

Dipl.-Umweltwissenschaftler

Marco Hümann

Vom Fachbereich VI
(Geographie/Geowissenschaften)
der Universität Trier
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

Abflussgeschehen unter Wald

—

Validierung und Weiterentwicklung eines GIS-basierten Tools zur Erstellung von Abflussprozesskarten auf forstlich genutzten Standorten

Betreuender: Prof. Dr. Sören Thiele-Bruhn
Berichterstattender: Prof. Dr. Sören Thiele-Bruhn
Berichterstattender: Prof. Dr. Gebhard Schüler

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 02.05.2012

Trier 2012

*„In den Wäldern sind Dinge, über die nachzudenken
man jahrelang im Moos liegen könnte“*

Franz Kafka

Vorwort

Hätte man mir vor zehn Jahren eröffnet, dass ich an der Universität ein Diplom in Angewandten Umweltwissenschaften erhalte und mir zusätzlich noch die Möglichkeit geboten wird, nach dem Abschluss eine Promotion in Naturwissenschaften anzustreben, so hätten meine Mitmenschen und ich wahrscheinlich ungläubig den Kopf geschüttelt. Doch was möglich ist, wenn man seine Interessen konsequent verfolgt und seine Berufung entdeckt, konnte ich mir selbst verdeutlichen. Ich bin sehr froh einen Arbeitsbereich gefunden zu haben, der mir immer wieder neue Perspektiven unserer Umwelt aufzeigt und vielfältige Möglichkeiten der beruflichen Entfaltung bietet. Von daher bin ich sehr stolz eine Dissertation vorlegen zu können, die sich mit umweltrelevanten Themen befasst und versucht einen Beitrag im Kontext Wald, Boden und Klimawandel zu leisten.

Bedanken möchte ich mich als erstes bei Herrn Prof. Dr. Sören Thiele-Bruhn sowie bei Herrn apl. Prof. Dr. Gebhard Schüler für die Betreuung und Übernahme der Begutachtung dieser Dissertation. Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern des Faches Bodenkunde, die mich schon während des Studiums als wissenschaftliche Hilfskraft ins Fach integrierten. Besonders zu erwähnen sind hier Herr Prof. Dr. Sören Thiele-Bruhn, Dr. Raimund Schneider und Dr. Christoph Müller. Für die Möglichkeit dem Fach auch nach dem Studium treu zu bleiben und mit den Arbeiten zu vorliegender Dissertation beginnen zu können, möchte ich mich bei den genannten Personen ebenfalls recht herzlich bedanken. Mein Dank gilt außerdem Herrn apl. Prof. Dr. Gebhard Schüler und der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft RLP (FAWF) für die mir zugeteilte Forschungsförderung. Danke an die Stipendienstiftung RLP für das Abschluss-Stipendium.

Für die tatkräftige Unterstützung bei Gelände-, Labor- oder PC-Arbeiten möchte ich mich bei zahlreichen Mitarbeitern, wiss. Hilfskräften, Diplomanden und Bachelor-Studenten bedanken, hier vor allem bei Dr. Christoph Müller, Andreas Rock, Pit Steinmetz, Andreas Kaiser, Holger Volz und Caroline Biewer. Dem Fach Physische Geographie danke ich für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Equipment. Für eine stets gute und sehr konstruktive Atmosphäre im Büro H329 möchte ich Nadine Koch und Daniel Felten danken.

Bei meinen Eltern, Großeltern, baldigen Schwiegereltern und Freunden bedanke ich mich sehr herzlich für die ständige Unterstützung in jeglichen Belangen.

Dankeschön für alles an meine zukünftige Frau Bettina.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des EU INTERREG NWE IVB Projektes "ForeStClim - Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts". Zum Zweck der Verbesserung des Prozessverständnisses von Abflussprozessen in Wäldern sowie zur Validierung und Weiterentwicklung eines GIS-basierten Tools (GIS-DRP) zur Erstellung von Abflussprozesskarten wurden auf 25 Test-Plots in vier Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz und dem Großherzogtum Luxemburg bodenhydrologische Untersuchungen durchgeführt.

Auf Grundlage dieser Untersuchungen konnten große intraspezifische Unterschiede im Abflussverhalten von Waldstandorten erhoben werden. Die Differenzen werden dabei hauptsächlich durch das Substrat, die bodenphysikalischen Eigenschaften, die Nutzung bzw. deren Intensität und die Vorfeuchte bedingt. Es wurde nachgewiesen, dass Wälder generell hohe Infiltrationsraten aufweisen und verzögerte Zwischenabflussprozesse begünstigen. Durch einen prinzipiell naturnahen Waldbau und etwaige Meliorationsmaßnahmen auf Niederertragsstandorten bestehen zudem Möglichkeiten positiv auf die Wasserretention und das Wasserspeichervermögen eines Forstbestandes einzuwirken.

Die mittels GIS-DRP erstellten Abflussprozesskarten der vier Testgebiete wurden durch die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen sowie der Abflussprozesskartierung nach SCHERRER (2006) validiert. Hierdurch wurden für die Abflussgenerierung wichtige Parameter ermittelt und Optimierungsansätze erarbeitet, welche anschließend in GIS-DRP implementiert werden konnten. Verschlammungsprozesse auf Ackerflächen können nun durch das modifizierte GIS-DRP-Werkzeug identifiziert werden. Zudem war es möglich, Extrem-Ereignis basierte Abflussprozesskarten zu etablieren, die Hot Spots der Abflussgenerierung identifizieren können. Die Einführung des Abflussprozesses „dSSF“ (tiefer Zwischenabfluss) wurde durch eine neue Klassifizierung des geologischen Ausgangssubstrates erreicht.

Forstwirten und Entscheidungsträgern im Waldmanagement wird somit die Möglichkeit geboten, Expertenwissen in ihre Planungen einfließen zu lassen. Hierdurch kann zum einen positiv auf den Landschaftswasserhaushalt eingewirkt werden, da gezielt auf Flächen nachteiliger Abflussbildung geeignete Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes angewandt werden können. Zum anderen werden Potentiale für bestmögliche Waldwachstumsvoraussetzungen in einem Landschaftsraum aufgezeigt. Der nachhaltigen Nutzung von Wäldern wird somit auch im Kontext des Klimawandels Rechnung getragen.

Abstract

The present study is integrated in the EU INTERREG NWE IVB Project "ForeStClim - Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts". The first objective of the study is to enhance the process knowledge of discharge generation in forested areas. The second objective is the validation and optimization of a GIS-based tool (GIS-DRP) to create maps that indicate Dominant Runoff Processes (DRP). Therefore, soil-hydrological experiments and discharge process mapping were conducted on 25 test plots, which are located in four catchments in Rhineland-Palatinate (Germany) and the Grand Duchy of Luxembourg.

Based on the results of the experimental research, major intra-specific differences within the discharge generation of forest stands could be determined. The parameters that affect these differences most are the geological substratum, the soil-physical properties, intensity of land use and prevailing soil moisture. It could be proven that forests possess generally high infiltration rates and contribute to a deceleration of subsurface flow processes. The implementation of methods like nature-orientated silviculture or amelioration measures on marginal earning sites provide opportunities that have a positive effect on water retention as well as the water storage capacity of forested areas.

The results of the field campaigns and the discharge process mapping according to SCHERRER (2006) validate the generated GIS-DRP-maps of the four investigated catchments. It was possible to identify and evaluate the important parameters that affect discharge generation. Subsequently, these findings were implemented in the GIS-DRP method for the optimization of the tool. The optimized GIS-DRP tool now also detects sealing effects on agriculturally used areas. Additionally, it was possible to establish DRP-maps based on extreme-events, which enables the identification of so-called "hot spots" of discharge generation. A new classification of the geological substratum realized the adoption of the dominant runoff process "dSSF" (deep subsurface flow).

The usage of the GIS-DRP tool provides an opportunity for foresters and decision makers in forest management to implement expert knowledge into their future planning. A positive effect on the water regime can be achieved: for areas with unfavorable discharge generation processes, appropriate measures of peripheral flood prevention can be devised. Furthermore, the tool identifies areas in the landscape that have the best potential for possible forest growth conditions. A sustainable use of forests can also be seen in the context of climatic change.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	VI
Verzeichnis der Abbildungen	VIII
Verzeichnis der Fotografien	XI
Verzeichnis der Tabellen	XIII
Verzeichnis der Abkürzungen	XVI
1. Einleitung	20
1.1 Rahmen der Arbeit	20
1.2 Zielsetzung	22
2. Stand der Forschung	24
2.1 Abflussbildung im Überblick	24
2.2 Abflussgeschehen unter Wald	30
2.3 Abflussprozessidentifikation und dominierende Abflussprozesse	33
2.4 Abflussprozesserhebung mittels GIS-DRP	37
3. Untersuchungsgebiete und Versuchsaufbau	39
3.1 Frankelbach	39
3.2 Holzbach	44
3.3 Weierbach	47
3.4 Huelwelerbach	50
4. Methoden	53
4.1 Labor- und Geländeuntersuchungen	53
4.1.1 Bodenphysikalische Untersuchungen	53
4.1.2 Infiltrationsexperimente	55
4.1.3 Beregnungsversuche auf Plot-Skala (30 m ² ; Großberegnungen)	56
4.1.4 Beregnungsversuche auf Punkt-Skala (0,28 m ² ; Kleinberegnungen)	60
4.2 Abflussprozesskartierungen	63
4.2.1 Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen	63
4.2.2 Abflussprozesskartierung nach Prozessbeurteilungsschemata (PBS)	63

4.2.3 Digitale Abflussprozesskartierung nach GIS-DRP-Methode	64
5. Ergebnisse und Diskussion	68
5.1 Labor- und Geländebefunde sowie Abflussprozesskartierungen	68
5.1.1 Frankelbach	68
5.1.1.1 Labor- und Geländeuntersuchungen	68
5.1.1.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen	83
5.1.2 Holzbach	87
5.1.2.1 Labor- und Geländeuntersuchungen	87
5.1.2.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen	97
5.1.3 Weierbach	100
5.1.3.1 Labor- und Geländeuntersuchungen	100
5.1.3.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen	106
5.1.4 Huewelerbach	109
5.1.4.1 Labor- und Geländeuntersuchungen	109
5.1.4.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen	113
5.1.5 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse	117
5.2 Validierung und Weiterentwicklung von GIS-DRP	131
5.2.1 Validierung der GIS-DRP-Karten	131
5.2.2 Ableitung von Optimierungsansätzen	137
5.2.3 Weiterentwicklung von GIS-DRP	139
5.2.3.1 Verschlammungsneigung	139
5.2.3.2 Niederschlagsintensität / Extrem-Ereignisse	143
5.2.3.3 Semipermeabilität	151
5.2.4 Validierung der optimierten GIS-DRP-Karten	157
5.2.5 Zusammenfassung Abflussprozesskartierung	160
6. Schlussfolgerungen und Ausblick	163
7. Gesamtzusammenfassung	166
Literaturverzeichnis	169
Anhang	187
Lebenslauf	222

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1:	Abflussprozesse in einem Hang (SCHERRER, 2006; verändert).....	25
Abb. 2.2:	Hydrologische Prozesse bei der Infiltration (BRONSTERT, 1994 nach GERMANN, 1981).....	26
Abb. 2.3:	Oberflächenabfluss am Hang (Bronstert, 1994 nach Kölla, 1987),.....	27
Abb. 2.4:	Schema der verschiedenen Fließwege in einem Hangboden (BRONSTERT, 1994, nach ZUIDEMA 1985).....	29
Abb. 3.1:	Lage der ForeStClim-Untersuchungsgebiete (http://www.mygeo.info).....	39
Abb. 3.2:	Frankelbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte.....	42
Abb. 3.3:	Holzbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte.....	46
Abb. 3.4:	Einzugsgebiet Attert (geologisch) mit Teileinzugsgebieten und Landschaftsgliederung.	48
Abb. 3.5:	Weierbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte.....	49
Abb. 3.6:	Einzugsgebiet Huewelerbach mit Verortung der Untersuchungsstandorte....	52
Abb. 4.1:	Prinzipskizze des Doppelring-Infiltrometers;	56
Abb. 4.2:	Schematische Darstellung des Beregnungssetups (aus SCHOBEL, 2008; nach SCHNEIDER et al., 2000).....	57
Abb. 5.1:	Trockenrohddichte Frankelbach (Auswahl).....	71
Abb. 5.2:	Gesamtporenvolumen Frankelbach (Auswahl).....	71
Abb. 5.3:	Weite Grobporen Frankelbach (Auswahl).....	71
Abb. 5.4:	Ges. Wasserleitfähigkeit Frankelbach (Auswahl).....	71
Abb. 5.5:	Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Frankelbach.....	73
Abb. 5.6:	Tägliche Abflusskoeffizienten der Standorte Frankelbach.....	75
Abb. 5.7:	Prozentuale Anteile der Abflussprozesse der Standorte Frankelbach.....	76
Abb. 5.8:	Abflussverhalten am Standort FRA-2 (30-jährige Aufforstung).....	77
Abb. 5.9:	Abflussverhalten am Standort FRA-4 (Douglasie).....	79
Abb. 5.10:	Abflussverhalten am Standort FRA-6 (Acker).....	80
Abb. 5.11:	GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Frankelbach.....	86
Abb. 5.12:	Trockenrohddichte Holzbach (Auswahl).....	88
Abb. 5.13:	Gesamtporenvolumen Holzbach (Auswahl).....	88
Abb. 5.14:	Weite Grobporen Holzbach (Auswahl).....	88

Abb. 5.15:	Ges. Wasserleitfähigkeit Holzbach (Auswahl)	88
Abb. 5.16:	Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Holzbach.....	90
Abb. 5.17:	Prozentualer täglicher Abfluss der Standorte Holzbach.....	92
Abb. 5.18:	Anteil der Abflussprozesse am Gesamtabfluss der Standorte Holzbach	92
Abb. 5.19:	Abflussverhalten am Standort HOL-1 (Buche, Oberhang)	93
Abb. 5.20:	Abflussverhalten am Standort HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang).....	94
Abb. 5.21:	Abflussverhalten am Standort HOL-6 (Fichte, Oberhang)	95
Abb. 5.22:	GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Holzbach	99
Abb. 5.23:	Trockenrohddichte Weierbach	101
Abb. 5.24:	Gesamtporenvolumen Weierbach	101
Abb. 5.25:	Weite Grobporen Weierbach.....	101
Abb. 5.26:	Ges. Wasserleitfähigkeit Weierbach	101
Abb. 5.27:	Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Weierbach.....	103
Abb. 5.28:	GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Weierbach	108
Abb. 5.29:	Trockenrohddichte Huewelerbach	110
Abb. 5.30:	Gesamtporenvolumen Huewelerbach.....	110
Abb. 5.31:	Weite Grobporen Huewelerbach	110
Abb. 5.32:	ges. Wasserleitfähigkeit Huewelerbach	110
Abb. 5.33:	Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Huewelerbach.....	111
Abb. 5.34:	GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Huewelerbach	116
Abb. 5.35:	DRP in Abhängigkeit des geologischen Ausgangssubstrates	118
Abb. 5.36:	DRP in Abhängigkeit von der vorherrschenden Textur der untersuchten Substrate	121
Abb. 5.37:	DRP in Abhängigkeit der Nutzungsvarianten der Testgebiete	123
Abb. 5.38:	Gegenüberstellung der Infiltrationsraten aller Standorte der vier Testgebiete	127
Abb. 5.39:	DRP in Abhängigkeit des Standortes und der Nutzung	128
Abb. 5.40a - d:	Ausschnitte aus den GIS-DRP-Abflussprozesskarten der vier Test-Gebiete	132
Abb. 5.41:	Vergleich der Hauptabflussprozesse zw. GIS-DRP und Schüler (2006) im	136
Abb. 5.42:	GIS-DRP-Karte <i>Verschlämmungsneigung</i> Frankelbach.....	142

Abb. 5.43:	Vergleich der Hauptabflussprozesse zw. GIS-DRP <i>Verschlämmungsneigung</i> und SCHÜLER (2006) im Einzugsgebiet Frankelbach.....	143
Abb. 5.44:	GIS-DRP-Karte <i>Extrem-Ereignis</i> Frankelbach	149
Abb. 5.45:	GIS-DRP-Karte <i>Extrem-Ereignis</i> Huewelerbach.....	150
Abb. 5.46:	GIS-DRP-Karte Holzbach <i>Semipermeabilität</i>	153
Abb. 5.47:	GIS-DRP-Karte Holzbach <i>Semipermeabilität</i> inkl. <i>Extrem-Ereignis</i>	153
Abb. 5.48:	GIS-DRP-Karte Weierbach <i>Semipermeabilität</i>	155
Abb. 5.49:	GIS-DRP-Karte Colpach <i>Semipermeabilität</i> inkl. Einzugsgebiet Weierbach (blau)	156
Abb. 5.50:	GIS-DRP-Karte Attert <i>Semipermeabilität</i> inkl. Einzugsgebiet Colpach (blau)	156
Abb. A1:	GIS-DRP-Karte des Einzugsgebietes Welschbillig (Verbandsgemeinde Trier Land) mit Validierungsbohrpunkten (MÜLLER, 2009).....	187
Abb. A2:	Schematische Darstellung des Infiltrationsverlaufs in Abhängigkeit von der Vorfeuchte des Bodens (HILLEL, 1971 in WINZIG 1997, verändert).....	187
Abb. A3:	Grobbodengehalte der Versuchsstandorte im Einzugsgebiet Weierbach (BIWER, 2011; verändert)	202
Abb. A4:	Prozessbeurteilungsschema für Wald bei extensiven und intensiven, kurzen Niederschlägen (SCHERRER, 2006).....	206
Abb. A5:	Prozessbeurteilungsschema für Acker bei extensiven aber langen Niederschlägen und mittlerer Hangneigung (SCHERRER, 2006)	207
Abb. A6:	Prozessbeurteilungsschema für Acker bei intensiven kurzen Niederschlägen und mittlerer Hangneigung (SCHERRER, 2006)	208
Abb. A7:	Abflussverhalten am Standort FRA-1 (1-jährige Aufforstung)	215
Abb. A8:	Abflussverhalten am Standort FRA-3 (Alter Laubwald)	215
Abb. A9:	Abflussverhalten am Standort FRA-5 (Alter Nadelwald).....	216
Abb. A10:	Abflussverhalten am Standort FRA-7 (Schneise)	216
Abb. A11:	Abflussverhalten am Standort HOL-3 (unterer Mittelhang, Buche).....	217
Abb. A12:	Abflussverhalten am Standort FRA-5 (oberer Mittelhang, Fichte).....	217
Abb. A13:	Abflussprozesskarte Frankelbach (SCHÜLER, 2006)	218
Abb. A14:	GIS-DRP-Karte Holzbach <i>Extrem-Ereignis</i>	220
Abb. A15:	GIS-DRP-Karte <i>Extrem-Ereignis</i> Weierbach	221

Verzeichnis der Fotografien

Foto 4.1:	Doppelring-Infiltrimeter	56
Foto 4.2:	Beregnungsanlage am Standort HOL-3; Einzugsgebiet Holzbach	58
Foto 4.3:	Beregnung durch Niederdruckdüsen	59
Foto 4.4:	Wasserversorgung der Beregnung	59
Foto 4.5:	Oberflächenabfluss Standort FRA-2	59
Foto 4.6:	Profilgrube FRA-6 mit Abflussblechen	59
Foto 4.7:	Beregnungsplot unter Buche	61
Foto 4.8:	Beregnungsplot unter Fichte (dichtes Moos)	61
Foto 4.9:	Motorspritze Fitosa	62
Foto 4.10:	Aufbau Kleinberegnungsanlage	62
Foto 4.11:	Vollkegel-Düse (Lechler 460.608).....	62
Foto 4.12:	Aluminium-Gestänge über Test-Plot	62
Foto 5.1:	Auffangen des HOF (FRA-6).....	80
Foto 5.2:	HORTON'scher Oberflächenabfluss (FRA-6)	80
Foto A1:	Bodenprofil FRA-1 (1-jährige Aufforstung).....	191
Foto A2:	Bodenprofil FRA-2 (30-jährige Aufforstung).....	191
Foto A3:	Bodenprofil FRA-4 (Alter Nadelwald)	191
Foto A4:	Bodenprofil FRA-5 (Douglasie).....	191
Foto A5:	Bodenprofil FRA-6 (Acker)	192
Foto A6:	Bodenprofil FRA-7 (Schneise).....	192
Foto A7:	Bodenprofil HOL-1 (Buche, Oberhang)	196
Foto A8:	Bodenprofil HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang)	196
Foto A9:	Bodenprofil HOL-3 (Buche, unterer Mittelhang)	196
Foto A10:	Bodenprofil HOL-4 (Fichte, unterer Mittelhang)	196
Foto A11:	Bodenprofil HOL-5 (Fichte, oberer Mittelhang).....	197
Foto A12:	Bodenprofil HOL-6 (Fichte, Oberhang).....	197
Foto A13:	Bodenprofil WEI-1 (Buche, Oberhang)	201
Foto A14:	Bodenprofil WEI-2 (Buche, Mittelhang)	201
Foto A15:	Bodenprofil WEI-3 (Buche, Unterhang).....	201
Foto A16:	Bodenprofil WEI-5 (Fichte, Mittelhang).....	201
Foto A17:	Bodenprofil WEI-7 (Buche, Plateau)	202

Verzeichnis der Fotografien

Foto A18:	Bodenprofil WEI-8 (Fichte, Plateau)	202
Foto A19:	Bodenprofil HUE-1	205
Foto A20:	Bodenprofil HUE-2	205
Foto A21:	Bodenprofil HUE-3	205
Foto A22:	Bodenprofil HUE-4	205
Foto A23:	Alte Quellfassung im Einzugsgebiet Huewelerbach während Vorbereitung auf Neufassung	212
Foto A24:	Alte Quellfassung Huewelerbach mit Schüttung frischen Quellwassers	212

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1:	Dominierende Abflussprozesse nach PBS (IHW, 2000; verändert).....	34
Tab. 4.1:	Klassifikation der Luftleitfähigkeit nach BRUGGE (1983)	54
Tab. 4.2:	Klassifikation der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003).....	55
Tab. 4.3:	Klassifikation der Infiltrationsleistung nach WOHLRAB et al. (1992)	56
Tab. 4.4:	Hangneigungsklassen in GIS-DRP (nach MÜLLER et al. 2009, verändert)....	64
Tab. 4.5:	DRP-Basis-Tabelle; DRP in Abhängigkeit von Hangneigung, Geologie und Landnutzung	67
Tab. 5.1:	Abflusscharakteristika der Test-Plots im Einzugsgebiet Frankelbach während der Großberechnungen	75
Tab. 5.2:	Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Frankelbach (Quelle: FP Physische Geographie, Universität Trier).....	82
Tab. 5.3:	Anwendung des PBS (Wald) für den Standort FRA-2 (30-jährige Aufforstung)	84
Tab. 5.4:	Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Frankelbach).....	85
Tab. 5.5:	Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse nach GIS- DRP (Frankelbach).....	85
Tab. 5.6:	Abflusscharakteristika der Test-Plots im Einzugsgebiet Holzbach während der Großberechnungen	91
Tab. 5.7:	Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Holzbach (Quelle: FP Physische Geographie, Universität Trier)	96
Tab. 5.8:	Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Holzbach)	98
Tab. 5.9:	Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse Holzbach ..	98
Tab. 5.10:	Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Weierbach.....	105
Tab. 5.11:	Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Weierbach)	107
Tab. 5.12:	Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse GIS-DRP (Weierbach)	107
Tab. 5.13:	Auszug aus den Resultaten der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Huewelerbach.....	113
Tab. 5.14:	Anwendung des PBS (Wald) für den Standort HUE-1 (Laubwald, Buche)	114

Tab. 5.15:	Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Huewelerbach)	114
Tab. 5.16:	Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse (Huewelerbach)	115
Tab. 5.17:	Vergleich der verschiedenen DRP-Ausweisungen aller Standorte	130
Tab. 5.18:	Vergleich der versch. Abflussprozessidentifikationen aller Testgebiete und Standorte.....	133
Tab. 5.19:	DRP-Ausweisung <i>Verschlämmungsneigung</i>	140
Tab. 5.20:	Vergleich der prozentualen Flächenanteile der Hauptabflussprozesse im Einzugsgebiet Frankelbach.....	143
Tab. 5.21:	DRP-Ausweisung für die Niederschlagsklassifikation „Extrem-Ereignis“ .	145
Tab. 5.22:	Vergleich der prozentualen DRP-Flächenanteile der vier untersuchten Testgebiete	148
Tab. 5.23:	DRP-Ausweisung <i>Semipermeabilität</i>	152
Tab. 5.24:	Vergleich der prozentualen DRP-Flächenanteile der Abflussprozesskarten Holzbach und Weierbach	154
Tab. 5.25:	Vergleich der Abflussprozessidentifikationen nach der GIS-DRP- Modifikation.....	159
Tab. A1:	Profilbeschreibungen Frankelbach FRA-1 – FRA-4.....	188
Tab. A2:	Profilbeschreibungen Frankelbach FRA-5 – FRA-7.....	189
Tab. A3:	Ergebnisse Bodenphysik Frankelbach	190
Tab. A4:	Profilbeschreibungen Holzbach HOL-1 – HOL-3	193
Tab. A5:	Profilbeschreibungen Holzbach HOL-4 – HOL-6	194
Tab. A6:	Ergebnisse Bodenphysik Holzbach	195
Tab. A7:	Profilbeschreibungen Weierbach WEI-1 – WEI-4.....	198
Tab. A8:	Profilbeschreibungen Weierbach WEI-5 – WEI-8.....	199
Tab. A9:	Ergebnisse Bodenphysik Weierbach	200
Tab. A10:	Profilbeschreibungen Huewelerbach HUE-1 – HUE-4	203
Tab. A11:	Ergebnisse Bodenphysik Huewelerbach	204
Tab. A12:	Ergebnisse aller 24 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Frankelbach (FP Physische Geographie).....	209
Tab. A13:	Ergebnisse aller 17 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Holzbach (FP Physische Geographie).....	210
Tab. A14:	Ergebnisse aller 14 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Weierbach.....	211

Tab. A15:	Ergebnisse aller 32 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Huewelerbach (FP Physische Geographie)	213
Tab. A16:	Vergleich der prozentualen Flächenanteile der DRP unterschiedlicher Klassifikationen.....	219

Verzeichnis der Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Bsp.	Beispiel
Buffer	schnell aufsättigender Auenbereich mit direkter Lage am Fließgewässer
bzw.	beziehungsweise
ca.	Circa
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DP	Deep Percolation (Tiefensickerung)
DRP	Dominant Runoff Process (dominierender Abflussprozess)
dSSF	deep Subsurface Flow (tiefer Zwischenabfluss)
DSSF	tiefer Zwischenabfluss über dichtem geologischen Untergrund nach SCHÜLER (2006)
ebd.	Ebenda (entspricht vorheriger Quellenangabe)
etc.	Et cetera
EW	Eindringwiderstand
FP	Forschungspraktikum
FRA	Einzugsgebiet Frankelbach
GIS	Geographisches Informationssystem
GIS-DRP	GIS-basiertes Tool zur Erstellung von Abflussprozesskarten nach MÜLLER et al. (2009)
GPV	Gesamtporenvolumen
HOF	Hortonian Overland Flow (HORTON'scher Oberflächenabfluss)
HOL	Einzugsgebiet Holzbach
HUE	Einzugsgebiet Huewelerbach
ka	Luftleitfähigkeit
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit
o. Ä.	oder Ähnliches
o. g.	oben genannt
PBS	Prozessbeurteilungsschemata nach SCHERRER (2006)
pf	dekadischer Logarithmus des Betrages der Bodenwasserspannung

P Ø	Porendurchmesser
RLP	Rheinland-Pfalz
SOF	Saturation Overland Flow (Sättigungsoberflächenabfluss)
sog.	sogenannte
SSF	Subsurface Flow (Zwischenabfluss)
Tab.	Tabelle
TRD/Rt	Trockenrohddichte / Rohddichte trocken
u. a.	unter anderem
WEI	Einzugsgebiet Weierbach
z. B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1 Rahmen der Arbeit

„Rund ein Drittel der Erdoberfläche ist mit Wäldern bedeckt“ (HIRSCHBERGER, 2007, S.1). Dies entspricht einer Fläche von etwa 3,9 Milliarden Hektar (GRIESSHAMMER, 2005). Auf Europa bezogen entfallen von dieser globalen Waldfläche etwa 160 Millionen Hektar (entspricht 4 % der globalen Waldfläche) (ebd.); in Deutschland werden ca. 11 Millionen Hektar und damit 30 % der bundesdeutschen Fläche von Wäldern bedeckt, wobei der Laub- und Mischwaldanteil 73 % beträgt (DVWR, 2011). Während der letzten vier Jahrzehnte wurde die waldbaulich genutzte Fläche in Deutschland um ca. eine Million Hektar vergrößert; ein gegenläufiger Trend im Vergleich zu den meisten anderen europäischen oder auch außereuropäischen Staaten (ebd.). Hierdurch wird deutlich, welchen hohen Stellenwert der Wald in Deutschland besitzt und dass innerhalb der letzten Dekaden ein Bewusstsein für das Ökosystem Wald und dessen nachhaltige Entwicklung ausgebildet wurde.

Wälder erfüllen eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen, die ökologische (Schutzfunktion, Lebensraumfunktion), ökonomische (Nutzungsfunktion) sowie soziale Belange (Erholungsfunktion) betreffen. Eine der bedeutendsten Funktionen ist jedoch, neben der Sauerstoffproduktion und der Kohlendioxidspeicherung, die Speicherung und Klärung der Süßwasservorräte der Erde (GRIESSHAMMER, 2005). „Waldeinzugsgebiete liefern vielerorts einen bedeutenden Teil unseres Trinkwassers, da sie verglichen mit anderen Ressourcen (z. B. Uferfiltration oder Grundwasser in landwirtschaftlich genutzten Gebieten) qualitativ hochwertigeres Wasser liefern“ (LANGE et al., 2006, S.25). Speziell im Zusammenhang mit diesen Wasserressourcen spielt der Wald und dessen Einfluss auf den gesamten Landschaftswasserhaushalt eine wichtige Rolle (MCCULLOCH & ROBINSON, 1993).

So schützen Wälder die Bodenoberfläche durch ihr Kronendach und die humose Streuauflage vor dem unmittelbaren Auftreffen des Niederschlages. Auflagehorizonte weisen zudem meist hohe hydraulische Leitfähigkeiten auf (CASPER, 2002), was das Infiltrationsvermögen erhöht und die Erosionsanfälligkeit vermindert. Auch die Wasserspeicherfähigkeit von Waldböden gilt gemeinhin als höher im Vergleich zu jener von Freilandböden (HEGG, 2004). Ein weiterer positiver Aspekt waldbaulicher Nutzung ist, dass Hochwald wie keine andere Landnutzungsart Hochwasserspitzen zu mindern vermag (MOESCHKE, 1998; MESSER, 2008).

Dieses Potential wird vor allem durch die Waldvegetation generiert. Jene verdunstet im Vergleich zu anderen Nutzungsvarianten mehr Wasser, wodurch dem Boden rascher und bedingt durch die Baumwurzeln tiefer Wasser entzogen wird (HEGG, 2004). Wie stark die Minderung schwerer Hochwässer aufgrund von forstlicher Nutzung letztendlich ausfällt ist jedoch schwer abzuschätzen und stark mit dem jeweiligen Einzugsgebiet, dessen spezifischer Ausgestaltung (Landnutzungsanteile) und der Art des Waldes verbunden.

Einschränkend wird im Kontext der Hochwasserminderung von CALDER & AYLWARD (2006) sowie WAHREN et al. (2007) bemerkt, dass Wälder im Falle von Starkregen nur in begrenztem Umfang das Ausmaß von großen Überflutungen reduzieren können (MESSER, 2008). Bestätigt wird diese These durch zahlreiche Hochwasserereignisse, die auch in hauptsächlich von Wald geprägten Einzugsgebieten mikro- und mesoskaliger Größe auftraten (z. B. Einzugsgebiet Frankelbach im Nordpfälzer Bergland 1993, 1995 und 2002).

Diese und andere kontrovers geführte Diskussionen an der Schnittstelle von Hydrologie, Bodenkunde, Geographie und Botanik lassen erkennen, dass Wald und der Kenntnisstand über seine hydrologischen und insbesondere boden-hydrologischen Eigenschaften bis heute als nicht abschließend erforscht und verstanden gelten (CALDER, 2005; MENDEL, 2000; SCHÜLER et al., 2009). So betonte CALDER (2005), dass die Interaktionen zwischen Wald und Boden eine Grauzone im hydrologischen Kenntnisstand darstellen. Ebenso unterstrichen SCHOBEL (2008) und SCHÜLER et al. (2009), dass Defizite im Expertenwissen über Abflussbildung- und -konzentration bestehen und dass die generellen Wechselwirkungen zwischen Forst, Boden und Wasser in waldbaulich genutzten Gebieten noch bei Weitem nicht hinreichend geklärt sind.

Hinzu kommt, dass der Wald und diejenigen die ihn bewirtschaften, vor dem Hintergrund des Klimawandels, zukünftig mit neuen, bisher unbekanntem Umweltbedingungen umgehen bzw. sich auf diese einstellen müssen. Der Report des INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 2007) bestätigt unter anderem, dass es praktisch sicher zu einer Zunahme der Häufigkeit von Wärmeperioden respektive Hitzewellen sowie von Starkniederschlagsereignissen kommen wird. SPITTLEHOUSE & STEWART (2003) gehen dementsprechend davon aus, dass der klimatische Wandel innerhalb der nächsten 100 Jahre signifikante Auswirkungen auf Waldökosysteme haben wird.

An diesem Punkt setzt das EU INTERREG NWE IVB Projekt "ForeStClim - Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts" an (<http://www.forestclim.eu>), in dessen Kontext die vorliegende Schrift entstand. Ziel dieses transnationalen Projektes mit 21 Partnern aus Deutschland, Luxemburg, Frankreich,

Großbritannien und den Niederlanden ist es, regionenbezogene Waldbewirtschaftungs- und Waldschutzstrategien für die künftig zu erwartenden klimatischen Bedingungen zu entwickeln. Aus diesem Grunde arbeiten Wissenschaftler, Zweckverbände und Interessengruppen der Partnerländer zusammen und nähern sich dem Themenkomplex des „Nachhaltigen Forstmanagements“ aus sehr unterschiedlichen Richtungen. Unter anderem werden Untersuchungen zur Physiologie und Konkurrenzstärke verschiedener Baumarten, Wachstums- sowie bodenhydrologische Modellierungen, Standortanalysen im Kontext der Klimaprojektionen des IPCC und Analysen zur C-Sequestrierung in Wäldern durchgeführt. Insgesamt möchte das Projekt durch die kooperative Tätigkeit der Projektpartner die ökonomische und ökologische Stabilität der Wälder in Nordwesteuropa fördern. Dabei ist der Fokus stets darauf gerichtet Forstwirten und Entscheidungsträgern im Waldmanagement Ideen und Instrumente zur Verfügung zu stellen, die dabei helfen sollen den Wald als Gesamtsystem in all seinen Facetten nachhaltig zu bewirtschaften, auszubauen und zu schützen.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zum nachhaltigen Forstmanagement liefern und beschäftigt sich daher mit den grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser in forstlich genutzten Gebieten. Hierzu wurden auf 25 Test-Plots in vier ForeStClim-Untersuchungsgebieten in Rheinland-Pfalz und dem Großherzogtum Luxemburg bodenkundlich-hydrologische Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich wurde ein, auf einem Geografischen Informationssystem (GIS¹) basierendes Werkzeug zur Ausweisung dominanter Abflussprozesse (GIS-DRP²) nach MÜLLER et al. (2009) in diesen bewaldeten Testgebieten angewandt, validiert und weiterentwickelt.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit gliedert sich demnach in zwei thematische Bereiche. Im ersten thematischen Bereich soll mittels bodenkundlich-hydrologischer Analysen und Messprogramme in bewaldeten Einzugsgebieten ein genaueres Verständnis von im Boden ablaufenden hydrologischen Prozessen entwickelt werden. Zu den Untersuchungen zählen unter anderem Niederschlagssimulationen auf Punkt- und Plot-Skala sowie Infiltrationsmessungen und die Erhebung bodenphysikalischer Kennwerte der untersuchten

¹ GIS: Geographische Informationssysteme sind rechnergestützte Systeme zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation raumbezogener Daten (BILL, 1999).

² GIS-DRP (nach MÜLLER et al., 2009): Tool zur Erstellung digitaler Abflussprozesskarten in einem GIS durch Ausweisung von dominierenden Abflussprozessen (Dominant Runoff Processes ; DRP). Bsp. siehe Anhang Abb. A1.

Areale. Ein detaillierter Blick auf die Interaktionen zwischen Boden und Wasser in Wäldern soll dabei helfen, dominierende Abflussprozesse während lang anhaltender extensiver Niederschläge in feuchten Winterperioden sowie auch im Zuge von sommerlichen Extrem-Ereignissen besser bewerten und abschätzen zu können. Ein Ziel dieser Arbeit ist daher die Ermittlung von dominanten Abflussprozessen in überwiegend forstlich geprägten Untersuchungsräumen in Rheinland-Pfalz und Luxemburg auf unterschiedlichen geologischen Ausgangssubstraten und den darauf entwickelten Bodenformen.

Der zweite thematische Bereich beschäftigt sich mit der Anwendung, Validierung und Weiterentwicklung eines GIS-Tools zur Ausweisung dominanter Abflussprozesse. Das diesbezügliche Ziel ist die Validierung des von MÜLLER et al. (2009) entwickelten GIS-DRP-Werkzeugs und dessen Weiterentwicklung in bewaldeten Gebieten. Da Wälder sehr komplexe Ökosysteme darstellen, sollen die durch GIS-DRP erzeugten Abflussprozesskarten auf Basis der erhobenen Geländebefunde validiert werden. Potentiale für Modifizierungen am Tool sollen zusätzlich eruiert und darauffolgend implementiert werden. Die bodenkundlich-hydrologischen Untersuchungen dienen daher nicht ausschließlich der Verbesserung des Prozessverständnisses von Wechselbeziehungen definierter Naturressourcen, sondern auch der Weiterentwicklung und Optimierung der Abflussprozesskarten nach GIS-DRP-Methode.

Darüber hinaus wird GIS-DRP in Landschaftsräumen eingesetzt und validiert, die durch die transnationale Kooperation der ForeStClim-Projektpartner im Fokus des Interesses liegen. So kann das Tool hauptsächlich am Beispiel der ForeStClim-Untersuchungsgebiete im Großherzogtum Luxemburg auch hinsichtlich eines Regionalisierungsansatzes überprüft werden. Dieser Regionalisierungsansatz ist wichtig, da andere physio-geographische Naturräume und neue Skalen-Ebenen (von der Mikro- zur Meso-Skale) häufig mit gänzlich unterschiedlichen Ausgangsbedingungen aufwarten, die die digitalen Werkzeuge vor neue Aufgaben stellen.

2. Stand der Forschung

2.1 Abflussbildung im Überblick

Die Abflussbildung ist ein zentrales Thema der Hydrologie, das nach wie vor noch nicht vollständig verstanden wird (MENDEL, 2000). ZUIDEMA (1985) definiert die Abflussbildung als einen raumzeitlichen Prozess, der den Niederschlag von der Bodenoberfläche bis in das Gerinne transportiert. Sie wird demzufolge initiiert, sobald Niederschlag auf der Erdoberfläche auftritt. Es hängt dann vom Zustand der einzelnen Umweltmedien - Atmosphäre, Landoberfläche, Boden - ab, welche Mengen des Niederschlages mit welcher Verzögerung in die verschiedenen Pfade des Wasserkreislaufs aufgeteilt werden (MENDEL, 2000). Wird das Wasser in die Atmosphäre zurückgeführt, erfolgt dies über die Evapotranspiration, wobei eine Unterscheidung in Verdunstung von Vegetationsoberflächen (Interzeptionsverdunstung), Verdunstung durch die Vegetation (Transpiration) und Verdunstung durch die Bodenoberfläche (Evaporation) getroffen wird (BRONSTERT, 2005). Der Prozess der Interaktion zwischen den Ökosphären im Zuge eines Niederschlagsereignisses wird, unter anderem von LEIBUNDGUT (1999), als entscheidend für die Wasserverteilung in einem Einzugsgebiet sowie für die Versorgung von Pflanze, Mensch und Tier mit lebensnotwendigem Wasser (WOHLRAB et al., 1992) angesehen. Die auf die Erdoberfläche auftreffenden Niederschlagsanteile tragen teils auf und teils unter der Erdoberfläche, unter dem Einfluss der Schwerkraft (DIN, 1994; MENDEL, 2000), zum Abfluss bei. Abfluss wird im Allgemeinen mit einer Bewegung verbunden und ist demnach nicht nur auf das Fließgewässer beschränkt, sondern in vielen Teilen eines Einzugsgebietes vertreten. Jedoch sind nicht alle Teile des gesamten Einzugsgebietes für den Abfluss verantwortlich, weshalb eine Gewichtung der einzelnen Teilflächen nach ihrem jeweiligen Einfluss vorteilhaft erscheint (SCHOBEL, 2008). Neben der Abflussbildung und dem Abfluss muss auch der Begriff der Abflussbildungsprozesse an dieser Stelle genannt werden. BRONSTERT (2005) definiert Abflussbildungsprozesse als all diejenigen hydrologischen Prozesse in einem Einzugsgebiet, die in ihrer Gesamtheit den Abfluss im Fließgewässer bzw. Vorfluter des Einzugsgebietes bilden. Zusammen mit dem Niederschlag, den Verdunstungsprozessen sowie den verschiedenen Speichervorgängen bilden die unterschiedlichen Prozesse der Abflussbildung die relevanten Bereiche des lokalen bzw. kleinräumigen Wasserkreislaufs (BRONSTERT, 2005). CASPER (2002) weist darauf hin, dass Abflussbildungsprozesse weder zeitlich noch

räumlich völlig voneinander trennbar sind und greift damit Aussagen zu abflussbildenden Prozessen z. B. durch DUNNE, 1978; SCHERRER, 1997; PESCHKE et al., 1998 und BONELL, 1998 auf. Des Weiteren ist die durch BLÖSCHL (1996) beschriebene Skalenabhängigkeit der Abflussbildungsprozesse zu beachten, wonach ihre Beschreibung mit wachsender Skalenebene³ komplexer und unschärfer wird (CASPER, 2002).

Die angesprochenen Pfade, die das Wasser nach Auftreffen auf der Erdoberfläche einschlagen kann, werden nach dem Ort der hauptsächlichen Bewegung in oder auf dem Boden klassifiziert. Das bedeutet, dass dem Vorfluter nach systemhydrologischem Verständnis bestimmte Niederschlagsmengen über die Bodenoberfläche (Oberflächenabfluss), die oberflächennahen Schichten (Zwischenabfluss) und über das Grundwasser (Grundwasserabfluss) zugeführt werden (MENDEL, 2000; Abb. 2.1). Der Ressource Boden wird dabei als Bezugsgröße sowie als Faktor der Abflussbildung eine entscheidende Rolle zugewiesen.

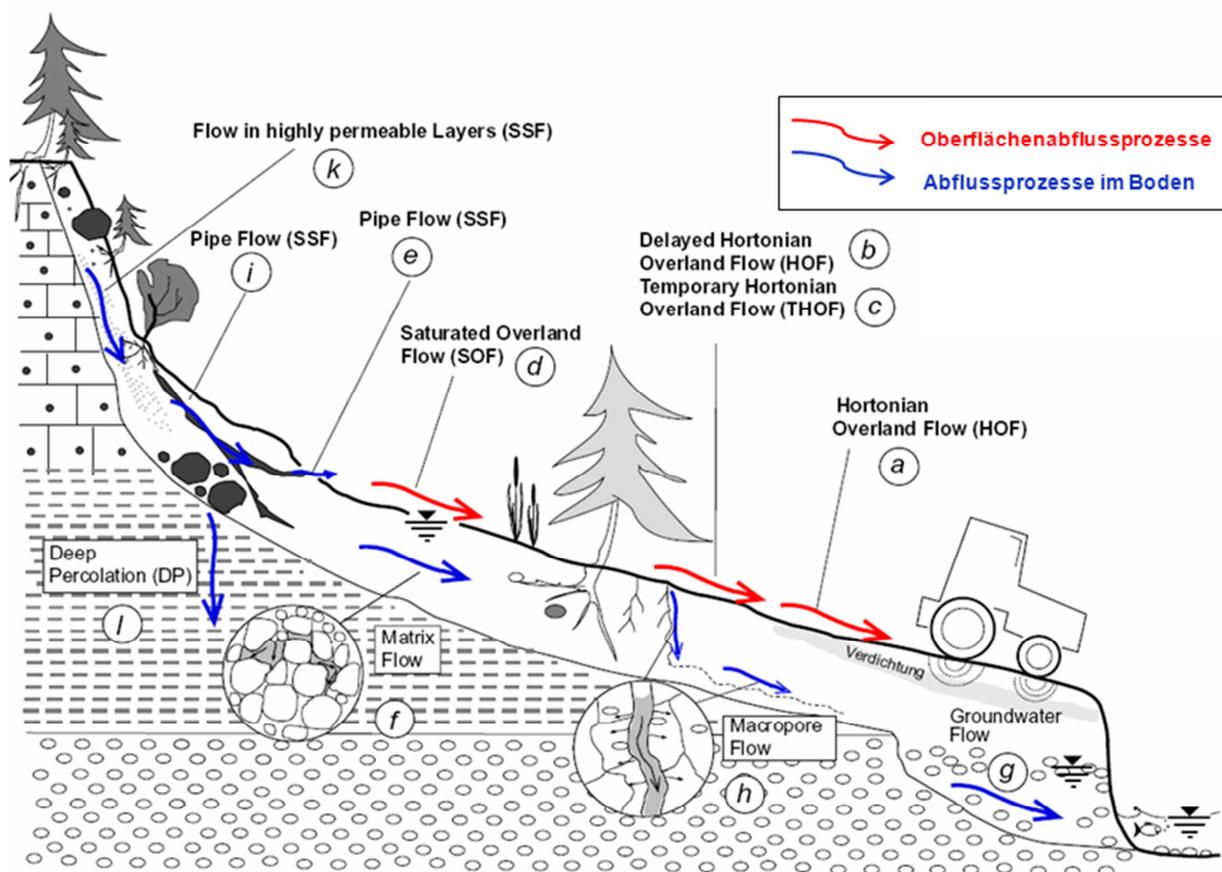


Abb. 2.1: Abflussprozesse in einem Hang (SCHERRER, 2006; verändert)

³ Skalenebenen: Punkt-Skala < Plot-Skala < Hang-Skala < Einzugsgebiets-Skala (Mikro < Meso < Makro-Skala). Genauere Betrachtungen verschiedener Skalen finden sich unter anderem in BLÖSCHL & SIVAPALAN (1995).

Im Folgenden soll detaillierter auf die wichtigsten Abflussprozesse und Faktoren der Abflussbildung eingegangen werden. Weiterführende Informationen zu hydrologischen Grundlagen werden ausführlich, unter anderem in den Werken von BRONSTERT (1994, 2005) und MENDEL (2000), dargelegt.

Infiltration

Unter dem Begriff der Infiltration versteht man die Bewegung des Sickerwassers von oben her in den Boden (BLUME et al., 2010; Abb. 2.2). Das bedeutet, dass nicht verdunstendes Niederschlagswasser, welches nicht von der Vegetation aufgenommen oder festgehalten wird, bei ungestörten Bedingungen in die Bodenoberfläche einsickern kann (BRONSTERT, 1994; MÜLLER, 2010). Die mit der Infiltration verknüpfte Größe der Infiltrationsrate wird nach HERMANN (1977) als der mengenmäßige Verlauf der vertikalen Absickerung definiert, wobei sie das Volumen angibt, das ein Boden eines bestimmten Zustandes (Vorfeuchte) pro Flächen- und Zeiteinheit aufnehmen kann (HÜMANN, 2008). Den Grenzwert der Infiltration bei Bodensättigung nennt man minimale Infiltrationsrate oder Endinfiltrationsrate (MENDEL, 2000). Sowohl Infiltration als auch Infiltrationsrate und Infiltrationskapazität⁴ sind wichtige Ausgangsparameter der Abflussbildung und stark abhängig von diversen Standort- und Umweltfaktoren. Diese sind vor allem die Körnung des Substrates (Korngrößenverteilung), die Verdichtungsintensität, die Hangneigung, sowie die biologische Aktivität, die Vegetationsbedeckung (Bodennutzung, Bewuchs) und die jeweiligen Witterungsverhältnisse (z. B. Frost oder extreme Trockenheit). Der die Infiltration am stärksten beeinflussende Parameter ist jedoch die Vorfeuchte des Bodens (Anhang Abb. A2).

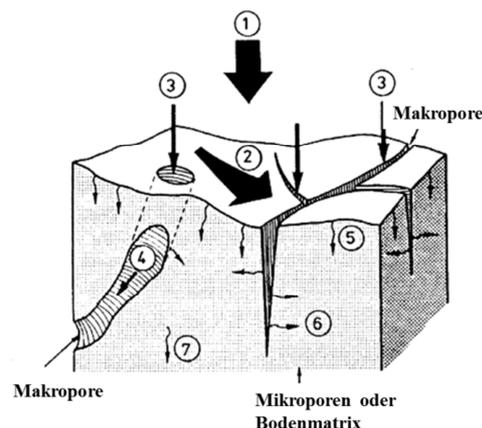


Abb. 2.2: Hydrologische Prozesse bei der Infiltration (BRONSTERT, 1994 nach GERMANN, 1981)

⁴ Infiltrationskapazität: maximal möglicher Wasserfluss in die Bodenoberfläche (BRONSTERT, 1994).

- 1) Niederschlag; 2) Oberflächenabfluss; 3) Sickerung in die Makroporen; 4) Sickerung in den Makroporen; 5) Sickerung in die Mikroporen der Bodenoberfläche; 6) Sickerung von den Makroporen in die Mikroporen; 7) Sickerung in den Mikroporen

Oberflächenabfluss

Dieser Teil des abflusswirksamen Niederschlages, der über die Bodenoberfläche dem Vorfluter zufließt (MENDEL, 2000), kann in drei unterschiedliche Prozesse nach seiner Entstehungsart (BRONSTERT, 1994) untergliedert werden.

HORTON'scher Oberflächenabfluss (Hortonian Overland Flow, HOF) tritt auf, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität überschreitet. HORTON (1933) definierte diesen speziellen Abflusstyp demnach als Infiltrationsüberschuss (Abb. 2.3a). Dieser kann nach BERGSMA (1983) auch verzögert auftreten, infolge von aufgesättigtem Boden nach Niederschlag und infolge dessen verringerter Infiltrationsrate (MÜLLER, 2010). Typischerweise tritt HORTON'scher Oberflächenabfluss jedoch auf versiegelten oder stark verdichteten Flächen auf. Andere Ursachen für das Auftreten dieses Abflusstyps sind Verschlammungen der Bodenoberfläche (z. B. SCHRÖDER, 2000) oder deren erhöhte Hydrophobizität (z. B. DOERR, 2003).

Gesättigter Oberflächenabfluss (Saturation Overland Flow, SOF) stellt den zweiten Abflusstyp dar, der dem Gerinne oberflächlich zugeführt wird. Man spricht in diesem Fall auch über, von unten nach oben aufgesättigte Flächen (MENDEL, 2000), da es bei gesättigten Bodenverhältnissen und weiterem Niederschlag zu einem Sättigungsüberschuss kommt, der über die Bodenoberfläche dem Gefälle folgend abfließt (Abb. 2.3b). Flachgründige Böden sind ebenso prädestiniert als Sättigungsflächen zu agieren, wie etwa stauende Böden (z. B. durch natürliche oder anthropogene Verdichtung) oder Unterhang- und Auenbereiche.

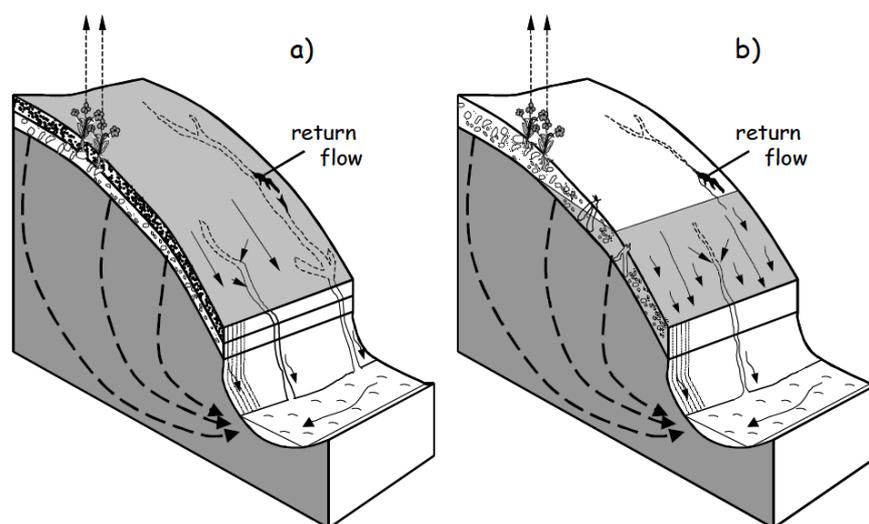


Abb. 2.3: Oberflächenabfluss am Hang (Bronstert, 1994 nach Kölla, 1987),

a) HORTON'scher Oberflächenabfluss, b) Sättigungsflächenabfluss

Der dritte Abflusstyp, der über die Bodenoberfläche fließt, wird als Returnflow bezeichnet (Abb. 2.3). Unter dieser Art des Abflusses versteht man Niederschlagswasser, welches am Oberhang infiltriert und in tieferen Hangbereichen wieder austritt, um darauffolgend als Oberflächenabfluss abzufließen (BRONSTERT, 1994; MUSGRAVE & HOLTAN, 1964). Ursachen für dieses Phänomen sind z. B. ausstreichende Gesteinsschichten, Änderungen in der Permeabilität (dichte, stauend wirkende Schichten) oder andersartige Morphologie im Hangbereich.

Zwischenabfluss

Der Zwischenabfluss (Subsurface Flow, SSF; oft auch als Interflow bezeichnet) ist das Sickerwasser, das sich nach der Infiltration lateral durch die oberen Bodenschichten bewegt, bis es einen Vorfluter erreicht oder wieder an die Oberfläche exfiltriert (LINSLEY et al., 1949), ohne dabei mit dem Grundwasser in Berührung gekommen zu sein (LINSLEY et al., 1958). Hierbei fließt das Wasser, je nach Beschaffenheit des Bodens (Struktur, Textur, Porenverteilung, Vorfeuchte etc.), verschiedenste Fließpfade nutzend, oberflächenparallel durch den Boden hindurch in Richtung Vorfluter (Abb. 2.4). Dementsprechend kann und muss der Zwischenabfluss in verschiedene Fließprozesse unterteilt werden. Basis der Untergliederung ist die Einteilung des Porensystems nach GERMANN & BEVEN (1981) in ein Mikroporen- und Makroporensystem.

Von Matrixfließen (Matrix Flow) wird gesprochen, wenn sich eine langsame Sickerbewegung durch die Mittel- und Feinporen, also das Mikroporensystem ($P \text{ } \varnothing < 10 \text{ } \mu\text{m}$), einstellt. Das Ausmaß der Wasserbewegung ist dabei abhängig von dem antreibenden Potentialgefälle und den Parametern Durchlässigkeit oder Wasserleitfähigkeit des Bodens (BLUME et al., 2010). Die Wasserbewegung in den Mikroporen wird insgesamt durch das Potentialkonzept beschrieben (BRONSTERT, 1994). Zur mathematischen Definition des Wasserflusses wird die RICHARDS-Gleichung verwendet (RICHARDS, 1931; SCHOBEL, 2008), welche auf dem DARCY-Gesetz beruht. Matrixfließen wird insgesamt als langsamer Prozess klassifiziert, da die genannten Poren hauptsächlich der Speicherung von Wasser durch auftretende Kapillar- und Adsorptionskräfte dienen (MENDEL, 2000). Fließprozesse durch die Bodenmatrix kommen aufgrund der beschriebenen Bedingungen und Abhängigkeiten eher im Bereich von Hangfüßen und fast gesättigten Auenbereichen vor. MCDONNELL (1990) und MONTGOMERY et al. (1997) merken diesbezüglich an, dass besonders in der Mikroskale (nach BLÖSCHL & SIVAPALAN (1995) Einzugsgebiete einer Größe zwischen 1 km^2 und 10 km^2 Größe) Abflussbildungsprozesse hauptsächlich von Reaktionen in Hanglagen und Bereichen nahe

dem Vorfluter beherrscht werden. Hier wird das Matrixfließen durch den Druckimpuls des infiltrierenden Niederschlages auf das im Boden befindliche Wasser am Oberhang und durch Druckfortpflanzung im Mittelhangbereich initiiert. Das Wasser, welches sich also vor dem Niederschlagsereignis schon im Boden befindet, wird durch das infiltrierende Sickerwasser verdrängt (auch Piston Flow genannt). Hierdurch wird es selbst zum Sickerwasser (SCHOBEL, 2008).

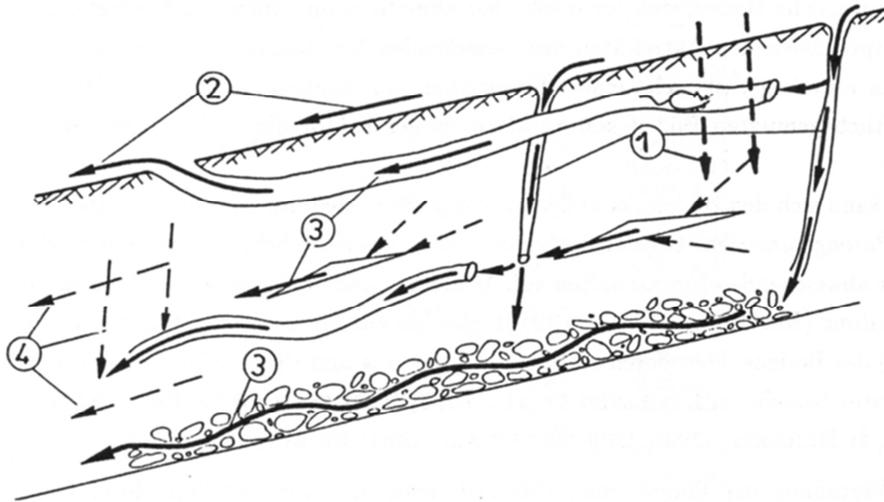


Abb. 2.4: Schema der verschiedenen Fließwege in einem Hangboden (BRONSTERT, 1994, nach ZUIDEMA 1985)
 1) Infiltration in Mikro- und Makroporen; 2) Oberflächenabfluss und Return Flow; 3) schneller lateraler Zwischenabfluss (inkl. Preferential Flow); 4) Matrixfließen

Das Pendant zum Matrixfluss stellt der sogenannte Makroporenfluss (Macropore Flow) dar. Unter diesem Begriff werden generell alle Bodenwasserbewegungen verstanden, die spezielle Fließwege nutzen (SYMADER, 2004). Hauptsächlich werden diese Wasserwege (Makroporen, Pipes, Pseudopipes) durch biologische Aktivität wie z. B. Bioturbation oder abgestorbene Wurzelmasse sowie durch kryoturbate und pedogene Prozesse (Frostspaltung, Quellung und Schrumpfung) gebildet (z. B. BEVEN & GERMANN, 1982; WEILER, 2001). Diese Art des Zwischenabflusses wird insgesamt als schnell eingestuft, da hier die kontinuierlichen Grobporen ($P \text{ } \varnothing > 10 \mu\text{m}$) gravitativ bevorzugtes Fließen ohne wesentliche Kapillarkräfte ermöglichen, was in Fließgeschwindigkeiten um $1,3 \text{ cm s}^{-1}$ resultiert (HERMANN et al., 1989). Andere Autoren wie z. B. SCHÜLER (2005) sprechen sogar von höheren Fließgeschwindigkeiten. Dabei steigt die Geschwindigkeit und Transportkraft des durch den Boden fließenden Wassers generell mit zunehmendem Durchmesser und Länge der Poren (SYMADER, 2001). Makroporen ermöglichen dem infiltrierenden Niederschlagswasser demnach ein schnelles Einsickern in tiefere Bodenschichten. Hier kann es gespeichert werden und der Vegetation in trockenen Perioden zur Verfügung stehen. Ist das Durchsickern des

Wassers jedoch durch unterirdische Schichtungen (z. B. Festgestein oder verdichtete Bodenhorizonte) nicht möglich, so kann ein schneller lateraler Fließprozess dicht unter der Bodenoberfläche entstehen. Dieser kann sich auf impermeablen liegenden Schichten und in erodierten Hohlräumen (pipes) zusätzlich sammeln und dann als sogenannter präferentieller Fluss (Preferential Flow), dem Gefälle folgend, dem Gerinne zugeführt werden. Solche lateral unter der Bodenoberfläche verlaufenden Makroporenflüsse werden aufgrund dessen auch als hochwasserwirksame Abflusstypen eingestuft, obwohl sie nicht unmittelbar sichtbar und schwer zu erfassen sind (MORGAN, 1999).

Basisabfluss

Unter Basisabfluss wird jener Anteil des Niederschlagswassers verstanden, der nach der Infiltration an der Bodenoberfläche vertikal durch das Bodenprofil sickert (meist durch Makroporen oder präferentielle Fließwege, jedoch auch als Matrixfluss) und dem Grundwasser zugeführt wird. Hier sammelt sich das Sickerwasser und füllt Hohlräume von Lockersedimenten und Gesteinen aus (SCHERRER, 2006). Dabei kommt es zur Grundwasserneubildung, wenn die infiltrierte Niederschlagsmenge die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens übersteigt (MÜLLER, 2010) und keine starken entgegengesetzten Wasserentzüge durch die Vegetation entstehen. Oftmals fließt dieses Wasser in Richtung eines Vorfluters, weshalb man neben Basisabfluss auch den Begriff Groundwater Flow verwendet (Abb. 2.1). SCHERRER & NAEF (2003a) bezeichnen das Durchsickern des infiltrierte Niederschlagswassers als Tiefensickerung (Deep Percolation, DP, Abb.2.1). Der genannte Prozess tritt vor allem auf durchlässigen und tiefgründigen Böden sowie auf flachgründigen Böden mit permeablem Unterböden und Ausgangsgesteinen auf.

2.2 Abflussgeschehen unter Wald

Wald gilt gemeinhin als die terrestrische Landnutzungsart, die das größte Wasserspeichervermögen im Vergleich zu den Nutzungsvarianten Grünland, Ackerbau, Brachen sowie Ödland und versiegelten Flächen aufweist (MESSER, 2008). Das zusätzliche Wasserspeicherpotential der Wälder, welches die Abflussbildung bei einem Niederschlagsereignis beeinflusst, wird dabei hauptsächlich durch den Boden generiert (HEGG, 2006). Waldböden sind i. d. R. gut entwickelt und bieten eine raue Oberfläche. Die Wurzelsysteme vieler Baumarten sind komplexer Natur und lockern den Oberboden auf, was wiederum positive Effekte hinsichtlich des Retentionsvermögens generiert. In diesem Kontext spielen Wald und Forstwirtschaft eine bedeutende Rolle, unter anderem im vorbeugenden

Hochwasserschutz, da Wälder den Abfluss bremsen und Hochwasserspitzen kappen können (SCHMIDT, 2003, SCHÜLER, 2007). Theoretisch kann der Abfluss so lange reduziert oder verzögert werden, bis die Wasserspeicherkapazität des Waldstandortes überschritten wird (SCHÜLER, 2006).

Die grundsätzlich positive Bewertung von Waldstandorten bezüglich des Wasser- und speziell des Bodenwasserhaushaltes, verglichen mit anderen Nutzungsvarianten, liegt vorwiegend in einer meist gut ausgeprägten Infiltrationsleistung begründet. Eine hohe Infiltrationsleistung ist jedoch nur dann relevant, wenn das Niederschlagswasser nicht durch Verdunstung (siehe Kapitel 2.1) der Atmosphäre zurückgeführt oder durch Interzeption in den Baumkronen zurückgehalten wird.

Die Verdunstungsleistung eines Waldbestandes ist maßgeblich von der Niederschlagsverteilung abhängig (MARKART et al., 2007). Die Menge des vom Wald aufgefangenen Niederschlages variiert, je nach Baumart und Jahreszeit, zwischen 25 % (z. B. Buche) bis ca. 50 % (immergrüne Fichte) des jährlichen Freilandniederschlages. Nach MENDEL (2000) werden z. B. in Fichtenbeständen bei jährlichen Niederschlägen um 750 mm fast 90 %, um 1.200 mm ca. 40 % und bei Niederschlägen um 2.000 mm ca. 20 % verdunstet. Nach LAWA (2000) werden pro Ereignis durchschnittliche Niederschlagsmengen von 0,5 - 5 mm in den Baumkronen gespeichert. Auch hier ist der aufgefangene Niederschlag abhängig von der Baumart und der Dichte des Kronendachs. Im Falle von Starkregen spielt die im Kronenraum aufgefangene Wassermenge nach LÜSCHER und ZÜRCHER (2003) jedoch nur eine untergeordnete Rolle für die Abflussbildung.

Der übrige Niederschlag, welcher nicht durch das Kronendach zurückgehalten wird, trifft auf einen i. d. R. von einer Streuschicht bedeckten Waldboden und wird nach DIN 4049 in durchfallenden Niederschlag, abtropfenden Niederschlag und Kronendurchlass unterteilt; zudem tritt Stammabfluss auf. Letzterer ist baumartenspezifisch und kann z. B. in Buchenaltbeständen mit bis zu 20 % des Jahresniederschlages zur Wasserbilanz beitragen (SCHWÄRZEL et al., 2011). Die Humusaufgabe weist oftmals hohe hydraulische Leitfähigkeiten $> 300 \text{ cm d}^{-1}$ gemäß der Klassifikation nach WOHLRAB et al. (1992) auf (MESSER, 2008), was eine hohe Infiltrationsleistung begünstigt, und bietet zudem eine additive Interzeptionskapazität von ca. 2 mm pro Ereignis (LAWA, 2000).

Faktoren, die die Infiltration an der Waldbodenoberfläche negativ beeinflussen können, sind vor allem die Hydrophobizität der Streu, Verdichtungen aufgrund von Befahrung bei Holzerntearbeiten oder Sättigung des kompletten Bodenspeichers physiologisch flachgründiger oder schon vernässter Standorte (SCHOBEL, 2008). Unter solchen Bedingungen

kann auch unter forstlicher Nutzung oberflächlicher Abfluss in Form von Hortonian Overland Flow (HOF) bzw. Saturation Overland Flow (SOF) generiert werden (HÜMANN et al., 2011). Generell erwarten jedoch viele Autoren (z. B. DVWK, 1999; WOHLRAB, 1992) keinen Oberflächenabfluss in Wäldern. ZHANG et al. (2006) geben diesbezüglich an, dass der oberflächliche Sättigungsabfluss in Waldgebieten gewöhnlich nicht mehr als 10 % des Niederschlagsereignisses ausmacht.

Ist der Waldboden natürlich entwickelt und nicht gestört, d.h. besitzt er ein durch Wurzelaktivität und Bioturbation etabliertes, weit verzweigtes Makroporensystem, so kann das Niederschlagswasser ungehindert in den meist locker gelagerten Oberboden infiltrieren. Die sich darauffolgend oftmals im Boden entwickelnden Makroporenflüsse können beispielsweise nach CASPER (2002) und ANDERSON et al. (2009) besonders in Hangbereichen bewaldeter Einzugsgebiete der mittleren Breiten als dominierend im Vergleich zu anderen Abflussprozessen angesehen werden. Zusammengenommen können die Subsurface Flow Prozesse (SSF) in Einzugsgebieten mit überwiegend forstlicher Nutzung mehr als 90 % des Abflusses betragen (CHANG, 2003). Der Makroporenfluss tritt dabei häufig als lateraler Preferential Flow auf, der sich entweder gravitativ durch markante Bodenstrukturen (z. B. pipes) oder in Bereichen höherer Permeabilität als die umgebende Bodenmatrix bewegt (WEILER et al., 2005). In flach bis mäßig geneigtem Gelände wird eher von verzögerten Zwischenabflussprozessen ausgegangen. Speziell an Hängen treten jedoch vielfach schnell reagierende Zwischenabflüsse in Wäldern auf, weshalb deren Einfluss auf die Entstehung von Hochwässern nicht vernachlässigt werden sollte. In diesem Zusammenhang wird von diversen Autoren (z. B. CALDER & AYLWARD, 2006; LULL & REINHART, 1972; SCHÜLER, 2006; WAHREN et al., 2007) einschränkend darauf verwiesen, dass Wälder nur limitiert dazu im Stande sind die Auswirkungen von starken bis extremen Niederschlagsereignissen zu vermindern. Diese Aussagen scheinen der allgemeinen Annahme einer großen Wasserspeicherfunktion von Waldböden auf den ersten Blick zu widersprechen. Oftmals ist die Bodenstruktur von Waldbeständen sowie die damit verknüpften bodenphysikalischen Eigenschaften und resultierenden Abflussprozesse jedoch eine direkte Folge negativen anthropogenen Handelns (z. B. schlechte Flächenvorbereitung). Natürlich entwickelten Wäldern sollten demzufolge, im Vergleich zu anderen Nutzungsvarianten, noch immer bessere boden-hydrologische Eigenschaften zugeschrieben werden.

Tiefensickerung (DP) tritt in Wäldern bevorzugt dann auf, wenn eine hohe Infiltrationsleistung gewährleistet ist, die entwickelten Böden locker gelagert und nicht pedogen bzw. anthropogen verdichtet wurden, eine hohe biologische Aktivität nachgewiesen

wird und wenn das geologische Ausgangssubstrat als permeabel klassifiziert werden kann (z. B. Lias-Sandstein). Tiefwurzelnde Laubbaumarten tragen ebenfalls zur tiefen Versickerung des Niederschlagswassers, vor allem in feuchten Winterperioden bei. In der Vegetationszeit findet unter Laubwald mit tief ausgeprägtem Wurzelsystem, aufgrund sehr hoher Transpirationsleistungen, praktisch keine Tiefensickerung statt (HIEGE, 1985; MESSER, 2008).

2.3 Abflussprozessidentifikation und dominierende Abflussprozesse

Das Verständnis der standörtlich unterschiedlichen Abflussprozesse stellt eine Grundvoraussetzung nicht nur für die Planung und Durchführung des dezentralen Hochwasserschutzes dar (SCHÜLER, 2007). Das Wissen um die Abflussgenerierung und Dominanz einzelner Abflussprozesse eines definierten Landschaftsraumes oder -ausschnitts bildet zudem eine wichtige Grundlage des nachhaltigen Landschaftsmanagements. Durch die Kenntnis der differenzierten Abflussprozesse wird es möglich, gezielte Maßnahmen hinsichtlich des klimatischen Wandels und speziell für das nur wenig flexible Ökosystem Wald zu empfehlen und zu ergreifen. Hiermit wird die bestmögliche Nutzung und Bewirtschaftung des Raumes bei gleichzeitiger zukunftsorientierter Planung möglich (SCHÜLER, 2005b & 2006).

Verschiedenste Aspekte der Abflussbildung und der daraus resultierenden Prozesse sind in den letzten Jahren und Jahrzehnten in mikroskaligen Einzugsgebieten untersucht worden, so z. B. durch GERMANN & BEVEN, 1981; ANDERSON & BURT, 1990; SCHERRER, 1997; BUTTLE & McDONALD, 2002; McDONNELL, 2003; WEILER & NAEF, 2003; WEILER et al., 2005. Häufig hatten diese Untersuchungen zum Resultat, dass verschiedene Abflussprozesse gleichzeitig auftreten. In den meisten Fällen dominiert aber ein bestimmter Prozess, sodass die anderen zu vernachlässigen sind (SCHERRER & NAEF, 2001). Aus diesem Grund wurden differenziertere Untersuchungen von verschiedenen hydrologischen und bodenkundlichen Arbeitsgruppen, mit dem Ziel einer Klassifizierung und Beurteilung der dominierenden Abflussprozesse, durchgeführt (u.a. MÜLLER et al., 2009; SCHERRER & NAEF, 2003a,b; SCHOBEL, 2008).

Einen weit verbreiteten Ansatz zur Ausweisung von hochwasserrelevanten Flächen und damit zur Bestimmung dominanter Abflussprozesse in der Landschaft, entwickelte SCHERRER über die vergangenen Jahre (SCHERRER, 1997; SCHERRER & NAEF, 2001; SCHERRER & NAEF, 2003a,b; SCHERRER, 2006; SCHERRER & DEMUTH, 2007). Auf Grundlage von plot-skaligen

Berechnungsversuchen auf Grünland in der Schweiz (FAEH, 1997; SCHERRER, 1997), konnte mit ergänzenden Infiltrationsmessungen und feldbodenkundlichen Untersuchungen ein Kartierschlüssel zur Bestimmung des Abflusstyps im Gelände entwickelt werden (SCHERRER, 2006; SAUER, 2009; MÜLLER, 2010). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten sog. Prozessbeurteilungsschemata (PBS), die die komplexe Natur der Abflussbildung reflektieren und schließlich zur Bestimmung dominanter Abflussprozesse (DRP) am Bodenprofil führen (SCHERRER & NAEF, 2003b). Die von SCHERRER etablierte und in den PBS verwendete Nomenklatur der Abflussprozesse wird in Tab. 2.1 aufgeführt. Die PBS umfassen dabei die Landnutzungsvarianten Acker, Grünland und Wald sowohl bei lang anhaltenden, extensiven Niederschlägen als auch bei kurzen, intensiven Ereignissen. Das Endergebnis dieser bodenhydrologischen Kartierung stellen Abflussprozesskarten des betreffenden Landschaftsraumes dar, die unter besonderer Berücksichtigung des dezentralen Hochwasserschutzes zum nachhaltigen Flächenmanagement beitragen sollen. Im Kapitel 4.2 wird die genannte Methode näher erläutert.

Tab. 2.1: Dominierende Abflussprozesse nach PBS (IHW, 2000; verändert)

Fließweg	Prozessgruppe	Abk.	Reaktionsgeschwindigkeit der Abflussprozesse	Abflusstyp
Oberfläche	Horton'scher Oberflächenabfluss (HOF)	HOF1	sofortiger Oberflächenabfluss infolge Infiltrationshemmnis	1
		HOF2	leicht verzögerter Oberflächenabfluss infolge Infiltrationshemmnis	1
	Sättigungsoberflächenabfluss (SOF)	SOF1	sofortiger Oberflächenabfluss infolge Sättigung	1
		SOF2	verzögerter Oberflächenabfluss infolge Sättigung	2
		SOF3	stark verzögerter Oberflächenabfluss infolge Sättigung	4
	Unterirdisch	Zwischenabfluss (SSF)	SSF1	rascher Abfluss im Boden
SSF2			verzögerter Abfluss im Boden	3
SSF3			stark verzögerter Abfluss im Boden	4
Tiefensickerung (DP)		DP	Tiefensickerung in geologische Schichten	5

Da Ausweisungen von DRP-Flächen und die manuelle Erstellung von Abflussprozesskarten auf Basis des o. g. Bestimmungsschlüssels nach SCHERRER (2006), selbst für mikroskalige

Einzugsgebiete, sehr zeit- und kostenintensiv sind, vereinfachten SCHMOCKER-FACKEL et al. (2007) das komplexe System unter Verwendung eines GIS. Grundlagendaten für diesen Ansatz sind Bodenkarten (1:5000) und Karten der Geologie, der Landnutzung und der Topographie. Häufig aber steht das Kartenmaterial, speziell die detaillierten Bodenkarten, nicht für den zu untersuchenden Landschaftsraum zur Verfügung. Eine Regionalisierung und die Ausweisung von dominierenden Abflussprozessen mesoskaliger Gebiete stellen sich dann als problematisch heraus.

Ähnliche Ansätze zur Ausweisung dominanter Abflussprozesse wurden unter anderem von PESCHKE et al. (1999), SCHOBEL (2005), SCHÜLER (2006) und TILCH et al. (2002, 2006) entwickelt. Bei der "WBS Flab"-Klassifikation⁵ von PESCHKE et al. (1999) werden, gleich dem Verfahren nach SCHMOCKER-FACKEL et al. (2007), neben der Morphologie, der Landnutzung und dem Gewässernetz, detaillierte Bodentypen-Informationen benötigt, was bei einer Anwendung in neuen, nicht messtechnisch erfassten und bodenkundlich nicht kartierten Gebieten problematisch wird ("ungauged basin" nach SIVAPALAN et al., 2003).

Der hauptsächliche Unterschied zwischen der Klassifikationsmethode nach SCHOBEL (2005) und jener nach SCHERRER & NAEF (2003a,b) besteht in der Interpretation der verschiedenen Prozesse und der Entstehungsbereiche des Abflusses. Die kulminierten Randbereiche diverser Einzugsgebiete werden nach SCHERRER & NAEF (2003a,b) sowie von SCHERRER (2006) aufgrund ihrer Neigung (oftmals flach) und der Entfernung zum Vorfluter grundsätzlich als nicht abflusswirksam bzw. abflussrelevant angesehen und dementsprechend als DP (Tiefensickerung) ausgewiesen. Nach SCHOBEL (2005) spielt die Entfernung zum Fließgewässer als genereller Einflussfaktor zur Abflussprozessbildung jedoch keine Rolle, sodass auch die Randbereiche der Untersuchungsgebiete nach ihren realen bodenhydrologischen Eigenschaften klassifiziert werden.

Die Methode zur Ausweisung dominierender Abflussprozesse nach SCHÜLER (2006) entstand ebenfalls in Anlehnung an die Ansätze von SCHERRER & NAEF (2003a,b) sowie SCHMOCKER-FACKEL (2004), basiert aber hauptsächlich auf der forstlichen Standortaufnahme und ist daher zunächst auf Waldgebiete beschränkt. Mittels der Ausweisung von DRP sollen bei diesem System sensitive Forstflächen und linienhafte Strukturen ermittelt werden. Als Ergänzung zu der von SCHERRER & NAEF (2003a,b) und SCHERRER (2006) eingeführten Nomenklatur der Abflussprozesse führte SCHÜLER (2006) den zusätzlichen Abflusstyp DSSF ein. Dieser DSSF-Prozess bezeichnet Zwischenabflussprozesse, die in tieferen Schichten über

⁵ WBS Flab: Wissensbasiertes System Flächen gleicher Abflussbildung (PESCHKE ET AL., 1999).

dichtem geologischen Untergrund (sog. „soil-bedrock interface“ nach TROMP-VAN MEERVELD & MCDONNELL, 2006) generiert werden (SCHÜLER, 2005b & 2006) ⁶.

Jedoch ergibt sich bei dieser forstlichen Methode ein Nachteil durch die nicht flächenhaft vorhandenen digitalen Daten zur Kartierung der Wälder (z. B. RLP ca. 50 % der Forstfläche; mündliche Mitteilung von GAUER, J.; Forsteinrichtung der Landesforsten Rheinland-Pfalz, Koblenz). Zudem besteht ein Einzugsgebiet in den wenigsten Fällen ausschließlich aus waldbaulich genutzten Flächen, sodass Grünland und Ackerflächen einer zusätzlichen Datenakquise bedürfen (bodenkundliche Detailkartierung). Für das in dieser Arbeit untersuchte Testgebiet Frankelbach liegt eine Abflussprozesskarte nach SCHÜLER (2006) vor (Anhang Abb. A13), die zu Validierungszwecken, zusätzlich zu den Abflussprozesskartierungen nach PBS und basierend auf den Geländeuntersuchungen, im Kapitel 5.2 angeführt wird.

TILCH et al. (2002, 2006) entwickelten eine Methode zur Ausweisung von sogenannten HRUs (Hydrological Response Units; Flächen gleicher Abflussbildung) unter Verwendung eines GIS, verfügbarem Datenmaterial (DHM, Landnutzung, Bodenkarten, etc.) und Expertenwissen. Jedes der ausgewiesenen HRU ist charakterisiert durch dasselbe Abflussquellgebiet und denselben Abflussbildungsprozess (TILCH et al., 2002).

In der heutigen Zeit ist die Anwendung von hydrologischen Modellen oder GIS-Applikationen zur Simulation und Ausweisung von dominanten Abflussprozessen und deren Genese demnach weit verbreitet (HÜMANN et al., 2010b). Durch die gezielte Anwendung solcher GIS-Methoden oder Modellansätze ist es möglich, schnell und effizient, zukünftige Managementstrategien zu erarbeiten (z. B. bezüglich des dezentralen Hochwasserschutzes), um anschließend wirkungsvolle Maßnahmen hinsichtlich einer nachhaltigen Landnutzung durchzuführen. In Zeiten eines sich wandelnden Klimas ist dies speziell für Forststandorte wichtig, da die hier getroffenen Entscheidungen und Maßnahmen, aufgrund der langen Umtriebszeiten von Baumbeständen, auf mehrere Dekaden ausgelegt sind und nicht flexibel geändert werden können. Auch für mesoskalige Gebiete ist dies von Bedeutung, um flächendeckende Aussagen zu einem bestimmten Raumausschnitt (z. B. ein Einzugsgebiet) und einer determinierten Fragestellung treffen zu können, ohne zeitaufwändige und kostenintensive Geländekampagnen durchführen zu müssen. Modelle oder GIS-

⁶ In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff des *tiefen Zwischenabflusses* ebenfalls verwendet und durch Abflussprozesskartierungen ausgewiesen. Da dieser Prozess jedoch innerhalb der Weiterentwicklung des GIS-DRP-Tools nach MÜLLER et al. (2009) nochmals größere Relevanz erlangt und um eine Differenzierung zur Abflussprozesscharakterisierung nach SCHÜLER (2006) zu erreichen, wird in dieser Arbeit *tiefer Zwischenabfluss* nicht mit *DSSF* sondern mit *dSSF* betitelt. Weitere Ausführungen finden sich in Kapitel 5.2.3.3.

Anwendungen zur mesoskaligen Untersuchung und Identifikation von Abflussprozessen in unterschiedlichen Landschaftsräumen durch flächendeckend (frei-) verfügbare Geo-Daten sind jedoch kaum vorhanden.

Viele Ansätze der Charakterisierung, Klassifikation und Ausweisung von Abflussprozessen, die analog zueinander entwickelt wurden, z. B. von FAEH (1997), SCHERRER (1997), SCHERRER & NAEF (2003a,b), SCHOBEL (2005), SCHÜLER (2006) und TILCH et al. (2002, 2006), beziehen sich lediglich auf die Mikroskala. Zudem werden häufig Grundlagendaten vorausgesetzt, die nicht flächendeckend zur Verfügung stehen. Dies führt dazu, dass dennoch zeit- und kostenintensive Untersuchungen zur Erlangung der benötigten Daten realisiert werden müssen. Um eine flächendeckend durchführbare Ausweisung von dominanten Abflussprozessen in der Landschaft verwirklichen zu können, entwickelten MÜLLER et al. (2009) eine GIS-Anwendung (GIS-DRP), die lediglich auf digitalen Daten, welche für die meisten Gebiete (frei) verfügbar sind, beruht.

2.4 Abflussprozesserhebung mittels GIS-DRP

Basierend auf der Methode von SCHERRER & NAEF (2003a,b) entwickelten MÜLLER et al. (2009) ein GIS-gestütztes Tool zur Identifikation und Regionalisierung von dominanten Abflussprozessen in der Mesoskala (GIS-DRP). Das Tool kommt hierbei ohne die Nutzung detaillierter Bodeninformation aus. Durch diese neue GIS-gestützte Analyse von Relief, Permeabilität des geologischen Untergrundes und der Landnutzung lassen sich, auch ohne aufwändig erhobene und ausgearbeitete Bodenkarten, Abflussprozesskarten erstellen, die als Grundlage für ein künftiges Flächenmanagement dienen können. Als Input-Daten werden dabei nur das digitale Höhenmodell (DHM), die digitale Geologische Karte sowie die Landnutzungsinformation des zu untersuchenden Landschaftsausschnitts in digitaler Form benötigt (HELLEBRAND, 2010). Niederschlagsintensitäten, Jahreszeiten sowie Bedeckungsgrade (zusammen als Ereignisklasse bezeichnet), die durch das GIS-DRP-Tool abgedeckt werden, sind:

- I. kurze intensive Niederschläge im Sommerhalbjahr (> 50 % Bedeckungsgrad)
- II. lang anhaltende extensive Niederschläge im Sommerhalbjahr (> 50 % Bedeckung)
- III. kurze intensive Niederschläge im Winterhalbjahr (> 50 % Bedeckungsgrad)
- IV. lang anhaltende extensive Niederschläge im Winterhalbjahr (> 50 % Bedeckung)
- V. lang anhaltende extensive Niederschläge im Winterhalbjahr (< 50 % Bedeckung)

Allerdings wurde die GIS-DRP-Methode, wie auch die Originalmethode nach SCHERRER & NAEF (2003a, b), hauptsächlich anhand von und für landwirtschaftliche Flächen entwickelt. Die Anwendung des Tools in Wäldern birgt daher noch Fehlerpotential, auch weil der generelle Zusammenhang zwischen Wald, Boden und Wasser in forstlich genutzten Gebieten noch nicht hinreichend geklärt ist (SCHÜLER et al., 2009). Daher ist es zwingend erforderlich Vorgänge des Wasserflusses in Waldböden eingehend zu untersuchen und ihr Prozessgeschehen zu charakterisieren. Das Verfahren nach MÜLLER et al. (2009) wird in der vorliegenden Arbeit speziell in Waldeinzugsgebieten mithilfe etablierter Arbeits- und Messmethoden validiert und in einem darauffolgenden Schritt angepasst. Im Kapitel 4.2.3 werden die GIS-DRP-Methode und die damit einhergehenden Arbeitsschritte genauer erläutert.

3. Untersuchungsgebiete und Versuchsaufbau

Die Versuche und Experimente der vorliegenden Dissertation wurden in vier ForeStClim-Untersuchungsgebieten in Rheinland-Pfalz und im Großherzogtum Luxemburg durchgeführt (Abb. 3.1). Die ausgewählten Einzugsgebiete repräsentieren typische Mittelgebirgsregionen unterschiedlicher geologischer, hydrologischer sowie geomorphologischer Ausprägung wie sie im nordwest-europäischen Landschaftsraum und speziell in Deutschland und Luxemburg typischerweise vertreten sind. Detaillierte Profilbeschriebe und Fotos der einzelnen Testflächen finden sich im Anhang.

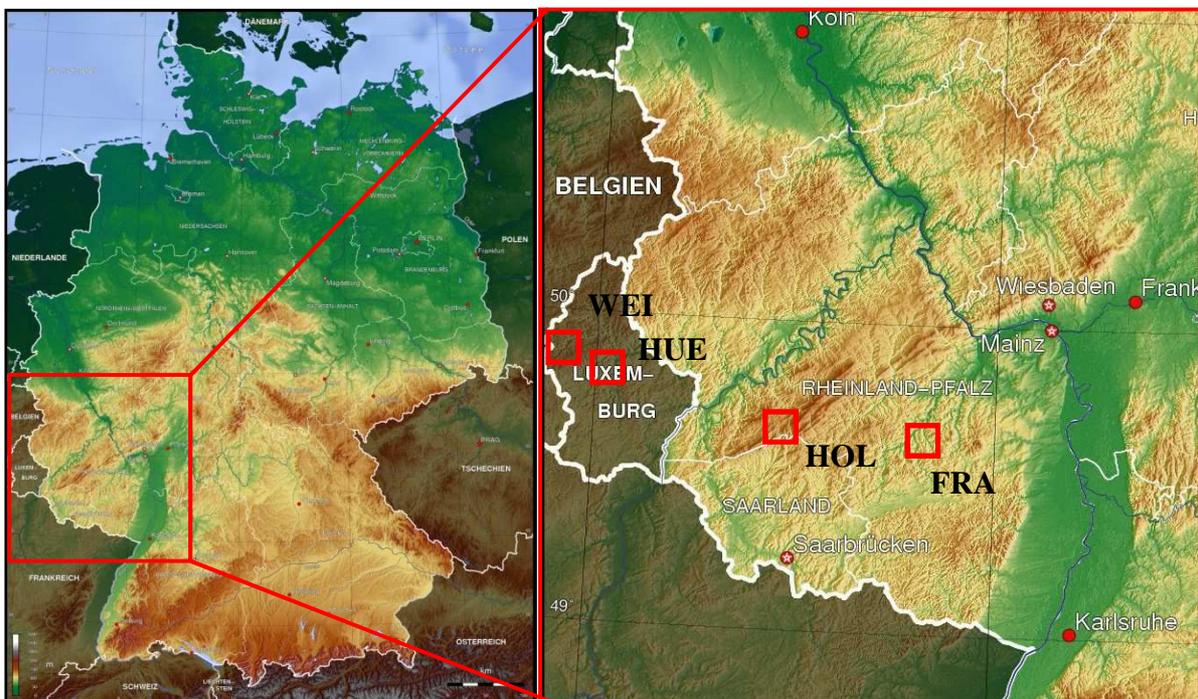


Abb. 3.1: Lage der ForeStClim-Untersuchungsgebiete (<http://www.mygeo.info>); links Bundesrepublik Deutschland mit angrenzenden Ländern; rechts Ausschnitt Rheinland-Pfalz und Luxemburg mit Verortung der Einzugsgebiete

3.1 Frankelbach

Naturraum

Das knapp 8 km² große Untersuchungsgebiet Frankelbach befindet sich ca. 16 km nördlich von Kaiserslautern (Rheinland-Pfalz) im Nordpfälzer Bergland. Hier gehört es naturräumlich zu den Oberen Lauterhöhen (SCHOBEL, 2007). Das zwischen 210 m und 430 m über NN liegende Gebiet weist eine Jahresmitteltemperatur von 8 - 9 °C (UHLIG, 1964) und einen

mittleren jährlichen Niederschlag von 700 - 800 mm auf (HAD, 2003). Der Frankelbach selbst entwässert, in nord-östlicher Richtung fließend, in die obere Lauter, welche wiederum in den Glan mündet. Die gleichnamige Ortschaft Frankelbach liegt im Nord-Osten des Einzugsgebietes auf ca. 230 m über NN.

Geologie

Der geologische Untergrund des Testgebietes besteht aus Schichten der Lebach-Gruppe, welche lithostratigraphisch dem Unteren oder Mittleren Rotliegend (je nach Autor) und somit dem Perm zugeordnet werden können. GÜMBEL (1894) und WEISS (1867) charakterisierten die Lebacher Schichten jeweils als graue Schiefertone, Sandsteine und Arkosen. In ähnlicher Weise beschreibt SPUHLER (1957) dünnbankige Sandsteine, Sandschiefer und Schiefertone. JOHST & CASPER (2008) bestätigen die unterschiedliche Ausprägung des Ausgangssubstrates im Untersuchungsgebiet durch die Beschreibung von Wechsellagen aus glimmer- und eisenhaltigen Sandsteinen sowie bänderartigen Silt- und Tonsteinen. Die Heterogenität des geologischen Ausgangssubstrates folgt aus der Genese dieses Landschaftsraumes, der während seiner Entstehungsphase, der variskischen Gebirgsbildung (Karbon / Devon), als Ablagerungsraum und intramontanes Becken fungierte. Unter semiariden bis subtropischen Klimabedingungen wurden die unterschiedlichsten Sedimente nach intensiver Verwitterung abgelagert (SEGATZ et al., 2009b). Die mehrere hundert Meter oder sogar mächtigere Auffüllung des Beckens wurde durch Subvulkanismus zu einem Sattel gewölbt, dem sog. Pfälzer Sattelgewölbe (JOHST & CASPER, 2007). Dieses ist das Mittelstück eines nach dem Unterrotliegend entstandenen Gewölbes, das jedoch vielfach zerbrochen und durch Quermulden geteilt ist (SPUHLER, 1957). Markante Erhebungen dieses Naturraumes sind Königsberg, Selberg, Hermannsberg und Potzberg, welche zumeist aus saurem Intrusivgestein (Rhyolith) bestehen und durch Erosion freigelegt wurden (ATZBACH, 1986).

Böden

Auf dem sehr heterogenen Ausgangssubstrat des Testgebietes bildete sich als Leitbodentyp eine (Norm-)Braunerde aus schutführendem Lehm über Schuttschluff aus (SCHOBEL et al., 2007). Überwiegend verfügen die verbreiteten Braunerden über eine mittlere bis tiefe Gründigkeit. Nach Informationen der Bodenübersichtskarte für Rheinland-Pfalz (LGB RLP, 2009; LGB RLP, 2011) reicht der durchwurzelbare Bodenraum bis 70 cm Tiefe (JOHST, 2011). In den Mulden und an den Unterhängen bildeten sich tiefgründige, skelettarme Kolluvisole. Deren Feinbodenanreicherung stammt aus der Erosion der Ackerböden auf den Höhenrücken (GALLUS et al., 2007b). Hier, im Kulminationsbereich der Wasserscheiden, entwickelten sich

auf schluffig-toniger Ausprägung des geologischen Ausgangssubstrates Pseudogleye und diverse Übergangsformen, die eine charakteristische Neigung zur Verschlämmung aufweisen. Auf sandigen Ausprägungen des Ausgangsgesteins entwickelten sich Ranker und flachgründige Braunerden (JOHST, 2011). Die pedogene Textur der übrigen Bereiche ist gleichfalls wie die Ausprägung des Ausgangsgesteins sehr unterschiedlich. Die Bodenarten variieren demnach von schwach lehmigen Sanden über tonige Lehme und Schluffe zu stark schluffigen Tonen.

Vegetation und Landnutzung

Der Untersuchungsraum ist geprägt von landwirtschaftlichen Flächen in den kulminierten Randbereichen und Oberhängen, die ca. $\frac{2}{3}$ der Gesamtfläche einnehmen, sowie von Laub- und Nadelwäldern, welche die stark eingekerbten und teils sehr steilen Hangbereiche abdecken ($\frac{1}{3}$ des Untersuchungsgebietes; SCHOBEL et al., 2007). Die ursprünglichen, natürlichen Wälder auf den lehmigen Standorten des Testgebiets sind Flattergras-Hainsimsen-Buchenwälder und Traubeneichen-Buchenwälder; bei besserer Wasser- und/oder Nährstoffversorgung edellaubholzreiche Buchenwälder. Aktuell prägen alte Mischwälder aus Eichen, Buchen und Hainbuchen aus ehemaliger Mittelwaldwirtschaft die forstliche Nutzung (SCHOBEL et al., 2007). Reine Nadelholzwälder z. B. aus Douglasie stammen aus den 1970er Jahren und sind selten. Die jüngeren, umfangreichen Aufforstungen im Testgebiet, die mittlerweile ca. 27 ha Fläche einnehmen, erfolgten mit standortgerechten Laubbaumarten auf Grenzertrags- und ehemaligen Grünlandflächen (SEGATZ et al., 2009b). Hier wurden vor allem Eichen und Edellaubbäume wie Schwarzerlen eingesetzt. Grünlandflächen, die nur einen geringen Prozentsatz der Nutzung ausmachen, sind vereinzelt auf den flachen Kuppen, vorwiegend jedoch in den Auenbereichen zu finden. Durch extensive Schafbeweidung werden die Flächen offen gehalten (ebd.). Nach Brachfallen unterliegen die betreffenden Bereiche einer unkontrollierten Sukzession (GALLUS et al., 2007b).

Versuchsaufbau

Für die bodenphysikalisch-hydrologischen Untersuchungen wurden sieben Test-Plots angelegt. Die Lage der einzelnen Testflächen innerhalb des Einzugsgebietes ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die Auswahl der Plots erfolgte nach ihrer Repräsentativität für das Untersuchungsgebiet wobei eine einschränkende Notwendigkeit ihre Erreichbarkeit für den mit den Großberegnungen einhergehenden Wassertransport war.

Da im Einzugsgebiet Frankelbach verschiedenste waldbauliche Formen und Stadien aufeinander treffen, wurden Standorte mit unterschiedlichen Bodentypen und Baumarten als Testflächen ausgewählt.

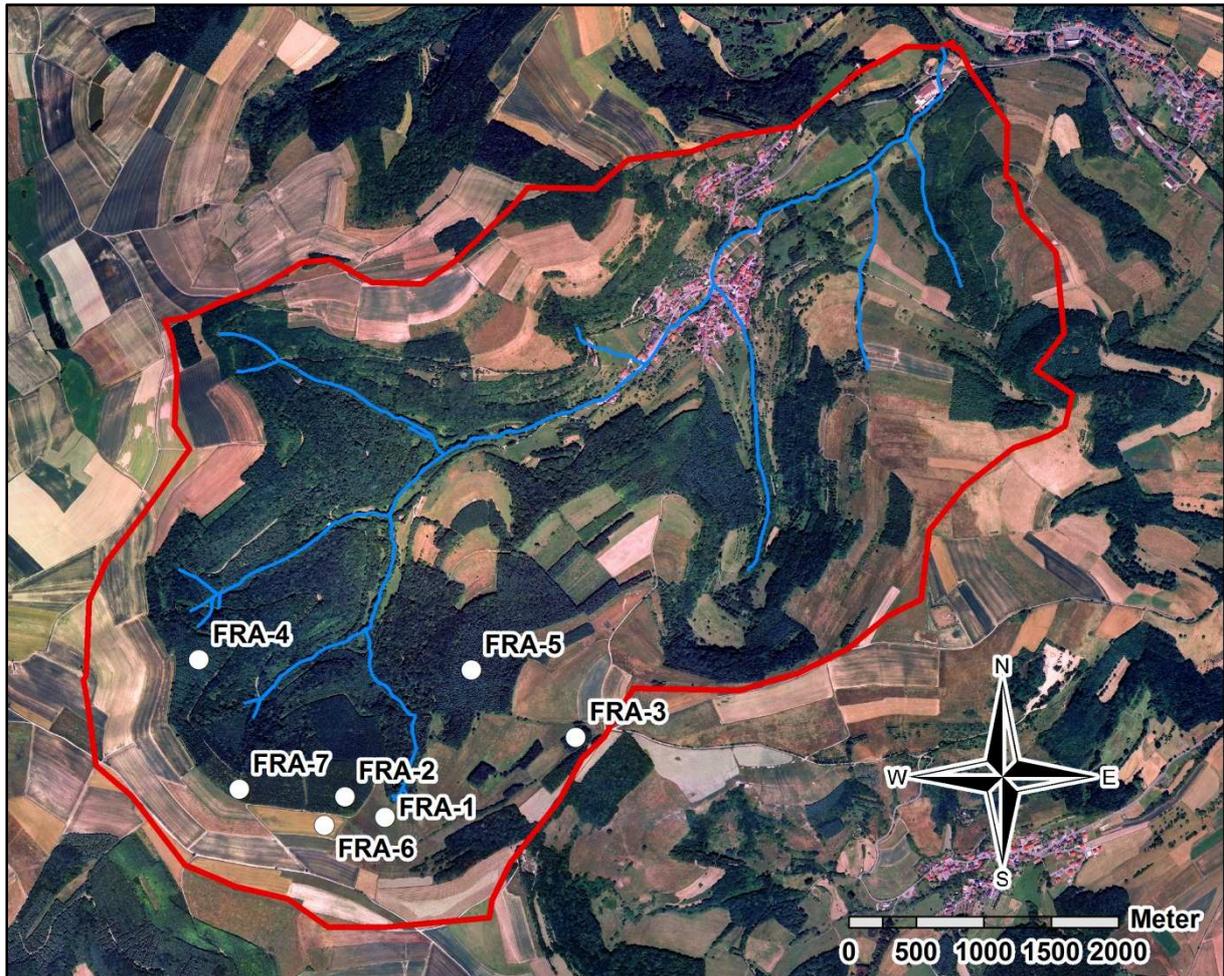


Abb. 3.2: Frankelbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte

- FRA-1: 1-jährige Aufforstung (Schwarzerlen; *Alnus glutinosa*) in einer Geländemulde mit verfilztem Grasbewuchs auf einer schwach kolluvial geprägten Pseudogley-Braunerde aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegend. 7° bis 10° Hangneigung.
- FRA-2: 30-jährige Aufforstung (in Abbildungen abgekürzt mit „30a“) mit Buchen (*Fagus sylvatica*) und Eichen (*Quercus robur*) auf einem Pseudogley aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendverwitterung. Ehemaliger Ackerstandort mit gekaptem Profil. 5° bis 7° Hangneigung.

- FRA-3: Privater Laubwald mit Buchen (*Fagus sylvatica*) und Eichen (*Quercus robur*) auf einer Braunerde aus schwach schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegend. 5° bis 7° Hangneigung.
- FRA-4: 40-jähriger Douglasien-Bestand (*Pseudotsuga menziesii*) auf einer Braunerde aus schwach schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegend. 7° bis 9° Hangneigung.
- FRA-5: Alter Nadelwald mit Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*) und Fichten (*Picea abies*) auf einer Braunerde aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzschutt über Rotliegendverwitterung. 5° bis 7° Hangneigung.
- FRA-6: Ackerstandort auf einer Braunerde-Pseudogley aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegend. 5° bis 7° Hangneigung.
- FRA-7: Forst-Schneise (letztmalig befahren vor ca. 12-15 Jahren) auf einer Braunerde aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegend. 7° bis 10° Hangneigung.

Die im Folgenden zum Überblick genannten angewandten Methoden, welche auf den jeweiligen Untersuchungsstandorten ausgeführt wurden, werden im Kapitel 4 detailliert erläutert.

Auf jeder Testfläche wurde eine Großberegnung durchgeführt. Zudem wurden bodenphysikalische Beprobungen innerhalb der Beregnungsgruben und mindestens vier Infiltrationsversuche in der näheren Umgebung des Beregnungsplots realisiert. Des Weiteren wurden die dominierenden Abflussprozesse auf Basis sowohl der Geländeergebnisse als auch der Prozessbeurteilungsschemata (PBS) nach SCHERRER (2006) am Bodenprofil des jeweiligen Testplots bestimmt. Die Standorte FRA-1 bis FRA-5 wurden im Frühjahr 2008, die Standorte FRA-6 und FRA-7 im Frühjahr des Jahres 2010 bearbeitet.

Im Zeitraum Mai bis Juni 2008 arbeiteten zwei Forschungspraktika des Faches Physische Geographie ebenfalls im Einzugsgebiet Frankelbach. Diese führten Kleinberegnungsversuche (Punkt-Skala) auf unterschiedlichen Landnutzungen durch. Insgesamt wurden 24 Kleinberegnungen im direkten Umfeld der sieben Testplots sowie in anderen Bereichen des Untersuchungsraumes ausgeführt. Die Ergebnisse dienen in vorliegender Arbeit als ergänzende und vergleichende Daten zu den Großberegnungsversuchen.

3.2 Holzbach

Naturraum

Das rund 4,6 km² große Untersuchungsgebiet Holzbach liegt inmitten des Hoch- und Idarwaldes, nördlich des saarländischen Luftkurortes Weiskirchen und umfasst das Wassereinzugsgebiet des Holzbachs. Die Hauptfließrichtung des teils steilen und engen Kerbtals verläuft von Nordwest nach Südost. Rund 60 % der Fläche befinden sich im Saarland, 40 % liegen in Rheinland-Pfalz (SEGATZ et al., 2009a). Im kühl gemäßigten, atlantisch geprägten Klima werden Jahresdurchschnittstemperaturen von ca. 8 - 9 °C und mittlere Jahresniederschläge von 950 mm - 1200 mm erreicht. Westlich wird der Holzbach durch die Höhen des Zerfer Hochwalds (659 m) und südlich durch den Schimmelkopf (695 m) begrenzt. Die maximale Höhendifferenz im Untersuchungsgebiet beträgt rund 280 m wobei eine generelle Höhenlage zwischen 400 m und 680 m über NN definiert wird (SEGATZ et al., 2009a).

Geologie

Geologisch gehört das Gebiet im rheinland-pfälzischen Teilbereich zum südwestlichen Rheinischen Schiefergebirge und damit im jüngeren Paläozoikum zum Rheinischen oder Rhenoherynischen Becken. Dessen Füllung besteht aus mächtigen Serien des Unterdevons. Das landschaftsbeherrschende Schichtglied des Untersuchungsraumes ist der Taunusquarzit (GALLUS et al., 2007a), der die Höhenzüge am Südrand des Schiefergebirges aufbaut. Der Schichtverband setzt sich aus bis zu 1000 Meter oder sogar mächtigeren Bankfolgen aus Quarzit zusammen. Der südöstliche, saarländische Teil des Untersuchungsgebietes gehört dagegen überwiegend zur jüngeren Periode des Rotliegend und genauer zum Quarzitkonglomerat des Oberrotliegend (ca. 200 Mio. Jahre) (GALLUS et al., 2007a).

Böden

Die pedologische Entwicklung im Einzugsgebiet Holzbach geht aus den sogenannten periglazialen Deckschichten hervor, die aus solifluidal hangabwärts verlagerten Verwitterungsprodukten des anstehenden Gesteins, zum Teil vermengt mit äolischem Material (Löss), bestehen. Sie werden auch als Lockergesteinsdecken⁷ bezeichnet (GALLUS et al., 2007a). Die bodenbildenden Prozesse im Testgebiet führten daher zur Bildung von

⁷ Nach ihrem relativen Alter und der Intensität der Beeinflussung durch äolisches Material werden unterschiedliche Lagen in der Vertikalabfolge differenziert als Oberlage(n), Hauptlage, Mittellage(n) und Basislage(n). Die wichtigste Lage ist die Hauptlage, die überwiegend lössbürtige Komponenten enthält. Stratigraphisch gehört sie zur Jungtundren-Zeit. Ihr Alter lässt sich durch Bimsanteile des Laacher See-Vulkanausbruchs sehr gut belegen. Die tieferen Lagen spielen für die Hydrogeologie, den Abflusstyp und die Abflussprozesse eine entscheidende Rolle (GALLUS et al., 2007a).

basenarmen Braunerden (teilweise pseudovergleyt) bis Podsolen. Im Bereich der Hangbrücher findet man hydromorphe Böden wie Zwischenmoore, Hangpseudogleye und deren Übergangsformen. Infolge der Aufwehungen im Pleistozän dominieren Schluff bestimmte Bodenarten wie toniger Schluff oder tonig-sandiger Schluff (GALLUS et al., 2007a). Sandigere Texturen wie lehmige Sande treten auf sobald der Einfluss des Ausgangsgesteins ansteigt.

Vegetation und Landnutzung

Das Gebiet wird zu 100 % forstlich genutzt. Die ursprünglichen Wälder auf den terrestrischen Böden des Untersuchungsgebietes sind botanisch dem Hainsimsen-Buchenwald (*Luzulo-Fagetum typicum*) zuzuordnen. Dem entgegen ist die Vegetation des rheinland-pfälzischen Teils aktuell geprägt von großflächigen alten Fichtenwäldern, mittelalten Mischwäldern aus Japanischer Lärche und Buche sowie alten Buchenwäldern im Osten. Stau- und grundnasse Windwurfflächen aus dem Jahre 1990 (Orkan Wiebke) wurden mit Erlen, Weißtannen und Eichen aufgeforstet. Zudem hat sich in gegatterten Flächen zahlreich Moorbirke und Fichte aus natürlicher Sukzession etabliert. Nach dem Windwurf und im Zuge des Fichtennutzungskonzepts wurde damit begonnen, die älteren Fichtenwälder mit Buchen zu verjüngen. Entlang des Gewässers gab es Ansätze, die dominierenden Fichten zu entfernen. Ältere Erlen und Moorbirken sind nur noch rudimentär vorhanden (GALLUS et al., 2007a).

Versuchsaufbau

Ebenso wie im Einzugsgebiet Frankelbach (Kapitel 3.1.2) wurden die Testflächen im Untersuchungsgebiet Holzbach nach ihrer Repräsentativität sowie nach ihrer Erreichbarkeit hinsichtlich der Großberegnungen ausgewählt. Da im Nordosten des Testgebietes Buchenwälder dominieren, während die nordöstlichen Bereiche von Fichtenbeständen eingenommen werden, wurde der Fokus der Untersuchungen in diesem Testgebiet auf die beiden dominierenden Waldtypen gerichtet. Unterschiede forststandörtlicher Parameter oder dem Abflussgeschehen, die durch die dominierende Baumart bedingt sind, sollten hierdurch eruiert werden. So liegen die Standorte HOL-1 bis HOL-3 im südwestlich exponierten Buchenwald; die Standorte HOL-4 bis HOL-6 in den nordöstlich exponierten Fichtenbeständen (Abb. 3.3).

Auf den Versuchsstandorten wurden, ähnlich wie im zuvor beschriebenen Einzugsgebiet Frankelbach, neben den Großberegnungen ebenfalls eine horizontweise Probennahme der Bodenphysik mittels Stechzylinder, mindestens vier Infiltrationsversuche sowie die

Abflussprozesskartierungen auf Basis der Geländeexperimente und auf Grundlage der PBS nach SCHERRER (2006) durchgeführt.

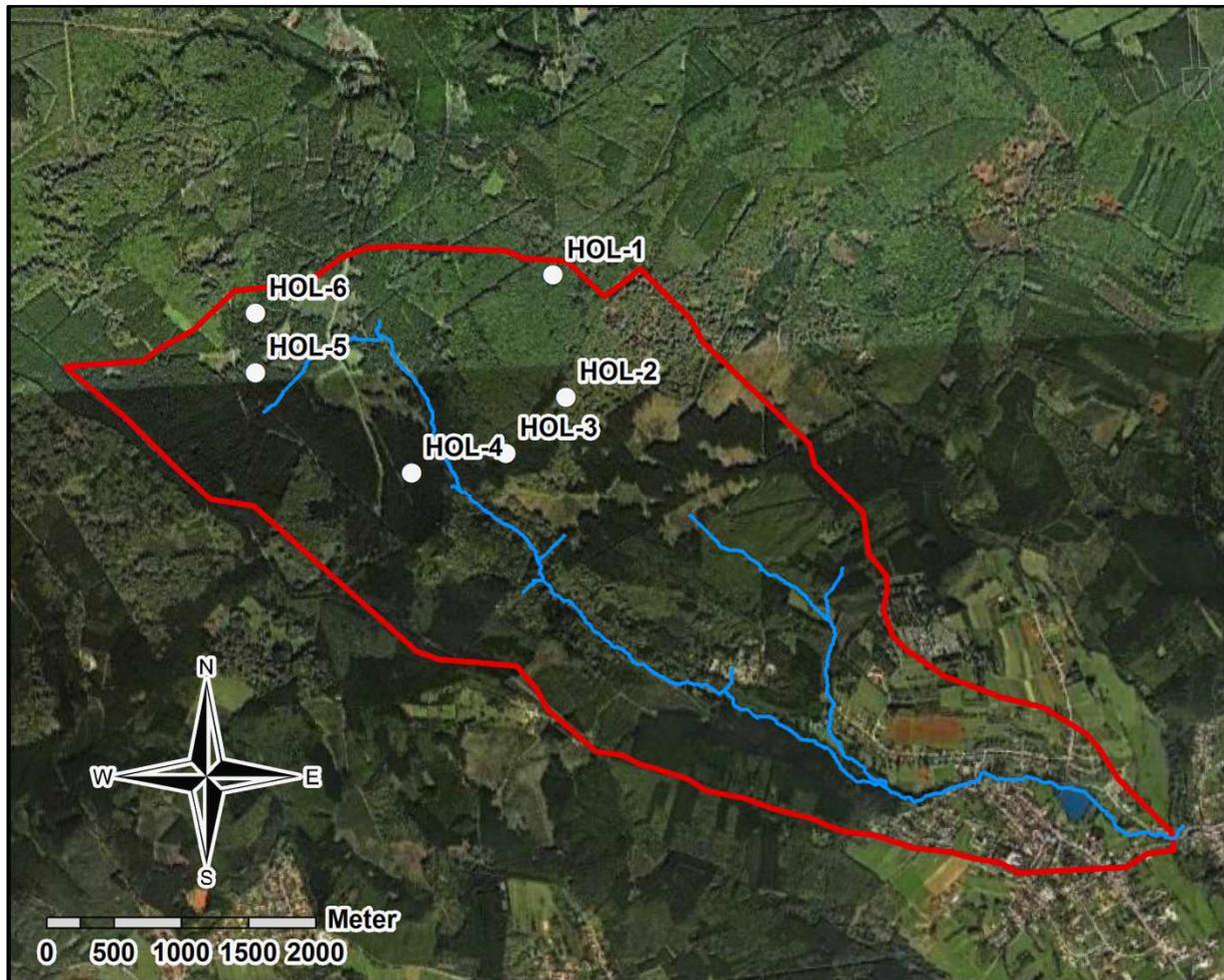


Abb. 3.3: Holzbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte

- HOL-1: Buchenwald am Oberhang auf einem Braunerde-Pseudogley aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde. 7° bis 10° Hangneigung.
- HOL-2: Buchenwald am oberen Mittelhang auf einer pseudovergleyten Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde. 7° bis 10° Hangneigung.
- HOL-3: Buchenwald am Mittelhang auf einer Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde. 7° bis 10° Hangneigung.
- HOL-4: Fichtenbestand am Mittelhang mit dichtem Fichtenjungwuchs und punktuell eingestreutem Buchenjungwuchs auf einer Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde. 7° bis 10° Hangneigung.

- HOL-5: Fichtenbestand am oberen Mittelhang mit leichtem Grasbewuchs und punktuell eingestreutem Buchenjüngwuchs auf einer Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde. 5° bis 7° Hangneigung.
- HOL-6: Fichtenbestand am Oberhang mit einzelnen Buchen und leichtem Grasbewuchs auf einem Podsol aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde aus Sandsteinverwitterung über Quarzit-Fließerde. 5° bis 7° Hangneigung.

3.3 Weierbach

Naturraum

Das nur 0,4 km² große Einzugsgebiet des Weierbachs liegt im äußersten Westen des Großherzogtums Luxemburg ca. 3 km östlich der belgischen Grenze. Der Weierbach bildet ein nordwestlich gelegenes Teileinzugsgebiet des Colpach (19 km² Gesamtfläche), welches seinerseits wiederum ein Teileinzugsgebiet der Attert (297 km² Gesamtfläche) darstellt (Abb. 3.4). Die Region des Colpach-Gebietes liegt, den Weierbach eingeschlossen, innerhalb des Ösling, einer luxemburgischen Großlandschaft, die den nordwestlichen Teil (24 %) des Attert-Einzugsgebietes sowie den gesamten nördlichen Teil Luxemburgs abdeckt. Bei einer jährlichen Durchschnittstemperatur von ca. 8 °C fallen durchschnittlich 900 mm - 1000 mm Niederschlag pro Jahr.

Geologie

Lithologisch besteht der Ösling hauptsächlich aus Schiefen des Devon. Auch das Einzugsgebiet des Weierbach, welches V-förmig eingeschnitten ist, besteht aus dem devonischen Ausgangsmaterial. Dieses ist hier in Wechsellagerungen mit unterdevonischem Kristallinschiefer vergesellschaftet (PFISTER et al., 2006). Zusammen werden sie als undeutlich geschichtete Grobschiefer mit seltenen Bänken von tonigem Sandstein (NIESSEN, 2009), den sogenannten Siegener Schichten (Sg3) zugeordnet (SERVICE GÉOLOGIQUE, 1996).

Böden

Entsprechend der bodenkundlichen Karte des Großherzogtums Luxemburg (1:100.000; MÜCKENHAUSEN & TAVERNIER, 1969) entwickelten sich im Einzugsgebiet des Weierbachs vornehmlich unvergleyte, steinig-lehmige Braunerden aus Schiefer und Phylladen (PFISTER et al., 2006). Dies wurde durch Bohrstock-Kartierungen im Gelände bestätigt. Auffällig waren hierbei die schluff-dominierte Textur, die lockere Lagerung und der zum Teil sehr hohe Grobbodenanteil. Letzterer ist durch eine ausgeprägte Fließerdendynamik im Pleistozän zu

erklären, welche zur Ablagerung mächtiger Schieferschuttdecken führte. Insgesamt konnte eine homogene Verteilung der Bodentypen innerhalb des Gebietes festgestellt werden. Auf den flachen Kulminationsbereichen an den Rändern des Testgebietes wurden zudem Pseudogley-Braunerden als auch Braunerde-Pseudogleye kartiert und angesprochen. In den zumeist feucht-nassen Auenbereichen sind vergleyte Böden typisch.

Vegetation und Landnutzung

Das Einzugsgebiet des Weierbachs wird zu 100 % forstlich genutzt. Dabei entfällt der weitaus größte Teil der Fläche auf Buchenbestände. Östlich des Bachlaufes sowie im Norden befinden sich außerdem Fichtenforste mit teils erheblichen Mengen an auf dem Boden liegendem Totholz oder dichter Moosbedeckung.

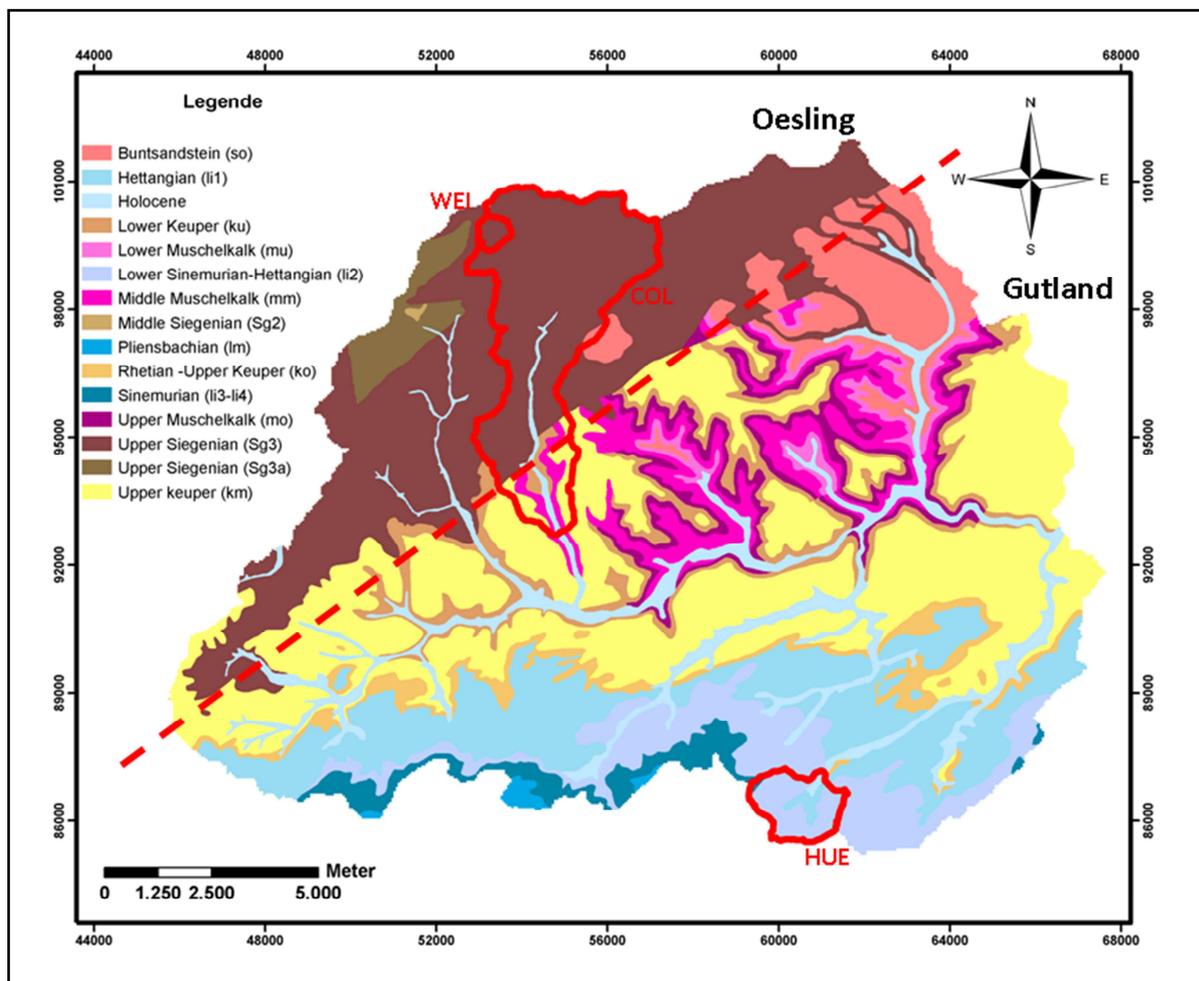


Abb. 3.4: Einzugsgebiet Attert (geologisch) mit Teileinzugsgebieten und Landschaftsgliederung. Weierbach (WEI), Colpach (COL) und Huwelerbach (HUE)

Versuchsaufbau

Im Untersuchungsgebiet Weierbach wurden die Test-Plots ähnlich jenen des Holzbachs (Kapitel 3.2.2) nach der vorherrschenden Baumart und der Lage im Relief ausgewählt (Abb. 3.5). Acht Profilgruben wurden zur bodenkundlichen Beschreibung und Probennahme installiert, in deren Umgebung Kleinberegnungsversuche und Infiltrationsversuche ausgeführt wurden. Großberegnungsversuche erschienen aufgrund der sehr lockeren Lagerung der Böden sowie den hohen Grobbodenanteilen und der auf diesen Faktoren basierenden Annahme von tiefem, nicht zu fassendem Abfluss in diesem Einzugsgebiet als wenig sinnvoll. Hinzu kam der Fakt der geringen infrastrukturellen Ausstattung dieses Testgebietes, welche die Großberegnungen kaum ermöglichten. An den Bodenprofilen des Weierbachs wurden die dominierenden Abflussprozesse ebenfalls nach Geländeuntersuchungen und PBS (SCHERRER, 2006) ausgewiesen.

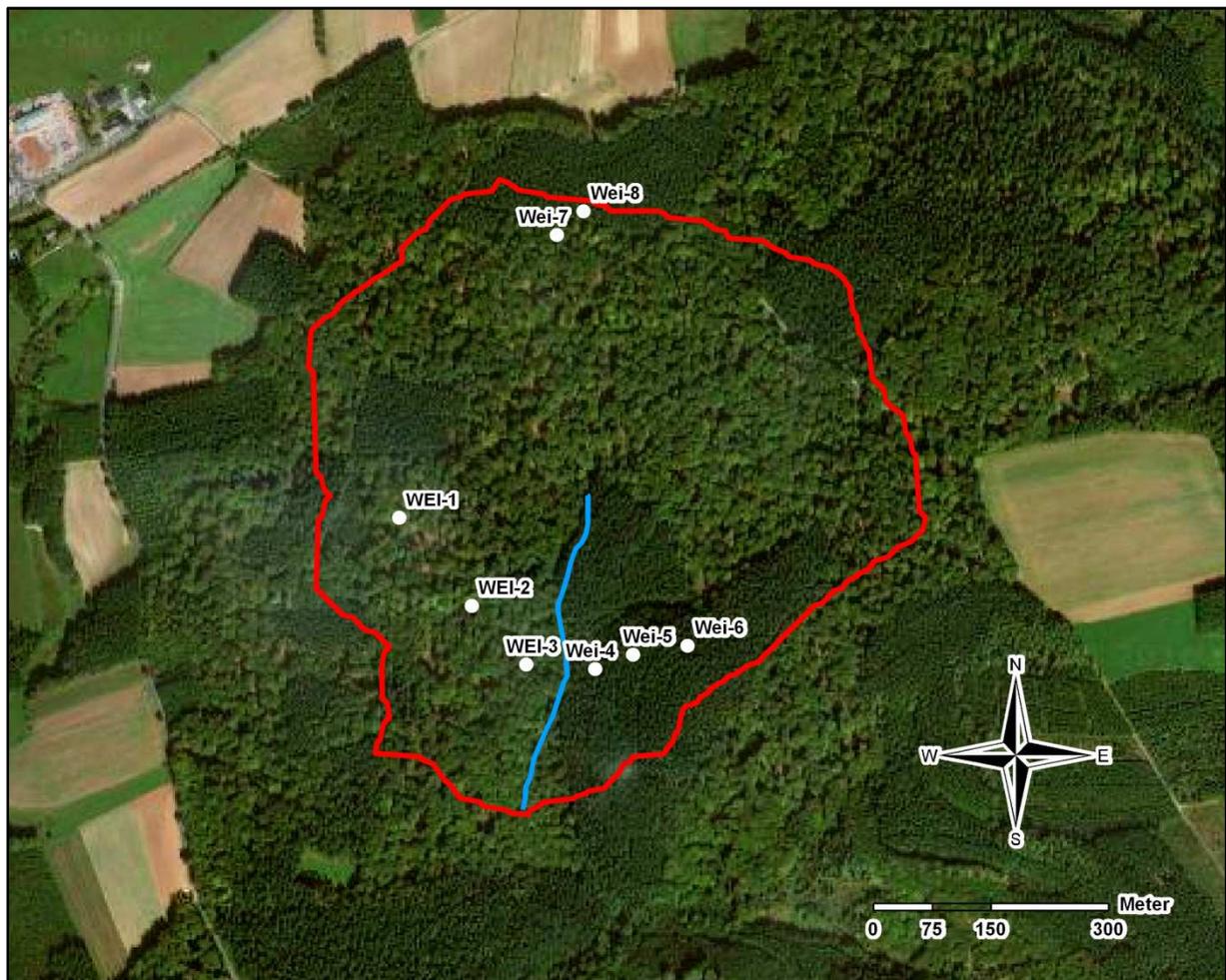


Abb. 3.5: Weierbach Einzugsgebiet mit Verortung der Untersuchungsstandorte

- WEI-1: Buchenwald im flachen Kulminationsbereich auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 1° bis 2° Hangneigung.
- WEI-2: Buchenwald am Mittelhang auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 5° bis 7° Hangneigung.
- WEI-3: Buchenwald am Unterhang auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 12° bis 15° Hangneigung.
- WEI-4: Fichtenwald am stark geneigten Unterhang mit dichtem Moosbewuchs auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 15° bis 20° Hangneigung.
- WEI-5: Fichtenwald am Mittelhang mit viel Totholz-Auflage auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 15° bis 20° Hangneigung.
- WEI-6: Fichtenwald am Oberhang mit viel Totholz-Auflage auf einer Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 1° bis 3° Hangneigung.
- WEI-7: Laubwald im nördlichen Kulminationsbereich auf einem Braunerde-Pseudogley aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 1° bis 2° Hangneigung.
- WEI-8: Fichtenwald im nördlichen Kulminationsbereich auf einem Braunerde-Pseudogley aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer. 1° bis 2° Hangneigung.

3.4 Huewelerbach

Naturraum

Das Einzugsgebiet des Huewelerbachs (ca. 2,7 km²) liegt im südwestlichen Teil des Großherzogtums Luxemburg und ist gleichermaßen wie das Einzugsgebiet Weierbach ein Teileinzugsgebiet der Attert (Abb. 3.4). Die den kompletten südlichen Teil Luxemburgs abdeckende Großlandschaft, in welche das Einzugsgebiet Huewelerbach eingebettet ist, wird Gutland genannt. Der Huewelerbach selbst entsteht aus mehreren Quellen, die an der Schnittstelle zwischen Luxemburger Sandstein (81 % des Gebietes) und Mergel (19 % des Gebietes) entspringen. Das Einzugsgebiet gliedert sich in drei Täler. Das Haupttal verläuft in

Nord-Süd-Richtung, mehrere kleine Täler ohne Gerinne münden in das Haupttal. Zwei weitere große Trockentäler befinden sich im westlichen Teil des Einzugsgebietes (SEELING et al., 2009). Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt im Huewelerbach Einzugsgebiet ca. 9 °C. Die jährliche Niederschlagsmenge liegt zwischen 750 mm und 850 mm.

Geologie

Das Teileinzugsgebiet des Huewelerbachs befindet sich vor der Schichtstufe des Luxemburger Sandsteins. Es liegt auf der Übergangszone vom Luxemburger Sandsteinplateau zur Mergel-Mulde. Die geologischen Schichten fallen im Mittel mit etwa 5° nach Südwesten ein. Durch bodenkundliche Bohrstock-Sondierungen konnten teils mächtige Ablagerungen von Sanden aus der Erosion der Sandsteinstufe und das Vorkommen von rotem Lehm (Mortinsart Lehme) identifiziert werden (SEELING et al., 2009). Die roten Tone, Sandsteine und schwarzen Tonsteine wurden ebenfalls durch JULLERET et al. (2012) für kleine Bereiche dieses Testgebiet beschrieben.

Böden

Auf dem zum Großteil aus Luxemburger Sandstein bestehenden Ausgangssubstrat des Untersuchungsgebietes entwickelten sich vorwiegend sandige Regosole, Braunerden sowie Podsole und deren Übergangsformen, die hauptsächlich auf den Plateaus und in den Trockentälern verbreitet sind. Darüber hinaus sind sandig-schluffige Kolluvien an den mittleren Hängen zu finden. Im Bereich der Auen und feuchten Wiesen Richtung Gebietsauslass entwickelten sich auf den dort vorliegenden Keuper-Mergeln stauwasserbeeinflusste Böden, meist Pseudogleye mit schluffig-lehmiger Textur und stark ausgeprägten hydromorphen Merkmalen wie Marmorierungen.

Vegetation und Landnutzung

Die Landnutzung des Untersuchungsgebietes Huewelerbach wird eindeutig von Wald dominiert (91,5 %). Der weitaus größere Anteil ist von Laubwäldern (meist Buche; *Fagus sylvatica*) bewachsen. Als Nadelbaum tritt die Fichte (*Picea abies*) in Erscheinung. Die restliche Fläche teilt sich zu 7 % auf Grünlandnutzung und zu 1,5 % auf Siedlungsfläche auf.

Versuchsaufbau

Im Untersuchungsgebiet Huewelerbach wurden aufgrund der homogenen Ausprägung der Böden des Einzugsgebietes, welche durch das sandige Ausgangssubstrat (Lias-Sandstein; Li2) bedingt ist, lediglich vier Test-Plots inklusive Profilgruben angelegt (Abb. 3.6). Da, durch den im Gebiet verbreiteten Lias-Sandstein, hauptsächlich Tiefensickerungsprozesse zu erwarten waren, wurde auf die Untersuchung mittels Großberegnungsanlage verzichtet. Stattdessen

wurden, ähnlich dem Einzugsgebiet Weierbach, Kleinberegnungen und Infiltrationsexperimente in der direkten Umgebung der Bodengruben ausgeführt. An den Profilen wurde neben den Geländeexperimenten das PBS von SCHERRER (2006) angewendet um die dominanten Abflussprozesse des Standortes zu identifizieren.

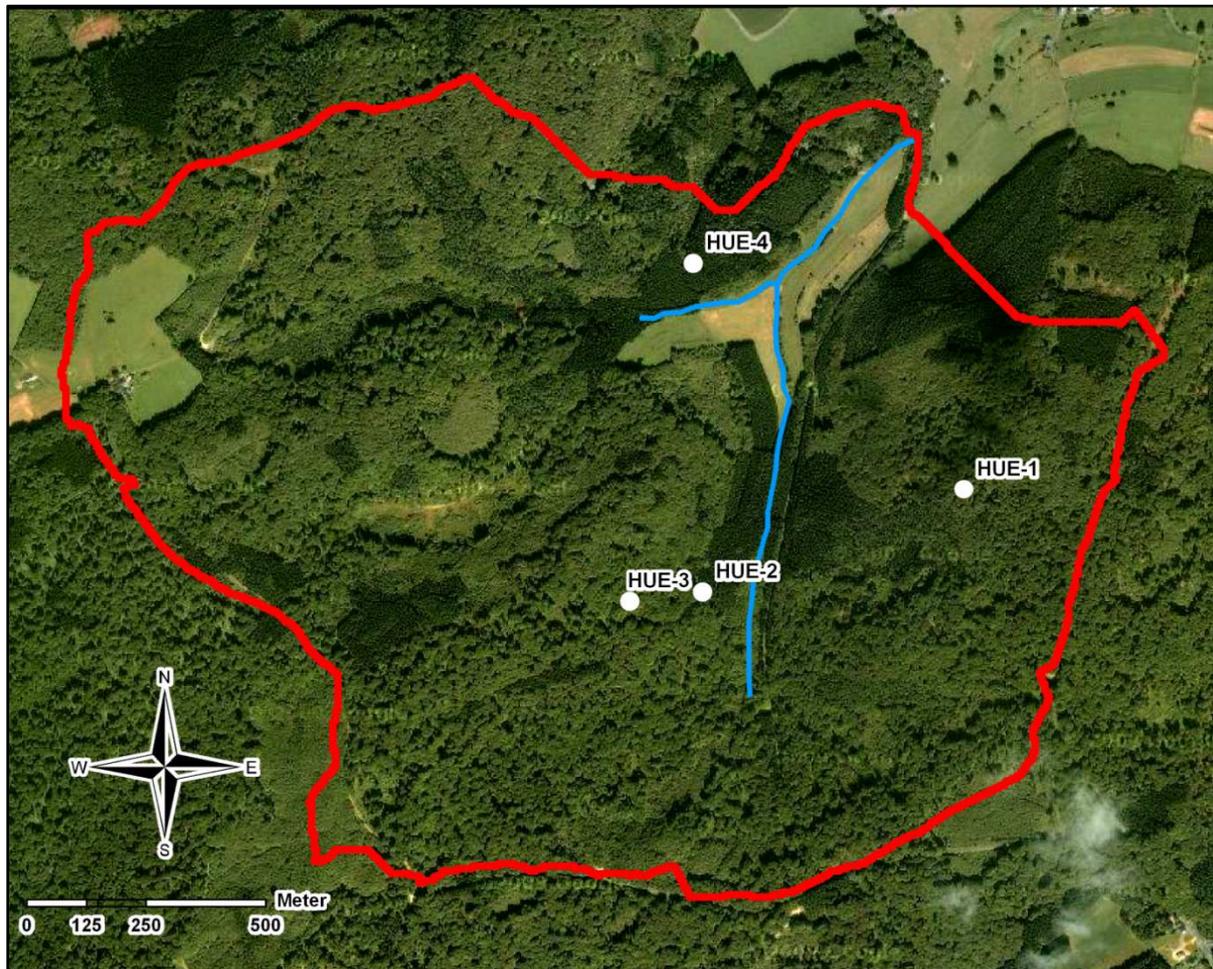


Abb. 3.6: Einzugsgebiet Huewelerbach mit Verortung der Untersuchungsstandorte

- HUE-1: Buchen-Eichen-Mischwald am Mittelhang auf einer schwach podsoligen Braunerde aus Lias-Sandstein (Li2). 4° bis 6° Hangneigung.
- HUE-2: Fichtenwald am Unterhang mit Moosaufgabe auf einer Braunerde aus Lias-Sandstein (Li2). 3° bis 5° Hangneigung.
- HUE-3: Buchen-Eichen-Mischwald am unteren Mittelhang auf einer Braunerde aus Lias-Sandstein (Li2). 5° bis 7° Hangneigung.
- HUE-4: Fichtenwald am unteren Mittelhang mit viel Totholz-Aufgabe auf einer schwach podsoligen Braunerde aus Lias-Sandstein (Li2). 7° bis 10° Hangneigung.

4. Methoden

4.1 Labor- und Geländeuntersuchungen

4.1.1 Bodenphysikalische Untersuchungen

Als Basis für die bodenphysikalischen Laboruntersuchungen wurden in allen Untersuchungsgebieten ungestörte Bodenproben mittels 100 cm³-Stechzylindern⁸ (sechs Wiederholungen je Tiefe) sowie gestörte Proben (Beutelproben) aus den jeweils vorhandenen Bodenhorizonten der Versuchsstandorte bis maximal 1 m Tiefe entnommen. Bei größerer Horizontmächtigkeit fanden zusätzliche Beprobungen im betreffenden Horizont statt (SCHULTE-KARRING, 1999). Bei einem zu hohen Grobbodenanteil wurde auf eine Beprobung verzichtet, da eine ungestörte Probenahme nicht möglich war. Die jeweiligen Entnahmetiefen können den Ergebnistabellen des Anhangs (Tab. A3, A6, A9, A11) entnommen werden.

Trockenrohddichte

Die Trockenrohddichte oder auch Rohddichte trocken (ρ_t oder R_t) des Bodens wird nach HARTGE & HORN (1992) als das Verhältnis der Masse des bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Bodens zu dessen Volumen definiert. Sie wird in g/cm³ angegeben. Die durchschnittliche Dichte der festen Bodensubstanz (d_f ; mineralische Bodensubstanz ohne Hohlräume) beträgt nach BETECHIN (1977) 2,65 g/cm³.

Porengrößenverteilung

Die Porengrößenverteilung (PV) wurde mittels ungestörter aufgesättigter Stechzylinderproben (100 cm³) nach dem Überdruckverfahren basierend auf RICHARDS & FIREMEN (1943) bei pF 1,8 (60 hPa) und pF 2,5 (300 hPa) bestimmt (MÜLLER, 2010). Der Feinporenanteil wurde durch Entwässerung gestörter Bodenproben (kleine Bodenaggregate) bei pF 4,2 (15.000 hPa) ermittelt.

Gesamtporenvolumen

Die Berechnung des Gesamtporenvolumens erfolgte nach der Gleichung

$$GPV = 1 - (R_t / d_f),$$

⁸ Methode der Entnahme ungestörter Probenmaterials nach HARTGE & HORN (1992).

wobei R_t die Trockenrohichte des Bodens und d_f die Dichte der festen Bodensubstanz darstellt (HARTGE & HORN, 1992).

Luftleitfähigkeit

Basierend auf der Methode nach KMOCH & HANUS (1965) wurde die Luftleitfähigkeit (k_a) im Labor bestimmt. Die Stechzylinderproben wurden vor dem Versuch bis zu pF 2,5 (300 hPa) entwässert. Eine Klassifizierung erfolgt basierend auf der Einteilung nach BRUGGE (1983; Tab. 4.1).

Tab. 4.1: Klassifikation der Luftleitfähigkeit nach BRUGGE (1983)

Klasse	Wertebereich [μm^2]	Bewertung
1	< 3	sehr langsam
2	3 - 15	langsam
3	15 - 60	langsam - mittel
4	60 - 170	mittel
5	170 - 350	mittel - schnell
6	350 - 700	schnell
7	> 700	sehr schnell

Eindringwiderstand

Ebenso wie bei der Messung der Luftleitfähigkeit wird die Probe vor diesem Versuch bis zu pF 2,5 (300 hPa) entwässert. Der Eindringwiderstand (EW) wird durch Einstechen einer Stabsonde mit konischer Spitze bis zu einem definierten Punkt ermittelt. Der maximale Widerstand des Bodens gegen die Sonde wird in kPa angegeben (SCHULTE-KARRING, 1999).

Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) wird an den 100 cm³-Stechzylindern, im wassergesättigten Zustand nach der Methode nach KMOCH & HANUS (1965) ermittelt und in cm d⁻¹ angegeben. Die Klassifikation der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003) in sechs Klassen eingeteilt (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Klassifikation der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2003)

Klasse	Wertebereich [cm d ⁻¹]	Bewertung
1	< 1	sehr gering
2	1 - 10	gering
3	10 - 40	mittel
4	40 - 100	hoch
5	100 - 300	sehr hoch
6	> 300	äußerst hoch

Wassergehalt

Zur Bestimmung des aktuellen Wassergehaltes im Boden vor und während der Beregnungsversuche wurde die thermo-gravimetrische Methode nach HARTGE & HORN (1992) verwendet. Hierbei werden aus der Untersuchungsfläche mittels eines Pürckhauer Bohrstocks Proben bis zu einer Tiefe von 80 – 90 cm entnommen (bei den Beregnungsversuchen auf Punkt-Skale wird lediglich der Oberboden mit einer Handschaufel beprobt).

4.1.2 Infiltrationsexperimente

Zur Beschreibung des Infiltrationsverhaltens und zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit der Böden innerhalb der verschiedenen Untersuchungsgebiete wurden Infiltrationsversuche mit einem Doppelring-Infiltrometer⁹ durchgeführt (SCHUMANN & PATZKE, 2006). Hierbei wurde die Infiltrationsrate bestimmt (siehe Kapitel 2.1). Die Infiltrationsversuche wurden so lange durchgeführt, bis sich eine konstante Endinfiltrationsrate einstellte. Die verwendeten Doppelring-Infiltrometer (siehe Foto 4.1 und Abb. 4.1) sind in Art und Handhabung mit einem DIN-Infiltrometer (DIN 19682, Blatt 7) vergleichbar. An einem Versuchsstandort wurden mindestens vier Wiederholungen durchgeführt. Die Einordnung der ermittelten Infiltrationsraten erfolgte auf Basis der Klassifikation nach WOHLRAB et al. (1992; siehe Tab. 4.3).

⁹ Verwendung eines Doppelring-Infiltrometers, da das aus dem äußeren Ring versickernde Wasser als hydraulische Pufferzone dient, um den lateralen Fluss unterhalb des inneren Rings zu minimieren (KUTILEK & NIELSEN, 1994; siehe Abb. 4.1). Maße des Doppelring-Infiltrometers: Höhe 15 cm, Durchmesser Innenring 18 cm, Durchmesser Außenring 32 cm, Volumen Innenring 3.817 cm³, Volumen gesamt 12.063 cm³.



Foto 4.1: Doppelring-Infiltrometer

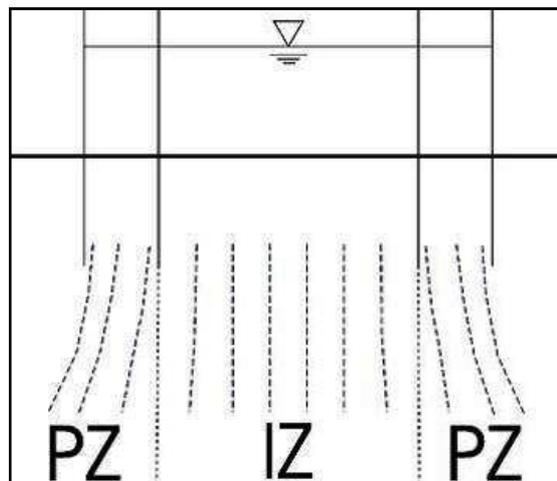


Abb. 4.1: Prinzipskizze des Doppelring-Infiltrometers; PZ = Pufferzone, IZ = Innere Zone (SCHUMANN & PATZKE, 2006)

Tab. 4.3: Klassifikation der Infiltrationsleistung nach WOHLRAB et al. (1992)

Endinfiltrationsrate [cm d ⁻¹]	Klasse
< 2,5	sehr gering
2,5 – 12	gering
12 – 50	gering bis mittel
50 – 150	mittel
150 – 300	mittel bis hoch
300 – 600	hoch
> 600	sehr hoch

4.1.3 Beregnungsversuche auf Plot-Skala (30 m²; Großberegnungen)

Ursprünglich fanden Beregnungsanlagen in der Bodenerosionsforschung sowie bei der Quantifizierung des Oberflächenabflusses und des Bodenabtrages Anwendung (SCHOBEL, 2008). Bei zusätzlicher Installation einer Profilgrube sind Beregnungsversuche auf Plot-Skala oder der Skala von Hangsegmenten zudem gut geeignet, um unter standardisierten Bedingungen zeitlich unabhängig verschiedenste Abflussprozesse auf unterschiedlichen Landnutzungstypen zu untersuchen (HÜMANN et al., 2011). Aufgrund dessen wird die

Großberegnungsanlage im folgend beschriebenen Setup seit mehreren Jahren in vielen Projekten und Studien eingesetzt (u. a. MÜLLER, 2010; NIEBES, 2002; SCHNEIDER et al. 2000; SCHOBEL, 2008).

Um Abflussprozesse unter verschiedener forstlicher Nutzung nachvollziehen zu können und um die GIS-generierten Abflussprozesskarten nach MÜLLER et al. (2009) zu validieren, wurden daher in zwei der vier Untersuchungsgebiete (Frankelbach und Holzbach) insgesamt 12 Beregnungsversuche auf Plot-Skala (30 m²) realisiert¹⁰. Dazu wurde eine mobile Beregnungsanlage basierend auf der Idee von KARL & TOLDRIAN (1973) und Weiterentwicklung durch SCHOBEL (2008) verwendet (Abb. 4.2; Foto 4.2).

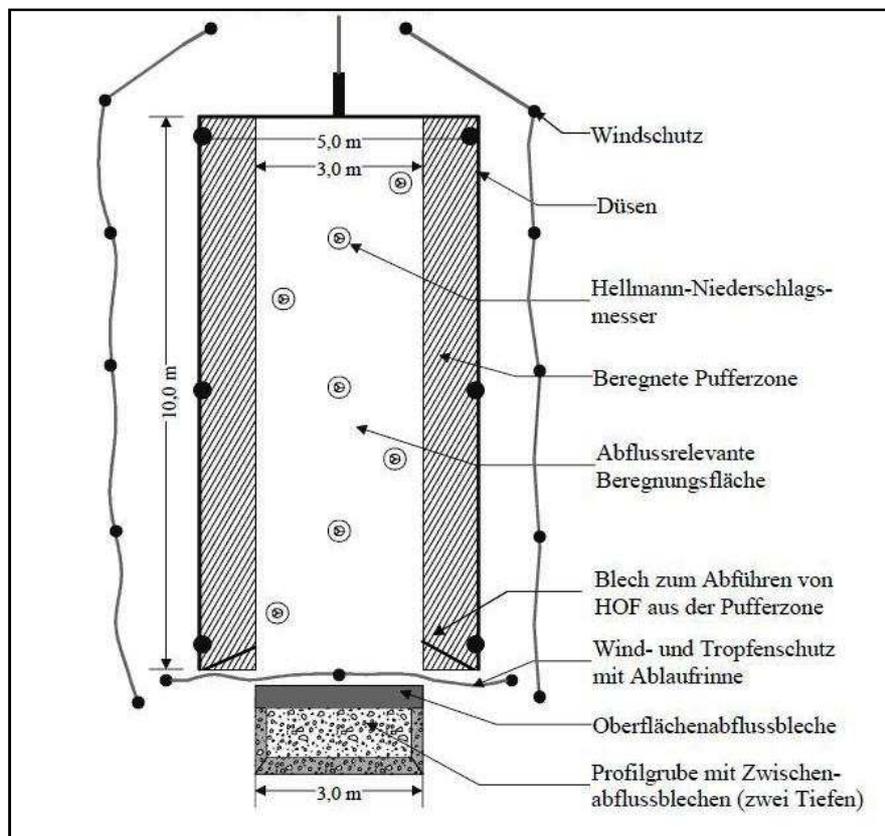


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Beregnungssetups (aus SCHOBEL, 2008; nach SCHNEIDER et al., 2000)

¹⁰ Bei der Anzahl der durchgeführten Versuche ist zu beachten, dass die Großberegnungen sehr arbeits- und zeitintensiv sind (Dauer eines Beregnungsversuchs an einem Standort inkl. Aufbau, Beregnung, Abbau insgesamt bis zu 5 Tage) und zudem mit einem großen infrastrukturellen Aufwand verbunden sind (Beschaffung und Transport großer Wassermengen zum Versuchsstandort).



Foto 4.2: Beregnungsanlage am Standort HOL-3; Einzugsgebiet Holzbach

Die Grundfläche des Beregnungs-Setups beträgt 50 m^2 , wobei $5 \times 2 \text{ m}$ lange Stahlrohre (Typ KSKR, Perrot) die beiden seitlichen Schenkel der Anlage bilden (Gesamtlänge: 10 m) und zusätzliche $2 \times 2 \text{ m}$ sowie $1 \times 1 \text{ m}$ Stahlrohre (Gesamtbreite: 5 m) die Oberseite der Anlage zu einer U-Form komplettieren. Die eigentliche Beregnung wird durch sechs 70 cm hohe Niederdruckdüsen, welche auf Standrohren befestigt sind (Eigenbau der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz), erreicht. Diese sind über Selbstverschlussventile mit Bajonettverschlüssen an den Seiten der Anlage aufgeschraubt (SCHOBEL, 2008). Bei einem Druck von ca. $2,5 \text{ bar}$ wird das Wasser über die vier Eckdüsen (90°) und die zwei Mitteldüsen (180°) (Foto 4.2) gleichmäßig über die Fläche verteilt (MÜLLER, 2010). Als Verbindungsstück zum wasserführenden Schlauch, der aus PVC-Fässern (1000 l ; Foto 4.3) durch eine traktorgetriebene Zapfwellenpumpe befüllt wird, wird ein T-Stück sowie ein Durchflussregler (Streckenschieber) verwendet¹¹.

Ähnlich einem Doppelring-Infiltrometer dient ein jeweils 1 m breiter seitlicher Rand der beregneten Fläche als Pufferbereich zum nebenliegenden, weniger gesättigten Boden (ebd.;

¹¹ Beregnungsanlage mit Stahlrohren (50 mm Außendurchmesser), Bögen sowie Kupplungen entstammen der Firma PERROT.

SCHOBEL, 2008). Daher wird lediglich eine zentrale Fläche von 30 m² zur Berechnung der verschiedenen Parameter (z. B. Abflusskoeffizienten) zu Grunde gelegt.



Foto 4.3: Beregnung durch Niederdruckdüsen



Foto 4.4: Wasserversorgung der Beregnung

Um den Abfluss dieser Fläche quantifizieren zu können, wird am unteren Ende der Beregnungsfläche eine 3 m breite und mindestens 1 m tiefe Profilgrube angelegt. Zur Erfassung des Oberflächenabflusses (SOF und HOF) werden gekantete Edelstahl-Bleche sowie eine, das Wasser auffangende, Regenrinne knapp unterhalb der Bodenoberfläche installiert (Foto 4.5). Der Zwischenabfluss (SSF) wird in zwei Tiefen des Profils ebenfalls mit installierten Metallblechen aufgefangen (Foto 4.6).



Foto 4.5: Oberflächenabfluss Standort FRA-2



Foto 4.6: Profilgrube FRA-6 mit Abflussblechen

Die Beregnung selbst erfolgt an drei aufeinander folgenden Tagen. An jedem Tag werden vier 15-minütige Beregnungsintervalle mit einer Intensität von 40 mm/h (10 mm/Intervall; 40 mm/Tag) und 60-minütigen zwischenliegenden Pausen realisiert, sodass eine totale

Berechnungssumme von 120 mm, verteilt über drei Tage erreicht wird. Dieser Ansatz wird verwendet, da FOHRER (1995) zeigen konnte, dass intermittierende Niederschlagsintervalle dem natürlichen Regen am nächsten kommen (HÜMANN et al., 2011). Nach BUNZA et al. (1985) beeinflussen solche Regenintensitäten die Bodenoberfläche in gleichem Maße wie natürliche Starkregen¹². SCHRÖDER et al. (2002) bestätigen, dass die gesamte Berechnungsmenge von 120 mm in drei Tagen mit regionalen Regensummen übereinstimmen, die zu großmaßstäblichen Überflutungen z. B. in den Jahren 1993 und 1995 geführt haben. Demzufolge können die implementierte Regenmenge- und intensität mit Starkregenereignissen verglichen werden, die unter natürlichen Voraussetzungen zu Hochwässern und Überschwemmungen geführt haben (HÜMANN et al., 2011). Ein passendes Beispiel hierfür lieferte das Rhein-Hochwasser des Monats März 2001 bei dem vieljährige mittlere März-Niederschlagssummen um bis zu 231 % überschritten wurden (LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT RLP, 2001). Einen Nachweis über die Sättigungsbedingungen des Berechnungsplots vor, während und nach der Beregnung wird mit Hilfe von Pürckhauer-Probennahme und gravimetrischer Wassergehaltmessung in drei Tiefen (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm) erbracht.

Um die Vergleichbarkeit der einzelnen Beregnungsversuche zu gewährleisten und da die Interzeption der Baumkronen im Falle eines Starkregenereignisses oder lang anhaltender Niederschläge in feuchten Winterperioden kaum relevant ist (HEUVELDOP, 1973; SCHÜLER, 1999), werden die Großberegnungen generell unterhalb der Baumkronen durchgeführt.

4.1.4 Beregnungsversuche auf Punkt-Skala (0,28 m²; Kleinberegnungen)

Neben der beschriebenen Großberegnungsanlage wurde in der vorliegenden Studie außerdem mit einer Kleinberegnungsanlage (Leihgabe des Faches Physische Geographie der Universität Trier) gearbeitet, die auf der Idee von CALVO et al. (1988) sowie LASANTA et al. (1994) basiert. Diese auf Punkt-Skala betriebene Anlage ist vor allem vorgesehen, um Oberflächenabflüsse und Bodenerosionsraten eines Standortes zu erfassen und wurde schon in

¹² Starkregen (Starkniederschlag): definiert als Niederschlag hoher Dichte pro Zeiteinheit. Er fällt meist aus konvektiver Bewölkung (z. B. Cumulonimbuswolken). Starkregen kann zu schnell ansteigendem und abfließendem Hochwasser oder Überschwemmungen führen, häufig einhergehend mit Bodenerosion. Nach einer Richtlinie des DWD ist Starkregen im Bundesgebiet wie folgt definiert:
Niederschlag > 5 mm / 5 min.
Niederschlag > 7,1 mm / 10 min.
Niederschlag > 10 mm / 20 min.
Niederschlag > 17,1 mm / 60 min.
Beim DWD sind darüber hinaus folgende Unwetterwarnkriterien für „heftigen Starkregen“ festgelegt:
Niederschlag > 25 mm / 1 Std.
Niederschlag > 35 mm / 6 Std. (DWD, 2011).

zahlreichen Studien und Projekten verwendet (z. B. MARZOLFF & RIES, 2007; MÜLLER, 2010; FISTER et al., 2011; RIES et al., 2000; SEEGER, 2007).

In vorliegender Arbeit wurde dieser Niederschlagssimulator insbesondere in den Luxemburger ForeStClim-Untersuchungsgebieten eingesetzt. Der Fokus der Kleinberechnungen lag auf der Ermittlung diverser Oberflächeneigenschaften der unterschiedlichen Streuauflagen in Waldgebieten (Fotos 4.7 und 4.8), speziell im Hinblick auf die Generierung von Oberflächenabfluss durch das Vorhandensein hydrophober Eigenschaften der Streu oder Generierung von Infiltrationsüberschüssen nach langer Feuchtperiode.



Foto 4.7: Berechnungsplot unter Buche



Foto 4.8: Berechnungsplot unter Fichte (dichtes Moos)

Der Niederschlagssimulator setzt sich zusammen aus einer Motorspritze, einem zusammensetzbaren Aluminiumgestell mit angebauter abwärts gerichteter Düse, einem Metallring zur Begrenzung des Plots (Durchmesser 60 cm; Höhe 7 cm) sowie einer Kalibrierplatte (RIES et al., 2000) und einem Durchflussregler (Fotos 4.9 – 4.12). Die Motorspritze der Firma Fitosa besitzt einen Honda Benzinmotor (G 100; 2,5 PS; 97 cm³), welcher eine Membranpumpe (Bertolini 20 S, max. Druck p 20 bar, 20 l/min) antreibt (ENGELS, 2009). Dieser Motor ist zusammen mit der Pumpe und einem Wassertank mit 100 l Volumen auf einem schubkarrenähnlichen Gestell montiert (Foto 4.9). Bei der verwendeten Düse (Foto 4.11) handelt es sich um eine Vollkegel-Düse (Lechler 460.608), die in einer Höhe von 2 m im Aluminium-Gestänge installiert ist (Foto 4.12) und mit einem Druck von ca. 0,4 bar betrieben wird (FISTER et al., 2011; ISERLOH et al., 2010). Der Durchfluss von der Pumpe zur Düse kann über einen Durchflussmesser (Typ KSK-1200HIG100) manuell geregelt werden.

Ähnlich der Großberegnungsanlage liegt die Beregnungsintensität bei 40 mm/h. Die Beregnungsdauer in forstlich genutzten Gebieten beläuft sich auf eine Stunde. Wird während der Niederschlagssimulation Oberflächenabfluss generiert, so läuft dieser aus dem Auslass im Stahlring über ein V-förmiges Ablaufblech (SEEGER, 2007). Aufgefangen wird der Oberflächenabfluss in zuvor gewogenen und beschrifteten Plastik-Weithalsflaschen in gleich bleibenden Intervallen von 5 Minuten (MÜLLER, 2010).



Foto 4.9: Motorspritze Fitosa



Foto 4.10: Aufbau Kleinberegnungsanlage



Foto 4.11: Vollkegel-Düse (Lechler 460.608)



Foto 4.12: Aluminium-Gestänge über Test-Plot

4.2 Abflussprozesskartierungen

4.2.1 Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen

Auf Basis der im Kapitel 4.1 erläuterten bodenhydrologischen Untersuchungen in den ForeStClim-Untersuchungsgebieten wurden die dominierenden Abflussprozesse der insgesamt 25 Test-Plots charakterisiert. Hierzu erfolgten zunächst eine bodenkundliche Detailkartierung in den Untersuchungsgebieten und eine Einschätzung der pedologischen Grundvoraussetzungen am jeweiligen Bodenprofil (Horizontierung, Wurzelmasse, Grobbodengehalt, präferentielle Fließpfade, etc.).

Im Anschluss an die Gelände- und Laboruntersuchungen wurden die Geländeeindrücke mit den ermittelten bodenphysikalischen Eigenschaften und den Infiltrations- und Berechnungsergebnissen in Beziehung gesetzt, um eine bestmögliche, auf Expertenwissen basierende Einschätzung der ablaufenden Prozesse zu gewährleisten. Die Beschreibung der jeweils ausgewiesenen dominierenden Abflussprozesse orientierte sich an den von SCHERRER (2006) verwendeten Bezeichnungen, welche bereits in Kapitel 2.4 erwähnt wurden.

4.2.2 Abflussprozesskartierung nach Prozessbeurteilungsschemata (PBS)

Prozessbeurteilungsschemata (PBS) bilden den Kern des von SCHERRER, FAEH UND NAEF (FAEH, 1997; IHW, 2000; NAEF et al., 1998; SCHERRER, 1997 & 2006; SCHERRER & NAEF, 2003a,b; SCHERRER et al., 2007) entwickelten „Bestimmungsschlüssels zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen“ (MÜLLER, 2010; SCHERRER & DEMUTH, 2007). Mit ihrer Hilfe sollen, anhand verschiedener Kriterien, Abflussprozesse in der Landschaft abgeschätzt werden (SCHERRER & NAEF, 2003; IHW, 2000). Hauptkriterien der PBS sind die Landnutzung, die Vegetation und der Boden; ferner werden das Relief und die Geologie mit berücksichtigt (SCHERRER & DEMUTH, 2007). Eine Untergliederung der Entscheidungsbäume findet nach Landnutzung, Hangneigung, Niederschlagsintensität und Boden statt¹³. Der jeweilige dominierende Abflussprozess eines Standortes oder einer Fläche wird ermittelt indem der Weg des Wassers anhand des Entscheidungsbaumes, welcher sich an Bodenhorizonten orientiert, nachverfolgt wird. Am Ende des Entscheidungsweges steht der entsprechende und für den Standort determinierte dominierende Abflussprozess (siehe Tab. 2.1).

¹³ Unterteilung der PBS: Landnutzung = Grünland; Acker; Weinberge; Wald;
Hangneigung = $J > 3\%$; $J > 5\%$ (Weinberg); $20\% < J < 3\%$;
Niederschlagsintensität = $I < \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$; $I > \text{ca. } 20 \text{ mm/h}$;
Boden = „normale Böden“; „Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden“ (SCHERRER, 2006).

Um eine erste Klassifizierung der dominanten Abflussprozesse der forstlich genutzten Untersuchungsstandorte durchzuführen, wurde in der vorliegenden Arbeit das PBS für Wald angewendet (Anhang Abb. A4). Gleichfalls bildet diese Anwendung eine Vergleichsgrundlage zu den durch GIS-DRP ausgewiesenen Abflussprozessen. Das Wald-PBS ist in Relation zu der Vielzahl von Standortvarianten in Wäldern stark vereinfacht und berücksichtigt geringe wie auch hohe Niederschlagsintensitäten (SCHERRER, 2006). Einzig für den Standort FRA-6 (Frankelbach, Acker) wurde das PBS für Ackerstandorte angewandt, da dieses speziell für landwirtschaftliche Nutzflächen ausgelegt ist. Da davon ausgegangen wird, dass sommerliche Starkregen und winterliche Dauerregen auf derselben Fläche unterschiedliche Abflussprozesse generieren können, wurde das PBS für hohe sowie für geringe Niederschlagsintensitäten verwendet (Anhang Abb. A5 und Abb. A6).

4.2.3 Digitale Abflussprozesskartierung nach GIS-DRP-Methode

Wie schon in Kapitel 2.4 angesprochen, dienen sowohl das digitale Höhenmodell (DHM) als auch die digitale Geologische Karte sowie die Landnutzungsinformation (z. B. ATKIS) des betreffenden Landschaftsausschnitts als Basis-Daten für die flächenhafte Ausweisung dominierender Abflussprozesse mit GIS-DRP. Diese Datengrundlagen werden schrittweise vorverarbeitet, um sie für die spätere Verschneidung passend zu gestalten. Grundlegend gilt, dass die Genauigkeit der Ergebnis-Karten hauptsächlich vom Maßstab der verwendeten Input-Daten abhängt. Die wichtigsten Arbeitsschritte werden im Folgenden beschrieben.

Nach MÜLLER et al. (2009) besteht der erste Prozessierungsschritt aus der Generierung der Hangneigungsklassen aus dem vorprozessierten DHM, wobei die Auflösung des Rasters je nach Bezugsquelle variiert (z. B. DHM von Rheinland-Pfalz verfügbar in 20 m x 20 m). Die verwendeten Hangneigungsklassen sind in Tab. 4.4 zu finden und basieren auf den von SCHERRER & NAEF (2003b) etablierten Klassengrenzen.

Tab. 4.4: Hangneigungsklassen in GIS-DRP (nach MÜLLER et al. 2009, verändert)

Hangneigung [%]	Klasse
0 - 3	1
>3 - 5	2
>5 - 20	3
>20 - 40	4
> 40	5

Die Vorprozessierung des Höhenmodells besteht aus diversen Berechnungsschritten, die das Einzugsgebiet abgrenzen und die Richtung des Abflusses aus dem Einzugsgebiet angeben. Weitere Berechnungen betreffen die schnell aufsättigenden Auenbereiche direkt am Fließgewässer, welche als „Buffer“ bezeichnet werden. Die Buffer-Breite variiert mit der Hangneigung der umgebenden Flächen und ist deshalb variabel. Das bedeutet, dass in Bereichen stark eingeschnittener Hangsegmente aufgrund des fehlenden Auenbereichs geringe Buffer-Breiten ausgewiesen werden, wohingegen weite Talebenen im Unterlauf vieler Gerinne mit deutlich breiteren Buffern versehen werden.

Der zweite Schritt bei der Erstellung einer Abflussprozesskarte mittels GIS-DRP ist die Klassifizierung der geologischen Basisdaten in durchlässige (permeabel) und undurchlässige (impermeabel) Substrate (MÜLLER et al., 2009). Die Klassifikation der Geologie in GIS-DRP basiert auf ZUMSTEIN et al. (1989), welche die Infiltrationspermeabilität des Substrates unter Berücksichtigung der Lithologie und der geo-hydrologischen Eigenschaften wie z. B. Risse und Porosität in neun verschiedene Klassen einteilen (HELLEBRAND, 2010). HELLEBRAND et al. (2008) nutzten diese Einteilung z. B. zur Regionalisierung von Koeffizienten winterlicher Extrem-Ereignisse.

Der nächste Prozessierungsschritt bezieht sich auf die dritte Input-Variable, die Landnutzung. Hier ist es wichtig, bei starker Untergliederung der einzelnen Nutzungsvarianten (z. B. Wald, Laubwald, Nadelwald, Mischwald, Fichtenforsten, Buchenreinbestände, etc.), eine Zusammenfassung und Vereinfachung zu schaffen. Die Untergliederung der einzelnen Landschaftselemente sollte eine noch handhabbare Anzahl an Einzelementen besitzen, um den Umfang an Eingabeparametern zu begrenzen und in der Ausgabekarte ein sinnvolles nachvollziehbares Ergebnis zu erhalten.

Letztlich werden die vorbereiteten Grundlegendaten miteinander verschnitten, sodass je nach Hangneigung, vorherrschender Nutzung und geologischem Ausgangssubstrat Flächen gleicher Abflussprozesse in einer Karte ausgewiesen werden. Die Ausweisung der DRP erfolgt dabei nach einem bestimmten Abfrage-Algorithmus, der aus „If-Then-Beziehungen“ besteht und bei jeder neuen Abfrage hinsichtlich der Datengrundlage abgeändert werden muss. Die Nomenklatur der Abflussprozesse (siehe Tab. 4.5) orientiert sich dabei wiederum an der Klassifikation der Prozessbeurteilungsschemata nach SCHERRER (2006, Tab. 2.1).

Dementsprechend findet eine Untergliederung der Abflussprozesse HOF (Hortonian Overland Flow), SOF (Saturation Overland Flow) und SSF (Subsurface Flow) statt. Die Zahlen 1 bis 3 hinter dem jeweiligen Prozess beziehen sich auf den Parameter der zeitlichen Reaktion des Abflusses auf ein Niederschlagsereignis, wobei 1 für schnell reagierend, 2 für mittel schnell

und 3 für verzögerte Reaktionen steht. In der Klassifizierungstabelle (Tab. 4.5) ist dargestellt welcher Abflussprozess mit welcher Reaktionsgeschwindigkeit bei einer gegebenen Hangneigung und der vorherrschenden Landnutzung ausgewiesen wird. Im Falle impermeablen Untergrundes wird davon ausgegangen, dass die Abflussreaktion in steilem Gelände insgesamt schneller erfolgt, was in einer Verschärfung der DRP mit steigender Hangneigungsklasse resultiert (Tab. 4.5).

HOF wird im Gegensatz zu SOF und SSF nur zweifach untergliedert, da der Infiltrationsüberschuss entweder sofort (1) oder nur leicht verzögert (2) auftritt (siehe Kapitel 2.1). Aus diesem Grund werden für HOF1- und HOF2-Flächen spezielle Annahmen in GIS-DRP getroffen und Regeln der Klassifikation erstellt. Die genannten Flächen werden insgesamt als sehr hochwasserrelevant eingestuft. HOF-Reaktionen werden üblicherweise, wie etwa bei SCHERRER & NAEF (2003a,b) und SCHERRER (2006), in Siedlungsgebieten (z. B. Straßen, Siedlungsflächen, Industriegelände) unabhängig von Hangneigung und Permeabilität ausgewiesen (HELLEBRAND, 2010; MÜLLER et al., 2009), weshalb sie nicht in die Ausweisungstabelle (Tab. 4.5) integriert sind. SOF1-Flächen werden überall dort ausgewiesen wo das Niederschlagswasser sehr schnell einen Sättigungsüberschuss bewirkt. Typischerweise sind dies die zuvor berechneten Buffer-Bereiche, vernässte Standorte sowie offene Wasserflächen. Diese Flächen unterliegen einer speziellen Klassifikation und sind daher ebenfalls nicht in Tab. 4.5 vertreten. Der Prozess der Tiefensickerung (DP) bedarf keiner zeitlichen Unterteilung, da die zum Basisabfluss beitragenden Niederschlagsanteile grundsätzlich als nicht hochwasserrelevant angesehen werden. Tiefensickerung kann zudem nur in Gebieten mit permeabler Geologie ausgewiesen werden.

Basierend auf der beschriebenen Vorgehensweise wurden für die vier im Kapitel 3 vorgestellten Untersuchungsgebiete unter Verwendung der ArcGIS 9.2 Software der Firma ESRI, Abflussprozesskarten erstellt.

Tab. 4.5: DRP-Basis-Tabelle; DRP in Abhängigkeit von Hangneigung, Geologie und Landnutzung
(nach MÜLLER et al. (2009); verändert)

Hangneigung [%]	impermeabel	impermeabel	permeabel
	Acker + Grünland	Wald	Acker + Grünland + Wald
0-3*	SOF3	SOF3	DP
>3-5*	SOF2	SSF3	DP
>5-20*	SSF2	SSF2	DP
>20-40**	SSF1	SSF2	DP
> 40**	SSF1	SSF1	DP

* Basierend auf SCHERRER (2006), teilweise modifiziert.

** Basierend auf SCHERRER (2006) und SCHÜLER (2006), teilweise modifiziert.

5. Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Teil dieses Kapitels (5.1) werden die Resultate der Labor- und Geländeexperimente, sowie die Ergebnisse der Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen, nach PBS und nach GIS-DRP-Methode vorgestellt. Die Darstellung erfolgt einzugsgebietsbezogen wobei repräsentative Daten und Ergebnisse der angewandten Methoden präsentiert werden. Eine vergleichende Betrachtung und Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich Abfluss bedingender Faktoren sowie wesentlicher Parameter im Kontext „Abfluss unter Wald“ schließt das Unterkapitel ab.

Im zweiten Teil des Kapitels (5.2) werden in einem ersten Schritt die erstellten GIS-DRP-Karten der vier Untersuchungsgebiete mit den Ergebnissen der Abflussprozessidentifikation nach SCHERRER (2006) und den Ergebnissen der Geländeuntersuchungen, speziell der Berechnungsversuche, zum Zweck der Validierung verglichen. Daraus wird ersichtlich in welchen Bereichen sich das GIS-DRP-Tool in der Ausweisung der dominierenden Abflussprozesse bewährt und an welchen Stellen Verbesserungsbedarf besteht.

Aus den angestellten Betrachtungen werden im zweiten Schritt Parameter abgeleitet, die zur Verbesserung des digitalen Werkzeugs nach MÜLLER et al. (2009) beitragen sollen.

Letztlich werden die Modifikationsansätze in die Praxis umgesetzt und neue Abflussprozesskarten, mit zum Teil veränderten Schwerpunkten bezüglich der Identifizierung von DRP, erstellt. Nach einer erneuten Validierung schließt das Unterkapitel mit einer Zusammenfassung zur Abflussprozesskartierung ab.

5.1 Labor- und Geländebefunde sowie Abflussprozesskartierungen

5.1.1 Frankelbach

5.1.1.1 Labor- und Geländeuntersuchungen

Bodenphysikalische Eigenschaften

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, bildet das im Einzugsgebiet Frankelbach dominierende geologische Ausgangssubstrat des Rotliegend, aufgrund seiner Bildungsbedingungen in Sedimentationsräumen während des Perm, eine sehr heterogene Basis im Hinblick auf die Bodenbildung und zur Ausprägung bodenphysikalischer

Eigenschaften eines Standortes. Demzufolge wurden unterschiedlichste Werte bodenphysikalischer Parameter durch die Stechzylinderuntersuchungen ermittelt. Besondere Unterschiede ergaben sich zwischen den Standorten der 30-jährigen Aufforstung (FRA-2), dem etablierten Laubwaldbestand (FRA-3) und dem Acker-Standort (FRA-6), weshalb diese im Folgenden detaillierter betrachtet werden. Die Ergebnisse der übrigen Standorte werden ebenso beschrieben. Die zugehörigen Daten finden sich im Anhang (Tab. A3) wieder.

Die Trockenrohdichten der Oberböden aller Standorte liegen nach AD-HOC-AG BODEN (2005) im Bereich zwischen $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ (sehr gering) im Falle der 1-jährigen Aufforstung (FRA-1) und $1,49 \text{ g cm}^{-3}$ (mittel) im Falle des Douglasienbestandes (FRA-4). Generell wird unter forstlicher Nutzung von geringen Dichten im Oberboden ausgegangen, da erhöhte Anteile organischer Substanz, Wurzelaktivität und Bioturbation zur Auflockerung des Substrates beitragen. Betrachtet man die im Vergleich zu den übrigen Test-Plots erhöhte Trockenrohddichte des schon genannten Douglasienbestandes (FRA-4), so muss hier entweder von einer natürlichen Verdichtung oder aber von einem anthropogenen Einfluss ausgegangen werden. Natürliche Verdichtungen im Wald werden üblicherweise auf Nadelwaldstandorten durch Zug- und Druckkräfte im Bereich des Wurzeltellers ausgelöst, welche durch Windbelastung induziert werden (HARTGE & BOHNE, 1985). Anthropogene Verdichtungen werden durch Forstarbeiten herbeigeführt. Verdichtungen treten dann typischerweise im Bereich der Rückegassen auf (z. B. SCHOBEL, 2008). Durch die Belastung des locker gelagerten Waldbodens durch schwere Forstmaschinen werden insbesondere schluff- und tonreiche Waldböden verdichtet, das Volumen der wasserleitenden Makroporen verringert und die Porenkontinuität zerstört (HILDEBRANDT, 1983). Kommt es auf Waldboden nicht nur zu einer Kompaktierung, sondern auch zur Entfernung der oberen organischen Bodenschichten, so kann dies zu anhaltend negativen Auswirkungen auf die hydraulischen Eigenschaften eines Standortes führen (WEILER & McDONNELL, 2004). Im Falle des angesprochenen Douglasienbestandes FRA-4 wird der anthropogene Einfluss als Hauptursache für die erhöhten Trockenrohdichten des Oberbodens angesehen.

Im Vergleich der drei zuvor genannten Test-Plots (FRA-2, FRA-3 und FRA-6) zeigt der Ackerboden (FRA-6; Braunerde-Pseudogley) über das gesamte Profil hinweg die höchsten Dichtewerte (Abb. 5.1). Besondere Differenzen ergeben sich hierbei zwischen den Oberböden der Acker- und Wald-Standorte, wobei ein Unterschied von mehr als $0,3 \text{ g cm}^{-3}$ deutlich wird. Die unterschiedlichen Dichtewerte speziell der Oberböden können hier mit der landwirtschaftlichen Tätigkeit auf dem Acker erklärt werden. Bodenverdichtung infolge der Bearbeitung von Ackerflächen mit schweren Landmaschinen ist ein sehr intensiv untersuchtes

Problemfeld (SCHOBEL, 2008). „Beim Verdichtungsprozess nimmt der Feststoffanteil am Bodenvolumen relativ zu, weil sich das Porenvolumen verringert. Das in den Bodenporen befindliche Wasser fördert diesen Vorgang, weil es als Gleitfilm für die Partikelbewegung wirkt“ (LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN, 2002, S.12).

Auffällig im weiteren Verlauf des Diagramms (Abb. 5.1) ist ein Dichtesprung im Profil des Test-Plots FRA-2 (30-jährige Aufforstung) auf ein annähernd hohes Niveau wie die Dichten des bearbeiteten Ackerbodens. Von einer früheren ackerbaulichen Nutzung dieses Standortes kann dementsprechend ausgegangen werden, was auch durch die Lage (direkt neben dem aktuellen Acker) und die geringe Hangneigung ($5 - 7^\circ$) plausibel erscheint.

Die Dichten der Unterböden variieren insgesamt weniger stark. Hier liegen die Werte aller Plots zwischen $1,59 \text{ g cm}^{-3}$ (FRA-1; mittel) und $1,83 \text{ g cm}^{-3}$ (FRA-6; sehr hoch). Demnach zeigt der rezente Acker auch hier die höchsten Werte; von Unterbodenverdichtung sowie beginnender Schadverdichtung (irreversible Verdichtung und Schädigung des Bodengefüges mit deutlich negativem Einfluss auf den Pflanzenstandort) ist demzufolge auszugehen.

Die Unterschiede zwischen den Test-Plots werden ebenfalls bei Betrachtung des Gesamtporenvolumens erkennbar (Abb. 5.2), da dieser Parameter in direkter Wechselbeziehung zur Trockenrohichte steht. Wichtiger als das Gesamtporenvolumen, hinsichtlich der Wasserführung im Boden und der damit verknüpften Abflussbildung, ist jedoch der Anteil der weiten Grobporen ($> 50\mu\text{m}$) am GPV (Abb. 5.3). Diese sog. Luftkapazität erklärt das Porenvolumen, welches bei Feldkapazität mit Luft gefüllt ist (HINTERMAIER-ERHARD & ZECH, 1997). Nach SCHOBEL (2008) kann dieser Porenraum im Falle stauwasserunbeeinflusster Böden als Maß für die Durchlässigkeit angesehen werden, während bei hydromorphen Böden die weiten Grobporen als (Zwischen-)Speicher für Stauwasser fungieren. Bei Betrachtung der Anteile weiter Grobporen (Abb. 5.3) wird ersichtlich, dass wiederum der Acker über das gesamte Profil hinweg die geringsten Werte aufweist. Im Oberboden liegen die Werte nach AD-HOC-AG BODEN (2005) noch in einem mittleren Bereich, während die Werte des Unterbodens lediglich als gering eingestuft werden können. Die sich daraus ergebenden nachteiligen Bedingungen für perkolierendes Wasser lassen sich durch den angesprochenen Bodentyp (Braunerde-Pseudogley) eindeutig nachvollziehen. Ab einer Profiltiefe von 15 – 20 cm verringert sich die Luftkapazität auch im Falle der beiden Vergleichsstandorte (FRA-2 und FRA-3) deutlich. Speziell das Bodenprofil der 30-jährigen Aufforstung (FRA-2) zeigt dementsprechende Hydromorphie Merkmale (Eisen- und Mangankonkretionen; Marmorierung).

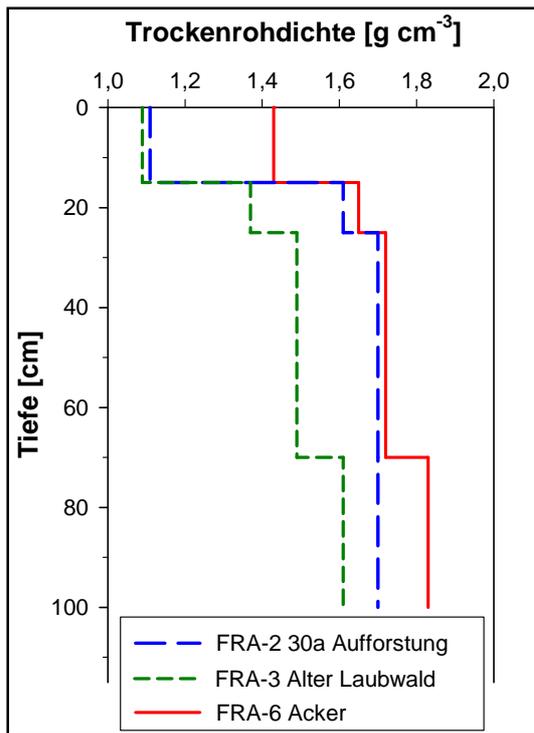


Abb. 5.1: Trockenrohichte Frankelbach (Auswahl)

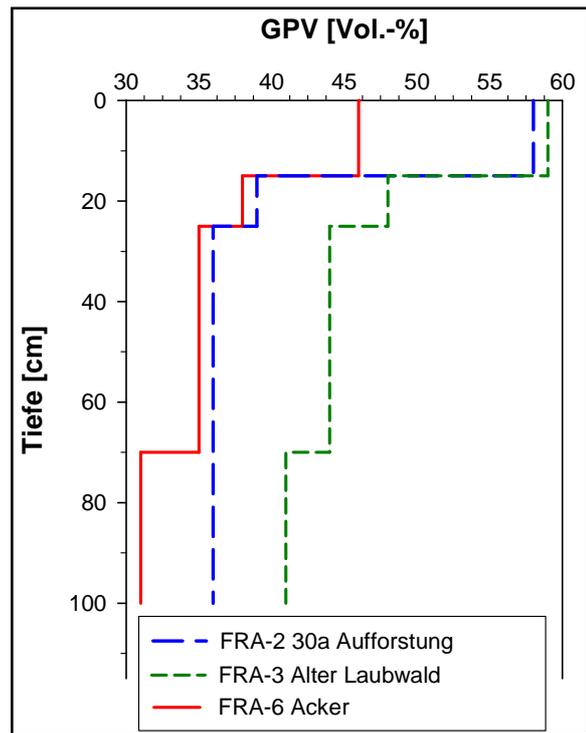


Abb. 5.2: Gesamtporenvolumen Frankelbach (Auswahl)

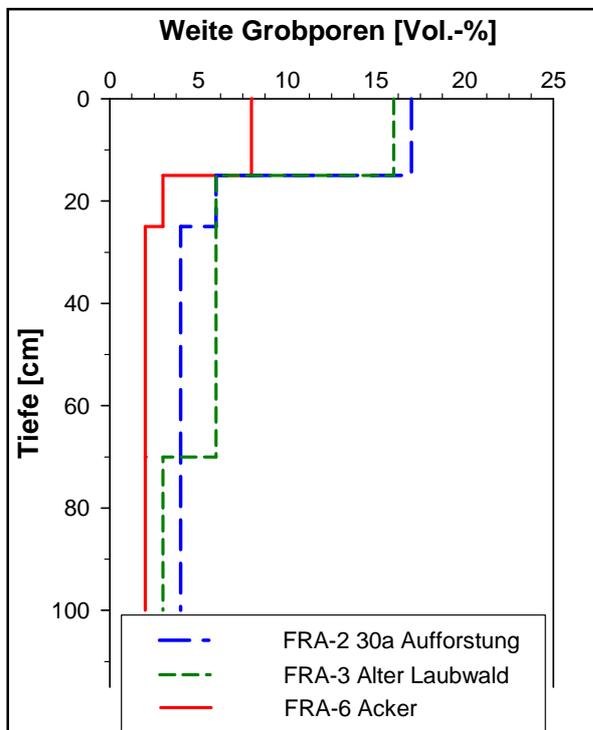


Abb. 5.3: Weite Grobporen Frankelbach (Auswahl)

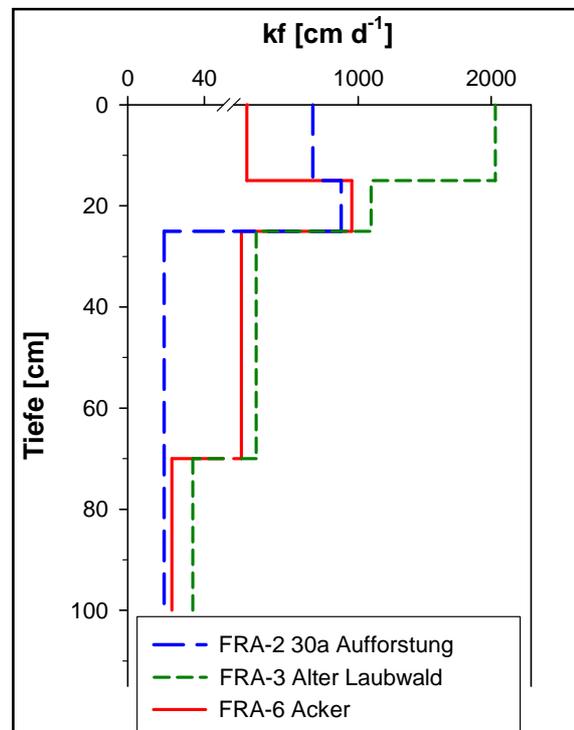


Abb. 5.4: ges. Wasserleitfähigkeit Frankelbach (Auswahl)

Der Einfluss des Anteils weiter Grobporen auf die Wasserleitfähigkeit eines Bodens kann durch die Laboruntersuchungen tendenziell bestätigt werden. So passt die geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit (Abb. 5.4) des Acker-Standortes im Oberboden gut zum geringen Anteil der Luftkapazität in derselben Profiltiefe. Auch die generell hohen Leitfähigkeiten des etablierten Laubwaldbestandes lassen sich aus den Anteilen der Poren $>50\mu\text{m}$ erklären. Hier sind es vor allem die Baumwurzeln, die kontinuierliche Grobporen schaffen, welche sich positiv auf den Gas- und Wasserhaushalt der Böden auswirken.

Weiterhin haben sowohl die Dichte des Bodens als auch dessen Porosität unmittelbaren Einfluss auf weitere physikalische Parameter wie den Eindringwiderstand (EW) und die Luftleitfähigkeit (k_a), die ebenfalls im Labor bestimmt wurden. Aus Tab. A3 des Anhangs ist ersichtlich, dass der Eindringwiderstand (EW) des Oberbodens, äquivalent zur hohen Trockenrohichte, auf dem Ackerstandort am höchsten ist. Auffallend ist daher, die nach der Klassifikation nach BRUGGE (1983) mittlere Luftleitfähigkeit (k_a) dieses Standortes im ersten Horizont, verglichen mit der geringen Leitfähigkeit für Wasser (k_f).

Infiltrationen

Die erhobenen Infiltrationsraten der bewaldeten Test-Plots im Einzugsgebiet Frankelbach sind basierend auf der Klassifikation nach WOHLRAB et al. (1992) insgesamt als sehr hoch zu bewerten ($n = 4$ je Plot; der Mittelwert aller Endinfiltrationsraten entspricht 693 cm d^{-1}). Nur der Standort FRA-3 (Alter Laubwald) wies etwas geringere (501 cm d^{-1}), jedoch immer noch als hoch zu klassifizierende Endinfiltrationsraten auf (Abb. 5.5). Einen Grund für das gute Infiltrationsvermögen der Test-Plots stellen die zuvor erwähnten geringen Oberbodendichten dar, welche verknüpft mit hohen Luftkapazitäten gute Wasserleitfähigkeiten garantieren.

Ein weiterer Grund für hohe Infiltrationsraten im Wald ist der vorhandene Humus, der die Evaporation verringert, das Wasserspeichervermögen erhöht (WEILER & McDONNELL, 2004) und dem Niederschlagswasser eine große Oberfläche bietet und es so besser verteilt. BROSINGER & ROTHE (2003) gehen unter Berücksichtigung des jeweiligen Humuszustandes davon aus, dass stufig aufgebaute Mischwälder im Hinblick auf die Infiltration günstiger zu bewerten sind, als z. B. nicht standortgerechte Fichtenbestände. Auf Basis der durchgeführten Infiltrationsexperimente in Laub- und Nadelwäldern des Einzugsgebietes Frankelbach scheint die vorherrschende Baumart jedoch lediglich geringen Einfluss auf die Infiltrationsrate auszuüben, da auf allen Test-Plots hohe oder sehr hohe Infiltrationsraten ermittelt wurden.

Selbst auf dem Acker-Standort (FRA-6) wurden, bedingt durch Trockenrisse und Regenwurmgänge an der Bodenoberfläche, sehr hohe Infiltrationsraten gemessen. Die Varianz der einzelnen Werte war jedoch auf diesem Standort, bedingt durch die heterogene Verteilung der Risse und biogenen Makroporen, auffällig hoch. Der Wertebereich der Messungen lag hier zwischen 0 cm d^{-1} und 1728 cm d^{-1} . Zur Identifikation von potentiellen Verschlammungsprozessen der Bodenoberfläche des Ackers waren die Infiltrationsversuche nicht geeignet, da bei korrekter Durchführung eine Aggregatzerstörung oder Splash-Effekte vermieden werden (SCHOBEL, 2008). Standort FRA-7 (Schneise) wies ebenfalls eine hohe Varianz und damit stark unterschiedliche Infiltrationsraten auf. Die differierenden Werte dieses Plots werden sowohl auf eine sehr heterogene Ausbildung der Gras- und Strauchschicht als auch von Wurzelgängen und biogenen Makroporen zurückgeführt. Die gemittelte Infiltrationsrate ist ebenfalls sehr hoch.

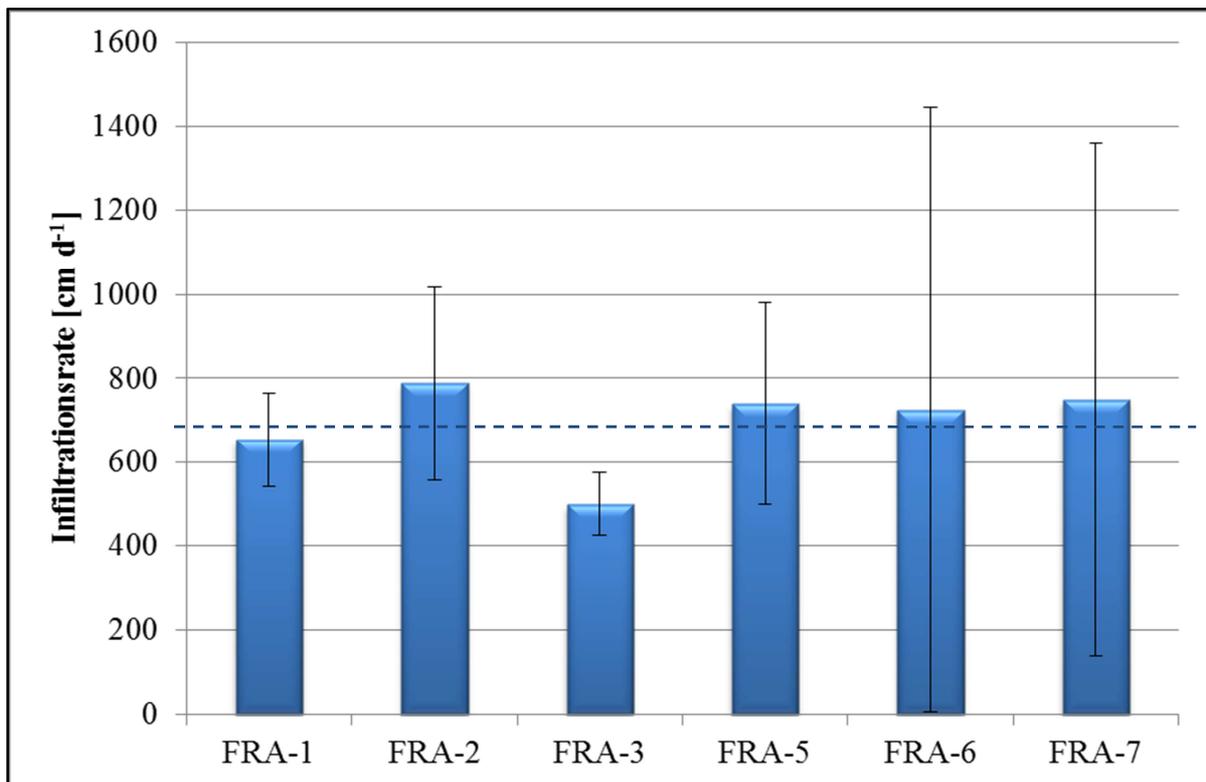


Abb. 5.5: Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Frankelbach

Abfluss auf Plot-Skala

Den bodenphysikalischen Untersuchungen ähnelnd, lieferten die Großberegnungsversuche auf den Standorten des Frankelbach Einzugsgebietes heterogene Ergebnisse und generierten zum Teil sehr unterschiedliche Abflussmengen sowie -prozesse.

Die Beregnungsversuche fanden im späten Frühling¹⁴ 2008 und im Jahr 2010 statt, sodass die Böden nicht völlig Wasser gesättigt waren. Die Anfangswassergehalte variierten zwischen 61 % und 77 % der Feldkapazität (pF 1,8). Demnach wurde das beregnete Wasser des ersten Tages im Falle der Wald-Beregnungen fast gänzlich zur Aufsättigung des Bodens auf FK benötigt, weshalb zu Beginn keine große Abflussspende (Tab. 5.1) gemessen wurde. Anders verhielt sich der Acker-Standort (FRA-6), da hier schon am ersten Beregnungstag vergleichsweise große Mengen Abfluss generiert wurden (24 % Tages-Abflusskoeffizient; Abb. 5.6), die sich mit jedem weiteren Beregnungstag noch bis max. 42 % erhöhten. Im Gegensatz dazu lieferte Standort FRA-7 (Schneise) über die gesamte Beregnungsdauer von drei Tagen keinen messbaren Abfluss (Abb. 5.6; Anhang Abb. A10). Es wird angenommen, dass das infiltrierte Wasser auf diesem Plot durch ein etabliertes Makroporensystem und präferentielle Fließpfade in tiefere Profilbereiche geleitet wurde und als tiefer Zwischenabfluss unterhalb der Grubentiefe zum Abfluss kam. Von Tiefensickerung kann an diesem Standort nicht ausgegangen werden, da das geologische Ausgangssubstrat des permischen Rotliegend nach ZUMSTEIN et al. (1989) als impermeabel klassifiziert wird. Die Annahme des tiefen Zwischenabflusses wird durch Beschreibungen von JOHST (2011) bestätigt, da hier kontinuierlich schüttende Quellen der Frankelbach-Zuströme erwähnt werden, die nur wenige Höhenmeter unterhalb des Test-Plots, im Bereich einer Geländeversteilung, zu finden sind.

Die Abflusskoeffizienten der Gesamtberegnungen (Tab. 5.1) belegten die klaren Unterschiede zwischen den einzelnen Test-Plots. 20 % Gesamtabfluss lieferte die 1-jährige Aufforstung (FRA-1) auf einer kolluvial beeinflussten tiefgründigen Braunerde. 11,6 % bis 17,3 % Abfluss wurden in den Laubwäldern auf Braunerden mit Einfluss periglaziärer Deckschichten generiert. Der Acker-Standort (Pseudogley mit hohen Trockenrohdichten) lieferte insgesamt 16 % Abfluss. Nur 5,5 % respektive 5,6 % wurden in den Nadelwäldern, ebenfalls auf periglaziär beeinflussten Braunerden, gemessen.

Überdies wurden im Falle der Standorte FRA-1 bis FRA-3 und FRA-6 steigende Tages-Abflusskoeffizienten ermittelt, während der unter den Nadelwaldbeständen gemessene Abflusskoeffizient des dritten Versuchstages wieder leicht abnahm.

Entscheidend hinsichtlich der DRP sind jedoch nicht nur die Abflussmenge und die zeitliche Reaktion, sondern vor allem das räumliche Abflussverhalten der einzelnen Test-Plots. Neben

¹⁴ Beregnungszeiten: Standorte FRA-1 bis FRA-5 im Zeitraum Mai bis Juni 2008
Standorte FRA-6 bis FRA-7 im Zeitraum März bis April 2010.

Zwischenabflussprozessen verschiedener Reaktionsgeschwindigkeiten wurden vornehmlich Oberflächenabflussprozesse unterschiedlicher Ausprägung identifiziert (Abb. 5.7).

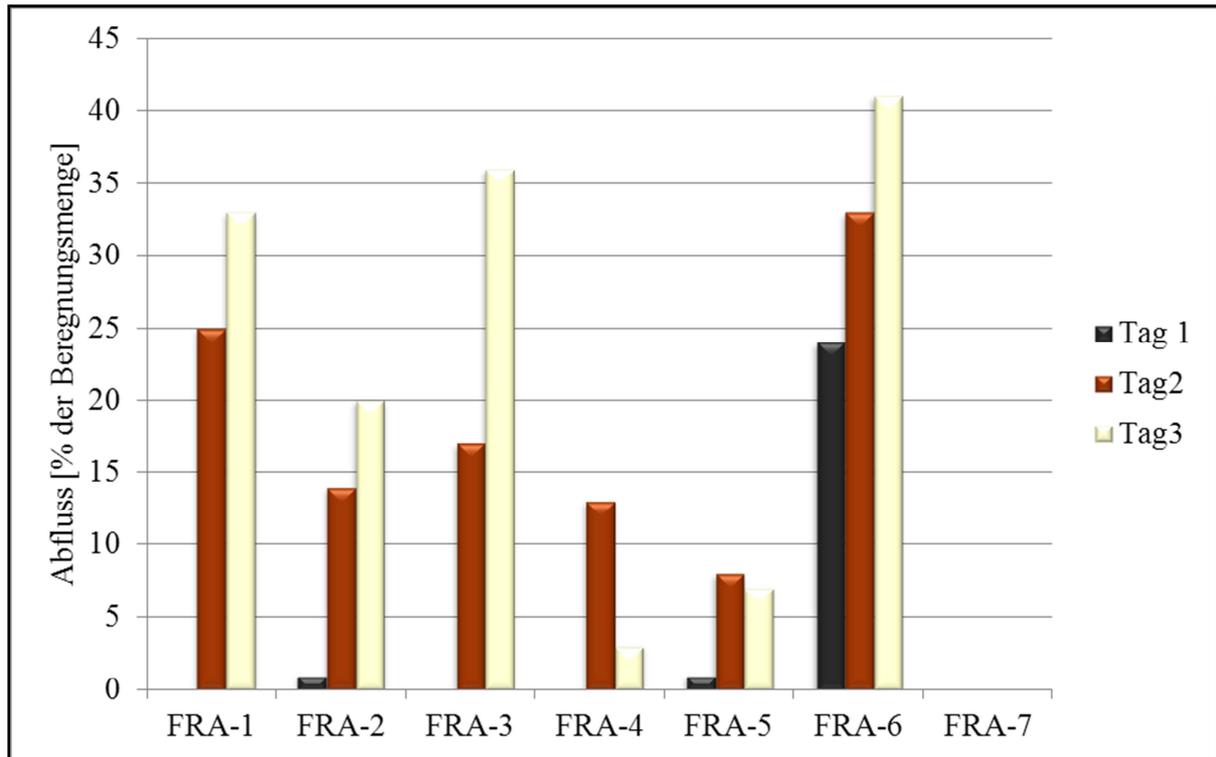


Abb. 5.6: Tägliche Abflusskoeffizienten der Standorte Frankelbach

Tab. 5.1: Abflusscharakteristika der Test-Plots im Einzugsgebiet Frankelbach während der Großberegnungen

Test Plots	Abfluss- koeffizient (gesamt) [%]	Σ Abfluss während täglichen Beregnungsintervallen (40 mm/Tag)		
		1.Tag [Σ mm]	2.Tag [Σ mm]	3.Tag [Σ mm]
FRA-1: 1-jährige Aufforstung	20,0	- ¹	10,8	13,2
FRA-2: 30-jährige Aufforstung	11,6	0,3	5,5	8,1
FRA-3: Alter Laubwald	17,3	-	6,6	14,2
FRA-4: Douglasie	5,6	0,1	5,3	1,4
FRA-5: Alter Nadelwald	5,5	0,5	3,2	3,0
FRA-6: Acker	16,0	9,5	13,1	16,5
FRA-7: Schneise	-	-	-	-

¹ in dieser und den folgenden Tabellen sind nur Ergebnisse mit $x > 0$ tabelliert

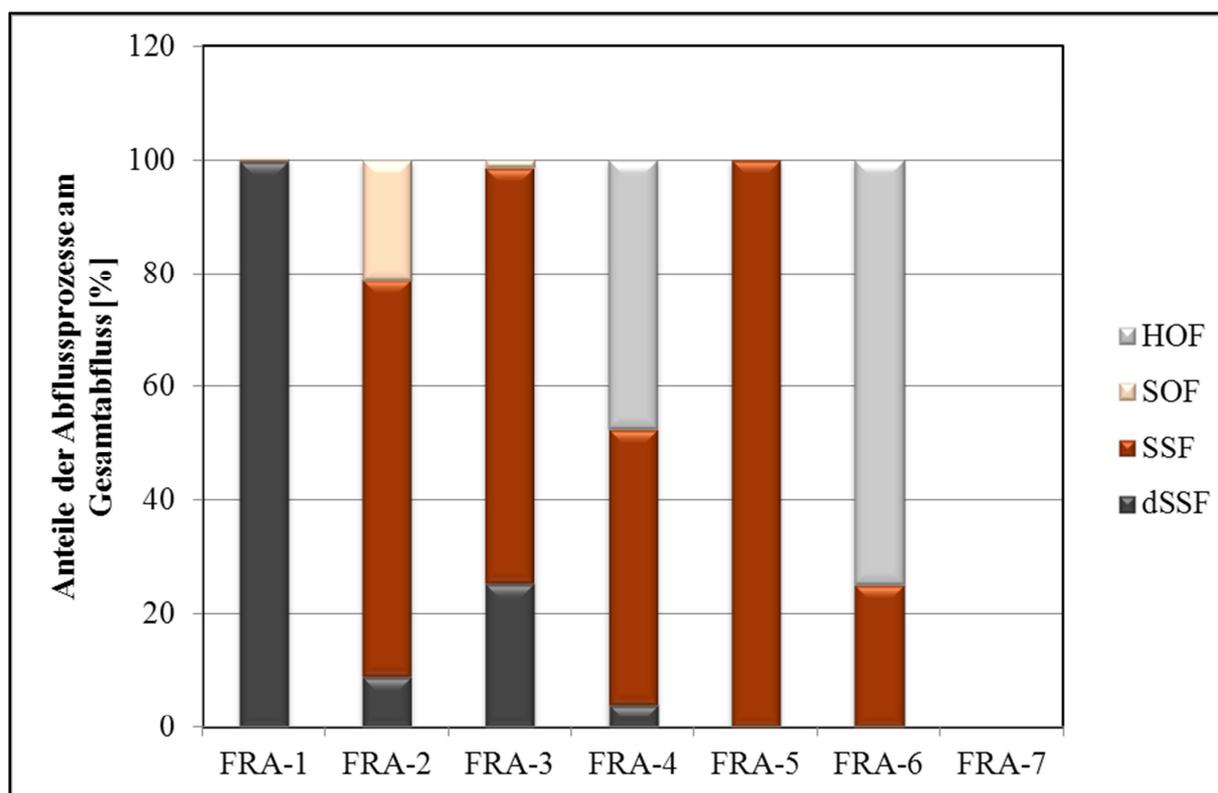


Abb. 5.7: Prozentuale Anteile der Abflussprozesse der Standorte Frankelbach

Aufgrund spezieller und teilweise für Wald untypischer Ergebnisse der Beregnungsversuche wird nachfolgend auf die Standorte FRA-2 (30-jährige Aufforstung), FRA-4 (Douglasie), und FRA-6 (Acker) näher eingegangen.

Das Abflussverhalten des Standortes FRA-2 (30-jährige Aufforstung; Abb. 5.8) unterscheidet sich von jenem der beiden folgenden Standorte. Dennoch sind Parallelen zum Standort FRA-6 (Acker, Abb. 5.10) zu erkennen, die auf die ehemalige ackerbauliche Nutzung dieses heute forstlich genutzten Test-Plots schließen lassen. Wie schon zuvor angesprochen, führte das Niederschlagswasser des ersten Beregnungstages zu einer weitgehenden Aufsättigung des Bodens, ohne dabei bedeutende Mengen an Abfluss zu generieren. Am zweiten Beregnungstag hingegen wurden ab dem zweiten Intervall schnell reagierender Zwischenabfluss (SSF1) und oberflächliche Abflüsse aufgrund von Sättigung (SOF2) gemessen, die zusammen 5,5 % des berechneten Niederschlages ausmachten (Tab. 5.1). Das bedeutet, dass das Wasser gut in den durchwurzelteten Oberboden infiltriert, dann aber sehr schnell lateral auf einer undurchlässigen Schicht abgeleitet (SSF) oder aufgestaut wird, um bei anhaltendem Regen, nach Sättigung, über die Oberfläche abzufließen (SOF). Dieses Ergebnis bestätigt Ausführungen von KIENZLER (2007), der von sehr schnellem Zwischenabfluss mit

großen Anteilen an Ereigniswasser¹⁵ ausgeht, wenn der Niederschlag direkten Anschluss an präferentielle Fließpfade hat. Diese bevorzugten Fließpfade werden an diesem und anderen Standorten hauptsächlich durch die Baumwurzeln geschaffen, die in den ersten 15 cm des Bodenprofils nach AD-HOC-AG BODEN (2005) in mittlerer Anzahl (W3) vertreten sind. Der Abflusskoeffizient des dritten Versuchstages steigerte sich auf 8,1 %; wiederum hauptsächlich erzeugt durch Sättigungs-Oberflächenabfluss (SOF) und Zwischenabfluss (SSF). Ferner konnte tiefer Zwischenabfluss (dSSF) ermittelt werden.

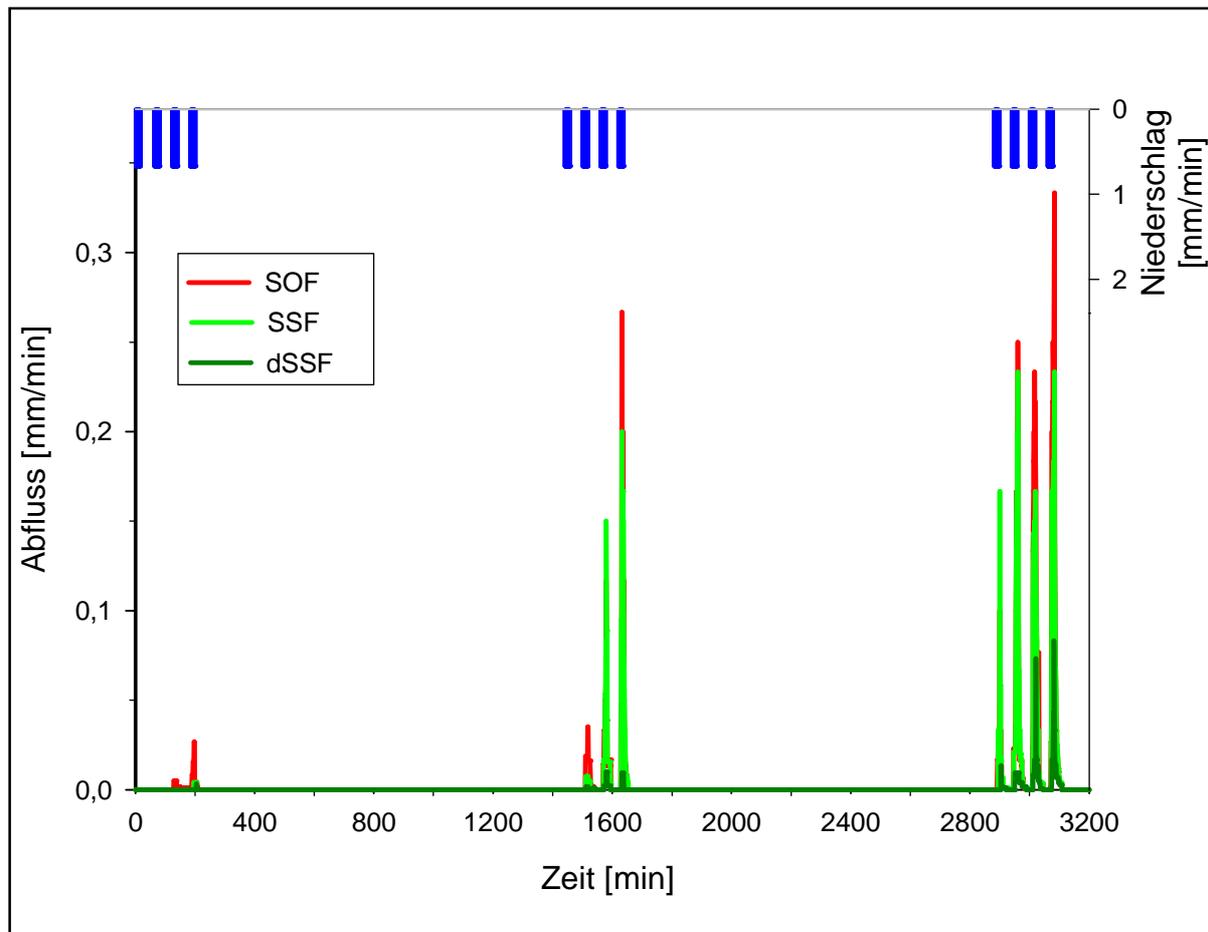


Abb. 5.8: Abflussverhalten am Standort FRA-2 (30-jährige Aufforstung)

Die Beregnung an Standort FRA-4 (Douglasie) fand, wie zuvor erwähnt, im Frühjahr 2008 nach einer längeren Trockenperiode statt. Bei einem insgesamt geringen Gesamtabflusskoeffizienten von 5,6 % wurden große Mengen an HORTON'schem Oberflächenabfluss generiert (47,5 % des Gesamtabflusses; Tab. 5.1, Abb. 5.9). Dies ist für Waldstandorte sehr untypisch. Gründe hierfür können zum einen in dem für Waldstandorte

¹⁵ Ereigniswasser: Anteil des Niederschlagswassers, das direkt, ohne längere Zwischenspeicherung und Zeitverzögerung, im Boden als Boden- oder Grundwasser dem Fließgewässer zufließt (<http://www.geodz.com>).

relativ dichten Oberboden (Dichte 1,49 g cm³; wahrscheinlich verursacht durch Erntearbeiten mit schweren Maschinen) und zum anderen durch hydrophobe Eigenschaften der Douglasienstreu gesucht werden. WEILER & MCDONNELL (2004) bestätigen in diesem Zusammenhang, dass die Infiltration durch Kompaktion des Waldbodens verringert werden kann und hierdurch Bereiche entstehen können, die Oberflächenabflüsse produzieren. Bezüglich des Faktors Hydrophobizität in Wäldern konstatiert WEINMEISTER (2003), dass hydrophobe Substanzen im Auflagehumus, Rohhumus sowie wasserabweisenden Blattscheiden dichter Bürstlingshorste das Eindringen von Wasser in den Boden bei trockenen sommerlichen Bedingungen erschweren. Untermauert werden diese Aussagen unter anderem durch HUFFMAN et al. (2001), da hier erläutert wird, dass viele Waldböden, saisonabhängig durch eine Auslaugung der Kohlenwasserstoffe innerhalb der Humusaufgabe und die darauffolgende Austrocknung des mineralischen Bodens, wasserabweisende Eigenschaften ausbilden. Demnach hat der Witterungsverlauf entscheidenden Einfluss auf die Infiltrationsleistung und die Generierung von oberflächlichen Abflussprozessen in Wäldern.

Neben dem oberflächlichen Abfluss auf Standort FRA-4 (Douglasie) traten außerdem durch periglaziäre Lagen induzierter Zwischenabfluss (SSF) und zusätzlich tieferer Zwischenabfluss (dSSF) auf (Abb. 5.9). Der Einfluss des geologischen Ausgangssubstrates bzw. der periglazialen Deckschichten und des Grobbodenanteils hinsichtlich der Abflussbildung werden hier deutlich. Dieser Einfluss wird von SCHOBEL (2008) bestätigt, der den Substrateigenschaften eine entscheidende Bedeutung hinsichtlich der dominierenden Abflussprozesse in der Landschaft beimisst.

Eine Dominanz eines einzelnen Abflussprozesses, wie im Falle der meisten anderen untersuchten Standorte, kann an diesem Test-Plot aufgrund der ähnlich hohen Werte von HORTON'schem Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss nicht ausgewiesen werden (47,5 % HOF zu 48,7 % SSF).

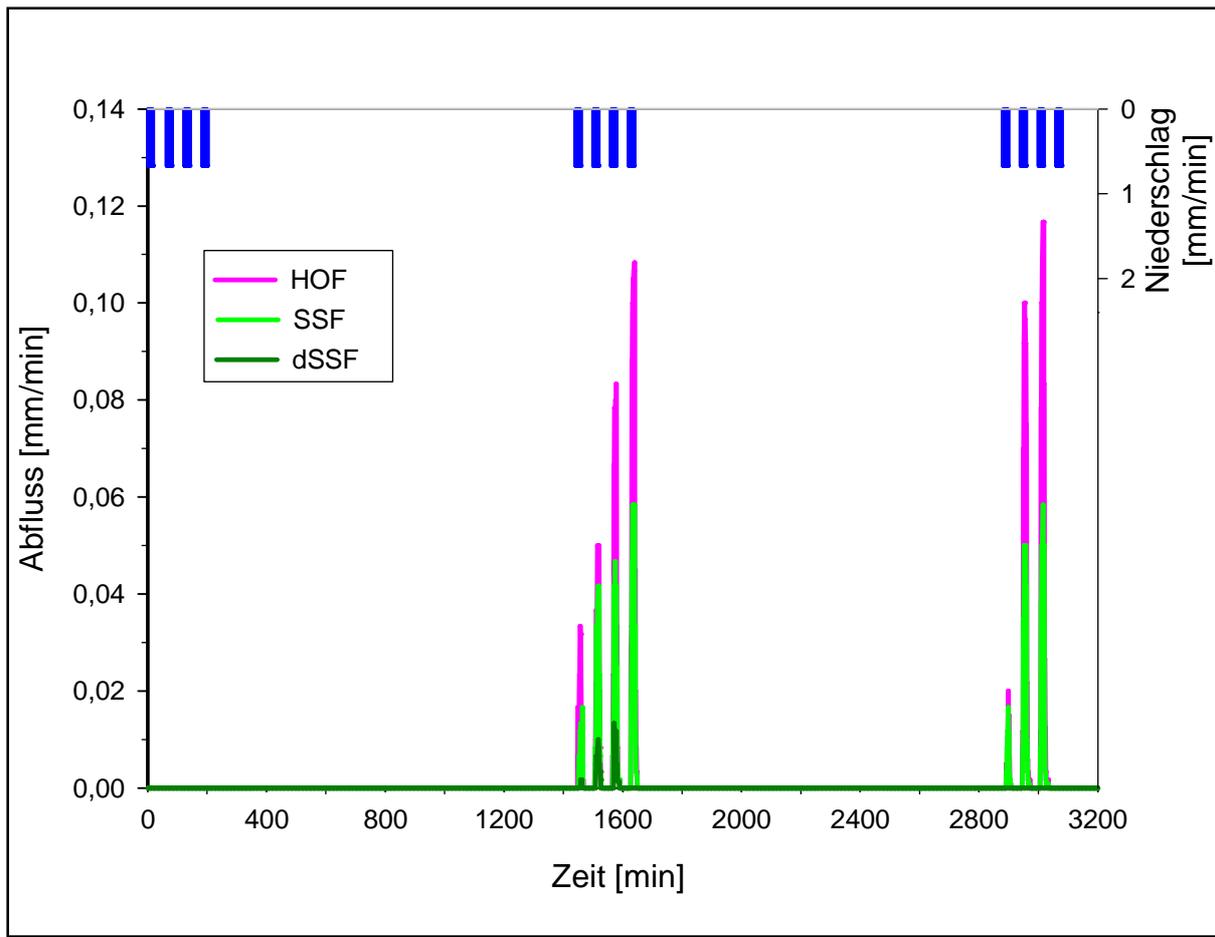


Abb. 5.9: Abflussverhalten am Standort FRA-4 (Douglasie)

Die Beregnung des Acker-Standortes FRA-6 (kurz nach dem Austreiben der Feldfrüchte; Weizen) generierte am ersten Tag vorwiegend schnell reagierenden Zwischenabfluss (Abb. 5.10). Das durch kleine Trockenrisse und Regenwurmröhren in den Boden infiltrierende Wasser wurde durch eine mulchhaltige Schicht in ca. 15 cm Tiefe schon nach dem zweiten Beregnungsintervall auf die Metallbleche in der Grube geleitet und dort aufgefangen (9,5 % des Gesamtabflusses). Im Laufe des ersten Tages konnte weiterhin beobachtet werden, dass die Bodenoberfläche durch Verschlammungsprozesse schrittweise verschlossen wurde. Dementsprechend änderte sich der dominierende Abflussprozess des zweiten und dritten Beregnungstages im Vergleich zum ersten Tag von Zwischenabfluss (SSF) zu HORTON'schem Oberflächenabfluss (HOF; Foto 5.1, 5.2). Am zweiten Beregnungstag wurden 13,1 % des gesamten Abflusses als HOF, am dritten Tag des Experimentes 16,5 % des Gesamtabflusses als HOF aufgefangen (Abb. 5.10). Zwischenabflussprozesse konnten am zweiten Tag nur noch sehr untergeordnet festgestellt werden; am dritten Tag nicht mehr. Der beschriebene Oberflächenabfluss bildet daher den

dominierenden Abflussprozess des Ackerstandortes unter den, zum Zeitraum der Beregnungsversuche, vorherrschenden Bedingungen.

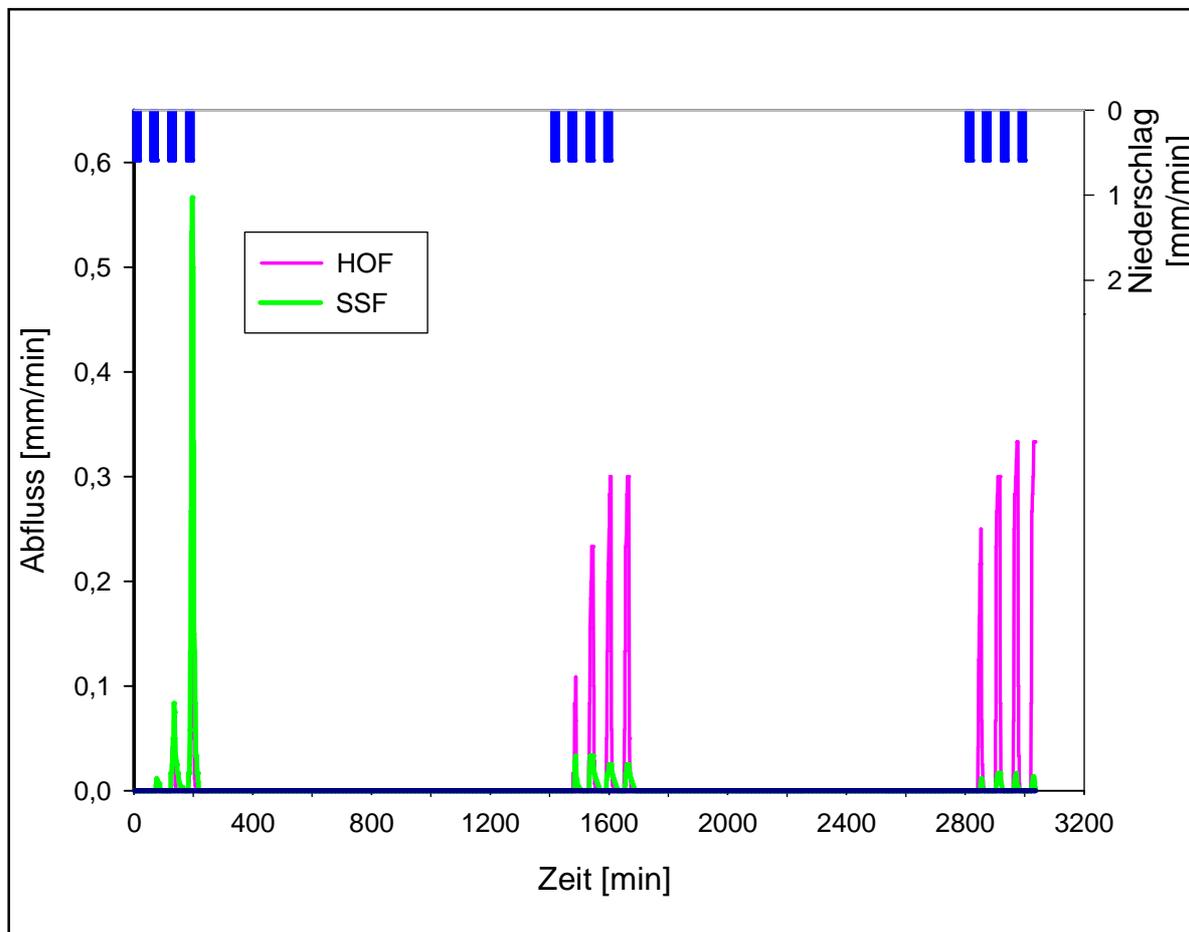


Abb. 5.10: Abflussverhalten am Standort FRA-6 (Acker)



Foto 5.1: Auffangen des HOF (FRA-6)



Foto 5.2: HORTON'scher Oberflächenabfluss (FRA-6)

Die Beregnung des kolluvial beeinflussten Standortes der 1-jährigen Aufforstung (FRA-1) lieferte ebenfalls keinen Abfluss am ersten Versuchstag (Anhang Abb. A7). Ab dem zweiten Beregnungstag traten überwiegend tiefere Zwischenabflüsse (dSSF) aus dem Profil der tief

entwickelten Braunerde aus. Der Großteil des abfließenden Wassers trat dabei unterhalb des dritten Auffangbleches aus, sodass die Messung der Abflussmenge hier kumulativ erfolgte. Unwesentliche Mengen gesättigten Oberflächeabflusses traten außerdem an den beiden letzten Untersuchungstagen auf. Mit 20 % wurde der insgesamt höchste Abflusskoeffizient an diesem Plot ermittelt.

Im Falle des Standortes FRA-3 (Alter Laubwald) wurden ebenfalls hauptsächlich Zwischenabflussprozesse ab dem zweiten Versuchstag nachgewiesen, die zusammen über 98 % des aufgefangenen Abflusses repräsentierten (Anhang Abb. A8). Der zu vernachlässigende restliche Anteil bestand aus gesättigtem Oberflächenabfluss (SOF).

Vollständigen Zwischenabfluss (SSF) lieferte die Beregnung des Test-Plots FRA-5 (Alter Nadelwald), wobei der Abflusskoeffizient mit 5,5 % sehr gering ausfiel.

Abfluss auf Punkt-Skala

Während der Geländearbeiten im Einzugsgebiet Frankelbach führten zwei Forschungspraktika des Faches Physische Geographie 24 Kleinberegnungen durch. Die dabei erhobenen Daten (Tab. 5.2 und Anhang Tab. A12) sollen im Zusammenhang mit der Generierung von Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet als additive Information zu den Ergebnissen der Großberegnungen genutzt werden.

Ähnlich zu den Großberegnungen wiesen die Acker-Standorte (ID 4 und 6) sowie die Douglasien-Plots (ID 5 und 22) die höchsten Abflusskoeffizienten der realisierten Versuche auf (36,6 % bis 86,9 %). Die punkt-skaligen Beregnungen auf Grünland, Aufforstungen und in den etablierten Laubwaldbeständen generierten in der Mehrheit der Fälle weit weniger Oberflächenabfluss (0 % bis 30,8 %). Auch dies passt ergebnisbezogen sehr gut zu den Beregnungen auf Plot-Skala. Demzufolge kann festgehalten werden, dass Abflüsse auf der Bodenoberfläche mit beiden Systemen identifizierbar und zudem vergleichbar sind.

Speziell im Falle des Douglasien-Bestandes lässt sich das Ergebnis (HORTON'scher Oberflächenabfluss) vor allem durch die zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden hydrophoben Oberflächeneigenschaften begründen. Weiterführende Studien zur Hydrophobizität in Wäldern verschiedener Einzugsgebiete (HOLTHOF, 2011; PETER, 2011; WEILER, 2011) bestätigen diesen durch HUFFMAN (2001) als „jahreszeitenabhängig“ bezeichneten Trend. Während Kleinberegnungsversuchen unter Douglasie und Fichte in feuchten Wintermonaten¹⁶ wurden hohe Infiltrationsraten und keine Oberflächenabflüsse festgestellt (PETER, 2011). Im

¹⁶ Nov. 2010 bis Jan. 2011 zwischen 54 mm und 100 mm monatlicher Niederschlag (<http://www.geoportal-wasser.rlp.de>)

Gegensatz dazu wurden im äußerst trockenen Frühjahr 2011¹⁷ bei geringen Bodenwassergehalten (im Mittel 16 Vol.-% im Ah) hohe Abflusskoeffizienten (im Mittel 41 %; Höchstwert 88 %), bedingt durch wasserabweisende Oberflächeneigenschaften, unter beiden Nadelbaumarten ermittelt (HOLTHOF, 2011; WEILER, 2011). Die Relevanz der jahreszeitlichen Austrocknung und Wiederbefeuchtung des Bodens hinsichtlich der Generierung von oberflächlichen Abflüssen im Wald kann anhand dieser Studien bestätigt werden.

Tab. 5.2: Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Frankelbach (Quelle: FP Physische Geographie, Universität Trier)

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs-	Berechnungs-	Hang-	Abfluss-
			dauer*	intensität**	neigung	koeffizient
			[min]	[l/m ² /h]	[°]	[%]
Frankelbach	2	Acker	60	38,2	6	20,1
Frankelbach	4	Acker	60	39,9	10	36,6
Frankelbach	6	Acker	30	43,7	6	56,0
Frankelbach	7	Grünland	60	40,3	25	12,7
Frankelbach	11	Grünland	60	36,9	21,5	8,2
Frankelbach	14	Aufforstung	30	41,2	8,5	7,5
Frankelbach	8	Mischwald	60	41,3	23	0,4
Frankelbach	9	Laubwald	45	39,9	17	2,2
Frankelbach	5	Nadelwald (Doug.)	30	44,1	10	86,9
Frankelbach	22	Nadelwald (Doug)	35	35,2	11	42,8
Frankelbach	23	Alter Nadelwald	50	37,3	10	3,8

* Die Berechnungsdauer variiert aufgrund verschiedener Reaktionsgeschwindigkeiten der Fläche und weil nach Einstellen eines konstanten Abflusses ab einer Zeitdauer von 30 min der Versuch als vollständig angesehen werden kann.

** Die Berechnungsintensität variiert um den Wert 40 l/m²/h, da hier die exakte Menge des simulierten Niederschlages durch Vor- und Nachkalibrierung des Systems erfasst wird.

¹⁷ Zweitrockenster Frühling seit Beginn der Wetteraufzeichnungen vor 130 Jahren (<http://www.dwd.de>).

5.1.1.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen

Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen

Auf Grundlage der im Gelände durchgeführten Untersuchungen (Infiltrationen und Beregnungsversuche) sowie den Ergebnissen der bodenphysikalischen Erhebungen wurde die Klassifizierung der DRP auf den Test-Plots des Untersuchungsgebietes Frankelbach (Tab. 5.4) vorgenommen. Da diese Tabelle die Resultate aller Klassifizierungsansätze enthält, erscheint sie anschließend an die schriftlichen Ausführungen.

Die Standorte FRA-1 und FRA-7 wurden aufgrund der großen Bodenmächtigkeit, des hohen Grobbodengehaltes sowie den Ergebnissen der Infiltrationen und Beregnungsversuche (Plot- und Punkt-Skala) mit dem Prozess dSSF charakterisiert. Verzögerter Zwischenabfluss (SSF2) wird für die Test-Plots FRA-3, FRA-4 und FRA-5 als dominierend erachtet. Diese stellen hinsichtlich des Abflussverhaltens typische bewaldete Mittelgebirgsstandorte dar. Im Falle des Douglasien-Standortes (FRA-4) wird neben dem SSF2, bei zuvor trockenen Bedingungen, in gleicher Weise HOF1 als dominierender Prozess generiert. Die 30-jährige Aufforstung wurde mit SSF1 und SOF2 bewertet. Diese schnellen oder nur leicht verzögerten Abflussprozesse sind eher untypisch für Forststandorte und weisen daher deutlich auf die vorherige langjährige Ackernutzung hin. Der Klassifizierung des Ackerstandortes (FRA-6) resultiert in der Ausweisung der hauptsächlichen Abflussreaktion HOF2. Grundlegend für dieses Ergebnis ist die Verschlammungsneigung dieses Plots.

Prozessbeurteilungsschemata PBS

Die Identifizierung der dominanten Abflussprozesse, basierend auf dem Kartierschlüssel nach SCHERRER (2006), wurde ebenfalls an jeder Profilgrube der einzelnen Untersuchungsstandorte durchgeführt. Für die bewaldeten Flächen wurde das PBS für Wald (Anhang Abb. A4) angewandt (keine Unterscheidungsmöglichkeit nach Niederschlagsintensität). Auf der Ackerfläche kam das PBS für landwirtschaftliche Flächen bei extensiven aber langen Niederschlägen sowie für intensive kurze Niederschläge zum Einsatz (Anhang Abb. A5 und Abb. A6). Tab. 5.3 zeigt beispielhaft für den Standort FRA-2 (30-jährige Aufforstung) welcher Entscheidungsweg nachverfolgt wurde und welchen dominierenden Abflussprozess man demnach erarbeitete.

Die Abflussprozessidentifikationen nach PBS aller Untersuchungsstandorte des Testgebietes Frankelbach sind in Tab. 5.4 zu finden. Wie dieser Tabelle zu entnehmen ist, resultiert die

Abflussprozessidentifikation nach SCHERRER (2006) für alle Waldstandorte des Frankelbachs in verzögertem Zwischenabfluss (SSF2). Das bedeutet, dass auf den Plots nicht nur der Abflussprozess als solcher, sondern auch die Reaktionsgeschwindigkeit des Abflusses als ähnlich charakterisiert wird. Abweichend von diesem Ergebnis zeigt sich der ausgewiesene HOF2-Prozess der Ackerfläche. Die unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten (extensiv, lang oder intensiv, kurz) haben bezogen auf den Abflussprozess jedoch keine Auswirkungen.

Tab. 5.3: Anwendung des PBS (Wald) für den Standort FRA-2 (30-jährige Aufforstung)*

Kriterium / Frage im PBS	Antwort	Bodenbereich
Kriterien für HOF erfüllt (siehe PBS)?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >3 % ?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Boden mit Vergleichungsmerkmalen?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >5 % ?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Wasserspeicher oberflächennah?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Vergleichungsmerkmale oberflächennah?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Laterale Fließwege?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >10 % ?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Ergebnis: SSF2 (Subsurface Flow)		

* zum Vergleich siehe auch Anhang Abb. A4

Digitale Abflussprozesskarte GIS-DRP

Auf Grundlage des von MÜLLER et al. (2009) entwickelten GIS-DRP-Tools, und unter Verwendung der für den Untersuchungsraum verfügbaren Geo-Daten wurde die Abflussprozesskarte für das Einzugsgebiet Frankelbach erstellt (Abb. 5.11).

Als Grundlagen-Daten dienten ein Digitales Geländemodell (DGM) in 5 m-Auflösung, die digitale Geologische Karte (1:200.000) sowie die digitale Landnutzungsinformation aus dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS).

Jedem der sieben Standorte wurde durch die GIS-DRP-Klassifikation der dominierende Abflussprozess SSF2 zugeordnet (Tab. 5.4). Die Karte wird insgesamt von grünen Farbtönen dominiert, welche die Zwischenabflussprozesse der verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten repräsentieren. Der weitaus größte Flächenanteil (77,7 %) entfällt dabei auf den Abflussprozess SSF2 (Tab. 5.5) gefolgt von SSF1 (16,1 %). Charakteristisch sind die SOF1-Flächen (2,9 %, rot), die sich im Bereich des Gerinnes befinden und dort, je nach Neigung der umgebenden Flächen, unterschiedlich breite Buffer (also sehr schnell

aufsättigende Flächen im Auenbereich) bilden. Der Abflussprozess HOF1 wird in der generierten Karte lediglich auf den Siedlungsflächen im Nordosten des Einzugsgebietes ausgewiesen (1,7 %). Die übrigen Abflussprozesse sind nur in unbedeutendem Maße im Testgebiet vertreten; meist an den kulminierten Randbereichen des Einzugsgebietes.

Tab. 5.4: Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Frankelbach)

Plot	GIS-DRP	PBS (Scherrer)	DRP (Gelände)¹
FRA-1 (1-jährige Aufforstung)	SSF2	SSF2	dSSF
FRA-2 (30-jährige Aufforstung)	SSF2	SSF2	SSF1/SOF2
FRA-3 (Alter Laubwald)	SSF2	SSF2	SSF2
FRA-4 (Douglasie)	SSF2	SSF2	SSF2/HOF1
FRA-5 (Alter Nadelwald)	SSF2	SSF2	SSF2
FRA-6 (Acker)	SSF2	HOF2/HOF2 ²	HOF2
FRA-7 (Schneise)	SSF2	SSF2	dSSF

¹ Geländeergebnisse basierend auf den Resultaten der Berechnungsversuche sowie den Untersuchungen zur Bodenphysik und Infiltration.

² Anwendung beider PBS für Acker (extensive und intensive Niederschläge; Anhang Abb. A5 und Abb. A6)

Tab. 5.5: Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse nach GIS-DRP (Frankelbach)

DRP	Flächenanteil [%]
HOF1	1,7
SOF1	2,9
SOF2	0,4
SOF3	0,2
SSF1	16,8
SSF2	77,7
SSF3	0,08
Error*	0,16

* Error: Nicht erklärte Flächenanteile, die aus Fehlern in den Grundlagendaten resultieren.

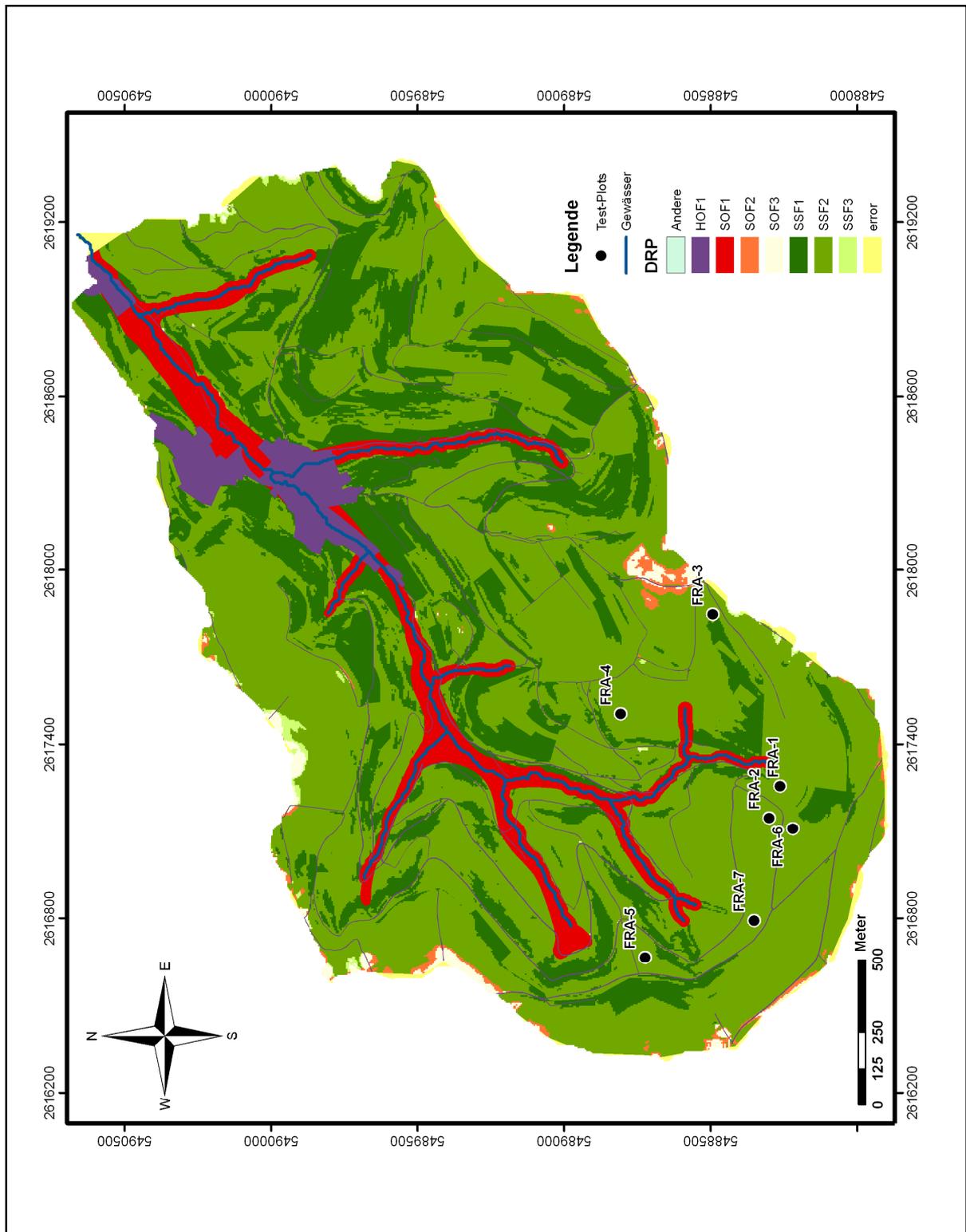


Abb. 5.11: GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Frankelbach

5.1.2 Holzbach

5.1.2.1 Labor- und Geländeuntersuchungen

Bodenphysikalische Eigenschaften

Die Böden der Untersuchungsstandorte im Einzugsgebiet Holzbach präsentierten sich was Struktur, Textur sowie Entwicklungsgrad betrifft, insgesamt homogener als jene des Frankelbachs. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine repräsentative Auswahl von Standorten zur detaillierteren Beschreibung der bodenphysikalischen Bedingungen verwendet (HOL-1, HOL-3, HOL-4, HOL-6). Die aus periglazialen Deckschichten über Quarzit-Schutt entstandenen Braunerden (teilweise pseudovergleyt) bis Podsole haben unter Laub- als auch unter Nadelwald sehr locker gelagerte Oberböden. Die Trockenrohdichten der Ah- und Ah-Bv-Horizonte variieren zwischen $0,85 \text{ g cm}^{-3}$ und $1,17 \text{ g cm}^{-3}$ (Abb. 5.12). Die lockere Lagerung hat im Umkehrschluss hohe bis sehr hohe Gesamtporenvolumina (Abb. 5.13) zur Folge. Mit der Tiefe nimmt dieses typischerweise ab (siehe Tab. A6 des Anhangs).

Die Luftkapazität (Abb. 5.14) hat am GPV einen Anteil von durchschnittlich 15 – 20 Vol.-% was nach AD-HOC-AG BODEN (2005) als hoch eingestuft werden kann. Lediglich im Profil des Standortes HOL-1 kann im Oberboden ein geringerer Anteil an weiten Grobporen festgestellt werden. Demzufolge wird den Oberböden des Untersuchungsgebietes Holzbach eine gute Perkulationswirkung attestiert.

Auch die Dichten der mittleren Profilbereiche (Bv-, Sw-Bv- und Bv-Sw-Horizonte) liegen mit Werten zwischen $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ und $1,33 \text{ g cm}^{-3}$ nach AD-HOC-AG BODEN (2005) im sehr geringen bis geringen Bereich. Nur an den Profilen HOL-3 (Buche, unterer Mittelhang) und HOL-6 (Fichte, Oberhang) wurden mit $1,49 \text{ g cm}^{-3}$ und $1,52 \text{ g cm}^{-3}$ mittlere Dichtewerte erfasst. Trotzdem sinken in diesem Profilbereich, verglichen zu den Oberböden, die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeiten ab (k_f ; Abb. 5.15). Dies kann zum einen durch die pedogene Eigenverdichtung und zum anderen durch die mit Lösslehm versehene, dichtere Matrix (Hauptlage) erklärt werden. Die Perkolation in diesen Profilbereichen wird dementsprechend als geringer, jedoch noch immer als gut bewertet.

Im tieferen Unterboden vergrößern sich die Dichtedifferenzen aufgrund unterschiedlicher Gründigkeiten der Profile sowie variierenden Grobbodenanteilen¹⁸ der C-Horizonte. Die Leitfähigkeitswerte steigen hier zum Teil wieder deutlich an (HOL-1, HOL-4). Dies liegt vorwiegend an den schon erwähnten hohen Grobbodengehalten der vorhandenen Basislage.

¹⁸ Der Anteil an Grobboden (Bodenpartikel $>2 \text{ mm}$ wie z. B. Gesteinsbruchstücke) verhinderte an den entsprechenden Profilen eine repräsentative ungestörte Probennahme in den C-Horizonten.

Nach SCHERRER (1997) werden solche periglazialen Solifluktionssedimente zu den bevorzugten Fließfaden gerechnet, was die höheren Leitfähigkeiten erklärt.

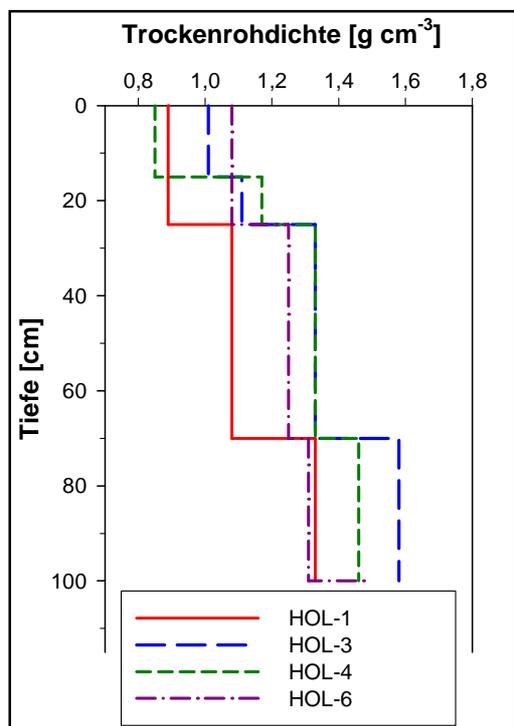


Abb. 5.12: Trockenrohichte Holzbach (Auswahl)

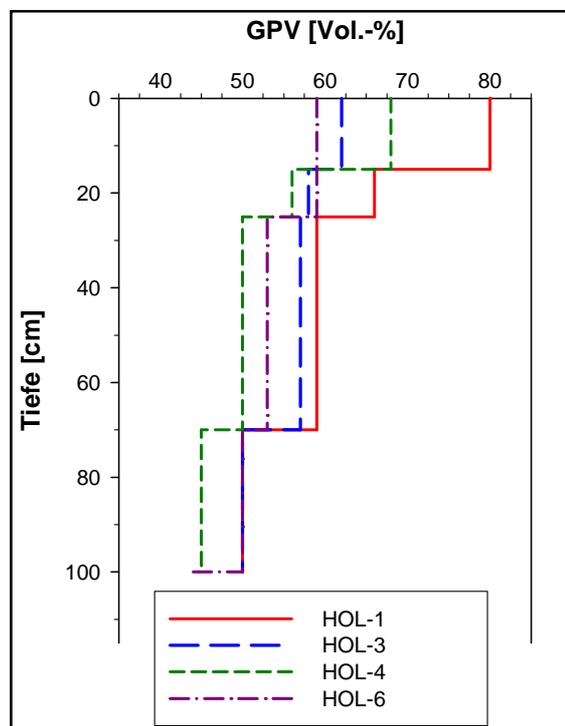


Abb. 5.13: Gesamtporenvolumen Holzbach (Auswahl)

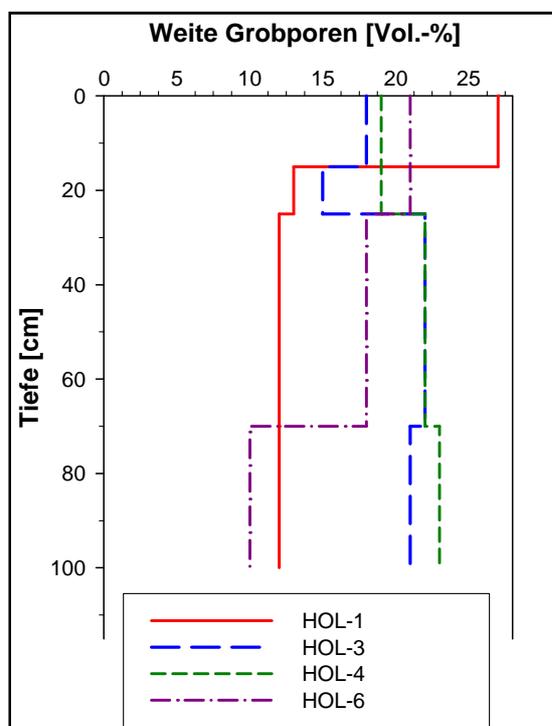


Abb. 5.14: Weite Grobporen Holzbach (Auswahl)

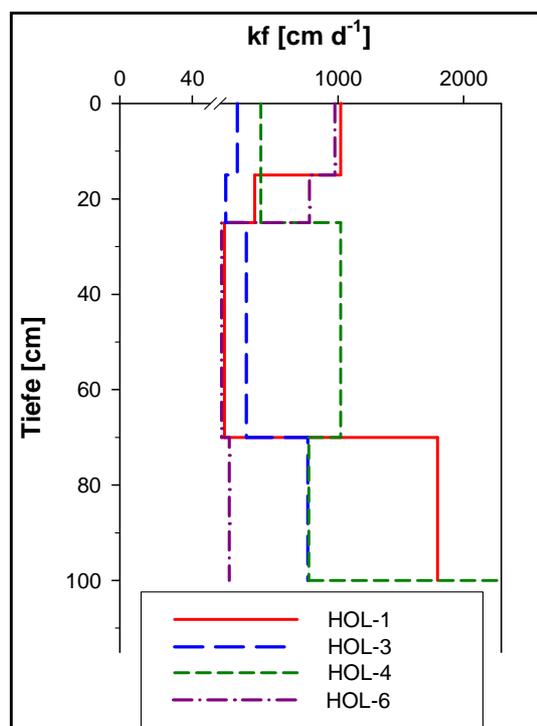


Abb. 5.15: ges. Wasserleitfähigkeit Holzbach (Auswahl)

Im Vergleich zu Basislagen aus Schieferverwitterung mit eingeregelter flachen Gesteinsbruchstücken scheinen jene aus Quarzit-Verwitterung weniger undurchlässig zu sein. Hier kommt es vielmehr zur Etablierung von Rissen und Spalten, die die Luft und das Wasser weiter in den tieferen Unterboden ableiten. Präferentielle Fließpfade entstehen hier hauptsächlich an den Grenzschichten Matrix/Gesteinsbruchstücke. Die für solifluidal umgelagerte Deckschichten typischen dichtlagernden Horizonte wurden im Holzbach nur in tieferen Bereichen des Bodenprofils angesprochen. Die hier als Staukörper fungierenden, verlehmtten Saprolithe werden in gleicher Weise von CHIFFLARD et al. (2008) für die süddeutschen Mittelgebirge beschrieben.

Infiltrationen

Die ermittelten Endinfiltrationsraten der Test-Plots im Einzugsgebiet Holzbach (Abb. 5.16) sind nach WOHLRAB et al. (1992) in der Mehrheit der Fälle (vier von sechs) als „sehr hoch“ einzustufen. Hierbei überschreiten die Standorte HOL-1, HOL-4 und HOL-6 den durch WOHLRAB et al. (1992) definierten Maximalwert von 600 cm d^{-1} bei weitem. Der Mittelwert aller Messungen beträgt 771 cm d^{-1} (siehe Abb. 5.16). Die Standardabweichungen sind ebenfalls hoch, was jedoch durch die hohe Variabilität der einzelnen Infiltrationsexperimente an einem Standort erklärt werden kann. So ist die Infiltrationsleistung z. B. stark unterschiedlich, wenn sich im Bereich der Infiltrationsfläche mehrere offene Wurzelbahnen befinden, welche das Wasser schnell in tiefere Profilbereiche weiterleiten, wohingegen beim nebenliegenden Experiment in einigen Metern Entfernung keine freien Wurzelbahnen als präferentielle Fließpfade wirksam sind. Nach ANDERSON & WEILER (2005) bilden sich bevorzugte Fließpfade vor allem über Röhren und Makroporen an der Schnittstelle organischer Boden/Mineralboden mit direktem Anschluss an die organischen Auflagen. Dies war im Einzugsgebiet Holzbach gut nachvollziehbar. Weitere Gründe für die sehr hohen Infiltrationsraten stellen, ähnlich den Ergebnissen des Einzugsgebietes Frankelbach, die geringen Oberbodendichten sowie die große spezifische Oberfläche der Humusaufgaben dar.

An den Standorten HOL-2 und HOL-3 wurden geringere, jedoch immer noch als „hoch“ zu klassifizierende Endinfiltrationsraten nachgewiesen. Ein Grund hierfür ist vor allem die mächtiger ausgebildete Hauptlage, welche das Wasser bedingt durch die feiner texturierte Matrix weniger schnell ableitet.

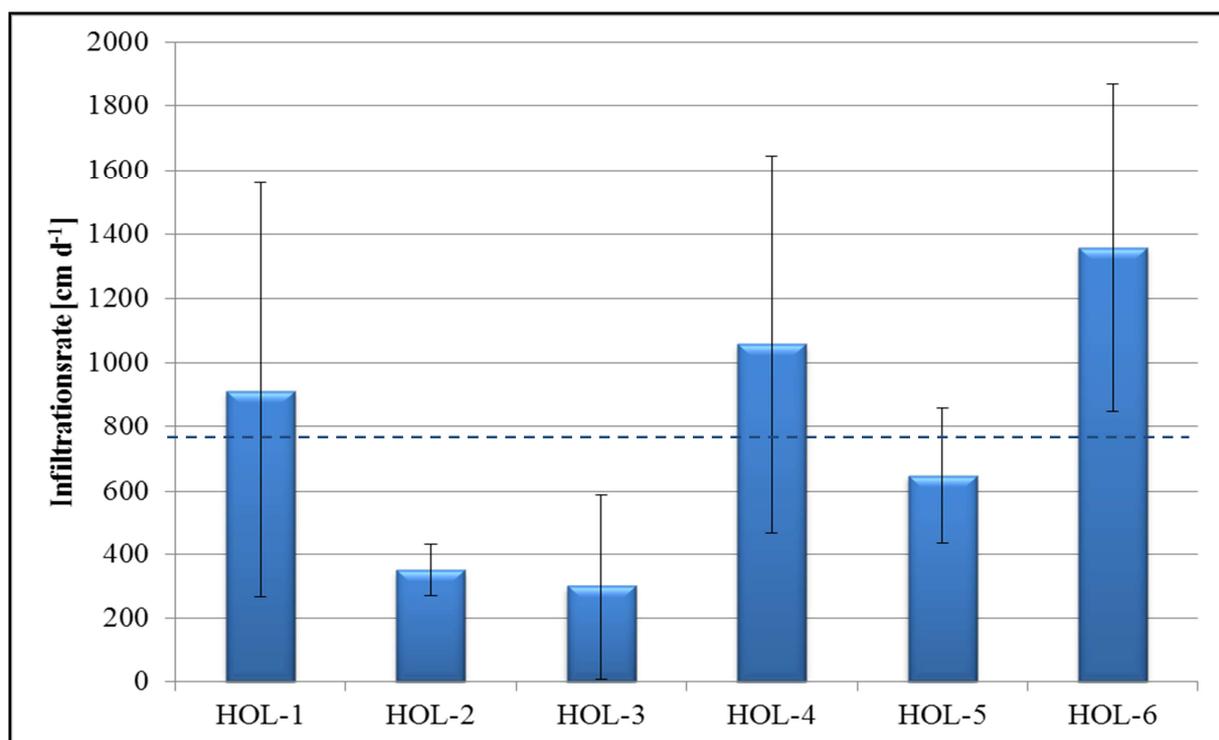


Abb. 5.16: Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Holzbach

Abfluss auf Plot-Skala

Die Beregnungsversuche im Untersuchungsgebiet Holzbach erfolgten von April bis Mai 2009. Nach einem strengen Winter mit lang andauernder Schneebedeckung bis in den März hinein waren die Böden des Testgebietes feucht, jedoch nicht mit Wasser gesättigt. Daher führte das Beregnungswasser des ersten Tages (ähnlich den Versuchen im Frankelbach) kaum zu Abfluss, sondern eher zur restlichen Aufsättigung des Bodens. Leider war es nicht möglich eine Großberegnung an Standort HOL-4 (Fichte, unterer Mittelhang) durchzuführen, da die Profilgrube zu grobbodenhaltig und instabil war, um Abflussauffangbleche zu installieren. Ohne diese ist eine Quantifizierung des produzierten Abflusses allerdings nicht möglich und eine Beregnung daher nicht sinnvoll.

Insgesamt wurde auf keiner der Beregnungsflächen, weder unter Laub- noch unter Nadelwald, Oberflächenabfluss nachgewiesen (Tab. 5.9; Abb. 5.17; Abb. 5.18). Die organischen Auflagehorizonte waren durchfeuchtet und dementsprechend hydrophil, was die Infiltration begünstigte. Zusätzlich leiteten die schon erwähnten, locker gelagerten Oberböden des Untersuchungsgebietes das Beregnungswasser schnell in tiefere Bereiche, was bereits durch die Infiltrationsversuche deutlich wurde.

Für das Untersuchungsgebiet Holzbach muss festgestellt werden, dass insgesamt nur sehr geringe Abflussmengen und folglich geringe Abflusskoeffizienten (0 % bis 3,7 %) erfasst wurden (Tab. 5.6). Dies ist erstaunlich, da basierend auf der forstlichen Standortaufnahme der Landesforsten RLP für den vorliegenden Naturraum dichte, eine tiefere Perkolation verhindernde Basislagen vermutet wurden (HÜMANN et al., 2011), die laterale Fließbewegungen durch den Boden und damit größere Mengen von Zwischenabfluss begünstigen sollten.

Tab. 5.6: Abflusscharakteristika der Test-Plots im Einzugsgebiet Holzbach während der Großberegnungen

Test Plots	Abfluss- koeffizient	Σ Abfluss während tägl. Beregnungsintervallen (40 mm/Tag)		
		1.Tag [Σ mm]	2.Tag [Σ mm]	3.Tag [Σ mm]
HOL-1: Buche, Oberhang	1.9	-	1.7	2.4
HOL-2: Buche, oberer Mittelhang	3.7	0.2	4.0	4.1
HOL-3: Buche, unterer Mittelhang	0.2	-	0.1	0.4
HOL-5: Fichte, oberer Mittelhang	-	-	-	-
HOL-6: Fichte, Oberhang	0.6	0.2	0.6	0.9

Abb. 5.18 zeigt in diesem Kontext bestätigend, dass durch die Beregnungen auf Plot-Skala ausschließlich Zwischenabflussprozesse im Einzugsgebiet Holzbach generiert und aufgefangen wurden; wenn auch nur in geringen Mengen. Als dominierende Abflussprozesse wurden daher verzögerter Zwischenabfluss (SSF2/SSF3) und tiefer Zwischenabfluss (dSSF) klassifiziert. Wenn das beregnete Wasser abflusswirksam wurde, so geschah dies sehr direkt nach Beginn des Versuchs ohne lange zeitliche Verzögerung (Ereigniswasser). Diese Ergebnisse stützen, wie am Standort FRA-2 des Testgebietes Frankelbach, die Aussage KIENZLERS (2007), dass schnell reagierender Zwischenabfluss auftritt, wenn das Niederschlagswasser direkten Anschluss an präferentielle Fließpfade hat. Bevorzugte Fließpfade, generiert durch Wurzelaktivität oder Gesteinsbruchstücke in der Bodenmatrix, wurden an fast allen Profilgruben des Untersuchungsgebietes festgestellt. Teilweise waren sie sogar als hauptsächliche Quelle an der Abflussgenerierung beteiligt (HOL-2, HOL-6).

Ebenfalls auf präferentielle Fließpfade führten SCHNEIDER et al. (2001) Zwischenabflussprozesse am Übergang zwischen Haupt- und Basislage zurück. Da dieser Übergang zum dichtlagernden Saprolith im Untersuchungsgebiet Holzbach zum Teil erst in größeren Profiltiefen nachgewiesen wurde, war besagte Grenzfläche für die gemessenen Abflüsse nur

in geringem Maße verantwortlich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der größte, nicht wieder aufgefangene Teil des berechneten Wassers auf diesen tiefer liegenden Schichten lateral zum Abfluss kam (dSSF).

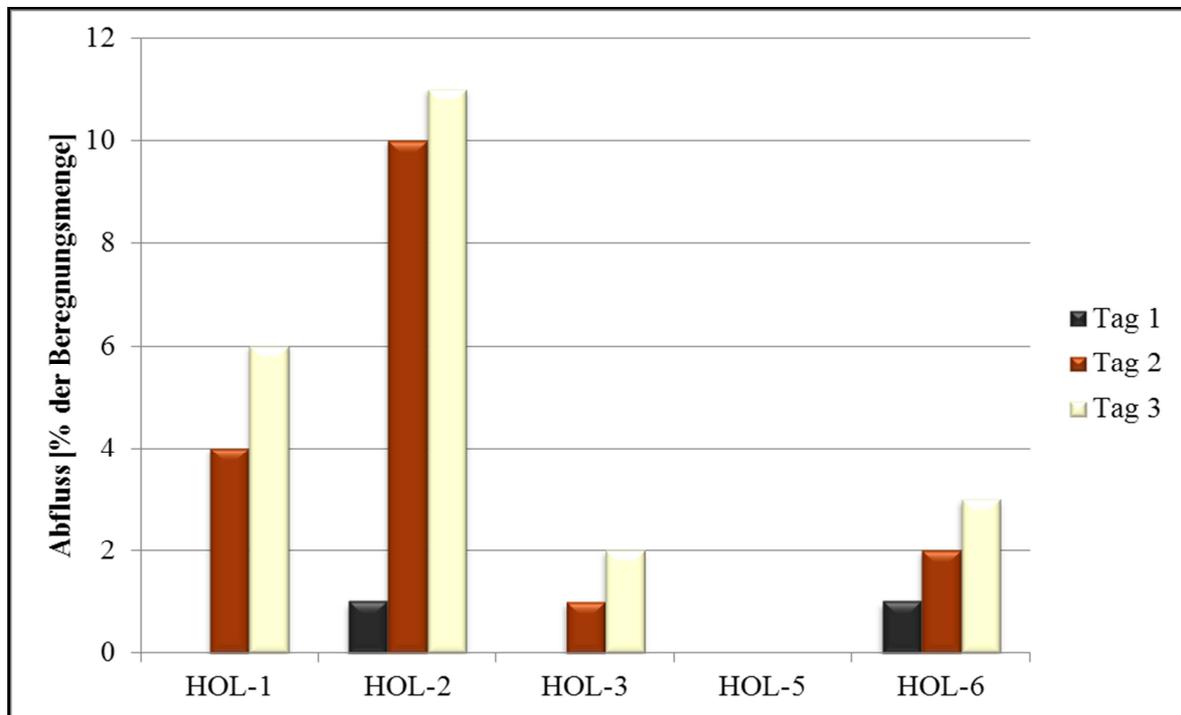


Abb. 5.17: Prozentualer täglicher Abfluss der Standorte Holzbach

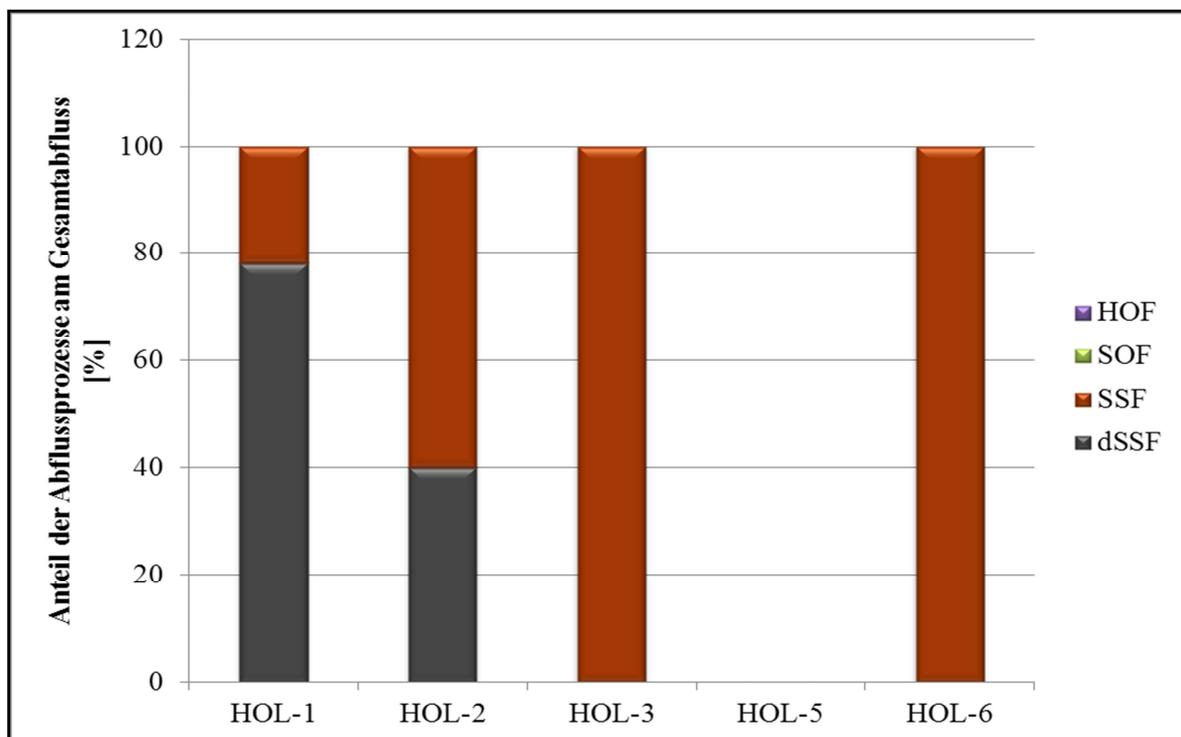


Abb. 5.18: Anteil der Abflussprozesse am Gesamtabfluss der Standorte Holzbach

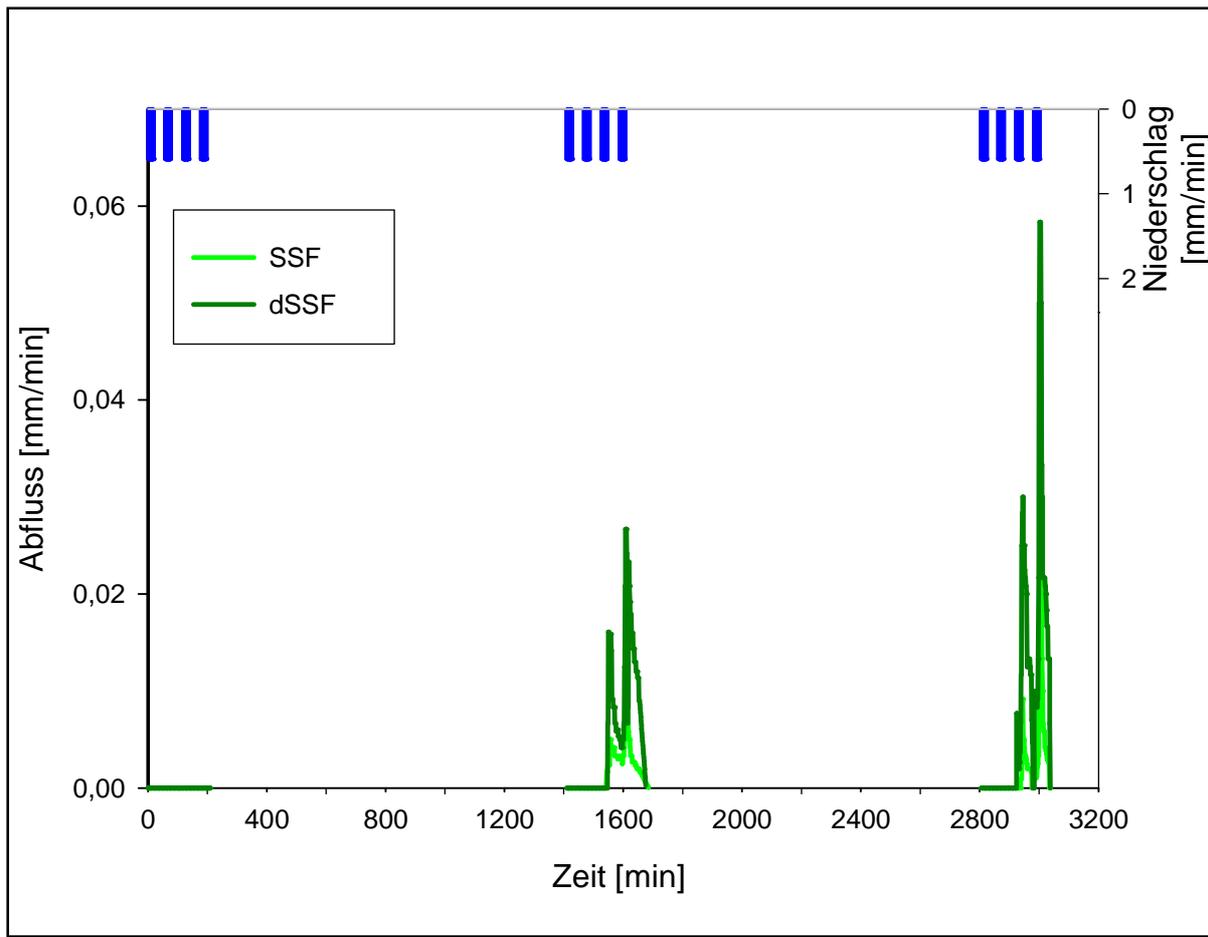


Abb. 5.19: Abflussverhalten am Standort HOL-1 (Buche, Oberhang)

Der Großteil des Abflusses der Beregnung an Standort HOL-1 wurde als dSSF, also tiefer Zwischenabfluss, gemessen (Abb. 5.19). Der Beginn des Abflusses wurde nur zehn bis 12 Minuten nach Anlauf der Beregnung, unterhalb der etablierten Sammelblech in die Grube fließend, ermittelt. Die zeitlich kaum verzögerte Reaktion des lateralen Wasserflusses ist verglichen zu Bodenmatrixflüssen oder gemessenen gesättigten Wasserleitfähigkeiten wesentlich schneller. Typische Fließgeschwindigkeiten des Matrixflusses liegen nach DINGMAN (2002) lediglich im Bereich von wenigen Zentimetern pro Stunde. Hinsichtlich der Größe des Beregnungsplots mit einer Gesamtlänge von zehn Metern hätte eine Matrixflussreaktion demnach deutlich länger gedauert. Aufgrund dessen kann die Präsenz von präferentiellen Fließpfaden, welche das infiltrierte Wasser schneller durch den Bodenkörper leiten, bestätigt werden. Hervorgerufen wurden die bevorzugten Fließwege dieses Bodenprofils hauptsächlich durch eine mittlere bis starke Wurzelaktivität im Oberboden und durchmischte Grobbodenabteile im Unterboden.

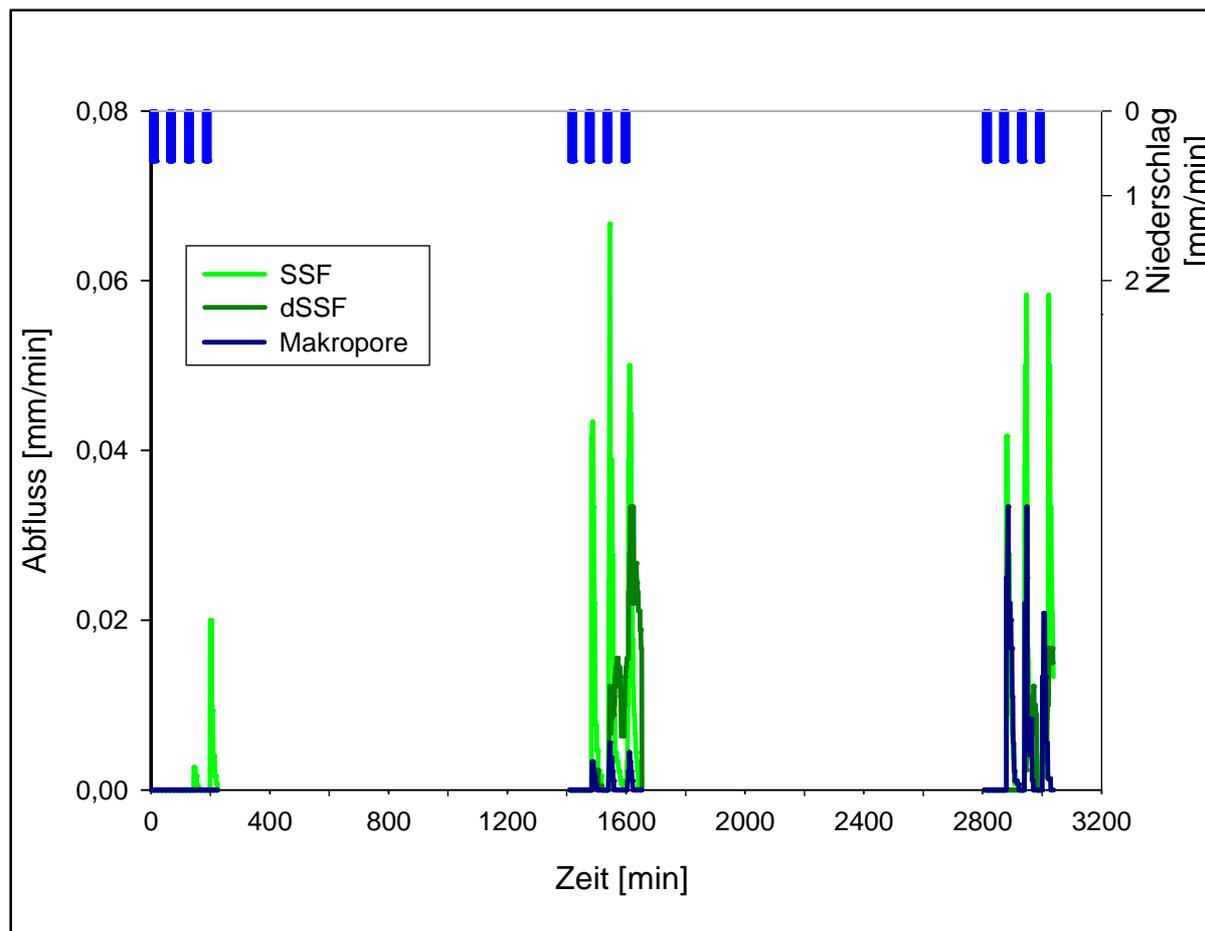


Abb. 5.20: Abflussverhalten am Standort HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang)

Der Abflusskoeffizient des Standortes HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang) betrug 3,7 % (Tab. 5.6). Speziell bei dieser Abflussmessung trug der präferentielle Fluss (Abb. 5.20), der vornehmlich durch eine große Makropore (ca. 5-7 cm Durchmesser) in der Profilwand aus dem Boden austrat, zum Gesamtabfluss bei. Makroporen dieser Größe sind hervorragende Wasserleitbahnen, die durch abgestorbene alte Wurzeln oder durch die Aktivität von Mega-Fauna (Wühl- und Grabgänge bzw. Röhren) entstehen können (z. B. BLUME et al. 2010).

Die Standorte HOL-3 (Buche, unterer Mittelhang) und HOL-5 (Fichte, oberer Mittelhang) generierten mit 0,2 % bzw. 0% Abflusskoeffizient so gut wie keinen Abfluss (Anhang Abb. A11 und Abb. A12). Selbst mit Beregnung der knapp doppelten Menge am dritten Beregnungstag im Falle von HOL-5 konnte kein Abfluss erzeugt werden. So bleibt zu vermuten, dass ein gewisser Teil des Wassers in der Fläche gespeichert wurde, wohingegen der größere Teil durch ein gut entwickeltes Makroporensystem in tiefere Horizonte perkolieren konnte (nicht quantifizierbarer dSSF).

Standort HOL-6 (Fichte, Oberhang) wurde mit 30 % zusätzlichem Beregnungswasser über die gesamte Versuchsdauer beregnet. Die gemessene Abflussreaktion (Abb. 5.21) war trotzdem

vergleichsweise gering. Ähnlich dem Standort HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang) war es eine große Makropore, die maßgeblich zum Abflussgeschehen beitrug, aber nicht separat erfasst werden konnte.

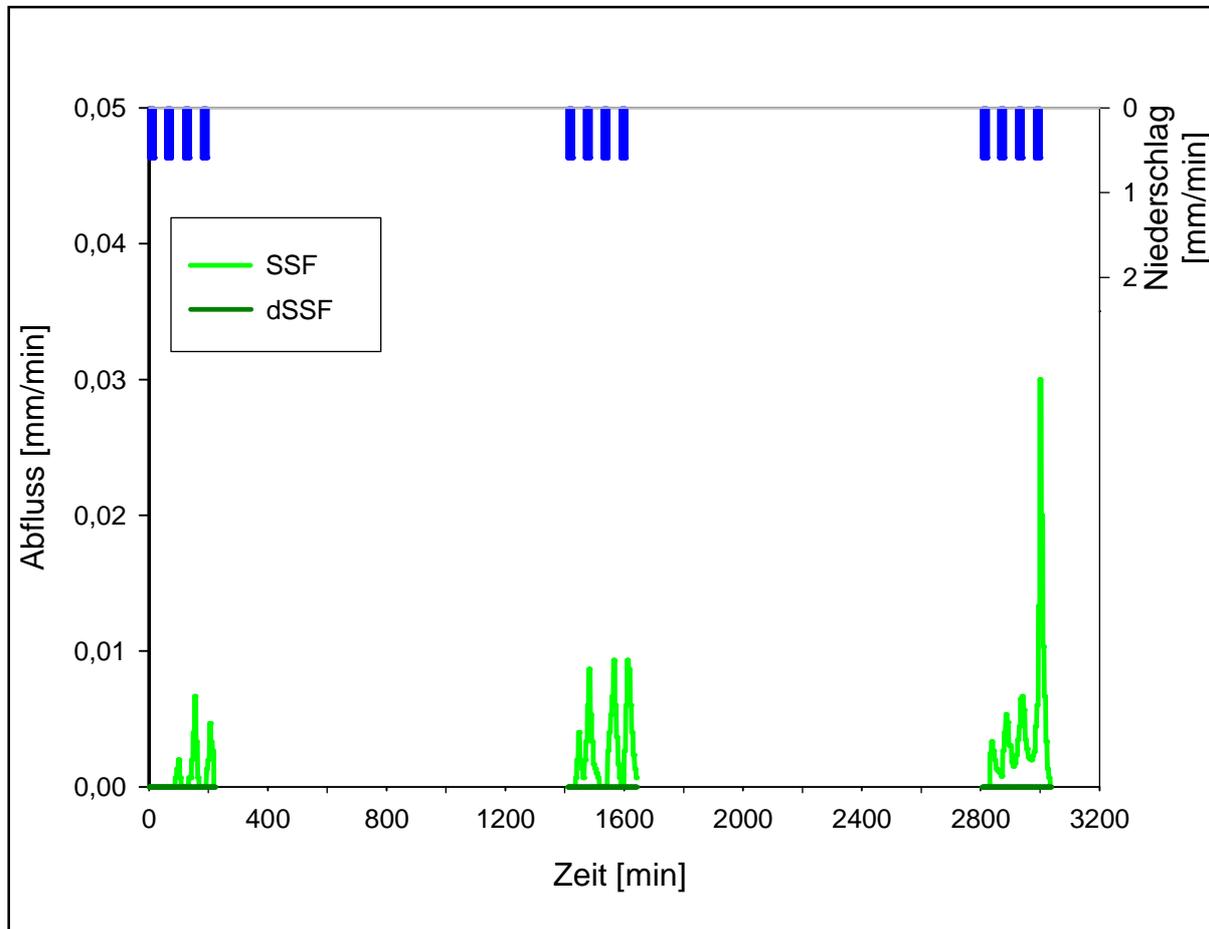


Abb. 5.21: Abflussverhalten am Standort HOL-6 (Fichte, Oberhang)

Abfluss auf Punkt-Skala

Auch im ForeStClim-Testgebiet Holzbach arbeiteten Mitarbeiter des Faches Physische Geographie (Uni Trier) mit der mobilen Kleinberechnungsanlage zur näheren Untersuchung der Oberflächeneigenschaften von Forststandorten. Im feuchten Frühjahr 2009 wurden lediglich fünf kleinflächige Berechnungen durchgeführt, da diese keinen Oberflächenabfluss lieferten. Dieses Ergebnis korreliert gut mit den Ergebnissen der Großberechnungen zum gleichen Zeitpunkt und Kleinberechnungen weiterer Studien (u. a. PETER, 2011).

Als Ergänzung wurden zusätzlich 17 punktskalige Berechnungsexperimente im Sommer 2009 (August) durch ein Forschungspraktikum der Physischen Geographie realisiert; davon vier direkt auf forstlichen Rückegassen zur Erfassung des anthropogenen Einflusses auf die

Abflussgenerierung. Tab. 5.7 zeigt eine Auswahl an Resultaten; die komplette Ergebnisaufstellung findet sich in Tab. A13 des Anhangs.

Tab. 5.7: Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Holzbach (Quelle: FP Physische Geographie, Universität Trier)

Untersuchungsgebiet	ID	Landnutzung	Berechnungsdauer [min]	Berechnungsintensität [l/m ² /h]	Hangneigung [°]	Abflusskoeffizient [%]
Holzbach	25	Laubwald (Buche)	60	39,4	4	2,5
Holzbach	26	Laubwald (Buche)	60	40,9	5	8,9
Holzbach	31	Nadelwald (Fichte)	60	40,3	4	38,7
Holzbach	32	Nadelwald (Fichte)	60	38,8	5	10,3
Holzbach	35	Nadelwald (Fichte, Gras)	60	40,7	6	-
Holzbach	36	Nadelwald (Fichte, Gras)	60	39,9	4	-
Holzbach	38	Rückegasse	60	40,7	6	71,9
Holzbach	40	Rückegasse	30	40,2	3,5	97,1

Die ermittelten Abflusskoeffizienten der Sommer-Berechnungen zeigen eine deutliche Abfolge. Nadelwaldstandorte mit Grasunterwuchs (ID 35 und 36) generierten während einer 60-minütigen Berechnung trotz trockener Bedingungen keinen Oberflächenabfluss. Mit 2,5 % bis 8,9 % folgten die Standorte unter Buche. Fichtenbestandene Plots reagierten mit Abflusskoeffizienten zwischen 10,3 % und 38,7 % auf den künstlichen Regen; deutlich mehr als die Laubwaldstandorte. Diese Resultate ähneln stark den Studien von WEILER (2011) und HOLTHOF (2011), die ebenfalls hohe Abflusskoeffizienten während Kleinberechnungsexperimenten in trockenen Perioden, in anderen Einzugsgebieten, ermittelten. Sehr hohe Abflusskoeffizienten konnten auf den forstlichen Rückegassen ermittelt werden (56 % bis 99 %). Hierdurch wird die nachhaltige Veränderung der Bodenstruktur und der negativen Einfluss auf die Abflussgenerierung durch anthropogene Waldbewirtschaftung mit immer schwerer werdenden Forstmaschinen deutlich.

5.1.2.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen

Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen

Die Infiltrationsraten im Einzugsgebiet Holzbach wurden auf Basis der Infiltrationsexperimente als hoch bis sehr hoch klassifiziert. Zudem wurden nur geringe Abflusskoeffizienten durch die Beregnungsversuche generiert. Daher ist davon auszugehen, dass ein großer Teil des infiltrierenden Niederschlagswassers in tieferen Horizont, die durch die Versuche nicht direkt erfasst wurden, versickerte. Vermutet wird, dass das Wasser auf tiefer liegenden, dichten Schichten lateral zum Abfluss kam. Auf den sehr grobbodenhaltigen Braunerden aus lösslehmführenden Fließerden wurde deswegen auf vier von sechs Standorten (HOL-3 bis HOL-6) dSSF ausgewiesen. Die ersten beiden Test-Plots wurden aufgrund der Profilsprache und den Beregnungsergebnissen mit verzögertem Zwischenabfluss (SSF2) als dominierendem Prozess charakterisiert (Tab. 5.8).

Prozessbeurteilungsschemata PBS

Im Einzugsgebiet Holzbach kam zur Identifikation von dominanten Abflussprozessen an den Bodenprofilen der Beregnungsgruben nur das PBS für Wald zum Einsatz. Tab. 5.8 zeigt die Resultate der Ausweisung.

Das Wald-PBS beginnt bei dessen Bearbeitung mit vorentscheidenden Kriterien, die zur Bildung von HOF vorausgesetzt werden (siehe Wald-PBS Anhang Abb. A4). Aufgrund der feuchten Ausgangsbedingungen während der Untersuchungen wurden diese Kriterien auf den Test-Plots nicht erfüllt. Die weitere Bearbeitung des Entscheidungsbaumes führte in vier von sechs Fällen zur Ausweisung von verzögertem Zwischenabfluss (SSF2; HOL-3 bis HOL-6). Zweimal wurde stark verzögerter Zwischenabfluss ausgewiesen (SSF3; HOL-1, HOL-2).

Digitale Abflussprozesskarte GIS-DRP

Als Grundlagendaten zur Erstellung der GIS-DRP-Karte für das Einzugsgebiet Holzbach dienten ein Digitales Höhenmodell (DHM) mit 5 m-Auflösung, eine digitalisierte und georeferenzierte Geologische Karte sowie die Landnutzungsinformation des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS). Als zusätzliche Information, die von den LANDESFORSTEN RLP zur Verfügung gestellt wurde, ging die Lage der Hangbruch-Flächen in die Erstellung der Abflussprozesskarte mit ein (Abb. 5.22).

Generell wird die GIS-DRP-Karte des Holzbaches, ähnlich der Abflussprozesskarte des Einzugsgebietes Frankelbach, von grünen Farbtönen dominiert. Das bedeutet, dass im weitaus größten Teil des Testgebietes Zwischenabflussprozesse verschiedener Ausprägung zu erwarten sind (Tab. 5.9). Verzögerter Zwischenabfluss (SSF2) deckt hierbei den größten Teilbereich ab (75,7 %). So wurden auch alle Test-Plots mit diesem Prozess charakterisiert (Tab. 5.8). Ferner werden Flächen stark verzögerter Zwischenabflussprozesse (SSF3; 4,3 %) identifiziert. SOF1-Flächen (11,7 %; Flächen sofortiger Aufsättigung und anschließendem Oberflächenabfluss) liegen typischerweise im Bereich des Gerinnes. Die Hangbrücher im Nordwesten des Einzugsgebietes werden mit SOF2 beschrieben (4,6 %). Stark verzögerter Sättigungsflächenabfluss (SOF3; 1,5 %) wird in kleinen Arealen im Norden und Nordwesten erwartet. Anders als im Testgebiet Frankelbach wird im Holzbach auch DP, also Tiefensickerung, im Südosten (Nähe des Gebietsauslass; 1,2 %) ausgewiesen. Ausschlaggebend hierfür ist die geologische Datengrundlage, welche in diesem Teilbereich auf Sande und Kiese des jüngeren Diluviums verweist. Diese werden als permeabel klassifiziert und tragen folglich zur Tiefensickerung bei.

Tab. 5.8: Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Holzbach)

Plot	GIS-DRP	PBS (Scherrer)	DRP (Gelände)
HOL-1 (Buche, Oberhang)	SSF2	SSF3	SSF2
HOL-2 (Buche, oberer Mittelhang)	SSF2	SSF3	SSF2
HOL-3 (Buche, unterer Mittelhang)	SSF2	SSF2	dSSF
HOL-4 (Fichte, unterer Mittelhang)	SSF2	SSF2	dSSF
HOL-5 (Fichte, oberer Mittelhang)	SSF2	SSF2	dSSF
HOL-6 (Fichte, Oberhang)	SSF2	SSF2	dSSF

Tab. 5.9: Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse Holzbach

DRP	Flächenanteil [%]
SOF1	11,7
SOF2	4,6
SOF3	1,5
SSF1	1
SSF2	75,7
SSF3	4,3
DP	1,2

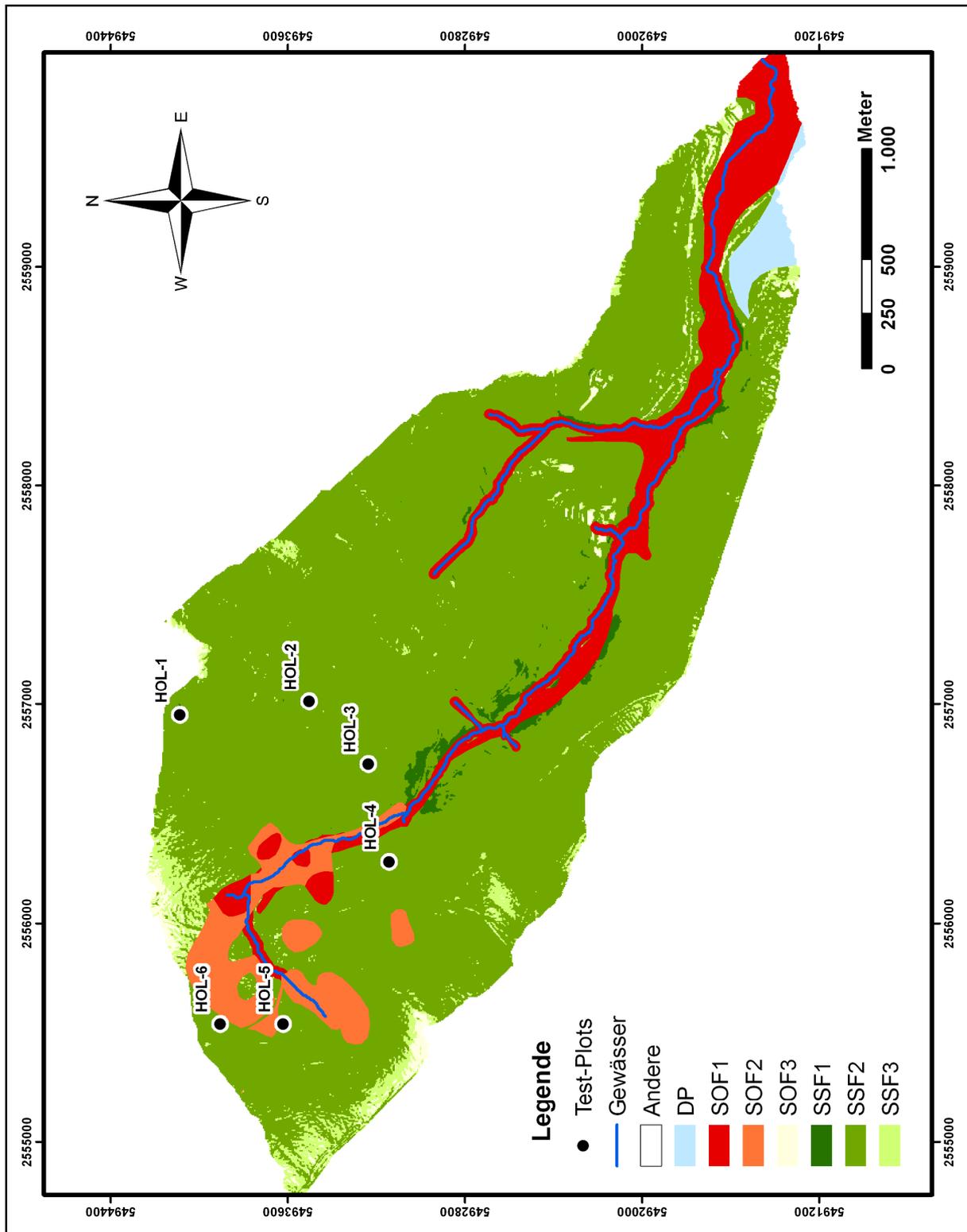


Abb. 5.22: GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Holzbach

5.1.3 Weierbach

5.1.3.1 Labor- und Geländeuntersuchungen

Bodenphysikalische Eigenschaften

Im Untersuchungsgebiet Weierbach wurden jeweils drei Profilgruben im ost-exponierten Laubwald sowie im west-exponierten Nadelwald ausgehoben und beprobt. Zwei zusätzliche Profile lagen nördlich im flachen Kulminationsbereich (Plateau) nahe der Wasserscheide. Aufgrund dieser Aufteilung nach Waldtyp bzw. Lage werden im Folgenden die Laubwald-Standorte zusammengefasst und mit den Nadelwald- und Plateau-Standorten verglichen.

Schon bei der ersten Geländebegehung, inklusive einer Bohrstock-Kartierung, wurde eine große Homogenität der Böden des Untersuchungsgebietes festgestellt. Auch eine lockere Lagerung des Bodens war durch das leichte Einschlagen des Pürckhauer-Bohrstocks eindeutig nachzuweisen. Daher wurden die meisten Böden im Rahmen der Kartierung als Locker-Braunerden angesprochen. Lediglich in den nördlichen Kulminationsbereichen sowie im direkten Einflussbereich der Aue wurden abweichende Bodentypen erfasst (Braunerde-Pseudogleye, Pseudogleye).

Die bodenphysikalischen Stechring-Untersuchungen an den Profilgruben bestätigten den ersten Eindruck von Bodenstruktur und -aufbau. Wie schon im Kapitel 3.3.1 angesprochen war der hohe Grobbodengehalt, resultierend aus einer ausgeprägten Fließerdendynamik, auffällig. Im Unterboden wurden Grobbodengehalte von 80 Gew.-% und mehr ermittelt (Anhang Abb. A3). Nach AD-HOC-AG BODEN (2005) können die Werte zwischen stark und extrem stark eingestuft werden. Eine ungestörte Probennahme im tieferen Unterboden wurde hierdurch in den meisten Fällen verhindert. Die ersten mineralischen Horizonte (Ah, Bv) wurden nichtsdestotrotz in einem üblichen Umfang beprobt, sodass die bodenphysikalischen Grundlagenparameter im Labor ermittelt werden konnten.

Abb. 5.23 zeigt, dass die Trockenrohdichten der Oberböden im Einzugsgebiet zwischen $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ und $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ liegen. Dies ist nicht ungewöhnlich, da nach SCHÄFFER (2002) der Anteil des nicht von Festsubstanz eingenommenen Porenraums bis über 70 % des Bodenvolumens betragen kann. Diese, nach AD-HOC-AG BODEN (2005) als sehr gering einzustufenden Dichtewerte untermauern die bodenkundlichen Profilsprachen, welche in einer Benennung der Böden als Locker-Braunerden mündete. Dies gilt jedoch nicht für die Plateau-Profile, die aufgrund von Hydromorphiemerkmalen im Unterboden als Pseudogley-

Braunerden angesprochen wurden. Selbst im Unterboden der Test-Plots wird eine mittlere Trockenrohddichte von $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ nicht überschritten.

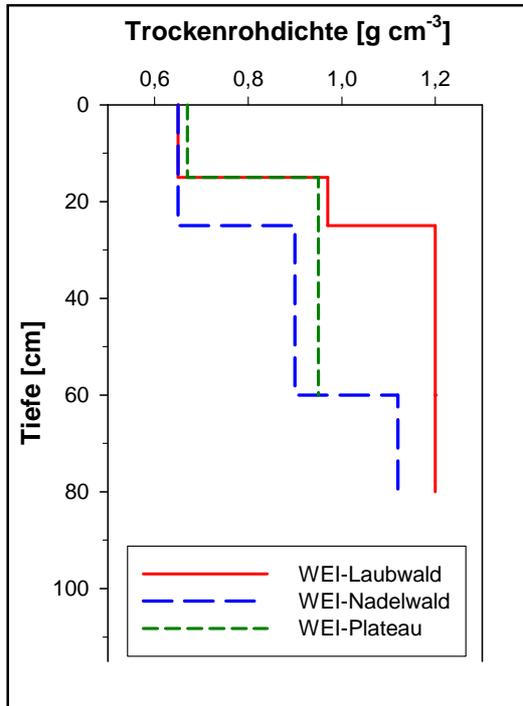


Abb. 5.23: Trockenrohddichte Weierbach

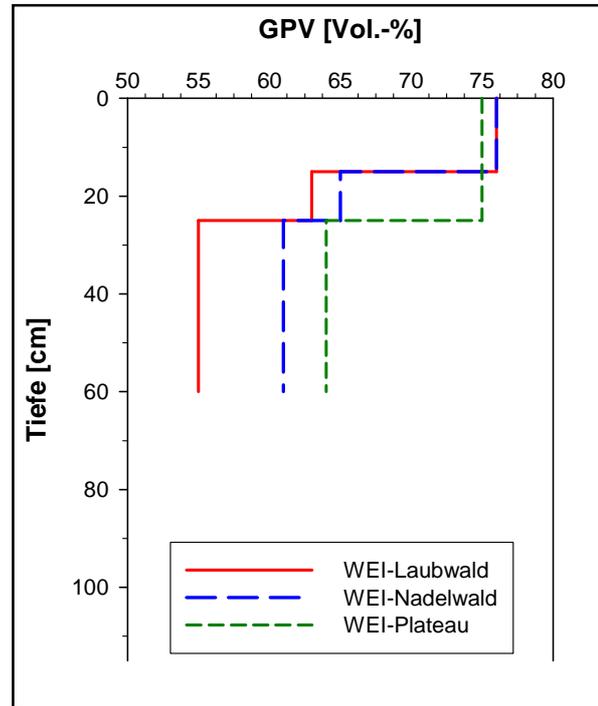


Abb. 5.24: Gesamtporenvolumen Weierbach

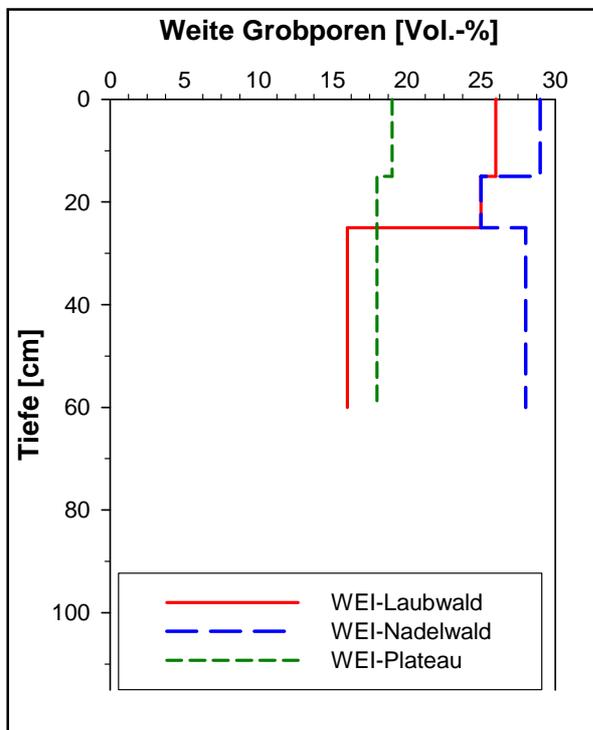


Abb. 5.25: Weite Grobporen Weierbach

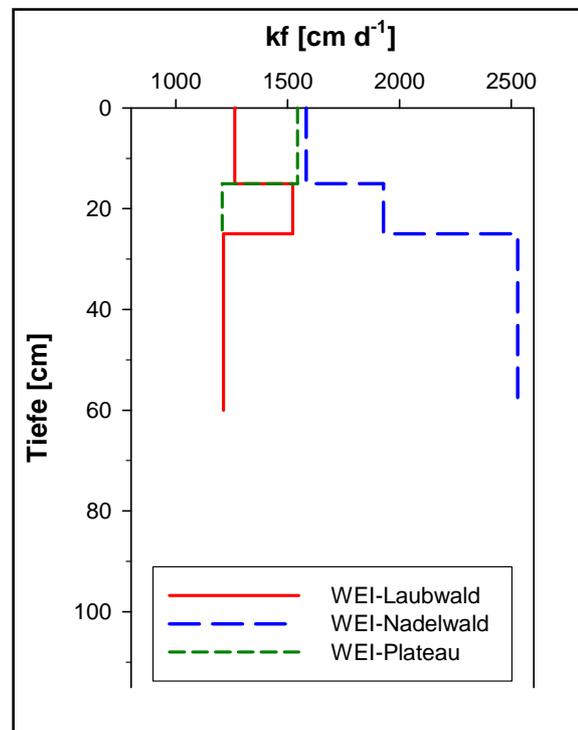


Abb. 5.26: ges. Wasserleitfähigkeit Weierbach

Die Gesamtporenvolumina (Abb. 5.24) der untersuchten Profile sind speziell in den Oberböden sehr hoch und hängen direkt mit den geringen Trockenrohdichten zusammen. In tieferen Schichten nimmt das GPV aufgrund des Eigengewichtes und der damit verbundenen pedogenen Verdichtung leicht ab, kann aber immer noch als sehr hoch eingestuft werden.

Wiederum wichtig für die Abflussgenerierung ist der Anteil weiter Grobporen ($>50\ \mu\text{m}$) am GPV (Abb. 5.25). Die Luftkapazitäten der Laub- und Nadelwaldstandorte sind bis zu einer Profiltiefe von 30 cm nach AD-HOC-AG BODEN (2005) als sehr hoch zu bewerten. Während das hohe Wertenniveau auf den Nadelwald-Standorten bis in den Unterboden bestehen bleibt kommt es bei den Standorten unter Laubwald zu einer Verringerung der Luftkapazität in einen mittleren Wertebereich. Dieser bleibt bis in den Unterboden konstant, wobei der Anteil weiter Grobporen der Plateau-Standorte leicht darüber liegt. Ein Grund für den schwach verringerten Anteil weiter Grobporen im Falle der Laubwaldstandorte ist in der etwas größeren Profilmächtigkeit und der etwas feiner texturierten Hauptlage dieser Test-Plots zu suchen. Der durchgehend hohe Grobbodenanteil der Vergleichsstandorte führt zur Etablierung eines Makroporensystems an der Schnittstelle Gesteinsbruchstücke-Boden. Daher wird den Böden des Untersuchungsgebietes, basierend auf diesen Ergebnissen, eine sehr gute Perkolationswirkung attestiert.

Betrachtet man in diesem Kontext die gesättigte Wasserleitfähigkeit (Abb. 5.26), so ist ein leichter Anstieg dieses Parameters im Bereich um 20 cm Profiltiefe im Falle der Laubwaldstandorte zu erkennen. Ein Grund für den Anstieg könnte die große Wurzelaktivität der Buchen in diesem Bereich sein. Im Unterboden bleiben die Werte jedoch auf dem ursprünglichen Niveau. Die Wasserleitfähigkeit der Nadelwaldstandorte nimmt im Gegensatz zu den Plots unter Buche mit der Tiefe zu. Dies ist sehr wahrscheinlich auf den mit der Tiefe steigenden Grobbodengehalt und die größere Klüftigkeit der Verwitterungsprodukte in diesem Bereich zurückzuführen.

Mit der Tiefe abnehmende Leitfähigkeitswerte für Luft und Wasser wurden auf den beiden Plateau-Standorten festgestellt (Anhang Tab. A9). Ein Grund, sowohl für die leichte Abnahme als auch für die schwache Pseudovergleyung dieser Böden, kann die dichtere Lagerung im Unterboden darstellen, die aber durch den hohen Grobbodengehalt nicht in konkreten Messwerten erfassbar war.

Infiltrationen

Vor allem bedingt durch den sehr locker gelagerten Oberboden lagen die Endinfiltrationsraten im Einzugsgebiet Weierbach (Abb. 5.27), basierend auf der Klassifikation nach WOHLRAB

et al. (1992), im sehr hohen Bereich. Dabei überschritten die ermittelten Werte die Klassifikationsobergrenze von 600 cm d^{-1} beträchtlich; teilweise um das 6-fache (Mittelwert 2824 cm d^{-1}). Weitere Faktoren der guten Infiltrationsleistungen sind der schon im Falle der ersten Einzugsgebiete genannte Humus (große spezifische Oberfläche; Verteilung des Niederschlagswassers) sowie die in großen Mengen vertretenen Gesteinsbruchstücke der devonischen Schieferverwitterung und das hierdurch etablierte Makroporensystem.

Wie schon bei den Testgebieten Frankelbach und Holzbach waren auch im Einzugsgebiet Weierbach die Standardabweichungen der Endinfiltrationsraten sehr groß. Ausschlaggebend für diese Resultate war eine für Waldböden typische, ungleichmäßige Verteilung von Wurzelbahnen, bioturbaten Makroporen oder Anteilen grober Bodenbestandteile. Die Infiltrationsleistung von Waldböden kann daher flächenbezogen als eher heterogen bewertet werden, ist jedoch insgesamt sehr häufig als hoch bis sehr hoch zu klassifizieren.

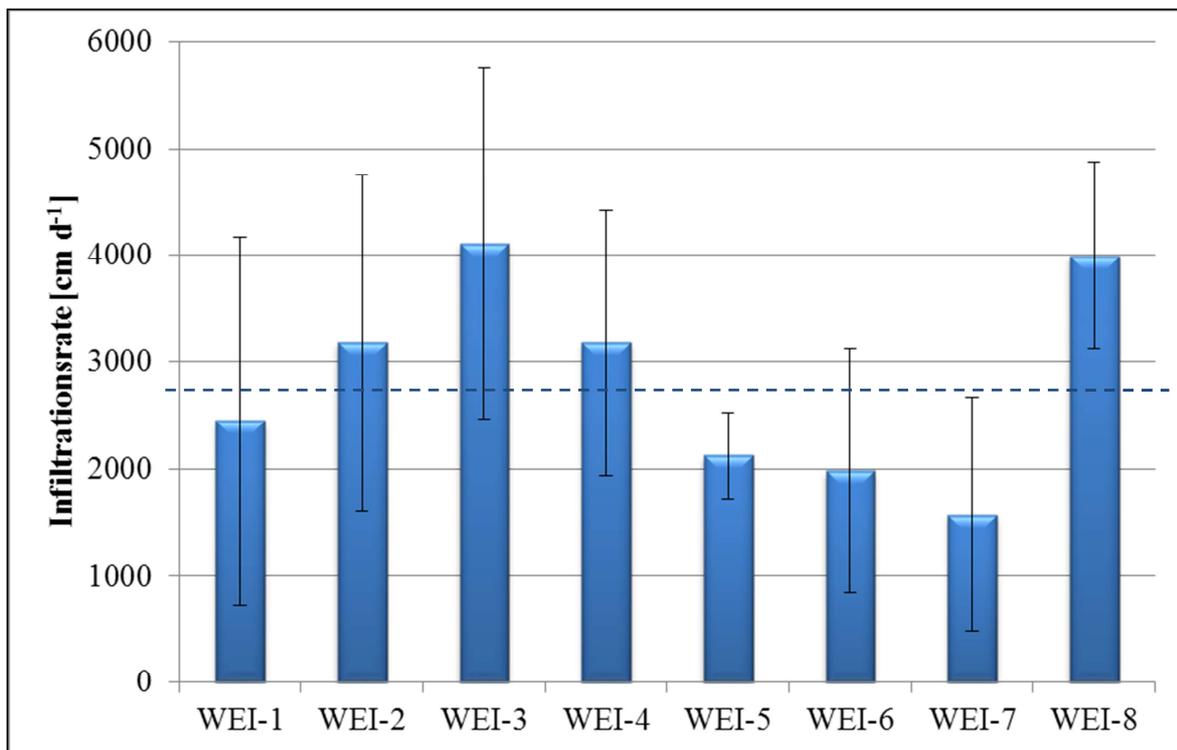


Abb. 5.27: Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Weierbach

Abfluss auf Punkt-Skala

Durch die Bohrstock-Kartierung, die bodenkundliche Profilansprache sowie die bodenphysikalischen Stechring-Untersuchungen wurden vor allem geringe Trockenrohdichten, sehr hohe Grobbodengehalte und hohe Wasserleitfähigkeiten im Einzugsgebiet Weierbach ermittelt. Zudem sind die Deckschichten des Testgebietes bis in eine Tiefe von

einem Meter nicht als impermeabel zu bewerten. Deshalb waren generell keine für das Großberechnungs-Setup erfassbare Zwischenabflüsse zu erwarten. Aus diesem Grund wurde auf eine Untersuchung der Standorte mittels der sehr zeit- und arbeitsaufwändigen Großberechnungsanlage verzichtet.

Nichtsdestotrotz sollten die Oberflächeneigenschaften der verschiedenen Plots in Bezug auf ihre abflussbildenden Eigenschaften und die jeweiligen Unterschiede zueinander untersucht werden, weshalb hier die Kleinberechnungsanlage zum Einsatz kam.

Die Berechnungen auf Punkt-Skala mit mobilen Niederschlagssimulatoren¹⁹ fanden Ende September 2010 im Rahmen einer Geländestudie statt. Bei insgesamt feuchten Witterungsverhältnissen²⁰ wurden 14 Versuche realisiert. Wie in Tab. 5.10 und Tab. A14 des Anhangs gezeigt wird, generierten neun dieser Versuche keinen Oberflächenabfluss. Das gesamte Niederschlagswasser infiltrierte auf diesen Plots in die Bodenoberfläche. Dabei variierte jedoch die Infiltrationstiefe des beregneten Wassers mit Art der Streuauflage oder des Bewuchses. Speziell die Laubwald-Standorte wiesen tiefere Infiltrationsfronten auf (bis zu 35 cm). Auch dort wo ein Wurzelballen o. Ä. das Wasser besser in den Untergrund leitete, waren punktuell größere Infiltrationstiefen zu messen.

Oberflächenabfluss wurde nur auf fünf Plots aufgefangen, wobei die Abflusskoeffizienten sehr gering ausfielen (zwischen 0,3 % und 2,8 %). Die Beregnung einer alten Fahrspur im Laubwald lieferte nach einer 35-minütigen Aufsättigungsphase 818 ml Abfluss, was einem Abflusskoeffizienten von 2,4 % entspricht. Grund hierfür könnte eine nachhaltige Verdichtung im Bereich der Fahrspur sein, da u.a. nach SCHÄFFER (2002) tiefgründige oder empfindliche Böden schon durch einmaliges Befahren nachhaltig beeinträchtigt werden können und intensivere Befahrung nach mehr als 25 Jahren noch deutliche Beeinträchtigungen des Bodens unter Fahrspuren hinterlässt.

Im Falle der mit Moos bewachsenen Fichtenbestände wird davon ausgegangen, dass der gemessene Abfluss systembedingt²¹ auftrat und nicht repräsentativ für die Fläche war. In diesen Fällen nahm das Moos auf der Bodenoberfläche fast das gesamte Beregnungswasser auf. Der Boden darunter war weiterhin trocken. Diese Beobachtungen können unter anderem durch Ausführungen von MÄGDEFRAU & WUTZ (1951) erklärt werden, da schon damals

¹⁹ Leihgabe des Faches Physische Geographie (Uni Trier).

²⁰ Die Böden des Untersuchungsgebietes waren trotz feuchter Witterung noch sommerlich ausgetrocknet. Nur die Streuauflagen waren befeuchtet und nicht hydrophob.

²¹ Durch die große Neigung der Test-Plots sammelte sich das Wasser im Inneren des eingeschlagenen Metallringes, sodass das aufgefangene Wasser nicht direkt von der Bodenoberfläche abgelaufen konnte.

bekannt wurde, dass Moose in der Lage sind große Wassermengen aufzunehmen und über einen Zeitraum von mehreren Tagen zu speichern.

Es kann daher festgehalten werden, dass die Beregnungsversuche im Weierbach weder unter Laub- noch unter Nadelwald bedeutende Mengen oberflächlicher Abflüsse generierten. Die gesamte Wassermenge wurde vom Boden, respektive der Vegetation (Moos) aufgenommen. Zu beachten ist hierbei aber, dass die Untersuchungen in den genannten Gebieten, wie erwähnt, im Herbst 2010 durchgeführt wurden und die Vorfeuchte der Oberböden mit 28 Gew.-% bis 47 Gew.-% (50 % bis 75 % der FK) hoch war. WAHREN et al. (2007) fügen in diesem Zusammenhang an, dass die Bodenvorfeuchte in Wäldern, verglichen mit anderen Landnutzungsarten generell deutlich geringer ist; Infiltration und Perkolation jedoch stärker ausgeprägt sind.

Arbeiten des CRP Gabriel Lippmann (Luxemburg) im Testgebiet Weierbach ergaben, dass bei trockenen Bedingungen sowohl unter Fichte als auch unter Buchennutzung Oberflächenabflüsse auftreten können (mündliche Mitteilung HISSLER, 2011). Der im Kapitel 5.1.1.1 angesprochene jahreszeitliche Trend des Oberflächenabflusses durch Hydrophobizität kann demzufolge auch im Einzugsgebiet Weierbach nachvollzogen werden. Es wird vermutet, dass sich im Falle des Laubwaldes, der durch Pilzhyphen und Ausscheidungsprodukte des Edaphons verklebte Of-Horizont der organischen Auflagen für dieses Ergebnis verantwortlich zeigt. Im Falle der Fichte wird angenommen, dass bei dominierender Fichtenstreu der Oh-Horizont die Ausbildung der Hydrophobizität bedingt, wodurch oberflächlicher Abfluss im Of-Horizont generiert wird (mündliche Mitteilung HOLT HOF, 2011). Ähnlich verhält es sich in Streuaufgaben unter Douglasie, was die Studie von WEILER (2011) bestätigt.

Tab. 5.10: Auszug aus den Ergebnissen der Kleinberegnungen im Einzugsgebiet Weierbach

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Beregnungs- dauer [min]	Beregnungs- intensität [l/m ² /h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Weierbach	1.1	Laubwald	60	40,0	8°	-
Weierbach	1.3	Laubwald Alte Fahrspur	60	33,9	9°	2,4
Weierbach	4.4	Nadelwald	60	37,3	31°	2,8
Weierbach	5.1	Nadelwald	60	40,7	22°	1,0

5.1.3.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen

Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen im Einzugsgebiet Weierbach hatten zum Resultat, dass bei undurchlässigem Ausgangssubstrat (Sg3) sehr geringe Trockenrohdichten (Lockerbraunerden), verknüpft mit sehr hohen Grobbodengehalten, homogen über das Testgebiet verteilt auftraten. Zudem wurden sehr hohe Infiltrationsraten ermittelt. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass infiltrierendes und durch den Bodenkörper perkolierendes Niederschlagswasser in tieferen Schichten, bedingt durch periglaziale Deckschichtendynamik bzw. dem sog. „soil-bedrock interface“, lateral abgelenkt wird. Aufgrund dessen wurden die Test-Plots entlang der Catena von West (Laubwald) nach Ost (Nadelwald) durchgängig mit dem dominierenden Abflussprozess dSSF (tiefer Zwischenabfluss) klassifiziert (Tab. 5.11). Die Plateau-Standorte im Norden des Einzugsgebietes wurden im Gegensatz dazu, aufgrund der geringen Hangneigung und hydromorphen Merkmalen im tieferen Profilbereich, als SOF3-Flächen bewertet.

Prozessbeurteilungsschemata PBS

Die Ergebnisse der Anwendung des Prozessbeurteilungsschemas für Wald nach SCHERRER (2006) können ebenfalls in Tab. 5.11 eingesehen werden.

Im Falle des Plots WEI-1 wurde Tiefensickerung (DP) ausgewiesen. Das ist für Schiefer-Standorte ungewöhnlich, da dieser nach ZUMSTEIN et al. (1989) als impermeabel eingestuft wird. Nach Begutachtung des Profils konnte jedoch keine Undurchlässigkeit des Gesteins bis in die ausgehobene Tiefe festgestellt werden. Die Schieferverwitterung ist in diesem Bereich sehr mächtig und klüftig. Demnach konnte auf einem so ebenen Standort durch das PBS auch im Schiefer DP identifiziert werden.

An den restlichen im Hang befindlichen Bodenprofilen wurde überwiegend SSF2 (verzögerter Zwischenabfluss) ausgewiesen. Laterale Wasserflüsse, vor allem durch präferentielle Fließpfade bedingt durch den Grobbodenanteil, sind demnach zu erwarten.

Die beiden Plateau-Lagen wurden mit dem Abflussprozess SOF3 (stark verzögerter Sättigungsflächenabfluss) charakterisiert. Eine ähnlich geringe Hangneigung wie WEI-1, verknüpft mit einem dichter gelagerten Unterboden, lässt diese Schlussfolgerung plausibel erscheinen, was durch die Übereinstimmung zu der Geländeansprache bestätigt wird.

Digitale Abflussprozesskarte GIS-DRP

Ein digitales Höhenmodell (20 m-Auflösung) diente neben der digitalen geologischen Information und der Landnutzung (100 % Wald) als Grundlage zur Erstellung der Abflussprozesskarte des Einzugsgebietes Weierbach (Abb. 5. 28). Die im Vergleich zu den bisherigen Karten insgesamt gröbere Auflösung der GIS-DRP-Karte (Pixel, Stufen) liegt zum einen an der schlechteren Auflösung des DHM (20 m im Gegensatz zu bisher 5 m) und zum anderen an der sehr geringen Einzugsgebietsgröße von nur 0,4 km².

Im forstlich genutzten Weierbach Untersuchungsgebiet werden hauptsächlich verzögerte Zwischenabfluss-Prozesse durch GIS-DRP ausgewiesen (WEI-1 bis WEI-6; Tab. 5.11). Auf den Plateau-Standorten WEI-7 und WEI-8 wird demgegenüber SOF3 klassifiziert. Ähnlich der PBS-Anwendung für Waldstandorte liegen die meisten Test-Plots im SSF2-Bereich, der mit 58,7 % den größten Flächenanteil ausmacht (Tab. 5.12). Die Standorte WEI-7 und WEI-8 liegen in einer SOF3-Zone, die den flächenmäßig nächst größeren Teil der DRP-Karte einnimmt. Die SOF1-Flächen beschränken sich auf die Auenbereiche (5,7 %).

Tab. 5.11: Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Weierbach)

Plot	GIS-DRP	PBS (Scherrer)	DRP (Gelände)
WEI-1 (Laubwald, Buche/Eiche)	SSF2	DP	dSSF
WEI-2 (Laubwald, Buche/Eiche)	SSF2	SSF2	dSSF
WEI-3 (Laubwald, Buche/Eiche)	SSF2	SSF2	dSSF
WEI-4 (Nadelwald, Fichte)	SSF1	SSF2	dSSF
WEI-5 (Nadelwald, Fichte)	SSF2	SSF2	dSSF
WEI-6 (Nadelwald, Fichte)	SSF2	SSF2	dSSF
WEI-7 (Plateau, Laubwald, Buche)	SOF3	SOF3	SOF3
WEI-8 (Plateau, Nadelwald, Fichte)	SOF3	SOF3	SOF3

Tab. 5.12: Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse GIS-DRP (Weierbach)

DRP	Flächenanteil [%]
HOF1	7,8
SOF1	5,7
SOF3	13,3
SSF1	9,3
SSF2	58,7
SSF3	5,2

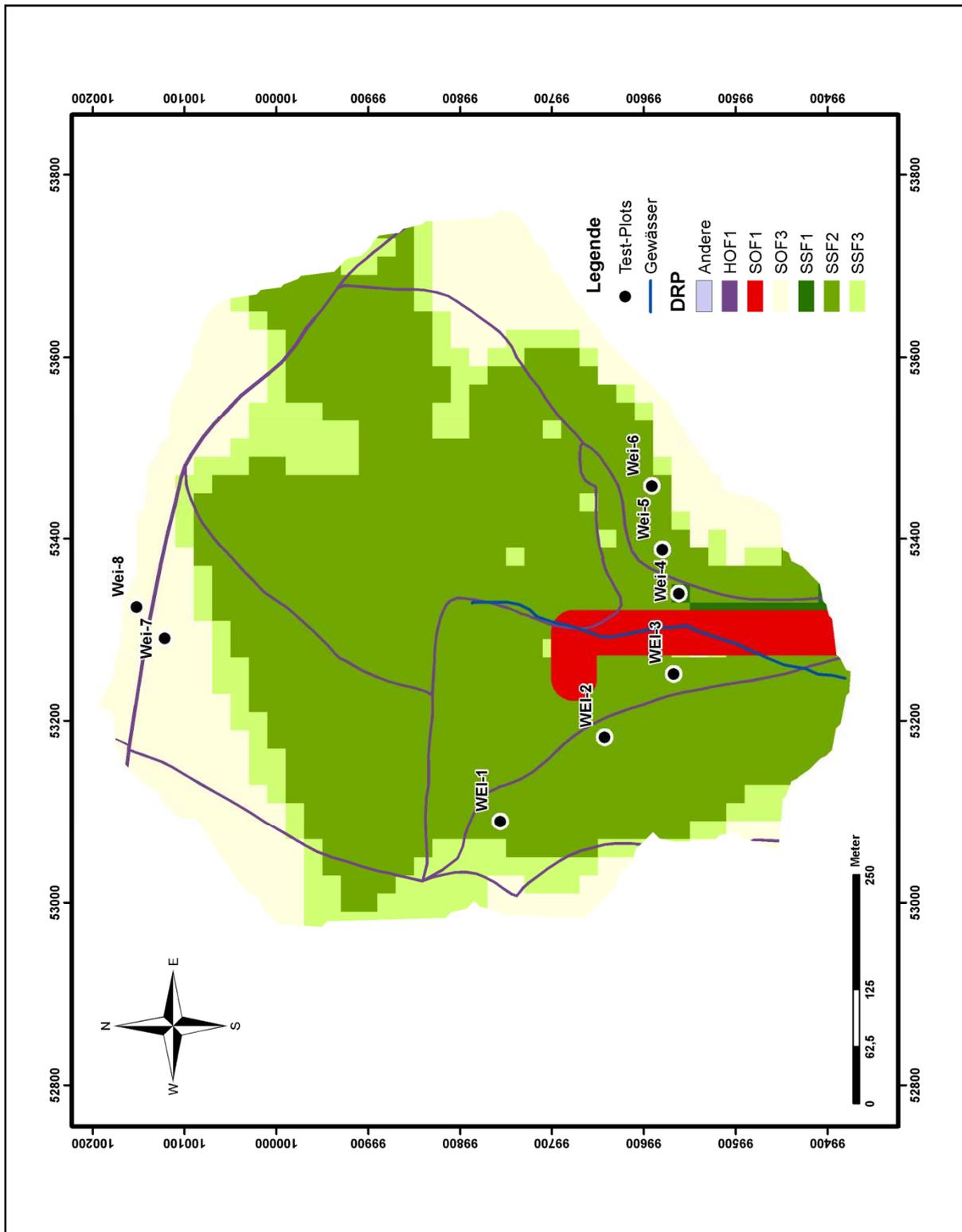


Abb. 5.28: GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Weierbach

5.1.4 Huewelerbach

5.1.4.1 Labor- und Geländeuntersuchungen

Bodenphysikalische Eigenschaften

Wie zuvor im Weierbach Test-Gebiet, waren auch die Böden des Huewelerbach Untersuchungsgebietes sehr homogen in ihrer Ausprägung. Das sandige Ausgangssubstrat des Luxemburger Sandsteins (Li2), führte zur Entwicklung von sandigen Braunerden bis schwach podsoligen und podsoligen Braunerden. Der Grobbodenanteil der Böden ist gering.

Die Trockenrohdichten (Abb. 5.29) der Oberböden sind walddtypisch niedrig und können nach AD-HOC-AG BODEN (2005) als „sehr gering“ eingestuft werden. Mit der Tiefe steigen die Werte, bedingt durch die pedogene Eigenverdichtung an, sodass im Unterboden mittlere Dichten von $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ bis $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ erreicht werden.

Entgegengesetzt zur Dichte verläuft das Gesamtporenvolumen. In den Oberböden der Test-Plots wurden sehr hohe Gesamtporenvolumina (50 % bis 70 %) ermittelt. Mit der Tiefe sinken die Werte aufgrund der höheren Dichte. Hieran ist zu erkennen, dass das GPV direkt mit der Dichte korreliert.

Die Luftkapazitäten der vier untersuchten Standorte dieses Einzugsgebietes weisen über das gesamte Profil hinweg hohe bis sehr hohe Werte auf (Abb. 5.31). Grund hierfür ist das im sandigen Material in allen Horizonten ausgebildete Einzelkorngefüge. Selbst im kompakter gelagerten C-Horizont aus Lias-Sandstein ist eine tiefe Perkolations von infiltrierendem Niederschlagswasser dementsprechend möglich und äußerst wahrscheinlich.

Die Messwerte der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Abb. 5.32) zeigen einen vergleichsweise ungleichmäßigen Verlauf. Der Anstieg der Leitfähigkeit für Wasser ab 15 cm Tiefe kann dabei auf eine höhere Wurzelaktivität und damit eine bessere Ableitung des Wassers durch bevorzugte Fließwege zurückgeführt werden. Ein weiterer Faktor für die insgesamt hohen Wasserleitfähigkeiten der Test-Plots sind wiederum das Einzelkorngefüge und der hiermit verknüpfte, hohe Makroporenanteil.

Die k_f -Werte der Unterböden, sind außer im Falle des Standortes HUE-3, nicht deutlich niedriger (teilweise sogar höher) als die Werte der Oberböden (Tab. A11). Dies kann gleichfalls mit der einheitlich sandigen Textur der Bodenprofile in Verbindung gebracht werden. Durch die sich nicht deutlich ändernden Korngrößenzusammensetzungen im Bodenprofil (Su3 / Su2) und das Fehlen von größeren Bodenpartikeln wie Gesteinsbruchstücken oder Verwitterungsschutt im Unterboden, ändern sich auch die Wasserleitfähigkeiten nicht deutlich.

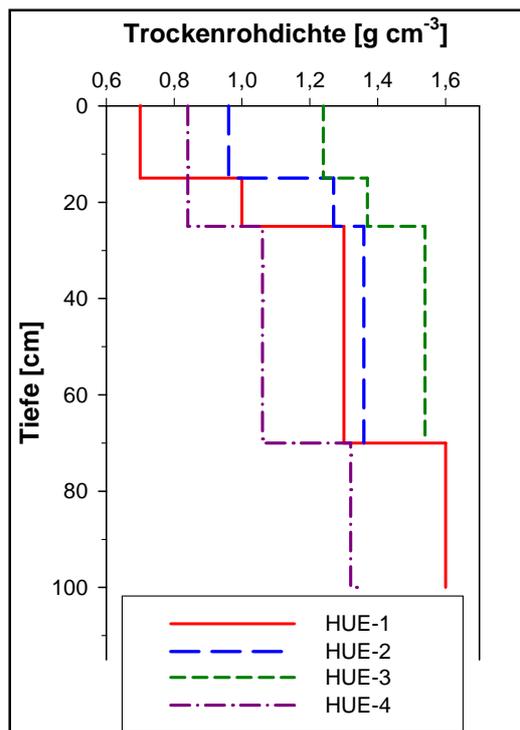


Abb. 5.29: Trockenrohddichte Huewelerbach

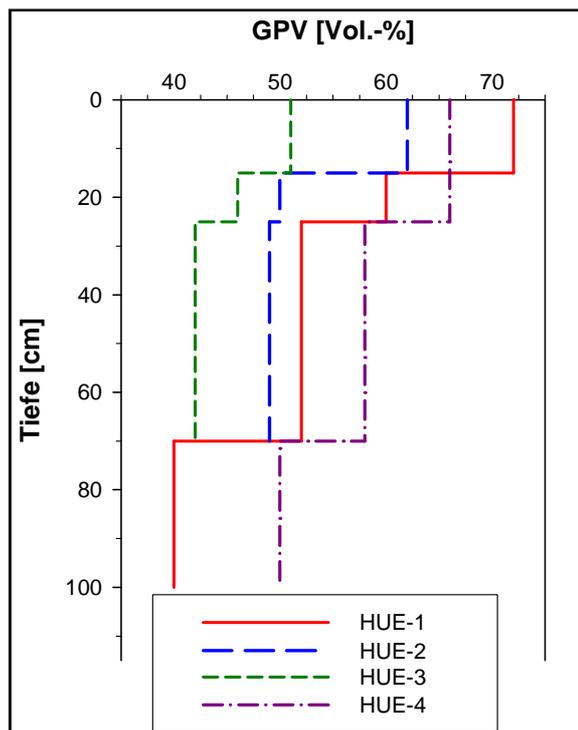


Abb. 5.30: Gesamtporenvolumen Huewelerbach

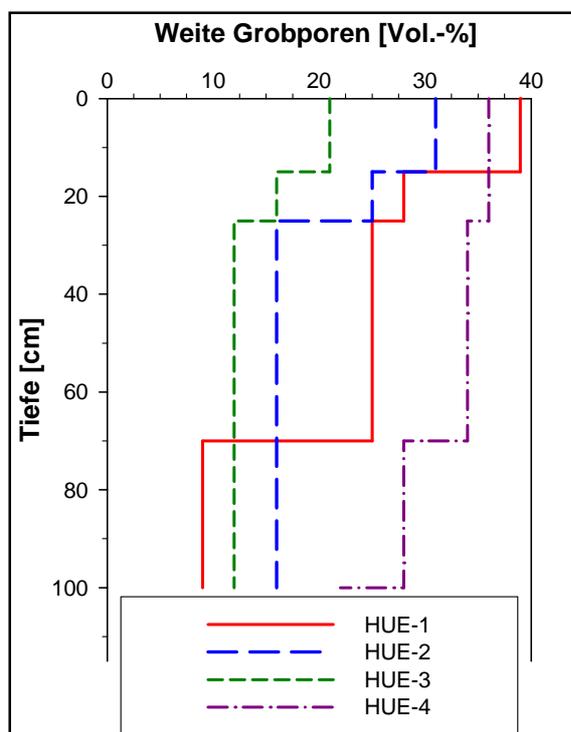


Abb. 5.31: Weite Grobporen Huewelerbach

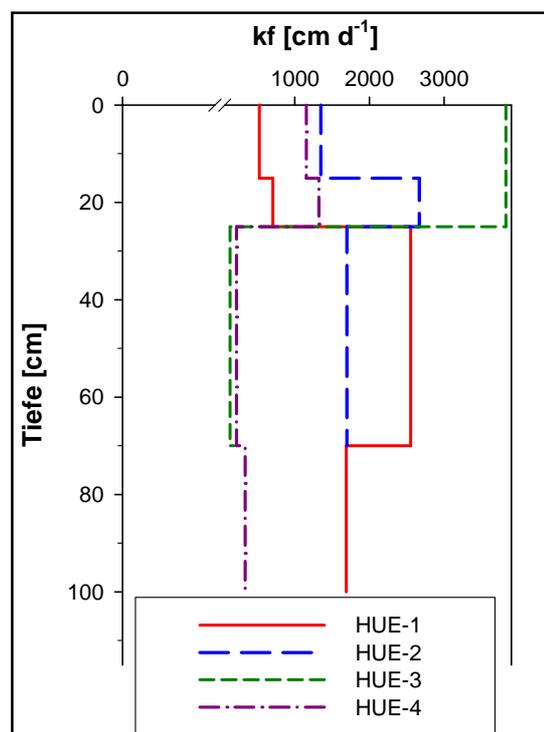


Abb. 5.32: ges. Wasserleitfähigkeit Huewelerbach

Ein klares Anzeichen für die gute Perkolationswirkung und die Filterfunktion der Böden und Gesteine im Einzugsgebiet Huewelerbach stellt eine Quelfassung (Anhang Foto A23 und A24) im westlichen Teil des Testgebietes dar (gelegen zw. den Standorten HUE-1 und

HUE-2). Hier tritt an der Grenzschicht Lias-Sandstein - Mergel Quellwasser aus, welches durch die Gemeinde Hovelange in Kooperation mit weiteren Gemeinden gefasst und als Wasserreserve in sehr trockenen Perioden verwendet wird.

Infiltrationen

Die Infiltrationsraten der forstlich genutzten Untersuchungsstandorte im Einzugsgebiet Huewelerbach fielen erwartungsgemäß sehr hoch aus (Abb. 5.33; Mittelwert 1613 cm d⁻¹). Durch die humosen Schichten der Bodenoberfläche wurde das Wasser gut verteilt, um dann rasch in den sandigen Oberboden zu infiltrieren. Das nach ZUMSTEIN et al. (1989) als permeabel klassifizierte Ausgangsgestein des Lias-Sandsteins begünstigte durch die grobsandige Textur eine tiefe Perkolation des Wassers. Alle Plots wiesen daher wesentlich höhere Infiltrationsleistungen auf als die Klassifikationsobergrenze von 600 cm d⁻¹ nach WOHLRAB et al. (1992). Ein eindeutiger Einfluss der Baumart (Buchen oder Fichten) auf die Infiltration der verschiedenen Test-Plots war, wie auch im Falle der anderen Untersuchungsgebiete, nicht zu erkennen.

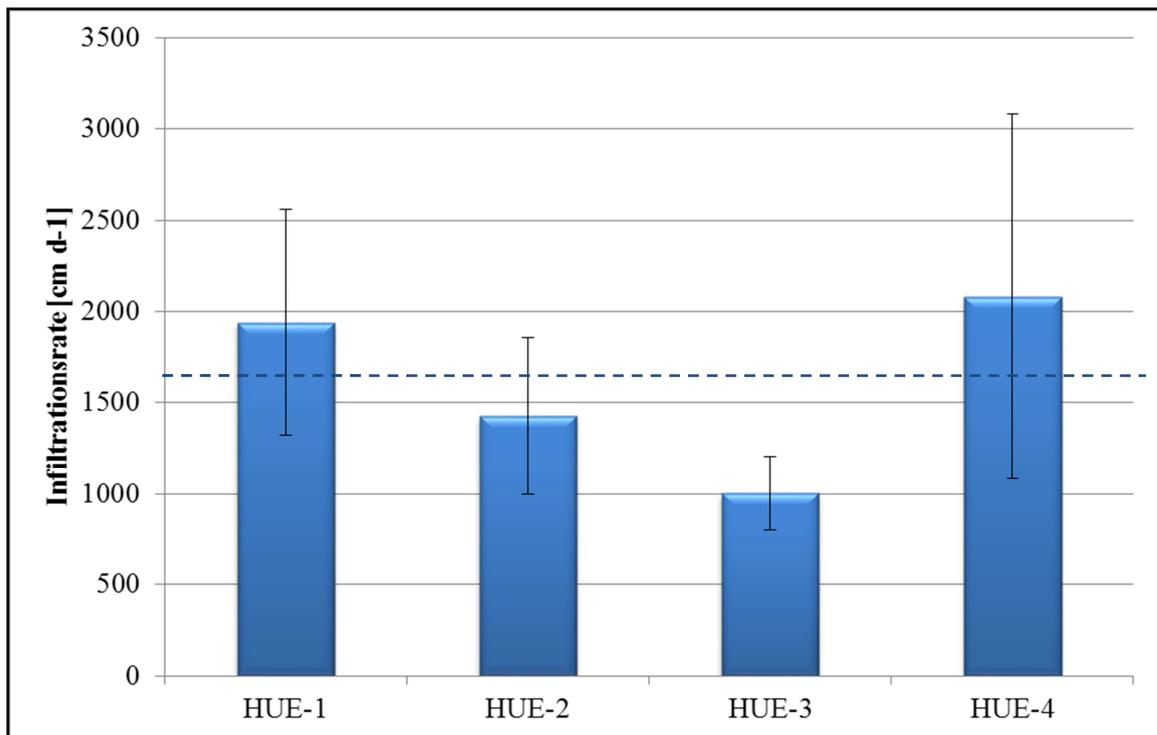


Abb. 5.33: Endinfiltrationsraten inkl. Standardabweichung und Mittelwert (gestrichelte Linie); Huewelerbach

Abfluss auf Punkt-Skala

Die Kleinberechnungen im ForeStClim-Untersuchungsgebiet Huewelerbach wurden im September 2010 sowie drei Jahre zuvor im September 2007 durchgeführt. Insgesamt wurden hier 32 Berechnungen auf Punkt-Skala realisiert (Tab. 5.13 und Tab. A15 des Anhangs).

Tab. 5.13 zeigt einen Auszug aus den Berechnungsergebnissen und verdeutlicht, dass auf dem sandigen Substrat des Einzugsgebietes unter Waldbeständen nicht mit Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Während vorfeuchter Witterungsbedingungen leiteten die Streuaufgaben der Laub- und Nadelwaldbestände sowie die lockere Lagerung der Oberböden das Niederschlagswasser schnell in den Boden hinein, von wo es in tiefere Horizonte versickert. Hydrophobizität der Humusaufgaben wurden demnach nicht festgestellt. Basierend auf vergleichbaren Studien von WEILER (2011), HOLTHOFF (2011) und SCHMID (2012) ist dennoch davon auszugehen, dass während trockenen Witterungsperioden wasserabweisende Oberflächeneigenschaften im Wald ausgebildet werden, die folglich (ähnlich den Einzugsgebieten Frankelbach und Holzbach) zur Generierung von Oberflächenabfluss beitragen können.

Andere Reaktionen wurden mit den Niederschlagssimulationen auf befestigten und ungeschützten Waldwegen, sowie in Rinnen provoziert. Abflusskoeffizienten von bis zu 96 % wurden hier ermittelt. Demnach bilden anthropogene Strukturen im Lias-Sandstein des Einzugsgebietes Huewelerbach die Hot-Spots der Abflussgenese. Studien von HENDRIKS (1993) ergaben ähnliche Resultate im Luxemburger Sandstein. Auch hier wurden die höchsten Abflusskoeffizienten auf Waldwegen erfasst, die gleichfalls als einzige zum Hochwasser beitragenden Flächen im Lias-Sandstein definiert wurden.

In den aktuellen Studien im Testgebiet Huewelerbach wurden des Weiteren oberflächliche Abflüsse auf Grünland gemessen (Abflusskoeffizienten bis ca. 60 %). Verantwortlich hierfür ist jedoch weniger der Sandstein, als vielmehr der liegende Keuper-Mergel in Richtung Gebietsauslass. Die hier vertretenen bindigen und tonigen Bodenarten sowie die dichte Lagerung der Böden insgesamt, sind neben anderen Einflussfaktoren wie Verdichtungen des Oberbodens durch Viehtritt oder ein dichter Wurzelfilz als beitragend zur Bildung von Oberflächenabfluss einzuschätzen. So wurden durch SCHOBEL (2008) signifikant geringere Infiltrationsraten auf verfilztem Grünland verglichen mit vertikutierten oder unverfilzten Grünland-Flächen nachgewiesen.

Tab. 5.13: Auszug aus den Resultaten der Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Huewelerbach

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs- dauer [min]	Berechnungs- intensität [l/m ² /h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Huewelerbach	57	Laubwald	60	38,9	6	-
Huewelerbach	58	Nadelwald	60	37,3	16	-
Huewelerbach	59	Nadelwald	60	38,6	16	-
Huewelerbach	62	Waldweg	30	36,9	7	88,7
Huewelerbach	64	Waldweg	60	38,0	13	96,0
Huewelerbach	72	Grünland	60	40,3	8	62,7

5.1.4.2 Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen

Abflussprozesskartierung auf Grundlage der Geländeuntersuchungen

Die bodenphysikalischen Untersuchungen ergaben auf den Versuchsstandorten des Einzugsgebietes Huewelerbach, wie zuvor beschrieben, geringe bis mittlere Trockenrohdichten und hohe Leitfähigkeitswerte für Wasser. Ebenso hatten die Infiltrationsexperimente im Gelände sehr hohe Infiltrationsraten zum Ergebnis. Da auch ZUMSTEIN et al. (1989) das geologische Ausgangssubstrat (Li2) als permeabel klassifizierten, wurden die dominierenden Abflussprozesse der Test-Plots des Huewelerbachs als Tiefensickerung (DP) ausgewiesen (Tab. 5.15).

Prozessbeurteilungsschemata PBS

Die Anwendung des Kartierschlüssels zur Identifikation hochwasserrelevanter Flächen nach SCHERRER (2006) lieferte für das Testgebiet Huewelerbach ein eindeutiges Ergebnis (Tab. 5.15). Die vier Plots wurden alle als Flächen vorwiegender Tiefensickerung (DP) bewertet. Dabei wurde das Entscheidungsdiagramm, wie in Tab. 5.14 nachzuvollziehen, bearbeitet.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen sowie der Infiltrationsversuche lassen die Resultate insgesamt sehr plausibel erscheinen.

Tab. 5.14: Anwendung des PBS (Wald) für den Standort HUE-1 (Laubwald, Buche)

Kriterium / Frage im PBS	Antwort	Bodenbereich
Kriterien für HOF erfüllt (siehe PBS)?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >3 % ?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Boden mit Vergleichsmerkmalen?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >5 %?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Hangneigung >10 %?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Bodenmächtigkeit >0,5 m?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Bodenmächtigkeit >1 m?	Nein	Bei Wald keine Unterteilung
Geologie durchlässig?	Ja	Bei Wald keine Unterteilung
Ergebnis: DP (Deep Percolation)		

Digitale Abflussprozesskarte GIS-DRP

Die GIS-DRP-Karte für das Einzugsgebiet Huewelerbach (Abb. 5.34) wurde unter Verwendung eines DHM (20 m-Auflösung), der digitalen geologischen Information sowie der Landnutzungsinformation erstellt.

Im Vergleich zu den bisher vorgestellten Abflussprozesskarten fällt der große Anteil an hellblau eingefärbten Flächen auf. Diese Flächen (62,4 %) werden als Areale dominierender Tiefensickerung (DP) charakterisiert, welche auch auf den vier Test-Plots als dominierender Abflussprozess ausgewiesen wurde (Tab. 5.15). Zwischenabfluss-Prozesse wurden im Bereich der Grünland-Flächen in Richtung Gebietsauslass ausgewiesen. Im Bereich der Aue und des Gerinnebettes dominieren schnell reagierende Sättigungsflächenabflüsse (SOF1; 15,3 %). Die prozentualen Flächenanteile der Abflussprozesse finden sich in Tab. 5.16 wieder.

Tab. 5.15: Abflussprozesskartierung nach versch. Ansätzen (Huewelerbach)

Plot	GIS-DRP	PBS (Scherrer)	DRP (Gelände)
HUE-1 (Laubwald, Buche)	DP	DP	DP
HUE-2 (Nadelwald, Fichte)	DP	DP	DP
HUE-3 (Laubwald, Buche)	DP	DP	DP
HUE-4 (Nadelwald, Fichte)	DP	DP	DP

Tab. 5.16: Prozentuale Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse (Huwelerbach)

DRP	Flächenanteil [%]
HOF1	2,7
SOF1	15,3
SOF2	0,02
SOF3	1,63
SSF1	0,22
SSF2	11,5
SSF3	1,9
DP	62,4
Error	4,4

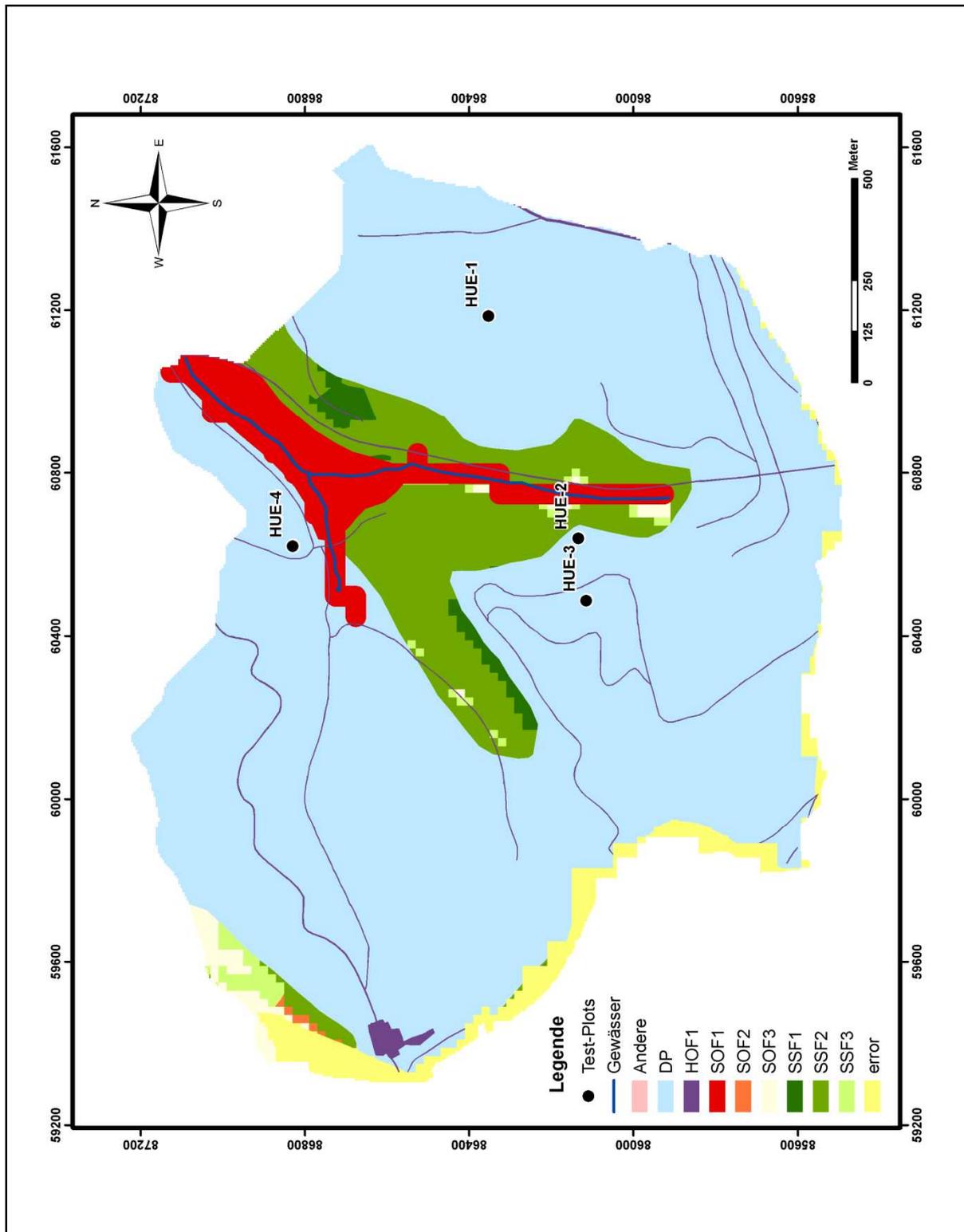


Abb. 5.34: GIS-DRP-Karte Einzugsgebiet Huewelerbach

5.1.5 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse

Zur Verbesserung des Prozessverständnisses von Abflussprozessen in Waldgebieten und zur Validierung der erstellten Abflussprozesskarten der vier ForeStClim-Testgebiete wurden bodenhydrologische Untersuchungen an insgesamt 25 Test-Plots durchgeführt. Die Resultate variierten hierbei je nach Methode und standörtlichen Gegebenheiten unterschiedlich stark. Eindeutige Rückschlüsse über den Einfluss verschiedener Parameter auf die Abflussbildung in bewaldeten Einzugsgebieten lassen sich durch die ermittelten Ergebnisse dennoch treffen.

Sowohl die Ergebnisse der bodenhydrologischen Untersuchungen als auch die Ergebnisse der Abflussprozesskartierungen verdeutlichen den unterschiedlichen Charakter der vier Einzugsgebiete bezogen auf die auftretenden dominierenden Abflussprozesse sowie deren Verbreitung innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Doch welche Faktoren bedingen die Abflussbildung in forstlich genutzten Einzugsgebieten und welche haben dabei den größten Einfluss?

Zur Klärung dieser Fragen und zur genaueren Einordnung abflussrelevanter Parameter werden im Folgenden Vergleiche und Gegenüberstellungen über die Einzugsgebietsgrenzen hinaus angestellt und die wichtigsten abflussspezifischen Einflussfaktoren genauer beleuchtet. Tiefergehende statistische Analysen, unter anderem mittels Hauptkomponentenanalysen (HKA), wurden ebenfalls zu diesem Zweck durchgeführt, trugen jedoch, bedingt durch die starke Korrelation der bodenphysikalischen Parameter, nicht zur Ermittlung Abfluss relevanter Faktoren bei. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung dieser Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit verzichtet.²²

Substrat

Wie in Kapitel 5.1.1 angesprochen, haben das Substrat bzw. die periglaziären Deckschichten und der Grobbodenanteil eines Standortes bedeutenden Einfluss auf dessen Abflussbildung. Unter anderem bestätigte SCHOBEL (2008) die entscheidende Bedeutung des geologischen Ausgangsgesteins durch Großberegnungsversuche und bodenphysikalisch-hydrologische Analysen auf verschiedenen Substraten der Trier-Bitburger Mulde.

Die Ausgangssubstrate der in der vorliegenden Studie untersuchten ForeStClim-Testgebiete variieren, wie in Kapitel 3 beschrieben, mit jedem Einzugsgebiet bzw. Naturraum. Deshalb repräsentieren die aufgeführten Substrate in Abb. 5.35 jeweils ein Untersuchungsgebiet.

²² Die im Folgenden dargestellten Abbildungen wurden mit der Statistik-Software PASW Statistics 17.0 durchgeführt. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um gemessene Abflüsse, die in Beziehung zu unterschiedlichen Parametern gesetzt werden. Die Größe der Kreise stellt die Häufigkeit des gemessenen Abflusses dar.

Anhand dieser Graphik wird deutlich, dass Zwischenabflussprozesse (SSF2 und SSF3 ebenso wie dSSF) in drei von vier forstlich genutzten Testgebieten maßgeblich für das Abflussgeschehen verantwortlich sind. Eine Ausnahme bildet nur das Testgebiet Huewelerbach, da hier Tiefensickerung (DP) als dominierender Abflussprozess auftritt. Dementsprechend ist ein vergleichbarer Einfluss der drei Substrate Permische Rotliegend, Devonische Quarzite und Devonische Schiefer auf die Abflussbildung zu erkennen. Der Lias-Sandstein (Li2) des Einzugsgebietes Huewelerbach hat einen gänzlich anderen, von den zuvor genannten Substraten abweichenden, Einfluss auf die Abflussbildung.

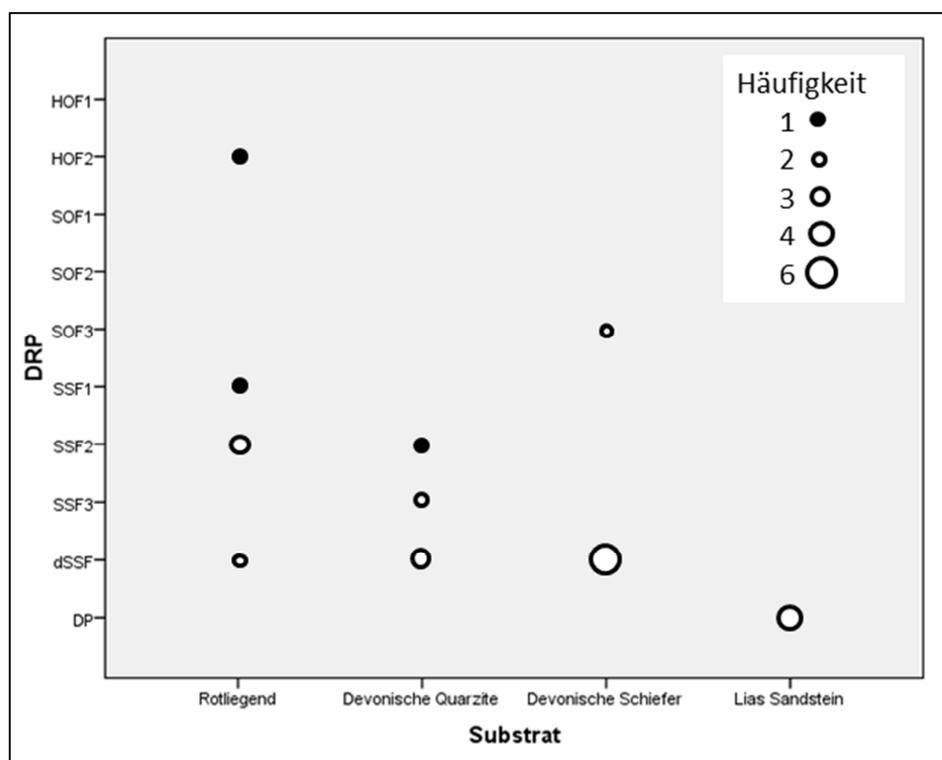


Abb. 5.35: DRP in Abhängigkeit des geologischen Ausgangssubstrates

Die Vergleichbarkeit der erstgenannten Ausgangssubstrate hinsichtlich ihrer Abflussbildung ist durch die ähnliche geomorphologische sowie pedogene Entwicklung der unterschiedlichen Ausgangsgesteine und hieraus entwickelten Böden, während und nach dem Pleistozän (nach PRESS & SIEVER (1995) zwischen 1,6 Mio. bis 10.000 Jahre vor heute), speziell im Mittelgebirgsraum zu erklären. Durch die periglaziale Deckschichtendynamik wurden die Verwitterungsprodukte der anstehenden Substrate zu mächtigen, durchlässigen und undurchlässigen Lagen aufgebaut. Hangsedimente, die in dieser Zeit (Pleistozän) meist durch solifluidale Verlagerungsprozesse entstanden sind, bilden in den mitteleuropäischen Mittelgebirgen nahezu flächendeckend das Ausgangsmaterial für die holozäne Bodengeneese und haben daher große Relevanz bei der Bildung unterschiedlicher Abflussprozesse

(CHIFFLARD et al., 2008). Die Schichtung ist nach ihrer Position im Profil benannt und in Oberlage, Hauptlage, Mittellage und Basislage eingeteilt (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Jedoch wird nur äußerst selten die komplette Vertikalabfolge der Lagen im Gelände angesprochen (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Die regionale Ausbildung periglazialer Lagen ist sehr unterschiedlich und hat einen bedeutenden Einfluss auf den gebietsbezogenen Wasserumsatz und die Wasserflüsse (z. B. EINSELE et al., 1986; SEMMEL, 1991; PESCHKE, 2001; WENNINGER et al., 2004 zitiert nach CHIFFLARD et al., 2008). Ausschlaggebend für die Ausprägung der Deckschichten sind vor allem das Relief und die vorherrschenden geologischen Schichten. Das Relief ist bedeutsam, da exponierte Bereiche einer stärkeren Erosion ausgesetzt sind als geschützte Flächen und demzufolge die Mächtigkeit der Lagen beeinflusst wird. Die vorherrschenden geologischen Schichten wirken sich besonders auf den substratspezifischen Aufbau periglaziärer Lagen (SCHOLTEN, 2003) aus (z. B. locker gelagerte Lösslehm-Fließerde oder plattig eingeregelter, dichter Schieferschutt). Durch diesen Aufbau wird infiltriertes Niederschlagswasser entweder vom Boden aufgenommen und in tiefere Schichten weitergeleitet oder aber dem Gefälle folgend lateral abgeführt.

Eine solche primär laterale und hangabwärts gerichtete Ablenkung des infiltrierten Wassers wurde durch die bodenhydrologischen Untersuchungen im Frankelbach, Holzbach und Weierbach ermittelt. Dabei war im Einzugsgebiet Frankelbach eine sehr standortspezifische Ausprägung der Deckschichten erkennbar. Aufgrund der Heterogenität des Rotliegend-Materials und der Reliefierung des Testgebietes, traten die umgelagerten Schichten in sehr verschiedenen Tiefen und Mächtigkeiten mit unterschiedlichen Dichten auf. Infolgedessen konnten durch die Beregnungsversuche verschiedenste Abflussprozesse generiert werden.

Einheitlicher zeigten sich der pedogene Aufbau und die hieraus resultierenden Abflussprozesse in den Einzugsgebieten Holzbach und Weierbach. Trotz der differierenden Charakteristik des Devonischen Ausgangsmaterials (Quarzite im Holzbach; Schiefer im Weierbach) wurden die periglazialen Deckschichten beider Gebiete durch die Geländeuntersuchungen als semipermeabel bewertet. Grund für diese Bewertung waren die zum Teil sehr hohen Grobbodengehalte, speziell der Unterböden (Grobbodengehalte bis zu 80 Gew.-%; Basislage). Die stark durchmischte und wenig eingeregelter Anordnung der Gesteinsbruchstücke innerhalb der Bodenmatrix bildete in beiden Einzugsgebieten ein verzweigtes Makroporensystem, welches dem Wasser präferentielle Fließpfade bis hin zu tieferen, dichtlagernden Horizonten bot. Durchgängig stauende Schichten konnten im Weierbach, verglichen mit den Einzugsgebieten Frankelbach und Holzbach, nicht erfasst

werden. Es wird aber davon ausgegangen, dass es im Bereich des sog. „soil-bedrock-interface“ des Devonischen Schiefers zu einer lateralen Ablenkung des Wassers kommt. Hieraus resultierte die Ausweisung des dominierenden Abflussprozesses dSSF.

In Gebieten ohne oder mit geringmächtiger Schichtung sowie mit hohen Durchlässigkeitsbeiwerten, wie beispielsweise dem Lias-Sandstein (Li2) des Einzugsgebietes Huewelerbach (Abb. 5.35), dominieren Tiefensickerungsprozesse (DP), da das perkolierende Niederschlagswasser im Bodenkörper nicht auf undurchlässigen Schichten lateral abgeleitet wird. Hier sickert das Wasser durch den Bodenkörper und das Gestein und wird so dem Grundwasser zugeführt.

Trotz insgesamt verbreiteter Zwischenabflussvariabilitäten innerhalb der untersuchten Testgebiete, wird beim Vergleich zwischen den Einzugsgebieten deutlich, dass grundlegend verschiedene geologische Ausgangssubstrate die Ausprägung der Abflussdynamik eindeutig bedingen. Das geologische Ausgangssubstrat kann folglich als sehr bedeutender und differenzierender Einflussfaktor bei der Abflussbildung bestätigt werden.

Textur / Dichte

Die Bodenart eines Standortes geht aus dem geologischen Ausgangssubstrat, dessen Verwitterungsprodukten und evtl. vorhandenen Lössanteilen hervor und kann in einem Bodenprofil stark variieren. Auf den 25 Test-Plots der vier ForeStClim-Untersuchungsgebiete wurden sandige Bodenarten (schwach schluffige Sande; Su2) bis hin zu sehr schluffigen (mittel toniger Schluff; Ut3) oder schluffig-tonigen Texturen (stark schluffiger Ton; Tu4) angesprochen. Um einen Vergleich bezüglich der Textur durchführen zu können, wurde eine gemittelte, das Profil repräsentierende, Bodenart gewählt. Trägt man diese gegen die dominierenden Abflussprozesse auf (Abb. 5.36), so entsteht ein nachvollziehbarer Trend des Einflusses dieses Parameters auf die Abflussbildung.

Tiefensickerung wurde nur auf Standorten mit sehr sandiger Textur ermittelt, wohingegen HORTON'sche und gesättigte Oberflächenabflüsse lediglich auf Plots mit sehr lehmigen bis tonigen Bodenarten auftraten. Zwischenabflussprozesse (dSSF bis SSF3) traten im Vergleich dazu in einem breiten Spektrum an Bodenarten auf (mittel schluffiger Sand (Su3) bis schwach toniger Lehm (Lt2)). Der von der Tiefensickerung bei sandigen Bodenarten zu HORTON'schen Oberflächenabflüssen bei lehmig-tonigen Texturen ansteigende Trend in Abb. 5.36 wird lediglich bei der Bodenart Lu (schluffiger Lehm) unterbrochen. Zu erklären ist der hier vorwiegend auftretende Abflussprozess dSSF durch den sehr hohen Grobbodenanteil (bis zu 80 Gew.-%; Anhang Abb. A3) der lockergelagerten Braunerden des Einzugsgebietes

Weierbach, welche die schluffig-lehmige Textur (Lu) aufwiesen. Ohne den Einfluss des Grobbodens wird die durchschnittliche Abflussreaktion, welche durch schluffigen Lehm bedingt wird, im Bereich des SSF2 erwartet, was den Einfluss des Anteils grober Bodenbestandteile neben der Bodenart wiederholt verdeutlicht.

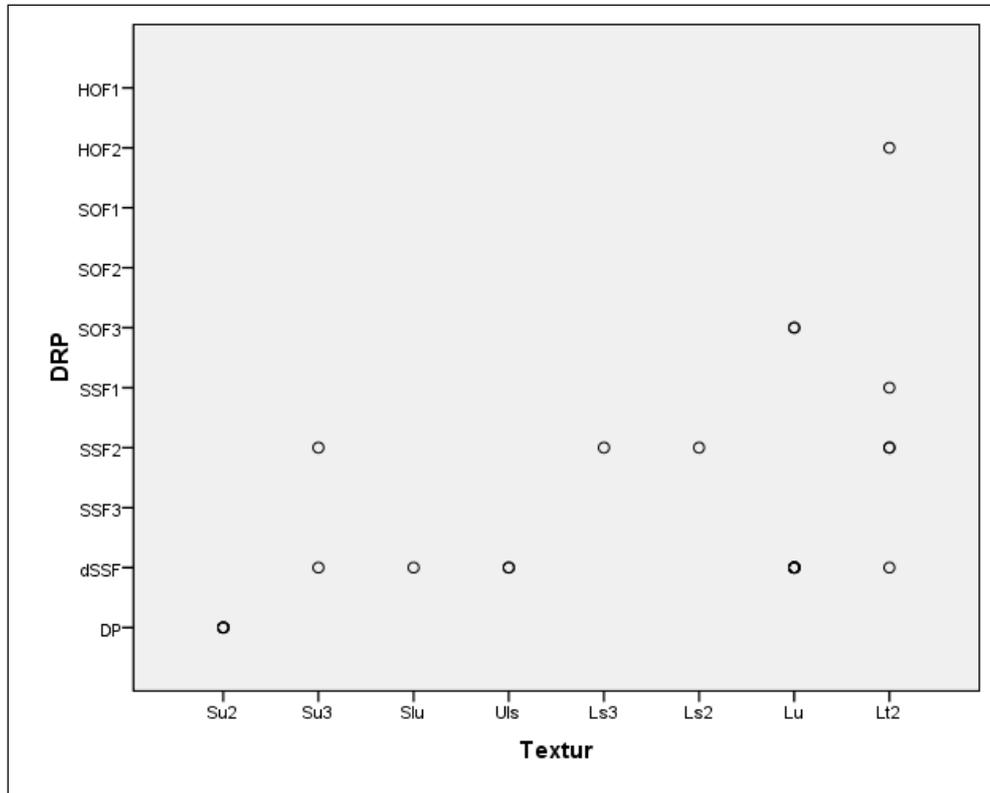


Abb. 5.36: DRP in Abhängigkeit von der vorherrschenden Textur der untersuchten Substrate

Da ein direkter Zusammenhang zwischen Textur und Dichte des Bodens besteht, letztere bei den natürlichen Geländebedingungen aber keine Konstante darstellte, kann letztlich nur eine Einschätzung betreffend des Einflussfaktors „Textur“ auf die Abflussbildung getroffen werden. Demnach wird konstatiert, dass Böden lehmiger bis toniger Textur stärker zu Zwischen- und Oberflächenabflussprozessen neigen als jene sandiger Ausprägung. Ausnahmen bilden stark schluffige, lehmige Sande, die zu Verschlämmung an der Bodenoberfläche und daher zu Oberflächenabflüssen neigen. Erhöht sich die Dichte lehmig-toniger Böden, so erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit von schnellen Abflussreaktionen sowohl auf der Bodenoberfläche als auch im Boden. Das liegt darin begründet, dass die Dichte zusammen mit der Porenverteilung vor allem das Infiltrieren des Niederschlagswassers in den Boden beeinflusst. Gleichfalls haben diese Faktoren großen Einfluss auf die Wasserversorgung und die Belüftung des Wurzelsystems (UHL, 2008).

20 der 25 Test-Plots wiesen eine Dichte um 1 g cm^{-3} oder geringer in den ersten mineralischen Horizonten (Ah; Ah-Bv) auf. Lediglich die Dichten der Standorte FRA-4 (Douglasie; $1,49 \text{ g cm}^{-3}$) und FRA-6 (Acker; $1,43 \text{ g cm}^{-3}$) lagen deutlich höher. Gründe für die erhöhten Werte im Vergleich zu den übrigen Plots sind anthropogene Einflüsse, wie Befahrung des Waldbodens mit schweren Maschinen bei Erntearbeiten, oder die langjährige ackerbauliche Nutzung im Falle von FRA-6. Aufgrund geringerer Trockenrohdichten weisen Waldböden häufig, insbesondere im Makro- und Mesoporenbereich, Unterschiede zu vergleichbaren Acker oder Grünlandböden auf (LUA, 2004). Dies wurde durch die bodenphysikalischen Untersuchungen bestätigt.

Landnutzung

Viele Autoren wiesen während des vergangenen Jahrzehnts einen großen Einfluss der Landnutzung als weiteren sehr wichtigen Einflussfaktor auf die Abflussgenerierung nach (z. B. ALLAN et al., 1997; COSTA et al., 2003; FOLEY et al., 2005; NIEBES et al., 2002; SCHOBEL, 2008 oder SCHÜLER et al., 2007). SCHOBEL (2008) führt in diesem Kontext weiter aus, dass die Landnutzung zu einer Modifikation des substratspezifischen Abflussprozesses führt, indem vor allem Einfluss auf die Oberflächeneigenschaften, wie etwa die Infiltrationsleistung, ausgeübt wird.

Während der Geländestudien wurden vier verschiedene Nutzungsvarianten untersucht. Dabei wurde der Schwerpunkt gemäß der Fragestellung der vorliegenden Arbeit, auf bewaldete Standorte gelegt. Abb. 5.37 zeigt die ermittelten dominierenden Abflussprozesse aller Standorte in Abhängigkeit von der Landnutzung. Für die forstlich genutzten Test-Plots wird deutlich, dass sowohl Tiefensickerungsprozesse als auch Zwischenabflussprozesse verschiedener Ausprägung (tief, stark verzögert, verzögert) als dominante Abflussprozesse auftreten; ferner wurden vereinzelt stark verzögerte Sättigungsflächenabflüsse ausgewiesen. Am Vergleichsplot FRA-6 (Acker) wurde hingegen HORTON'scher Oberflächenabfluss ermittelt, was eine große Differenz im Abflussverhalten von Wald und landwirtschaftlich genutzten Flächen im Einzugsgebiet Frankelbach anzeigt.

Die Ergebnisse bestätigen die Auffassung diverser Autoren (z. B. HARDER et al., 2007; HERRMANN et al., 1989; SCHOBEL, 2008; SCHWARZ, 1985; TOLDRIAN, 1974), dass Oberflächenabflüsse in Wäldern kaum oder nur unter vorhergehender, starker Sättigung und extremen Niederschlagsereignissen auftreten. Interessant ist in diesem Zusammenhang das Auftreten von HORTON'schem Oberflächenabfluss unter Douglasie (FRA-4), der auf die Hydrophobizität der Streuauflagen zurückgeführt wurde und neben dem auftretenden

Zwischenabfluss eine dominierende Ausprägung aufwies. Hydrophobizität ist nach SAUER (2009) jedoch nicht permanent vorhanden und wird während eines Niederschlagsereignisses reduziert oder aufgehoben. Über ein ganzes Jahr gesehen ist die Ausbildung wasserabweisender Oberflächeneigenschaften ein saisonales Phänomen, welches hauptsächlich in Trockenphasen der Sommermonate zu beobachten ist (z. B. HUFFMAN et al., 2001).

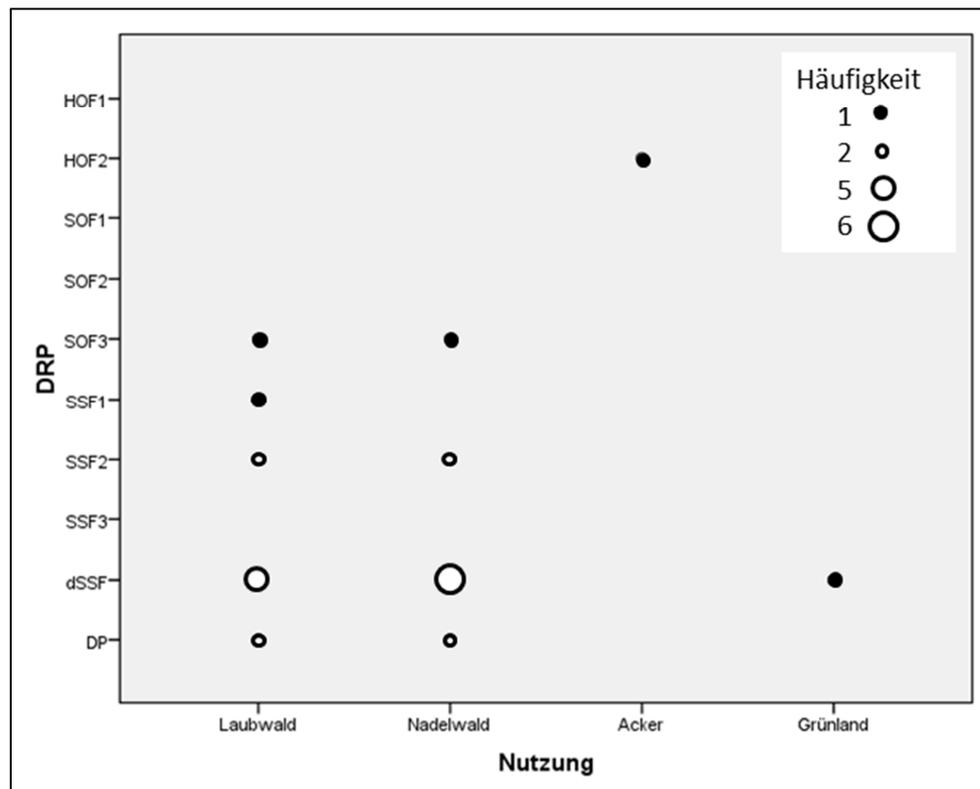


Abb. 5.37: DRP in Abhängigkeit der Nutzungsvarianten der Testgebiete

Bezüglich des Einflussfaktors Landnutzung wird durch die vorgestellten Ergebnisse zusätzlich deutlich, dass nicht nur interspezifische Unterschiede im Abflussverhalten zwischen verschiedenen Landnutzungsarten auftreten, sondern auch intraspezifische Differenzen (speziell auf Forststandorten), bedingt durch unterschiedliche Nutzungskonzepte und -intensitäten, ermittelt werden. Die Standortauswahl ist daher, speziell im Zusammenhang mit einer nachhaltig ökologischen sowie ökonomischen Waldbewirtschaftung sehr wichtig.

Oftmals liegt der Grund für einen schlechten Wasserhaushalt und das damit verbundene nachteilige Abflussgeschehen einzelner Forststandorte in einer negativ zu bewertenden Wahl des Standortes für die Anpflanzung von Bäumen (HÜMANN et al., 2010a). Die Landnutzungshistorie lehrt uns diesbezüglich, dass Wälder meist auf Standorten mit schlechten bodenkundlichen Grundvoraussetzungen wie z. B. Flachgründigkeit, Wasserstau oder geringer Feldkapazität etabliert wurden, während die Böden besserer Ausprägung für die

landwirtschaftliche Nutzung vorbehalten sind (HÜMANN, 2008; SCHOBEL et al., 2007; SCHULTE-KARRING, 1999). In der Folge dieser Standortauswahl mit negativen Wachstumsvoraussetzungen tragen Waldgebiete v. a. durch schnelle Zwischenabflussprozesse sowie Sättigungsoberflächenabflüsse zur Hochwasserentstehung bei (SCHOBEL et al., 2007). Repräsentatives Beispiel für solche sogenannten Niederertragsstandorte ist der in der Vergangenheit landwirtschaftlich genutzte und hierdurch nachhaltig überprägte Test-Plot FRA-2 (30a-Aufforstung). Trotz einer 30-jährigen Entwicklungszeit der angepflanzten Buchen und Eichen, haben sich die physikalischen Bodeneigenschaften im Vergleich zum nebenliegenden rezenten Acker-Plot nicht nachweislich verbessert. Zudem weisen die aufgeforsteten Bäume, bedingt durch die negativen Wachstumsvoraussetzungen, eine Pflanzenphysiologie auf, welche weit hinter ihrem potentiellen Entwicklungsgrad liegt.

Um solche Standorte hinsichtlich des Abflussgeschehens zu verbessern und für eine ökologisch sowie ökonomisch wertvolle Pflanzenentwicklung vorzubereiten, kann eine Melioration, z. B. durch Tieflockerungsmaßnahmen, vor der eigentlichen Aufforstung nur empfohlen werden. SCHULTE-KARRING (1999), HÜMANN (2008) und MÜLLER (2010) konnten nachweisen, dass eine einmalige, physikalisch tiefreichende Lockerung von Niederertragsböden im Vorfeld der Aufforstung oder Ackerbewirtschaftung das Wachstumspotential maßgeblich steigert und die Gefahr von Ausfällen oder Kümmerwuchs deutlich verringert. Zudem wird der Baumbestand auf künftige Folgen des Klimawandels, wie z. B. Trockenstress durch sehr wahrscheinlich häufiger auftretende Trockenperioden und Hitzewellen (IPCC, 2007), vorbereitet. Dies geschieht durch die Beseitigung von Stauwasserbeeinflussung und die gleichzeitige Optimierung des Wasserspeichervermögens bis in den tieferen Unterboden. Eine Amortisierung der zusätzlich investierten Kosten erfolgt dabei schon innerhalb weniger Jahre (HÜMANN et al., 2010a).

Schlussfolgernd wird dem Faktor Landnutzung ein generell großer Einfluss auf die Abflussbildung bestätigt.

Baumart

Die Nutzung eines Forststandortes wird vornehmlich durch die Baumart definiert. Daher ist dieser Faktor, neben dem grundlegenden Zustand der vergesellschafteten Böden, als weiteres Kriterium für die in einem Wald auftretenden Abflussprozesse zu nennen. Der vorherrschende Waldtyp (Laub- oder Nadelwald) und die hierdurch bedingte Durchwurzelung des Bodens (Flachwurzler oder Tiefwurzler) scheinen jedoch bei Betrachtung der ermittelten DRP kaum relevant im Hinblick auf die Abflussgenerierung. Die auf Basis der Geländeuntersuchungen

am häufigsten ausgewiesenen Prozesse dSSF und SSF3 werden in beiden Waldtypen gleichermaßen generiert. FOELSTER et al. (1991) und RASTIN (1991) fanden diesbezüglich heraus, dass Douglasien und Fichten in Braunerden ebenfalls recht große Durchwurzelungstiefen erreichen können. Ein nachteiliger Effekt vorhandener Koniferen auf die Abflussbildung vergleichbarer Standorte ist demnach generell nicht zu erwarten. Jedoch weisen LÜSCHER und ZÜRCHER (2003) darauf hin, dass die Durchwurzelung und die damit verbundene Porenstruktur sehr schwer zu quantifizieren sind, wodurch auch die Einschätzung des Effektes der Wurzelstruktur auf die Abflussbildung erschwert wird.

Durch die Berechnungsversuche sowohl im Einzugsgebiet Frankelbach als auch im Testgebiet Holzbach wurden geringere Abflusskoeffizienten der Douglasien- und Fichtenbestände (FRA-4, FRA-5, HOL-5, HOL-6) verglichen mit jenen der Laubwaldbestände nachgewiesen. Basierend auf den Ausführungen zum geologischen Ausgangssubstrat bzw. dem bodenphysikalischen Zustand dieser Plots, muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Ausprägung der Bodentypen und der einzelnen Profile (Mächtigkeit, Grobbodenanteil, Anzahl präferentieller Fließpfade) sehr wahrscheinlich größeren Einfluss auf die Resultate der Berechnungen hatte als die vorherrschende Baumart und deren Wurzelsystem.

SCHUME et al. (2003) zeigten, dass der Abfluss eines Stagnosols unter Fichte im Vergleich zu Buche verzögert auftritt. Erklärt wird der schnellere Abfluss des Buchenbestandes durch ein tieferes und intensiver verzweigtes Wurzelsystem in Kombination mit einer höheren biologischen Aktivität. Insgesamt bildete der Laubwald in diesem Fall ein gut entwickeltes Makroporensystem in der ansonsten sehr dichten Matrix aus, das dem Wasser präferentielle Fließpfade bot. Hierdurch trat der Abfluss, verglichen zum Nadelwaldbestand, früher in Erscheinung. Ein weiterer Grund für den in dieser Studie schnell auftretenden Abfluss des Laubwaldbestandes ist mit großer Wahrscheinlichkeit der Stammabfluss. Dieser kann nach aktuellen Studien von SCHWÄRZEL et al. (2011) mit bis zu 20 % des Jahresniederschlages zur Wasserbilanz beitragen. Des Weiteren führen SCHWÄRZEL et al. (2011) aus, dass bei Starkregenereignissen die Senk- und Zugwurzeln der Buche den Stammabfluss kanalisieren und hierdurch schnelle Zwischenabflüsse begünstigt werden. Zu beachten ist jedoch, dass der von SCHUME et al. (2003) untersuchte Stagnosol als vorherrschender Bodentyp für das Pflanzenwachstum sehr spezielle Voraussetzungen bietet, die nicht als Regel angesehen werden können.

Präferentielle Fließpfade, welche hauptsächlich durch die Wurzelentwicklung der Bäume gebildet werden, wurden ebenfalls durch die Berechnungsexperimente als wichtiger Faktor der Abflussbildung identifiziert. NORDMANN et al. (2009) stellten diesbezüglich heraus, dass die

Wurzelentwicklung als Schlüsselfaktor bei der Erschließung von Böden zu beachten ist. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu bedenken, dass bei generell flachgründigen und pseudovergleyten Standorteigenschaften, welche in großen Teilen der deutschen und luxemburgischen Mittelgebirge aufzufinden sind, selbst durch eine Baumartenumstrukturierung nicht mit einer wesentlichen Verbesserung der Standortverhältnisse zu rechnen ist (SCHOBEL, 2008).

Eine positive wechselseitige Beziehung zwischen Boden und Baumwurzel ist demnach nur dann gegeben, wenn dem Baum die bestmöglichen Voraussetzungen geboten werden und eine ideale Baumartenwahl für den betreffenden Standort erfolgt.

Infiltration

Stellt man die Infiltrationsraten aller Standorte der Einzugsgebiete gegenüber (Abb. 5.38), so wird ersichtlich, dass die Annahme einer generell hohen Infiltrationsleistung von Waldböden (CHANG, 2003) durchaus bestätigt werden kann. Auf 21 von 25 Test-Plots (84 % aller Standorte), wurden basierend auf der Klassifikation nach WOHLRAB et al. (1992; Tab. 4.3), sehr hohe Infiltrationsraten nachgewiesen. Sehr auffällig sind hierbei die überaus hohen Werte des Testgebietes Weierbach. Zurückzuführen ist dies auf die sehr locker gelagerten Braunerden des Untersuchungsgebietes und den Grobbodenanteil von bis zu 80 Gew.-%. Lediglich drei Standorte der übrigen Einzugsgebiete (FRA-3, HOL-2, HOL-3) wiesen geringere, jedoch immer noch als hoch zu klassifizierende Infiltrationsraten auf (300 cm d⁻¹ bis 501 cm d⁻¹).

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass neben den Waldstandorten auch auf dem Ackerstandort (FRA-6) eine sehr hohe Infiltrationsrate nachgewiesen wurde (Abb. 5.5). Wie zuvor beschrieben, variierten die Werte der Einzelerperimente jedoch aufgrund der Verteilung von Schrumpfrissen und biogenen Makroporen auf der Bodenoberfläche sehr stark. Die während natürlicher Niederschläge auftretende und durch die Infiltrationsexperimente nicht erfassbare Verschlämmung unter Ackernutzung darf angesichts der hohen Infiltrationsraten nicht außer Acht gelassen werden. Jene führt zu einer dramatischen Reduzierung des Infiltrationsvermögens und zur Bildung von Oberflächenabfluss (SCHRÖDER, 2000).

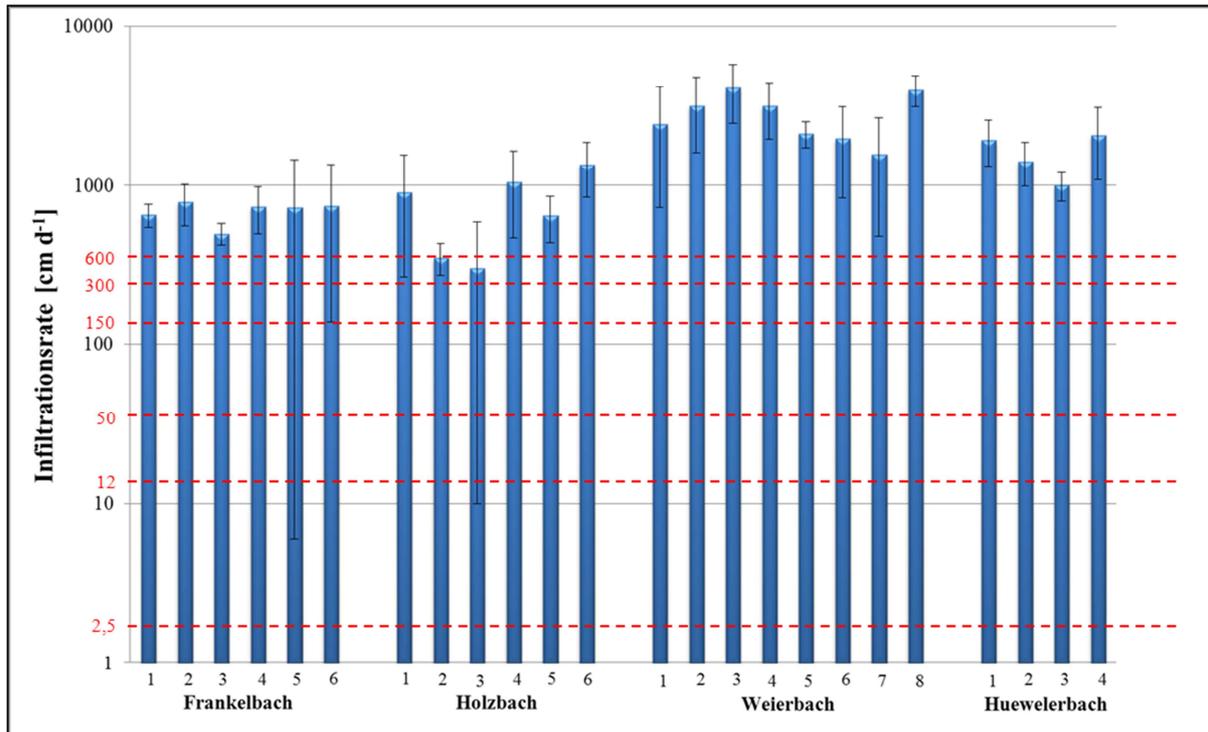


Abb. 5.38: Gegenüberstellung der Infiltrationsraten aller Standorte der vier Testgebiete (gestrichelte Linien markieren die Klassifikationsgrenzen nach WOHLRAB et al. (1992) siehe Tab. 4.3)

Auch im Wald wurden deutliche Unterschiede im Infiltrationsvermögen einzelner Standorte nachgewiesen. Diese bewegten sich jedoch meist im hohen bis sehr hohen Wertebereich. Zudem ist davon auszugehen, dass die schützende Humusbedeckung des Waldbodens einer Beeinträchtigung der Infiltrationsrate durch Verschlammungsprozesse entgegenwirkt.

Die Generierung von Oberflächenabflüssen im Wald ist aufgrund hoher Infiltrationsraten generell nicht zu erwarten. Die Ausnahmen bilden spezielle natürliche Faktoren, wie die Ausbildung hydrophober Oberflächeneigenschaften nach lang anhaltender Trockenheit (BISDOM et al., 1993; ZUBER, 2007) oder anthropogene Einflüsse, etwa Verdichtungen der Bodenoberfläche durch intensive Waldarbeiten während der Ernte oder nach Kahlschlägen (NEMESTOTHY, 2009; SCHÜLER, 2005a; SCHOBEL, 2008).

Berechnungsversuche

Ein Vergleich der Berechnungsversuche ist durch eine unterschiedliche Einzugsgebietscharakteristik der vier Untersuchungsgebiete, bezogen auf Geologie, Bodeneigenschaften, klimatische Verhältnisse und Nutzung, nur eingeschränkt möglich. Dennoch konnte gezeigt werden, dass bewaldete Standorte in Hanglage bei einer natürlichen, ungestörten Ausprägung des Bodens meist Zwischenabflussprozesse (tief oder verzögert) generieren; und dies über verschiedene Baumartenzusammensetzungen hinweg (Abb. 5.39).

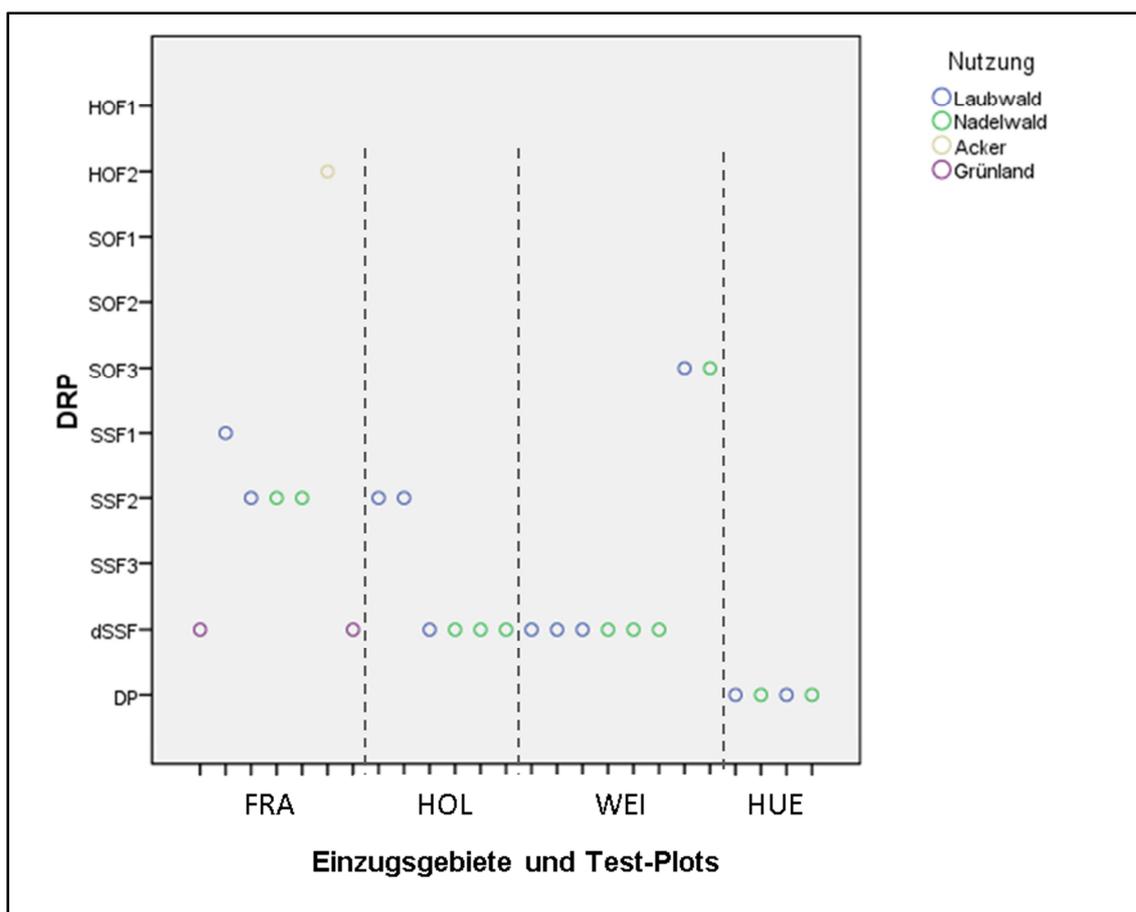


Abb. 5.39: DRP in Abhängigkeit des Standortes und der Nutzung (Resultat Beregnungsexperimente)

Dennoch wurden große intraspezifische Unterschiede im Abflussverhalten der hiesigen Wälder nachgewiesen, die jeweils von den spezifischen Standorteigenschaften determiniert werden. Daher können generelle Aussagen zum Abflussverhalten von Waldstandorten, welche durch die Resultate der Beregnungsexperimente getroffen werden können, wie folgt formuliert werden.

Ist die Hangneigung eines Waldstandortes gering, das Infiltrationsvermögen gut und das geologische Ausgangsgestein durchlässig, neigt dieser Standort typischerweise zur Tiefensickerung. Ist der Unterboden bedingt durch undurchlässiges Gestein, Deckschichtendynamik oder vorhergehende andersartige Nutzung beeinträchtigt (z. B. durch Verdichtungen des Unterbodens aufgrund früherer intensiver Ackerbewirtschaftung), so sind Zwischenabflüsse typisch und die Entstehung oberflächlicher Abflussprozesse durch Sättigung oder Infiltrationsüberschuss durchaus möglich. Steigt der Neigungswinkel solcher, im Unterboden dichter Standorte, entsteht vermehrt schnell reagierender Zwischenabfluss, der durch präferentielle Fließpfade schnell dem Vorfluter entgeengebracht wird. Wird das Infiltrationsvermögen zudem negativ beeinflusst (z. B. durch längere Trockenheit bedingte

Hydrophobizität des Standortes), ist das Auftreten von HORTON'schem Oberflächenabfluss im Falle von Starkregen auch in Wäldern möglich.

Die Resultate der Kleinberechnungen auf den unterschiedlichen Test-Plots der vier Einzugsgebiete zeigten, hinsichtlich oberflächlicher Abflüsse, ein vergleichbares Bild zu den Ergebnissen der Großberechnungen. Auch hier traten in trockenen Sommermonaten Oberflächenabflüsse in Nadel- und Laubwäldern auf, die auf wasserabweisende Oberflächeneigenschaften (sog. water repellency) zurückgeführt wurden. Waren die Plots hingegen in Wintermonaten durch natürliche Niederschläge vorbefeuchtet oder mit Moos bewachsen, wurde kein Abfluss ermittelt. Die in Kapitel 5.1.1 erwähnten Studien von HOLTHOF (2011), PETER (2011) und WEILER (2011) bestätigen diesen jahreszeitenabhängigen Trend auch in weiteren Testgebieten des deutschen Mittelgebirges.

Speziell die Witterungsbedingungen bzw. die Vorfeuchte des Bodens ist für die Ausbildung dominierender Abflussprozesse demzufolge von großer Wichtigkeit, was durch zahlreiche Arbeiten bestätigt wird (z. B. SYMADER & KREIN, 2000; CHIFFLARD et al., 2004; CHIFFLARD, 2006 oder TROCH et al., 1993). Das bedeutet, dass an einem Standort bei unterschiedlichen witterungsbedingten Voraussetzungen verschiedene Abflussprozesse generiert werden können. Ein dominierender Abflussprozess eines Standortes muss demgemäß nicht zwangsläufig über das gesamte Jahr hinweg als Hauptabflussprozess auftreten, was eine Dynamik der DRP impliziert, welche bisher nicht in GIS-DRP inbegriffen ist. Eine Implementierung dieses Parameters in das GIS-Tool wäre daher wünschenswert, um ein breiteres Spektrum von Grundvoraussetzungen und die Dynamik der Abflussprozesse eines Einzugsgebietes abdecken und darstellen zu können.

Abflussprozesskartierungen

Insgesamt wurden die verschiedenen Ansätze zur Abflussprozesskartierung an 25 Standorten im Gelände sowie computerbasiert im Modell durchgeführt. Dabei ergab die Ausweisung durch GIS-DRP nur drei von insgesamt zehn dominierenden Abflussprozessen, die zur Charakterisierung der Standorteigenschaften zur Verfügung stehen (Tab. 5.17).

Fünf Abflussprozess-Varianten wurden durch die Anwendung der PBS nach SCHERRER (2006) ausgewiesen, während es durch die Geländeuntersuchungen zur Ausweisung sechs verschiedener Prozesse kam. Insgesamt dominiert der Prozess SSF2, sowohl bei GIS-DRP (76 %) als auch bei der PBS-Anwendung (60 %). Der in GIS-DRP und PBS nicht implementierte Prozess dSSF wurde in 48 % der Fälle als dominierend durch die Geländeuntersuchungen ausgewiesen.

Um der Frage nachzugehen, in welchen Einzugsgebieten oder an welchen Standorten sich die größten Unterschiede bzw. Übereinstimmungen der verschiedenen Identifikationsmethoden ergeben und wie man das Tool hinsichtlich einer genaueren DRP-Ausweisung weiterentwickeln kann, werden im folgenden Kapitel 5.2 die erstellten GIS-DRP-Karten gesondert betrachtet.

Tab. 5.17: Vergleich der verschiedenen DRP-Ausweisungen aller Standorte (n =25)

DRP	GIS-DRP [n (%)]	PBS (Scherrer) [n (%)]	DRP (Gelände) [n (%)]
HOF1	- ¹	-	-
HOF2	-	1 (4)	1 (4)
SOF1	-	-	-
SOF2	-	-	-
SOF3	2 (8)	2 (8)	2 (8)
SSF1	-	-	1 (4)
SSF2	19 (76)	15 (60)	5 (20)
SSF3	-	-	-
dSSF	-	2 (8)	12 (48)
DP	4 (16)	5 (20)	4 (16)

¹ nur Modellierungsergebnisse mit n > 0 sind tabelliert

5.2 Validierung und Weiterentwicklung von GIS-DRP

Eine Validierung von digital erzeugten Kartenwerken ist unerlässlich, um die Genauigkeit des digitalen Modells hinsichtlich der Realitätsnähe zu überprüfen und etwaige Fehlerquellen zu eruieren. Auf Grundlage der Validierung sollen Parameter bestimmt werden, die zur Weiterentwicklung des digitalen Werkzeuges dienlich sind. Im Folgenden werden daher die mittels GIS-DRP erstellten Abflussprozesskarten der einzelnen Untersuchungsgebiete anhand der Ergebnisse der Abflussprozesskartierung nach PBS und der Geländeuntersuchungen validiert.

5.2.1 Validierung der GIS-DRP-Karten

Die Kartenausschnitte (Abb. 5.40a bis Abb. 5.40c) der GIS-generierten Abflussprozesskarten der Einzugsgebiete Frankelbach, Holzbach und Weierbach sowie die tabellarische Auflistung der Anwendungsergebnisse der verschiedenen Abflussprozesskartierungen (Tab. 5.18) zeigen, dass nach GIS-DRP 18 von insgesamt 21 Test-Plots dieser drei Untersuchungsgebiete durch den Abflussprozess SSF2 (verzögerter Zwischenabfluss) charakterisiert wurden. Niederschlagswasser infiltriert demnach in den Boden und wird im Unterboden, z. B. durch dichtlagernde Horizonte, lateral abgelenkt. Die zeitliche Reaktion des Abflussprozesses findet, durch die Wirkung des Bodens als Zwischenspeicher und Puffer, verzögert zum Niederschlagsereignis statt.

Insgesamt kann hier von einem grundlegend plausiblen Ergebnis ausgegangen werden. Die für Mittelgebirgsregionen typische Fließerdynamik und die hierdurch im Pleistozän entstandenen Lagen unterschiedlicher Durchlässigkeit (z. B. im Bereich des Übergangs von Haupt- zu Basislage), begünstigen Zwischenabflüsse durch laterale Ablenkung des perkolierenden Wassers im Boden.

Die Abflussprozesskartierungen nach PBS ergaben für alle Untersuchungsgebiete sehr ähnliche Resultate wie jene von GIS-DRP. Eine völlige Übereinstimmung der Standortcharakterisierung konnte im Testgebiet Weierbach sowie im Huelwelerbach erzielt werden. Im Einzugsgebiet Holzbach sind leichte Abweichungen zu den GIS-DRP-Resultaten auf den Standorten HOL-1 und HOL-2 zu erkennen. Die, um eine Klasse abweichende, Einschätzung der zeitlichen Reaktion des Zwischenabflusses (GIS / SSF2 zu PBS / SSF3) basiert an diesen beiden Standorten auf dem Vorhandensein von Hydromorphie Merkmalen, die in die Klassifizierung nach PBS mit eingehen und so den resultierenden Abflusstyp beeinflussen.

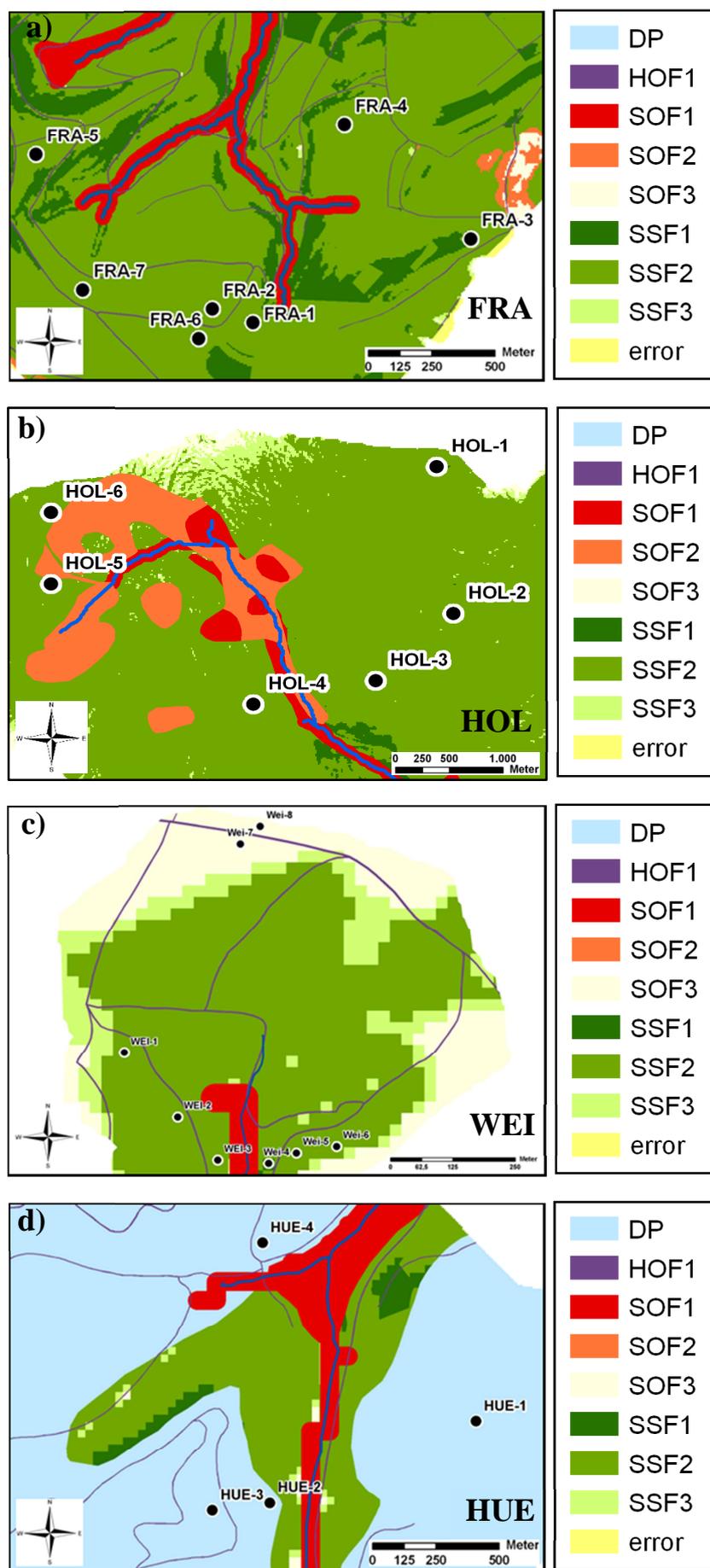


Abb. 5.40a - d: Ausschnitte aus den GIS-DRP-Abflussprozesskarten der vier Test-Gebiete

Tab. 5.18: Vergleich der versch. Abflussprozessidentifikationen aller Testgebiete und Standorte

Plot	GIS-DRP	PBS (Scherrer)	DRP (Gelände)	Schüler (2006)²³
FRA-1	SSF2	SSF2	dSSF	DSSF/Hot Spot
FRA-2	SSF2	SSF2	SSF1/SOF2	SSF2
FRA-3	SSF2	SSF2	SSF2	SSF2
FRA-4	SSF2	SSF2	SSF2/HOF1	SSF2
FRA-5	SSF2	SSF2	SSF2	SSF2
FRA-6	SSF2	HOF2	HOF2	HOF1
FRA-7	SSF2	SSF2	dSSF	SSF2
HOL-1	SSF2	SSF3	SSF2	-
HOL-2	SSF2	SSF3	SSF3	-
HOL-3	SSF2	SSF2	SSF3	-
HOL-4	SSF2	SSF2	dSSF	-
HOL-5	SSF2	SSF2	dSSF	-
HOL-6	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-1	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-2	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-3	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-4	SSF3	SSF3	dSSF	-
WEI-5	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-6	SSF2	SSF2	dSSF	-
WEI-7	SOF3	SOF3	SOF3	-
WEI-8	SOF3	SOF3	SOF3	-
HUE-1	DP	DP	DP	-
HUE-2	DP	DP	DP	-
HUE-3	DP	DP	DP	-
HUE-4	DP	DP	DP	-

Eine deutliche Abweichung zwischen GIS-DRP und PBS-Klassifikation zeigte lediglich Test-Plot FRA-6 (Acker) des Einzugsgebietes Frankelbach, der sich mit HOF2 (verzögerter HORTON'scher Oberflächenabfluss) klar von dem durch GIS-DRP ausgewiesenen SSF2-Prozess unterscheidet. Begründet werden kann diese Abweichung durch die Berücksichtigung der Oberflächeneigenschaften im Falle der PBS-Anwendung für Ackerstandorte (Anhang

²³ Eine weitere Validierungsgrundlage stellt die für das Einzugsgebiet Frankelbach verfügbare Abflussprozesskarte nach SCHÜLER (2006) dar (Anhang Abb. A13). Erläuterungen folgen im Text (S.133f).

Abb. A5 und Abb. A6). Da hier die Verschlammungsneigung zusammen mit der Makroporosität als Entscheidungskriterium angeführt wird, und beides auf dem Ackerstandort (FRA-6) als hoch bewertet wurde, konnte HOF2 als dominierender Abflussprozess bei lang anhaltenden und kurzen intensiven Niederschlagsereignisse ausgewiesen werden. FRA-6 ist als Ackerstandort zu gewissen Perioden des Jahres von Vegetation unbedeckt und damit vor auftreffendem Regen ungeschützt (Splash-Effekt). Zusätzlich bietet die Bodenart Ls2 (schwach sandiger Lehm) an diesem Plot gute Voraussetzungen für Verschlammungsprozesse. In Phasen unbedeckter Bodenoberflächen führt der auftreffende Niederschlag zur Verschlammung (durch die Beregnungsversuche nachgewiesen), sodass das Wasser nicht in den Boden infiltrieren kann und oberflächlich zum Abfluss kommt. Zwischenabflussprozesse können dann lediglich untergeordnet auftreten. Als dominierender Abflussprozess ist HOF2 daher insgesamt als plausibler einzustufen als etwa SSF2.

Beim Vergleich der GIS-generierten Abflussprozesskarten mit den Ergebnissen der Geländeuntersuchungen (Tab. 5.18) werden größere Differenzen bei der Ausweisung dominanter Abflussprozesse deutlich. Der auffälligste Unterschied besteht darin, dass in den drei Einzugsgebieten Frankelbach, Holzbach und Weierbach durch die bodenhydrologischen Untersuchungen neben den drei bisher definierten Zwischenabflussprozessen (SSF1, SSF2 und SSF3) auch der zusätzlich von SCHÜLER (2006) eingeführte, tiefe Zwischenabfluss (dSSF) charakterisiert wurde. Dieser dSSF-Prozess wurde erstmals durch SCHÜLER (2006) implementiert und bezeichnet Zwischenabflussprozesse, die in tieferen Schichten über dem Grundgestein (sog. „soil-bedrock interface“ nach TROMP-VAN MEERVELD & MCDONNELL, 2006) oder tiefer liegenden periglazialen Deckschichten generiert werden.

Im Falle des Frankelbach Testgebietes werden die Standorte FRA-1 (1-jährige Aufforstung) und FRA-7 (Schneise) mit dSSF klassifiziert. Auf diesen Plots stimmen die bodenkundlichen Ausgangsbedingungen (kolluvial beeinflusste Braunerde; FRA-1 sowie Braunerde aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde; FRA-7) klar mit dem ausgewiesenen, tiefer im Profil verlaufenden Abflussprozess überein.

Die Standorte im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes Holzbach (HOL-4 bis HOL-6) wurden ebenfalls mit dSSF klassifiziert. Ausschlaggebend für diese Entscheidung waren die, im Gegensatz zu den Profilen der östlich gelegenen Test-Plots (HOL-1 bis HOL-3), größeren Profilmächtigkeiten ohne hydromorphe Merkmale, sandigeres Ausgangssubstrat und die sehr geringen Abflusskoeffizienten der durchgeführten Beregnungsversuche.

Die dSSF-Ausweisung der in Hanglage verorteten Standorte im Einzugsgebiet Weierbach (WEI-1 bis WEI-6) basierte auf der generell sehr lockeren Lagerung der Böden sowie auf den

als semipermeabel klassifizierten Deckschichten²⁴ des Untersuchungsgebietes. Hier wird davon ausgegangen, dass die Teildurchlässigkeit der Deckschichten des Testgebietes die Genese von tiefem Zwischenabfluss, der lateral über dem Festgestein verläuft, begünstigt. Da der Prozess dSSF bisher nicht in GIS-DRP implementiert ist, zeigt sich hier Entwicklungsbedarf.

Durch die Geländeuntersuchungen wurde, über die dSSF-Ausweisung hinaus, im Einzugsgebiet Frankelbach am Standort FRA-6 (Acker) die schon beschriebene PBS-Klassifikation (HOF2) bestätigt. Auch der Großberechnungsversuch auf diesem Plot hatte HOF2 zum Ergebnis, welcher durch die Verschlammung der Bodenoberfläche verursacht wurde.

Auf Standort FRA-4 (Douglasie) wurde neben Zwischenabfluss (SSF2) ebenfalls HORTON'scher Oberflächenabfluss (HOF1) als dominierend durch die Berechnungsversuche ermittelt. Der HOF1 dieses Standortes basierte, wie schon in Kapitel 5.1.1 erwähnt, auf Hydrophobizitätseffekten der organischen Streuauflage. Eine Berücksichtigung solcher Effekte in GIS-DRP ist langfristig wünschenswert und bietet Potenzial zur Optimierung.

Im Einzugsgebiet Huewelerbach stimmten die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen ebenso mit den GIS-DRP-Resultaten überein, wie mit der Ausweisung durch die PBS (Tab. 5.18). Der flächenmäßig dominierende Prozess der Tiefensickerung, der eindeutig durch das als permeabel zu klassifizierende Ausgangssubstrat des Lias-Sandsteins (Li2) geprägt ist, kann demnach eindeutig und sicher von GIS-DRP erfasst und ausgewiesen werden.

Zusätzlich zu den genannten Klassifizierungsansätzen, die zur Validierung der GIS-DRP-Resultate herangezogen werden können, ist für das Einzugsgebiet Frankelbach mit der Abflussprozesskarte nach SCHÜLER (2006) eine weitere Validierungsgrundlage verfügbar. Auch hier wird ähnlich den PBS auf den kulminierten, landwirtschaftlich genutzten Randbereichen des Testgebietes HORTON'scher Oberflächenabfluss ausgewiesen (Anhang Abb. A13). Im Falle der Karte basierend auf dem Ansatz nach SCHÜLER (2006), wurden die ackerbaulichen Nutzflächen, wie schon in Kapitel 2.3 angesprochen, mittels bodenkundlicher Kartierung klassifiziert, da die Methode grundsätzlich auf dem Datenmaterial der forstlichen Standortskartierung beruht. Der Grund der HOF1-Ausweisung liegt im Fall der Ackerflächen also in der fachlichen Einschätzung, dass die Flächen und die vorliegenden Bodenarten zur Verschlammung neigen und daher potentiell Oberflächenabflüsse generiert werden.

²⁴ Der im Untersuchungsgebiet vorhandene Schiefer-Verwitterungsschutt wurde im Pleistozän durch Solifluktionsprozesse zu periglazialen Deckschichten umgelagert. Diese sind jedoch nicht, wie für Schiefer üblich, dicht und wasserundurchlässig, sondern durch die lockere Matrix zwischen den groben Bodenbestandteilen bis zu einem gewissen Grad wasserdurchlässig, was mit dem Begriff semipermeabel beschrieben wird.

Trotz der im Vergleich zur detaillierten forstlichen Standortkartierung deutlich generalisierten Datenbasis der GIS-DRP-Methode (DHM, Geologie und Landnutzung) stimmen die Abflussprozesskarten beider Ansätze zu 78,4 % überein. Dennoch wird durch einen Vergleich der Hauptabflussprozesse des Frankelbach Testgebietes eine Fehlinterpretation der Ackerflächen bezüglich des bewerteten dominierenden Abflussprozesses durch GIS-DRP deutlich (Abb. 5.41 und Abb. 3.2). Verschlammungsprozesse werden bisher nicht durch GIS-DRP berücksichtigt. Die Einbindung des Parameters „Verschlammung“ in GIS-DRP scheint demnach sehr wichtig und bietet Modifizierungspotenzial (siehe auch Kap. 5.2.3).

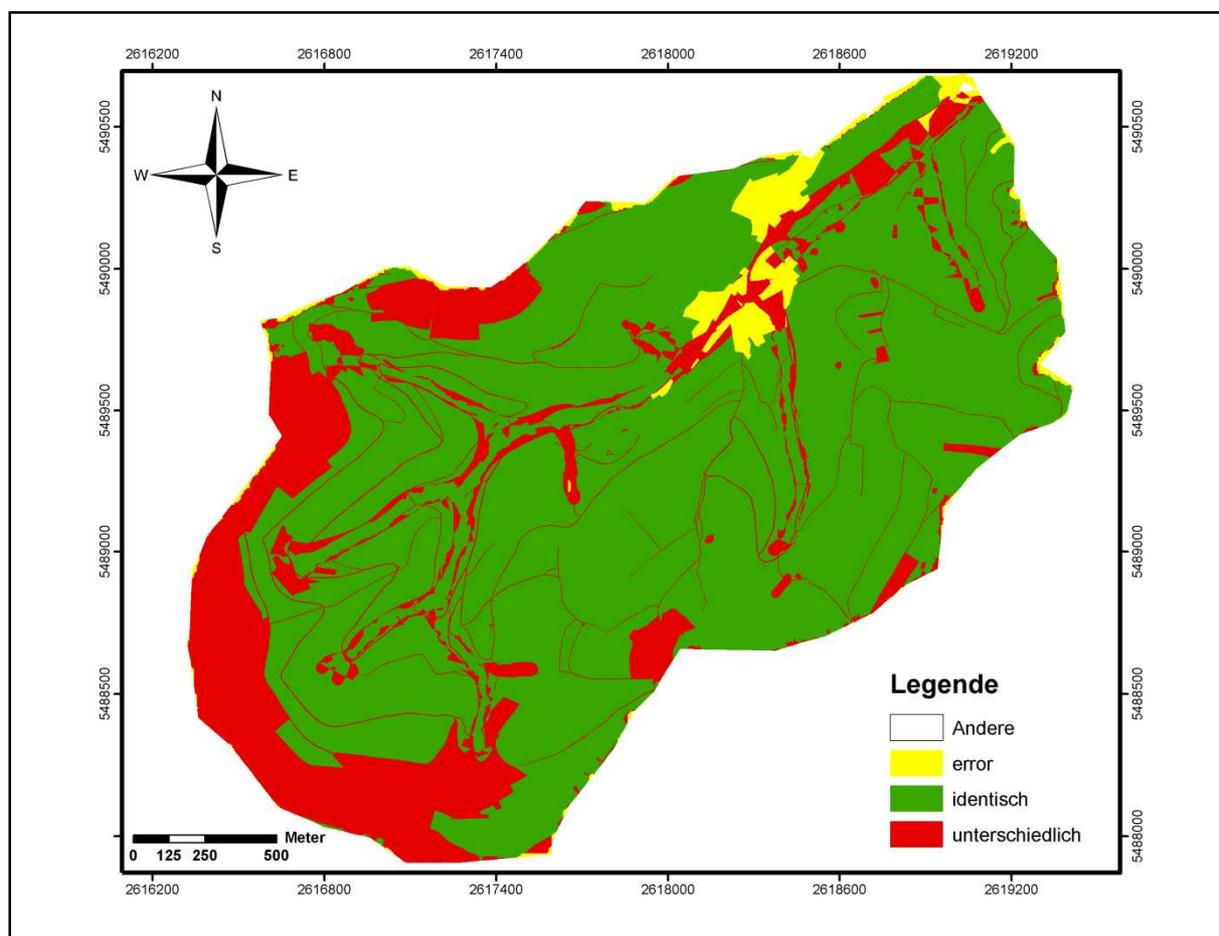


Abb. 5.41: Vergleich der Hauptabflussprozesse zw. GIS-DRP und SCHÜLER (2006) im Einzugsgebiet Frankelbach (Trautmann, 2011; verändert); „error“, da in der Karte nach SCHÜLER (2006) die Siedlungsflächen nicht abflussspezifisch charakterisiert wurden.

5.2.2 Ableitung von Optimierungsansätzen

Insgesamt zeigen die Vergleiche der angewandten Ansätze zur Identifikation und Ausweisung dominierender Abflussprozesse des vorangegangenen Kapitels 5.2.1, dass das digitale GIS-DRP-Tool eine sehr gute Möglichkeit bietet, um flächendeckende Informationen bezüglich des Abflussgeschehens in einem Einzugsgebiet zu erhalten. Mit ähnlicher oder sogar identischer Genauigkeit wie die Anwendung der PBS nach SCHERRER (2006) ist es möglich, konkrete Aussagen zu den Abflussprozessen eines größeren Landschaftsausschnitts zu treffen, ohne genauere Vorkenntnisse zu den Gebietseigenschaften haben zu müssen. Eine Validierung der erstellten GIS-DRP-Karte durch Bohrstock-Kartierung an repräsentativen Punkten im Gelände wird nichtsdestotrotz empfohlen.

Zieht man jedoch die erhobenen Geländeergebnisse in Betracht, so wird deutlich, dass einige, den Abflusstyp mitbestimmende Faktoren (wie z. B. Verschlammungsneigung, Semipermeabilität des Substrates, spezielle Landnutzungseffekte oder Starkregenereignisse), nicht durch GIS-DRP berücksichtigt werden, was zu weniger korrekten oder gar falschen Ergebnissen führen kann. So integriert SCHERRER (2006) die Verschlammungsneigung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, was im Falle des Test-Plots FRA-6 zur korrekten Ausweisung von HOF2 führte. Im Gegensatz dazu lieferte das GIS-DRP-Ergebnis SSF2, welcher durch die Geländeuntersuchungen nicht bestätigt wurde.

Deshalb werden im Folgenden für eine Optimierung relevante Parameter aus dem Vergleich der Ansätze herausgestellt. Diese beziehen sich aufgrund der Ergebnisse nicht ausschließlich auf bewaldete Gebiete, sondern erstrecken sich ebenfalls auf andere Landnutzungsvarianten. Wichtig bei der hier forcierten Weiterentwicklung des Tools ist, dass weiterhin mit der identischen Datenbasis (DHM, Geologie, Landnutzung) gearbeitet wird, um im Sinne der Grundidee von MÜLLER et al. (2009) nur mit flächenhaft (frei) verfügbaren Daten zu agieren. Es sollen keine weiteren Datengrundlagen wie z. B. Informationen aus genauen Bodenkarten oder der forstlichen Standortaufnahme implementiert werden, da GIS-DRP als ubiquitär einsetzbares Werkzeug ausgebaut werden soll.

1.) Verschlammungsneigung:

Verschlammung spielt in bewaldeten Arealen in denen die Bodenoberfläche durch organische Streuauflagen geschützt ist keine bedeutende Rolle (z. B. LUA, 2010). Anders stellt sich die Situation auf landwirtschaftlich genutzten Flächen dar (IEEP & ALTERRA, 2010). Wie am Beispiel des Standortes FRA-6 (Acker) gezeigt werden konnte, vermindert bzw. verhindert Verschlammung die Infiltration von

Niederschlagswasser und führt demzufolge zur Genese von HORTON'schem Oberflächenabfluss (HOF1 / HOF2). Eine weitere Folge ist die Erosion von Bodenmaterial. Um das GIS-DRP-Tool diesbezüglich zu optimieren, sollte die Ausweisung der DRP im Falle ackerbaulicher Nutzung verbunden mit einem geringen Bedeckungsgrad abgeändert werden.

2.) Niederschlagsintensität / Extrem-Ereignisse:

Da Flächen in trockenen Sommermonaten anders auf Niederschläge verschiedener Intensitäten reagieren als in feuchten Winterperioden, ist es sinnvoll, die Stärke eines Regenereignisses in Verbindung mit der vorherrschenden Jahreszeit, dem Bedeckungsgrad und der Permeabilität der Fläche in GIS-DRP zu implementieren. So können Ereignisse mit einer insgesamt geringen Intensität von solchen mittlerer oder sehr starker Ausprägung unterschieden und im Hinblick auf die jeweilige DRP-Generierung abgeschätzt werden.

Eine solche Unterteilung ist wichtig, da schon jetzt über vielen Landflächen die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen zugenommen hat (IPCC, 2007) und diese Starkregen andere Abflussprozesse bedingen als schwache oder mäßige Ereignisse. Auch für die Zukunft sind häufigere Extrem-Ereignisse als sehr wahrscheinlich eingestuft worden (IPCC, 2007). Daher ist es zweckmäßig und nicht nur für ein nachhaltiges Waldmanagement bedeutend die Reaktion verschiedener Flächen bei extremen Niederschlagsereignissen abschätzen zu können.

Hierbei sollte auf eine reale Einschätzung der Flächeneigenschaften geachtet werden (Bedeckungsgrad, Substrateigenschaften, Nutzung, etc.), da gerade in sommerlichen Trockenperioden Faktoren wie z. B. Hydrophobizität auftreten können, welche die Abflussprozesse auch in Wäldern negativ beeinflussen.

3.) Semipermeabilität:

Auf elf von insgesamt 25 Test-Plots wurde durch die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen dSSF als DRP ausgewiesen. Dieser Prozess setzt voraus, dass vorhandene Deckschichten oder das geologische Ausgangssubstrat eine Teildurchlässigkeit für Wasser aufweisen. Durch das Vorhandensein dieser Schichten perkoliert das infiltrierte Niederschlagswasser durch das teildurchlässige Substrat bis es darauffolgend auf tiefer liegenden, dichtlagernden Schichten lateral abgeleitet wird. Die Semipermeabilität des Substrates soll demnach in GIS-DRP integriert werden, um Flächen identifizieren zu können, die tiefen Zwischenabfluss (dSSF) als Hauptabflussprozess generieren.

5.2.3 Weiterentwicklung von GIS-DRP

Im Folgenden wird erläutert wie die drei neu zu implementierenden Parameter in GIS-DRP eingeführt werden und welche Änderungen diese in den neuen Abflussprozesskarten der vier Untersuchungsgebiete bewirken. Die Optimierungen werden daran anschließend durch Vergleiche der prozentualen Flächenanteile der verschiedenen Abflussprozesse in den ursprünglichen und den neuen GIS-DRP-Karten verdeutlicht und validiert.

5.2.3.1 Verschlämmungsneigung

Eine Einführung des Parameters *Verschlämmungsneigung* ist generell nur für landwirtschaftliche Nutzflächen relevant. Da solche in dieser Arbeit lediglich im Untersuchungsgebiet Frankelbach vorhanden sind, wird für den zu etablierenden Parameter einzig die GIS-DRP-Karte dieses Einzugsgebiet modifiziert.

Grundvoraussetzung für die Abänderung der Abflussklassifikation ist eine Modifikation der DRP-Basis-Tabelle (siehe Tab. 4.5). Trotz einer hauptsächlich Änderung der Abflussprozesse auf Ackerstandorten werden auch die übrigen Nutzungsvarianten im Vergleich zur dieser DRP-Basis-Tabelle leicht verändert, was erklärt, warum auch Grünland- und Waldnutzung in der abgeänderten Tabelle vertreten sind.

In Tab. 5.19 ist die neue Zuordnung der DRP einzusehen. Im Gegensatz zur ursprünglichen DRP-Basis-Tabelle wurden die Nutzungen Acker und Grünland im Falle impermeablen Untergrundes getrennt. Der Prozess HOF2 (verzögerter HORTON'scher Oberflächenabfluss) tritt nun bei Ackerland mit impermeablem Ausgangssubstrat auf. Es wird dabei im Bereich geringer Hangneigungen (0 - 3 % und 3 - 5 %) auf eine weitere Unterteilung der Abflussklassifikation verzichtet, da es auch hier zu Verschlammungsprozessen kommen kann. Die Infiltration wird demnach auch hier verhindert, was zur Bildung von Oberflächenwasser führt. Dieses kann, einmal in Hangbereiche transferiert (Vernetzungsprozesse des oberflächlichen Wassers), zur Generierung von Oberflächenabfluss beitragen. HOF1 wird weiterhin im Bereich von Siedlungsflächen und Straßen ausgewiesen. Auf als permeabel bewerteten Ackerflächen wurden die Abflussprozesse ebenfalls modifiziert, da die auftretende Verschlammung dazu führt, dass kein Niederschlagswasser in den Boden gelangt, um dort in tiefere Profilmereiche zu versickern. Im Wald und auf Grünland wird bei permeablen Bedingungen weiterhin davon ausgegangen, dass die Streuauflage bzw. der Bewuchs die Bodenoberfläche vor dem Auftreffen der Regentropfen schützt und das Niederschlagswasser nach dem Infiltrationsvorgang in tiefere Schichten perkoliert (DP).

Tab. 5.19: DRP-Ausweisung *Verschlämmungsneigung*

Hang- neigung [%]	impermeabel	impermeabel	impermeabel	permeabel	permeabel
	Acker	Grünland	Wald	Acker	Grünland + Wald
0-3	HOF 2	SOF 2	SOF 3	HOF 2	DP
3-5	HOF 2	SOF 2	SSF 3	HOF 2	DP
5-20	HOF 2	SSF 1	SSF 2	HOF 2	DP
20-40	HOF 2	SSF 1	SSF 1	HOF 2	DP
> 40	HOF 2	SSF 1	SSF 1	HOF 2	DP

Wie schon in Kapitel 2.4 erläutert, gilt die DRP-Basis-Tabelle für fünf Ereignisklassen, also Kombination aus Niederschlagsintensität, Jahreszeit und Bedeckungsgrad.

Die neue DRP-Ausweisung (Tab. 5.19) ist durch die Anpassung an den Parameter *Verschlämmungsneigung* auf permeablen sowie impermeablen Ackerstandorten abgeändert worden. Diese Modifikation der DRP-Charakterisierung beinhaltet hinsichtlich der Ereignisklassen eine gleichzeitige Adaption an zwei zuvor nicht vorhandene Kombinationen. Bei geringem Bedeckungsgrad wirken Niederschläge unterschiedlicher Intensitäten stärker auf die Bodenoberfläche und begünstigen somit die Verschlämmung.

Zusätzlich werden daher die folgenden Ereignisklassen abgedeckt:

- VI. lange extensive Niederschläge im Sommerhalbjahr (< 50 % Bedeckungsgrad)
- VII. kurze intensive Niederschläge im Winterhalbjahr (< 50 % Bedeckungsgrad).

GIS-DRP-Karte *Verschlämmungsneigung* Frankelbach (Abb. 5.42)

Der wesentliche Unterschied zur ursprünglichen GIS-DRP-Karte dieses Gebietes (Abb. 5.11) wird in der optimierten Karte (Abb. 5.42) vor allem durch den Anteil hell-lila gefärbter Flächen an den Einzugsgebietsrändern deutlich. Hier werden basierend auf der neuen Klassifikation auf ackerbaulich genutzten Flächen hohe Verschlämmungsneigungen angenommen, was bei Niederschlag und gleichzeitig geringem Bedeckungsgrad zu verzögertem HORTON'schen Oberflächenabflüssen führt. Der Anteil der prognostizierten HOF-produzierenden Flächen steigt somit von 1,7 % in der ursprünglichen (Tab. 5.8) auf 24,4 % (HOF1 und HOF2 zusammen) in der modifizierten GIS-DRP-Karte (Abb. 5.42; Tab. 5.20) an. Im Gegensatz dazu verringert sich vor allem der Anteil an SSF2-Flächen von

vorher 77,7 % auf nun 47,3 %. Die Flächenanteile der SSF1, SSF3 und SOF dominierten Areale bleibt hingegen annähernd gleich.

Die in Kapitel 5.2.1 angesprochene Fehlinterpretation der Abflussprozesse auf den kulminierten, landwirtschaftlich genutzten Flächen wird durch die Optimierung *Verschlämmungsneigung* korrigiert. In der neuen Karte wird demnach eine weitere Übereinstimmung von Geländeuntersuchungen, Klassifizierung nach PBS sowie der GIS-generierten Abflussprozesskarte am Ackerstandort FRA-6 verzeichnet. Dies zeigt, dass Landnutzungseffekte, besonders der ackerbaulichen Nutzung, durch die verbesserte Karte besser berücksichtigt werden. Das führt zu einer allgemein genaueren Abbildung der dominierenden Abflussprozesse in einem Einzugsgebiet durch das GIS-DRP-Tool, was auch durch eine Validierung der optimierten GIS-DRP-Karten in Kapitel 5.2.4 bestätigt wird.

Wird die neue GIS-DRP-Karte *Verschlämmungsneigung* (Abb. 5.42) erneut mit der in Kapitel 2.3 erläuterten und in Kapitel 5.2.1. angeführten Abflussprozessklassifikation nach SCHÜLER (2006) verglichen, so stimmen die an den südwestlichen Einzugsgebietsrändern ausgewiesenen HOF-Flächen der SCHÜLER-Karte (Anhang Abb. A13) nun mit der optimierten GIS-DRP-Karte überein. Dies ist auch im Vergleich der Hauptabflussprozesse nachzuvollziehen (Tab. 5.20; Abb. 5.43). Die prozentuale Übereinstimmung beider Karten steigt insgesamt von 78 % auf ca. 89 %. Das bedeutet, dass die räumliche Verteilung der Abflussprozesse insgesamt genauer eingeschätzt wurde. Der verbleibende Unterschied der HOF-Flächen beider Karten besteht in der Reaktionsgeschwindigkeit des Abflussprozesses. Der HOF2 der GIS-DRP-Karte wird im Vergleich zum HOF1-Prozess der „SCHÜLER-Karte“ bei zuvor nicht verschlammter Bodenoberfläche als der plausible Abflussprozess der Ackerflächen erachtet, da es zuerst durch Splash-Effekte des auftreffenden Niederschlages zu einer Verschlämmung der Bodenoberfläche kommt und erst darauffolgend Oberflächenabfluss generiert wird. Eine zeitliche Verzögerung des Abflussprozesses ist unter solchen Bedingungen demnach zu erwarten. Ist die Bodenoberfläche jedoch durch ein vorheriges Niederschlagsereignis verschlammte oder verkrustet, so führt weiterer Niederschlag zur Generierung von schnell reagierendem HORTON'schem Oberflächenabfluss (HOF1).

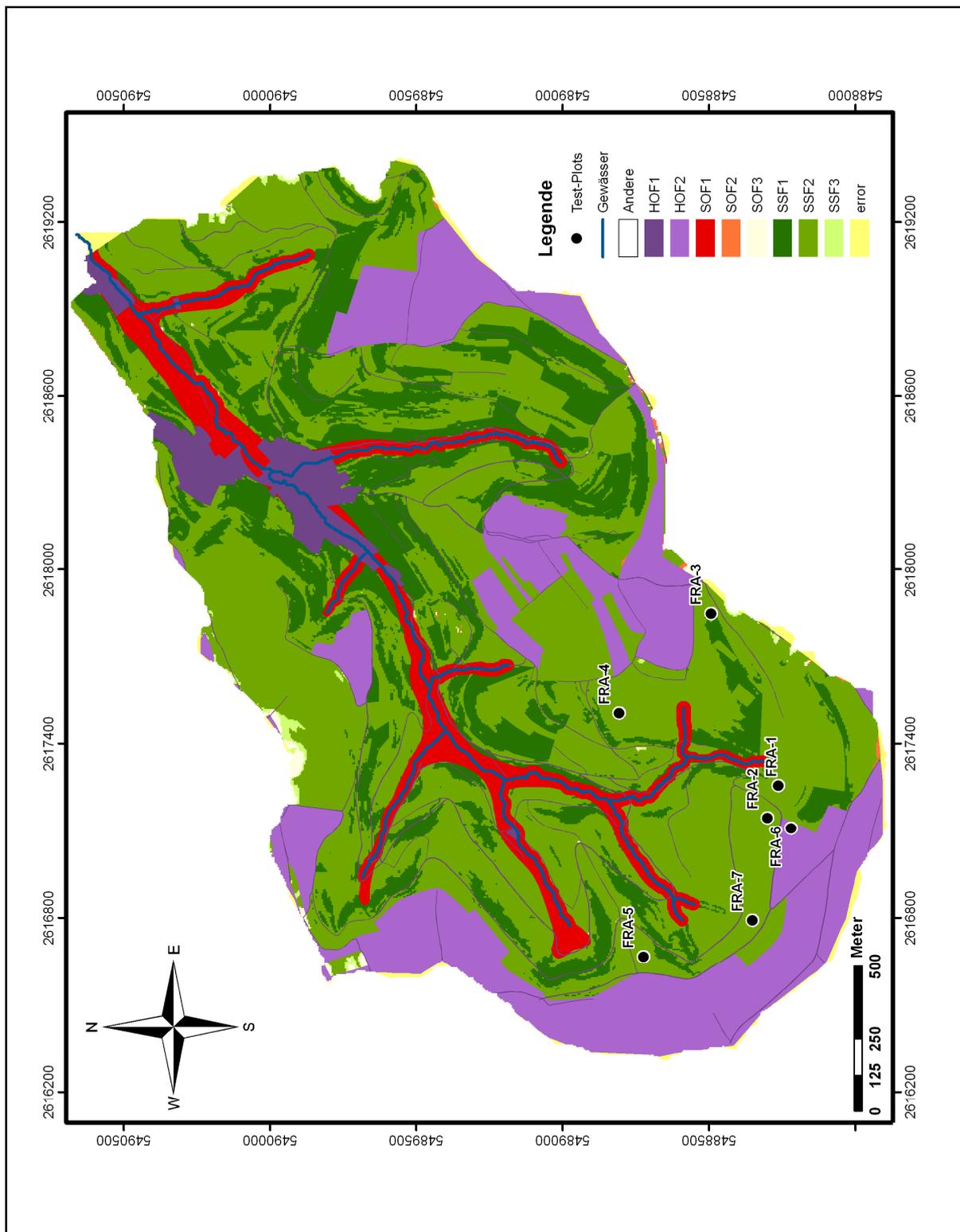


Abb. 5.42: GIS-DRP-Karte Verschlammungsneigung Frankelbach

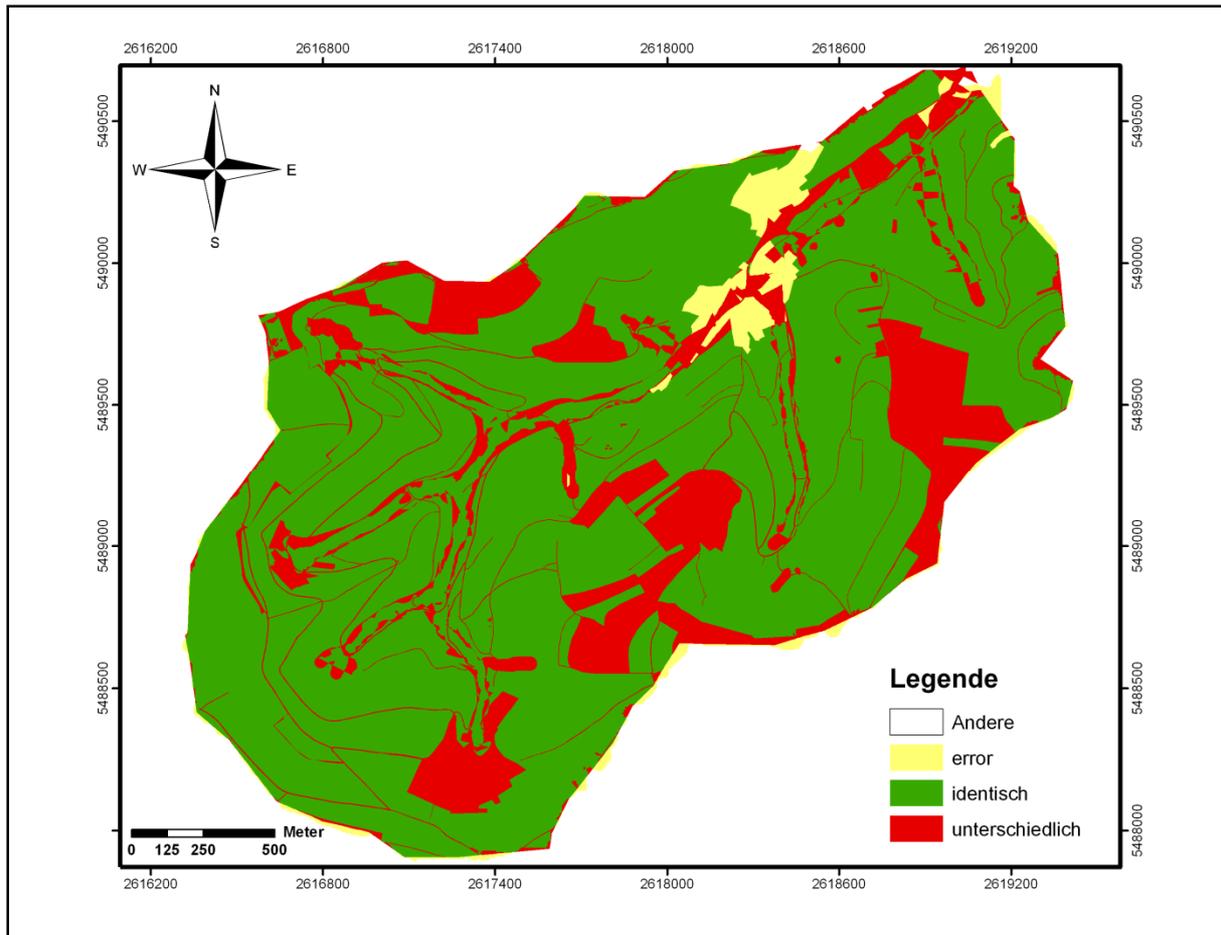


Abb. 5.43: Vergleich der Hauptabflussprozesse zw. GIS-DRP *Verschlämmungsneigung* und SCHÜLER (2006) im Einzugsgebiet Frankelbach

Tab. 5.20: Vergleich der prozentualen Flächenanteile der Hauptabflussprozesse im Einzugsgebiet Frankelbach

DRP	Flächenanteile GIS-DRP „Basis“ [%]	Flächenanteile GIS-DRP „Verschlämmungsneigung“ [%]	Flächenanteile DRP „SCHÜLER 2006“ [%]
HOF	1,7	24,4	13,0
SOF	3,5	8,1	8,0
SSF	94,5	66,5	73,0
error	0,2	1,0	6,0*

* Error resultiert im Falle der „SCHÜLER-Karte vornehmlich aus den nicht klassifizierten Siedlungsflächen

5.2.3.2 Niederschlagsintensität / Extrem-Ereignisse

Die Einbindung verschiedener Niederschlagsintensitäten in GIS-DRP zur genaueren Ausweisung von dominierenden Abflussprozessen bei variierenden Witterungsbedingungen wird, ebenso wie bei dem zuvor genannten Parameter der *Verschlämmungsneigung*, über eine

Anpassung der DRP-Basis-Tabelle erzielt. Zuvor müssen jedoch die Ereignisklassen in Intensitätsstufen des Niederschlags untergliedert werden.

Aus den drei Informationen Niederschlagsintensität, Jahreszeit und Bedeckungsgrad lassen sich insgesamt acht Kombinationen (Ereignisklassen) ableiten. Diese entsprechen den bisher genannten Kombinationen I bis VII; die achte und bisher nicht genannte und in GIS-DRP nicht implementierte Klasse ist dementsprechend:

VIII. kurze intensive Niederschläge im Sommerhalbjahr (< 50 % Bedeckung).

Die Ereignisklassen I bis V (siehe Kapitel 2.4) sind bezüglich der Gesamtintensität der Niederschläge als relativ gering zu bewerten. Daher werden diese Niederschlagsvarianten zusammengefasst und im Folgenden als *Basis-Ereignisse* bezeichnet. Die Ausweisung der DRP für die genannten Fälle wird wie beschrieben durch die DRP-Basis-Tabelle (Tab. 4.5) abgedeckt. Eine weitere Änderung ist nicht erforderlich.

Die Kombinationen VI und VII (siehe Kapitel 5.2.3.1) werden ebenfalls zusammengefasst und bilden die Klasse der Niederschläge mittlerer Intensität. Da hier bei extensiven sommerlichen und intensiven, kurzen winterlichen Niederschlägen ein Bedeckungsgrad von unter 50 % vorliegt, ist die Bodenoberfläche kaum vor Verschlämmung und Splash-Effekten geschützt. Die Niederschläge dieser beiden Kombinationen werden demnach als *Medium-Ereignisse* betitelt. Die Ausweisung dieser Niederschlagsintensität erfolgt nach der bearbeiteten DRP-Basis-Tabelle für den Faktor *Verschlämmungsneigung* (Tab. 5.19). Diese deckt die genannten Ereignisse ab, weshalb auch für diese beiden Ereignisklassen keine weitere Modifikation notwendig ist.

Die Niederschläge der Kombination VIII werden aufgrund ihrer hohen Intensität bei geringer Bodenbedeckung im Sommerhalbjahr als *Extrem-Ereignisse* klassifiziert. In solchen Fällen ist die Gefahr von Überflutungen, bedingt durch große Anteile oberflächlicher Abflüsse, die schnell dem Vorfluter zugeführt werden, am größten. Dies liegt unter anderem an den häufig sehr trockenen Ausgangsbedingungen, welche der Bodenoberfläche wasserabweisende (hydrophobe) Eigenschaften verleihen (BISDOM et al., 1993; ZUBER, 2007). Hierdurch kann das Niederschlagswasser nicht in den Boden infiltrieren; HORTON'scher Oberflächenabfluss entsteht somit auch unter Wald. Dies wurde durch die Geländeuntersuchungen belegt. Auf ackerbaulich genutzten und unbedeckten Flächen kommt es ebenfalls zur Generierung von HOF, da durch die Verschlämmung des ungeschützten Bodens eine Infiltration verhindert wird. Grünland, als letzte Landnutzungsvariante, produziert ebenfalls unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. dichter Wurzelfilz) Oberflächenabflüsse, was Studien von SCHERRER

et al. (2007) und SCHOBEL (2008) dokumentieren. Auch durch die im Einzugsgebiet Frankelbach und Huewelerbach durchgeführten Kleinberechnungen (Anhang Tab. A12 und A15) wurden Oberflächenabflüsse auf Grünland ermittelt. Die Messungen hatten Abflusskoeffizienten zwischen 4 – 63 % zum Resultat. Die Ausbildung von oberflächlichen Abflüssen ist hier jedoch stark von der Art des Grünlandes sowie dessen Pflegezustand abhängig (PFAHLER, 2010; SCHOBEL, 2008).

Eine Abänderung der dominierenden Abflussprozesse der DRP-Basis-Tabelle für diese besonderen klimatischen Verhältnisse muss sich demzufolge auf alle Landnutzungen erstrecken (Tab. 5.21). Die Änderung wird im Falle extremer Ereignisse auch für Acker- und Grünlandflächen mit permeablem Untergrund durchgeführt. Hier wird davon ausgegangen, dass durch Verschlammung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und wasserabweisendem Grasbewuchs oder Filzauflagen auf Grünland Oberflächenabflüsse generiert werden. Lediglich die DRPs unter Wald bei permeablen Substraten (DP) bleiben gegenüber der DRP-Basis-Tabelle unverändert. Dies wird durch die hohen Infiltrationsleistungen und Wasserleitfähigkeiten dieser Böden erklärt, die dem Niederschlagswasser erlauben schnell zu infiltrieren und tief in den Boden sowie das liegende Substrat zu perkolieren. Hydrophobizitätseffekte, die wie zuvor erwähnt, auch im Wald zu HOF führen können, werden im Falle permeablen Untergrundes nicht berücksichtigt.

Die Modifikation „Extrem-Ereignis“ wird für alle vier ForeStClim-Untersuchungsgebiete angewendet, um die zum schnellen Abfluss beitragenden Flächen im Fall von Starkniederschlagsereignissen zu identifizieren.

Tab. 5.21: DRP-Ausweisung für die Niederschlagsklassifikation „Extrem-Ereignis“

Hang- neigung [%]	imp.*	imp.	imp.	perm.	perm.	perm.
	Acker	Grünland	Wald	Acker	Grünland	Wald
0-3	HOF 2	SOF 2	SOF 2	HOF 2	SOF 2	DP
3-5	HOF 2	SOF 2	SSF 2	HOF 2	SOF 2	DP
5-20	HOF 2	SOF 2	SSF 1	HOF 2	SOF 2	DP
20-40	HOF 1	SOF 1	SSF 1	HOF 1	SOF 1	DP
> 40	HOF 1	SOF 1	SSF 1	HOF 1	SOF 1	DP

* imp. = Impermeabel; perm. = Permeabel

GIS-DRP-Karten „Extrem-Ereignis“ der vier ForeStClim-Untersuchungsgebiete

Nach Anpassung der Abflussprozesskarten für *Extrem-Ereignisse*, durch die neue GIS-DRP-Ausweisungs-Tabelle (Tab. 5.21) und den darauf basierenden Abfrage-Algorithmus in GIS-DRP, ergeben sich zum Teil beträchtliche Unterschiede zu den bisher erstellten Karten.

Die Neuklassifizierung der ursprünglichen GIS-DRP-Karten nach der DRP-Ausweisung „Extrem-Ereignis“ hat zur Folge, dass sich die Abflussprozesse eines Einzugsgebietes in Bereichen impermeablen Untergrundes generell in Richtung der schnelleren Prozess-Varietät entwickeln. Das bedeutet, dass die Reaktionsgeschwindigkeit der jeweiligen Abflussprozesse verkürzt wird. So ändern sich beispielsweise SSF3 zu SSF2 oder SSF2 zu SSF1. Auch Sättigungsoberflächenabflüsse (SOF) verschärfen sich in ihrer zeitlichen Reaktion und binden gesättigte Bereiche teilweise direkt an den Vorfluter an. Speziell im Auenbereich wirkt sich diese Änderung unmittelbar auf die Wasserführung im Gerinnebett aus. Für das gesamte Einzugsgebiet ergibt sich aus den Veränderungen der Abflussprozessdynamik eine allgemein schnellere Reaktion auf ein sehr starkes Niederschlagsereignis. Solche schnellen Reaktionen führten in der Vergangenheit schon des Öfteren zu Überschwemmungen in Siedlungsbereichen was am Beispiel der Gemeinde Frankelbach mit Überflutungen in den Jahren 1993, 1995 und 2002 bestätigt wurde (JOHST, 2011). Die gegenüber den ursprünglichen GIS-DRP-Karten veränderten prozentualen Flächenanteile der dominierenden Abflussprozesse in den ForeStClim-Untersuchungsgebieten werden in Tab. 5.22 vergleichend gegenübergestellt. Die insgesamt schnellere Abflussreaktion im Falle extremer Niederschläge ist hier eindeutig zu erkennen und konnte auch durch die Berechnungsversuche validiert werden.

Das Einzugsgebiet Frankelbach zeigt nach der neuen Berechnung der dominanten Abflussprozesse die deutlichste Veränderung zu den zuvor vorgestellten DRP-Karten im Vergleich aller Testgebiete. Durch die Modifikation des GIS-Tools wird nun auf großen Acker- und Grünlandflächen (vgl. Abb. 3.2) das Auftreten von Oberflächenabflüssen im Falle sommerlicher Starkregen prognostiziert (Abb. 5.44). Der Großteil der Waldgebiete wird durch schnelle Zwischenabflussprozesse (SSF1) charakterisiert, welcher auf 47,7 % der Fläche ausgewiesen wird. Die Verschiebung der Abflussprozesse in Richtung der schnelleren Ausprägung ist auch hier gut nachzuvollziehen. Siedlungsflächen und Wege zeigen weiterhin HOF1-Reaktionen (8,5 %), sind jedoch nicht mehr die einzigen Flächen, die sofort einsetzenden HORTON'schen Oberflächenabfluss generieren. Auch stärker geneigte Ackerbereiche werden in der modifizierten Abflussprozesskarte mit dem genannten

Abflusstyp klassifiziert, was die Verschärfung der Reaktionsgeschwindigkeit ebenfalls verdeutlicht (Tab. 5.22).

Was durch die neue Karte außerdem hervorgehoben wird ist, dass es im Falle von sommerlichen Starkregenereignissen zur Anbindung von zum Hochwasser beitragenden Flächen an die schnell aufsättigenden SOF-Bereiche des Gewässers kommt (Abb. 5.44). Besonders im Bereich nordöstlich des Standortes FRA-1 kommt es zur Anbindung der dort verorteten SOF1 und SOF2 Flächen an die Gerinnebereiche. Die abfließenden Wassermengen werden hier direkt ins Gewässerbett geleitet.

Auch in den beiden von devonischem Ausgangsmaterial geprägten Untersuchungsgebieten Holzbach und Weierbach zeichnet sich im Falle extremer Niederschläge eine insgesamt schnellere Abflussreaktion des gesamten Testgebietes ab (Anhang Abb. A14 und Abb. A15). So ist z. B. die Anbindung der Hangbrücher des Holzbaches charakteristisch für eine Vernetzung von Sättigungsflächen. Eine grundsätzliche Änderung der Abflussdynamik aufgrund eines Wandels der Oberflächeneigenschaften (z. B. Oberflächenabflüsse infolge Verschlammung oder flächendeckender Sättigung) ist hingegen nicht zu erwarten.

Die geringsten Unterschiede zur Basis-Abflussprozesskarte wurden nach der Modifizierung *Extrem-Ereignis* erwartungsgemäß im Testgebiet Huewelerbach festgestellt. Noch immer ist der Hauptabflussprozess des Gebietes die Tiefensickerung (DP). Aufgrund des in der Datengrundlage als permeabel klassifizierten geologischen Ausgangssubstrates (Lias Sandstein; Li2) unterscheiden sich lediglich die Bereich des Gerinnebettes und der Grünlandflächen in der modifizierten Abflussprozesskarte (Abb. 5.45) von jenen in der ursprünglichen Karte (Abb. 5.34). Hier kommt es, ähnlich den zuvor beschriebenen Testgebieten, zu einer Verschiebung der Zwischenabflussprozesse (SSF2 zu SSF1) sowie zu einer leichten Vergrößerung des Flächenanteils gesättigten Oberflächenabflusses. Resultierend aus diesen Daten wird für den Huewelerbach konstatiert, dass auch bei intensiven Gewitterniederschlägen, nicht mit einer bedeutenden Änderung der Abflussdynamik zu rechnen ist.

Tab. 5.22: Vergleich der prozentualen DRP-Flächenanteile der vier untersuchten Testgebiete

DRP	FRA Basis* [%]	FRA Medium [%]	FRA Extrem [%]	HOL Basis [%]	HOL Extrem [%]	WEI Basis [%]	WEI Extrem [%]	HUE Basis [%]	HUE Extrem [%]
HOF1	1,7	5,3	8,5	-	-	7,8	7,8	2,7	2,7
HOF2	-	19,1	15,8	-	-	-	-	-	-
SOF1	2,9	7,7	19,7	11,7	16,3	5,7	5,7	15,3	15,6
SOF2	0,4	0,1	6,6	4,6	-	-	-	-	0,7
SOF3	0,2	0,3	0,3	1,5	1,5	13,3	13,3	1,63	1,6
SSF1	16,8	19,1	47,7	1,0	76,6	9,3	68,0	0,2	11,3
SSF2	77,7	47,3	0,4	75,7	4,4	58,7	5,2	11,5	1,9
SSF3	0,1	0,4	-	4,3	-	5,2	-	1,9	-
DP	-	-	-	1,2	1,2	-	-	62,4	61,8
Error	0,2	0,9	1,0	-	-	-	-	4,4	4,4

* „Basis“ stellt die Ergebnisse der ursprünglichen GIS-DRP-Karte dar, während „Medium“ die Ergebnisse der modifizierten GIS-DRP-Karte *Verschlämmungsneigung* und „Extrem“ die Resultate der GIS-DRP-Karte *Extrem* darstellt.

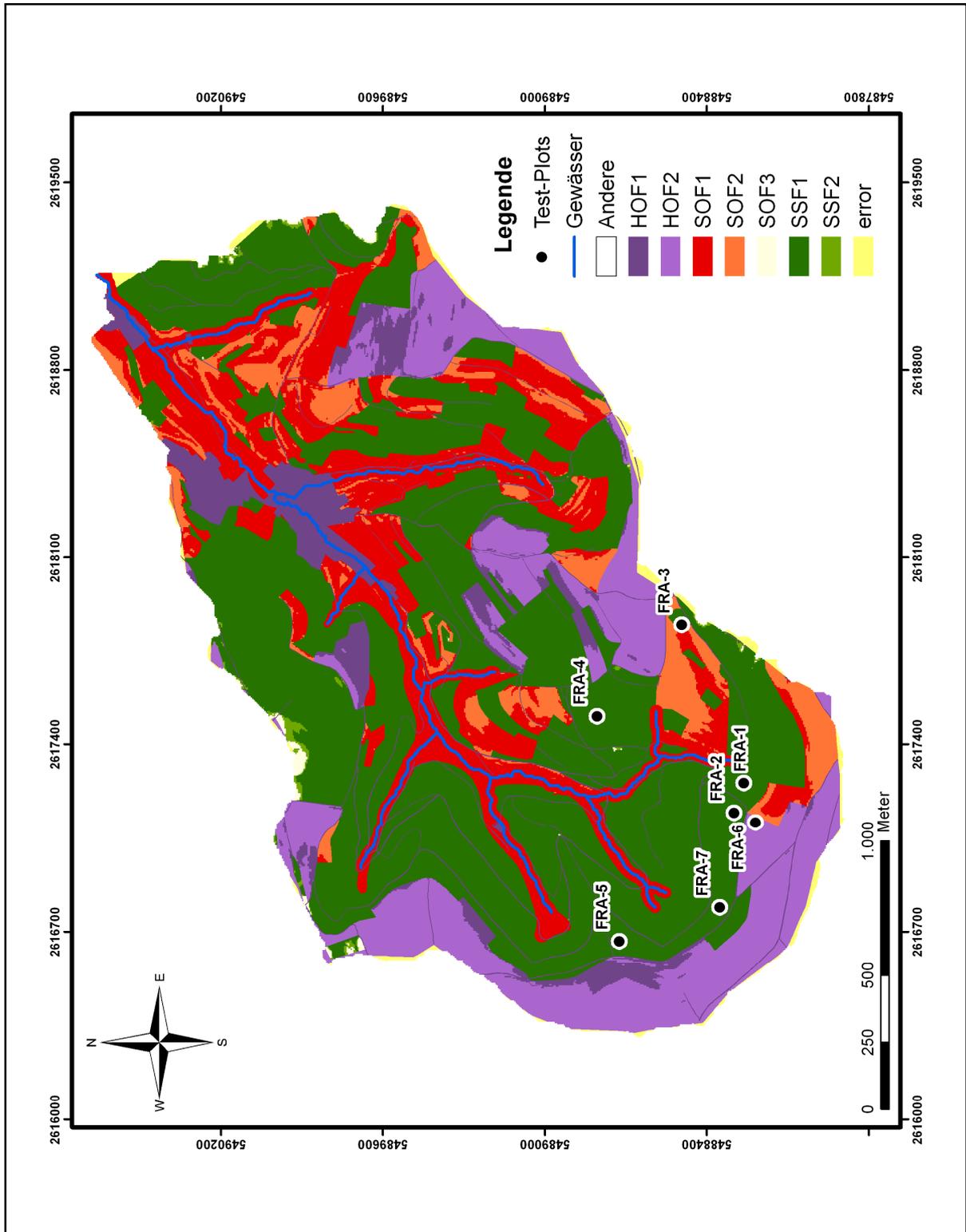


Abb. 5.44: GIS-DRP-Karte *Extrem-Ereignis* Frankelbach

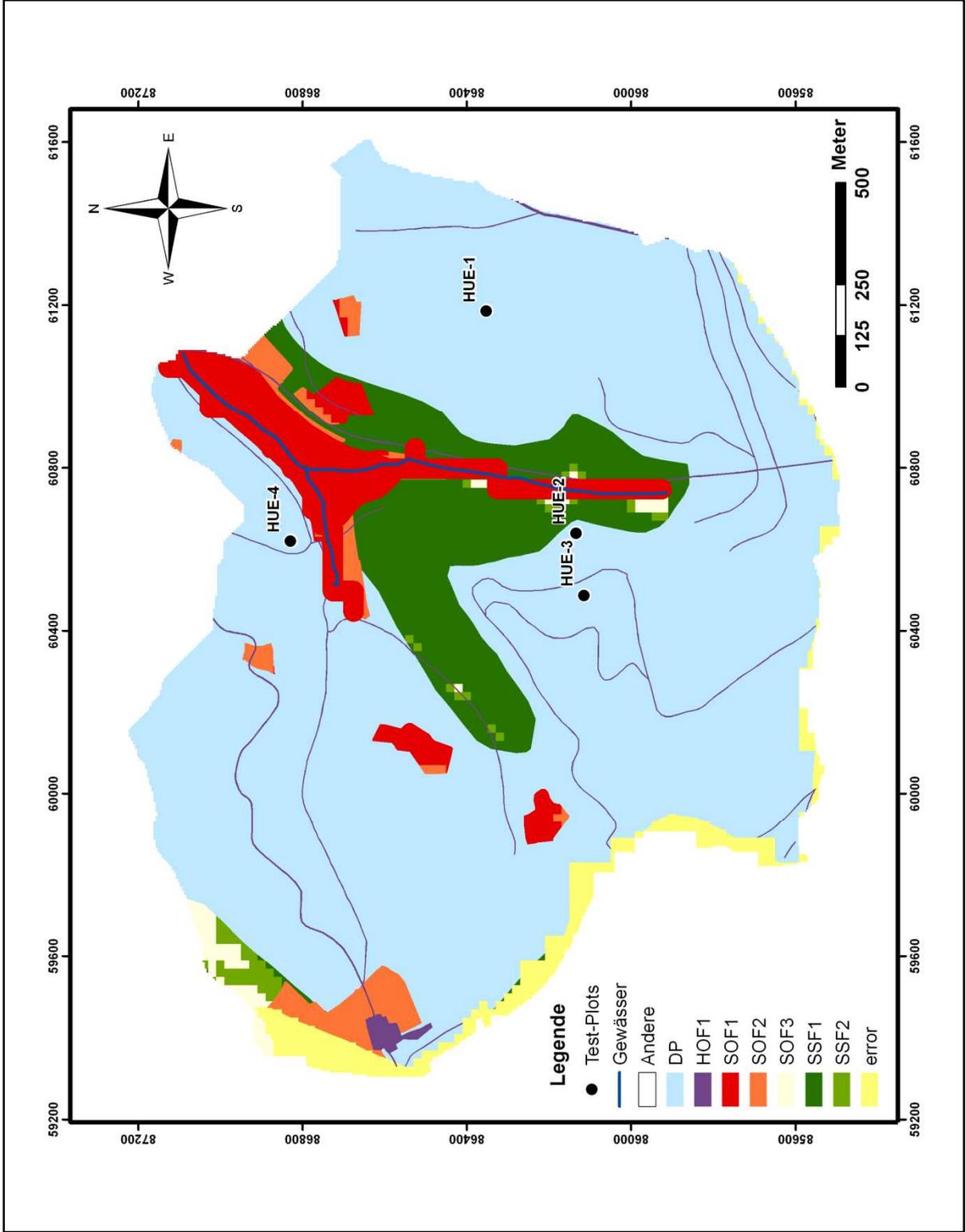


Abb. 5.45: GIS-DRP-Karte Extrem-Ereignis Huewelerbach

5.2.3.3 Semipermeabilität

Der Parameter *Semipermeabilität*, in diesem Fall bezogen auf die Teildurchlässigkeit des Untergrundes für Wasser, bildet die Voraussetzung für die Generierung tiefen Zwischenabflusses. Im Vergleich zur Einführung des Abflussprozesses DSSF durch SCHÜLER (2006) liegt der Fokus hier demnach nicht nur auf der Bildung tiefer Zwischenabflüsse über dichtem geologischem Untergrund, sondern entscheidend auf den vorherrschenden Substrateigenschaften, die die Bildung von Abflussprozessen maßgeblich beeinflussen. Eigenschaften des Bodens, der Deckschichten und des liegenden Gesteins, die eine Ansprache von *Semipermeabilität* und damit von tiefem Zwischenabfluss im Gelände bedingen, sind eine große Profilmächtigkeit, periglaziale Deckschichten, mit extrem hohen, nicht eingeregelteten Grobbodengehalten und lockerer Bodenmatrix oder eine direkte Klassifizierung des geologischen Ausgangssubstrates als *semipermeabel* (z. B. ZUMSTEIN et al., 1989). Zur Differenzierung der Klassifikationsansätze nach SCHÜLER (2006) und GIS-DRP wird dem tiefen Zwischenabfluss im weiterentwickelten GIS-DRP-Tool die Bezeichnung dSSF (im Vergleich zu DSSF nach SCHÜLER) zugewiesen.

Durch die Geländeuntersuchungen wurde dSSF in drei von vier Untersuchungsgebieten auf Waldstandorten ausgewiesen (FRA-1, FRA-7, WEI-1 bis WEI-6, HOL-4 bis HOL-6). Die zuvor genannten Substrateigenschaften wurden demnach in den Testgebieten nachgewiesen, wodurch mit Expertenwissen im fachlichen Diskurs die *Semipermeabilität* des Untergrundes klassifiziert werden konnte. Die Implementierung des dSSF in GIS-DRP ist daher sinnvoll.

Die zur Erstellung von GIS-DRP-Karten generell verfügbaren Kartenwerke liefern leider oftmals nur unzureichende Informationen zur lateralen und vertikalen Ausbildung des periglazialen Hangschutts (TILCH et al., 2002) oder des geologischen Substrates. Daher muss der Grundlageninformation *Geologie* durch Geländeuntersuchungen oder auf Basis von Expertenwissen bzw. anderen Informationsquellen die Eigenschaft *semipermeabel* zugewiesen werden. Auf Basis dieser Definition des betreffenden Gesteins als teildurchlässig wird es im Abfrage-Algorithmus möglich, den Prozess dSSF zu klassifizieren. Eine Anpassung der Basis-Tabelle zur DRP-Ausweisung ist auch in diesem Falle notwendig und zielführend, da die Eigenschaft *semipermeabel* bisher nicht in GIS-DRP vertreten war. Anders als bislang gehandhabt, wird die *Semipermeabilität* nur für die Nutzungsvariante Wald eingebunden, da lediglich auf bewaldeten Test-Plots dSSF ausgewiesen wurde. Bei sehr geringen Hangneigungen von unter 3 % wird von stark verzögertem Sättigungs-oberflächenabfluss anstelle von dSSF ausgegangen, da die Neigung kaum ausreicht, um infiltriertes Niederschlagswasser lateral abzuführen (Tab. 5.23).

Tab. 5.23: DRP-Ausweisung *Semipermeabilität*

Hang- neigung [%]	imperm. Acker + Grünland	imperm. Wald	semi. Wald	perm. Acker + Grünland + Wald
0-3	SOF 3	SOF 3	SOF3	DP
3-5	SOF 2	SSF 3	dSSF	DP
5-20	SSF 2	SSF 2	dSSF	DP
20-40	SSF 1	SSF 2	dSSF	DP
> 40	SSF 1	SSF 1	dSSF	DP

Eine Optimierung der bisher erstellten Abflussprozesskarten sollte vorwiegend in den Testgebieten Holzbach und Weierbach durchgeführt werden, da hier durch die Geländeuntersuchungen semipermeable Eigenschaften des geologischen Ausgangssubstrates und damit dSSF festgestellt wurde. Im Einzugsgebiet Frankelbach wurde dSSF nur sehr lokal aufgrund großer Bodenmächtigkeiten klassifiziert. Das aus permischem Rotliegend bestehende Grundgestein wird generell als *impermeabel* charakterisiert, weshalb eine Anpassung der GIS-DRP-Karte für dieses Gebiet, auf Basis der vorhandenen Grundlagendaten (Geologische Karte 1:200.000), nicht in Frage kommt²⁵. Auch für das Einzugsgebiet Huewelerbach wird keine Semipermeabilitätskarte erstellt, da der dort hauptsächlich vertretene Lias-Sandstein (Li2) als *permeabel* zu klassifizieren ist. Andere im Gebiet vorhandenen Gesteine gelten weiterhin als *impermeabel*, was eine Anpassung an den Parameter *Semipermeabilität* ausschließt.

Im Vergleich zur ursprünglichen Abflussprozesskarte des Holzbachs (Abb. 5.22) wird in der optimierten Variante (Abb. 5.46) im kompletten nördlichen Teil des Einzugsgebietes der Prozess dSSF ausgewiesen (54,8 %; Tab. 5.24). Diese Klassifizierung basiert, wie zuvor erläutert, auf einer Anpassung der Eigenschaften der pedologischen bzw. geologischen Schichten. In diesem speziellen Fall wurde dem Devonischen Hunsrück-Quarzit die Eigenschaft *Semipermeabilität* zugewiesen. Daraus ergibt sich bei gleichzeitiger forstlicher Nutzung und definierten Hangneigungen tiefer Zwischenabfluss als dominierender Abflussprozess. In der modifizierten Karte sind die Hangbrücher weiterhin enthalten, welche sich an den nördlichen Gerinnebereich anschließen. Hieraus ergeben sich Areale gesättigten Oberflächenabflusses, die hydrologisch an das Gerinne des Einzugsgebietes angeschlossen

²⁵ Im Falle einer höher aufgelösten geologischen Grundlagenkarte würden die verschiedenen Fazies des Rotliegend wahrscheinlich deutlich hervortreten, sodass eine neue Klassifizierung der Permeabilitäten möglich wäre.

sind. Die SOF3-Flächen an den kulminierten Randbereichen des Untersuchungsgebietes sind zu denen in der ursprünglichen Karte identisch.

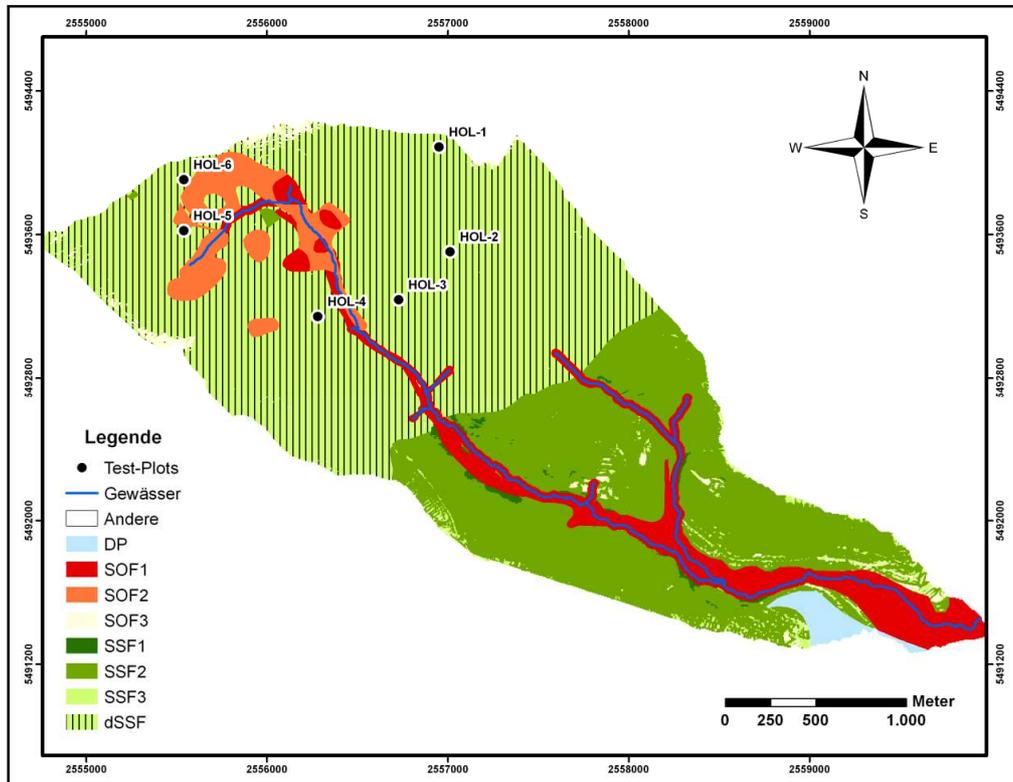


Abb. 5.46: GIS-DRP-Karte Holzbach *Semipermeabilität*

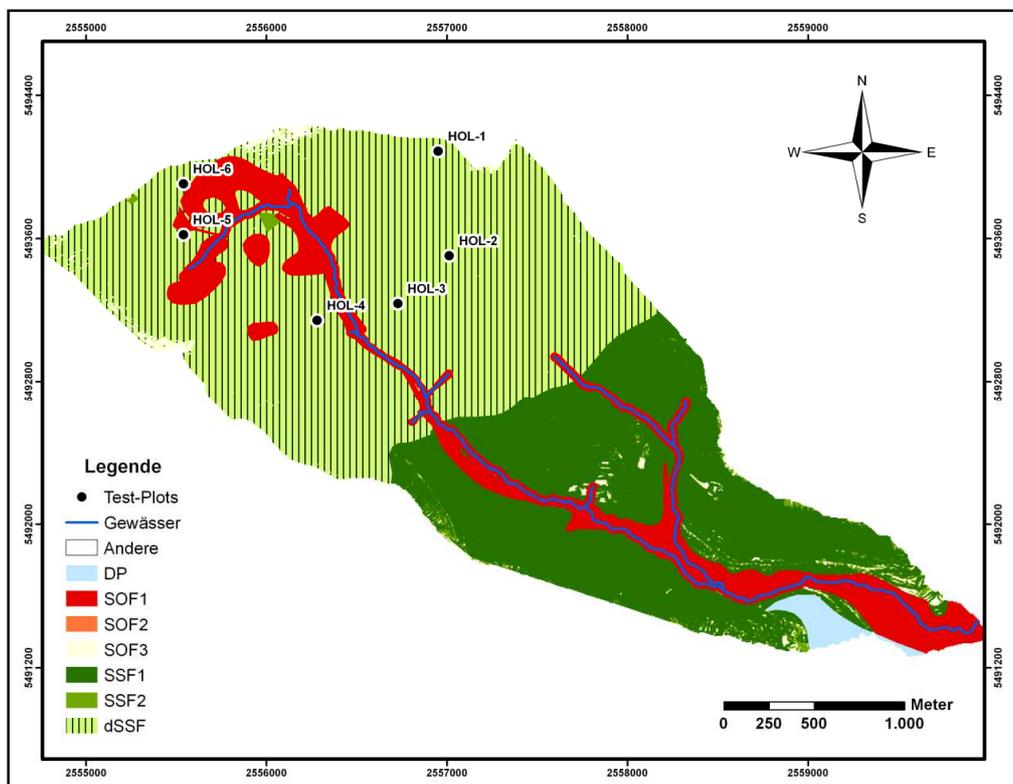


Abb. 5.47: GIS-DRP-Karte Holzbach *Semipermeabilität inkl. Extrem-Ereignis*

Der Südteil des Einzugsgebietes ist von der Modifikation der Karte, ebenfalls wie die Buffer-Bereiche (SOF1), nicht betroffen, da die Klassifikation des dortigen geologischen Untergrundes als impermeabel bzw. permeabel bestehen bleibt.

Im Falle einer Abänderung der GIS-DRP-Karte *Semipermeabilität* inklusive *Extrem-Ereignis* (Abb. 5.47) bleiben die dSSF-Flächen als solche bestehen, da auch bei sehr starken Niederschlägen von einer hohen Infiltrationsleistung sowie einer guten Perkolation des infiltrierten Wassers durch Boden und Gestein ausgegangen wird. Außerhalb der Bereiche des als *semipermeabel* klassifizierten devonischen Quarzits ist die neue Abflussprozesskarte identisch zu jener ohne die Implementierung der *Semipermeabilität*. Die unterschiedlichen Flächenanteile der DRP resultieren dementsprechend aus dem Vorhandensein des Prozesses dSSF. Tab. 5.24 zeigt eine Gegenüberstellung der Flächenanteile nach jeweiligem Ausweisungsansatz.

Tab. 5.24: Vergleich der prozentualen DRP-Flächenanteile der Abflussprozesskarten Holzbach und Weierbach

DRP	HOL Basis [%]	HOL semi [%]	HOL Extrem [%]	HOL Extrem/semi [%]	WEI Basis [%]	WEI semi [%]	WEI Extrem [%]	WEI Extrem/semi [%]
HOF1	-	-	-	-	7,8	7,8	7,8	7,8
HOF2	-	-	-	-	-	-	-	-
SOF1	11,7	11,7	16,3	11,1	5,7	5,7	5,7	5,7
SOF2	4,6	4,6	-	-	-	-	-	-
SOF3	1,5	1,5	1,5	1,5	13,3	13,3	13,3	13,3
SSF1	1	0,5	76,6	30,2	9,3	-	68,0	-
SSF2	75,7	24,6	4,4	1,2	58,7	-	5,2	-
SSF3	4,3	1,1	-	-	5,2	-	-	-
dSSF	-	54,8	-	54,8	-	73,2	-	73,2
DP	1,2	1,2	1,2	1,2	-	-	-	-
Error	-	-	-	-	-	-	-	-

Im Testgebiet Weierbach wird nach der GIS-DRP-Modifikation, verglichen zur ersten Abflussprozesskarte (Abb. 5.28), überwiegend dSSF ausgewiesen (Abb. 5.47; Tab. 5.24). Auch hier wurde die Klassifizierung des devonischen Schiefer der Siegener-Schichten (Sg3) von *impermeabel* zu *semipermeabel* geändert, damit der neue Abfrage-Algorithmus den Prozess dSSF erfassen kann. Nicht eingeschlossen sind wiederum die Buffer-Bereiche (SOF1) und die Kulminationsbereiche nahe der Wasserscheide (SOF3).

Wird die Neuklassifizierung der Abflussprozesskarte *Semipermeabilität* inklusive *Extrem-Ereignis* des Weierbachs angewandt, so ergeben sich keine Änderungen zu Abb. 5.47. Die dSSF-Bereiche werden weiterhin als solche ausgewiesen, ebenso wie die Flächen der Sättigungsflächenabflüsse verschiedener Ausprägung. Dies liegt an der Klassifizierung des geologischen Ausgangssubstrates als *semipermeabel* und der damit einhergehenden guten Infiltration in den Boden sowie der Perkolation durch das Substrat.

Wird der Weierbach, zwecks einer besseren Einschätzung der ausgewiesenen Prozesse, in das nächst größere Einzugsgebiet integriert (Colpach 19 km²; Abb. 5.49), so erschließt sich die Lage der für die *Semipermeabilität* verantwortlichen geologischen Schichten besser als in dem sehr kleinen Landschaftsraum des Untersuchungsgebietes (0,4 km²). Noch besser erkennt man die Verortung der Schichten und die Ausweisung des Prozesses dSSF bei Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes der Attert (258 km²; Abb. 5.50).

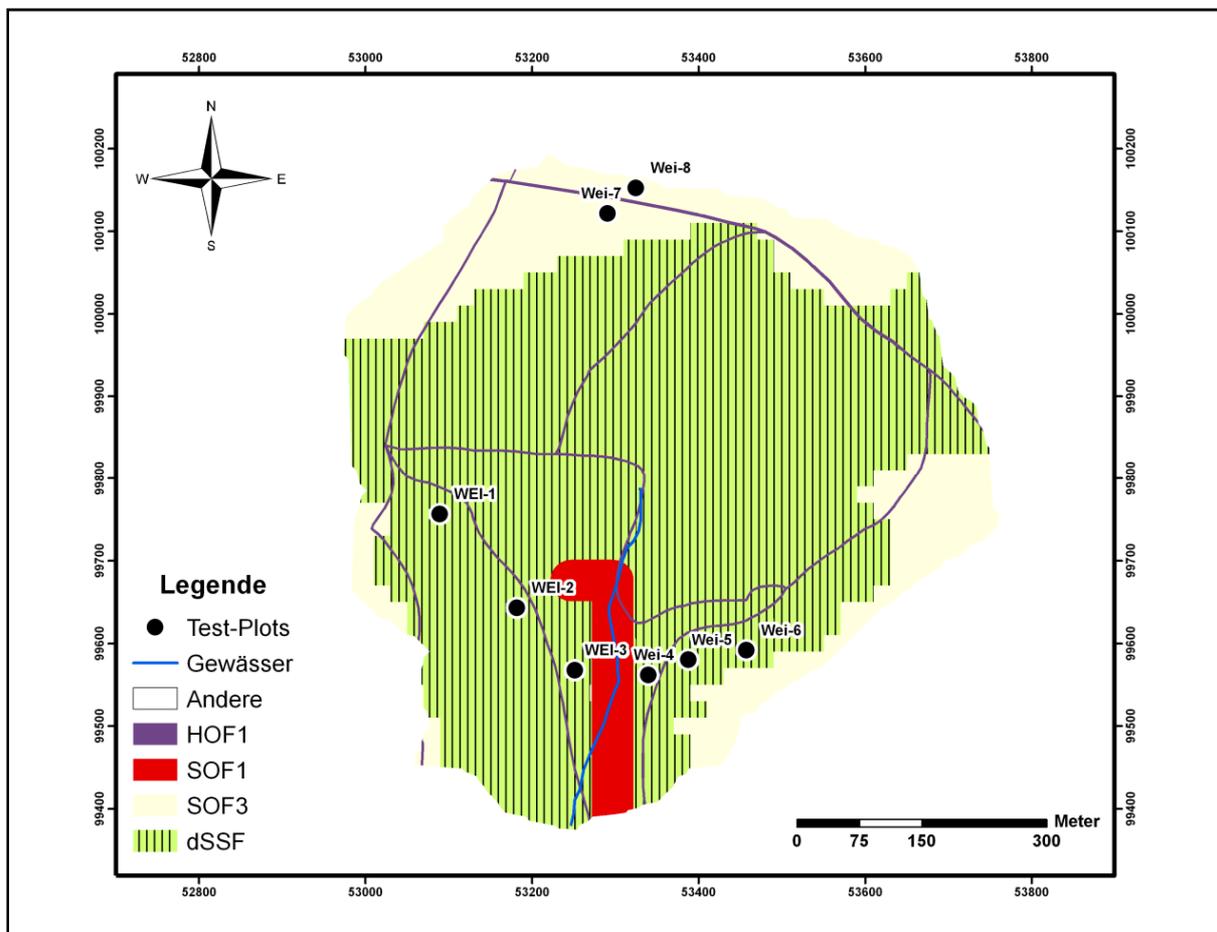


Abb. 5.48: GIS-DRP-Karte Weierbach *Semipermeabilität*

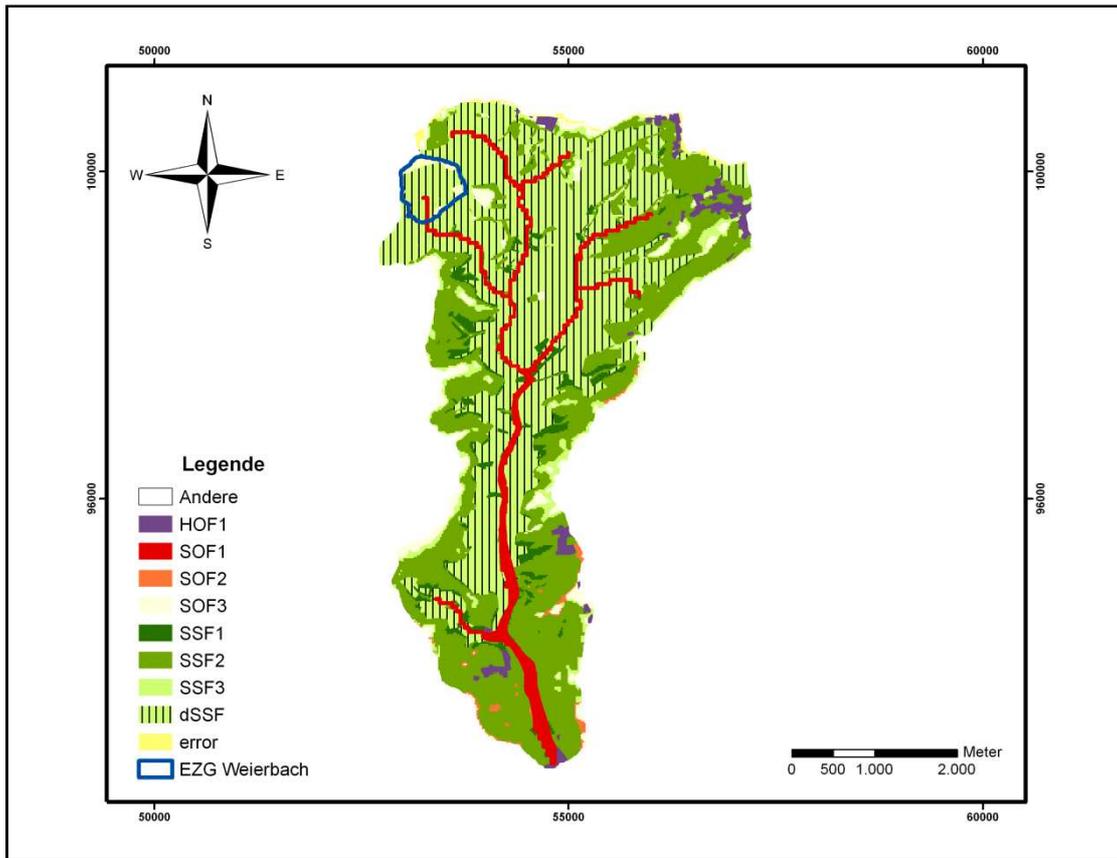


Abb. 5.49: GIS-DRP-Karte Colpach *Semipermeabilität* inkl. Einzugsgebiet Weierbach (blau)

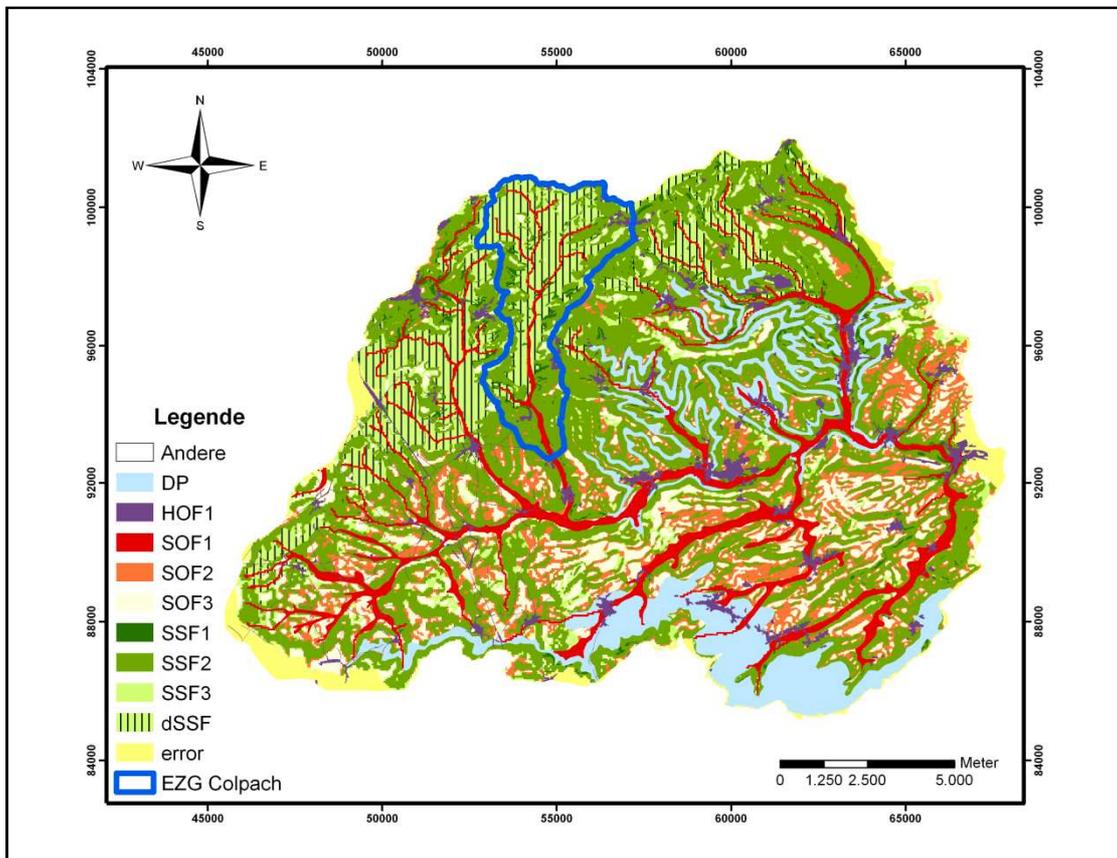


Abb. 5.50: GIS-DRP-Karte Attert *Semipermeabilität* inkl. Einzugsgebiet Colpach (blau)

5.2.4 Validierung der optimierten GIS-DRP-Karten

Die Implementierung der drei neuen, zur genaueren Ausweisung dominierender Abflussprozesse wichtigen Parameter, erfordert eine erneute Validierung der GIS-DRP-Karten. Die modifizierten Karten und die neu klassifizierten Abflussprozesse werden aufgrund dessen im Folgenden mit den Geländeergebnissen und den Abflussprozesskartierungen nach SCHERRER (2006) verglichen. Hieraus wird ersichtlich, ob sich die Änderung der jeweiligen Abfrage-Algorithmen im GIS positiv auf die Genauigkeit des GIS-DRP-Tools ausgewirkt hat.

Die Einführung des Parameters *Verschlämmungsneigung* führte auf den Ackerflächen des Testgebietes Frankelbach zu einer Änderung der Abflussprozesscharakterisierung. Der durch die Geländeuntersuchungen nachgewiesene verzögerte HORTON'sche Oberflächenabfluss (HOF2) am Standort FRA-6 (Acker) wird nun auch durch die GIS-DRP Karte ausgewiesen (Tab. 5.25). Die dominierenden tiefen Zwischenabflüsse der Standorte FRA-1 (Aufforstung) und FRA-7 (Schneise) sind das Resultat standortspezifischer Ausprägungen und werden auch in der optimierten Abflussprozesskarte *Verschlämmungsneigung* nicht ausgewiesen. Grund hierfür ist das Rotliegend-Substrat des Testgebietes, das generell nicht als *semipermeabel* klassifiziert werden kann. Demzufolge wird auch kein dSSF durch GIS-DRP klassifiziert.

Im Falle der Anwendung der DRP-Ausweisung *Extrem-Ereignis* verschieben sich die Prozesse generell in Richtung der schneller reagierenden Prozessvariante. Am Beispiel des Standortes FRA-2 (30a Aufforstung) und der dort ermittelten Berechnungsergebnisse wird deutlich, dass schnelle Zwischenabflüsse im Falle extremer Niederschläge durchaus vorstellbar und verbreitet sind. Durch die neue Anwendung können auch solche Bedingungen abgebildet werden.

Zur Optimierung der DRP-Bewertung des Untersuchungsgebietes Holzbach wurde die neue GIS-DRP-Karte *Semipermeabilität* angewandt. Die überarbeitete Klassifikation der Permeabilität des Substrates führte zur Ausweisung von dSSF-Prozessen im nördlichen Teil des Einzugsgebietes. Diese neue Einschätzung der dominierenden Abflussprozesse stimmt nun deutlicher mit den Ergebnissen der Geländeuntersuchungen überein als die Ausweisung der ursprünglichen Karte. Drei Standorte werden nun richtig abgebildet; die drei übrigen weichen nur um eine Klasse²⁶ (HOL-2, HOL-3), respektive zwei Klassen (HOL-1) ab (Tab. 5.25).

²⁶ Unter dem Begriff „Klasse“ wird die Reaktionsgeschwindigkeit der ausgewiesenen Abflussprozesse verstanden (z. B. SSF1 zu SSF2 oder SSF2 zu SSF3)

Wird die GIS-DRP-Karte *Extrem-Ereignis* im Testgebiet Holzbach angewandt, so wird auf allen Standorten SSF1 als dominierend ausgewiesen. Im Gegensatz dazu bleibt es bei einer Klassifizierung von dSSF im Falle von *Extrem-Ereignissen* verbunden mit *Semipermeabilität*. Letztere Variante wird aufgrund des als *semipermeabel* zu klassifizierenden devonischen Quarzits insgesamt als wahrscheinlicher für den Untersuchungsraum betrachtet.

Durch die GIS-DRP-Weiterentwicklung *Semipermeabilität* bzw. die Einbindung des tiefen Zwischenabflusses (dSSF) als dominierendem Abflussprozess war es im Einzugsgebiet Weierbach möglich durch die digitale Methode identische DRP, verglichen mit den Geländeuntersuchungen, zu klassifizieren (Tab. 5.25).

Ähnlich dem Testgebiet Holzbach wird im Falle der GIS-DRP-Ausweisung *Extrem-Ereignis* im Untersuchungsgebiet Weierbach lediglich SSF1 ausgewiesen. Aufgrund der teildurchlässigen Schichten im Untersuchungsgebiet ist jedoch das Resultat des kombinierten Ansatzes - *Extrem-Ereignis* und *Semipermeabilität* - als realitätsnäher einzustufen.

Im Einzugsgebiet Huewelerbach wurde nur die neue GIS-DRP-Karte *Extrem-Ereignis* angewandt, da weder *Verschlämmungsneigungen* noch *Semipermeabilitäten* im Untersuchungsgebiet erwartet werden oder durch die Geländeuntersuchungen erfasst wurden. Im Falle der untersuchten Standorte (HUE-1 bis HUE-4) brachte die Anwendung des optimierten Ansatzes jedoch keine Veränderungen der ausgewiesenen Abflussprozesse mit sich (Tab. 5.25). Grund hierfür ist der permeable Lias-Sandstein, der als geologisches Ausgangsmaterial auch bei starken Niederschlägen vom infiltrierenden Niederschlagswasser durchsickert wird. Eine Verschärfung der Abflussprozesse im Sinne einer Beschleunigung sowie völligen Änderung wird hier nur im Grünlandbereich des Einzugsgebietes sowie im Buffer-Bereich der Aue erwartet (Abb. 6.10). Flächenmäßig sind diese Bereiche aber kaum relevant.

Tab. 5.25: Vergleich der Abflussprozessidentifikationen nach der GIS-DRP-Modifikation

Plot	DRP-Ausweisung „Gelände“	DRP-Ausweisung „PBS“	GIS-DRP „Verschlämmungsneig.“	GIS-DRP „semi“	GIS-DRP „Extrem“	GIS-DRP „Extrem“ / inkl. „semi“
FRA-1	dSSF	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
FRA-2	SSF1/SOF2	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
FRA-3	SSF2	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
FRA-4	SSF2/HOF1	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
FRA-5	SSF2	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
FRA-6	HOF2	HOF2	HOF2	-	HOF2	-
FRA-7	dSSF	SSF2	SSF2	-	SSF1	-
HOL-1	SSF2	SSF3	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
HOL-2	SSF3	SSF3	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
HOL-3	SSF3	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
HOL-4	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
HOL-5	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
HOL-6	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-1	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-2	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-3	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-4	dSSF	SSF3	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-5	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-6	dSSF	SSF2	-	dSSF	-	SSF1 / dSSF
WEI-7	SOF3	SOF3	-	SOF3	-	SSF1 / dSSF
WEI-8	SOF3	SOF3	-	SOF3	-	SSF1 / dSSF
HUE-1	DP	DP	-	-	DP	-
HUE-2	DP	DP	-	-	DP	-
HUE-3	DP	DP	-	-	DP	-
HUE-4	DP	DP	-	-	DP	-

5.2.5 Zusammenfassung Abflussprozesskartierung

Die Abflussprozesskartierung stellt eine wichtige Methode zur Charakterisierung und Klassifikation des standortspezifischen Abflussverhaltens dar, was durch die Arbeiten zahlreicher Autoren bestätigt wird (u.a. PESCHKE et al., 1999, TILCH et al., 2002; SCHERRER & NAEF, 2003a,b; SCHERRER, 2006). Die digitale Ausweisung dominierender Abflussprozesse durch ein Geographisches Informationssystem (GIS) extrapoliert dabei die standortbezogene Information in die Fläche. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit auch für größere Einzugsgebiete, die nicht mehr manuell kartierbar sind²⁷, unter Zuhilfenahme von verfügbarem, digitalem Datenmaterial, Abflussprozesskarten zu erstellen, die als Planungsgrundlage für ein künftiges Flächenmanagement dienen können. Ferner stellen die Abflussprozesskarten eine Basis zur hydrologischen Modellierung dar, die dabei hilft, Modellergebnisse zu verbessern und realitätsnäher abzubilden. So verwendeten z. B. HELLEBRAND et al. (2011) GIS-DRP-Karten zur Etablierung eines einfach zu parametrisierenden und zu kalibrierenden, hydrologischen Modellkonzeptes.

Die verschiedenen, teilweise parallel zueinander entwickelten Ansätze zur digitalen Abflussprozesskartierung (siehe Kapitel 2.3) bieten Vor- und Nachteile für spezifische Fragestellungen und erfassen den Themenkomplex „Abflussbildung“ und „dominierende Abflussprozesse“ aus verschiedenen Blickwinkeln. Dabei müssen zur Anwendung der jeweiligen Methode unterschiedliche Flächeninformationen zu Grunde gelegt werden. Oftmals sind die benötigten Daten aber nicht flächendeckend verfügbar, was eine Regionalisierung erschwert oder kostspielige Nachkartierungen erfordert. Ansätze wie jene von SCHMOCKER-FACKEL et al. (2007) oder SCHÜLER (2006) benötigen beispielsweise genaue Bodenkarten (1:5000), Waldvegetationskarten oder digitale Informationen einer vorab durchgeführten forstlichen Standortkartierung. Die Ergebnisse solcher Ausweisungen bieten genaue Informationen für ein zukünftiges Flächenmanagement, sind aber durch die flächenhafte Begrenzung der Datengrundlagen in ihrem Anwendungsbereich beschränkt.

Um mit (frei) verfügbaren, flächenhaften Grundlagendaten (DHM, Geologie, Landnutzung) auch für mesoskalige Gebiete ubiquitär digitale Abflussprozesskarten zu erstellen, etablierten MÜLLER et al. (2009) das in Kapitel 2.4 und 4.3 erläuterte GIS-DRP-Tool. Da bei der Anwendung dieses Werkzeugs speziell in walddreichen Gebieten Fragen zur Genauigkeit und den Einflussfaktoren auf die dort vorherrschende Abflussbildung offen blieben, wurde eine Validierung nötig, die durch die durchgeführten Untersuchungen realisiert werden konnte.

²⁷ Eine manuelle Bohrstock-Kartierung des Bodens und seiner Eigenschaften (Bodenfunktionskartierung) zu Validierungszwecken ist für größere Einzugsgebiete nicht realisierbar, da der zeit- und kostenintensive Aufwand oftmals nicht von der betreffenden Institution geleistet werden kann.

Aufgrund der boden-hydrologischen Experimente und Messungen wurden drei Parameter zur Optimierung von GIS-DRP in von Wald geprägten Gebieten ermittelt, die ohne die Implementierung neuer Basisdaten bestimmbar sind. Konkret handelte es sich um die Parameter *Verschlämmungsneigung* (zur realitätsnäheren Charakterisierung von Landwirtschaftsflächen am Rande forstlicher Standorte), *Niederschlagsintensität* bzw. *Extrem-Ereignisse* sowie *Semipermeabilität*. Nach deren Implementierung wurden die modifizierten Abfrage-Algorithmen für die jeweils in Frage kommenden Einzugsgebiete angewandt.

Als ein Beispiel für verschiedene Herangehensweisen bzw. unterschiedliche Ausweisungsansätze für DRP sowie für die verbesserte Genauigkeit des vorgestellten Tools nach der GIS-DRP-Modifizierung kann z. B. das Einzugsgebiet Frankelbach herangezogen werden. Hier liegen zwei digital erstellte Abflussprozesskarten vor – jene nach SCHÜLER (2006) und die neue GIS-DRP *Medium* Karte (Kapitel 5.2.1.1) – welche auf grundsätzlich verschiedenen Abflussprozesskartierungsansätzen beruhen. Durch den Vergleich beider Karten werden die Vorteile von GIS-DRP gegenüber bisherigen Ansätzen deutlich, da ohne eine detaillierte Datengrundlage wie z. B. der forstlichen Standortaufnahme, Kartenwerke erzeugt wurden, die hinsichtlich der Abflussprozesse und deren Verteilung ähnlich genaue Ergebnisse erzielen (Tab. 5.20; Abb. 5.45). So werden die Ackerflächen der kulminierten Randbereiche in beiden Karten durch HOF-Prozesse erfasst, während die Forstflächen hauptsächlich durch SSF und die Gerinnebereiche durch SOF-Prozesse repräsentiert werden. Im Falle der Karte nach SCHÜLER (2006; Anhang Abb. A13) bedurfte es, bezüglich der nicht forstlich genutzten Gebiete, einer flächenhaften Bodenkartierung, da die Informationen der forstlichen Standortaufnahme lediglich für Wälder verfügbar sind. Landwirtschaftliche Nutzflächen, wie Acker oder Grünland, werden bei der Forstbodenkartierung nicht abgedeckt und müssen daher manuell durch Kartierungen nacherhoben werden. Eine weitere Einschränkung der Anwendbarkeit des Forstansatzes in anderen Landschaftsräumen liegt in den nur teilweise zur Verfügung stehenden digitalen Daten der forstlichen Standortkartierung begründet.

Die optimierten Klassifikationen und die hieraus resultierenden Abflussprozesskarten schließen demnach eine Lücke zwischen den im Gelände erhobenen Daten und den bisher erstellten GIS-DRP-Karten sowie Abflussprozesskarten anderer Ansätze. Fußend auf den erneuerten Abfragen im GIS wird es nun möglich für jedes Einzugsgebiet genauere und realitätsnähere Abflussprozesskarten ereignisspezifisch zu erstellen (Basis, Medium, Extrem). Des Weiteren ist es möglich, eine Optimierung von GIS-DRP, basierend auf den bisher verwendeten, flächenhaft verfügbaren Grundlagendaten zu erreichen.

Folglich können Forst- sowie Landschaftsplanern in Zukunft GIS-DRP-Karten angeboten werden, die verschiedene Niederschlagsereignisse abdecken und dabei Gebiete identifizieren, die bezüglich eines nachhaltigen Forstmanagements vorrangig in den Fokus des Interesses rücken sollten. Hinsichtlich einer auf GIS-DRP-Karten basierenden hydrologischen Modellierung kann durch die Weiterentwicklung des GIS-Tools gleichfalls eine breitere Anwendung in diesem Bereich erfolgen. Dies ist Gegenstand aktueller Forschung (z. B. HELLEBRAND et al., 2011).

Resümierend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass das Abflussgeschehen in bewaldeten Einzugsgebieten und die dort auftretenden dominierenden Abflussprozesse von standortspezifischen Faktoren beeinflusst werden, die jedoch bis dato nicht immer durch die zur Verfügung stehenden Abflussprozesskartierungen berücksichtigt werden konnten. Eine Validierung von digital erzeugten Abflussprozesskarten, basierend auf Geländeergebnissen wie Kartierungen oder Messungen, zur Sicherstellung der Genauigkeit dieser Karten, ist dementsprechend sehr wichtig. Zudem wurde in dieser Arbeit deutlich, dass durch eine solche Validierung Potential zur Verbesserung der entwickelten Ansätze aufgezeigt wird. Selbstverständlich ist eine solche, auf bodenkundlichen Kartierungen und Geländeexperimenten basierende Vorgehensweise aufgrund des enormen Arbeits- und Kostenaufwandes für Untersuchungsräume der Meso- oder gar Makroskala keine gangbare Lösung. Umso bedeutender ist die Überprüfung der Genauigkeit digitaler Tools in Gebieten, die mit noch akzeptablem Aufwand, durch repräsentative Standorte, abgebildet werden können. Bei einer Regionalisierung und Extrapolation der Anwendung wird hierdurch die Generierung vergleichsweise geringer Fehlerquoten möglich.

Hinsichtlich der zur Validierung angewandten Methodik bleibt zu erwähnen, dass die bodenhydrologischen Grundlagenuntersuchungen (Kartierungen, Stechring-Untersuchungen, Doppelring-Infiltrometrie) sehr gut geeignet und essentiell sind, um die Eigenschaften eines Standortes bezüglich seines Abflussverhaltens einzuschätzen und zu klassifizieren. Auch die Beregnungsexperimente mittels der in Kapitel 4.1 erläuterten mobilen Systeme verschiedenen Maßstabs (Punkt- und Plot-Skala) stellen ein probates Werkzeug zur Untersuchung und Erhebung von Abflussprozessen in der Landschaft dar (HÜMANN et al., 2011).

Diese Kombination aus den bodenphysikalischen Grundlagenuntersuchungen und den künstlichen Niederschlagsexperimenten bilden daher die Grundlage für eine realitätsnahe Bewertung der Standorteigenschaften (HÜMANN et al., 2010b) ebenso wie zur Validierung von Modellergebnissen und GIS-Applikationen.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Abflussgeschehen unter Wald und die hiermit verknüpften dominierenden Abflussprozesse sind maßgeblich von den bodenphysikalischen Eigenschaften eines Forststandortes abhängig. Die vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass Parameter wie die Trockenrohdichte, die Porung und der Grobbodenanteil sowie dessen Position und Lage im Bodenkörper, einen stärkeren Einfluss auf die Abflussgenese ausüben als die vorherrschende Baumart. Die für die Abflussbildung bedeutsamen physikalischen Parameter gehen zum einen aus dem Substrat und der Bodentextur und zum anderen aus der Bewirtschaftung und deren Intensität hervor. Wichtig ist daher, dass speziell in Landschaftsräumen mit schlechten bodenphysikalischen Voraussetzungen auf eine nachhaltige Bewirtschaftung geachtet wird und Flächen besonderer Sensibilität geschont und vor neuen waldbaulichen Maßnahmen melioriert werden.

Des Weiteren stellen die Vorfeuchte und damit die vorherrschenden Witterungsbedingungen einen zentralen Faktor dar, der die Ausbildung von dominanten Abflussprozessen in Waldgebieten beeinflusst. Saisonale Effekte wie sommerliche Trockenheit oder vollständige Sättigung des Waldbodens in feuchten Winterperioden bedingen Oberflächenabflüsse (HOF/SOF), die sich verstärkend auf Hochwasserereignisse auswirken können. Diese, für Waldgebiete, untypischen Abflussprozesse werden generell nicht erwartet, treten aber in Erscheinung sobald spezielle Ausgangsbedingungen wie z. B. die Hydrophobizität der Bodenoberfläche oder (reliktische) Stauhorizonte im Bodenkörper auftreten. Auch der anthropogene Einfluss kann, etwa durch zu intensive oder falsch durchgeführte Forstbearbeitung, Oberflächenabflüsse im Wald hervorrufen. Wird diesen Tatsachen bei der forstlichen Planung Rechnung getragen, so ist es möglich durch präventive Maßnahmen zur Verminderung oder Vermeidung der schnellen Weiterleitung oberflächlich abfließenden Wassers beizutragen. Die Arbeiten im Bestand sollten immer auf die Nachhaltigkeit des Standortes für ein gesundes Pflanzenwachstum und einen ausgeglichenen Landschaftswasserhaushalt ausgerichtet sein. Im Zuge des regionalen Klimawandels kann dies nur vorteilhaft sein, da sich die Forststandorte bei positiven standörtlichen Ausgangsbedingungen besser an einen klimatischen Wandel adaptieren können.

Gegenüber den erwähnten Oberflächenabflüssen kann der Zwischenabfluss (SSF) verschiedener Reaktionsgeschwindigkeit als der typische Abflussprozess der mitteleuropäischen Wälder angesehen werden. Die in den Mittelgebirgen weit verbreiteten periglaziären Deckschichten sind hier oftmals ausschlaggebend für die Generierung von lateralen, im Boden verlaufenden Fließbewegungen verantwortlich. Aufgrund der unterschiedlich ausgeprägten Durchlässigkeit der Unterböden, speziell am Übergang zur oftmals sehr dichten Basislage, werden hauptsächlich Zwischenabflüsse in den hiesigen Wäldern als dominierend ausgewiesen. Die Reaktionsgeschwindigkeit dieser Prozesse wird entscheidend durch die Hangneigung, die Bodenmächtigkeit, die Porung und den vorherrschenden Sättigungsgrad des Bodens determiniert. Hierbei wird generell davon ausgegangen, dass die Reaktion umso schneller erfolgt, je höher der Sättigungsgrad des Bodens ist. Die mittlere Retention auf SSF-Standorten verbessert sich mit steigender Reaktionszeit von SSF1 (schnell reagierender Zwischenabfluss) zu SSF3 (stark verzögerter Zwischenabfluss).

Werden die Deckschichten oder das Substrat eines Gebietes als semipermeabel klassifiziert, so ist das Auftreten tiefer Zwischenabflüsse (dSSF) zu erwarten. Diese treten zumeist am Grenzbereich Boden-Ausgangsgestein auf und sind bei mittleren bis tief ausgeprägten Bodenmächtigkeiten zeitlich nach den stark verzögerten Zwischenabflüssen (SSF3) einzuordnen. Standorten mit dominierendem dSSF kann daher eine gute Retentionswirkung attestiert werden.

Bei permeablem geologischem Ausgangsgestein, bildet sich im Falle naturnaher Waldbewirtschaftung, auf gut entwickelten Böden, typischerweise Tiefensickerung (DP) als dominierender Abflussprozess. Dieser ist bezogen auf die Hochwasserwirksamkeit als unbedenklich einzustufen, da der Boden zusammen mit dem Gestein als Zwischenspeicher für das Wasser fungiert. Die Retentionswirkung ist hier im Vergleich zu den anderen DRP am größten.

Abflussprozesskarten, wie jene der vorgestellten GIS-DRP-Methode, können Entscheidungsträgern im Waldmanagement in diesem Zusammenhang grundlegende Informationen liefern und so hilfreich bei der aktiven Forstplanung eingesetzt werden. Abflussprozesskarten dienen unter anderem dazu Standorte zur Aufforstung auszuweisen oder Hot Spots der Abflussgenerierung zu identifizieren. Aufforstungen könnten dann z. B. speziell in Bereichen nachteiliger Abflussbildungsprozesse durchgeführt werden, um hier, verknüpft mit Meliorationsmaßnahmen, verbessernd auf die Abflussgenese einzuwirken. Ferner können Hot Spots nach deren Identifizierung durch hochwasserschutztechnische

Maßnahmen (z. B. Retentionsmulden, Rückleitung des Oberflächenwassers in den Bestand, Lockerungsmaßnahmen) in ihrem negativen Einfluss auf die Hochwasserentstehung beschränkt werden. Auch im Falle von Kahlschlägen können die Auswirkungen dieser Maßnahme am betreffenden Standort durch Abflussprozesskarten besser abgeschätzt und eingeordnet werden, da sich Landnutzungsänderungen direkt in der Karte widerspiegeln. Durch das GIS-DRP-Tool und die auf Waldstandorte fokussierte Weiterentwicklung und Optimierung besteht nun, auch für dominierend forstlich genutzte Einzugsgebiete, die Möglichkeit realitätsnahe DRP-Karten zu erstellen. Diese liefern den Forstwirten und waldbaulichen Planern grundlegende und entscheidungsrelevante Informationen, die dabei helfen den Wald „fit“ für den Klimawandel zu machen.

Neue Fragen, die sich durch die vorgestellten Untersuchungen ergaben und die in Zukunft Inhalt eingehender wissenschaftlicher Forschung sein sollten und schon teilweise sind, beschäftigen sich mit dem Thema hydrophober Oberflächeneigenschaften in Wäldern. So bleiben z. B. Fragen nach den wasserabweisenden Eigenschaften verschiedener Humusauflagen und -horizonte offen:

Ist es lediglich die Nadelstreu, die Hydrophobizität ausbildet oder tritt dieses Phänomen auch bei Laubstreu auf? Ist in beiden Fällen eine bestimmte Humusschicht verantwortlich oder gibt es Unterschiede? Wie lange hält dieser „water repellency“-Effekt an? Wie ist der Hydrophobizitätseffekt flächenhaft zu bewerten und wie beeinflusst er die dominierenden Abflussprozesse eines Standortes?

Fragen hinsichtlich der Abflussprozesskarten bzw. spezieller von GIS-DRP und der flächenhaften Anwendbarkeit des Ansatzes unter Einbezug weiterer Grundlagendaten, wie z. B. der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BUEK 200) oder der Geologischen Übersichtskarte 1:300.000 (GUEK 300), sollten ebenfalls durch weitere Studien beantwortet werden. Hierdurch könnte die Regionalisierung des Ansatzes auf die Makroskala übertragen werden, was das Tool auch für Bundesländer, Großregionen oder Länder, unter anderem in Bereichen des Landschaftswasserhaushaltes, des dezentralen Wasserrückhaltes und des nachhaltigen Forstmanagements nutzbar machen würde.

7. Gesamtzusammenfassung

Wälder erfüllen eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionen, die sowohl ökologische und ökonomische als auch soziale Belange betreffen. Speziell im Zusammenhang mit terrestrischen Wasserressourcen spielt der Wald und dessen Einfluss auf den gesamten Landschaftswasserhaushalt eine wichtige Rolle. Die Interaktionen zwischen Wald und Boden stellen jedoch noch immer eine Grauzone im hydrologischen Kenntnisstand dar und es bestehen Defizite im Expertenwissen über Abflussbildung- und -konzentration sowie die generellen Wechselwirkungen zwischen Forst, Boden und Wasser in waldbaulich genutzten Gebieten. Hinzu kommt, dass der Wald und diejenigen die ihn bewirtschaften, vor dem Hintergrund des Klimawandels, zukünftig mit neuen, bisher unbekanntem Umweltbedingungen umgehen bzw. sich auf diese einstellen müssen.

Das EU INTERREG NWE IVB Projekt "ForeStClim - Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts", in dessen Kontext die vorliegende Schrift entstand, setzt genau an diesem Punkt an. Im Zuge des regionalen Klimawandels sollen Waldschutz- und -management-Strategien entwickelt werden, um die Wälder Nordwest-Europas bestmöglich an neuartige Klimabedingungen adaptieren zu können. Des Weiteren sollen Forstwirten und Personen der waldbaulichen Planung durch wissenschaftlich erarbeitete Maßnahmen und Konzepte angeleitet werden, um die nachhaltige ökologische und ökonomische Nutzung der Wälder zu sichern.

Die hier präsentierte Arbeit soll, geprägt durch den Projektcharakter, einen Beitrag zum nachhaltigen Forstmanagement liefern und beschäftigt sich daher mit den grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen Boden und Wasser in forstlich genutzten Gebieten. Hierzu wurden auf 25 Test-Plots in vier ForeStClim-Untersuchungsgebieten in Rheinland-Pfalz und dem Großherzogtum Luxemburg bodenkundlich-hydrologische Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich wurde ein, auf einem Geografischen Informationssystem (GIS) basierendes, Werkzeug zur Ausweisung dominanter Abflussprozesse (GIS-DRP) nach MÜLLER et al. (2009) in den bewaldeten Testgebieten angewandt, validiert und weiterentwickelt. Zur Validierung der GIS-generierten Abflussprozesskarten wurden neben bodenkundlichen Kartierungen, bodenphysikalischen Stechringuntersuchungen und Infiltrationsexperimenten hauptsächlich Beregnungsversuche auf Plot- und Punkt-Skala sowie manuelle Abflussprozesskartierungen durchgeführt.

Auf Grundlage der Geländeuntersuchungen konnten große intraspezifische Unterschiede im Abflussverhalten von Waldstandorten erhoben werden. Neben Zwischenabflüssen (SSF) verschiedener Ausprägung wurden Sättigungsflächenabflüsse (SOF), HORTON'sche Oberflächenabflüsse (HOF) und Tiefensickerungsprozesse (DP) nachgewiesen. Die Resultate der angewandten Methodik zeigen, dass diese Differenzen entscheidend durch das Substrat, die bodenphysikalischen Eigenschaften, die Nutzung bzw. deren Intensität und die Vorfeuchte bedingt werden. Ergänzend zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen, dass Parameter wie die Trockenrohddichte, die Porung und der Grobbodenanteil einen stärkeren Einfluss auf die Abflussgenese ausüben als die vorherrschende Baumart eines Waldbestandes.

Es wurde bestätigt, dass Wälder generell hohe Infiltrationsraten aufweisen und verzögerte Zwischenabflussprozesse begünstigen. Dieser Zwischenabfluss kann als der typische Abflussprozess der mitteleuropäischen Wälder angesehen werden. Speziell in den Mittelgebirgen sind es die weit verbreiteten periglaziären Deckschichten, die oftmals ausschlaggebend für die Generierung von lateralen, im Boden verlaufenden Fließbewegungen sind. Die Reaktionsgeschwindigkeit der im Boden verlaufenden Flüsse ist hauptsächlich von der Hangneigung, der Bodenmächtigkeit, der Vorfeuchte und der Anzahl präferentieller Fließpfade abhängig. Generell wird davon ausgegangen, dass die Reaktion umso schneller erfolgt, je höher der Sättigungsgrad des Bodens ist.

Neben der Generierung von Zwischenabflüssen sind saisonale Effekte wie sommerliche Trockenheit oder vollständige Sättigung des Waldbodens in feuchten Winterperioden dazu im Stande Oberflächenabflüsse in Wäldern zu bedingen, die sich verstärkend auf Hochwasserereignisse auswirken können. So fließt das Wasser aus der Fläche u. a. auf Wege oder in wegbegleitende Gräben von wo aus es meist schnell dem nächsten Fließgewässer zugeführt wird. Hier tragen die betreffenden Abflüsse steigend zum Flutereignis bei.

Auch durch anthropogene Einflüsse, etwa durch zu intensive oder falsch durchgeführte Forstbearbeitung, können Oberflächenabflüsse im Wald hervorgerufen werden. Verdichtungen des locker gelagerten Waldbodens sind oftmals irreversibel und haben ebenso negative Auswirkungen auf die Abflussbildung wie etwa die Zerstörung oder Entfernung der schützenden Humusaufgaben. Die Arbeiten im Bestand sollten daher immer auf die Nachhaltigkeit des Standortes für ein gesundes Pflanzenwachstum und einen ausgeglichenen Landschaftswasserhaushalt ausgerichtet sein. Im Zuge des regionalen Klimawandels kann dies nur als vorteilhaft bewertet werden, da sich die Forststandorte bei günstigen standörtlichen Ausgangsbedingungen besser an einen klimatischen Wandel adaptieren.

Die mittels GIS-DRP erstellten Abflussprozesskarten der vier Testgebiete wurden durch die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen sowie der Abflussprozesskartierungen validiert. Hierdurch wurde deutlich, dass das digitale Tool nach MÜLLER et al. (2009) eine gute Möglichkeit der flächenhaften DRP-Ausweisung darstellt. Des Weiteren wurden durch die Validierung für die Abflussgenerierung wichtige Parameter ermittelt und Optimierungsansätze erarbeitet, welche anschließend in GIS-DRP implementiert werden konnten. Die Relevanz des Parameters *Verschlämmungsneigung* wurde durch den Vergleich verschiedener Abflussprozesskarten und Klassifikationsansätze deutlich, sodass dessen Implementierung in GIS-DRP forciert wurde. Verschlämmungsprozesse auf Ackerflächen können nun durch das modifizierte GIS-DRP-Werkzeug charakterisiert werden. Zudem wurde eine Abhängigkeit des vorherrschenden Abflussprozesses von der Intensität des Niederschlages nachvollzogen. Da durch verschiedenste meteorologische Institutionen eine Häufung von starken und extremen Niederschlagsereignissen für die Zukunft bestätigt wird, sollte auch dieser Parameter in GIS-DRP einfließen. Demnach war es möglich, *Extrem-Ereignis* basierte Abflussprozesskarten zu etablieren, die Hot Spots der Abflussgenerierung identifizieren können. Die Einführung des Abflussprozesses *tiefer Zwischenabfluss* (dSSF) wurde durch eine neue Klassifizierung des geologischen Ausgangssubstrates erreicht. Wird ein Grundgestein aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften als *semipermeabel* klassifiziert, so werden speziell auf hängigen Waldstandorten tiefe Zwischenabflüsse ausgewiesen.

Forstwirten und Entscheidungsträgern im Waldmanagement wird durch das weiterentwickelte GIS-DRP-Tool und die gewonnenen Erkenntnisse die Möglichkeit geboten, Expertenwissen in ihre Planungen einfließen zu lassen. Ebenso bekommen Modellierer ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, das ihnen genauere Grundlagen für eine realitätsnahe (hydrologische) Modellierung erstellt. Die Neuerungen in GIS-DRP führen dazu, dass Abflussreaktionen in einem Landschaftsraum, während verschiedenster Niederschlagsereignisse besser abgeschätzt werden können. Hierdurch kann zum einen positiv auf den Landschaftswasserhaushalt eingewirkt werden, da gezielt auf Flächen nachteiliger Abflussbildung geeignete Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes angewandt werden können. Zum anderen werden Potentiale für bestmögliche Waldwachstumsvoraussetzungen in einer Landschaft aufgezeigt. Der nachhaltigen Nutzung von Wäldern wird somit auch im Kontext des Klimawandels Rechnung getragen.

Literaturverzeichnis

- ALLAN, J.D.; ERICKSON, D.L.; FAY, J. (1997): The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 37, 149–161.
- ANDERSON, M.G. & BURT, T.P. (1990): *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley & Sons, Chichester, 1–8.
- ANDERSON, A.E. & WEILER, M. (2005): How do preferential flow features connect? Combining tracers and excavation to examine hillslope flow Pathways on Vancouver Island, British Columbia, Canada. American Geophysical Union, Fall Meeting 2005, Abstract.
- ANDERSON, A.E.; WEILER, M.; ALILA, Y.; HUDSON, R.O. (2009): Subsurface flow velocities in a hillslope with lateral preferential flow. *Water Resour. Res.*, 45, W11407, doi:10.1029/2008WR007121.
- ATZBACH, O. (1986): *Geologische Karte von Rheinland-Pfalz 1:25.000. Erläuterungen Blatt 6411*, Wolfstein, Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz.
- BERGSMAN, E. (1983): Rainfall erosion surveys for conservation planning. *ITC Journal*, 2, 166-174.
- BETECHIN, A.G. (1977): *Lehrbuch der speziellen Mineralogie*. 683 S., Leipzig.
- BEVEN, K. & GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. *Water Resour. Res.*, 18, 1311-1325.
- BILL, R. (1999): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. 4. Auflage. Wichmann Verlag, Berlin, 454 S.
- BISDOM, E. B. A., DEKKER, L. W., SCHOUTE, J. F. T. (1993): Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56: 105-118.
- BIWER, C. (2011): *Untersuchung der Abflussprozesse im Einzugsgebiet des Weierbachs (Luxemburg)*. Diplomarbeit im Fach Bodenkunde, Fachbereich VI, Universität Trier.
- BLÖSCHL, G. & SIVAPALAN, M. (1995): Scale issues in hydrological modelling: a review, *Hydrol. Proc.*, 9, 312-329.
- BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): *Scheffer / Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

- BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 46, Karlsruhe.
- BRONSTERT, A. (2005) (Hrsg.): Abflussbildung. Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft der DWA, Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, 13.05., München.
- BROSINGER, F. & ROTHE, A. (2003): Intakter Bergwald – unverzichtbar für den Hochwasserschutz in Bayern. In: Berichte aus der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF-Berichte, Freising, 40, 34-38.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2003): HAD - Hydrologischer Atlas von Deutschland, Freiburger Verlagsdienste.
- BUNZA, G.; DEISENHOFER, HE.; KARL, J.; PORZELT, M.; RIEDL, J. (1985): Der künstliche Starkniederschlag der transportablen Berechnungsanlage nach Karl und Toldrian. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau eV 71: 3-35.
- BUTTLE, J.M. & McDONALD, D.J. (2002): Coupled vertical and lateral preferential flow on a forested slope, *Water Resour. Res.*, 38, 5, doi:10.1029/2001WR000773, 18/1–18/16.
- CALDER, I.R. (2005): *Blue Revolution – Integrated Land and Water Resource Management*, 2nd ed. Earthscan London, Sterling, VA.
- CALDER, I.R. & AYLWARD, B. (2006): *Forest and Floods: Moving to an Evidence-based Approach to Watershed and Integrated Flood Management*. International Water Resour. Association. *Water International*, 31(1), 1-13.
- CALVO, A.; GISBERT, J. M.; PALAU, E.; ROMERO, M. (1988): Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. – In: Sala, M. & Gallart, F. (eds.): *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía No. 1: 6–15; Barcelona.
- CASPER, M. (2002): *Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald)*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), 210 S..
- CHANG, M. (2003): *Forest hydrology. An introduction to water and forests*. CRC Press, Boca Raton (FA), USA.

- CHIFFLARD, P.; ZEPP H. & SCHUMANN, A. (2004): Untersuchungen zum Einfluss der Vorfeuchte und des Reliefs auf die Abflussbildung. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 05.04, Band 2:69-73.
- CHIFFLARD, P. (2006): Der Einfluss des Reliefs, der Hangsedimente und der Bodenvorfeuchte auf die Abflussbildung im Mittelgebirge. Experimentelle Prozess-Studien im Sauerland. – Diss. Ruhr-Universität Bochum, Bochumer Geographische Arbeiten 76, 162 S..
- CHIFFLARD, P.; DIDSZUN, J.; ZEPP, H. (2008): Skalenübergreifende Prozess-Studien zur Abflussbildung in Gebieten mit periglazialen Deckschichten (Sauerland, Deutschland). Grundwasser 13(1), 27-41.
- COSTA, M.H.; BOTTAB, A.; CARDILLEB, J.A. (2003): Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. J. Hydrol, Vol. 283, 206-217.
- DIN 19682-7 (2007): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrimeter, Beuth Verlag, Berlin.
- DINGMAN, S.L. (2002): Physical hydrology. Engelwood Cliff, NJ: Prentice Hall.
- DOERR, S.H.; FERREIRA A.J.D.; WALSH, R.P.D.; SHAKESBY, R.A.; LEIGHTON-BOYCE, G.; COELHO, C.O.A. (2003): Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. Hydrological Processes, 17(2), 363-377.
- DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU, e. V. (Hrsg.) (1999): Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss – Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze. Bonn.
- DVWR, DEUTSCHER FORSTWIRTSCHAFTSRAT (2011): Broschüre Wald – Mensch. http://www.dfwr.de/download/Broschuere_1903_final.pdf, 22.06.2011.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): Wetterlexikon, Starkregen. <http://www.deutscherwetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=S&DAT=Starkregen>, 18.04.2011.
- DWD, DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): Deutschlandwetter im Frühling 2011, Pressemitteilung vom 30.05.2011. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Content%2FPresse%2FPressemitteilungen%2F2011%2F20110530_DeutschlandwetterFruehling_2011_news.html, 09.08.2011.
- EINSELE, G., AGSTER, G., ELGNER, M. (1986): Niederschlag-Bodenwasser-Abflußbeziehungen bei Hochwasserereignissen im Keuper-Lias-Bergland des Schönbuchs.- In: EINSELE,

- G. (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbuch: Wasser- und Stoffhaushalt, bio-, geo- und forstwirtschaftliche Studien in Südwestdeutschland.- DFG-Forschungsbericht: 209 –234; Weinheim.
- ENGELS, B. (2009): Einfluss von Rodung auf die Erosions- und Oberflächenabflussdynamik eines Steillagen-Weinbergs, Diplomarbeit des Faches Physische Geographie, Universität Trier.
- FAEH, A.O. (1997): Understanding the processes of discharge formation under extreme precipitation; A study based on the numerical simulation of hillslope experiments, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 150.
- FISTER, W.; ISERLOH, T.; RIES, J.B.; SCHMIDT, R.-G. (2011): Comparison of rainfall characteristics of a small portable rainfall simulator and a combined portable wind and rainfall simulator. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55(3), 109-126.
- FOELSTER, H.; DEGENHARDT, M.; FLOR, T.; LUX, M. (1991): Untersuchungen zur Tiefendurchwurzelung und Durchwurzelungsintensität auf Braunerde-Pseudogleyen im Vorderen Hunsrück in Abhängigkeit von Baumart und Bestandesstrukturparametern. *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz*, Nr. 19, 91-106.
- FOHRER, N. (1995): Auswirkungen von Bodenfeuchte, Bodenart und Oberflächenverschlammung auf Prozesse der Flächenerosion durch Wasser. Dissertation, Technische Universität Berlin, *Bodenökologie und Bodengenese* 19: 183 p.
- FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.A.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K. (2005): Global Consequences of Land Use. *Science*, Vol. 309, 570-574.
- GALLUS, M.; LEY, M.; SCHUBERT, D.; SCHÜLER, G.; SEGATZ, E.; WERNER, W. (2007a): Renaturierung von Hangbrüchern im Hunsrück zur Glättung von Abflussspitzen. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, *Mitteilungen der FAWF*, 64/07, Trippstadt.
- GALLUS, M.; LEY, M.; SCHUBERT, D.; SCHÜLER, G.; SEGATZ, E. (2007b): Erstaufforstung in Hotspots der Abflussentstehung. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S.

- (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- GERMANN, P.F. (1981): Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr.51, ETH Zürich, 135 S.
- GERMANN, P.F. & BEVEN, K. (1981): Water flow in soil macropores. 1. An experimental approach. *Journal of Soil Science*, 32, 31-39.
- GEO DATA ZONE – DAS LEXIKON DER ERDE (2011): Ereigniswasser. <http://www.geodz.com/deu/d/Ereigniswasser>. 28.10.2011.
- GRIESSHAMMER, N. (2005): Hintergrundinformation – Daten und Fakten Wald. WWF Deutschland (Hrsg.), Berlin.
- GÜMBEL, C.W.V. (1894): Geologie von Bayern, 2 Bde., Bd.2, 889-1064: Die Rheinpfalz, Kassel.
- HARDER, S.V.; AMATYA, D.M.; CALLAHAN, T.J.; TRETIN, C.C.; HAKKILA, J. (2007): Hydrology and Water Budget for a Forested Atlantic Coast Plain Watershed, South Carolina. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 43 (3), 563-575.
- HARTGE, K.-H. & BOHNE, H. (1985): Zur gegenseitigen Beeinflussung von Baum und Bodengefüge. *Allgemeine Forst Zeitschrift*, 41, 235-237.
- HARTGE, K.-H. & HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. 3. durchgesehene Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- HEGG, C. (2004): Zur Schutzwirkung des Waldes gegen Hochwasser. *Forum für Wissen*, 15–20.
- HEGG, C. (2006): Waldwirkung auf Hochwasser. In: *Berichte der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF Wissen 55, Freising*, 29 - 33.
- HELLEBRAND, H., VAN DEN BOS, R., HOFFMANN, L., JUILLERET, J.; PFISTER, L. (2008): Investigating the degree of information needed to regionalize winter storm flow coefficients, *Hydrol. Sci. J.*, 53, 773–788.
- HELLEBRAND, H. (2010): Theories, Experiments, Tools – An applied hydrological spatio-temporal assessment of meso-scale basins with a view to regionalization. Dissertation, TU Delft, The Netherlands.
- HELLEBRAND, H.; MÜLLER, C.; FENICIA, F.; MATGEN, P.; SAVENIJE, H. (2011): A process proof test for model concepts: modelling the meso-scale. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol.36, Issues 1-4, 42-53.

- HENDRIKS, M.R. (1993): Effects of lithology and land use on storm runoff in East Luxembourg. *Hydrological Processes*, 7, 213-226.
- HEUVELDOP, J. (1973): Die Größe der Interzeptionsverdunstung in Fichtenkronen abhängig von einzelnen klimatischen Faktoren. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 144: 35-41.
- HERMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie., Teubner, Stuttgart, 151 S.
- HERRMANN, A.; KOLL, J.; LEIBUNDGUT, CH.; MALOSZEWSKI, P.; RAU, R.; RAUERT, T.; SCHÖNIGER, M.; STICHLER, W. (1989): Wasserumsatz in einem kleinen Einzugsgebiet im paläozoischen Mittelgebirge. *Landschaftsökologie und Umweltforschung* 17, Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig, 250 S.
- HIEGE, W. (1985): Wasserhaushalt von Forsten und Wäldern und der Einfluss des Wassers auf Wachstum und Gesundheit von Forsten und Wäldern. Eine Literaturstudie. *Waterbeheer Natuur Bos en Landschap*, Utrecht.
- HILDEBRANDT, E.E. (1983): Der Einfluß der Bodenverdichtung auf die Bodenfunktionen im forstlichen Standort. *Forstwiss. Cbl.*, 102, 111-125.
- HILLEL, D. (1971): *Soil and Water: Physical principles and processes*. Academic Press, New York, 288 S.
- HINTERMAIER-ERHARD, G. & ZECH, W. (1997): *Wörterbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 338 S.
- HIRSCHBERGER, P. (2007): *Die Wälder der Welt – Ein Zustandsbericht*. Globale Waldzerstörung und ihre Auswirkungen auf Klima, Mensch und Natur. WWF Schweiz (Hrsg.), Zürich.
- HOLTHOF, E. (2011): Effekte „künstlicher“ Trockenheit auf die Hydrophobizität der Nadelstreu und den Oberflächenabfluss in einem Fichtenbestand. Bachelor-Thesis, Fach Bodenkunde, Universität Trier.
- HORTON, R.E. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. *American Geophysical Union Transactions*, 14, 446-460.
- HÜMANN, M. (2008): Auswirkungen von Tieflockerungsmaßnahmen erstaufgeforsteter Flächen in Eifel und Hunsrück auf Bodeneigenschaften und Wuchsleistung von Bäumen, Diplomarbeit im Fach Bodenkunde, Fachbereich VI, Universität Trier.
- HÜMANN, M.; SCHNEIDER, R.; SCHÜLER, G. (2010a): Auswirkungen von Tieflockerung auf erstaufgeforsteten Flächen. *AFZ-DerWald*, 5, 8-12.
- HÜMANN, M.; SCHOBEL, S.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R. (2010b): A rainfall simulator for characterising dominant runoff processes on the scale of hillside segments, EGU General Assembly, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-4382.

- HÜMANN, M.; SCHÜLER, G.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; JOHST, M.; CASPARI, T. (2011): Identification of runoff processes - Impact of different forest types and soil properties on soil-water interrelations and floods. *J. Hydrol.*, 409, 637-649.
- HUFFMAN E.L., MACDONALD L.H. AND STEDNICK J.D. (2001): Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pin, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15, 2877–2892.
- IEEP & ALTERRA (2010): Reflecting environmental land use needs into EU policy: preserving and enhancing the environmental benefits of “land services”: soil sealing, biodiversity corridors, intensification / marginalisation of land use and permanent grassland. Final report to the European Commission, London.
- IHW – INSTITUT FÜR HYDROMECHANIK UND WASSERWIRTSCHAFT DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ETH ZÜRICH (2000): Die Beurteilung von Einzugsgebieten und ihrer Teilflächen nach der Abflussbereitschaft unter Berücksichtigung der landschaftlichen Nutzung – aufgezeigt an drei Einzugsgebieten in Rheinland-Pfalz. Im Auftrag des Landesamtes für Wasserwirtschaft, Rheinland-Pfalz.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC (2007): Klimaänderung 2007 - Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Deutsche Übersetzung, Hrsg. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Stuttgart.
- ISERLOH, T. & FISTER, W. & RIES, J.B. & SEEGER, M. (2010): Design and calibration of the small portable rainfall simulator of Trier University. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-2769.
- JOHST, M. & CASPER, M. (2007): Untersuchungen zum Wasserhaushalt und zum Abflussbildung im Frankelbach-Einzugsgebiet. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, *Mitteilungen der FAWF*, 64/07, Trippstadt.
- JOHST, M. & CASPER, M. (2008): Hochwasserentstehung in Kleineinzugsgebieten – Modell und Realität. - In: HABERLANDT, U. et al. (Hrsg.): Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung - Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008 Hannover, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, H.23.08:98-105, Bad Hoenf.
- JOHST, M. (2011): Experimentelle und modellgestützte Untersuchungen zur Hochwasserentstehung im Nordpfälzer Bergland unter Verwendung eines neuartigen

- Spatial-TDR-Bodenfeuchtemessgeräts. Dissertation. Universität Trier, <http://ubt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2011/651/>.
- JUILLET, J.; IFFLY, J.F.; HOFFMANN, L.; HISSLER, C. (2012): The potential of soil survey as a tool for surface geological mapping: a case study in a hydrological experimental catchment (Huewelerbach, Grand-Duchy of Luxembourg). *Geologica Belgica*, 15/1-2, 36-41.
- KARL, J. & TOLDRIAN, H. (1973): Eine transportable Beregnungsanlage für die Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag, *Wasser und Boden* 25, 63 - 65.
- KIENZLER, P. (2007): Experimental study of subsurface stormflow formation. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Dissertation, Nr. 17330.
- KMOCH, H.G.& HANUS, H. (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. –In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (1965), 111, 1-10, Weinheim.
- KÖLLA, E. (1987): Estimating flood peaks from small rural catchments in Switzerland, *J. Hydrol.*, 95, 203-225.
- KUTILEK, M. & NIELSEN, D. R. (1994): *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, Cromay, 370 S.
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA; Hrsg.)(2000): Wirksamkeit von Hochwasservorsorge und Hochwasserschutzmaßnahmen. LAWA-Arbeitskreis "Bewirtschaftung oberirdischer Gewässer, Wasserbau" in der LAWA-Arbeitsgruppe "Oberirdische Gewässer und Küstenschutz", Schwerin.
- LANDESAMT FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND GEOLOGIE MECKLENBURG-VORPOMMERN (2002): Bodenverdichtung. Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (LUA) (2010): Brandenburg spezifische Boden-Indikatoren für ein Klimamonitoring und Grundlagen zur Ableitung von Wirkungs- und Alarmschwellen, Potsdam.
- LANGE, J.; HÄNSLER, A.; HUGENSCHMIDT, C. (2006): Hydrologische Prozessforschung bei Niedrigwasser in bewaldeten Einzugsgebieten – Einblick in die Funktionsweise extremer Dürreereignisse. In: DISSE, M. (2006): Tag der Hydrologie, Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse, Kurzbeiträge, München.
- LGB-RLP (2009): Bodenflächendaten 1:200.000. Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz, Mainz.

- LGB-RLP (2011): Dokumentation zur Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) von Rheinland-Pfalz. http://mapserver.lgb-rlp.de/php_bfd200/index.phtml, 06.07.2011, Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz, Mainz.
- LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT RLP (2001): Hochwasser im Rhein-Einzugsgebiet - März 2001, LFW-Bericht NR. 204/01, Mainz.
- LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG (2004): Bodenhydrologische Kennwerte heterogener Flächeneinheiten - Methodik der Ableitung und Anwendungsbeispiel für Nordostdeutschland. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft Nr. 87 - Bodenschutz 2.
- LASANTA, T.; PEREZ RONTOME, M. C.; GARCIA-RUIZ, J.M. (1994): Efectos hidromorfológicos de diferentes alternativas de retirada de tierras en ambientes semiáridos de la depresión del Ebro. – In: LASANTA, T. & GARCIA-RUIZ, J. M. (eds.): Efectos geomorfológicos del abandono de tierras: 69–82, Zaragoza.
- LEIBUNDGUT, CH. (1999): Konzept und Zielsetzung eines Forschungsprojektes *Abflußbildung und Einzugsgebietsmodellierung* - In: DFG (Hrsg.): *Abflußbildung und Einzugsgebietsmodellierung*, Sammlung der Beiträge zu einem Rundgespräch, 5-9.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. (1949): *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York, 689 S.
- LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. (1958): *Applied Hydrology for Engineers*. McGraw-Hill Book Company, New York, 340 S.
- LÜSCHER, P. & ZÜRCHER, K. (2003): Waldwirkung und Hochwasserschutz: Eine differenzierte Betrachtungsweise ist angebracht. In: BAYRISCHEN LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2003): *Hochwasserschutz im Wald*. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 40, 30-33.
- LULL, H. & REINHARDT, K. (1972): *Forest and Floods in the Eastern United States*. USDA Forest Service Research Paper NE-226.
- MÄGDEFRAU, K. & WUTZ, A. (1951): Die Wasserkapazität der Moos- und Flechtendecke des Waldes. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Volume 70 (2), 103-117.
- MARKART, G.; KOHL, B.; PERZL, F. (2007): Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung - eine unterschätzte Größe? *LWF Wissen*, Freising, 55, 34-43.
- MARZOLFF, I. & RIES, J.B. (2007): Gully erosion monitoring in semi-arid landscapes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 51(4), 405 – 425.
- MCCULLOCH, J.S.G. & ROBINSON, M. (1993): History of forest hydrology, *J. Hydrol.*, 150, 189-216.

- MCDONNELL, J.J. (1990): A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment, *Water Resour. Res.*, 26, 2821–2832.
- MCDONNELL, J.J. (2003): Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response, *Hydrol. Process.*, 17, 1869–1875.
- MENDEL, H.G. (2000): *Elemente des Wasserkreislaufs - Eine kommentierte Bibliographie zur Abflußbildung*, Hrsg. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), 1. Auflage, Berlin.
- MESSER, D. (2008): *Beschleunigter Abfluss aus Waldgebieten - Literaturstudie zum verminderten Rückhaltevermögen*. Diplomarbeit im Fachbereich 3: Mathematik / Naturwissenschaften, Universität Koblenz-Landau.
- MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, ERNÄHRUNG, WEINBAU UND FORSTEN RHEINLAND-PFALZ (2011): <http://www.geoportal-wasser.rlp.de/servlet/is/8180/>, 27.10.2011.
- MOESCHKE, H. (1998): *Abflussgeschehen im Bergwald: Untersuchungen in drei bewaldeten Kleinzugsgebieten im Flysch der Tegernsee-Berge*. Forstl. Forschungsbericht, 169 S., München.
- MONTGOMERY D.R.; DIETRICH, W.E.; TORRES, R.; ANDERSON, S.P.; HEFFNER, J.T.; LOAGUE, K. (1997): Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, *Water Resour. Res.*, 33(1), 91–109.
- MORGAN, R. (1999): *Bodenerosion und Bodenerhaltung*. G. Thieme Verlag, Stuttgart.
- MÜCKENHAUSEN, E. & TAVERNIER, R. (1969): *Carte des sols du Grand-duché de Luxembourg*, 1:100.000, Ministère de l'Agriculture et de la Viticulture, Administration des Services, Techniques de l'Agriculture, Service de Pédologie.
- MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; SCHRÖDER, D. (2007): Umsetzung und Validierung von hochwasserschonenden Maßnahmen in der Landwirtschaft in einem mikroskaligen Einzugsgebiet der Eifel. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): *Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen*, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- MÜLLER, C.; HELLEBRAND, H.; SEEGER, M.; SCHOBEL, S. (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes –a GIS-based and a statistical approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 779-792.
- MÜLLER, C. (2010): *Hochwasserschutz in der Landwirtschaft - Validierung und Modellierung ausgewählter Maßnahmen*; Trierer Bodenkundliche Schriften, Band 15, Abt. Bodenkunde (Hrsg.), Universität Trier, Trier.

- MUSGRAVE, G.W. & HOLTAN, H.N. (1964): Infiltration. Handbook of Applied Hydrology, Ed.: V.T. Chow, McGraw Hill, New York.
- MYGEO (2011): Topographische Karte von Deutschland. http://www.mygeo.info/landkarten/deutschland/Deutschland_Topographie_2007.jpg, 26.04.2011.
- NAEF, F.; SCHERRER, S; FAEH, A. (1998): Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Größe extremer Hochwasser: Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“, NFP31, 143 S., Zürich.
- NEMESTOTHY, N. (2009): Boden unter Druck – sind Bodenschutz und Holzernte vereinbar? BFW-Praxisinformation, 19, 9-13.
- NIEBES, D.; SCHNEIDER, R.; SCHRÖDER, D. (2002): Einfluss der Landnutzung und Möglichkeiten zur Reduzierung von Oberflächenabfluss. – In: MÜLLER, P., RUMPF, S., MONHEIM, H. (Ed.) (2002): Umwelt und Region – Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereiches 522, 83-88, Trier.
- NIESSEN, E. (2009): Forstliches Betriebsgutachten (PSG), Waldbesitz Jean Lanners, VBD Lëtzebuerg SA, Ingeldorf, Luxemburg.
- NORDMANN, B.; GOETTLEIN, A.; BINDER, F. (2009): Einfluss unterschiedlicher Waldbestockung auf die Abflussbildung – ein Beispiel aus einem Wassereinzugsgebiet im Frankenwald (Influence of different tree species on runoff formation – an example of a catchment in the low-mountain ranges Franconian Forest, Germany). Hydrologie und Wasserbewirtschaftung – Hydrology and Water Resources Management 53(2): 80-95.
- PESCHKE, G.; ETZENBERG, C.; MÜLLER, G.; TÖPFER, J.; ZIMMERMANN, S. (1999): Das wissensbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung, IHI-Schriften, Heft. 10, Zittau.
- PETER, A. (2011): Untersuchungen der bodenhydrologischen Eigenschaften von Waldböden unter Douglasie. Diplomarbeit, Fach Bodenkunde, Universität Trier.
- PFAHLER, B. (2010): Handlungsempfehlungen zum Hochwasserschutz in der Gemeinde Aach. Diplomarbeit, Fach Bodenkunde, Fachbereich VI, Universität Trier.
- PFISTER L.; BARNICH F.; BOUCHET A.; EL IDRISSE A.; IFFLY J.F.; MATGEN P.; SALVIA M.; TAILLIEZ C.; VAN DEN BOS R.; HOFMANN H.; KIES A.; STELLATO L.; TOSHEVA Z. (2006): CYCLEAU project – Final Report. FNR Program « eau », Luxembourg.

- PRESS, F. & SIEVER, R. (1995): Allgemeine Geologie: eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- RASTIN, N. (1991): Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden im vorderen Hunsrück. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 19, 79-90.
- RICHARDS, L. (1931): Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, 1(11), 318-333.
- RICHARDS, L.A. & FIREMEN, H. (1943): Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. – In: *Soil Science* (1943), 56, 173-180, Madison, Wisconsin.
- RIES, J.; LANGER, M.; REHBERG, C. (2000): Experimental investigations on water and wind erosion on abandoned fields and arable land in the central Ebro basin, Aragon. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, H. 121, S. 91-108.
- SAUER, T. (2009): Modellierung von Bodenwasserhaushalt und Abflussprozessen auf der Plotskala in Abhängigkeit von Substrat und Landnutzung. Dissertation Universität Trier, 269 S., Trier.
- SCHÄFFER, J. (2002): Befahren von Waldböden – ein Kavaliersdelikt? *Der Waldwirt* 29 (12), 21-23.
- SCHERRER, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge, VAW– Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Zürich, 147 pp., 1997.
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. LUWG, Bericht 18, Mainz, 1–126.
- SCHERRER, S. & DEMUTH, N. (2007): Die Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen als Grundlage für die Beurteilung von extremen Abflüssen. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2003a): A decision scheme to identify dominant flow processes at the plot scale for the evaluation of contributing areas at the catchments-scale, *Hydrol. Process.*, 17(2), 391–401.
- SCHERRER, S. & NAEF, F. (2003b): A decision scheme to identify dominant flow processes at the plot scale for the evaluation of contributing areas at the catchments-scale. In:

- LEIBUNDGUT, C.; UHLENBROOK, S.; MCDONNELL, J. (Hrsg.): Runoff generation and implications for river basin modelling. Freiburger Schriften zur Hydrologie 13, 11-16, Selbstverlag des Institutes für Hydrologie der Universität Freiburg, Freiburg / Br.
- SCHERRER, S., NAEF F., FAEH A. O. AND CORDERY I. (2007): Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. Hydrology and Earth System Sciences, 11, 2, 907-922.
- SCHMID, S. (2012): Einfluss der Hydrophobizität der Streuauflagen und Oberböden auf das Abflussverhalten in unterschiedlichen Waldbeständen. Diplomarbeit, Bodenkunde, Universität Trier.
- SCHMIDT, O. (2003): Hochwasserschutz im Wald. Berichte der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF Wissen 40, Freising.
- SCHMOCKER-FACKEL, P.; NAEF, F.; SCHERRER, S. (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale, Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 891-906.
- SCHNEIDER, R.; TRESSEL, E.; SCHOBEL, S.; SCHRÖDER, D. (2000): Untersuchungen zur Bedeutung des Bodens für die Hochwasserentstehung im Trierer Raum. Trierer Geographische Studien 23, 165-182, Trier.
- SCHNEIDER, R., SCHOBEL, S., NIEBES, D., SCHRÖDER, D. (2001): Untersuchungen zur Hochwasserentstehung im Labor und Gelände auf unterschiedlichen Skalenniveaus.- Mittlg. Dt. Bodenk. Ges. 96 /II, 653– 654.
- SCHOBEL, S. (2005): Erläuterungsbericht zur Abflussprozesskarte der Einzugsgebiete des Grundgrabens und Schleidweiler Baches bei der Gemeinde Zemmer/Eifel: Ber. f. d. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt, 76 pp., 2005.
- SCHOBEL, S.; SEGATZ, E.; VASEL, R.; SCHÜLER, G. (2007): Standortkartierung: Grundlage für die Bestimmung abflussrelevanter Flächen im Forst. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- SCHOBEL, S. (2008): Infiltrations- und Bodenabflussprozesse in Abhängigkeit von Landnutzung und Substrat in der Trier-Bitburger Mulde, Dissertation, Universität Trier, (<http://ubt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2008/493>).
- SCHOLTEN, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen.- Relief, Boden, Paläoklima 19, Stuttgart, 149 S..

- SCHRÖDER, R. (2000): Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. – Bonner Geographische Abhandlungen, 101: 175 S..
- SCHRÖDER, D.; NIEMEYER, J.; SCHNEIDER, R.; NIEBES, D.; ROTHSTEIN, B. (2002): Umweltgerechte Bodennutzung zur Reduzierung von Bodenverdichtung, Hochwassergefahr und Erosion sowie Nähr- und Schadstoffbelastung in einem Mittelgebirgsraum. In: MÜLLER, P.; RUMPF, S.; MONHEIM, H. (Ed.): Umwelt und Region. Ergebnisbericht der ersten Förderphase 1999/2-2002/1, Trier, 121-144.
- SCHÜLER, G. (1999): Schwemmfächer im nördlichen Oberrheingraben als Waldstandorte. Habil.-Schrift der Universität Trier. Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz, Nr. 16.
- SCHÜLER, G. (2005a): Wasserrückhalt und Hochwasserschutz durch vorsorgende Waldbewirtschaftung. - In: WAGNER, W. (2005) (Hrsg.): Abwassertechnik und Gewässerschutz. Loseblattwerk, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg.
- SCHÜLER, G. (2005b): Herleitung von abflussrelevanten Flächen zur Steuerung von Wasserrückhaltmaßnahmen im Wald, Freiburger Forstliche Forschung, H. 62.
- SCHÜLER, G. (2006): Identification of flood generating forest areas and forestry measures for water retention. For. Snow Landsc. Res. 80 (1), 99–114.
- SCHÜLER, G. (2007): Wasserrückhalt im Wald - Ein Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz. - In: SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- SCHÜLER, G.; GELLWEILER, I.; SEELING, S. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen, Mitteilungen der FAWF, 64/07, Trippstadt.
- SCHÜLER, G.; HÜMANN, M.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; JOHST, M. (2009): Vortrag: Runoff in Afforestations and in established Forests in SW-Germany, 2nd International Conference on Forests and Water in a Changing Environment, September 2009, Raleigh NC, USA.
- SCHULTE-KARRING, M. (1999): Auswirkungen von Tieflockerungsmaßnahmen erstaufgeforsteter flachgründiger Ackerstandorte in Eifel und Hunsrück auf

- Bodeneigenschaften und Wuchsleistung, Dissertation, Abteilung Bodenkunde des Fachbereiches VI, Universität Trier.
- SCHUMANN, A.H. & PATZKE, S. (2006): Hydrometrisches Messen. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Bochum.
- SCHWÄRZEL, K.; EBERMANN, S.; SCHALLING, N.; FEGER, K.-H. (2011): Induziert der Stammabfluss bei Buche präferentielles Fließen im Boden? Tagungsbeitrag zur Jahrestagung der DBG 2011, Berlin.
- SCHWARZ, O. (1985): Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen - Messungen mit einer transportablen Berechnungsanlage in Baden-Württemberg. Schriftenreihe DVWK 71, S.185-230.
- SEEGER, M. (2007): Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. – *Catena* 71: 56–67.
- SEELING, S.; GELLWEILER, I.; HILL, J.; SCHÜLER, G. (2009): Wege zum dezentralen Hochwasserschutz. Erfahrungen und Beispiele nachhaltigen Einzugsgebietsmanagements im Mittelgebirgsraum, Trierer Geographische Studien, Heft 31, Geographische Gesellschaft Trier.
- SEGATZ, E.; GELLWEILER, I.; GALLUS, M.; SCHÜLER, G. (2009a): Holzbach. - In: SEELING, S.; GELLWEILER, I.; HILL, J.; SCHÜLER, G. (2009): Wege zum dezentralen Hochwasserschutz. Erfahrungen und Beispiele nachhaltigen Einzugsgebietsmanagements im Mittelgebirgsraum, Trierer Geographische Studien, Heft 31, S. 137 - 192, Geographische Gesellschaft Trier.
- SEGATZ, E.; JOHST, M.; GELLWEILER, I.; GALLUS, M.; SCHÜLER, G. (2009b): Frankelbach. - In: SEELING, S.; GELLWEILER, I.; HILL, J.; SCHÜLER, G. (2009): Wege zum dezentralen Hochwasserschutz. Erfahrungen und Beispiele nachhaltigen Einzugsgebietsmanagements im Mittelgebirgsraum, Trierer Geographische Studien, Heft 31, S. 137 - 192, Geographische Gesellschaft Trier.
- SERVICE GEOLOGIQUE (1996): Carte géologique du Grand-duché de Luxembourg, 1:100.000, V.2.2.
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.W.; GUPTA, V.K.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; MCDONNELL, J.J.; MENDIONDO, E.M.; O'CONNELL, P.E.; OKI, T.; POMEROY, J.W.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S.; ZEHE, E. (2003): IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences, *Hydrological Sciences–Journal*, 48(6).

- SPITTLEHOUSE, D.L. & STEWART, R.B. (2003): Adaption to climate change in forest management, BC Journal of Ecosystems and Management, Volume 4, Number 1.
- SPUHLER, L. (1957): Einführung in die Geologie der Pfalz, Verlag der Pfälzischen Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften, Speyer / Rh.
- SYMADER, W. (2004): Was passiert, wenn der Regen fällt? Eine Einführung in die Hydrologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 256 S.
- SYMADER, W. & KREIN, A. (2000): Der Einfluß der Bodenfeuchte auf die Abflussbildung. - In: Trierer Bodenkundliche Schriften, Band 1, Festschrift, S. 224 - 229.
- TILCH, N.; UHLENBROOK, S.; LEIBUNDGUT, CH. (2002): Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten, Grundwasser H.4/02, 206–216.
- TILCH, N.; ZILLGENS, B.; UHLENBROOK, S.; LEIBUNDGUT, CH.; KIRNBAUER, R.; MERZ, B. (2006): Gisgestützte Ausweisung von hydrologischen Umsatzräumen und Prozessen im Löhnersbach-Einzugsgebiet (Nördliche Grauwackenzone, Salzburger Land), Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 58, 9-10, 141-151.
- TRAUTMANN, T. (2011): Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Identifikation von Abflussprozessen und Weiterentwicklung der GIS-DRP-Methode. Bachelor-Thesis, Fach Bodenkunde, Universität Trier.
- TROCH, P.; DE TROCH, F. & BRUTSAERT, W. (1993): Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions. Water Resources Research, 29(2), 427-434.
- UHL, E. (2008): Bodenstruktur und Bestandeswachstum. In: LWF aktuell – Magazin der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, SCHMIDT, O. & HAMBERGER, J. (Hrsg.), 67, 8-10.
- VAN MEERVELD, T. & MCDONNELL, J.J. (2006): Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. Water Resources Research, Vol. 42, 1-11.
- VBD LÉTZEBUERG SA (2009): Forstliches Betriebsgutachten (PSG), Waldbesitz Jean Lanners.
- WAHREN, A.; SCHWÄRZEL, K.; FEGER, K.H.; MÜNCH, A.; DITTRICH, I. (2007): Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes. Adv. Geosci., 11, 49-56.
- WEILER, M. (2001): Mechanisms controlling macropore flow during infiltration - Dye tracer experiments and simulations, Diss. ETH Zürich, No. 14237.
- WEILER, M. & NAEF, F. (2003): Simulating surface and subsurface initiation of macropore flow, J. Hydrol., 273, 139-154.

- WEILER, M. & MCDONNELL, J.J. (2004): Water Storage and Movement. In: BURLEY, J.; EVANS, J.; YOUNGQUIST, J. (Eds.): Encyclopedia of forest sciences, Chapter: Soil development and properties, 1253-1260.
- WEILER, M.; MCDONNELL, J.J.; TROMP-VAN MEERVELD, I.; UCHIDA, T. (2005): Subsurface Stormflow, edited by: Anderson, M. G. and Mc-Donnell, J. J., Encyclopedia of Hydrol. Sci., 3, Chapter 112, John Wiley & Sons, Ltd., 1719–1733.
- WEILER, A. (2011): Effekte „künstlicher“ Trockenheit auf die Hydrophobizität und das Abflussverhalten in einem Douglasienbestand. Bachelor-Thesis, Fach Bodenkunde, Universität Trier.
- WEINMEISTER, W. (2003): Fähigkeiten des Waldes zur Verminderung von Hochwasser und Erosionsschäden. In: Berichte aus der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 40, 15-29.
- WEISS, E. (1867): Fossile Flora der jüngsten Steinkohleformationen und des Rotliegenden im Saar-Rheingebiet, 1. Teil mit 12 Tafeln, Bonn.
- WINZIG, G. (1997): Untersuchung der Funktionsfähigkeit von dezentralen Regenwasserversickerungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes. Shaker Verlag, Aachen.
- WOHLRAB, B.; ERNSBERGER, H.; MEUSER, A.; SOKOLLEK, V. (1992): Landschaftswasserhaushalt. Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- ZECH, W. & HINTERMAIER-ERHARD, G. (2002): Böden der Welt - Ein Bildatlas, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin.
- ZHANG, G.P.; SAVENIJE, H.H.G.; FENICIA, F; PFISTER, L. (2006): Modelling subsurface storm flow with the Representative Elementary Watershed (REW) approach: application to the Alzette River Basin. Hydrol. Earth Syst. Sci., 10, 937-955.
- ZUBER, T. (2007): Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Fichtenwaldstandorts unter Berücksichtigung der Humusaufgabe. Dissertation, Universität Bayreuth.
- ZUIDEMA, P.K. (1985): Hydraulik der Abflußbildung während Starkniederschlägen, eine Untersuchung mit Hilfe numerischer Modelle unter Verwendung plausibler Bodenkennwerte, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 79, ETH Zürich, 149 S.

ZUMSTEIN, J.F.; GILLE, E.; DELOUX, J.P.; PARIS, P. (1989): Atlas de la Lithologie et de la Perméabilité du Bassin Rhin-Meuse. Agence de l'eau Rhin-Meuse, Moulin-lès-Metz, France.

Anhang

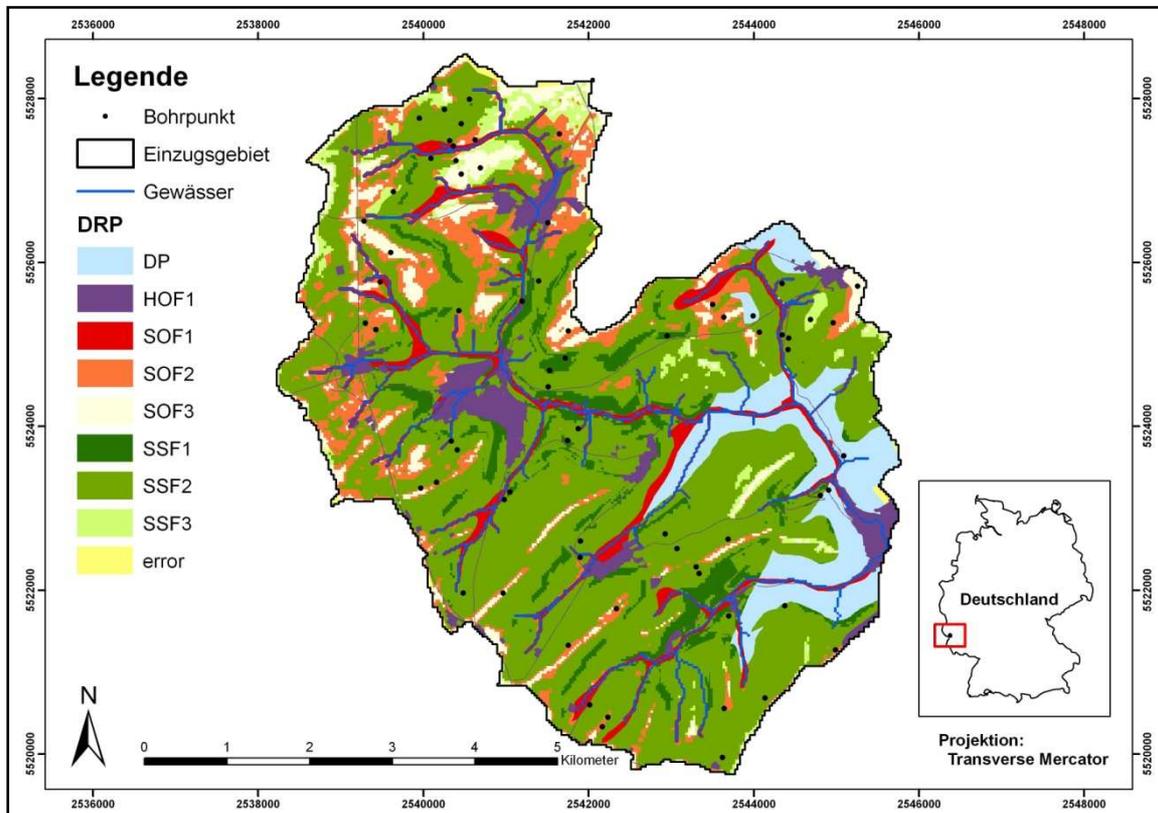


Abb. A1: GIS-DRP-Karte des Einzugsgebietes Welschbillig (Verbandsgemeinde Trier Land) mit Validierungsbohrpunkten (MÜLLER, 2009)

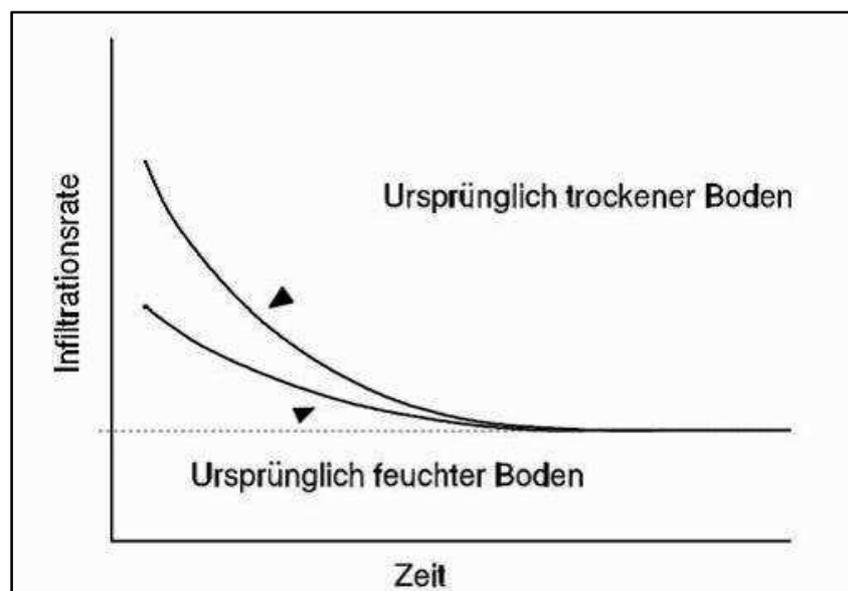


Abb. A2: Schematische Darstellung des Infiltrationsverlaufs in Abhängigkeit von der Vorfeuchte des Bodens (HILLEL, 1971 in WINZIG 1997, verändert)

Tab. A1: Profilbeschreibungen Frankelbach FRA-1 – FRA-4

Standort:	FRA-1			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	
Profil:	Neu-Aufforstung			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	39581			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Praktikum / Schneider			Nutzung:	Neu-Aufforstung (Schwarz-Erle)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-10	Ah	Su3	2	1	-	W5		
10-25	Ah2 (rAp)	Su3	2	1	-	W4		
25-50	(M)-Bv	Sl2	3	2	-	W4		
50-75	II Sw-Bv	Ls3	3	3	-	W3		
75-100	III ICv-Sd	Sl2	5	freies Wasser	-	W0		
Schwach kolluviale Pseudogley-Braunerde aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendem								

Standort:	FRA-2			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	MUO
Profil:	30-jährige Aufforstung			Hangneigung:	N 3.1 / 5 - 7°		DRP:	SSF
Datum:	19.05.08			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Rock			Nutzung:	Laubwald; Buchen (wenige Eichen)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 10	rAp	Ls2	1	2	2	W3		
10-60	Sw	Lt2	3	3	2	W1		
60-100	Sw-Sd	Lt3	4	3	1	W1		
100-115	II ICv - Sd	Lt3	4	3	2	W1		
115+	II ICv	-	5	-	4	W0		
Pseudogley aus schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendeverwitterung (gekapptes Profil - alter Acker!)								

Standort:	FRA-3			Lage im Relief:	Oberhang		Humus:	F-Mull
Profil:	alter Laubwald			Hangneigung:	N 3.1 / 5 - 7°		DRP:	SSF
Datum:	10.06.08			Reliefform:	X.G			
Kartierer:	Müller			Nutzung:	Laubwald; Buchen (wenige Eichen)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-8	Ah	Lt2	1	2	1	W4		
8-30	rAp-Bv	Lt2	2	3	1	W4		
30-55	Bv1	Lu	3	3	1	W4		
55-72	Bv2	Ut4	3	1	0	W2		
72-120	ICv	Tu4	4	1	2	W0		
Braunerde aus schwach schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendem								

Standort:	FRA-4			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	RO
Profil:	40-jährige Douglasie			Hangneigung:	N 3.2 / 7-9°		DRP:	SSF
Datum:	10.06.08			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller			Nutzung:	Douglasie			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-5	Ah	Su3	1	1	1	W4		
5-20	rAp	Su3	2	1	1	W4		
20-30	Bv1	Sl2	3	1	5	W3		
30-60	Bv2	Sl2	3	2	3	W3		
60-130	ICv	Su2	4	2	4	W2		
Braunerde aus schwach schuttführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendem								

Tab. A2: Profilbeschreibungen Frankelbach FRA-5 – FRA-7

Standort:	FRA-5			Lage im Relief:	Oberhang		Humus:	RO
Profil:	alter Nadelwald			Hangneigung:	N 3.1 / 5-7°		DRP:	SSF
Datum:	10.06.08			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller			Nutzung:	Douglasie, teilw. Fichte			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-6	Ah	Lt2	1	2	2	W4		
6-40	Bv	Lt2	2	2	3	W3		
40-60	ICv	Lu	4	3	4	W1		
60-95	II ICv	Tu4	3	2	1	W1		
95-120	III Cv	-	5	1	4	W1		
Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzschutt über Rotliegendverwitterung								

Standort:	FRA-6			Lage im Relief:	unterer Oberhang		Humus:	Ap-Horiz.
Profil:	Acker oberhalb 30-j. Aufforstung			Hangneigung:	5° - 7°		DRP:	SOF/HOF
Datum:	23.03.2010			Reliefform:	GX			
Kartierer:	Hümann			Nutzung:	Acker			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 30	Ap	Ls2	1	2	1	W2		
30 - 50	Bv-Sw	Lt2	3	1	1	W1		
50 - 80	Sw	Lt3	4	1	2	W0		
80 - 100+	II ICv-Sd	Lt3	5	1	4	W0		
Braunerde-Pseudogley aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendem								

Standort:	FRA-7			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	
Profil:	Schneise			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	01.04.2010			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Hümann			Nutzung:	Schneise			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 30	rAp	Ls2	1	2	2	W3		
30 - 60	Bv	Lt2	3	1	3	W1		
60 - 100+	IICv	Ls4	4	1	5	W0		
Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Rotliegendem								

Tab. A3: Ergebnisse Bodenphysik Frankelbach

FRA-1 1a-Aufforstung												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	0	30,24	31,99	60,09	19,43	5,55	15,48	19,63	57,85	693,56	986,85	1,06
Ah2 (rAp)	15-20	27,25	33,62	53,44	12,99	5,63	16,96	17,86	19,72	178,86	1360,41	1,23
(M)-Bv	30-40	18,09	26,74	44,11	13,80	3,50	11,10	15,70	10,04	65,96	2524,93	1,48
II Sw-Bv	70-80	16,15	25,65	39,85	13,48	1,38	8,02	16,98	7,24	164,44	2664,41	1,59

FRA-2 30a-Aufforstung												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
rAp	0-10	23,56	25,75	58,28	16,84	5,05	16,09	20,30	32,49	656,88	1137,04	1,11
Sw	10-35	17,55	28,16	39,39	4,61	2,29	8,38	24,12	8,87	868,50	2594,04	1,61
Sw-Sd	60-85	15,70	26,62	35,84	3,99	1,27	7,53	23,06	2,00	18,86	3849,22	1,70
II ICv-Sd	110+	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

FRA-3 Alter Laubwald												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	0-7	17,51	18,96	58,92	15,54	6,22	6,34	30,82	79,48	2029,50	1280,88	1,09
rAp-Bv	7-25	16,04	21,88	48,49	5,87	5,84	16,79	19,99	30,34	1097,33	1664,21	1,37
Bv1	25-40	16,39	24,46	43,61	3,33	4,15	10,49	25,65	10,94	269,97	3607,63	1,49
Bv2	40-60	15,66	26,55	43,93	7,44	3,41	11,41	25,47	15,45	396,38	2964,43	1,49
Cv	60-80	13,55	25,18	38,81	2,14	1,60	10,00	25,06	4,16	34,68	3472,65	1,61

FRA-4 Douglasie												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah-Bv	0-10	13,37	19,86	43,93	15,09	3,22	13,06	12,56	15,47	463,09	2844,95	1,49
Bv	10-20	10,77	18,10	36,52	8,91	2,94	8,74	15,93	10,12	426,97	3285,22	1,68

FRA-5 Alter Nadelwald; keine Physik-Probenahme möglich!												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]

FRA-6 Acker												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ap	0-10	26,70	38,21	45,95	7,63	3,91	15,89	18,52	144,38	160,15	1895,41	1,43
Bv-Sw	30-40	20,18	33,25	37,82	2,45	2,47	14,23	18,66	20,61	951,29	2991,37	1,65
Sw	50-60	17,50	30,08	35,00	1,93	2,11	11,26	19,70	5,84	119,95	3062,45	1,72
II ICv-Sd	80-90	15,21	28,00	30,96	-0,84	1,63	12,51	17,66	2,66	22,70	4436,93	1,83

FRA-7 Schneise												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]					ka	kf	EW	Rt
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
rAp	25	27,15	35,08	50,79	13,48	3,57	19,04	14,70	29,03	1333,36	1706,95	1,30
Bv	30	14,32	22,00	42,01	9,33	4,10	13,99	14,59	9,53	154,56	2978,83	1,54



Foto A1: Bodenprofil FRA-1
(1-jährige Aufforstung)

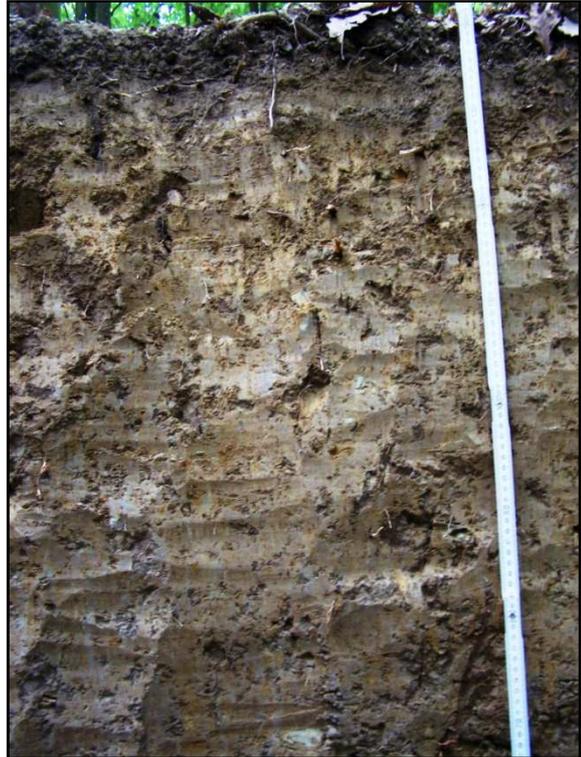


Foto A2: Bodenprofil FRA-2
(30-jährige Aufforstung)



Foto A3: Bodenprofil FRA-4 (Alter Nadelwald)



Foto A4: Bodenprofil FRA-5 (Douglasie)



Foto A5: Bodenprofil FRA-6 (Acker)



Foto A6: Bodenprofil FRA-7 (Schneise)

Tab. A4: Profilbeschreibungen Holzbach HOL-1 – HOL-3

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	Oberhang		Humus:	MOA
Profil:	HOL-1			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Buchenwald			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 5	Ah	Uls	1	1	1	W5		
5 - 22	Ah-Bv	Lu	2	2	2	W5		
22 - 45	Bv-Sw	Ls3	3	3	4	W3		
45 - 55	Sw-Sd	Ls2	4	3	6	W1		
55 - 90	II ICv - Sd	Ls2	5	3	6	W0		
Braunerde-Pseudogley aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde								

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	MRA
Profil:	HOL-2			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Buchenwald			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 10	Ah	Lu	1	2	3	W5		
10 - 40	Bv	Ls3	3	2	4	W4		
40 - 55	(Sw)-Bv	Ls3	4	3	4	W2		
55 - 70	II ICv - Sd	Ls2	5	3	6	W1		
Pseudovergleyte Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde								

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	Unterer Mittelhang		Humus:	MOR
Profil:	HOL-3			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Buchenwald			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 5	Ah	Lu	1	1	2	W3		
5 - 25	Ah-Bv	Lu	2	1	2	W3		
25 - 50	Bv	Ls2	3	1	3	W1		
50 - 70	Bv2	Uls	4	2	5	W1		
70 - 120	II ICv	Uls	5	2	5	W1		
120+	III ICv - Sd	Ls2	5	2	6	W0		
Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde								

Tab. A5: Profilbeschreibungen Holzbach HOL-4 – HOL-6

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	Unterer Mittelhang		Humus:	MRR
Profil:	HOL-4			Hangneigung:	N 3.2 / 7-10°		DRP:	SSF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Mischwald (Buchen/Fichten)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 3	Ah	Lu	1	1	3	W5		
3 - 30	Ah-Bv	Lu	2	1	4	W4		
30 - 60	Bv	Lu	3	2	4	W3		
60 - 80	Bv-Cv	Slu	4	3	5	W1		
80 - 100	II ICv	Slu	4	1	6	W0		
Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde								

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	oberer Mittelhang		Humus:	MRA
Profil:	HOL-5			Hangneigung:	N 3.1 / 5-7°		DRP:	SSF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Fichtenwald			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 15	rAp-Ah	Slu	1	1	2	W4		
15 - 25	Bv1	Uls	2	1	1	W4		
25 - 65	Bv2	Slu	4	2	3	W2		
65 - 100	II ICv-Sd	Uls	5	2	5	W0		
Braunerde aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde über Quarzit-Fließerde								

Standort:	Holzbach			Lage im Relief:	Oberhang		Humus:	ROR
Profil:	HOL-6			Hangneigung:	N 3.1 / 5-7°		DRP:	SFF
Datum:	39973			Reliefform:	GG			
Kartierer:	Müller / Hümann			Nutzung:	Fichtenwald			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0 - 5	Aeh	Slu	1	1	3	W5		
5 - 30	Ae	Slu	3	1	4	W4		
30 - 40	Bs	Ls2	3	1	4	W3		
40 - 75	Bv	Lt2	4	1	4	W2		
75 - 100	II Cv	Ls2	5	1	5	W1		
Podsol aus schutführender lösslehmhaltiger Fließerde aus Sandsteinverwitterung über Quarzit-Fließerde								

Tab. A6: Ergebnisse Bodenphysik Holzbach

HOL-1 Buche Oberhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	2-7	77,97	38,64	79,83	26,79	6,88	2,32	43,85	130,81	1018,86	887,77	0,89
Ah-Bv	10-15	59,91	53,57	66,25	13,28	7,55	19,80	25,70	36,20	335,73	1269,30	0,89
Bv-Sw	30-40	43,50	46,84	59,22	11,73	7,95	18,92	22,53	20,81	93,64	1084,70	1,08
ICv-Sd	55-60	22,73	30,05	49,97	18,63	4,01	10,50	16,79	172,58	1792,69	773,51	1,33

HOL-2 Buche oberer Mittelhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	0-5	44,09	41,65	64,34	19,73	7,23	11,03	26,35	51,97	1223,01	1352,84	0,95
Bv	5-10	27,47	35,45	51,15	10,97	5,50	10,87	23,81	15,55	459,27	2374,91	1,29
(Sw)-Bv	50-55	20,91	27,43	50,39	20,37	4,32	12,00	13,73	59,71	321,86	1449,30	1,31

HOL-3 Buche unterer Mittelhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	0-5	46,09	46,11	62,00	17,65	4,99	11,37	28,00	23,95	199,41	1869,25	1,01
Ah-Bv	5-10	40,44	44,61	57,99	14,68	5,48	16,85	20,94	13,92	105,90	1689,59	1,11
Bv1	20-25	32,37	36,43	57,53	21,55	5,00	10,86	20,07	19,90	268,63	1860,95	1,13
Bv2	40-45	21,78	28,60	49,98	21,23	3,69	8,94	16,05	49,12	757,82	1115,57	1,33
ICv	60-65	16,97	26,71	40,44	11,24	3,38	14,03	11,81	18,29	316,48	1629,33	1,58

HOL-4 Fichte unterer Mittelhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah	0-5	32,67	27,79	67,90	19,24	11,16	3,31	34,18	31,80	385,83	1929,40	0,85
Ah-Bv	10-15	21,58	25,28	55,72	18,51	7,56	11,00	18,63	21,11	1020,61	1705,18	1,17
Bv	30-40	17,06	22,17	49,82	22,19	5,18	11,29	11,16	64,99	766,47	1153,04	1,33
Bv-Cv	60-65	13,12	19,20	44,78	23,05	3,28	11,56	6,89	120,17	3869,75	926,89	1,46

HOL-5 Fichte oberer Mittelhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
rAp-Ah	0-5	23,38	22,22	63,96	19,09	12,26	12,76	19,85	25,56	397,66	1514,00	0,96
Bv1	20-30	30,78	32,72	59,69	19,56	9,36	13,57	17,21	18,82	488,04	1265,52	1,07
Bv2	35-45	29,31	32,25	57,91	20,57	8,07	11,30	17,98	22,79	910,75	1312,35	1,12
ICv	70-80	28,77	34,26	55,10	17,70	6,86	2,96	29,42	30,34	398,19	1600,02	1,19

HOL-6 Fichte Oberhang												
Horizont	Entnahme- tiefe	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Aeh	0-5	31,88	34,13	59,34	20,73	6,70	0,02	32,62	36,04	975,35	1266,27	1,08
Ae	10-15	24,81	30,51	53,03	17,67	8,40	2,72	24,30	24,35	771,21	1767,64	1,24
Bs	20-25	29,67	37,75	50,66	10,30	7,84	20,89	11,63	31,07	73,32	1743,36	1,31
Bv	40-45	13,95	20,77	43,90	18,15	5,76	15,81	4,19	37,71	132,77	1585,39	1,49



Foto A7: Bodenprofil HOL-1
(Buche, Oberhang)



Foto A8: Bodenprofil HOL-2
(Buche, oberer Mittelhang)



Foto A9: Bodenprofil HOL-3
(Buche, unterer Mittelhang)

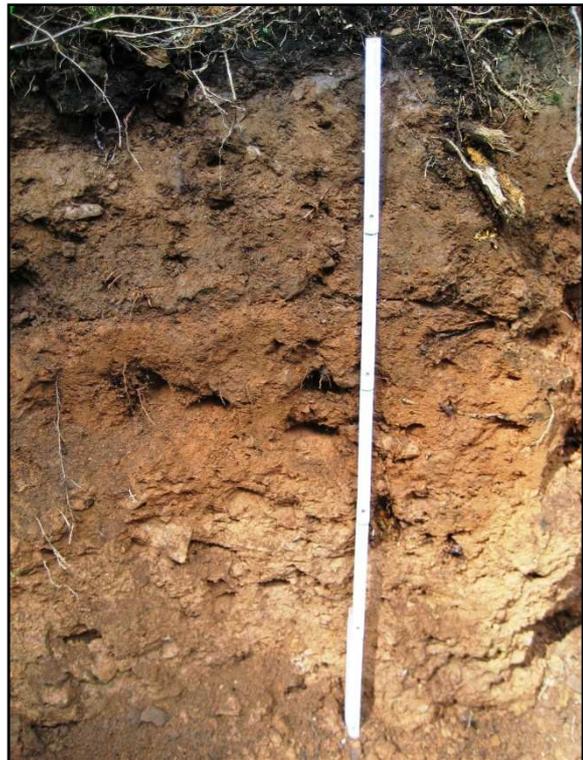


Foto A10: Bodenprofil HOL-4
(Fichte, unterer Mittelhang)



Foto A11: Bodenprofil HOL-5
(Fichte, oberer Mittelhang)



Foto A12: Bodenprofil HOL-6
(Fichte, Oberhang)

Tab. A7: Profilbeschreibungen Weierbach WEI-1 – WEI-4

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Kulminationsbereich/Oberhang		Humus:	MOM
Profil:	WEI-1			Hangneigung:	NO.2 (1-2%)		DRP:	dSSF
Datum:	40345			Reliefform:	Ku			
Kartierer:	Hü/Bi			Nutzung:	Laubwald (Buche)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-8	Ah	Lu	1	0	3	3	769-774	G1 Tiefe1
8-50	Bv1	Lu	2	2	3	4	775-780	G1 Tiefe2
50-90	Bv2	Ut3	4	3	5	2		G1 Tiefe3
90-120	II ICv		5	1	5	1		G1 Tiefe4
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer								

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Mittelhang		Humus:	MOM
Profil:	WEI-2			Hangneigung:	N2.2 (5-9%)		DRP:	dSSF
Datum:	40345			Reliefform:	V,X			
Kartierer:	Hü/Bi			Nutzung:	Laubwald (Buche)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-8	Ah	Lu	1	0	2	4	793-798	G2 Tiefe1
8-55	Bv	Lu	3	1	3	4	800,601, 802	G2 Tiefe2
55-120+	II ICv	Ut3	4-5	2	5	2		G2 Tiefe3
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer								

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Unterhang		Humus:	MOM
Profil:	WEI-3			Hangneigung:	N4 (18-27%)		DRP:	dSSF
Datum:	40350			Reliefform:	X,G			
Kartierer:	Mü/Hü			Nutzung:	Laubwald (Buche)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-7	Ah	Lu	1	1	3	4	265-269, 270	G3 Tiefe1
7-50	Bv	Lu	3	1	4	3	271-276	G3 Tiefe2
50-80	IIBv-Cv	Ut4	4	1	5	2		G3 Tiefe3
								G3 Tiefe4
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer								

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Unterhang		Humus:	
Profil:	WEI-4			Hangneigung:	N5 (27-36%)		DRP:	dSSF
Datum:	40350			Reliefform:	X,G			
Kartierer:	Mü/Hü			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)			
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer
0-5	Ah	Lu	1	1	2	4	673-678	G4 Tiefe1
5-50	Bv1	Lu	3	1	3	3	679-684	G4 Tiefe2
5-110	Bv2	Ut3	3	1	4	1	686-689,720	G3 Tiefe3
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer								

Tab. A8: Profilbeschreibungen Weierbach WEI-5 – WEI-8

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Mittelhang			Humus:	Moder
Profil:	WEI-5			Hangneigung:	N5 (27-36%)			DRP:	dSSF
Datum:	40350			Reliefform:	X,G				
Kartierer:	Mü/Hü			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0-4	Ah	Lu	1	1	3	4	2, 718, 719, 6	G5 Tiefe1	
4-14	Bv	Lu	2	1	3	4	697-702	G5 Tiefe2	
14-80	II Bv	Lu	3	1	5	3	703-708	G5 Tiefe3	
80+	IICv	Ut4	4	1	6	2		G5 Tiefe4	
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer									

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Oberhang			Humus:	Moder
Profil:	WEI-6			Hangneigung:	N2.1 (3,5-5%)			DRP:	dSSF
Datum:	40345			Reliefform:	X,G				
Kartierer:	Hü/Bi			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0-8	Ah	Uls	1	0	2	3	817-822	G6 Tiefe1	
8-20	AhBv	Uls	2	1	3	4		G6Tiefe2	
20-55	Bv	Ut3	4	2	4	4	823-828	G6 Tiefe3	
55-100	Cv	Ut3	5	2	5	3		G6 Tiefe 4	
Braunerde aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer									

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Kulminationsbereich			Humus:	MOR
Profil:	WEI-7			Hangneigung:	N0.2 (1-2%)			DRP:	SOF
Datum:	40350			Reliefform:	G,G				
Kartierer:	Hü/Mü/Ro/Bi			Nutzung:	Laubwald (Buche, Eiche)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0-6	Ah	Lu	1	1	2	3	241-246	G7 Tiefe1	
6-45	(Sw)Bv	Lu	3	2	3	4	247-252	G7 Tiefe2	
45-80	II Bv-Sw	Ut4	4	-	5	1		G7 Tiefe3	
80-120	II ICv-Sd	Ut4	5	-	6	0		G7 Tiefe 4	
Braunerde-Pseudogley aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer									

Standort:	Weierbach			Lage im Relief:	Kulminationsbereich			Humus:	ROR
Profil:	WEI-8			Hangneigung:	N0.1 (0-1%)			DRP:	SOF
Datum:	40350			Reliefform:	G,G				
Kartierer:	Hü/Mü/Ro/Bi			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0-4	Ah	Lu	1	2	2	2	253-258	G8 Tiefe1	
4-35	Bv	Lu	2	2	3	3	259-264	G8 Tiefe2	
35-70	II Sw-ICv	Tu4	4	2	5	1		G8 Tiefe3	
70-120	II Sd-ICv	Tu3	6	3	6	0		G8 Tiefe4	
Braunerde-Pseudogley aus periglazial umgelagertem Schieferschutt über devonischem Schiefer									

Tab. A9: Ergebnisse Bodenphysik Weierbach

WEI-1 Laubwald Buche Oberhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-8	62,53	36,64	77,62	26,67	13,07	19,71	18,17	61,92	804,25	888,67	0,59	
Bv1	8-50	32,28	29,32	64,99	23,70	8,50	14,63	18,16	110,78	1126,50	750,50	0,93	

WEI-2 Laubwald Buche Mittelhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-5	44,09	41,65	64,34	19,73	7,23	11,03	26,35	51,97	1223,01	1352,84	0,95	
Bv	5-10	27,47	35,45	51,15	10,97	5,50	10,87	23,81	15,55	459,27	2374,91	1,29	
(Sw)-Bv	50-55	20,91	27,43	50,39	20,37	4,32	12,00	13,73	59,71	321,86	1449,30	1,31	

WEI-3 Laubwald Buche Unterhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-7	38,11	27,07	72,74	25,28	13,31	15,02	19,14	75,63	2034,18	746,22	0,72	
Bv	7-50	25,58	24,27	63,54	27,08	9,44	2,36	24,66	88,24	2590,98	573,59	0,97	

WEI-4 Nadelwald Fichte Unterhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-5	32,66	18,27	76,47	36,39	13,38	6,09	20,62	102,24	2549,09	302,69	0,62	
Bv1	5-50	20,57	20,53	62,27	28,21	9,27	14,46	10,32	118,35	2464,87	471,69	1,00	
Bv2	50-110	12,27	16,16	50,21	26,55	4,54	9,45	9,66	224,65	2968,96	797,30	1,32	

WEI-5 Nadelwald Fichte Mittelhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-4	42,66	26,99	75,64	25,42	17,18	15,47	17,57	71,12	797,17	635,20	0,65	
Bv	4-14	30,20	26,06	67,36	21,92	15,76	7,71	21,97	107,34	1391,27	418,80	0,86	
IIBv	14-80	23,34	21,33	65,32	30,99	10,08	5,04	19,21	179,65	2380,59	438,58	0,92	

WEI-6 Nadelwald Fichte Oberhang													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-8	37,15	24,84	74,52	24,98	18,49	8,16	22,89	49,24	1405,37	894,00	0,68	
Bv	20-55	29,32	24,15	68,85	27,10	13,35	10,52	17,88	65,12	2236,53	595,98	0,83	

WEI-7 Laubwald Buche Plateau													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-6	63,84	40,80	75,84	19,98	11,54	18,14	26,18	42,35	661,31	1989,71	0,64	
(Sw)Bv	6-45	33,86	35,32	60,60	7,95	14,65	14,89	23,12	28,74	803,03	2429,89	1,04	

WEI-8 Nadelwald Fichte Plateau													
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]						ka	kf	EW	Rt
	tiefe				[µm]								
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]	
Ah	0-4	49,48	34,84	73,41	17,59	20,30	6,72	28,80	106,48	2428,07	1140,86	0,70	
Bv	4-35	33,95	29,02	67,57	28,47	9,26	13,81	16,03	114,57	1613,71	1149,19	0,86	



Foto A13: Bodenprofil WEI-1 (Buche, Oberhang)



Foto A14: Bodenprofil WEI-2 (Buche, Mittelhang)



Foto A15: Bodenprofil WEI-3 (Buche, Unterhang)



Foto A16: Bodenprofil WEI-5 (Fichte, Mittelhang)



Foto A17: Bodenprofil WEI-7 (Buche, Plateau)



Foto A18: Bodenprofil WEI-8 (Fichte, Plateau)

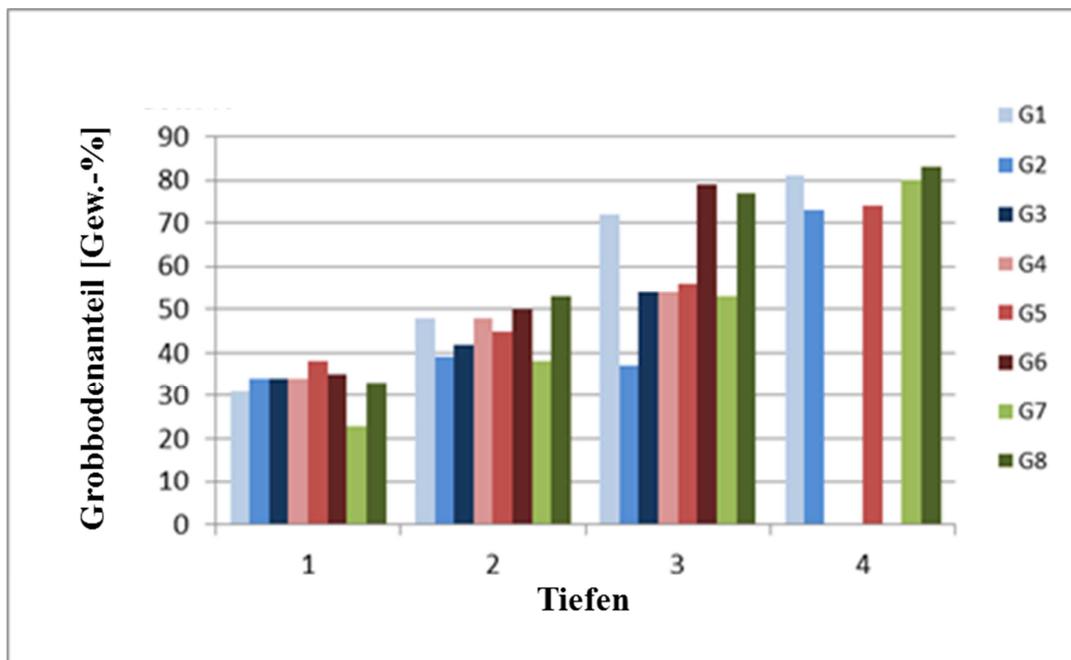


Abb. A3: Grobbodengehalte der Versuchsstandorte im Einzugsgebiet Weierbach (BIWER, 2011; verändert)

Tab. A10: Profilbeschreibungen Huewelerbach HUE-1 – HUE-4

Standort:	Huewelerbach (Lux)			Lage im Relief:	Mittelhang (hier jedoch Hangfuß)			Humus:	Moder
Profil:	HUE-1			Hangneigung:	N2.2 (4-6°)			DRP:	DP
Datum:	40423			Reliefform:	G/G				
Kartierer:	MH			Nutzung:	Laubwald (Buchen und Eichen)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0 - 10	Aeh	Su2	1	1	1	W5	1 - 6	721 - 726	
10 - 38	Bv	Sl2	2	1	1	W4	15 - 20	727 - 732	
38 - 100	ICv	Sl2	4	1	1	W2	42 - 50	733 - 738	
							60 - 65	739 - 744	
Schwach podsolige Braunerde aus Lias-Sandstein									

Standort:	Huewelerbach			Lage im Relief:	Unterhang			Humus:	ROM
Profil:	HUE-2			Hangneigung:	N 2.2 (~5°)			DRP:	DP
Datum:	40423			Reliefform:	G/G				
Kartierer:	MH / DA / AA			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0 - 2	Ah	Su2	1	1	1	W4			
2 - 12	Ah-Bv	Su2	2	2	1	W3	3 - 9	745 - 750	
12 - 39	Bv	Su2	3	2	1	W2	16 - 22	751 - 756	
39 - 60+	ICv	Su2	4	1	1	W1	45 - 50	757 - 762	
Braunerde aus Lias-Sandstein									

Standort:	Huewelerbach			Lage im Relief:	unterer Mittelhang			Humus:	Moder
Profil:	HUE-3			Hangneigung:	N 3.1 (7°)			DRP:	DP
Datum:	40423			Reliefform:	G/G				
Kartierer:	MH			Nutzung:	Laubwald (Buche/Eiche)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0 - 3	Ah	Su2	1	1	1	W3			
3 - 14	Ah-Bv	Su2	1	2	1	W3	5		
14 - 40	Bv	Su2	2	2	1	W2	25		
40 - 70+	ICv	Su2	4	2	1	W1	55		
Braunerde aus Lias-Sandstein									

Standort:	Huewelerbach			Lage im Relief:	unterer Mittelhang			Humus:	ROM
Profil:	HUE-4			Hangneigung:	N 3.2 (9°)			DRP:	DP
Datum:	40452			Reliefform:	X/X				
Kartierer:	MH / CM			Nutzung:	Nadelwald (Fichte)				
Tiefe (cm)	Horizont	Bodenart	Ld	Feuchte	Grobboden	Wurzeln	Tiefe (Proben)	Stechring Nummer	
0 - 5	Aeh	Su2	1	1	1	W4	2,5	49 - 54	
5 - 16	Aeh-Bv	Su2	1	1	1	W3	10	55 - 60	
16 - 56	Bv	Su2	2	1	1	W2	40	61 - 66	
56 - 80+	ICv	Su3	3	1	1	W1	75	67 - 72	
Schwach podsolige Braunerde aus Lias-Sandstein									

Tab. A11: Ergebnisse Bodenphysik Huewelerbach

HUE-1 Laubwald Buche Mittelhang												
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
	tiefe				[µm]							
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Aeh	1-6	54,36	25,97	72,40	38,95	10,95	15,99	6,51	27,94	524,71	948,65	0,69
Bv	15-20	20,55	21,10	59,87	27,87	11,75	12,85	7,39	29,08	705,28	1081,64	1,02
ICv1	42-50	11,97	15,12	52,14	25,23	10,36	14,22	2,33	17,78	2550,02	1301,98	1,27
ICv2	60-65	12,25	19,49	39,71	9,21	8,73	19,70	2,07	6,02	1686,69	3998,30	1,60

HUE-2 Nadelwald Fichte Mittelhang												
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
	tiefe				[µm]							
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah-Bv	3-9	19,63	17,26	61,61	30,67	11,28	12,61	7,05	74,92	1348,08	618,01	0,96
Bv	16-22	13,61	17,26	50,21	24,58	8,21	11,17	6,26	44,14	2669,44	1273,66	1,27
ICv	45-50	13,27	17,09	48,86	15,59	9,29	15,49	8,54	26,84	1697,96	1086,74	1,36

HUE-3 Laubwald Buche Mittelhang												
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
	tiefe				[µm]							
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Ah-Bv	5-10	21,84	26,82	50,56	20,54	8,36	7,30	14,35	28,17	3829,00	1278,93	1,24
Bv	30-35	16,14	21,91	46,31	16,24	9,46	10,25	10,35	7,41	128,56	1684,43	1,37
ICv	60-65	11,55	17,78	41,76	11,85	10,59	6,11	13,21	14,35	182,79	2578,63	1,54

HUE-4 Nadelwald Fichte Mittelhang												
Horizont	Entnahme-	Wassergehalt:		Porenvolumen [Vol.%]				ka	kf	EW	Rt	
	tiefe				[µm]							
Bezeichnung	[cm]	Gew. %	Vol. %	Ges. PV	>50	50-10	10-0,2	<0,2	[µm ²]	[cm/d]	[kPa]	[g/cm ³]
Aeh	0-5	16,27	13,58	66,37	36,48	11,92	11,81	6,16	55,17	1150,54	424,41	0,84
Aeh-Bv	5-16	9,64	10,12	58,25	33,59	9,44	8,02	7,20	40,12	1322,39	687,41	1,06
Bv	16-56	7,40	9,76	50,24	27,49	9,62	8,34	4,79	22,15	219,33	814,07	1,32
ICv	56-80	14,98	17,73	49,60	22,25	10,60	17,92	3,19	16,00	332,89	812,22	1,34



Foto A19: Bodenprofil HUE-1



Foto A20: Bodenprofil HUE-2

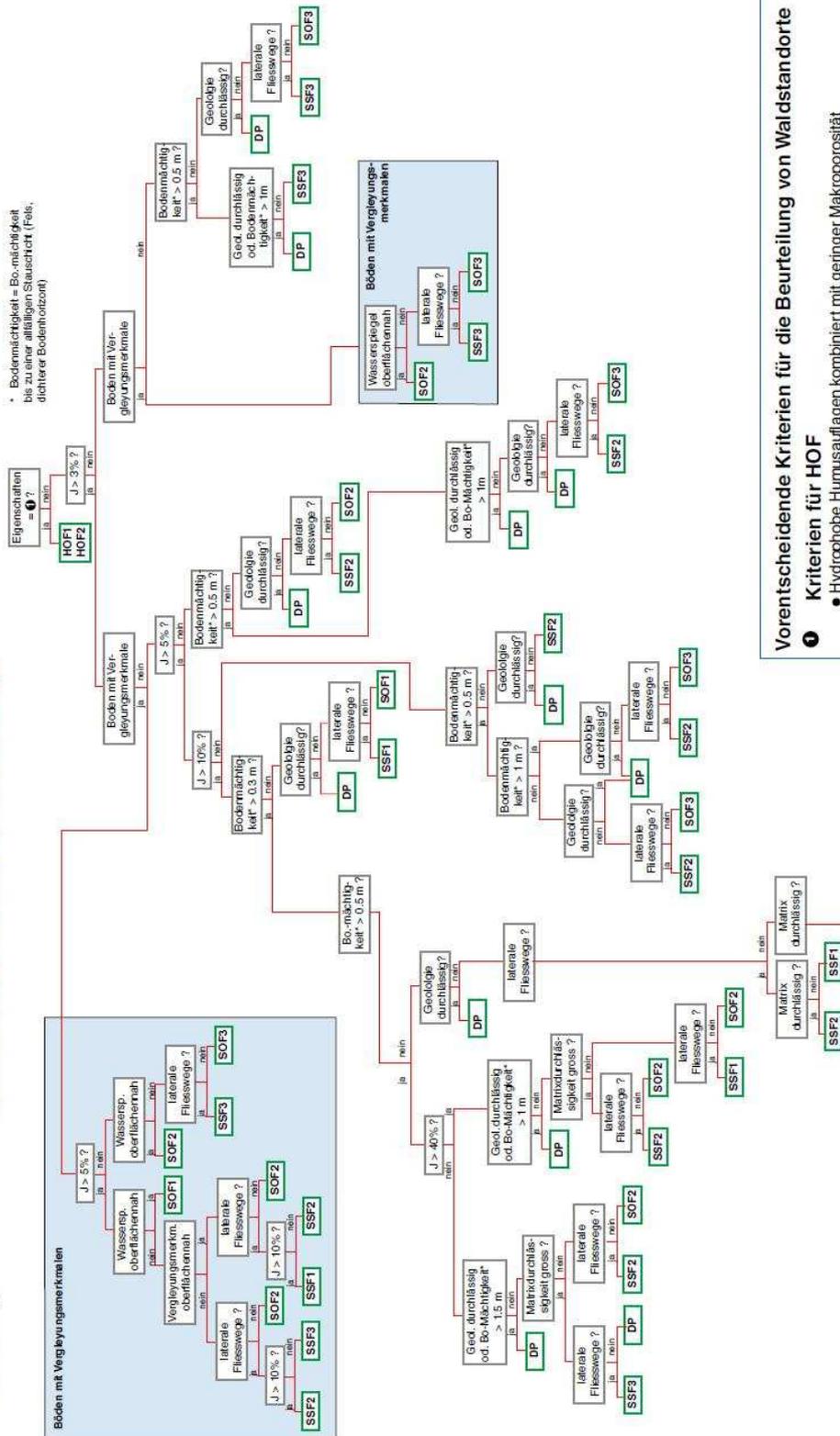


Foto A21: Bodenprofil HUE-3



Foto A22: Bodenprofil HUE-4

Prozess-Beurteilungsschema: **Wald**
 Extensive und intensive, kurze Niederschläge
 Niederschlag:



Vorentscheidende Kriterien für die Beurteilung von Waldstandorte

1 Kriterien für HOF

- Hydrophobe Humusauflagen kombiniert mit geringer Makroporosität
- Hydrophobe Streu: Nadelstreu in Aufforstungen ohne Untervegetation
- steile Flanken ohne schützende Humusschicht z.B. an eingeschnittenen Bächen, steile Hangflanken ohne Krautschicht
- Feistflächen (kompakter Fels)
- anthropogen überformte Flächen: Wege, Plätze, Holzrückegassen, von Waldmaschinen verdichtete Flächen

Abb. A4: Prozessbeurteilungsschema für Wald bei extensiven und intensiven, kurzen Niederschlägen (SCHERRER, 2006)

Prozess-Beurteilungsschema: **Acker**
 Extensive aber lange Niederschläge
 20% < J > 3%
 Hangneigung: "Von Grund- und Stauwasser massgeblich beeinflusste Böden"

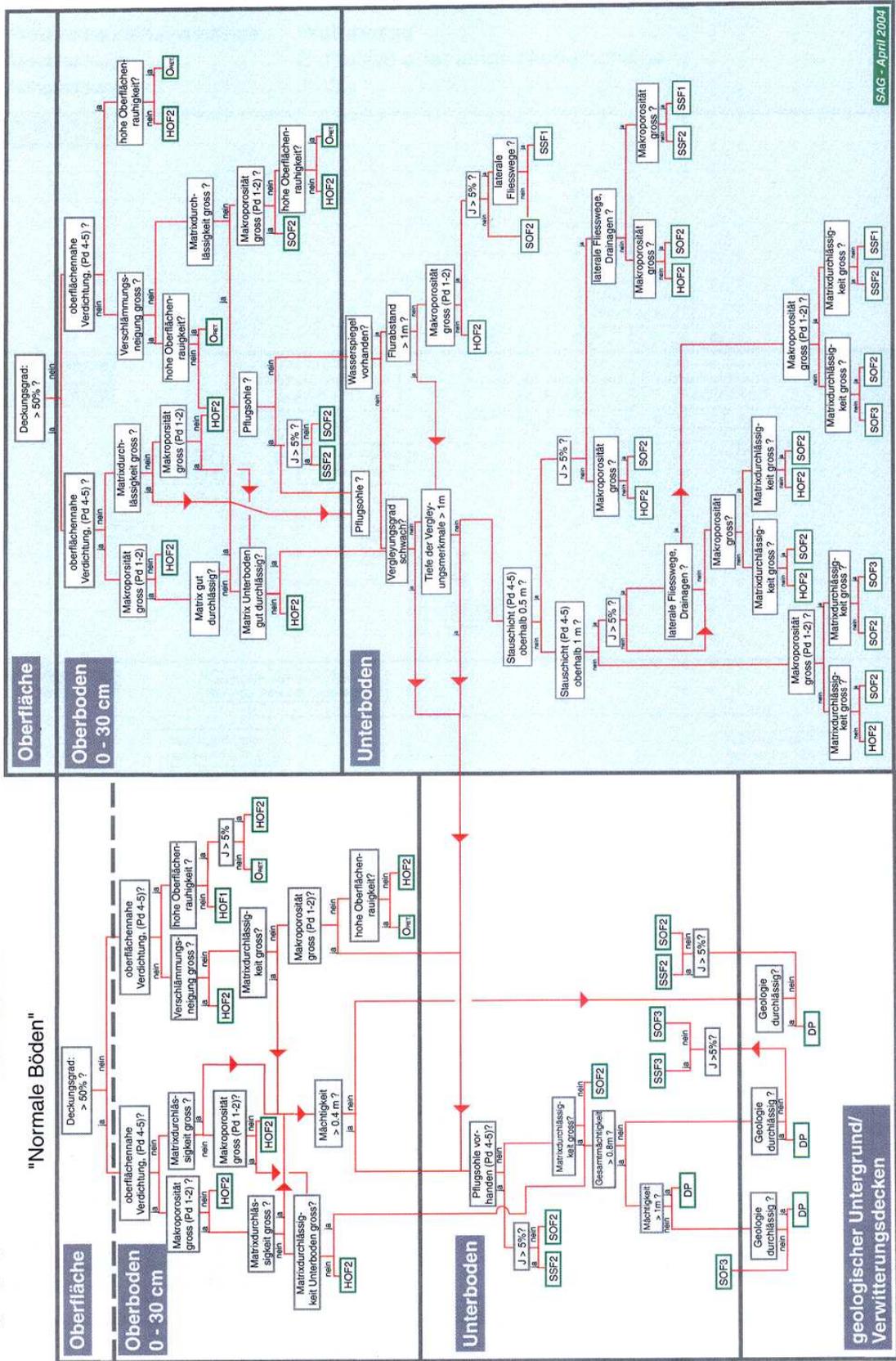


Abb. A5: Prozessbeurteilungsschema für Acker bei extensiven aber langen Niederschlägen und mittlerer Hangneigung (SCHERRER, 2006)

Tab. A12: Ergebnisse aller 24 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Frankelbach (FP Physische Geographie)

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs- dauer [min]	Berechnungs- intensität [l/m ² h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Frankelbach	1	Acker	30	40,7	8,7	2,4
Frankelbach	2	Acker	60	38,2	6	20,1
Frankelbach	3	Acker	60	38,2	15	1,2
Frankelbach	4	Acker	60	39,9	10	36,6
Frankelbach	6	Acker	30	43,7	6	56,0
Frankelbach	20	Acker	45	40,7	6,5	4,3
Frankelbach	21	Acker	45	40,3	6,5	18,1
Frankelbach	7	Grünland	60	40,3	25	12,7
Frankelbach	10	Grünland	55	40,7	22,5	4,0
Frankelbach	11	Grünland	60	36,9	21,5	8,2
Frankelbach	12	Grünland	45	37,3	11,5	30,8
Frankelbach	13	Aufforstung	45	40,0	8,5	15,0
Frankelbach	14	Aufforstung	30	41,2	8,5	7,5
Frankelbach	15	Aufforstung	30	38,2	6,5	3,6
Frankelbach	16	Aufforstung	60	32,4	8,5	2,6
Frankelbach	17	Aufforstung	60	40,7	11,5	17,3
Frankelbach	18	Aufforstung	30	42,4	11,5	9,8
Frankelbach	19	Aufforstung	30	41,1	6,5	16,4
Frankelbach	9	Laubwald	45	39,9	17	2,2
Frankelbach	8	Mischwald	60	41,3	23	0,4
Frankelbach	23	Alter Nadelwald	50	37,3	10	3,8
Frankelbach	24	Alter Nadelwald	60	34,8	8	0
Frankelbach	5	Nadelwald (Douglasie)	30	44,1	10	86,9
Frankelbach	22	Nadelwald (Douglasie)	35	35,2	11	42,8

Tab. A13: Ergebnisse aller 17 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Holzbach (FP Physische Geographie)

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs- dauer [min]	Berechnungs- intensität [l/m ² h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Holzbach	25	Laubwald (Buche)	60	39,4	4	2,5
Holzbach	26	Laubwald (Buche)	60	40,9	5	8,9
Holzbach	27	Laubwald (Buche)	60	40,3	3,5	4,2
Holzbach	28	Laubwald (Buche)	80	40,4	11	6,7
Holzbach	29	Laubwald (Buche)	60	37,6	3	0,4
Holzbach	30	Laubwald (Buche)	60	41,3	4,5	25,2
Holzbach	31	Nadelwald (Fichte)	60	40,3	4	38,7
Holzbach	32	Nadelwald (Fichte)	60	38,8	5	10,3
Holzbach	33	Nadelwald (Fichte)	60	40,7	3	12,5
Holzbach	34	Nadelwald (Fichte)	60	39,9	3,5	0,0
Holzbach	35	Nadelwald (Fichte, Gras)	60	40,7	6	0,0
Holzbach	36	Nadelwald (Fichte, Gras)	60	39,9	4	0,0
Holzbach	37	Nadelwald (Fichte, Gras)	60	41,1	2,5	0,0
Holzbach	38	Rückegasse	60	40,7	6	71,9
Holzbach	39	Rückegasse	60	39,0	3,5	64,3
Holzbach	40	Rückegasse	30	40,2	3,5	97,1
Holzbach	41	Rückegasse (alt)	60	38,6	5	63,7

Tab. A14: Ergebnisse aller 14 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Weierbach

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs- dauer [min]	Berechnungs- intensität [l/m²h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Weierbach	1.1	Laubwald Buche/Eiche	60	40,0	8°	0,0
Weierbach	1.2	Laubwald Buche/Eiche	60	41,8	9°	0,0
Weierbach	1.3	Laubwald Alte Fahrspur	60	33,9	9°	2,4
Weierbach	2.1	Laubwald Buche/Eiche	60	37,3	14°	0,0
Weierbach	2.2	Laubwald Buche/Eiche	60	39	24°	0,0
Weierbach	3.1	Laubwald Buche/Eiche	60	38,3	20°	0,0
Weierbach	4.1	Nadelwald Fichte/Moos	60	35,4	21°	0,0
Weierbach	4.2	Nadelwald Fichte/Moos	60	39,4	22°	2,3
Weierbach	4.3	Nadelwald Fichte/Moos	60	39,0	19°	0,3
Weierbach	4.4	Nadelwald Fichte/Moos	60	37,3	31°	2,8
Weierbach	5.1	Nadelwald Fichte/Totholz	60	40,7	22°	1,0
Weierbach	5.2	Nadelwald Fichte/Totholz	60	36,4	20°	0,0
Weierbach	5.3	Nadelwald Fichte/Totholz	60	38,1	19°	0,0
Weierbach	5.4	Nadelwald Fichte/Totholz	60	40,0	23°	0,0



Foto A23: Alte Quellfassung im Einzugsgebiet Huewelerbach während Vorbereitung auf Neufassung



Foto A24: Alte Quellfassung Huewelerbach mit Schüttung frischen Quellwassers

Tab. A15: Ergebnisse aller 32 Kleinberechnungen im Einzugsgebiet Huewelerbach (FP Physische Geographie)

Untersuchungs- gebiet	ID	Landnutzung	Berechnungs- dauer [min]	Berechnungs- intensität [l/m²h]	Hang- neigung [°]	Abfluss- koeffizient [%]
Huewelerbach	42	Grünland	30	52,6	3	37,5
Huewelerbach	43	Grünland	30	37,5	5	57,3
Huewelerbach	44	Laubwald	30	40,3	5	2,8
Huewelerbach	45	Nadelwald	30	37,3	8	2,2
Huewelerbach	46	Nadelwald	30	38,6	8	16,3
Huewelerbach	47	Laubwald	30	39,9	5	0,6
Huewelerbach	48	Aufforstung	30	40,7	8	0,2
Huewelerbach	49	Aufforstung	30	41,1	18	24,6
Huewelerbach	50	Nadelwald	60	36,0	17,5	2,0
Huewelerbach	51	Nadelwald	30	38,6	27	3,0
Huewelerbach	52	Nadelwald	30	39,4	2	0,5
Huewelerbach	53	Waldweg	30	39,0	4	61,6
Huewelerbach	54	sandiger Waldweg	30	39,9	5	74,6
Huewelerbach	55	Laubwald	30	40,3	2	0,0
Huewelerbach	56	Laubwald	60	39,9	6	0,0
Huewelerbach	57	Laubwald	60	38,9	6	0,0
Huewelerbach	58	Nadelwald	60	37,3	16	0,0
Huewelerbach	59	Nadelwald	60	38,6	16	0,0
Huewelerbach	60	Waldweg	30	36,9	10	88,5
Huewelerbach	61	Waldweg	30	36,5	9	82,6
Huewelerbach	62	Waldweg	30	36,9	7	88,7
Huewelerbach	63	Waldweg	60	37,7	7	70,3
Huewelerbach	64	Waldweg	60	38,0	13	96,0
Huewelerbach	65	Laubwald	60	37,7	22	0,0
Huewelerbach	66	Laubwald	30	38,2	21	0,0
Huewelerbach	67	Nadelwald	60	37,3	10	0,0

Hewelerbach	68	Nadelwald	60	37,7	8	0,0
Hewelerbach	69	Nadelwald	60	37,7	22	0,0
Hewelerbach	70	Waldweg	30	39,0	-	96,6
Hewelerbach	71	Grünland	60	35,6	2	6,2
Hewelerbach	72	Grünland	60	40,3	8	62,7
Hewelerbach	73	Grünland	60	40,3	5	32,0

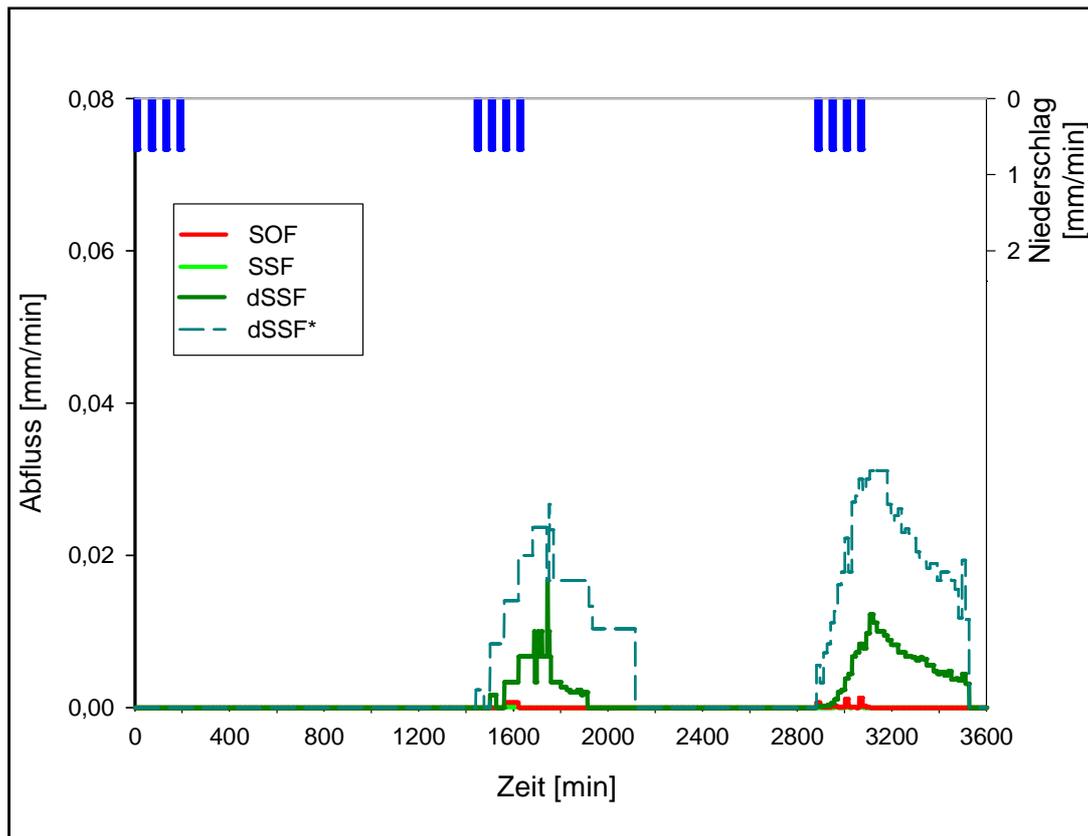


Abb. A7: Abflussverhalten am Standort FRA-1 (1-jährige Aufforstung)

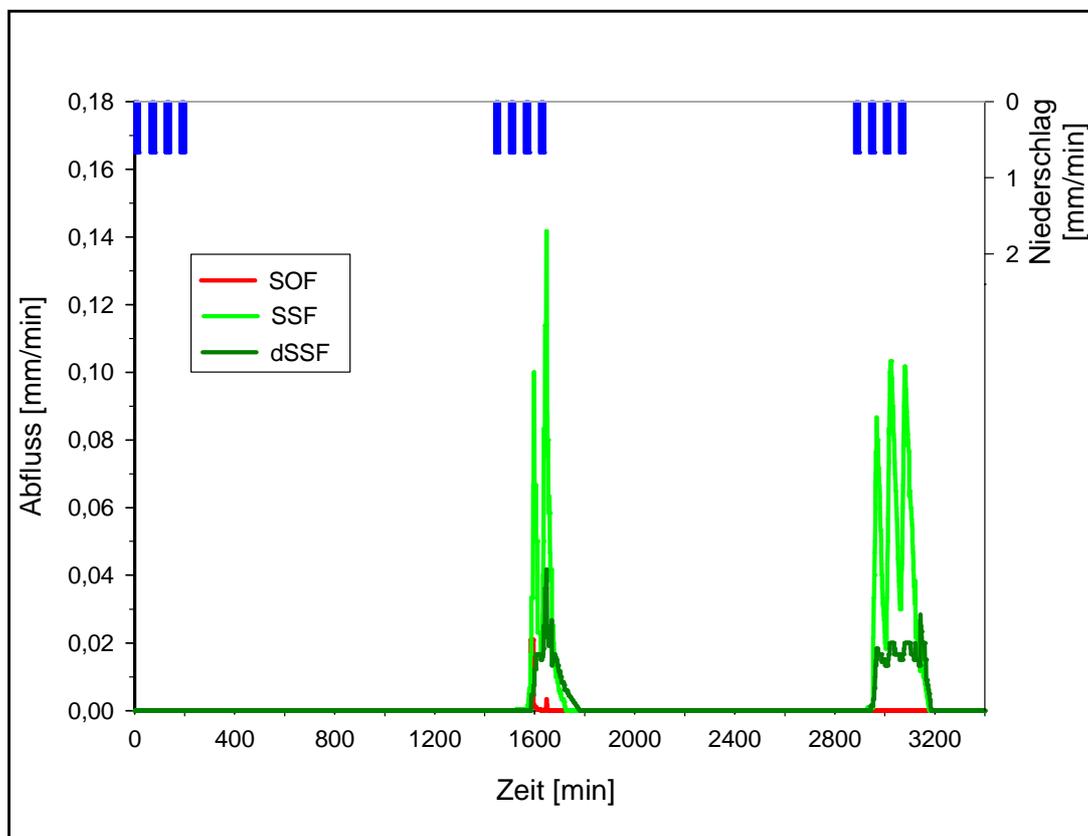


Abb. A8: Abflussverhalten am Standort FRA-3 (Alter Laubwald)

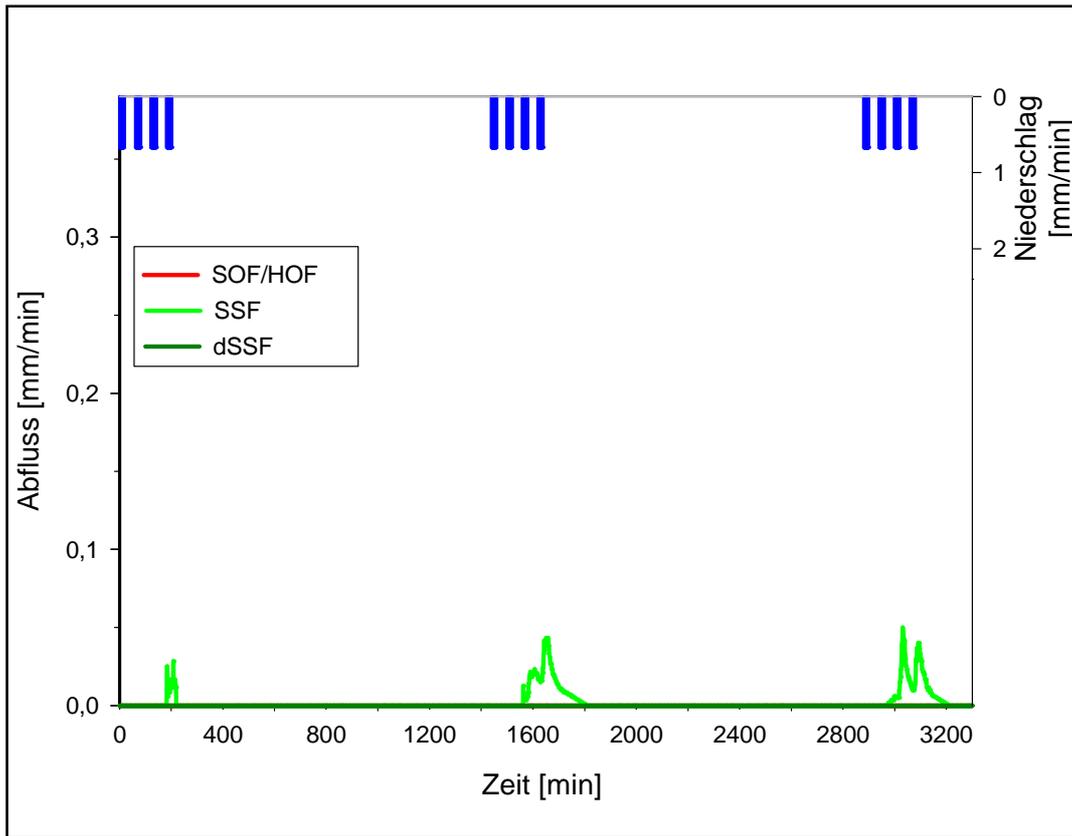


Abb. A9: Abflussverhalten am Standort FRA-5 (Alter Nadelwald)

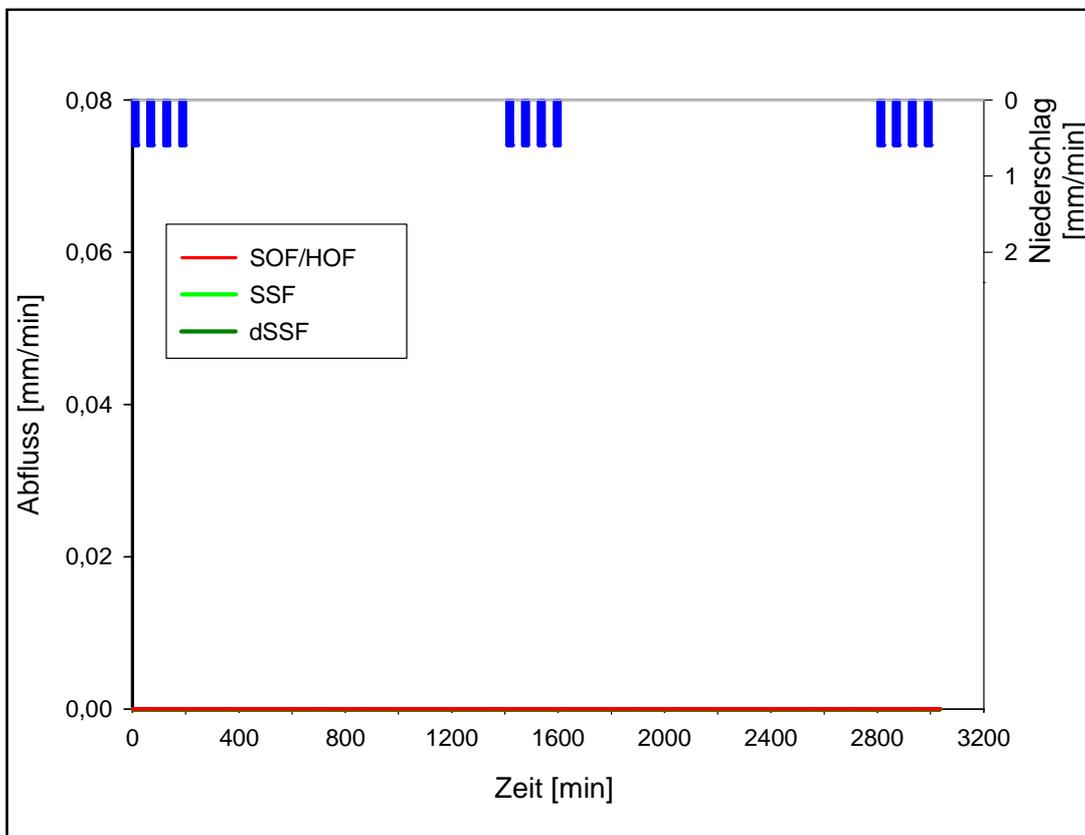


Abb. A10: Abflussverhalten am Standort FRA-7 (Schneise)

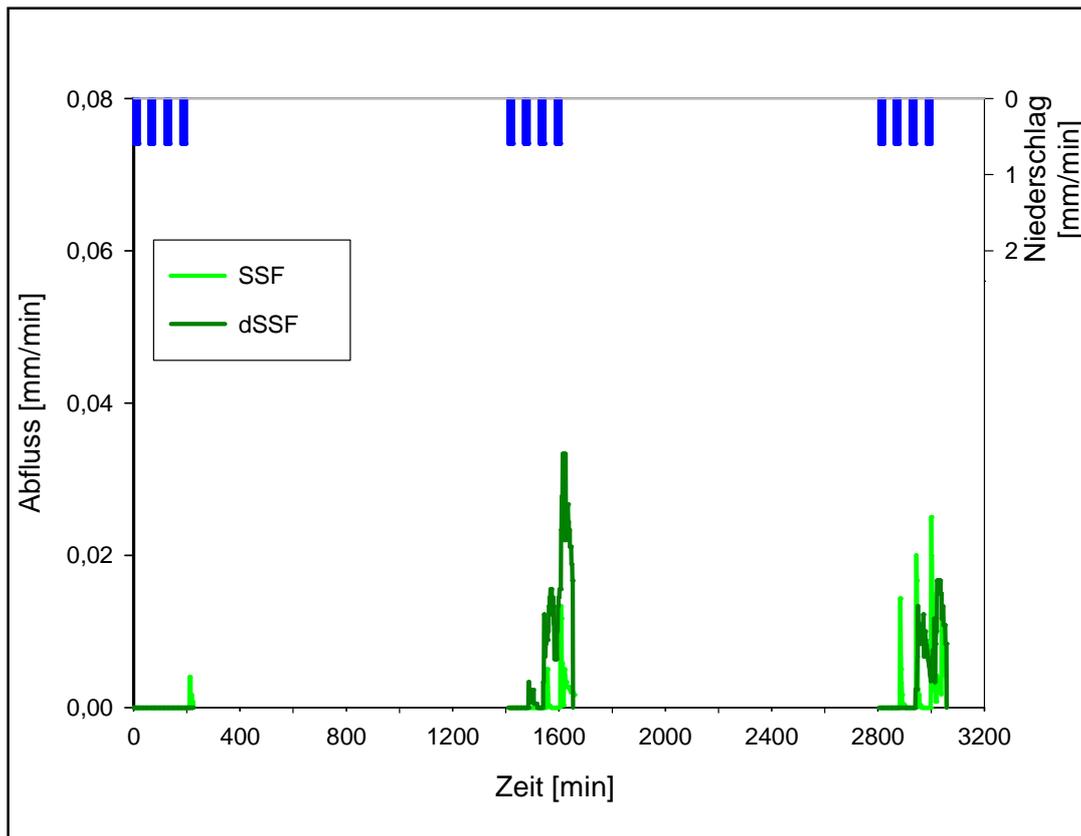


Abb. A11: Abflussverhalten am Standort HOL-3 (unterer Mittelhang, Buche)

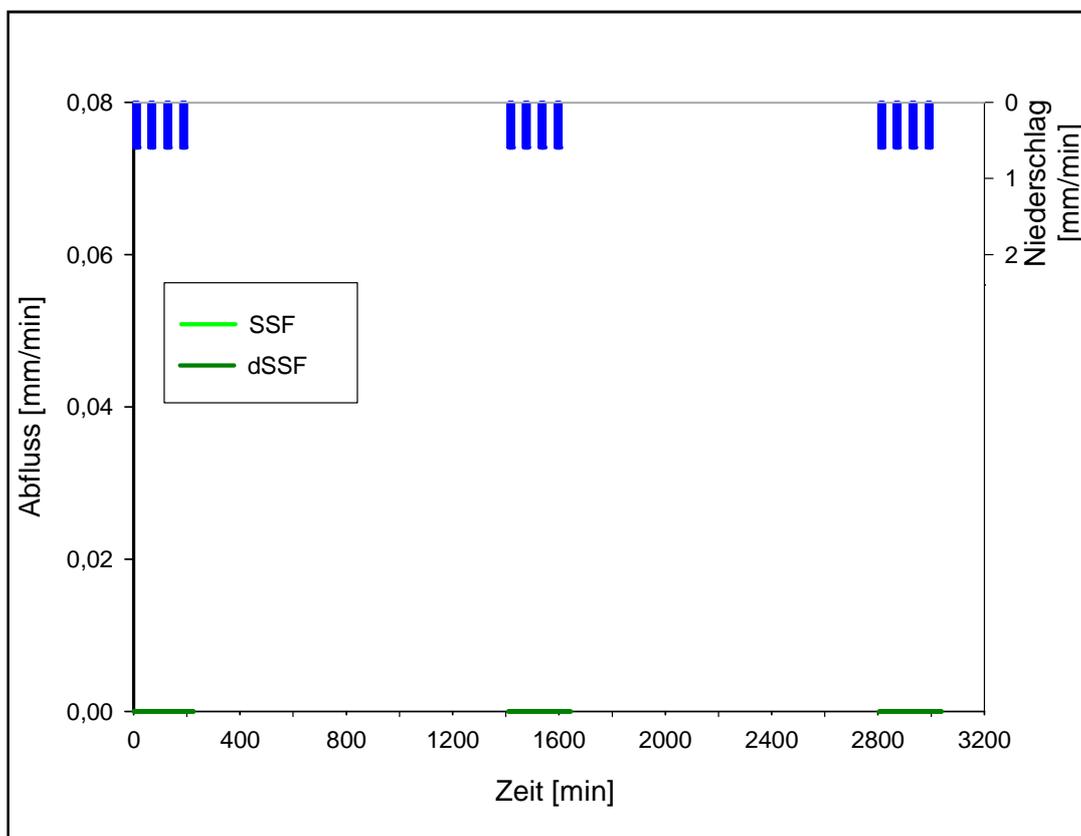


Abb. A12: Abflussverhalten am Standort FRA-5 (oberer Mittelhang, Fichte)

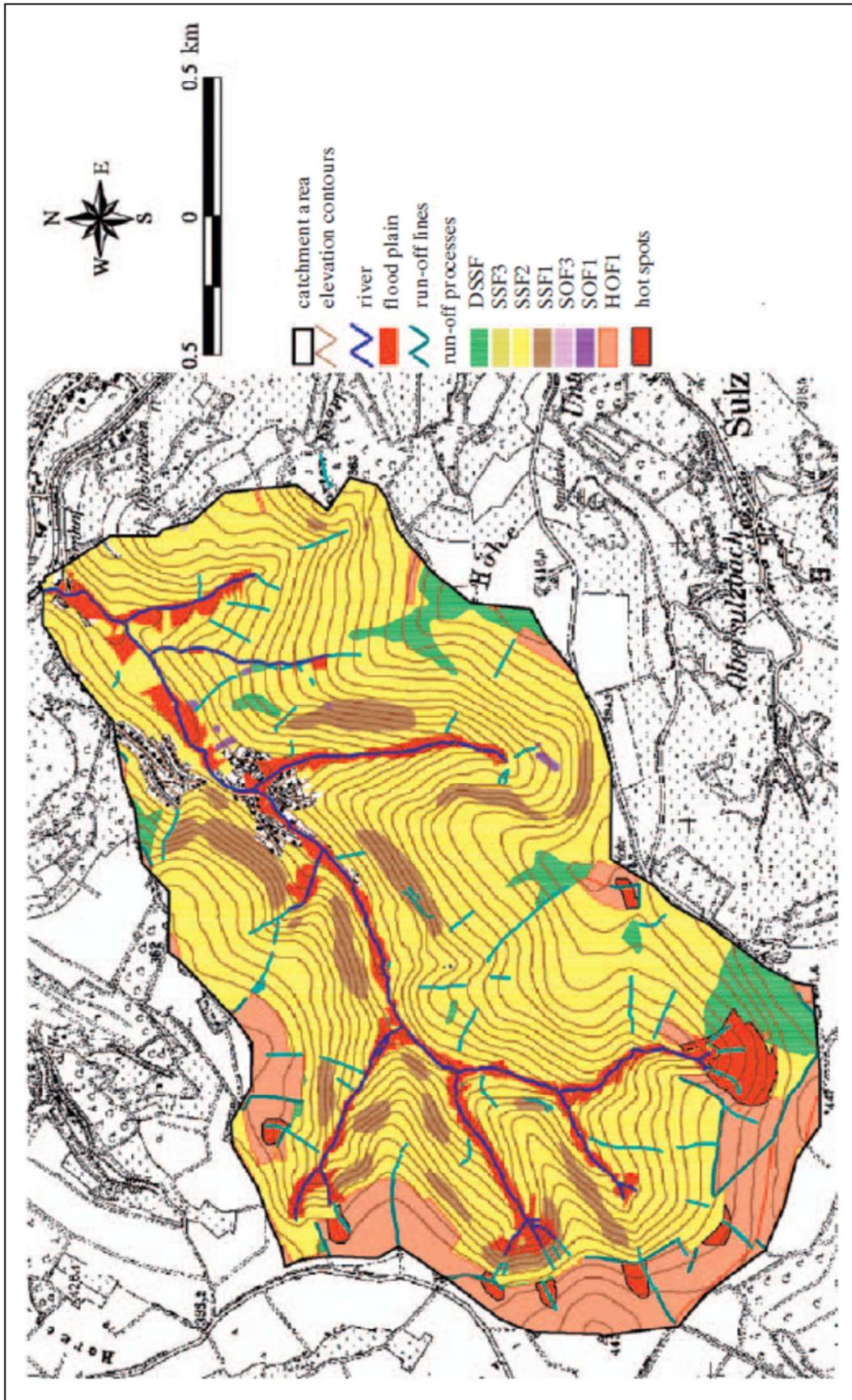


Abb. A13: Abflussprozesskarte Frankelbach (SCHÜLER, 2006)

Tab. A16: Vergleich der prozentualen Flächenanteile der DRP unterschiedlicher Klassifikationen

DRP	Flächenanteile GIS-DRP „Basis“ [%]	Flächenanteile GIS-DRP „Verschlammungsneigung“ [%]	Flächenanteile DRP „Schüler 2006“ [%]
HOF1	1,7	5,3	13,0
HOF2	-	19,1	-
SOF1	2,9	7,7	2,0
SOF2	0,4	0,1	6,0
SOF3	0,2	0,3	-
SSF1	16,8	19,1	6,0
SSF2	77,7	47,3	67,0
SSF3	0,1	0,4	-
Error	0,2	0,9	1,0

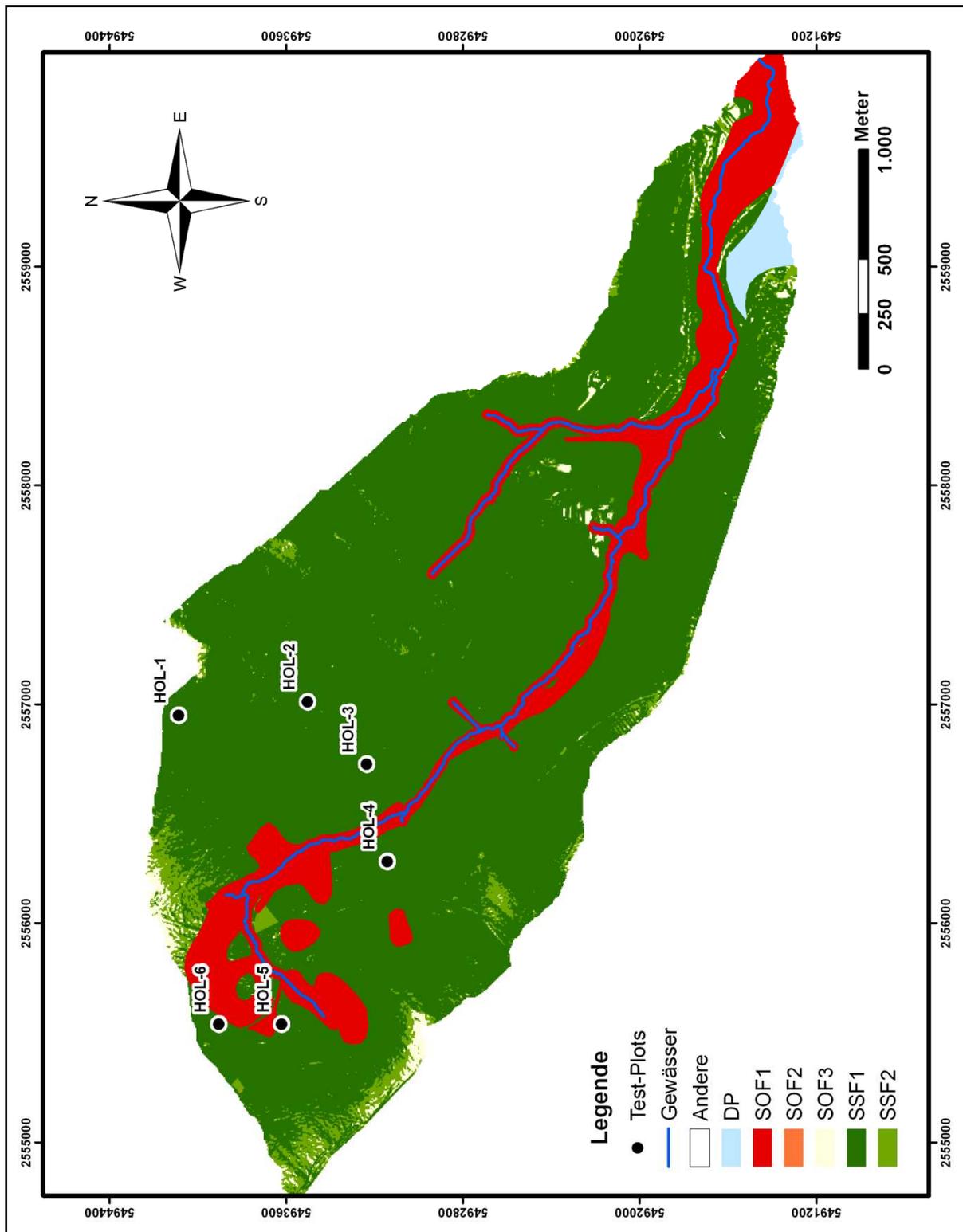


Abb. A14: GIS-DRP-Karte Holzbach *Extrem-Ereignis*

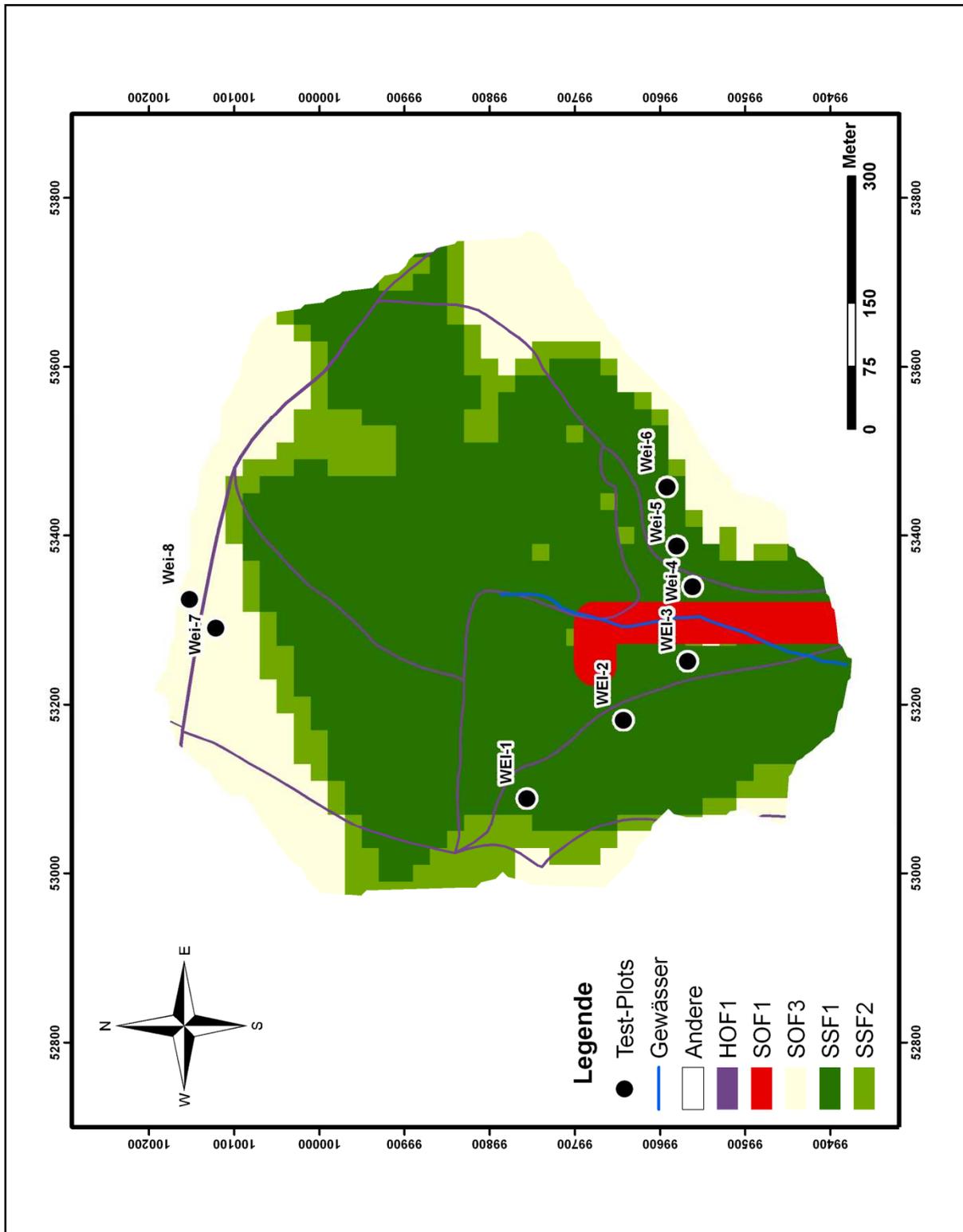


Abb. A15: GIS-DRP-Karte *Extrem-Ereignis* Weierbach

Lebenslauf

Name: Marco Hümann
Geburtsdatum: 27.05.1982
Geburtsort: Neuwied
Familienstand: verlobt
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulische Ausbildung

1992 - 2001 Rhein-Wied Gymnasium Neuwied mit Abschluss des Abiturs

Wehrersatzdienst

08/2001 - 05/2002 AWO Seniorenzentrum "Altes Brauhaus zur Nette", Weißenthurm

Studium

10/2002 - 05/2008 Studium der Angewandten Umweltwissenschaften an der Universität Trier mit dem Abschluss des Diplom-Umweltwissenschaftlers
Diplomarbeit: „Auswirkungen von Tieflockerungsmaßnahmen erstaufgeforsteter Flächen in Eifel und Hunsrück auf Bodeneigenschaften und Wuchsleistung von Bäumen“
Hauptfächer: Bodenkunde / Physische Geographie
Nebenfächer: Geologie / Fernerkundung
Begleitstudium: Altlasten / Bauleitplanung / Umweltrecht

Wissenschaftliche Tätigkeit

08/2008 - Heute Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Bodenkunde der Universität Trier (Forschungsarbeiten im Rahmen des EU Interreg IVb Projektes "ForeStClim - Transnational Forestry Management Strategies in Response to Regional Climate Change Impacts")
10/2003 - 05/2008 Wissenschaftliche Hilfskraft im Fach Bodenkunde der Universität Trier (überwiegend Mitarbeit im EU Interreg IIIb Projekt "WaReLa - Water Retention by Land Use")

Praktika

- 08/2006 - 10/2006 Praktikum
 Büro für Umweltplanung
- 08/2005 - 09/2005 Praktikum
 Kühn Geoconsulting GmbH, Bonn
- 07/2002 - 09/2002 Praktikum
 FUGRO Consult GmbH, Wiesbaden

Berufserfahrung

- 09/2011 - Heute Freier Mitarbeiter der Firma HYDROSOL (Trier)
- 08/2008 - 09/2011 Präsentationen auf internationalen Tagungen; Gastvorträge
- 01/2008 - 10/2010 Lehraufträge der Universität im Fach Bodenkunde sowie für das DLR
(Neustadt a. d. Weinstraße), Mühlengärtnerei Heydenmühle
(Darmstadt), Gemeinde Mettlach (Saarland), Gemeinde Welschbillig
(Rheinland-Pfalz)
- 11/2006 - 11/2007 Freier Mitarbeiter der Firma Büro für Umweltplanung

Veröffentlichungen (Auswahl)

- HÜMANN, M.; SCHÜLER, G.; MÜLLER, C.; SCHNEIDER, R.; JOHST, M.; CASPARI, T. (2011):
Identification of runoff processes - The impact of different forest types and soil properties
on runoff formation and floods. *Journal of Hydrology*, 409, 637–649.
- Hümann, M.; Schneider, R.; Schüler, G. (2010): Auswirkungen von
Tieflockerungsmaßnahmen erstaufgeforsteter, ehemaliger Ackerflächen auf
Bodeneigenschaften, Bestandesentwicklung sowie Aspekte des Klimawandels.
AFZDerWald, 5/2010, 8-12.

Besondere Kenntnisse

- EDV- Kenntnisse: MS-Office, ArcGIS (ESRI)
- Fremdsprachen: Englisch fließend in Wort und Schrift
- Führerschein: Klasse B

