}$), expertenbasierter Kartenerstellung und APU-Methodik gleiche SDR-Werte (62 und 65 %) auf. Das im stärker landwirtschaftlich genutzten Hochspeyerbach gelegene Tiergartenprofil ist jedoch durch zwei Sedimentationsphasen gekennzeichnet. Die jüngeren Sedimente sind schluffiger, was bedeutet, dass sich die Konnektivität zu den auf der Wasserscheide im Westen und Nordwesten befindlichen Lösslehmflächen geändert hat, wie die historischen Karten belegen. Das Mückentalgrabenprofil weist dagegen nur eine Sedimentationsphase auf. Der mittlere Abtrag pro m^2 beträgt in diesem Kleinstzeugsgebiet nur rund 35 cm m^{-2} . Im Tiergarten-

tälchen ist der mittlere Flächenabtrag aufgrund der abweichenden Berechnungsgrundlage für die Parabraunerden mit rund 55 cm m^{-2} fast doppelt so hoch. Der übergeordneten Tendenz der Einzugsgebietsgrößenabhängigkeit liegen demnach lokal äußerst verschiedene Landschaftsgeschichten zugrunde, die – eine breitere Datierungsbasis vorausgesetzt – auch zeitlich differenziert bilanziert werden könnten.

Welchen zeitlichen Rahmen umfassen die Hauptsedimentationsphasen?

Wie in Kapitel 1 und 3 dargelegt, sind die naturräumlichen Bedingungen im Speyerbach-Einzugsgebiet in hohem Maße mit der Landnutzungsgeschichte verflochten, wodurch in den meisten kulturgeschichtlichen Epochen die Voraussetzung zur Bodenerosion gegeben war. Die Berichte in den Ortschroniken über Starkregenereignisse mit Abtrag zeigen, dass bei solchen Ereignissen das erodierte Material bis in die Auen bzw. über den Speyerbach ausgebracht wurde. Demnach ist davon auszugehen, dass Sedimentspeicher am Hang sowie in den Auen geringer Strahler-Ordnung durch Erosionsdiskordanzen überprägt sind. Die anhand der zwei beprobten Standorte vorgestellte Chronostratigraphie kann also bis zur Verfügbarkeit weiterer Datierungsergebnisse nur als relativ angesehen werden.

Als durch die Siedlungsgeschichte und die zwei datierten Aufschlüsse abgesicherte Hauptsedimentationsphase lässt sich für das gesamte Speyerbach-Einzugsgebiet nur die Neuzeit identifizieren. In dem von Siedlungen und Haupttransportstrecken abgelegenen Mückental konnten im untersuchten Profil frühholozäne Umlagerungen von Hauptlagenmaterial mittels OSL-Datierung identifiziert werden, die wesentlich mächtiger als die neuzeitlichen Kolluvien sind. DREIBRODT ET AL. (2010) stellen eine Liste von Phänomenen in Deutschland vor, die ihrem Erachten nach ebenfalls Beispiele für solche Umlagerungen aufzeigen. Ursachen und Funktionsweisen dieser Mobilisierung sind jedoch noch nicht geklärt.

Im Tiergartenprofil sind keine frühholozänen Sedimente erhalten. Allerdings ist die Genese des auf $5201 \text{ BC} \pm 870$ datierten Sediments noch offen. Eine bandkeramische Besiedlung ist im Kaiserslauterner Stadtgebiet nachgewiesen, weshalb es möglich wäre, dass auch die Lösslehmflächen im Tiergarten-TEZG schon genutzt wurden. Das korrelierte Sediment erfüllt jedoch nicht die Kriterien für ein Kolluvium, sondern ähnelt sehr stark der Hauptlage im Liegenden. An diesem Standort ist eine Sedimentationsphase im Mittelalter und in der Neuzeit dokumentiert, die in guter zeitlicher Übereinstimmung mit der Besiedlung des Gebiets bzw. den Landnutzungsmustern in den historischen Karten steht. Es ist auffällig, dass sich weder die Bronzezeit, noch die Römische Kaiserzeit durch eine Sedimentationsphase in den Kleinstzeugsgebieten des Speyerbachs abbilden. Auch die mittelalterlichen Ereignisse

scheinen nicht das Ausmaß angenommen zu haben, wie es für die Elbe- und Main-Einzugsgebiete (BORK ET AL. 1998) belegt werden kann.

Die Datierungen der Sedimentkörper in den zwei Kleinsteinzugsgebieten machen auch deutlich, dass nicht von einer holozänen Sedimentbilanz gesprochen werden kann, da die frühholozänen Umlagerungen nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet erfasst wurden und somit nicht differenzierbar sind. Die Erosion bezieht sich also nicht auf 10000 Jahre, sondern auf höchstens 7500 Jahre, wenn man das Neolithikum mit einbezieht, bzw. auf 1100 Jahre, wenn man von der frühesten Besiedlung im Speyerbach-Einzugsgebiet ausgeht.

Ist eine Unterscheidung der Wirkung von klimatischen und anthropogenen Einflüssen möglich?

Die Frage nach der Dominanz eines Prozesses ist nach dem heutigen Wissensstand im Pfälzerwald nicht abschließend zu klären. Dafür liegen zu wenige Informationen über die Niederschlagsverhältnisse seit der Besiedlung des Gebietes vor. Anhand der vorhandenen meteorologischen Daten aus der Neuzeit, vor allem der Periode erhöhter Niederschlagsintensitäten und -häufigkeiten zum Ende der Kleinen Eiszeit, wird deutlich, dass die Bedingungen gegeben sind, um Bodenerosion durch Wasser zu verursachen. Dabei scheinen Starkregenereignisse infolge von sommerlichen Gewittern im Untersuchungsgebiet höhere Relevanz zu haben als gefrorener Boden oder Vorflechte.

Dass die ackerbauliche Bewirtschaftung in diesem Relief zu verstärkter Bodenerosion führt, hat das Tiergartenprofil gezeigt. Anhand der ABAG-Modellierung wurde das hohe Erosionspotential dieser Mittelgebirgslandschaft verdeutlicht. Bezieht man den mit der ABAG berechneten langfristigen mittleren Bodenabtrag nun, wie oben schon angedeutet, nicht auf das gesamte Holozän, sondern nur auf die Periode menschlichen Wirtschaftens (Tab. 22), so wird immer weniger Gesamterosion durch die landwirtschaftliche Nutzung der heutigen Acker- und Grünlandflächen und dem daraus resultierenden flächenhaften Abtrag erklärt. Es muss also in größerem Maße lineare Erosion und/oder flächenhaften Abtrag auch auf den Waldflächen gegeben haben. Dies kann dann nur durch intensive und großflächige Nutzung der Waldflächen durch Kahlschläge verursacht werden. Plenterwälder und Femelhieb-Bewirtschaftung fördern die Bodenerosion nicht so stark, da durch die starke Naturverjüngung und dichte Bodenflora nach dem Eingriff nur ein geringfügiger Abbau des organischen Materials bzw. nur geringfügige Veränderungen des Bodenwasserhaushalts stattfinden (BURSCHEL & HUSS 2003: 133f).

Tab. 22: Ergebnisse der ABAG-Modellierung für die potentielle mittlere flächenhafte Erosion im Speyerbach-EZG für das Holozän (10 000 Jahre), die letzten 7500 und die letzten 1100 Jahre (A – Acker-Szenario, A/G – Acker und Grünland-Szenario, m.E. – mit Erosionsschutz).

Masseinheit	10 ⁶ t	10 ⁶ t	10 ⁶ t	10 ⁶ t
Zeitspanne	1a	10000a	7500a	1100a
A Schwarzbrache	0,0820	820	615	90,2
A Schwarzbrache m.E.	0,0015	15	11,25	1,65
A Gras	0,0012	12	9	1,32
A/G Schwarzbrache	0,7210	7210	5407,5	793,1
A/G Gras	0,0034	34	25,5	3,74
A/G Schwarzbrache m.E.	0,0046	46	34,5	5,06

Wie die Zusammenstellung der Entwicklung des Wegenetzes im Speyerbach (Tab. 15) gezeigt hat, ist im 19. Jahrhundert ein deutlicher Ausbau von Forstwegen und Straßen im Speyerbach-Einzugsgebiet erfolgt. Die neuzeitlichen Erosions- und Sedimentationsereignisse wurden demnach sowohl durch die Erschließung und die damit erhöhte Abflusskonzentration sowie das Vorhandensein von präferentiellen Fließpfaden hangabwärts (*routing*) als auch durch die verstärkte Entnahme von Bäumen im Großschirm- und Kahlschlagsverfahren gefördert. Damit sind die Entwicklung der Gesellschaft und die Umgestaltung ihrer Ansprüche an die Natur während der Industrialisierung als treibende Kräfte hinter dem Landnutzungswandel anzusehen. Wie stark dabei politische, wirtschaftliche und persönliche Gründe Einfluss auf das Handeln von verantwortlichen Personen hatten, wird im Exkurs zur Holznotdebatte des 18. Jahrhunderts in Anhang 7 exemplarisch an der Eisenproduktion der Gienanth'schen Werke im Pfälzerwald dargestellt. Zieht man vor allem die Initiative von L. Gienanth zur Unterstützung des Eisenbahnbaus in der Pfalz (Anhang 13) mit in Betracht, wird deutlich, dass es sich bei dem Holzangelargument vor allem in den 1830er Jahren um ein politisches Druckmittel handelte, das dazu genutzt wurde die Anbindung an die Eisenbahn durchzusetzen. Die nur sehr langsam nachwachsende Ressource Holz, die Veränderungen in der Forstwirtschaft, die teilweise langen Transportwege der Holzkohle, die ungünstige Lage der Gienanth'schen Werke zu Versorgungsstrecken für Steinkohle und Torf, die starke Konkurrenz der ausländischen Eisenproduktion, die Zollpolitik und eventuell eine zu konser-

vative Einstellung gegenüber den technischen Neuerungen sowie fehlende unternehmerische Weitsicht (auch im Hinblick auf die Erzvorkommen) mögen einen Einfluss auf die Entscheidungen in den Gienanth'schen Werken gehabt haben.

Die Antwort auf die Frage lautet demnach: Die Landnutzung, wie sie historischen Karten als räumliches Muster zu entnehmen ist, ist Ausdruck menschlichen Handelns. Diese ganz anderen Gesetzen folgende Dynamik verändert die naturräumlichen Gegebenheiten des Reliefs und der bodenerosionssteuernden Faktoren. Die Überlagerung mit der niederschlagsintensiven Periode am Ende der Kleinen Eiszeit hat im Mittleren Pfälzerwald zu einer flächendeckenden Erosion geführt, die wesentlichen Anteil an der Gesamterosion trägt.

Ist es ausreichend, mit öffentlich verfügbaren Bodendaten eine holozäne Sedimentbilanz zu erstellen, oder bedarf es einer gesonderten Kartierung von Erosion und Sedimentation?

Es ist möglich, mit Daten aus der bodenkundlichen Landesaufnahme eine Sedimentbilanz (SB I) zu erstellen. Die vorliegende Arbeit hat jedoch gezeigt, dass das Ergebnis der Sedimentbilanz I deutlich von dem Ergebnis abweicht, das auf der Grundlage von erosionsspezifischen Daten (Sedimentbilanz II) erhoben wurde. Selbst wenn man als Berechnungsgrundlage für die Sedimentbilanz Ia 78 und 140 cm annehmen würde, wie in der Sedimentbilanz II, so würde die Erosion nur rund 79 Mio. m³ betragen. Da die Sedimentation in der Sedimentbilanz I aber auf jeden Fall unterschätzt wird, nehme ich an, dass die tatsächlichen Umlagerungen eher den Dimensionen der Sedimentbilanz II entsprechen. Die Verdopplung der Erosion und Sedimentation in der Sedimentbilanz Ib im Vergleich zur Sedimentbilanz II ist meines Erachtens ein Artefakt der verwendeten BK50.

Wie die Sensitivitätsanalysen der Sedimentbilanzen (Kap. 4.2.2 und 4.2.4) und NOTEBAERT ET AL. (2009) vorgeführt haben, weist die verwendete APU-Methodik einen gewissen Fehlerbereich auf. Die absoluten Zahlen der Sedimentbilanzen sind daher nur innerhalb des Speyerbach-Einzugsgebiets aussagekräftig. Sowohl die Studien im Dijle-Einzugsgebiet (NOTEBAERT ET AL. 2009; VERSTRAETEN ET AL. 2009) als auch die Sensitivitätsanalysen weisen darauf hin, dass die Bestimmung der initialen Bodenmächtigkeit eine kritische Variable bleibt, die die Aussagekraft der ermittelten Sedimentbilanzterme begrenzt. Aber selbst wenn man dieses Problem vernachlässigt, ist davon auszugehen, dass es sich bei der Sedimentation um eine Minimumschätzung handelt. Dies ist der Fall, wenn man annimmt, dass die jetzt kartierten Sedimente nur noch ein Residuum der ursprünglich abgelagerten Kolluvien sind, wie z. B. LANG & HÖNSCHIEDT (1999) an Lössböden des Neckarbeckens nachweisen konnten. Wie die

Datierungsergebnisse (Kap. 4.5.2) und die Zusammenstellung historischer Erosionsereignisse im Untersuchungsgebiet (Kap. 3.5.4) belegen, hat es im Speyerbach-Einzugsgebiet mehrere Erosions- und Sedimentationsphasen gegeben. Die Erosion ging dabei nicht flächendeckend, sondern lokal unterschiedlich intensiv vonstatten. Der Betrag x , der durch nachfolgende Erosion von einem schon abgelagerten Kolluvium wieder abgetragen wurde, ist mit den verwendeten Methoden nicht ermittelbar. Die dadurch entstehende Umlagerung von Kolluvien und die damit unter Umständen erneute Bleichung der Sedimentkörner und deren Einfluss auf die OSL-Datierung scheint nur im M₃-Horizont des Tiergartenprofils einen Einfluss gehabt zu haben. Konsequenterweise bedeutet dies für die Sedimentbilanz, dass die in dieser Arbeit vorgestellten Sedimentaustragsverhältnisse (SDR) Maximum-Werte darstellen, denn bei einer höheren Zwischenspeicherung der Sedimente würde der Austrag noch geringer werden.

Ein deutlicher Vorteil der eigenen Erosionskartierung war es, dass im Zuge dessen ein *nested approach* angewendet werden konnte: Durch die Bilanzierung der Tälchen 1. Ordnung, der Teileinzugsgebiete 4. Ordnung und des Speyerbachs (6. Strahler-Ordnung) war es möglich, die raum-zeitliche Heterogenität der Landschaftsveränderungen im Pfälzerwald und deren Auswirkungen auf die Sedimentbilanzen aufzuzeigen. Durch die Datierung des Tiergartenprofils konnten die Ergebnisse von VERSTRAETEN ET AL. (2009) bestätigt werden, dass die Sedimentation an den Hängen bzw. in den Einzugsgebieten 1. Ordnung direkt mit Phasen starker Landnutzung in Verbindung stehen. Da jedoch keine Datierungen aus den Auen höherer Ordnung im Speyerbach-Einzugsgebiet vorliegen, kann keine Aussage dazu getroffen werden, ob und wie der CSDR auf Landnutzungsveränderungen reagierte.

Eignen sich historische Karten, um die Änderung des räumlichen Musters des Landschaftswandels abzubilden?

Aufgrund schlechter Lesbarkeit oder zu großer Verzerrung konnten nicht alle für das Gebiet des Speyerbachs verfügbaren historischen Karten verwendet werden. Die Schmitt'sche Karte von 1797, die Preußische Generalstabkarte von 1801 bis 28, die Topographischen Karten von 1915 und die ATKIS-Daten von 2001, geben im Gegensatz zur Auswertung von schriftlichen archivalischen Quellen, eine räumlich explizite Vorstellung über die Veränderungen des Landschaftsbilds seit Beginn der Industrialisierung. Da diese Periode aber weder mit ¹⁴C-Datierungen noch mit der OSL-Methode aufzulösen ist, ist eine weitere zeitliche Differenzierung der neuzeitlichen Sedimente nicht möglich. Die wichtigste Methode zur zeitlichen Differenzierung älterer Sedimentationsphasen im Speyerbach-Einzugsgebiet ist die OSL-Datierung des Substrats. Im Gegensatz zu anderen Datierungsstudien an periglazialen

Deckschichten waren die Eigenschaften des Substrats geeignet und die Ergebnisse von hoher Qualität. Wären nur Radiokarbonalter für die zeitliche Differenzierung verfügbar gewesen, hätte sich aufgrund der Differenz von rund 2000 Jahren ein ganz anderes Bild der Kolluviation im Speyerbach-Einzugsgebiet (Frühholozän/Völkerwanderungszeit/18. Jahrhundert) ergeben, das nicht das Ablagerungsalter der Sedimente widerspiegeln würde.

Was kann man aus schriftlichen historischen Dokumenten zur Sedimentationsgeschichte des Gebiets ableiten?

Als sehr wertvoll erwiesen sich umwelthistorische Aufarbeitungen des schriftlichen Quellenmaterials. Die dabei vorgenommenen Bewertungen der Quellen eröffneten mir die Möglichkeit einer kritischen Bewertung anderer Sekundärquellen. So wurde offensichtlich, dass auch umfassenden Regionalstudien, wie jenen von FENKNER-VOIGTLÄNDER (1992) und ZINTL (2006), wissenschaftshistorische Zuschreibungen und Interpretationen eigen sind, die es bei der Verwendung für meine Arbeit zu berücksichtigen galt. Nichtsdestotrotz konnten aus der Sekundärliteratur chronologische und relative räumliche Hinweise zur Besiedlungs- und Bebauungsgeschichte sowie zu Extremereignissen entnommen werden. Literatur zur historischen Klimatologie des Pfälzerwaldes liegt nicht vor. Aus den Studien im Oberrheingraben (WITTE et al. 1995, LAUER & FRANKENBERG 1986) und den Angaben der Ortschroniken lässt sich jedoch eine Koinzidenz der Intensivierung der Landwirtschaft und der Waldnutzung, der Veränderungen der Bearbeitungstechniken sowie verstärkter Niederschlagsereignisse für das Untersuchungsgebiet ableiten.

Sind die räumlichen und zeitlichen Dimensionen mit Ergebnissen aus den Lössstief-ländern vergleichbar?

Die Sedimentaustragsverhältnisse aus dem Speyerbach-Einzugsgebiet folgen der weltweit zu beobachtenden Tendenz, dass der SDR mit zunehmender Einzugsgebietsgröße abnimmt (u. a. ROMMENS ET AL. 2005). Das bedeutet, dass 86 % der HSDR-Werte der Sedimentbilanz II durch die Einzugsgebietsgrößen erklärt werden können (vgl. Abb. 40). Sie liegen jedoch, insbesondere wenn man die CSDR-Werte betrachtet, unterhalb der für die Lössgebiete Mitteleuropas publizierten Ergebnisse (vgl. Abb. 41 und Tab. 18). Die Zwischenspeicherung von Sedimenten ist demnach im Speyerbach höher als in den Lössgebieten des Rhein-Einzugsgebiets. Betrachtet man die absoluten Zahlen und die HSDR-Werte für das Speyerbach- und das Dijle-Einzugsgebiet, so wird dies besonders deutlich (Tab. 23). Die geringere Gesamterosion ist auf die spätere Besiedlung und die, erst in der Neuzeit erfolgte, intensive Nutzung der Gesamtfläche des Speyerbach-Einzugsgebietes zurückzuführen. In der geringeren Anbin-

dung der Hangflächen an den Vorfluter z. B. durch Forstwege, scheint ein Grund für die höhere Zwischenspeicherung zu liegen.

Tab. 23: Gegenüberstellung der Erosion und Sedimentation am Hang für das Speyerbach- und das Djile-Einzugsgebiet (EZG – Einzugsgebiet, HSDR – *hillslope sediment delivery ratio*, * Daten aus NOTEBAERT ET AL. (2009)).

EZG	Fläche	Erosion (10 ⁶ t)	Sedimentation (10 ⁶ t)	HSDR (%)
Laan*	139 km ²	161	58,5	63,8
Speyerbach	311 km ²	139	126	9,8
Djile*	758 km ²	817	327	59,9

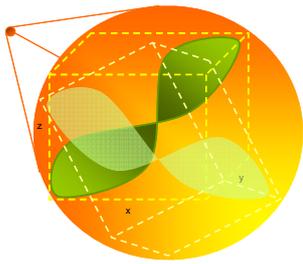
Hinweise auf die für den Oberrheingraben von THIEMEYER ET AL. (2005) und MÄCKEL ET AL. (1998) belegten Haupterosionsphasen Bronzezeit und Eisenzeit (hier vor allem die Römische Kaiserzeit) sind in den datierten Profilen im Speyerbach-Einzugsgebiet nicht gefunden worden. Für das Mittelalter konnte im Mückentalgraben ebenfalls keine Sedimentation belegt werden. Ganz auszuschließen ist das Auftreten dieser Phasen im Untersuchungsgebiet allerdings nicht, da Erosionsdiskordanzen nicht ausgeschlossen werden können und die Datierung der Kolluvien sich nur auf zwei Standorte im gesamten Einzugsgebiet beschränken.

Wie lässt sich der Pfälzerwald in Hinblick auf seine Umwelt- und Sedimentationsgeschichte in den nationalen und internationalen Kontext einordnen?

Der Pfälzerwald ist in seiner Landnutzungsgeschichte im regionalen Kontext durch eine relativ abseitige Lage gekennzeichnet. Er erstreckt sich zwischen den breiten Entwicklungsachsen der Saar-Nahe-Senke im Norden, des Oberrheingrabens im Südosten und grenzt im Süden an die Vogesen an. Er lag dadurch selten im Zentrum von Entwicklungen, was sich lange Zeit durch eine relativ geringe Landnutzungsintensität äußerte. Auch von den großräumigen Vb-Wetterlagen, die in Vergangenheit (z. B. 1342) und Gegenwart (1997 Oder-Hochwasser, 2002 an der Weißeritz und Elbe) zu extremen Niederschlagsereignissen mit starker linearer Erosion geführt haben, scheint er nicht betroffen gewesen zu sein. Die bodenkundlich-sedimentologischen Untersuchungen im Speyerbach-Einzugsgebiet zeigen jedoch, dass auch trotz dieser Umstände – unterstützt durch die hohe Reliefenergie und ungeachtet der hohen Infiltrationskapazität des Sandes – große Mengen Bodenmaterial im Holozän verlagert wurden. Dabei lassen sich drei zeitliche Schwerpunkte herauskristallisieren: Für das frühe Holozän ist die Umlagerung von Hauptlagenmaterial am Hang nachgewiesen worden,

wie sie von DREIBRODT ET AL. (2010) für verschiedene Gebiete Deutschlands identifiziert wurden. Während des Hochmittelalters kam es, einhergehend mit der ersten permanenten Besiedlung einzelner Regionen innerhalb des Speyerbach-Einzugsgebiets, zu einer Erosionsphase, die in Sedimentspeichern in Kleinstzugsgebieten dokumentiert ist. Zu diesem Ergebnis kommt auch STOLZ (2005) für den westlichen Taunus.

Flächendeckend kann Bodenerosion und Sedimentation für das Speyerbach-Einzugsgebiet erst mit der wirtschaftlichen Nutzung der Wälder seit 1750 belegt werden. Dabei spielen sowohl die Umstellung von der Einzelbaumentnahme zum Kahl- oder großflächigen Schirmschlag eine Rolle, als auch der Ausbau des Wald- und Verkehrsnetzes, wodurch die Verfügbarkeit von leicht erodierbaren Sedimenten erhöht wurde. Dass es sich dabei um eine flächendeckende Erscheinung in den deutschen Mittelgebirgen handelt, machen die Untersuchungen von BORK (1988) und HARD (1970) für den Pfälzerwald, BAUER (1993) und STOLZ (2005) für den Taunus, DOTTERWEICH ET AL. (2003) für den Frankenwald und RICHTER & SPERLING (1967) für den nördlichen Odenwald deutlich, die ebenfalls Kolluvien in das 17./18. Jahrhundert datiert haben.



6. Fazit und Ausblick

Die Erstellung einer Sedimentbilanz für das Mittelgebirgseinzugsgebiet des Speyerbachs war sowohl mit den verfügbaren bodenkundlichen Daten, als auch mit einer gesonderten Erosions- und Sedimentationskartierung erfolgreich und weist eine maximale Erosion von 109 Mio. m³ und eine Hangsedimentation von 94 Mio. m³ während des Holozäns aus. Die Sedimentbilanz Ib zeigt, dass die Ausgangsdaten, die für die Erstellung der BK 50 verwendet wurden, die Erosion und Sedimentation berücksichtigen, die Bilanzierung jedoch aufgrund des Fehlens einer adäquaten Karte problematisch war. Daher ist es empfehlenswert in Zukunft mit den Originalbeschrieben zu arbeiten und das Problem der adäquaten Kartengrundlage zu lösen, wenn keine Möglichkeit zu einer expliziten Erosions- und Sedimentationskartierung besteht.

Durch die eigene Kartierung von Erosions- und Sedimentationsdaten war in diesem Projekt die Bilanzierung für das gesamte Speyerbach-Einzugsgebiet, zwei Teileinzugsgebiete und zwei Tälchen möglich. Die räumliche Differenzierung der Bilanz hat wertvolle Hinweise auf die Dynamik innerhalb des Speyerbach-Einzugsgebietes gegeben. Die Frage nach der Bedeutung der Konnektivität für die Gesamtbilanz konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft werden. Ein Einblick in die historische Entwicklung des Wegenetzes im Untersuchungsgebiet und die Erkenntnisse der Forschung zur Erosionsförderung durch das Forstwegenetz wurden zwar dargelegt, für eine weitgehendere Betrachtung fehlten jedoch geeignete Daten. Das Beispiel des Grabenreißens im Mückental verdeutlicht jedoch den Forschungsbedarf, der angesichts der Intensivierung der forstlichen Nutzung seit der Privatisierung der Forstbetriebe und dem damit verbundenen Ausbau des Wegenetzes notwendig ist.

Das Fallbeispiel des Speyerbachs steht stellvertretend für Gebiete begrenzter Zugänglichkeit und höherer Abgeschiedenheit im Rhein-Einzugsgebiet, was sich auf die Landnutzungs- und Erosionsintensitäten seit der Besiedlung ausgewirkt hat. Bodenerosion ist aber sowohl in intensiv als auch in extensiv genutzten Regionen aufgetreten, wie die Datierungen an zwei exemplarischen Standorten zeigen. Die Quarzkörner der periglazialen Lagen der beprobten Standorte Tiergarten und Mückentalgraben weisen im Gegensatz zu den Ergebnissen von VÖLKEL & MAHR (2001) und HÜLLE ET AL. (2009) gute Bleicheigenschaften auf, so dass

OSL-Datierungen möglich waren. Die Datierungsergebnisse haben mit den frühholozänen Altern von Sedimentkörpern sowie einem Sedimentkörper, der zeitlich in das Neolithikum eingeordnet werden muss aber kein Kolluvium ist, neue Fragen zur holozänen Entwicklung von Hangsedimenten in Mittelgebirgsregionen aufgeworfen und beleben die Diskussion um frühholozäne Sedimentverlagerungen, wie sie bei DREIBRODT ET AL. (2010) geführt wird. Weitere Datierungen an anderen Standorten innerhalb des Speyerbach-Einzugsgebiets, z. B. in der Umgebung von Lambrecht, würden diese exemplarischen Erkenntnisse erweitern. Die Überbauung der Aue und des Schwemmfächers des Speyerbachs durch die Städte Neustadt, Lambrecht, Neidenfels, Weidenthal, Frankenstein und Hochspeyer sowie der Eisenbahnstrecke Neustadt-Hochspeyer hat dazu geführt, dass in der vorgelegten Arbeit nur eine *hillslope sediment delivery ratio* für das Speyerbach-Einzugsgebiet bis zum Pegel Neustadt berechnet wurde. Es wären weitere Datierungen und die Erfassung von Auensedimenten –im Rahmen zukünftiger Bauvorhaben oder gezielter Bohrungen– wünschenswert, um auch die fluviale Dynamik des Untersuchungsgebiets zu beleuchten. Damit wäre auch die von BROWN ET AL. (2009) vorgeschlagene Vorgehensweise der Datierung mehrerer Sedimentkörper innerhalb eines Einzugsgebietes möglich, um eine vollständige zeitliche Differenzierung der Volumina zu erreichen.

Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Bodenkunde (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung.- Band 4 Berichtigter Nachdruck, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover: 392 S.
- Adamiec, G. & Aitken, M.J. (1998): Dose rate conversion factors: new data.- **Ancient TL** 16: 37-50.
- Ahl, C. & Meyer, B. (2001): Die Systematik der Böden der DBG und Probleme der Anwendung ihrer Nomenklatur auf die Charakterisierung weit verbreiteter Böden.- **Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft** 96: 463-464.
- Allmann, J. (1989): Der Wald in der frühen Neuzeit - Eine mentalitäts- und sozialgeschichtliche Untersuchung am Beispiel des Pfälzer Raumes 1500-1800.- **Schriften zur Wirtschafts- und Sozialgeschichte** 36: 416 S.
- Anderson, M.G. & Burt, T.P. (1995): Modelling strategies.- **In**: M.G. Anderson & T.P. Burt (Eds.): Hydrological Forecasting.- Wiley, Chichester: 1-4.
- Ashmore, P. (1993): Contemporary erosion of the Canadian landscape.- **Progress in Physical Geography** 17(2): 190-204.
- Asselman, N.E.M., Middelkoop, H. & van Dijk, P.M. (2003): The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine.- **Hydrological Processes** 17: 3225-3244.
- Auerswald, K., Fiener, P. & Dikau, R. (2009): Rates of sheet and rill erosion in Germany - A meta-analysis.- **Geomorphology** 111: 182-193.
- Badoux, A., Jeisy, M., Kienholz, H., Lüscher, P., Weingartner, P., Witzig, J. & Hegg, C. (2006): Influence of storm damage on the runoff generation in two sub-catchments of the Sperbelgraben, Swiss Emmental.- **European Journal of Forest Research** 125(1): 27-41.
- Banasik, K., Barszcz, M. & Branski, J. (2005): Major components of a sediment budget for four river catchments in Poland.- **IAHS Publications** 292: 32-36.
- Bännjerrück, W.K. (2010): Wetterstation Kaiserslautern Bännjerrück.- <http://www.kaiserslautern-wetter.de.vu/>, Zugriff am 12.04.2010.
- Barton, A.P., Fullen, M.A., Mitchell, D.J., Hocking, T.J., Liu, L.G., Bo, Z.W., Zheng, Y. & Xia, Z.Y. (2004): Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China.- **Agriculture Ecosystems & Environment** 104(2): 343-357.
- Bäse, F. (2005): Beurteilung der Parametersensitivität und der Vorhersageunsicherheit am Beispiel des hydrologischen Modells J2000.- unveröff. Diplomarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena: 102 S.
- Bauer, A. (1993): Bodenerosion in den Waldgebieten des östlichen Taunus in historischer und heutiger Zeit - Ausmaß, Ursachen und geoökologische Auswirkungen.- **Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten Serie D** 14: 194 S.
- Beckett, P.H.T. & Webster, R. (1971): Soil variability: a review.- **Soils and Fertilizers** 34: 1-15.
- Beckmann, S. (2007): Kolluvien und Auensedimente als Geoarchive im Umfeld der historischen Hammerwerke Leidersdorf und Wolfsbach (Vils/Opf.).- **Regensburger**

- Beiträge zur Bodenkunde, Landschaftsökologie und Quartärforschung** 12: 327 S.
- Behrens, T. (2003): Digitale Reliefanalyse als Basis von Boden-Landschafts-Modellen - Am Beispiel der Modellierung periglaziärer Lagen im Ostharz.- **Boden und Landschaft** 42: 181 S.
- Behrens, T. & Scholten, T. (2006): Digital soil mapping of Germany - a review.- **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 169: 434-443.
- Berg, R.C. (1984): The origin and early genesis of clay bands in youthful sandy soils along Lake Michigan, U.S.A.- **Geoderma** 32: 45-62.
- Bernhard, H. (2001): Die Römische Geschichte der Pfalz.- **In**: K.-H. Rothenberger, K. Scherer, F. Staab & J. Keddigkeit (Hrsg.): Pfälzische Geschichte.- Institut für pfälzische Geschichte und Volkskunde, Kaiserslautern: 43-78.
- Boardman, J. & Favis-Mortlock, D. (1999): Frequency-magnitude distribution for soil erosion, runoff and rainfall - a comparative analysis.- **Zeitschrift für Geomorphologie** 115: 51-70.
- Boardman, J. (2002): The need for soil conservation in Britain - revisited.- **Area** 34(4): 419-427.
- Boiselle, R. (1998): Aus den Wäldern um Trippstadt: Bewirtschaftung des Forstes in früheren Zeiten.- **Pfälzer Heimat** 49(1): 22-27.
- Bork, H.-R. (1983): Die holozäne Relief- und Bodenentwicklung in Lössgebieten. Beispiele aus dem südöstlichen Niedersachsen.- **Catena** 3: 1-93.
- Bork, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt - Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion: Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulation.- **Landschaftsgenese und Landschaftsökologie** 13: 249 S.
- Bork, H.-R., Bork, H., Dalchow, C., Faust, B., Piorr, H.-R. & Schatz, T. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa.- Justus Perthes Verlag, Gotha: 328 S.
- Bork, H.-R., Schmidtchen, G. & Dotterweich, M. (2001): Die Wechselwirkungen zwischen Landnutzung und Bodenzerstörung in Mitteleuropa.- **Regensburger Beiträge zur Prähistorischen Archäologie** 7: 43-55.
- Bork, H. & Lang, A. (2003): Quantification of past soil erosion and land use/land cover changes in Germany.- **In**: A. Lang, K. Hennrich & R. Dikau (Eds.): Long term hillslope and fluvial system modelling - concepts and case studies from the Rhine river catchment.- Springer Verlag, Berlin: 231-239.
- Bott, W. (2002): Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten.- Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz: 114 S.
- Braukämper, K. (1990): Zur Verbreitung periglazialer Deckschichten in Deutschland.- Dissertation, Ruhr-Universität Bochum: 156 S.
- Brazdil, R. (1998): The history of floods on the rivers Elbe and Vlatava in Bohemia.- **Erfurter Geographische Studien** 7: 93-108.
- Brewer, P.A. & Passmore, D.G. (2002): Sediment budgeting techniques in gravel-bed rivers.- **In**: S.J. Jones & L.E. Frostick (Eds.): Sediment flux to basins: causes, controls and consequences.- Geological Society Special Publication, London: 97-113.

- Brown, A.G., Carey, C., Erkens, G., Fuchs, M., Hoffmann, T., Macaire, J.J., Moldenhauer, K.-M. & Walling, D.E. (2009): From sedimentary records to sediment budgets: Multiple approaches to catchment sediment flux.- **Geomorphology** 108: 35-47.
- Büdel, J. (1937): Eiszeitliche und rezente Verwitterung und Abtragung im ehemals nicht vereisten Teil Mitteleuropas.- **Petermanns Geographische Mitteilungen** Erg.-H. 229: 1-83.
- Budja, M. (2007): The 8200 cal BP 'climate event' and the process of neolithisation in south-eastern Europe.- **Dokumenta Praehistorica** 34: 191-201.
- Burschel, P. & Huss, J. (2003): Grundriss des Waldbaus.- 3.Aufl., Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart: 487 S.
- Casper, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald).- **Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe** 210: 165 S.
- Church, M. & Slaymaker, O. (1989): Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia.- **Nature** 337(2): 452-454.
- Clemens, G. & Stahr, K. (1994): Present and past soil erosion rates in catchments of the Kraichgau area (SW-Germany).- **Catena** 22(2): 153-168.
- Cloer, B. & Kaiser-Cloer, U. (1984): Eisengewinnung und Eisenverarbeitung in der Pfalz im 18. und 19. Jahrhundert.- **Mannheimer Geographische Arbeiten** 18: 517 S.
- Collofong, E. & Fell, H. (1978): 1000 Jahre Lambrecht - Chronik einer Stadt.- Edeldruck Lambrecht, Lambrecht: 431 S.
- Consultants, N.H. & Stokes, J. (2003): San Francisquito Creek watershed sediment budget.- Draft Report, San Francisquito Creek Joint Power Authority: 46 S.
- Croke, J., Hairsine, P. & Fogarty, P.J. (1999): Sediment transport, redistribution and storage on logged forest hillslopes in south-eastern Australia.- **Hydrological Processes** 13: 2705-2720.
- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P. & Takken, I. (2005): Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity.- **Geomorphology** 68(3-4): 257-268.
- Croke, J. & Nethery, M. (2006): Modelling runoff and soil erosion in logged forests: Scope and application of some existing models.- **Catena** 67: 35-49.
- Cunningham, D.A., Farrell, E.P. & Collins, J.F. (1999): Soil responses to land-use change - a study in south-west Ireland.- **Forest Ecology and Management** 119: 63-76.
- Cyffka, B. (1991): Das Abflussverhalten in kleinen Buntsandstein-Einzugsgebieten.- **Göttinger Geographische Abhandlungen** 93: 180 S.
- Dahlke, H., Behrens, T., Seibert, J. & Andersson, L. (2009): Test of statistical means for the extrapolation of soil depth point information using overlays of spatial environmental data and bootstrapping techniques.- **Hydrological Processes** 23: 3017-3029.
- De Moor, J.J.M. & Verstraeten, G. (2008): Alluvial and colluvial sediment storage in the Geul River catchment (The Netherlands) — Combining field and modelling data to construct a Late Holocene sediment budget.- **Geomorphology** 95(3-4): 487-503.
- De Roo, A.P.J. (1993): Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. Validity and applicability of the "ANSWERS"

- model in two catchments in the loess area of South Limburg (The Netherlands) and one in Devon (UK).- **Nederlandse Geografische Studies** 157: 295 S.
- Deutsch, M. (1998): Das Hochwasser der Unstrut im März 1947 - Verlauf, Krisenmanagement und Schäden am Ober- und Mittellauf.- **Erfurter Geographische Studien** 7: 129-162.
- Deutsch, M. (2000): Zum Hochwasser der Elbe und Saale Ende Februar/Anfang März 1799.- **Erfurter Geographische Studien** 9: 7-44.
- Dietze, M. (2006): Untersuchung sedimentpetrographisch-mineralogischer Eigenschaften quartärer Lagen und Modellierung ihrer Verbreitungsmuster im Tharandter Wald (Sachsen).- Diplomarbeit, Technische Universität Dresden: 141 S.
- Dolch, M. (2005): Glasmacher und Glaser in der Pfalz nach Quellen des 15./17. Jahrhunderts.- **Pfälzer Heimat** 56: 1-20.
- Dotterweich, M., Schmitt, A., Schmidtchen, G. & Bork, H.-R. (2003): Quantifying historical gully erosion in northern Bavaria.- **Catena** 50(2-4): 135-150.
- Dotterweich, M. (2008): The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment — A review.- **Geomorphology** 101: 192-208.
- Dreibrodt, S. & Bork, H. (2005): Historical soil erosion and landscape development at Lake Belau (North Germany) - a comparison of colluvial deposits and lake sediments.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** Suppl. 139: 101-128.
- Dreibrodt, S., Lubos, C., Terhorst, B., Damm, B. & Bork, H.-R. (2010): Historical soil erosion by water in Germany: Scales and archives, chronology, research perspectives.- **Quaternary International** 222: 80-95.
- Eisenbies, M.H., Aust, W.M., Burger, J.A. & Adams, M.B. (2007): Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians - a review.- **Forest Ecology and Management** 242: 77-98.
- Ernst, C. (2000): Den Wald entwickeln - Ein Politik- und Konfliktfeld in Hunsrück und Eifel im 18. Jahrhundert.- *Ancien Regime, Aufklärung und Revolution* Band 32, R. Oldenbourg Verlag, München: 408 S.
- Ernstberger, H. (2005): Nachhaltiger, vorbeugender Hochwasserschutz durch schonende Flächenbewirtschaftung und Wiederherstellung von Bach- und Flussauen.- Projektbericht 08.03 LAWA, Büro für Umweltbewertung und Geoökologie: 37 S.
- Fenkner-Voigtländer, U. (1992): Forsteinrichtung und Waldbau im Elmsteiner Wald unter deutschen und französischen Einflüssen 1780-1860 - Ein Beitrag zur Forstgeschichte des Pfälzerwaldes.- **Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz** 10: 336 S.
- Firbas, F. (1934): Zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte der Rheinpfalz.- **Beihefte zum Botanischen Centralblatt** 52(Abt. B, Heft 1): 119-156.
- Firbas, F., Grünig, G., Weisedel, I. & Worzel, G. (1948): Beiträge zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte der Vogesen.- **Bibliotheca Botanica** 121: 75 S.
- Fischer-Zujkov, U. & Schatz, T. (2002): Kolluvien als Archive der Landschaftsentwicklung.- **Archiv für Acker und Pflanzenbau und Bodenkunde** 48: 57-76.

- Fischer, H. (1989): Rheinland-Pfalz, Saarland - eine geographische Landeskunde.- Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt: 48-110.
- Fried, G. (1984): Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein-Odenwald.- **Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten Serie D** 4: 204.
- Fröhlich, H. & Opp, C. (2005): Periglacial layer or anthropogenic layer - A small scale analysis of their spatial distribution under forest.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** Suppl. 139: 203-219.
- Frühauf, M. (1990): Neue Befunde zur Lithologie, Gliederung und Genese der periglazialen Lockermaterialdecken im Harz: Fremdmaterialnachweis und Decksedimenterfassung.- **Petermanns Geographische Mitteilungen** 134(1): 249-256.
- Frühauf, M. (1996): Periglaziale Lockermaterialdecken in ostdeutschen Mittelgebirgen – Forschungsstand und Versuch einer kritischen Bestandsaufnahme.- **Heidelberger Geographische Arbeiten** 104: 121-133.
- Fryirs, K. & Brierley, G.J. (1999): Slope-channel decoupling in Wolumla catchment, New South Wales, Australia: the changing nature of sediment sources following European settlement.- **Catena** 35(1): 41-63.
- Fryirs, K., Brierley, G.J., Preston, N.J. & Kasai, M. (2007): Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades.- **Catena** 70(1): 49-67.
- Fuchs, M., Lang, A. & Wagner, G.A. (2004): The history of Holocene soil erosion in the Phlious Basin, NE Peloponnese, Greece, based on optical dating.- **The Holocene** 14(3): 334-345.
- Fuchs, M. & Lang, A. (2009): Luminescence dating of hillslope deposits - A review.- **Geomorphology** 109(1-2): 17-26.
- Gabris, G., Kertesz, A. & Zambo, L. (2003): Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment.- **Catena** 50: 151-164.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H. & Olley, J.M. (1999): Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinnium rock shelter, northern Australia. Part I experimental design and statistical models.- **Archaeometry** 41: 339–364.
- Gees, A. (1997): Analyse historischer und seltener Hochwasser in der Schweiz: Bedeutung für das Bemessungshochwasser.- **Geographica Bernensia** G53: 156 S.
- Gerber, B. (1989): Waldflächenveränderungen und Hochwasserbedrohung im Einzugsgebiet der Emme.- **Geographica Bernensia** G33: 97 S.
- Geyh, M.A. (2001): Erwartungen und Enttäuschungen bei der Deutung von ¹⁴C-Daten.- **Regensburger Beiträge zu prähistorischen Archäologie** 7: 59-76.
- Geyh, M.A. (2005): Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung.- Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt: 211 S.
- Glaser, R. (1998): Historische Hochwässer im Maingebiet - Möglichkeiten und Perspektiven auf der Basis der Historischen Klimadatenbank Deutschland (HISKLID).- **Erfurter Geographische Studien** 7: 109-128.
- Glaser, R. & Stangl, H. (2004): Eine kurze Geschichte des Klimas und der Katastrophen.- **Marburger Geographische Schriften** 140: 68-85.

- Grabas, M. (1995): Krisenbewältigung oder Modernisierungsblockade? Die Rolle des Staates bei der Überwindung des "Holzenergiemangels" zu Beginn der industriellen Revolution in Deutschland.- **Jahrbuch der europäischen Verwaltungsgeschichte** 7: 43-76.
- Grewe, B.-S. (2004): Der versperrte Wald - Ressourcenmangel in der bayrischen Pfalz (1814-1870).- *Umwelthistorische Forschungen*, Band 1: 508 S.
- Grote, T. (2008): Kausalanalytischer Vergleich von historischen und aktuellen Erosionsprozessen im Zusammenhang mit der Waldnutzung.- Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Brsg.: 171 S.
- Gündra, H., Jäger, S., Schroeder, M. & Dikau, R. (1995): Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg.- **Agrarforschung in Baden-Württemberg** 24: 76 S.
- Häberle, D. (1921): Die Wüstungen der Rheinpfalz auf Grundlage der Besiedlungsgeschichte.- *Beiträge zur Landeskunde der Rheinpfalz*, Band 3: 246 S.
- Hagedorn, E.-M. (2004): Sedimentpetrographie und Lithofazies der jungtertiären und quartären Sedimente im Oberrheingebiet.- Dissertation, Universität zu Köln: 310 S.
- Hahn, H.-J., Bauer, A. & Friedrich, E. (Hrsg.) (2000): Wasser im Biosphärenreservat Naturpark Pfälzerwald: Ergebnisse der interdisziplinären Fachtagung "Wasser im Biosphärenreservat Naturpark Pfälzerwald" vom 10. bis 12. Juni 1999 an der Universität in Landau.- Institut für Regionale Umweltforschung und Umweltbildung, Landau: 284 S.
- Hahn, H.-U. (1992): Die morphogenetische Wirksamkeit historischer Niederschläge. Die Besselbergäcker und die Grünbachau - ein Beispiel aus dem Taubereinzugsgebiet.- **Würzburger Geographische Arbeiten** 47: 196 S.
- Hard, G. (1970): Exzessive Bodenerosion um und nach 1800.- **Erdkunde** 24(4): 290-308.
- Harvey, A.M. (2001): Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from Howgill Fells, northwest England.- **Catena** 42: 225-250.
- Hebel, B. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiets-Dimension.- Dissertation, Universität Basel: 181 S.
- Hegg, C., Thormann, J.J., Böll, A., Germann, P., Kienholz, H., P., L. & Weingartner, P. (2004): Lothar und Wildbäche - Schlussbericht eines Projektes im Rahmen des Programms "Lothar Evaluations- und Grundlagenprojekt", Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf: 79 S.
- Heitele, H. & Kärcher, T. (1997): Exkursionsführer Geologie und Hydrogeologie des mittleren Pfälzer Waldes und des vorgelagerten Oberrheingrabenrandes.- Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz: 5-24.
- Henderson, W.O. (1966): Die Entstehung der preußischen Eisenbahn 1815-1848.- **In**: K.E. Born (Editor): *Moderne Deutsche Wirtschaftsgeschichte*.- Kiepenheuer & Witsch, Köln: 137-150.
- Herbst, M. (2001): Regionalisierung von Bodeneigenschaften unter Berücksichtigung geomorphometrischer Strukturen für die Modellierung der Wasserflüsse eines mikroskaligen Einzugsgebiets.- Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn: 123 S.

- Heuser-Hildebrandt, B. (2004): Kohlenmeilerplätze im Ebracher Forst, Wüstungsgemarkung Horb, als Quellen zur spätmittelalterlich-frühneuzeitlichen Kulturlandschaftsentwicklung im westlichen Steigerwald.- **Bamberger Geographische Schriften Sonderfolge 7**: 81-105.
- Hildebrandt, H. (2004): Die spätmittelalterliche Wüstungsperiode aus der Sicht der Bodenerosionstheorie, betrachtet vornehmlich am Beispiel der Wüstung Horb im westlichen Steigerwald.- **Bamberger Geographische Schriften Sonderfolge 7**: 121-137.
- Hildebrandt, H., Heuser-Hildebrandt, B. & Wolters, S. (2007): Kulturlandschaftsgenetische und Bestandsgeschichtliche Untersuchungen anhand von Kohlholzspektren aus historischen Meilerplätzen, Pollendiagrammen und archivalischen Quellen im Naturpark Pfälzerwald, Forstamt Johanniskreuz.- **Mainzer Geographische Studien Sonderband 3**: 182 S.
- Himmler, K.H. (2010): Wolkenbruch.- <http://www.lambrecht-pfalz.de/geschichtliches/Wolkenbruch.pdf>: Zugriff am 20.08.2010.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Cohen, K.M., Houben, P., Seidel, J. & Dikau, R. (2007): Holocene floodplain sediment storage and hillslope erosion within the Rhine catchment.- **The Holocene** 17(1): 105-118.
- Houben, P., Hoffmann, T., Zimmermann, A. & Dikau, R. (2006): Land use and climatic impacts on the Rhine system (RheinLUCIFS): Quantifying sediment fluxes and human impact with available data.- **Catena** 66(1-2): 42-52.
- Houben, P., Burggraaf, P., Hoffmann, T., Kleefeld, K., Zimmermann, A. & Dikau, R. (2007): Reconstructing Holocene land-use change and sediment budgets in the Rhine system.- **PAGES News** 15(1): 17-18.
- Houben, P. (2008): Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany.- **Geomorphology** 101: 172-191.
- Houben, P. (submitted): Sediment budget for five millennia of tillage in the Rockenberg catchment (Wetterau loess basin, Germany).-
- Huber, A. (1989): Landkreis und Kreisfreie Stadt Kaiserslautern.- **In**: K. Kremb & P. Lautzas (Hrsg.): Landesgeschichtlicher Exkursionsführer Rheinland-Pfalz, Band 1 Regierungsbezirk Rheinhessen - Pfalz.- Arbogast, Otterbach: 229-250.
- Hülle, D., Hilgers, A., Kühn, P. & Radtke, U. (2009): The potential of optically stimulated luminescence for dating periglacial slope deposits - A case study from the Taunus area, Germany.- **Geomorphology** 109: 66-78.
- Innes, J.B. & Simmons, I.G. (2000): Mid-Holocene charcoal stratigraphy, fire history and palaeoecology at North Gill, North York Moors, UK.- **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 164(1-4): 151.
- Jäckli, H. (1957): Gegenwartsgeologie des Bündnerischen Rheingebietes. Ein Beitrag zur exogenen Dynamik alpiner Gebirgslandschaften.- **Beiträge zur Geologie der Schweiz - Geotechnische Serie** 36: 136 S.
- Jentsch, C. & Lukhaupt, R. (1998): Die Holztrift im Biosphärenreservat Naturpark Pfälzer Wald als ein traditionelles Element der Kulturlandschaft.- **Mannheimer Geographische Arbeiten** 46: 33-48.

- Jordan, G. & Slaymaker, O. (1991): Holocene sediment production in Lillooet River Basin, British Columbia: A sediment budget approach.- **Géographie physique et Quaternaire** 45(1): 45-57.
- Jordan, G., Van Rompaey, A.J.J., Szilassi, P., Csillag, G., Mannaerts, C. & Woldai, T. (2005): Historical land use change and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary).- **Agriculture Ecosystems & Environment** 108(2): 119-133.
- Kadereit, A., Lang, A., Müth, J., Hönscheidt, S. & Wagner, G.A. (2002): IR-OSL-dated colluvial sediments as a key to Holocene landscape reconstruction. Case studies from SW-Germany.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** 128: 191-207.
- Kadereit, A., Sponholz, B., Rösch, M., Schier, W., Kromer, B. & Wagner, G.A. (2006): Chronology of Holocene environmental changes at the tell site of Uivar, Romania, and its significance for late Neolithic tell evolution in the temperate Balkans.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** 142: 19-45.
- Kadereit, A. & Kühn, P. (2009): Holocene relief and soil changes in loess-covered areas of south-western Germany: The pedosedimentary archives of Bretten-Bauerbach (Kraichgau).- **Quaternary International** 222(1-2): 96-119.
- Karch, P. (1968): Neidenfels und seine Wälder: Dorf und Landschaft zwischen den Zeiten.- Edelverlag Lambrecht, Lambrecht: 458 S.
- Kemp, R.A. & Macintosh, P.D. (1989): Genesis of a texturally banded soil in Southland, New Zealand.- **Geoderma** 45: 65-81.
- Klimek, K. & Latocha, A. (2007): Response of small mid-mountain rivers to human impact with particular reference to the last 200 years, Eastern Sudetes, Central Europe.- **Geomorphology** 92: 147-165.
- Kösel, M. (1996): Der Einfluß von Relief und periglazialen Deckschichten auf die Bodenausbildung im mittleren Rheingletschergebiet von Oberschwaben.- Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten Reihe D, Geoökologie und Quartärforschung, Band 1: 147 S.
- Küster, H. (1995): Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa von der Eiszeit bis zur Gegenwart.- C.H.Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München: 423 S.
- Kwaad, F.J.P.M. & Múcher, H.J. (1979): The formation and evolution of colluvium on arable land in Northern Luxembourg.- **Geoderma** 22: 173-192.
- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (2005): Geologie von Rheinland-Pfalz.- E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 400 S.
- Landesamt für Umweltschutz (2001): Erläuterungen zur Karte: Das Quartär des Saarland (Quartäre Ablagerungen, periglaziäre Lagen und Paläoböden) Maßstab 1:100.000.- Saarbrücken: 57 S.
- Lang, A. (1994): Infra-red stimulated luminescence dating of Holocene reworked silty sediments.- **Quaternary Science Review** 13: 525-528.
- Lang, A., Rieser, U., Habermann, J. & Wagner, G.A. (1998): Luminescence dating of sediments.- **Naturwissenschaften** 85(11): 515-523.
- Lang, A. & Hönscheidt, S. (1999): Age and source of soil erosion derived colluvial sediments at Vaihingen-Enz, Germany.- **Catena** 38(2): 89-107.
- Lang, A. (2003): Phases of soil erosion-derived colluviation in the loess hills of South Germany.- **Catena** 51: 209-221.

- Lang, A. & Mauz, B. (2006): Towards chronologies of gully formation: optical dating of gully fill sediments from Central Europe.- **Quaternary Science Reviews** 25: 2666-2675.
- Latocha, A. (2009): Land-use changes and long-term human-environment interactions in a mountain region (Sudetes mountains, Poland).- **Geomorphology** 108: 48-57.
- Lauer, W. & Frankenberg, P. (1986): Zur Rekonstruktion des Klimas im Bereich der Rheinpfalz seit Mitte des 16. Jahrhunderts mit Hilfe von Zeitreihen der Weinqualität und Weinquantität.- **Paläoklimaforschung** 2: 54 S.
- Lauterburg, A. (1990): Klimaschwankungen in Europa - Raum-zeitliche Untersuchungen in der Periode 1841-1960.- **Geographica Bernensia** G35: 229 S.
- Leopold, M. & Völkel, J. (2007): Colluvium: Definition, differentiation, and possible suitability for reconstructing Holocene climate data.- **Quaternary International** 162-163: 133-140.
- Liedtke, H. (1968): Die geomorphologische Entwicklung der Oberflächenformen des Pfälzer Waldes und seiner Randgebiete.- **Arbeiten aus dem Geographischen Institut der Universität des Saarlandes** Sonderband 1: 232 S.
- Lothhammer, H. (1996): Die Böden des mesozoischen Schichtstufenlandes der Rheinpfalz.- **Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen** 25: 183-204.
- Ludemann, T. (2008): Natürliches Holzangebot und historische Nutzung. Heutige Vegetation und historische Holzkohle als wertvolle Quellen.- **Das Mittelalter - Perspektiven mediävistischer Forschung** 13: 39-62.
- Ludt, W. (1959): Hochspeyer - Die Geschichte eines Dorfes.- Arbogast, Otterbach: 384 S.
- Machann, R. & Semmel, A. (1970): Historische Bodenerosion auf Wüstungsfluren deutscher Mittelgebirge.- **Geographische Zeitschrift** 58: 250-266.
- Mäckel, R. (1998): Flußaktivität und Talgeschichte des Spät- und Postglazials im Oberrheingraben und Schwarzwald.- **In: R. Mäckel & A. Friedmann (Hrsg.): Wandel der Geo-Biosphäre in den letzten 15 000 Jahren im südlichen Oberrheintiefland und Schwarzwald.-** Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie, Freiburg: 31-50.
- Mailänder, S. & Veith, H. (2001): Periglacial cover-beds on the Swiss Plateau: indicators of soil, climate and landscape evolution during the Late Quaternary.- **Catena** 45: 251-272.
- Marcinek, J. & Schmidt, K.-H. (2002): Gewässer und Grundwasser, Physische Geographie Deutschlands.- Klett-Perthes, Gotha: 157-182.
- Ministerium für Landwirtschaft Weinbau und Forsten (1982): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Rheinland-Pfalz: Erläuterungsbericht, Mainz: 2-14, 31-38, 42-60.
- Ministerium für Umwelt und Ernährung (2001): Bodenzustandsbericht Rheinland-Pfalz, Blatt 6711 Pirmasens Nord.- Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz: 10-22.
- Mitasova, H., Mitas, L. & Brown, W.M. (2001): Multiscale simulation of land use impact on soil erosion and deposition patterns.- **In: D.E. Stott, R.H. Mohtar & G.C. Steinhardt (Eds.): Sustaining the global farm.- Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: 1163-1169.**
- Moersch, K. (1987): Geschichte der Pfalz: von den Anfängen bis ins 19. Jahrhundert.- Pfälzische Verlagsanstalt, Landau/Pfalz: 526 S.

- Moore, J. (2000): Forest fire and human interaction in the early Holocene woodlands of Britain.- **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 164(1-4): 125-137.
- Müller, M.J. (1979): Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde.- Forschungsstelle Bodenerosion der Universität Trier, Band 5, Trier: 51-53.
- Müller, S. (2004): Zur Anwendbarkeit verschiedener Gliederungen periglazialer Deckschichten - Ein Beitrag zur Landschaftsgenese des mittleren Saaletales.- Diplomarbeit, Universität Leipzig: 115 S.
- Müller, S. (2007): Zur Anwendbarkeit verschiedener Gliederungen periglazialer Deckschichten im Buntsandstein des mittleren Saaletales.- **Jahresberichte der Wetterauischen Gesellschaft für die gesamte Naturkunde** 155-57: 67-83.
- Murray, A.S. & Wintle, A.G. (2000): Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol.- **Radiation Measurements** 32: 57-73.
- Nagel, A. (2009): Semi-automatisierte Klassifikation geomorphologischer Reliefeinheiten am Beispiel des Speyerbach-Einzugsgebietes im Pfälzer Wald.- unveröff. Diplomkarte, Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt/Main: 13 S.
- Nearing, M.A. (1998): Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses.- **Catena** 32: 15-22.
- Neustadt, P. (2006): Unwetter im Bereich Elmstein.- http://www.polizei.rlp.de/internet/nav/dac/presse.jsp?uMen=dac4f5d4-a938-2011-99f3-1a94839292e2&page=1&pagesize=10&sel_uCon=b5b60f29-59b4-9c01-44b9-461a94839292: Zugriff am 12.03.2006.
- Niehoff, D. (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala.- Dissertation, Universität Potsdam: 144 S.
- Notebaert, B., Verstraeten, G., Rommens, T., Vanmontfort, B., Govers, G. & Poesen, J. (2009): Establishing a Holocene sediment budget for the river Dijle.- **Catena** 77: 150-163.
- O'Neal, M.R., Nearing, M.A., Vining, R.C., Southworth, J. & Pfeifer, R.A. (2005): Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management.- **Catena** 61: 165-184.
- Owens, K.E., Reed, D.D., Londo, A.J., Maclean, A.L. & Mroz, G.D. (1999): A landscape level comparison of pre-European settlement and current soil carbon content of a forested landscape in upper Michigan.- **Forest Ecology and Management** 113: 179-189.
- Owens, P. & Slaymaker, O. (1992): Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins, British Columbia.- **IAHS Publications** 209: 147-154.
- Owens, P.N., Wallbrink, P.J., He, Q. & Shanahan, J. (1997): The use of caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start catchment, Devon, UK.- **Hydrological Studies** 42(3): 405-423.
- Passmore, D.G. & Macklin, M.G. (2001): Holocene sediment budgets in an upland gravel bed river: The River South Tyne, Northern England.- In: D. Maddy, M.G. Macklin & J.C. Woodward (Eds.): River Basin Sediment Systems: Archives of Environmental Change.- Balkema, Rotterdam: 423-444.
- Pfister, C., Bütikofer, N., Schuler, A. & Volz, R. (1988): Witterungsextreme und Waldschäden in der Schweiz - Eine historisch-kritische Untersuchung von

- Schadenmeldungen aus schweizerischen Wäldern in ihrer Beziehung zur Klimabelastung, insbesondere durch sommerliche Dürreperioden.- Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Bern: 70 S.
- Phillips, J.D. (1991): Fluvial sediment budgets in the North Carolina Piedmont.- **Geomorphology** 4: 231-241.
- Plewe, E. (1938): Geomorphologische Studien am pfälzischen Rheingrabenrand.- **Badische Geographische Abhandlungen** 19: 70 S.
- Polyakov, V.O., Nearing, M.A. & Shipitalo, M.J. (2004): Tracking sediment redistribution in a small watershed: implications for agro-landscape evolution.- **Earth Surface Processes and Landforms** 29: 1275-1291.
- Precht, J. (1953): Pollenanalytische Untersuchungen zur Kiefernfrage im Pfälzer Wald.- **Mitteilungen der Pollichia III. Reihe** 3: 150-153.
- Prosser, I.P. & Abernethy, I.P. (1999): Increased erosion hazard resulting from log-row construction during conversion to plantation forest.- **Forest Ecology and Management** 123: 145-155.
- Raab, T. & Völkel, J. (2005): Soil geomorphological studies on the Prehistoric to Historic landscape change in the former mining area at the Vils River (Bavaria, Germany).- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge Suppl.** 139: 129-145.
- Raab, T., Leopold, M. & Völkel, J. (2007): Character, age, and ecological significance of Pleistocene periglacial slope deposits in Germany.- **Physical Geography** 28(6): 451-473.
- Radkau, J. (1986): Warum wurde die Gefährdung der Natur durch den Menschen nicht rechtzeitig erkannt? Naturkult und Angst vor Holznot um 1800.- In: H. Lübke & E. Ströker (Hrsg.): *Ökologische Probleme im kulturellen Wandel.*- Fink Verlag/Ferdinand Schönigh: 47-78.
- Ranzi, F. (1939): Königsgut und Königsforst im Zeitalter der Karolinger und Ludolfinger und ihre Bedeutung für den Landesausbau.- *Volk in der Geschichte*, Band 5, Max Niemeyer Verlag, Halle/Saale: 192 S.
- Rapp, A. (1960): Recent development of mountain slopes in Kaerkevagge and surroundings, northern Scandinavia.- **Geografisker Annaler** 42A: 71-200.
- Reimer (2004): IntCal04 Terrestrial radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP.- **Radiocarbon** 46(3): 1029-1058.
- Richard, N. (2005): Historischer Ausbau oder natürliche Entwicklung? Die fluviale Morphologie der Vils unter dem Einfluss des historischen Bergbaus.- **Regensburger Beiträge zur Bodenkunde, Landschaftsökologie und Quartärforschung** 6: 179 S.
- Richter, G. & Sperling, W. (1967): Anthropogen bedingte Dellen und Schluchten in der Lösslandschaft. Untersuchungen im nördlichen Odenwald.- **Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv** 5: 136-176.
- Rieger, D. & Vingert, A. (2000): Hochwasserschutz für die Stadt Erfurt: Methodik und Maßnahmen des lokalen Hochwasserschutzes.- **Erfurter Geographische Studien** 9: 199-209.
- Rienks, S.M., Botha, G.A. & Hughes, J.C. (2000): Some physical and chemical properties of sediments exposed in a gully (donga) in northern KwaZulu-Natal, South Africa and their relationship to the erodibility of the colluvial layers.- **Catena** 39: 11-31.

- Roberts, R.G. & Church, M. (1986): The sediment budget in severely disturbed watersheds, Queen Charlotte Ranges, British Columbia.- **Canadian Journal of Forest Research** 16: 1092-1106.
- Rommens, T., Verstraeten, G., Poesen, J., Govers, G., Van Rompaey, A.J.J., Peeters, I. & Lang, A. (2005): Soil erosion and sediment deposition in the Belgian loess belt during the Holocene: establishing a sediment budget for a small agricultural catchment.- **The Holocene** 15(7): 1032-1043.
- Rommens, T., Verstraeten, G., Peeters, I., Poesen, J., Govers, G., Van Rompaey, A.J.J., Mauz, B., Packmann, S. & Lang, A. (2007): Reconstruction of late-Holocene slope and dry valley sediment dynamics in a Belgian loess environment.- **The Holocene** 17(6): 777-788.
- Roth, C. & Visser, F. (2003): Quantification and managing sources of sediments and nutrients in low-lying canelands.- Technical Report 52/03, CSIRO Land and Water, Townsville: 40 S.
- Rothenberger, K.-H. (1989): Landkreis Südliche Weinstraße und Kreisfreie Stadt Landau.- In: K. Kremb & P. Lautzas (Hrsg.): Landesgeschichtlicher Exkursionsführer Rheinland-Pfalz, Band 1 Regierungsbezirk Rheinhessen - Pfalz.- Arbogast, Otterbach. 195-228.
- Rothenberger, K.-H., Scherer, K., Staab, F. & Keddigkeit, J. (Hrsg.) (2001): Pfälzische Geschichte Band 1.- Institut für pfälzische Geschichte und Volkskunde, Kaiserslautern: 388 S.
- Röttcher, K., Kühne, B. & Tönsmann, F. (2000): Umweltverträglicher Hochwasserschutz in Nordhessen am Beispiel der Bauna. Weltweites Projekt der EXPO 2000 in Hannover.- **Erfurter Geographische Studien** 9: 189-198.
- Rovira, A., Batalla, R.J. & Sala, M. (2005): Fluvial Sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain).- **Catena** 60: 19-42.
- Royall, D. (2001): Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain.- **Catena** 46: 15-34.
- Rustomji, P. & Prosser, I.P. (2001): Spatial patterns of sediment delivery to valley floors: sensitivity to sediment transport capacity and hillslope hydrology relations.- **Hydrological Processes** 15: 1003-1018.
- Sauer, D. (2002): Genese, Verbreitung und Eigenschaften periglaziärer Lagen im rheinischen Schiefergebirge - anhand von Beispielen aus Westerwald, Hunsrück und Eifel.- **Boden und Landschaft** 36: 295 S.
- Sauer, D. & Felix-Henningsen, P. (2004): Application of ground-penetrating radar to determine the thickness of Pleistocene periglacial slope deposits.- **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 167: 752-760.
- Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G., Hartge, K.H. & Schwertmann, U. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde.- 14. Aufl. Ferdinand Encke Verlag, Stuttgart: 494 S.
- Schilling, B. (1990): Die Böden im Keuper-Lias-Land Frankens, ihr Aufbau, ihre Deckschichten und ihre Umwelteigenschaften.- Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg: 203 S.
- Schilling, W. & Wiefel, H. (1962): Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringen und des Harzes.- **Geologie** 11: 428-460.

- Schimmack, W., Auerswald, K. & Bunzl, K. (2002): Estimation of soil erosion and deposition rates at an agricultural site in Bavaria, Germany, as derived from fallout radiocesium and plutonium as tracers.- **Naturwissenschaften** 89: 43-46.
- Schmerer, T. (1998): Geographische und historische Perspektiven des Kulturlandschaftswandels am Beispiel des Triftwesens in der bayrischen Pfalz 1816-1860.- **Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz** 15: 119 S.
- Schmidt, U.E. (2002): Der Wald in Deutschland im 18. und 19. Jahrhundert - Das Problem der Ressourcenknappheit dargestellt am Beispiel der Waldressourcenknappheit in Deutschland im 18. und 19. Jahrhundert: eine historisch-politische Analyse.- Conte Forst, Saarbrücken: 433 S.
- Schmitt, A., Dotterweich, M., Schmidtchen, G. & Bork, H.-R. (2003): Vineyards, hopgardens and recent afforestation: effects of late Holocene land use change on soil erosion in northern Bavaria, Germany.- **Catena** 51(3-4): 241-254.
- Scholten, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen.- **Relief Boden Paläoklima** 19: 149 S.
- Scholz, R., Strejc, W. & Uhlmann, H.-W. (2000): Hochwasserschutz an der Unstrut in Sachsen-Anhalt, historische und aktuelle Betrachtungen.- **Erfurter Geographische Studien** 9: 173-188.
- Schönwiese, C.-D. (2002): Beobachtete Klimatrends im Industriezeitalter - Ein Überblick global/Europa/Deutschland.- **Berichtes des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main** 106: 93 S.
- Schröder, A. (2000): WEPP, EUROSEM, E-2D: results of applications on plot scale.- In: J. Schmidt (Ed.): Soil erosion - applications of physical based models.- Springer, Berlin: 199-250.
- Schrott, L. & Adams, T. (2002): Quantifying sediment storage and Holocene denudation in an Alpine basin, Dolomites, Italy.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge Suppl.** 128: 129-145.
- Schrott, L., Hufschmidt, G., Hankammer, M., Hoffmann, T. & Dikau, R. (2003): Spatial distribution of sediment storage types and quantification of valley fill deposits in an alpine basin, Reintal, Bavarian Alps, Germany.- **Geomorphology** 55: 45-63.
- Schwarz, O. (1974): Hydrogeographische Studien zum Abflußverhalten von Mittelgebirgsflüssen am Beispiel der Bieber und Salz (Hessen).- **Rhein-Mainische Forschungen** 76: 128 S.
- Schwarz, O. (1985): Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen in Baden-Württemberg.- **Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau** 71: 185-230 S.
- Schwertmann, U., Vogl, W. & Kainz, M. (1987): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- Eugen Ulmer, Stuttgart: 64 S.
- Seebach, H. (1994): Pfälzerwald: Waldbauern, Waldarbeiter, Waldprodukten- und Holzwarenhandel, Waldindustrie und Holztransport.- Altes Handwerk und Gewerbe in der Pfalz, Band 3. Bachstelz-Verlag, Mainz-Gonsenheim: 324 S.
- Seidel, J. (2004): Massenbilanzen holozäner Sedimente am südlichen und mittleren Oberrhein.- Dissertation, Albert-Ludwig-Universität Freiburg i. Brsg.: 137 S.

- Selter, B. (1995): Waldnutzung und ländliche Gesellschaft - Landwirtschaftlicher "Nährwald" und neue Holzökonomie im Sauerland des 18. und 19. Jahrhunderts.- **Forschungen zur Regionalgeschichte** 13: 482 S.
- Semmel, A. (1964): Junge Schuttdecken in hessischen Mittelgebirgen.- **Notizblatt des hessischen Landesamtes für Bodenforschung** 92: 275-285.
- Semmel, A. (1968): Studien über den Verlauf jungpleistozäner Formung in Hessen.- **Frankfurter Geographische Hefte** 45: 133 S.
- Semmel, A. (2002): Die periglaziale Hauptlage - Genese, Alter und anthropogene Veränderung.- **Terra Nostra** 2002/6: 342-348.
- Semmel, A. & Petschick, R. (2006): Spätglaziale Sedimente und ihre äolischen Beimengungen in einigen deutschen Mittelgebirgen.- **Geologisches Jahrbuch Hessen** 133: 109-120.
- Semmel, A. & Terhorst, B. (2010): The concept of the Pleistocene periglacial cover beds in central Europe: A review.- **Quaternary International** 222: 120-128.
- Seppä, H., Birks, H.J.B., Giesecke, T., Hammarlund, D., Alenius, T., Antonsson, K., Bjune, A.E., Heikkilä, M., MacDonald, G.M., Ojala, A.E.K., Telford, R.J. & Veski, S. (2007): Spatial structure of the 8200 cal yr BP event in northern Europe.- **Climatic of the Past** 3: 225-236.
- Sidle, R.C., Ziegler, A.D., Negishi, J.N., Nik, A.R., Siew, R. & Turkelboom, F. (2006): Erosion processes in steep terrain - Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia.- **Forest Ecology and Management** 224: 199-225.
- Sidorchuk, A., Walling, D.E. & Wasson, R. (Eds.) (2003): A LUCIFS Strategy: Modelling the sediment budgets of fluvial systems.- In: A. Lang, K. Hennrich & R. Dikau (Series Eds.): Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling - Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment.- LNES 101, Springer, Heidelberg: 19-35.
- Siegrist, S. (2004): Aktuelle Erodierbarkeit von Böden in verschiedenen Landschaftstypen der Schweiz - Methoden und Modelle.- Dissertation, Universität Basel: 165 S.
- Slaymaker, O. (2003): The sediment budget as conceptual framework and management tool.- **Hydrobiologia** 494: 71-82.
- Sperber, L. (2001): Die Pfalz in der Vorgeschichte.- In: K.-H. Rothenberger, K. Scherer, F. Staab & J. Keddigkeit (Hrsg.): Pfälzische Geschichte Band 1.- Institut für pfälzische Geschichte und Volkskunde, Kaiserslautern: 1-27.
- Stäblein, G. (1968): Reliefgenerationen der Vorderpfalz - Geomorphologische Untersuchungen im Oberrheingraben zwischen Rhein und Pfälzer Wald.- **Würzburger Geographische Arbeiten** 23: 191 S.
- Stahr, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald.- **Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen** 9: 273 S.
- Stankoviansky, M. (2003): Historical evolution of permanent gullies in the Myjava Hill Land, Slovakia.- **Catena** 51(3-4): 223-239.
- Stevens, A. & Wesemael, B.v. (2008): Soil organic carbon stock in the Belgian Ardennes as affected by afforestation and deforestation from 1868 to 2005.- **Forest Ecology and Management** 256: 1527-1539.

- Stolz, C. (2005): Historisches Grabenreißen im Wassereinzugsgebiet der Aar zwischen Wiesbaden und Limburg.- Dissertation, Johann-Gutenberg-Universität Mainz: 305 S.
- Stolz, C. & Grunert, J. (2008): Floodplain sediments of some streams in the Taunus and Westerwald Mts., western Germany, as evidence of historical land use.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** 52(3): 349-373.
- Strittmatter, W. (1986): Wurde die Gefährdung der Natur durch den Menschen nicht rechtzeitig erkannt? Zur Diskussion der Thesen Radkaus.- **In**: H. Lübke & E. Ströker (Hrsg.): Ökologische Probleme im kulturellen Wandel.- Fink Verlag/Ferdinand Schönigh, 79-92.
- Stuckert, H. (1960): Weidenthal - Die Geschichte eines Walddorfes.- Gemeinde Weidenthal/Pfalz, Lambrecht: 332 S.
- Sturm, A. (1959): Die Wälder des östlichen Nordpfälzer Berglandes.- **Veröffentlichungen der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften** 39: 257 S.
- Swiaczny, F. (1998): Die Verkehrserschließung des Pfälzerwaldes und ihre Auswirkung auf die räumlich differenzierte Bevölkerungsentwicklung.- **In**: D. Anhuf (Hrsg.): Beiträge zur Landeskunde Südwestdeutschlands und angewandten Geographie.- Geographisches Institut der Universität Mannheim: 121-144.
- Thiemeyer, H. & Veith, H. (1993): Bodenkundliche und schwermineralogische Untersuchungen an ausgewählten periglazialen Deckschichtenprofilen in NE-Bayern.- **Berliner Geographische Arbeiten** 78: 265-286.
- Thiemeyer, H., Blümel, W.D., Dambeck, R., Dieckmann, B., Eberle, J., Glade, T., Hecht, S., Houben, P., Moldenhauer, K.-M., Schrott, L., Schulte, A., Vogt, R. & Wunderlich, J. (2005): Soils, sediments and slope processes and their effects on sediment fluxes into the river Rhine.- **Erdkunde** 59: 184-198.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B. & Lotter, A.F. (2005): Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age.- **The Holocene** 15(8): 1214-1226.
- Trimble, S.W. (1983): A sediment budget for Coon Creek basin in the Driftless Area, Wisconsin, 1853-1977.- **American Journal of Science** 283(5): 454-474.
- Trimble, S.W. (1999): Decreased rate of alluvial sediment storage in the Coon Creek Basin, Wisconsin, 1975-93.- **Science** 285: 1244-1246.
- Troßbach, W. (Hrsg.) (1993): Bauern 1648-1806.- Enzyklopädie Deutscher Geschichte, Band 19, R. Oldenbourg Verlag, München: 159 S.
- Uhly, E. (2006): Die Gemeinde Elmstein in alten Bildern: die Vergangenheit vor dem Vergessen bewahren.- Geiger-Verlag, Horb a.N.: 160 S.
- Ussiri, D.A.N. & Johnson, C.E. (2007): Organic matter composition and dynamics in a northern hardwood forest ecosystem 15 years after clear-cutting.- **Forest Ecology and Management** 240: 131-142.
- Valentin, C., Poesen, J. & Li, Y. (2005): Gully erosion: impacts, factors and control.- **Catena** 63: 132-153.
- Van Balen, R.T., Houtgast, R.F., Van der Wateren, F.M., Vandenberghe, J. & Bogaart, P.W. (2000): Sediment budget and tectonic evolution of the Meuse catchment in the Ardennes and the Roer Valley Rift System.- **Global and Planetary Change** 27: 113-129.

- van Hooff, P.P.M. & Jungerius, P.D. (1984): Sediment source and storage in small watersheds on the Keuper marls in Luxembourg: As indicated by soil profile truncation and the deposition of colluvium.- **Catena** 11(1): 133-144.
- Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P. (2000): Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage.- **Landscape Ecology** 15: 577-589.
- Van Oost, K., Van Myusen, W., Govers, G., Heckrath, G., Quine, T.A. & Poesen, J. (2003): Simulation of the redistribution of soil by tillage on complex topographies.- **European Journal of Soil Science** 54(1): 63-76.
- Van Oost, K., Van Myusen, W., Govers, G., Deckers, J. & Quine, T.A. (2005): From water to tillage erosion dominated landform evolution.- **Geomorphology** 72: 193-203.
- Van Rompaey, A., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G. & Poesen, J. (2001): Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach.- **Earth Surface Processes and Landforms** 26: 1221-1236.
- Ventura, E., Nearing, M.A., Amore, E. & Norton, L.D. (2002): The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer.- **Catena** 48: 149-161.
- Verstraeten, G., Rommens, T., Peeters, I., Poesen, J., Govers, G. & Lang, A. (2009): A temporarily changing Holocene sediment budget for a loess-covered catchment (central Belgium).- **Geomorphology** 108: 24-34.
- Voges, J. (1999): Empirisches Modell für die mittlere Maßstabebene zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer.- Dissertation, Universität zu Hannover: 231 S.
- Völkel, J. (1995): Periglaziale Deckschichten und Böden im Bayerischen Wald und seinen Randgebieten als geogene Grundlagen landschaftsökologischer Forschung im Bereich naturnaher Waldstandorte.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** Suppl. 96: 301 S.
- Völkel, J. & Leopold, M. (2001): To the age of the youngest stage of periglacial morphodynamics on slopes in the Central European Highlands.- **Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge** 45(3): 273-294.
- Völkel, J. & Mahr, A. (2001): Die IRSL-Datierung von periglazialen Hangsedimenten - Ergebnisse aus dem Bayerischen Wald.- **Zeitschrift für Geomorphologie** 45: 285-305.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Müller, J., Jouzel, J. & Johnson, S. (1998): The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland.- **Climate Dynamics** 14: 73-81.
- Wagner, G.A. (1998): Age determination of young rocks and artifacts: physical and chemical clocks in quaternary geology and archaeology.- Natural science in archaeology, Springer, Berlin: 466 S.
- Wallbrink, P.J., Roddy, B.P. & Olley, J.M. (2002): A tracer budget quantifying soil redistribution on hillslopes after forest harvesting.- **Catena** 47: 179-201.
- Wallbrink, P.J. (2004): Quantifying the erosion processes and land-uses which dominate fine sediment supply to Moreton Bay, Southeast Queensland, Australia.- **Journal of Environmental Radioactivity** 76: 67-80.
- Walling, D.E., He, Q. & Blake, W.H. (2000): River floodplains as phosphorous sinks.- **IAHS Publications** 263: 211-218.

- Walling, D.E., Russel, M.A., Hodgkinson, R.A. & Zhang, Y. (2002): Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK.- **Catena** 47: 323-353.
- Weber, F.W. (1978): Die Geschichte der Mühlen und des Müllerhandwerks der Pfalz: dargestellt nach gegenständlichen Befunden, archivalischen Quellen und der mündlichen Überlieferung.- Arbogast, Otterbach b. Kaiserslautern: 339 S.
- Weidmann, W. (1968): Die pfälzische Landwirtschaft zu Beginn des 19. Jahrhundert - Von der Französischen Revolution bis zum Deutschen Zollverein.- **Veröffentlichungen des Instituts für Landeskunde des Saarlandes** 14: 304 S.
- Witte, W., Krahe, P. & Liebscher, H.J. (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse.- Report II-9, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR, Lelystad: 69.
- Wolters, S. (2007): Zur spätholozänen Vegetationsgeschichte des Pfälzer Waldes.- **Eiszeitalter und Gegenwart** 56(3): 139-161.
- Yu, B. (2003): A Unified Framework for Water Erosion and Deposition Equations.- **Journal of Soil Science Society of America** 67: 251-257.
- Zevenbergen, L. & Thorne, C. (1987): Quantitative analysis of land surface topography.- **Earth Surface Processes and Landforms** 12: 47-56.
- Zintl, H. (2006): Johanniskreuz – Im Herzen des Pfälzerwaldes: Eine Forst- und Waldgeschichte.- Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern: 188 S.

Lebenslauf und Akademischer Werdegang



1979 10. April geboren in Halle an der Saale

1997 Allgemeine Hochschulreife

AUSBILDUNG

10/1997-10/2004 Diplom-Studium Geographie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Diplomarbeit: Erstellung von digitalen Bodenprognosekarten mit Künstlichen Neuronalen Netzen am Beispiel des Pfälzer Waldes und des Mittleren Saaletals

Betreuer: Prof. Dr. Thomas Scholten, Dr. Thorsten Behrens

Schwerpunkte:

- Data Mining, Künstliche Intelligenz
- Bodenkunde, Geomorphologie, Landschaftsentwicklung,
- Hydrologische Systemanalyse und Modellierung,
- Ökologie, Geologie an der FSU Jena,
- Stadt- und Regionalplanung an der Bauhaus Universität Weimar

BERUFSERFAHRUNG

10/2004-03/2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena

- Publizierung der Diplomarbeitsergebnisse,
- Vorlesungs- und Exkursionsvorbereitung

04/2005-03/2010 Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Institut für Physische Geographie, Goethe-Universität Frankfurt/Main

- Promotionsthema: Sedimentbilanzierung in Mittelgebirgen: Historische Bodenerosion mesoskaliger Einzugsgebiete am Beispiel des Speyerbachs, Pfälzerwald,
- Schwerpunkte: Geomorphologie, Klimageographie, Wissenschaftstheorie
- Lehrtätigkeit,
- Gremien- und Alumniarbeit bei Geoprax e.V.

Betreuer: Prof. Dr. Jürgen Wunderlich, Dr. Peter Houben

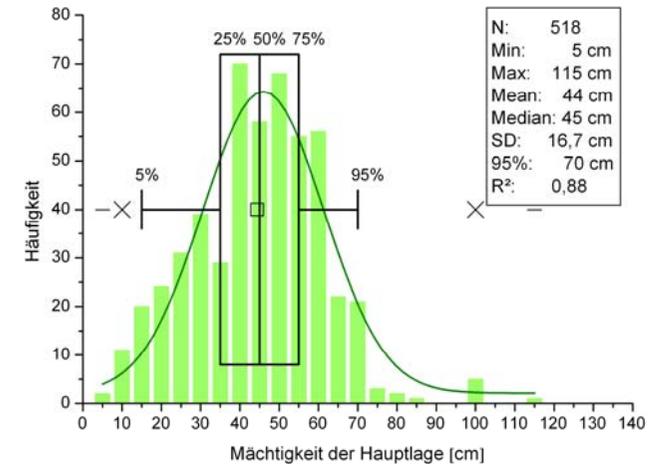
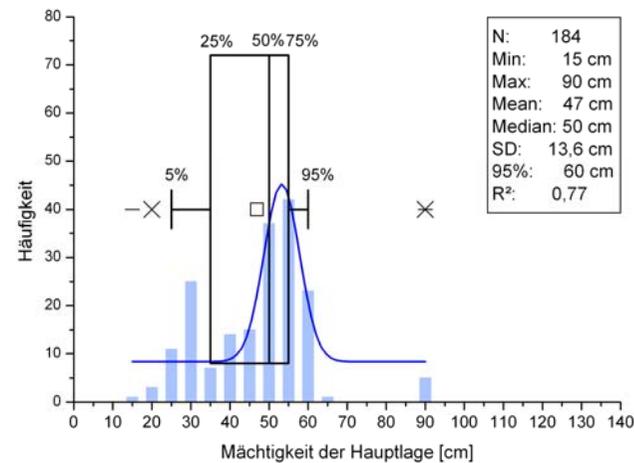
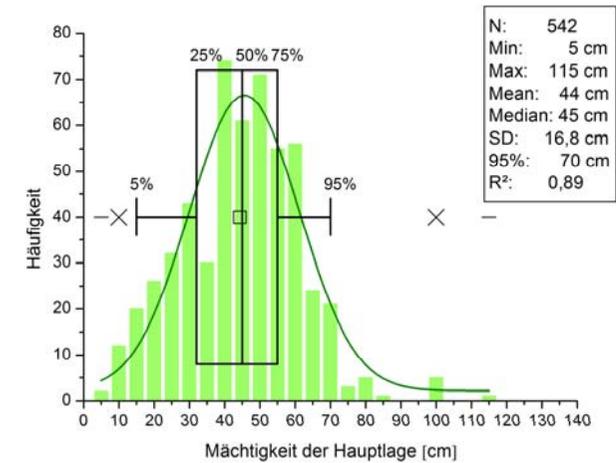
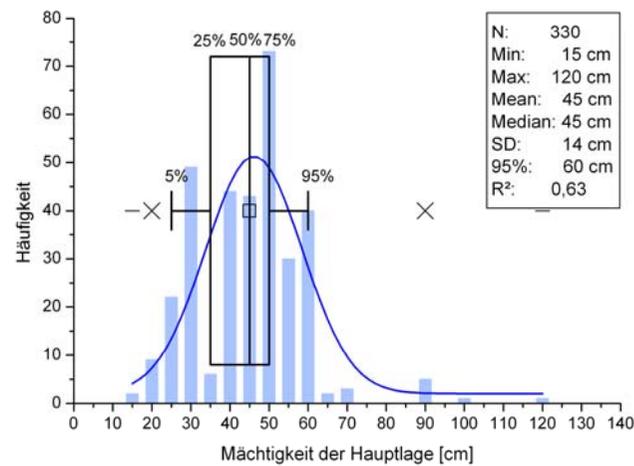
12/2010 Wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg in Freiburg im Breisgau

- Projektarbeit zur Präzisionsnavigation im Wald

Betreuer: Dr. Hans Udo Sauter und Dr. Stephan Verhoff, Abteilung Waldnutzung

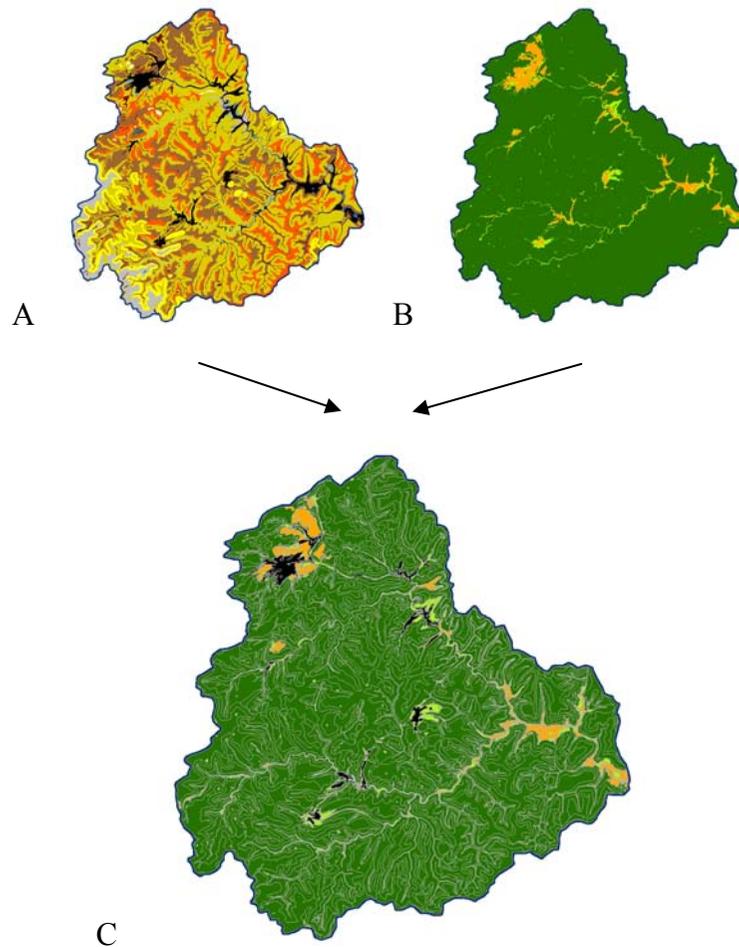
Anhang

Anhang 1a: Statistische Charakterisierung des Kartendatensatzes (oben: Gesamtdatensatz, unten: Speyerbachprofile). Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten des Kartendatensatzes, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.	193
Anhang 1b: Statistische Charakterisierung des Grunddatensatzes (oben: Gesamtdatensatz, unten: Speyerbachprofile). Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten des Grunddatensatzes, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.	193
Anhang 2: Disaggregation der BK 50 (C) anhand der BK 50 (A) und den BoFA reklassifizierten ATKIS-Daten (B) unter Zuhilfenahme des Zuordnungsschlüssels nach prof.dbf für den Kartendatensatz des Speyerbach-Einzugsgebiets. Die Farbcodierung entspricht den Klassen Wald (dunkelgrün), Grünland (hellgrün), Acker (orange).	194
Anhang 3: Ausschnitt aus der Berechnungsmatrix für die Bilanz Ib des Speyerbach-Einzugsgebiets, Berechnungsgrundlage = 70 cm.	195
Anhang 4: Überblick über die archäologischen Fundorte im Speyerbach-Einzugsgebiet klassifiziert nach Kulturepochen und Befundkategorie (Datenquelle: PGIS des Landesamts für Archäologie 2007).....	196
Anhang 5: Mittlere und extreme Hoch- und Niedrigwässer am Mittelrhein (aus: WITTE ET AL. 1995: 33).	197
Anhang 6: Historische Zeitreihen von 1550 der Frühjahrs- und Sommerwitterung in der Rheinpfalzregion um Deidesheim nach Primär und Sekundärquellen (aus: LAUER & FRANKENBERG 1986).	198
Anhang 7: Exkurs: Die Holznotdebatte aus Sicht der Umwelthistoriker.....	199
Anhang 8: Kartierte Bodenprofile im Erlenbach-Teileinzugsgebiet dargestellt auf der Reliefeinheiten-karte, die Datengrundlage für die Sedimentbilanz II bildend.	205
Anhang 9: Kartierte Bodenprofile im Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet sowie die Reliefeinheitenkarte, die die Datengrundlage für die Sedimentbilanz II bilden.....	206
Anhang 10: Statistische Charakterisierung des Erosionsdatensatzes für den Speyerbach, den Hochspeyerbach, den Erlenbach, den Mückentalgraben und das Tiergartentälchen: Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.	207
Anhang 11: Korngrößenverteilungen der beprobten Horizonte des Mückentalgrabens und des Tiergartenprofils.	208
Anhang 12: Wahrscheinlichkeitsdichtekurven für alle im Mückentalgraben und Tiergarten entnommenen OSL-Proben. Dargestellt sind die normierten Paläodosen mit individuellen Fehlerbalken und der resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichtekurve je Probe. Nur die ausgefüllten <i>aliquote</i> gingen in die Altersberechnung ein.	209
Anhang 13: Zur AMS-Datierung eingesendete Holzkohleproben mit Details zur Entnahmestelle und den Datierungsergebnissen für den Mückentalgraben und das Tiergartenprofil.....	210
Anhang 14: Kalibrierte Alter der AMS-Datierung eingesendeter Holzkohleproben des Mückentalgrabens und des Tiergartenprofils.	211
Anhang 15: Zusammenstellung der Entwicklung der Eisenbahn in England (blau), Preußen (orange) und der Rheinpfalz (grün) zwischen 1825 und 1913 und die Bedeutung für die Pfälzer Eisenwerke (CLOER & KAISER-CLOER 1984: 426ff, HENDERSON 1966: 138ff, SWIACZNY 1998: 131ff.)	212



Anhang 1a: Statistische Charakterisierung des Kartendatensatzes (oben: Gesamtdatensatz, unten: Speyerbachprofile). Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten des Kartendatensatzes, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.

Anhang 1b: Statistische Charakterisierung des Grunddatensatzes (oben: Gesamtdatensatz, unten: Speyerbachprofile). Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten des Grunddatensatzes, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.



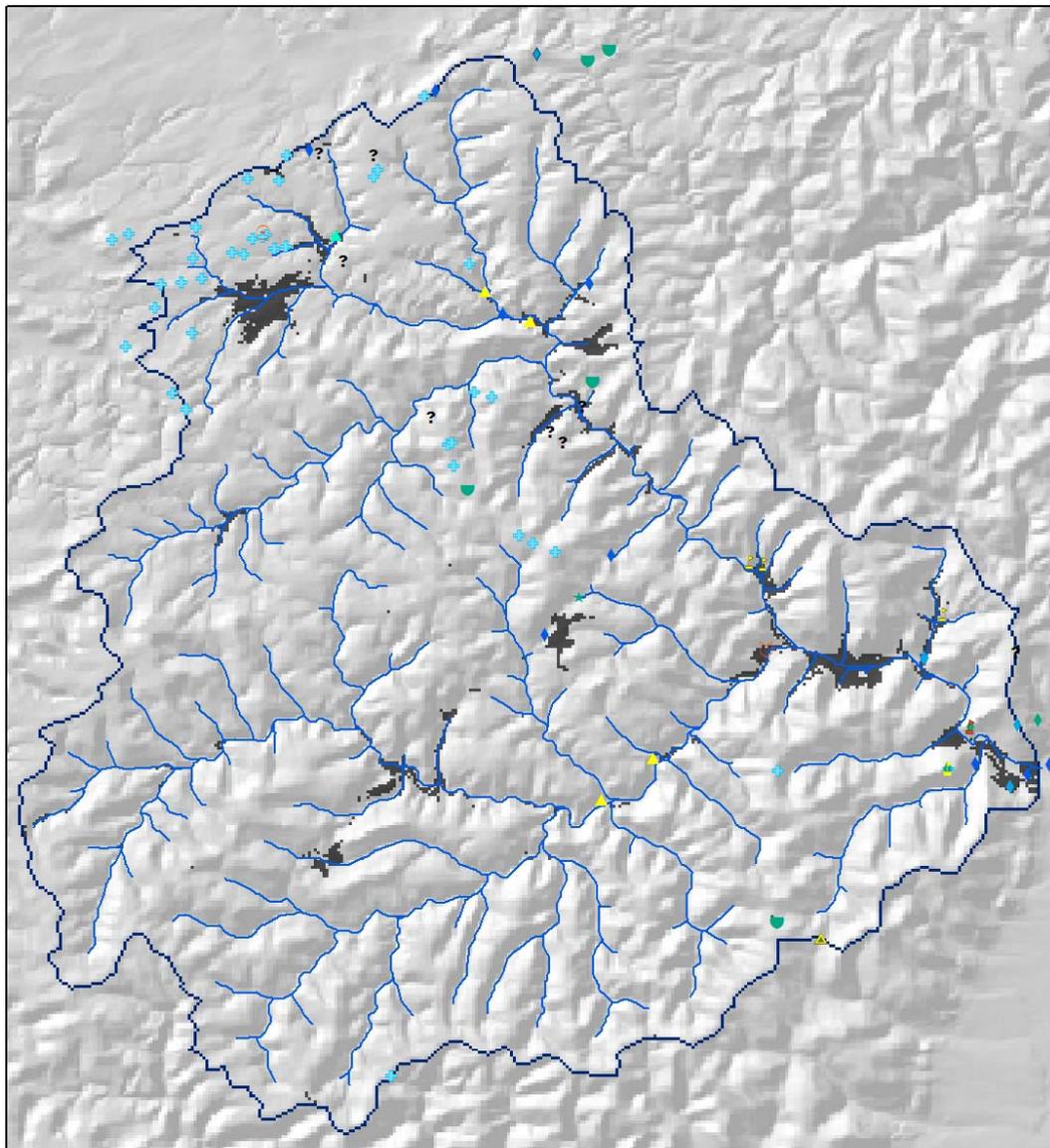
NrBFG	NrBF	Name der Bodenform	FLANT	Nutzung
1	168	podsolige Braunerde aus lößlehmhaltigem, schufführendem Sand (Hauptlage) über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	A
1	170	podsolige, pseudogley Braunerde aus schufführendem Sand (Hauptlage) über schufführendem Lehm (Mittellage) über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein)	10 - 30 % Flächenanteil	A
1	227	(Nom-) Braunerde aus lößlehmarmem, grusführendem Sand (Hauptlage) über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	30 - 70 % Flächenanteil	A
1	1	podsolige Braunerde aus lößlehmhaltigem, schufführendem Sand (Hauptlage) über Schuttsand (Basislage) über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
1	8	podsolige Braunerde aus schufführendem Sand (Hauptlage) über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
1	29	(Nom-) Regosol aus flachem Mischschuttsand über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
1	169	Braunerde aus lößlehmhaltigem, schufführendem Sand (Hauptlage) über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	> 70 % Flächenanteil	F
1	214	Pseudogley (Nom-) Braunerde aus lößarmem, schufführendem Sand (Hauptlage) über lößlehmarmem, schufführendem Lehm (Mittellage) über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	10 - 30 % Flächenanteil	F
...				
39	139	Podsoliger (Nom-) Kolluvisol aus schufführendem Kolluvialsand über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	A
39	144	(Nom-) Kolluvisol aus lößhaltigem grusführendem Kolluvialsand (qh) über Verwitterungsschutt (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	A
39	281	(Nom-)Kolluvisol aus lößarmem, grusführendem Kolluvialsand (qh) über sehr tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein (sm))	> 70 % Flächenanteil	A
39	282	podsoliger Pseudogley - Kolluvisol aus lößlehmarmem, schufführendem Sand (Hauptlage) über Verwitterungsschuttsand (Sandstein)	10 - 30 % Flächenanteil	A
39	3079	(Nom-) Kolluvisol aus schufführendem Kolluvialsand über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	30 - 70 % Flächenanteil	A
39	142	Kolluvisol aus schufführendem Kolluvialsand über sehr tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
39	143	Kolluvisol aus schufführendem Sand über tiefem Verwitterungsschutt (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
39	215	podsoliger Kolluvisol aus lößlehmhaltigem, schufführendem Kolluvialsand über Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	F
39	283	podsoliger Pseudogley - Kolluvisol aus lößlehmhaltigem, schufführendem Sand (Hauptlage) über lößlehmhaltigem, schufführendem Lehm (Mittellage) über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein)	10 - 30 % Flächenanteil	F
39	3078	podsoliger (Nom-) Kolluvisol aus grusführendem Kolluvialsand (qh) über sehr tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	10 - 30 % Flächenanteil	F
39	3080	(Nom-) Kolluvisol aus lößhaltigem grusführendem Kolluvialsand (qh) über Verwitterungsschutt (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	30 - 70 % Flächenanteil	F
39	138	podsoliger (Nom-) Kolluvisol aus grusführendem Kolluvialsand (qh) über sehr tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	G
39	140	podsoliger Kolluvisol aus schufführendem Kolluvialsand über tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein/Mittlerer Buntsandstein)	< 10 % Flächenanteil	G
39	3077	(Nom-)Kolluvisol aus lößarmem, grusführendem Kolluvialsand (qh) über sehr tiefem Verwitterungsschuttsand (Sandstein (sm))	10 - 30 % Flächenanteil	G
...				

Anhang 2: Disaggregation der BK 50 (C) anhand der BK 50 (A) und den BoFA reklassifizierten ATKIS-Daten (B) unter Zuhilfenahme des Zuordnungsschlüssels nach prof.dbf für den Kartendatensatz des Speyerbach-Einzugsgebiets. Die Farbcodierung entspricht den Klassen Wald (dunkelgrün), Grünland (hellgrün), Acker (orange).

Schlüssel -code	Nr BFG	Nr BF	Nutz	Flant_ class	m ² BFG_ ATKIS_BoFA	% FLANT	m ² BF	maecht_ LH (m)	Erosions -tiefe	m ³ Erosion	Tonnen_E (TD=1,43)	maecht_ Akkum (m)	m ³ Akkum	Tonnen_A (TD=1,43)
130029	1	29	A	3	18705276,00	21	3928107,96		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
130214	1	214	A	4	18705,28	9	1683,47	0,45	0,25	420,87	601,84		0,00	0,00
130227	1	227	A	2	18705,28	70	13093,69	0,50	0,20	2618,74	3744,80		0,00	0,00
						100								
110001	1	1	F	4	5187403,02	5	259370,15	0,55	0,15	38905,52	55634,90		0,00	0,00
110008	1	8	F	4	5187403,02	5	259370,15	0,55	0,15	38905,52	55634,90		0,00	0,00
110168	1	168	F	1	5187403,02	70	3631182,12	0,55	0,15	544677,32	778888,56		0,00	0,00
110169	1	169	F	3	5187403,02	15	778110,45	0,55	0,15	116716,57	166904,69		0,00	0,00
110170	1	170	F	4	5187403,02	5	259370,15	0,55	0,15	38905,52	55634,90		0,00	0,00
						100								
210002	2	2	F	2	38331,06	45	17248,98	0,55	0,15	2587,35	3699,91		0,00	0,00
210168	2	168	F	2	38331,06	45	17248,98	0,55	0,15	2587,35	3699,91		0,00	0,00
210218	2	218	F	4	38331,06	5	1916,55	0,90	-0,20	0,00	0,00		0,00	0,00
210219	2	219	F	4	38331,06	5	1916,55	0,90	-0,20	0,00	0,00		0,00	0,00
						100								
330013	3	13	A	4	183444,99	5	9172,25		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
330041	3	41	A	2	183444,99	40	73378,00	0,55	0,15	11006,70	15739,58		0,00	0,00
330043	3	43	A	2	183444,99	40	73378,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
330131	3	131	A	4	183444,99	5	9172,25		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
330173	3	173	A	4	183444,99	5	9172,25		0,00	0,00	0,00	0,60	5503,35	7869,79
330203	3	203	A	4	183444,99	5	9172,25	0,45	0,25	2293,06	3279,08		0,00	0,00

Anhang 3: Ausschnitt aus der Berechnungsmatrix für die Bilanz Ib des Speyerbach-Einzugsgebiets, Berechnungsgrundlage = 70 cm.

Archäologische Fundstellen im Untersuchungsgebiet



Hintergrundinfos

- Fließgewässer
- Siedlungen
- Speyerbach-EZG



Maßstab: 1:125,000

Kulturepochen

- ◆ Neuzeit
- ◆ Mittelalter
- ◆ Eisenzeit
 - ◆ Röm. Kaiserzeit
 - ◆ Latene/Vorröm. EZ
 - ◆ Hallstatt
- ◆ Bronzezeit
- ◆ Neolithikum
- ◆ Vorgeschichte
- ? unbekannt

Befunde

- ◆ Einzelfund
- ◆ Depotfund
- + Hügelgrab
- + Gräber/-felder
- ★ Steindenkmal
- + Kirche
- ⚡ Burg/Kapelle/Wehranlage/Stadtmauer
- ▲ Siedlungsfund
- ♥ (Alt)Straße
- ◆ Verhüttungsspuren
- ▲ Siedlung/Produktion
- ⊖ Steinbruch
- ⌋ Wasserleitung/Kanal

Quelle: PGIS des Landesamtes für Archäologie, 2007
Entwurf: H.Förster 2009

Anhang 4: Überblick über die archäologischen Fundorte im Speyerbach-Einzugsgebiet klassifiziert nach Kulturepochen und Befundkategorie (Datenquelle: PGIS des Landesamtes für Archäologie 2007).

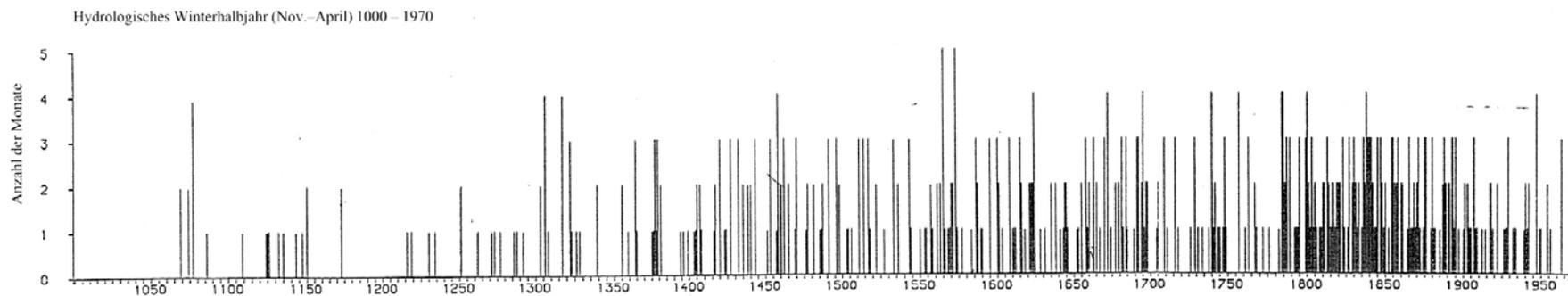
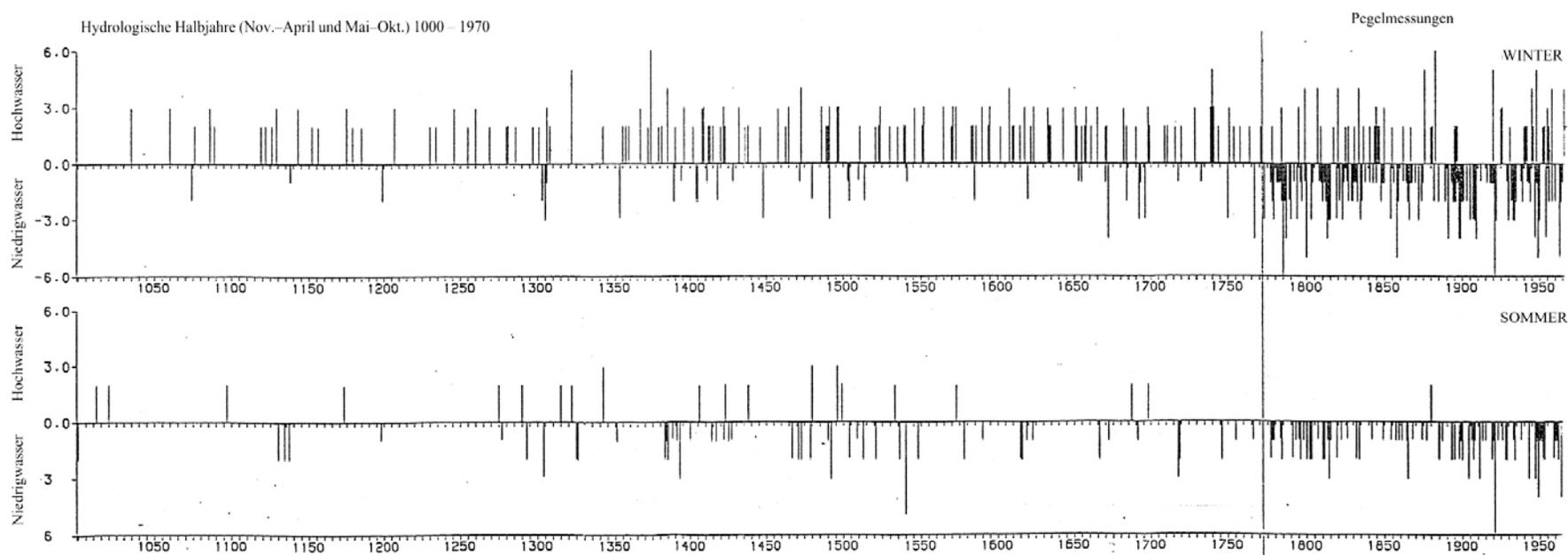


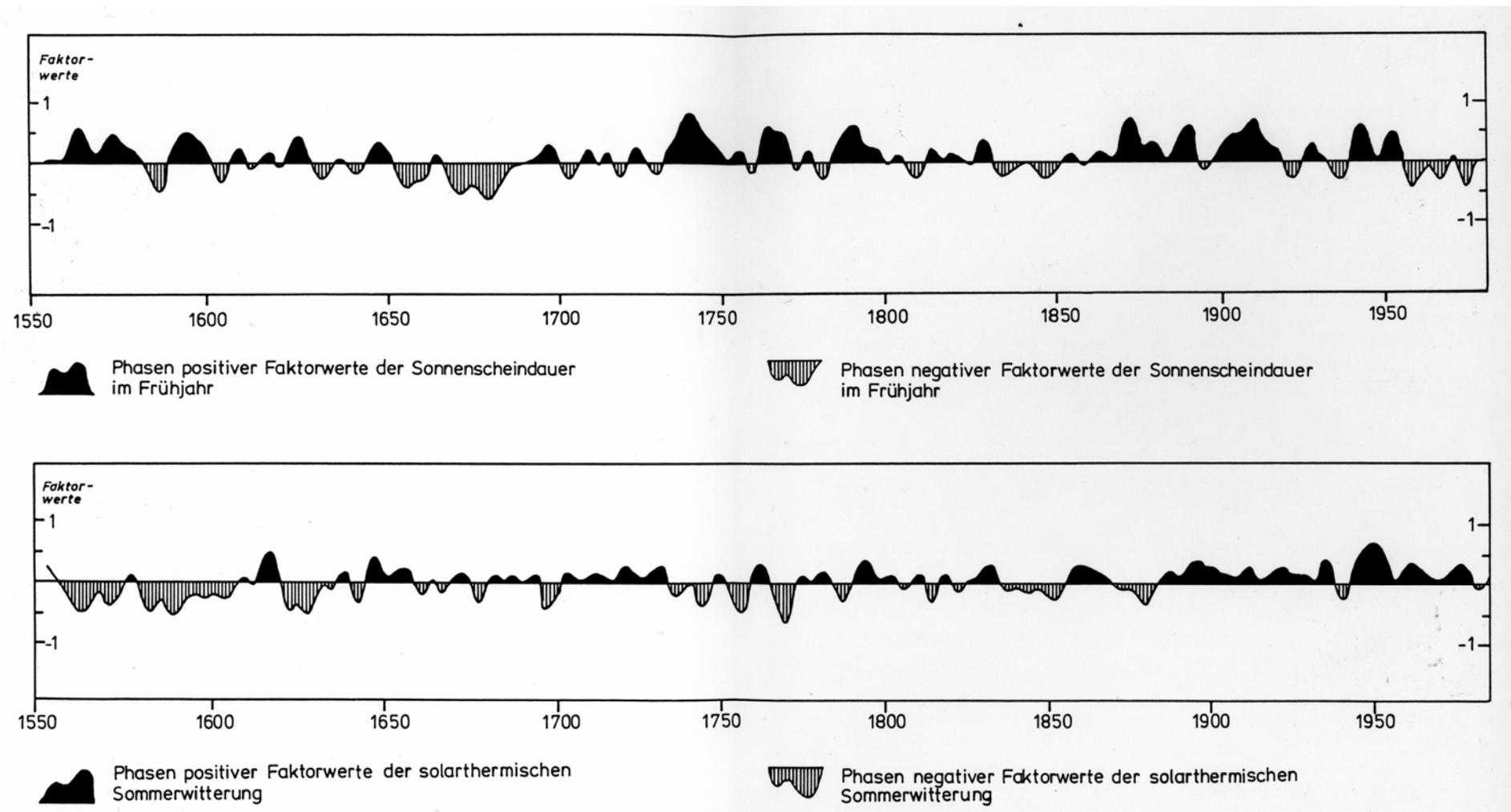
Abb. 4a Treibeis und Eisstand auf dem Rhein.



Hochwasser: 2 ausgefertes Hochwasser mit Schadenswirkung
 (-Index) 3 ausgefertes Hochwasser mit erheblicher Schadenswirkung
 >3 Summe mehrerer Hochwasserereignisse

Niedrigwasser: Anzahl der Monate mit Meldungen über Niedrigwasser

Anhang 5: Mittlere und extreme Hoch- und Niedrigwässer am Mittelrhein (aus: WITTE ET AL. 1995: 33).



Anhang 6: Historische Zeitreihen von 1550 der Frühjahrs- und Sommerwitterung in der Rheinpfalzregion um Deidesheim nach Primär und Sekundärquellen (aus: LAUER & FRANKENBERG 1986).

Anhang 7:

Exkurs: Die Holznotdebatte aus Sicht der Umwelthistoriker

Eine regelmäßige und großflächige, die gesamten Waldbestände umfassende Bewirtschaftung der Wälder im Untersuchungsgebiet lässt sich für die kurpfälzischen Bereiche der Pfalz erst seit der Mitte des 18. Jahrhunderts belegen. Die in historischen Quellen oft beschriebene Holznot liegt im Falle des Pfälzerwaldes erst ab den 1850er Jahren und dann nur am Haardtrand und in den Haingeraidewäldern vor, so postuliert ALLMANN (1989) seine mentalitäts- und sozialgeschichtliche These⁴³. In der Heftigkeit der Sanktionierungen und der offensichtlichen Unglaubwürdigkeit der immer wieder als Argument für weitere Einschränkungen der Holznutzung durch die Bevölkerung ins Feld geführten Holznot sieht ALLMANN (1989: 98ff) den Ausdruck absolutistischer Machtdemonstrationen und ein Mittel zur Durchsetzung wirtschaftlicher, rechtlicher und sozialer Strukturen. ALLMANN (1989) entlarvt die in den Forstverordnungen wiederholt beschriebenen Holznöte mit seiner sozial- und mentalitätsgeschichtlichen Quellenkritik als haltlos und postuliert zwei Phasen unterschiedlicher Nutzungsintensität seit der Besiedlung der kurpfälzischen Gebiete: eine räumlich und zeitlich extensive, auf Ertragserhaltung ausgerichtete Phase bis Mitte des 18. Jahrhunderts und eine auf Gewinnmaximierung fixierte intensive Umgestaltung und planvolle Bewirtschaftung der Wälder seitdem. Die Dekonstruktion der allgemeinen Energiekrise des 18. Jahrhunderts auf ein regionales Problem (vor allem des Transports) ist jedoch nicht nur die These von ALLMANN (1989), die sich auf den Pfälzerwald zwischen 1500 und 1800 beschränkt. Will man seine Arbeit einordnen, die dem Leser aufgrund der vehementen Bevorzugung der Sicht der Bevölkerung vor allem als eindeutige Parteinahme für eben diese erscheint, findet man sich in einem sehr kontrovers von Umwelt- und Forsthistorikern sowie den historischen Geographen geführten Diskurs der Umweltgeschichte wieder. Dieser umfasst eher polarisierende Arbeiten und Gegendarstellungen (RADKAU 1986; STRITTMATTER 1986), umfangreiche Archivauswertungen für bestimmte Waldgebiete und Zeitabschnitte (ERNST 2000; GREWE 2004, SELTER 1995; STURM 1959), oder z. B. die Arbeit von SCHMIDT (2002) für den südwestdeutschen Raum, um nur einige zu nennen. Dieser Diskurs wird schon seit den 1980er Jahren geführt und es wird betont, dass nicht alle strittigen Fragen per se gelöst werden können. Allerdings sind zwei Erkenntnisse für die Bewertung der Verhältnisse in der Pfalz zu entnehmen:

⁴³ Allerdings umfassen seine archivalischen Auswertungen nur den Zeitraum von 1500 bis 1800 n. Chr.

1. Der Einsatz gleicher politischer Mittel zur Steuerung der Entwicklung im 19. Jahrhundert durch die Landesherrschaften führte zu unterschiedlichen Auswirkungen in der Landnutzung, wie der Vergleich der Arbeiten im Sauerland (SELTNER 1995), in der Eifel, im Hunsrück (ERNST 2000) und im Pfälzerwald zeigt (ALLMANN 1989).
2. Diese Auswirkungen orientieren sich an der Eigenart der politischen Verwaltung, dem Bevölkerungsdruck und dem Vorkommen traditionellen (meist holzintensiven) Gewerbes, weniger an naturräumlichen Aspekten.

ERNST (2000) hat sich der Problematik der Holzversorgung im 18 und 19. Jahrhundert in Teilen der Eifel und des Hunsrücks gewidmet und entlarvt die Holznot-Diskussion als eine „[...] Amöbe, die im Kopf der Sprecher viele Gestalten annehmen konnte. Nur der Zusammenhang, in welchem jeweils von der Holznot die Rede war, enthüllt, welche wechselnden Gestalten sie konkret annahm. Grundsätzlich reagierten alle Waldnutzer mit ihrer Holznot-Rhetorik sowohl auf die immense Wertsteigerung des Holzes als auch auf den historischen Wandel der Wertvorstellungen, von der die Subsistenz sichernden Nahrungswirtschaft hin zur gewinnorientierten Marktökonomie.“ (328f). Er zeigt, dass das Holznotargument sowohl von Gemeinden benutzt wurde, um starke herrschaftliche Holzentnahme zu verhindern, als auch von der Herrschaft, um die Holzentnahmen der Bevölkerung zu minimieren. Der reale, archivalisch belegbare Flächenrückgang fand nach ERNST (2000: 334ff) bei den Gemeindewäldern statt. Wenn auch keine einheitlichen Zahlen für die Gemeindewälder vorliegen, so konnte dennoch bewiesen werden, dass die Gemeinden Brenn-, Kohlholz und Holländerstämme aus ihren Wäldern verkauften und damit ihre Schulden tilgten. ERNST (2000) macht aber darauf aufmerksam, dass bei dieser Debatte zwischen Brennholz und Bauholz zu unterscheiden ist. An Letzterem herrschte 1790 in seinem Untersuchungsgebiet noch kein Mangel. Die Anzahl an Holländerstämmen, die aus den Erzstift'schen Wäldern exportiert wurden, schwanken zwischen 60 und rund 700 von 1763 bis 1781, ab 1784 stieg die Anzahl und schwankte zwischen 466 und 1528 Stämmen (ERNST 2000: 142,144, 147ff).

Auch in der Arbeit von STURM (1959) lassen sich intensiv genutzte Waldbestände von wenig genutzten separieren. Diese Trennung ist, wie die Autorin zeigt, nicht primär naturräumlich gesteuert, vielmehr wird auch aus ihrer Arbeit deutlich, dass sich die Intensität und Art der Nutzung stark am vorhandenen Gewerbe einer Region orientierte. STURM (1959) konstatiert eine starke Beanspruchung der Wälder der Gemeinden durch die Medums- und Eichenschälwirtschaft und die mangelnden Möglichkeiten der Landwirtschaft, die Waldweide zu substituieren. Allerdings sind auch für die nordpfälzischen Wälder zwei Dinge aufzuführen, die

mit denen des Mittleren Pfälzerwaldes übereinstimmen: Mangelhaft erschlossene und entlegene Bestände sind nicht stark genutzt worden und die Förderung der Nadelbäume erfolgte durch Aufforstung von Ödflächen, die infolge der Übernutzung entstanden waren (STURM 1959: 205ff).

Im Gegensatz zu ALLMANN (1989) sieht ERNST (2000: 84f) in der im Vergleich zum Mittelalter erhöhten Anzahl von neuzeitlichen Forstgesetzen einen Ausdruck der Erstarkung der Staatlichkeit, die sich in einem Regelungsanspruch und der zeitlichen und räumlichen Konkretisierung der Nutzungsziele niederschlägt. ALLMANN (1989) und SELTER (1995) argumentieren in ihren Arbeiten, dass die Landesherrschaft durch die neuzeitlichen Forstgesetze eigene, vor allem fiskalische Interessen stärker gegenüber der Bevölkerung durchsetzten. Dagegen relativiert ERNST (2000) diese Polarisierung zwischen Landesherrschaft und Bevölkerung für den Hunsrück und die Eifel. GRABAS (1995) und STRITTMATTER (1986) zeigen sogar, dass die Landesherrschaft nicht nur finanzielle Interessen am Wald hatte, sondern durch verschiedenste Maßnahmen versuchte, die Holznot zu verhindern. Für GRABAS (1995: 54) stellt sich das Phänomen als ein Problem der „kostenrentablen Verfügbarkeit“ von Holz dar. GREWE (2004: 440) bewertet die Veränderung der waldbaulichen Ziele der Forstwirtschaft hin zu einer nachhaltigen Sicherstellung von Bauholz in den 1840er Jahren als prioritären Grund für die Verknappung – und nicht real dezimierte Bestände.

Der Holz-mangel wurde je nach spezifischer Gestaltung der räumlichen, sozialen und technischen Bedingungen unterschiedlich erlebt; teils führte er zu Toten (vornehmlich bei der armen Bevölkerung), teils wurde er nur prognostiziert. Dabei handelt es sich bei der räumlichen Komponente um die Distanz zu Waldflächen, bei der sozialen Komponente um die Bevölkerungs- und Gewerbedichte sowie die Holzverteilung nach sozialem Status. Hinzu kam eine technische Komponente, die durch das unzureichende und unflexible Transportsystem (Ochsenwagen und Triftbäche) gekennzeichnet war und eine Erhöhung der Kapazitäten ohne Investitionen nicht ermöglichte (GRABAS 1995: 53f). Im Gegensatz zu dieser Ansicht geht GREWE (2004: 442) davon aus, dass es sich bei der Erschließung der Waldgebiete seit dem Ausbau zu Beginn des 19. Jahrhunderts nicht mehr um ein begrenzenden Faktor handelte. Auch die wachsende Bevölkerung sieht GREWE (2004) nicht als Ursache für den Mangel an, sondern vielmehr der verhinderte Zugang zur Waldstreu als Dünger, die Kommerzialisierung der Beholzigungsrechte der Bevölkerung und der hohe Preis für andere Energieträger. Demnach waren vor allem die untersten Schichten, die nicht über die ausreichenden Geldmittel verfügten, vom Holz-mangel betroffen.

Dass diesem Mangel nicht nur mit Forstgesetzen und der Umstrukturierung der Forstwirtschaft begegnet wurde, machen GRABAS (1995) und SCHMIDT (2002) deutlich: Holzeinsparung, Substitution mit Torf und Steinkohle werden sowohl für die Gewerbe als auch für die Haushalte empfohlen und gefördert. Darüber hinaus wertet STRITTMATTER (1986) auch herrschaftliche Maßnahmen in der Landwirtschaft⁴⁴, im Verkehrswesen⁴⁵ und der Bevölkerungspolitik⁴⁶ als Eingriff zur Stabilisierung der Versorgungslage der Bevölkerung und des wachsenden Gewerbes. Aus diesen Ergebnissen lässt sich mit SCHMIDT (2002) schließen, dass es sich in der Pfalz im 18./19. Jahrhundert um prognostizierte und inszenierte Holz-mangelsituationen handelte, wobei SCHMIDT (2002) die deutliche Diskrepanz zwischen Vorderpfalz und Pfälzerwald herausstellt. Für die unterste Schicht wurde die Holznot jedoch aufgrund unzureichender Zugangschancen real.

Exemplarisch für den Mittleren Pfälzerwald soll nun auf der Grundlage der Ergebnisse von CLOER & KAISER-CLOER (1984) für die Waldungen, die zum Gienanth'schen Besitz gehörten, der Frage nachgegangen werden, ob während der Industrialisierung eine reale Holznot und damit eine Entwaldung um Trippstadt vorkam (Abb. 52). Die Situation stellte sich nach den Quellen von CLOER & KAISER-CLOER (1984) wie folgt dar: 1770 wurde die Produktion der Wattenheimer Schmelz u. a. wegen Kohlholzmangel eingestellt und 1809/10 der Altleiningener Hammer in eine Drahtzugfabrik umgebaut. 1837/38 musste die Eisenproduktion wegen Holzkohlemangel reduziert werden. Ruft man sich dazu die Ausführungen in Kapitel 3.1.3 in Erinnerung, so fällt auf, dass sich zwischen 1779 und 1853 die Umtriebszeiten von 60 Jahren verdoppelt haben und dass die Forstwirtschaft zumindest in der Kurpfalz auf die Erzeugung vom Stammholz (Bauholz) umgestellt wurde. Die Altersstruktur des Elmsteiner Waldes veranschaulicht dies sehr schön (Abb. 21 und Abb. 22): 1785 dominieren in der Fläche (~75 %) Bestände mit Bäumen die jünger waren als 60 Jahre. 1810 sind schon 50 % von hiebbaren Bäumen bestanden (60 bis 100 Jahre). Bis 1853 hat sich das Alter erhöht: >55 Flächenprozent ist mit 80 - 140 Jahre alten Bäumen bestanden und es wird eine Umtriebszeit von 120 Jahren für Nadel- bzw. 144 Jahren für Laubbäume festgelegt. Damit wird von der Forstwirtschaft bis 1850 Holz, das vorher als abgängig potentiell für die Köhlerei zur Verfügung stand, als Bauholz ausgewiesen und steht nicht mehr für die Eisenwerke zur Verfügung. Der Argumentation von CLOER & KAISER-CLOER (1984) kann also nicht gefolgt werden:

⁴⁴ Einführung der Stallhaltung, Förderung des Kartoffelanbaus, Pflanzen- und Tierzüchtungen, Entwicklung von Düngersurrogaten, Entwicklung von Methoden zur Nahrungsmittelkonservierung (STRITTMATTER 1986: 85)

⁴⁵ Ausbau des Wegenetzes und der Eisenbahn, Ausbau des Triftwesens, Flusskorrekturen, Landnahme durch Trockenlegung von Mooren etc. (STRITTMATTER 1986: 85)

⁴⁶ Förderung der Auswanderung, staatliche gelenkte Verteilung des Brennholzes (STRITTMATTER 1986: 85)

Pro: CLOER & KAISER-CLOER (1984: 237) sehen in der vertraglichen Festschreibung mit den bayrischen Staatswäldungen 1832, laut welcher erst Nadelhölzer verkohlt werden müssen, ein Zeichen sich verknappender Holzressourcen und steigender Holzpreise.

Contra: Das Ansteigen der Holzpreise ist ab 1814 dokumentiert, wobei starke Unterschiede zwischen den Werken Hochstein, Trippstadt und Eisenberg vorliegen. Dazu muss erwähnt werden, dass die Verträge zum Ankauf von Kohlholz aus Staats- und Privatwäldungen ausgehandelt wurden, hier also schon Differenzen entstehen konnten. Dazu kommen unterschiedlich lange Transportwege zum Werk.

Wie man in Abbildung 52 b) und c) sehen kann, war der Holzkohleverbrauch um 1845 am höchsten, obwohl die Hochofenproduktion nicht zunahm. Bis 1850 sank der Verbrauch stark, auch die Produktion nahm ab. Dies fiel mit dem Produktionsrückgang im Revolutionsjahr 1848, der immens gestiegenen Verfügbarkeit von saarländischem Koks und immer noch steigenden Roheisenimporten (Abb. 52 b und c) zusammen.

Pro: Die seit 1835 steigenden Holzpreise werden von CLOER & KAISER-CLOER (1984: 245) als Indikator für Kohlholzmangel angesehen, der die Familie Gienanth veranlasste 1845 noch einmal 635 ha Wald bei Landstuhl zu kaufen.

Contra: Allerdings fielen in diese Zeit auch das Sinken der Zollschränken in Europa und die sich erhöhende Konkurrenz durch ausländische Eisenprodukte.

Anhand der Zusammenstellung in Anhang 8 ist eindrücklich nachzuvollziehen, dass auch der späte Bau der Eisenbahn Auswirkungen auf die Entwicklung der Gienanth'schen Eisenwerke hatte und wie die Entwicklung in der Kurpfalz im Vergleich mit der Preußens oder Englands vor sich ging. Das Beispiel der Eisenwerke der Familie Gienanth zeigt eindrücklich, wie sich lokale (vor allem naturräumliche und erschließungstechnische) Bedingungen des Trippstädter Werks mit regionalen (allen Gienanth'schen Eisenwerken in der Pfalz) und überregionalen Rahmenbedingungen und Entwicklungen (Zollunion, Eisenproduktion in England und Belgien, Kohleförderung im Saarland, Technische Erneuerungen) durchdringen. Der Zugriff auf die Ressource Wald und damit das räumliche und zeitliche Muster der Landnutzung unterliegt damit sehr vielfältigen sozialen Einflussgrößen, deren Geflecht sich nur schemenhaft über Statistiken, Gerichtsprozessakten oder Holzrechnungen rekonstruieren lässt, nicht zuletzt aufgrund der lückenhaften Quellenlage durch Kriegsverluste.

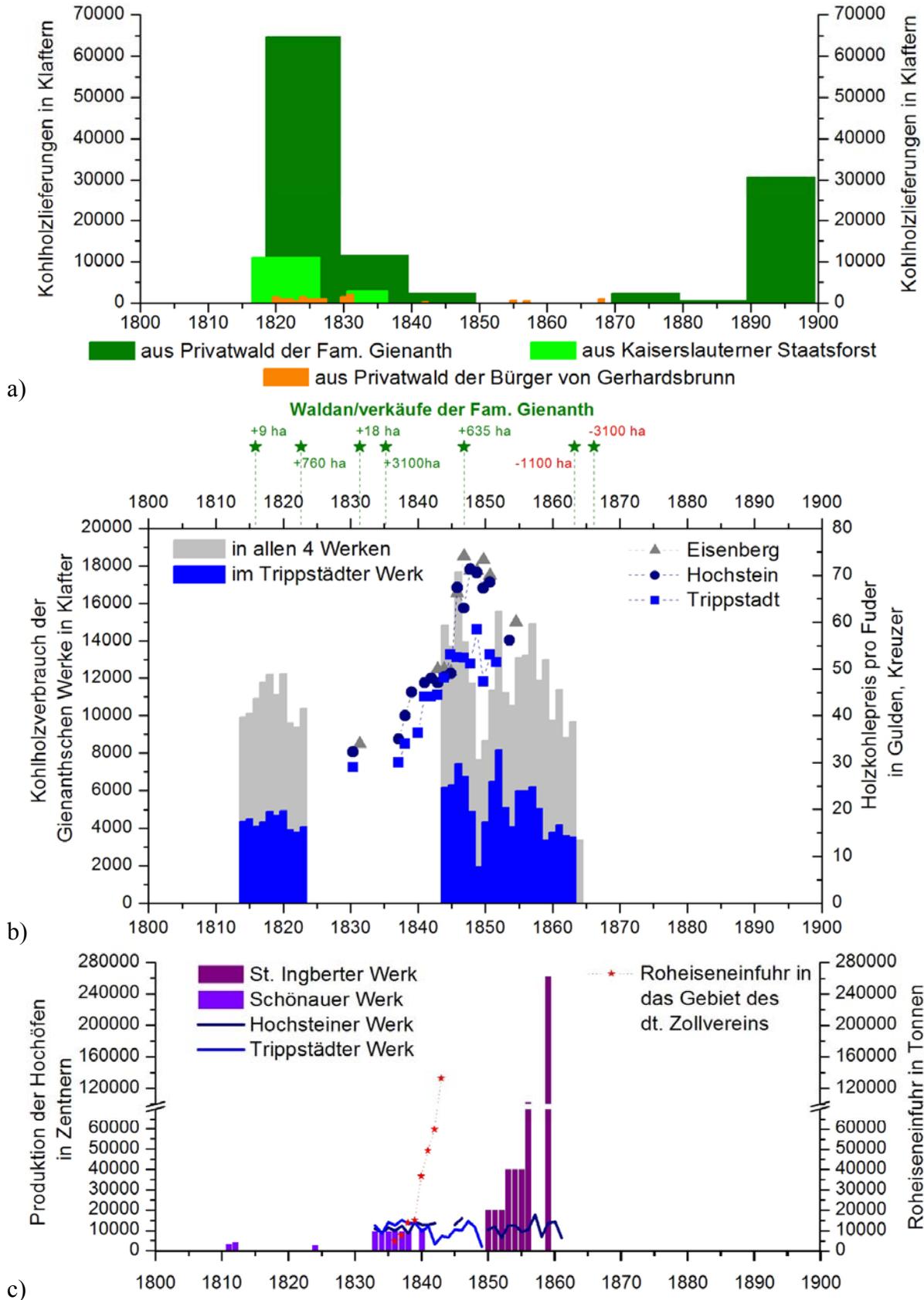
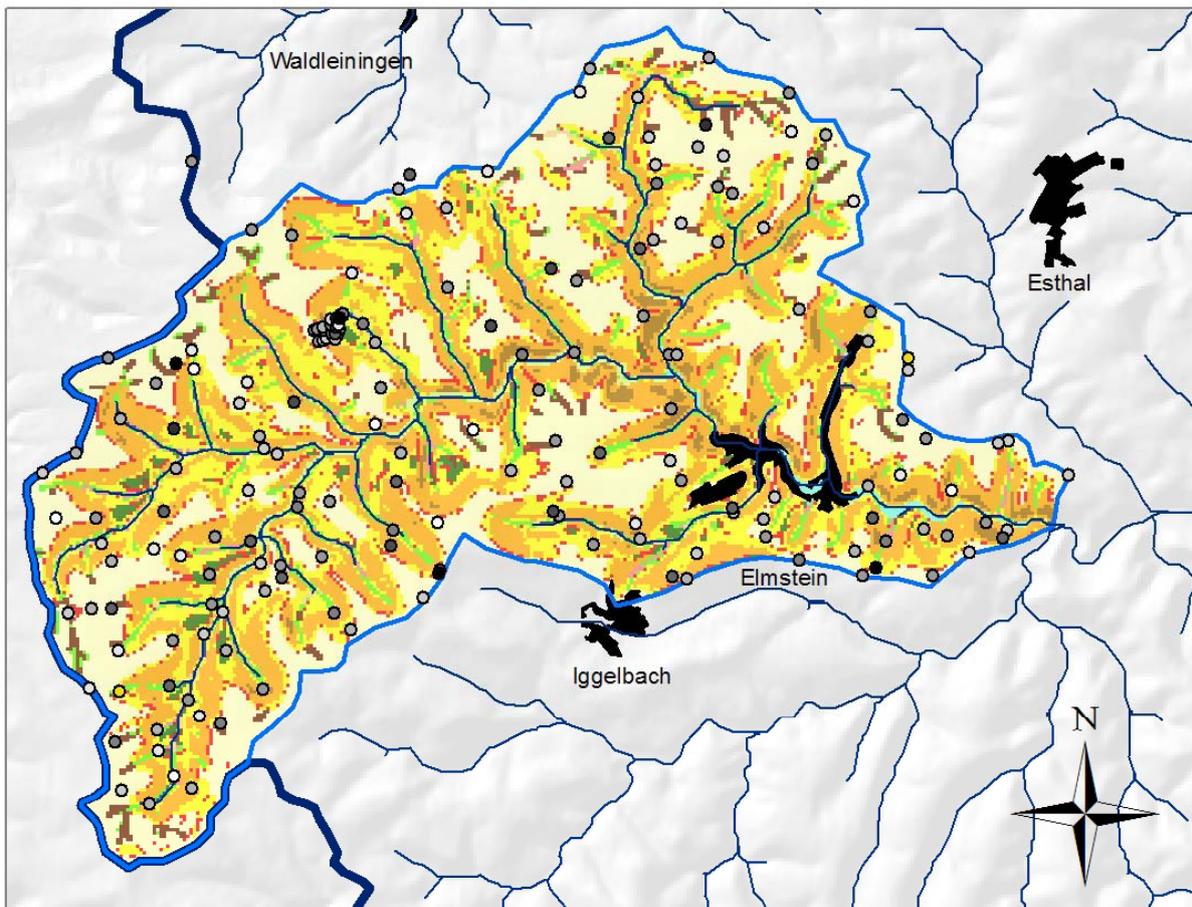


Abb. 52: Kennwerte zur Eisenverarbeitung in der Kurpfalz: (a) Kohlholzlieferungen an Gienanth'sche Werke, (b) Kohlholzverbrauch der Eisenwerke kombiniert mit den Holzkohlepreisen pro Fuder und den Waldan- und -verkäufen der Fam. Gienanth, (c) Produktion der Hochöfen in den Werken kombiniert mit der Roheiseneinfuhr in das Gebiet des dt. Zollvereins (Quelle: CLOER & KAISER-CLOER 1984); Datenlücken bedeuten nicht Ausfall der Anlagen, sondern Überlieferungslücken.

Kartengrundlage und Erosionsdatensatz für SB II - TEZG Erlenbach



Reliefeinheiten

■ Tiefenlinie
■ Auen 1. Ordnung
■ Auen 1.u.2. Ordnung
■ Auen 2. Ordnung
■ Auen 3. Ordnung
■ Auen 4. Ordnung
■ Auen 5. Ordnung
■ Auen 6. Ordnung

Siedlungen

■ Plateaus
■ Oberhang
■ Mittelhang >30°
■ Mittelhang >20°
■ Mittelhang >12,5°
■ Mittelhang, flach
■ Unterhang
■ Talschluss

Mächtigkeiten in cm

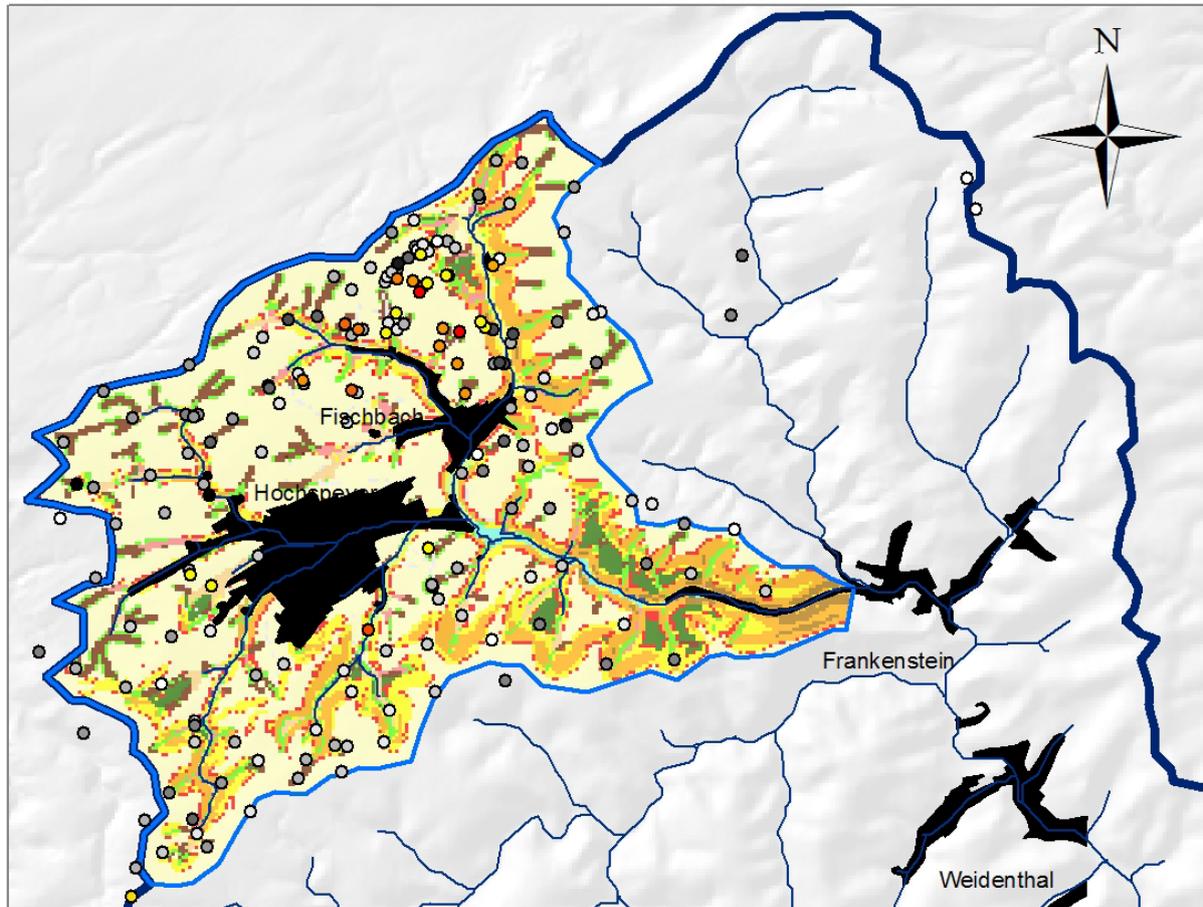
Parabraunerden	Hauptlagen
● 0 - 10	○ 4 - 10
● 11 - 20	○ 11 - 20
● 21 - 30	○ 21 - 30
● 31 - 40	○ 31 - 40
● 41 - 50	○ 41 - 50
● 51 - 60	○ 51 - 60
● 61 - 70	○ 61 - 70
● 71 - 80	○ 71 - 80
● 81 - 90	○ 81 - 90
● 91 - 100	○ 91 - 100
● 101 - 143	○ 101 - 182

Konzept verändert nach Nagel (2009)
Umsetzung, Kartographie H.Förster (2010)

Maßstab: 1:75 000

Anhang 8: Kartierte Bodenprofile im Erlenbach-Teileinzugsgebiet dargestellt auf der Reliefeinheitenkarte, die Datengrundlage für die Sedimentbilanz II bildend.

Kartengrundlage und Erosionsdatensatz für SB II TEZG Hochspeyerbach



Reliefseinheiten

	Tiefenlinie
	Auen 1. Ordnung
	Auen 1.u.2. Ordnung
	Auen 2. Ordnung
	Auen 3. Ordnung
	Auen 4. Ordnung
	Auen 5. Ordnung
	Auen 6. Ordnung

Siedlungen

	Plateaus
	Oberhang
	Mittelhang >30°
	Mittelhang >20°
	Mittelhang >12,5°
	Mittelhang, flach
	Unterhang
	Talschluss

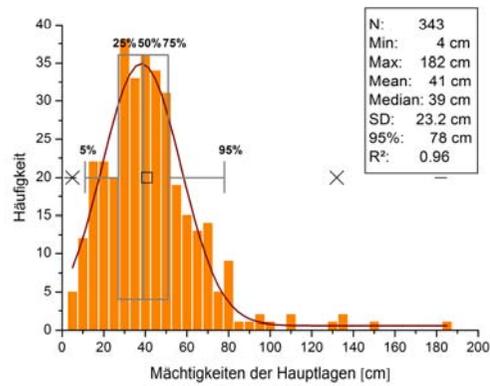
Mächtigkeiten in cm

Parabraunerden	Hauptlagen
	0 - 10
	11 - 20
	21 - 30
	31 - 40
	41 - 50
	51 - 60
	61 - 70
	71 - 80
	81 - 90
	91 - 100
	101 - 143
	4 - 10
	11 - 20
	21 - 30
	31 - 40
	41 - 50
	51 - 60
	61 - 70
	71 - 80
	81 - 90
	91 - 100
	101 - 182

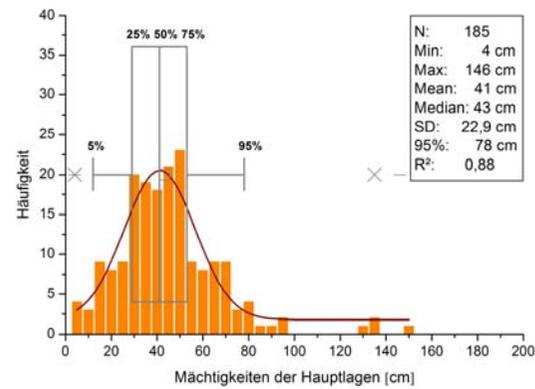
Konzept verändert nach Nagel (2009)
Umsetzung, Kartographie H.Förster (2010)

Maßstab: 1:75 000

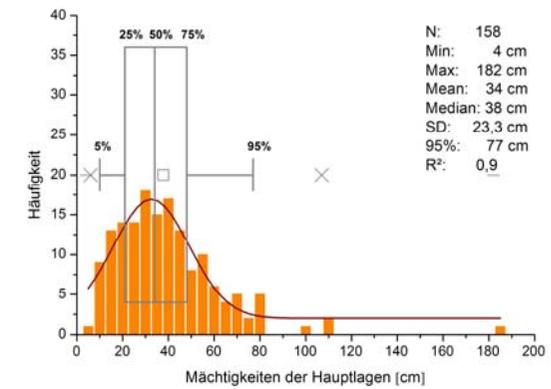
Anhang 9: Kartierte Bodenprofile im Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet sowie die Reliefseinheitenkarte, die die Datengrundlage für die Sedimentbilanz II bilden.



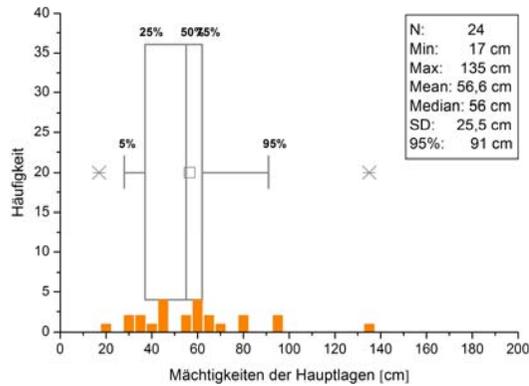
Speyerbach-Einzugsgebiet



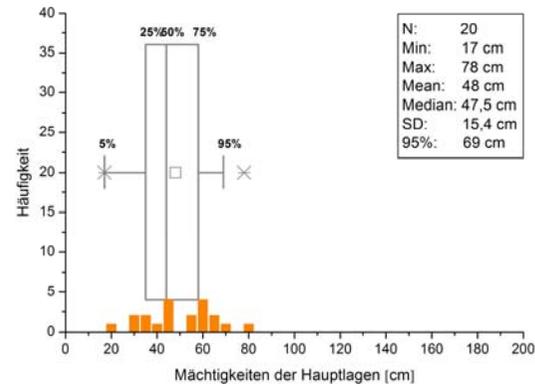
Erlenbach-Teileinzugsgebiet



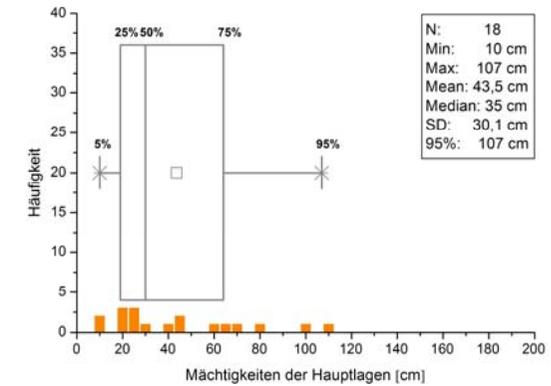
Hochspeyerbach-Teileinzugsgebiet



Mückentalgraben



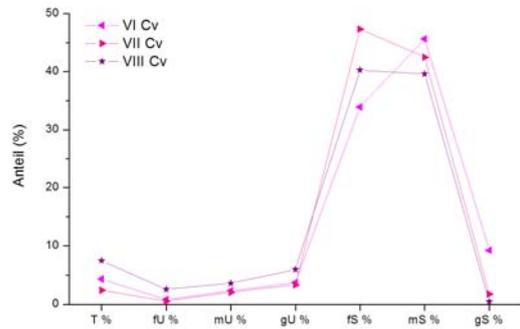
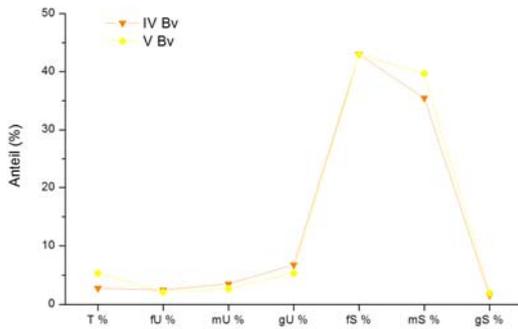
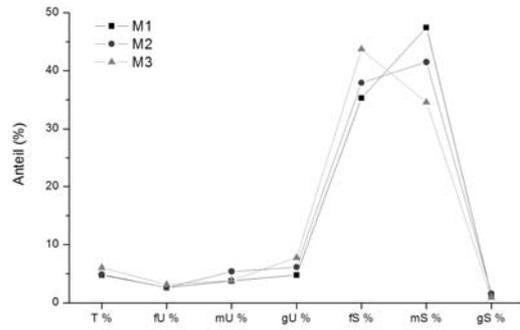
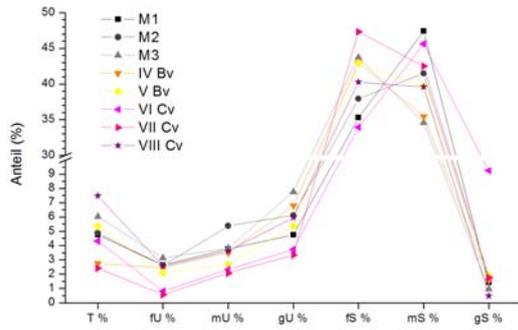
Mückentalgraben. ohne Tiefenlinie



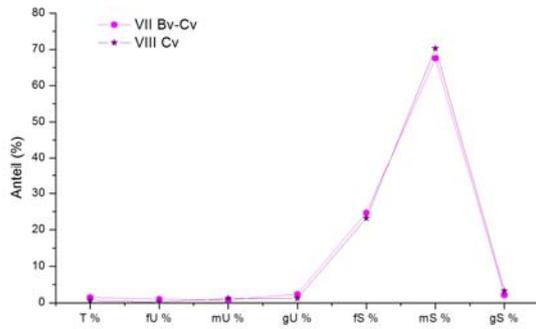
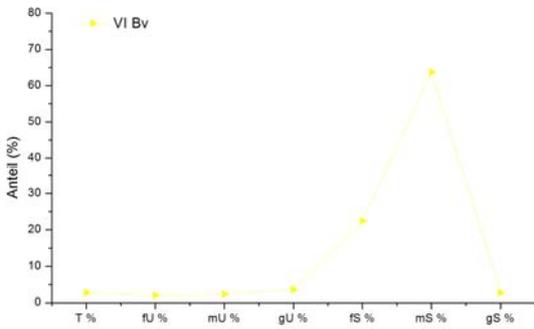
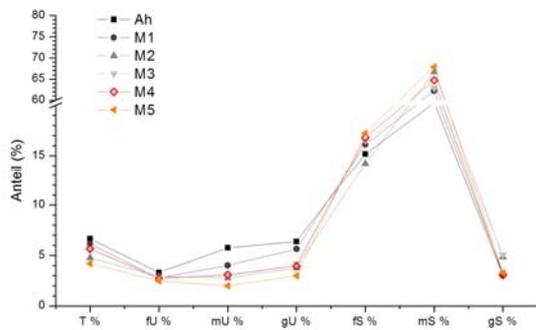
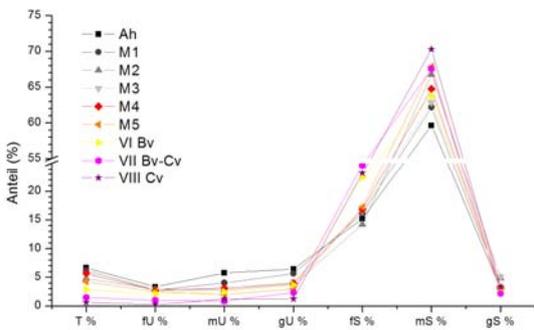
Tiergartentälchen

Anhang 10: Statistische Charakterisierung des Erosionsdatensatzes für den Speyerbach, den Hochspeyerbach, den Erlenbach, den Mückentalgraben und das Tiergartentälchen: Häufigkeitsdiagramm, Gaußsche Verteilungskurve und Box-Whisker-Plot für die Hauptlagenmächtigkeiten, dargestellt in 5 cm Klassen. Die Legende listet die wichtigsten statistischen Parameter auf.

Mückentalgraben

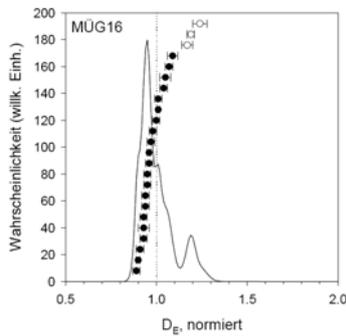


Tiergarten

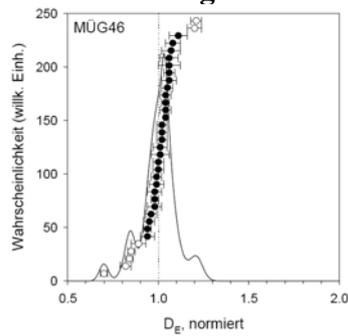


Anhang 11: Korngrößenverteilungen der beprobten Horizonte des Müchelentalgrabens und des Tiergartenprofils.

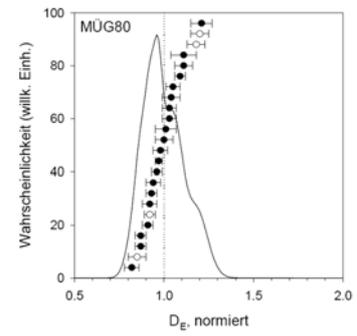
Mückentalgraben



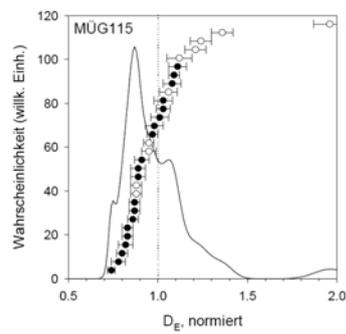
6321 ± 685 BC



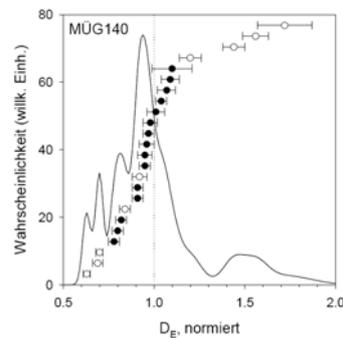
8261 ± 795 BC



9781 ± 1400 BC

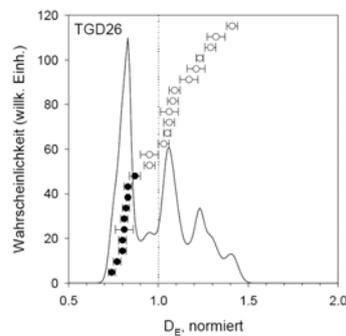


11291 ± 1765 BC

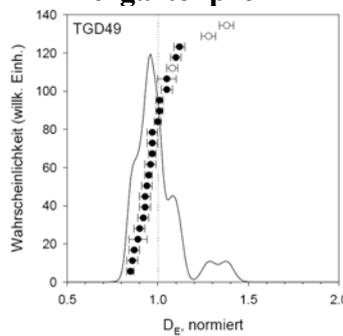


19481 ± 2460 BC

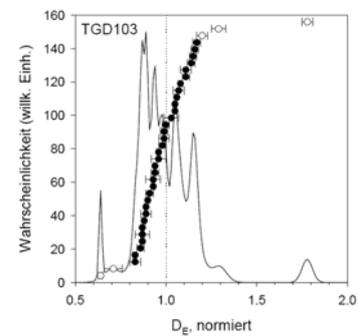
Tiergartenprofil



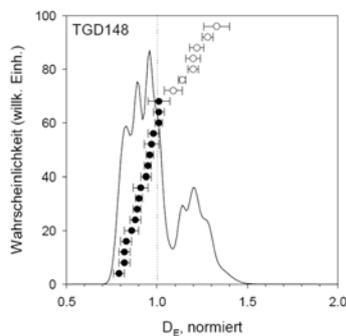
1644 ± 25 AD



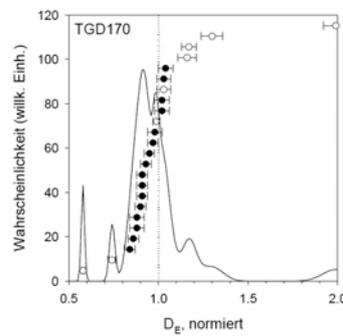
1179 ± 80 AD



5201 ± 870 BC



9186 ± 1120 BC



10236 ± 990 BC

Anhang 12: Wahrscheinlichkeitsdichtekurven für alle im Mückentalgraben und Tiergarten entnommenen OSL-Proben. Dargestellt sind die normierten Paläodosen mit individuellen Fehlerbalken und der resultierenden Wahrscheinlichkeitsdichtekurve je Probe. Nur die ausgefüllten *aliquote* gingen in die Altersberechnung ein.

Holzkohleproben ERLANGEN											Alter	
Labor-Nr.	Entnahme	TK25	Profilname	Horizont	Tiefe ⁴⁷ (cm)	Humus	Fein- wurzeln	Farbe	LD ⁴⁸	Einwaage (mg)	BP	Fehler
Erl-12852	18/09/2008	6613	MTG	II M	15	h2-3	w2	7.5YR3/4	LD3	20,6	10059	61
Erl-12853	18/09/2008	6613	MTG	IV Bv	96	h1	w2	7.5YR5/6	LD2	45,4	11826	70
Erl-12854	18/09/2008	6613	MTG	VI Cv	148	h0	w3	7.5YR6/4	LD1	103,4	11796	71
Erl-12855	18/09/2008	6613	MTG	Hzk-Nest	190	h3	w2	7.5YR4/3	LD3	14,3	157	47
Erl-12856	18/09/2008	6513	TGD	II M	7	h3	w4	7.5YR4/2	LD3	230,4	199	47
Erl-12857	18/09/2008	6513	TGD	Hzk-Nest	70	h1-2	w2	7.5YR4/4	LD1	182,6	122	48
Erl-12858	18/09/2008	6513	TGD	IV M	73	h1-2	w2	7.5YR4/4	LD1	9,4	1331	48
Erl-12859	18/09/2008	6513	TGD	VI Bv	140	h2-3	w1	10YR4/4	LD2	8,5	9963	56

Anhang 13: Zur AMS-Datierung eingesendete Holzkohleproben mit Details zur Entnahmestelle und den Datierungsergebnissen für den Mückentalgraben und das Tiergartenprofil.

⁴⁷ unter Geländeoberfläche

⁴⁸ LD – Lagerungsdichte

Holzkohleproben			Alter						
Labor-Nr.	Profil	Horizont	BP	Fehler	$\delta^{13}\text{C}$	cal. σ	%	cal. 2σ	%
Erl-12852	MTG	II M	10059	61	-25,1	9802-9784 BC	3,5		
						9773-9643 BC	28,8	10009-9935 BC	4,4
						9629-9455 BC	36	9878-9374 BC	91
Erl-12853	MTG	IV Bv	11826	70	-25,2	11829-11667 BC	68,3	11873-11526 BC	95,4
Erl-12854	MTG	VI Cv	11796	71	-25,8	11807-11627 BC	68,3	11846-11508 BC	95,4
Erl-12855	MTG	Hzk-Nest	157	47	-25,6	1667-1695 AD	12		
						1726-1781 AD	25		
						1796-1813 AD	7,3		
						1835-1843 AD	2,8		
						1851-1868 AD	61	1664-1711 AD	16,9
						1872-1876 AD	1,4	1715-1891 AD	62
						1917-1949 AD	13,7	1907-1950 AD	16,5
Erl-12856	TGD	II M	199	47	-26,2			1640-1708 AD	25,1
						1651-1682 AD	17,6	1718-1826 AD	46,5
						1735-1805 AD	39,4	1832-1889 AD	8,3
						1930-1950 AD	11,3	1910-1950 AD	15,6
Erl-12857	TGD	Hzk-Nest	122	48	-23,9	1682-1735 AD	21,5		
						1805-1892 AD	36,3	1670-1778 AD	38
						1906-1932 AD	10,5	1798-1943 AD	57,4
Erl-12858	TGD	IV M	1331	48	-24,7	650-709 AD	53,7		
						746-765 AD	14,6	613-778 AD	95,4
Erl-12859	TGD	VI Bv	9963	56	-23,2	9651-9604 BC	11,4		
						9542-9537 BC	1		
						9528-9486 BC	9,6	9749-9725 BC	1,9
						9460-9317 BC	46,2	9676-9294 BC	93,5

Anhang 14: Kalibrierte Alter der AMS-Datierung eingesendeter Holzkohleproben des Mückentalgrabens und des Tiergartenprofils⁴⁹.

⁴⁹ Kalibrierungsdatensatz: InterCal04 (Reimer et al. (2004): ntCal04 Terrestrial radiocarbonAge Calibration, 0-26 cal kyr BP.- Radiocarbon 46/3:1029-1058)

Jahr	Ereignis
1825	Strecke Stokton-Darlington, England eröffnet
1830	erkennen L. Gienanth und P.H. Krämer die Bedeutung der Bahn
1835	wird die Strecke Nürnberg-Fürth eröffnet
1836	wird die „Gesellschaft für die Errichtung einer Eisenbahn von Saarbrücken nach Mannheim“ gegründet
1837	wird die Strecke Leipzig-Dresden eröffnet
1838	wird die „Bayrische Gesellschaft der Pfalz/Rheinschanz-Bexbacher Bahn“ (Ludwigsbahn) gegründet
1838	Genehmigung für Bau und Betrieb der Ludwigsbahn erteilt
1838-42	Eröffnung versch. Bahnen zw. Belgien, Köln, Minden und im Ruhrgebiet, von Berlin Richtung Stettin, Frankfurt/Oder, Potsdam und Magdeburg
1847	Inbetriebnahme der Ludwigsbahn zwischen Ludwigshafen und Schifferstadt
1849	Inbetriebnahme der Ludwigsbahn zwischen Bexbach und Ludwigshafen
1853	Verbindung Ludwigshafen-Mainz fertig
1855-60	Inbetriebnahme der Luxemburger Eisenbahn (Eisenerzlieferungen für das Eisenwerk St. Ingbert)
1863	Roheisenproduktion in Trippstadt eingestellt
1865	Verkauf des Schönauer Werks
1866	Planung der Strecke Kaiserslautern-Pirmasens und eines Anschlusses für das Trippstädter Werk
1870	Inbetriebnahme der Strecke Hochspeyer-Winnweiler (Hochsteiner Werk erhält Anschluss)
1876	wird Strecke Grünstadt-Eisenberg eröffnet (Eisenberger Werk erhält Anschluss)
1880er Jahre	sukzessive Stilllegung aller Aktivitäten im Trippstädter Werk
1909	Strecke Lambrecht-Elmstein fertig gestellt
1913	Eröffnung der Strecke Kaiserslautern-Pirmasens

Anhang 15: Zusammenstellung der Entwicklung der Eisenbahn in England (blau), Preußen (orange) und der Rheinpfalz (grün) zwischen 1825 und 1913 und die Bedeutung für die Pfälzer Eisenwerke (CLOER & KAISER-CLOER 1984: 426ff, HENDERSON 1966: 138ff, SWIACZNY 1998: 131ff.)

Dank

Mein tiefer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Jürgen Wunderlich für seine Unterstützung in jeglicher Hinsicht, mit der er die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte und diskursiv begleitete sowie für den Freiraum, den er mir zur Umsetzung meiner eigenen Ideen einräumte. Ich danke Herrn Dr. Peter Houben für die Heranführung an das Thema der holozänen Sedimentbilanzierung. Mit Herrn Dr. Markus Dotterweich fanden gemeinsame Besprechungen von Geländebefunden und eine kritische Diskussion unserer Ergebnisse im Pfälzerwald statt. Er hat dankenswerterweise das Zweitgutachten dieser Arbeit übernommen.

Für die Erstellung meiner Doktorarbeit stellten mir das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, das Umweltamt Rheinland-Pfalz, die FVA Trippstadt sowie das Landesamt für Archäologie Speyer Basisdaten zur Verfügung, ohne die ich die Arbeit in der vorliegenden Form nicht hätte durchführen können. Ich möchte deshalb Herrn Dr. E. Spies, Herrn Goldschmitt, Herrn Demuth, Herrn Mack und Herrn Himmelsreich für die bereitwillige und großzügige Unterstützung danken. Für Ihre freundlichen und umfangreichen Auskünfte zu lokalen Aspekten der Forst- und Heimatgeschichte danke ich Herrn Otto Feyock aus Elmstein und Herrn Franz Neumer aus Hochspeyer.

Unterstützung bei der Beprobung und Diskussion der Ergebnisse der OSL-Datierung erhielt ich dankenswerterweise von Dipl.-Geogr. Alexander Fülling, der die OSL-Datierungen im Lumineszenz-Datierungslabor des Geographischen Institutes der HU Berlin vornahm. Die Radiokarbondatierungen wurden am AMS-¹⁴C-Labor des Physikalischen Instituts der Universität Erlangen Nürnberg durchgeführt. Im Rahmen der Beprobung der Standorte Mückentalgraben und Tiergartentälchen fertigte Dipl.-Geogr. Susann Müller Dünnschliffanalysen an und stand mir bei der Auswertung zur Seite. Die bodenphysikalischen und bodenchemischen Analysen wurden freundlicherweise von Frau Bergmann-Dörr und Frau Schneider und dem Labor-Hiwi-Team des Labors der Professur für Bodenkunde der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt durchgeführt. Finanziert wurden die Gelände-, Labor- und Datierungsarbeiten freundlicherweise durch die Freunde und Förderer der Universität Frankfurt und der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Für die Begleitung während der Geländearbeiten und ihre kritisch-konstruktiven Diskussion meiner Arbeit stehe ich in der Schuld von Sabine Schmidt, Susann Müller, Tiemo Kahl, Ralf Gründling und Alexander Nagel. Christiane Döll, Catharina Meyer, Ales Macik und Philippe Kersting haben sich auf das Experiment des Lesezirkels eingelassen und mit mir die Freude am Diskutieren und „über den Tellerrand schauen“ geteilt. Euch verdanke ich einige Impulse für die Zukunft. Den Kollegen am Institut für Geographie und am Institut für Humangeographie bin ich für die zusammen verbrachte Zeit und die gemeinsam angestoßenen Projekte verbunden.

Ohne alle beim Namen zu nennen möchte ich meinen Freunden dafür danken, dass ich an ihren Leben teilhaben darf und sie meine Gedankenwelt reicher machen. Meine immer wieder überwältigende Familie hat mit Langmut und Nachsicht das Vorhaben begleitet und das eine oder andere Mal Mut und Ablenkung gegeben. Bleibt noch die Frage zu beantworten: Was ist schwerer – Anfangen oder Aufhören?

Merzhausen, den 12. Dezember 2010