

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt

Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung abflusssensitiver Waldflächen

Bastian Nordmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. R. Mosandl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. A. Göttlein
2. apl. Prof. Dr. J. Prietzel
3. Univ.-Prof. Dr. M. Weiler,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
(schriftliche Beurteilung)

Die Dissertation wurde am 26.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt 02.11.2011 angenommen.

Vorwort

Hochwasser sind natürliche Ereignisse, die infolge extremer meteorologischer Situationen auftreten und große Schäden anrichten können. Dabei macht die Hochwasserwelle nicht vor Ländergrenzen halt. Ein länderübergreifendes Flussgebietsmanagement ist daher dringend notwendig und mittlerweile durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie gesetzlich vorgeschrieben. Neben den verheerenden Schäden und menschlichem Leid, die große Fluten mit sich bringen, tragen auch die vielen kleinen Überschwemmungen aus kleineren bis mittleren Wassereinzugsgebieten bedeutend zum Schadensausmaß bei.

Viele dieser Schäden sind hausgemacht. Durch die Umgestaltung des Naturhaushalts durch den Menschen und die Anhäufung von Sachwerten in ehemaligen Überschwemmungsbereichen von Flüssen und Bächen wurde die Hochwassersituation und das einhergehende Schadenspotenzial enorm verschärft.

Neben dem technischen Hochwasserschutz und der Hochwasservorsorge spielt der vorbeugende Hochwasserschutz eine wichtige Rolle im modernen Hochwassermanagement. Die Sicherung und Erhöhung der Retentionskapazität der Böden im Wassereinzugsgebiet ist dabei ein nicht zu unterschätzender Faktor. Um in Zeiten knapper Kassen Maßnahmen zum vorbeugenden Hochwasserschutz gezielt umsetzen zu können, ist zu klären, wo die flutbringenden Wassermassen herkommen, welche Flächen verhältnismäßig viel zur Hochwasserwelle beitragen und wie dem entgegengewirkt werden kann.

Dieser Aufgabe widmet sich folgende Arbeit. Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung zwischen den forstlichen Versuchsanstalten von Bayern (LWF) und Thüringen (TLWJF) sowie der Technischen Universität München. Die Antragstellung, die Projektleitung und -ausführung übernahm die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Freising. Die Thüringische Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei half bei der Suche nach geeigneten Beregnungsplätzen in Thüringen und übernahm einen großen Teil der Bodenanalysen. Fachlich begleitet wurde das Projekt durch die TU München – Fachgebiet Waldernährung und Wasserhaushalt.

Als Erstes möchte ich meinen Dank an die beiden Herren Dr. Franz Binder und Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein richten. Bei Franz Binder, Sachgebietsleiter „Schutzwald und Naturgefahren“, bedanke ich mich für die freundschaftliche Atmosphäre, in der ich arbeiten durfte und für die fortwährende Motivation in Sachen Promotion. Ohne sein hohes Engagement im Korrekturlesen und seiner konstruktiven Kritik wäre die Arbeit nicht das, was sie jetzt ist. Ein Dankeschön auch an meinen Doktorvater Herr Prof. Dr. Dr. Axel Göttlein für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit. Durch seine freundschaftliche Art, den gewährten wissenschaftlichen Freiraum und die hohe Eigenverantwortlichkeit legte er die Grundlagen zu einem angenehmen Arbeiten.

Sein praxisorientiertes Denken machte die komplizierten Beregnungsversuche im Frankенwald erst möglich. Ebenfalls danken möchte ich apl. Prof. Dr. Jörg Prietzel und Prof. Dr. Markus Weiler für das Schreiben der Gutachten sowie Prof. Dr. Reinhard Mosandl für die Übernahme des Vorsitzes.

Weiterer Dank gilt Herrn Dr. Mößmer (LWF) für die Idee des Forschungsprojektes.

Nicht zu vergessen ist Herr MR Wolfgang Sailer (ehemals Bay StMELF), der das Projekt über nahezu vier Jahre begleitete und immer ein offenes Ohr für unsere Wünsche und Bitten hatte.

Tatkräftig unterstützten mich in Thüringen Herr FD Wolfgang Arenhövel und Frau OFR Karina Kahlert von der Thüringischen Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei bei der Auswahl der Versuchsflächen und bei der Beschaffung von Datenmaterial.

Stellvertretend für die Helfer vor Ort in Thüringen bedanke ich mich bei Herrn FOR Uwe Zehner vom Forstamt Sonneberg und in Bayern bei Herrn FOR Peter Hagemann vom Forstbetrieb Nordhalben und FOR Albert Schrenker vom Forstbetrieb Coburg.

Ein Dank geht an die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft – Abteilung Untersuchungs-wesen – für die Analyse der Bodenproben.

Gedankt sei dem Bayerischen Landesamt für Umwelt, stellvertretend Herrn Baudirektor Anton Loipersperger für die vertrauensvolle Überlassung der Beregnungsanlage und seinem ehemaligen Mitarbeiter Herrn RAR Michael Porzelt für die Einweisung in die Anlage auf den Projektflächen.

Weiterer Dank gilt Herrn TAR Ulrich Zosel vom Wasserwirtschaftsamt Kronach für das wasserwirtschaftliche Gutachten der Beregnungsversuche im Bereich der Trinkwassertalsperre Mauthaus.

Mein ganz persönlicher Dank gebührt den beiden ehemaligen Praktikanten und neu gewonnen Freunden Christian Hertel und Sebastian Höh. Sie halfen mir über mehrere Wochen in unermüdlicher Weise beim Herrichten der Beregnungsprofile und beim Transport der Beregnungsanlage.

Allen Mitarbeitern des Sachgebietes „Schutzwald und Naturgefahren“, vertreten durch Dr. Franz Binder, Karl Stahuber, Christian Macher, Paul Dimke, Joachim Stiegler und Monika Arzberger sowie Holger Hastreiter vom Sachgebiet „Forstpolitik, Wildtiermanagement, Jagd“ gilt mein ganz persönlicher Dank. Sie waren mir stets eine große Hilfe und brachten mich auch abseits der Arbeit auf andere Gedanken.

Nicht zuletzt möchte ich mich beim Bayerischen Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Projektes bedanken.

"Katastrophen kennt allein der Mensch, sofern er sie überlebt;
die Natur kennt keine Katastrophen"

Max Frisch 1979

„Eine nicht standortgemäße Baumartenwahl führt zu leistungsschwachen
und gegenüber den verschiedensten Faktoren
(z.B. Witterungsextremen, Insekten, Pilzen) anfälligen
Wäldern, die weder wirtschaftliche noch soziale
Funktionen im gewünschten Ausmaß
erfüllen können.“

Karl Gayer 1889



Blick vom Hauptquellgebiet der Röthen (Thüringen) nach Süden in das Untersuchungsgebiet



Oben: Beregnungsversuche im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Bayern)

Links: Nebentälchen im Sommer am Beispiel der Röthen (Thüringen). Bemerkenswert ist die große Amplitude der Wasserschüttung in Abhängigkeit zur Witterung.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	V
1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG.....	1
2. GRUNDLAGEN UND AKTUELLER KENNNTNISSTAND.....	7
2.1 WASSEREINZUGSGEBIET UND GEBIETSABFLUSS.....	7
2.2 HOCHWASSER UND FAKTOREN DER HOCHWASSERENTSTEHUNG.....	7
2.3 RAUMSKALEN IN DER HYDROLOGIE.....	12
2.4 HYDROGEOLOGIE - AQUIFERTYPEN.....	13
2.5 ABFLUSSPROZESSE.....	15
2.5.1 Abflussbildung.....	15
2.5.2 Abflusskonzentration.....	18
2.5.2.1 Oberflächenabfluss.....	18
2.5.2.2 Zwischenabfluss („Interflow“, „Subsurface flow“, SSF).....	20
2.5.2.3 Tiefensickerung („Deep Percolation“, DP).....	21
2.5.3 Fließvorgang im offenen Gerinne.....	22
2.5.4 Hochwasserbeitrag der einzelnen Abflussbildungsprozesse.....	22
2.6 PERIGLAZIALE FLIEßERDEN – ENTSTEHUNG UND AUFBAU.....	24
2.7 HANGHYDROLOGIE – THEORIE DER ABFLUSSWIRKSAMEN FLÄCHEN.....	27
2.8 KLASSIFIKATIONSVERFAHREN ZUR AUSWEISUNG HYDROLOGISCHER HOMOGENITÄTSBEREICHE.....	31
2.9 EINFLUSS DES WALDES AUF DIE ABFLUSSBILDUNG.....	34
2.10 UNTERSUCHUNGEN ZUR WALDWIRKUNG – EINE LITERATURSTUDIE.....	37
2.11 DURCHWURZELUNGSSYSTEME DER WALDBÄUME.....	41
2.11.1 Fichte (Picea abies L. (Karst.)).....	42
2.11.2 Rotbuche (Fagus sylvatica L.).....	43
2.11.3 Bergahorn (Acer pseudoplatanus L.).....	44
3. UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	46
3.1 DER FRANKENWALD.....	46
3.1.1 Besiedelung und Waldentwicklung.....	46
3.1.2 Klima.....	49
3.1.3 Geologie und Böden.....	50
3.1.4 Quelltypen – Abflusscharakteristik – Hochwassergefährdung.....	52
3.2 WASSEREINZUGSGEBIETE DER RÖTHEN UND DER TSCHIRNER KÖDEL.....	54
3.2.1 Wassereinzugsgebiet der Röthen (Thüringen).....	54
3.2.2 Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Bayern).....	55
4. MATERIAL UND METHODEN.....	57
4.1 DATENGRUNDLAGE.....	57
4.1.1 Geologische und hydrogeologische Karten.....	57
4.1.2 Konzeptbodenkarten.....	58
4.1.3 Forstliche Standortskarten.....	59
4.1.4 Bodenschätzungskarten.....	60
4.1.5 Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (Thüringen).....	60
4.1.6 Forstbetriebskarten/Forsteinrichtungsdaten.....	60
4.1.7 Digitale Höhenmodelle und Orthophotos.....	60

4.2	METHODISCHE GRUNDLAGEN.....	62
4.2.1	Geoinformationssysteme (GIS) und verwendete Software.....	62
4.2.2	Digitale Reliefanalyse und Abflussmodellierung.....	65
4.2.3	Abflussalgorithmen	66
4.3	EIGENE STANDORTSKARTIERUNG	70
4.4	BEREGNUNGSVERSUCHE – AUFBAU UND METHODIK.....	71
4.5	BODENPHYSIKALISCHE KENNWERTE	78
4.5.1	Skelettgehalt und Korngrößenanalyse	78
4.5.2	Effektive Lagerungsdichte	79
4.5.3	Durchwurzelung.....	79
4.5.4	Nutzbare Wasserspeicherkapazität	79
4.6	PEGELSONDEN.....	80
4.6.1	Pegelstandorte – Röthengrund.....	81
4.6.2	Pegelstandorte – Tschirner Ködel.....	82
5.	ERGEBNISSE.....	83
5.1	AUSWEISUNG HOCHWASSERSENSITIVER WALDFLÄCHEN	83
5.1.1	Eignung bodenkundlicher Grundlagendaten – Ergebnisse aus der Sichtung verschiedener bodenkundlicher Kartenwerke der Untersuchungsgebiete	84
5.1.2	Klassifikationsverfahren zur Ausweisung abflusssensitiver Waldflächen.....	95
5.1.2.1	<i>Abflussprozesskarten der beiden Untersuchungsgebiete</i>	<i>108</i>
5.1.3	Eigene Standortskartierung	112
5.1.3.1	<i>Standörtliche Verhältnisse im Kartiergebiet</i>	<i>112</i>
5.1.3.2	<i>Vergleich der erstellten Abflussprozesskarte mit der vor Ort ermittelten Abflussintensität</i>	<i>114</i>
5.2	BEREGNUNGSVERSUCHE	118
5.2.1	Berechnungsergebnisse im Röthengrund.....	119
5.2.2	Berechnungsergebnisse im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel	125
5.2.3	Vergleich und Zusammenführung der Berechnungsergebnisse.....	134
5.3	ABSCHÄTZUNG DES WALDEINFLUSSES AUF EINZUGSGEBIETSEBENE.....	138
6.	DISKUSSION	140
6.1	MATERIAL- UND METHODENDISKUSSION	140
6.1.1	Wahl der Untersuchungsflächen.....	140
6.1.2	Aufnahmemethodik – Abflussprozesskarte	143
6.1.2.1	<i>Regionalisierung bestimmter Bodeneigenschaften</i>	<i>144</i>
6.1.2.2	<i>Flächen mit rasch einsetzendem Zwischenabfluss</i>	<i>145</i>
6.1.3	Berechnungsversuche.....	149
6.1.3.1	<i>Berechnungsmethodik und Versuchsaufbau</i>	<i>150</i>
6.1.3.2	<i>Auffangvorrichtung</i>	<i>152</i>
6.2	ERGEBNISDISKUSSION	153
6.2.1	Eignung der forstlich-bodenkundlichen Grundlagendaten.....	153
6.2.2	Abflussprozesskarte	162
6.2.3	Berechnungsversuche.....	166
6.2.4	Behandlungsdringliche Flächen.....	177
6.2.5	Pegellogger	179
7.	WALDBAULICHE SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	180
7.1	FLÄCHEN MIT HORTONISCHEN OBERFLÄCHENABFLUSS (HOF)	183
7.2	FLÄCHEN MIT SÄTTIGUNGSOBERFLÄCHENABFLUSS (SOF)	184
7.3	FLÄCHEN MIT ZWISCHENABFLUSS (SSF).....	189

8. ZUSAMMENFASSUNG.....	192
9. LITERATURVERZEICHNIS	195
10. ANHANG.....	215
11. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	235
12. TABELLENVERZEICHNIS.....	239
13. LEBENSLAUF – BASTIAN NORDMANN	241

1. Einleitung und Fragestellung

In Anbetracht verheerender Schäden durch Hochwasserereignisse der Vergangenheit stellten im Jahre 1999 die beiden Länder Bayern und Thüringen einen gemeinsamen Gewässeraktionsplan auf. Wenig später folgte die EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) vom 23. Oktober 2000, die das länderübergreifende Abstimmungsgebot zwischen Ober- und Unterliegern sogar gesetzlich festschreibt. Das Ziel liegt in einer engen Zusammenarbeit und einer Harmonisierung von geplanten Entscheidungen in den neu festgeschriebenen Flussgebietseinheiten, um den vorbeugenden Hochwasserschutz möglichst effektiv und länderübergreifend ausrichten zu können.

Wie dringend und wichtig eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Hochwasserschutzes ist, zeigt das Januarhochwasser von 2002, wo weite Teile Oberfrankens und Südthüringens durch ein Zusammentreffen von Schneeschmelze und starken Regenfällen überflutet wurden (Abb. 1). Im darauffolgenden Jahr 2003, ebenfalls im Januar, folgte das nächste schwere Hochwasser mit ähnlich hohen Pegelständen. Im Grenzbereich beider Länder, entlang einer Linie vom Thüringischen Schiefergebirge über den Frankenwald zum Oberpfälzer Wald, stellt die Region eine bedeutende Wasserscheide dar. Viele kleinere Bäche entspringen an den Hängen des Mittelgebirges und entwässern in zum Teil tief eingeschnittenen Tälern nach Norden in die Elbe oder nach Süden über den Main in den Rhein.

Auf einer gemeinsamen Kabinettsitzung im Februar 2004 wurde daraufhin vereinbart, mit Hilfe eines gemeinschaftlichen wasserwirtschaftlichen-ökologischen Entwicklungskonzepts den Hochwasserschutz im Bereich der grenzüberschreitenden Flüsse (Föritz, Steinach, Röthen) auf das Engste abzustimmen. Die beiden forstlichen Landesanstalten von Bayern und Thüringen nahmen diesen Gedanken auf, und es entstand ein gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsprojekt, das den Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz in diesem Gebiet näher beleuchten soll.



Abbildung 1: Die „WeltOnline“ berichtete am 29. Januar 2002 von schweren Überschwemmungen im Grenzbereich von Bayern und Thüringen

Der vierte Statusbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) misst dem Zusammenhang zwischen der globalen Erwärmung und der Zunahme atmosphärischer Extremwetterereignisse eine hohe Bedeutung zu. In den gemäßigten Breiten wird durch die Änderung der großräumigen Luftzirkulation mit einer jahreszeitlichen Umverteilung der Niederschläge gerechnet (IPCC 2007). In Deutschland wird vor allem im Winter mit einer deutlichen Zunahme von hohen Niederschlagssummen zu rechnen sein, wobei die prognostizierten regionalen Schwerpunkte unter anderem im nordbayerischen Raum (Frankenwald) vermutet werden (vgl. BERNHOFER et al. 2005, HENNEGRIFF et al. 2006). In vielen Lagen fällt im Winter der Niederschlag häufig als Regen. Sind die Böden durch vorausgegangene Niederschlagsereignisse bereits vorgesättigt, können sie kein zusätzliches Wasser aufnehmen und werden rasch abflusswirksam. Fehlt die Zwischenspeicherung in Form von Eis und Schnee auch in den höheren Lagen, wird der Abfluss in den Wintermonaten deutlich zunehmen (LIEBSCHER 1991).

In den Sommermonaten hingegen wird mit einer Zunahme von Trockenperioden gerechnet (BERNHOFER et al. 2005), die sich künftig in einer Veränderung der Baumartenzusammensetzung widerspiegeln wird. Durch die wärmeren Sommer verschärfen sich jedoch auch die Gegensätze zwischen kontinentalen und maritimen Luftmassen. Die größer werdenden Energiegegensätze und der höhere Wasserdampfgehalt der Luft entladen sich in kurzzeitigen, lokal begrenzten Sommergewittern, die mit enorm hohen Niederschlagsmengen einhergehen können (RAPP 2008). Infolge des Klimawandels muss wohl in Zukunft mit einer Zunahme von Trockenperioden aber auch von Starkniederschlägen gerechnet werden, die das Abflussgeschehen von Bächen und Flüssen verändern wird.

Hochwasser sind natürliche Ereignisse, die bereits lange Zeit vor der Veränderung der Landnutzung durch den Menschen auftraten. Sie sind Teil eines sich selbst regulierenden Systems, das die Vielfalt des Lebens durch Veränderungen fördert (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2008). Neu dabei sind die enormen Schäden, die durch das abfließende Wasser nach Starkregenereignissen verursacht werden. Die Gründe liegen in der zunehmenden Besiedelung natürlicher Überschwemmungsräume und der damit einhergehenden Konzentration von Vermögenswerten in hochwassergefährdeten Gebieten (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 2004). Durch Flächenversiegelung, Flurbereinigung, die Eindeichung und Begradigung der Flüsse in den letzten Jahrzehnten gingen viele natürliche Retentionsräume in den Auen verloren. Zusätzlich nimmt die Fließgeschwindigkeit in den Flüssen zu und das abfließende Wasser entwickelt eine immer höhere Zerstörungskraft. Allein das Elbe-Hochwasser im August 2002 verursachte Schäden in Höhe von über 11 Milliarden Euro (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 2008). Die Natur liefert das Hochwasser und der Mensch parallel dazu die Schadenspotenziale, wie WORRESCHK (2002) treffend konstatiert. Laut der Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft tragen neben den großen Hochwasser-

katastrophen aber auch die vielen kleinen und mittleren, oft nur lokal begrenzten Überschwemmungen entscheidend zum Schadensausmaß bei (KRON 2005).

Nach GÖTTLE (2006) geht es im Hochwasserschutz nicht darum, der illusorischen Vorstellung zu verfallen, Hochwasser vollständig verhindern zu können, sondern viel mehr darum zu verhindern, dass es zur Katastrophe wird. Neben der Hochwasservorsorge und dem technischen Hochwasserschutz stellt der natürliche Wasserrückhalt am Entstehungsort der Abflussbildung einen der drei Grundpfeiler für ein modernes Hochwassermanagement dar. Die Forschungen der letzten Jahre zeigten, dass vor allem an den Entstehungsorten des Abflusses, das heißt in kleineren und in den Kopfgebieten mittlerer Wassereinzugsgebiete, über die Landnutzung ein positiver Beitrag für den Wasserrückhalt geleistet werden kann (BORK et al. 1998, RICHTER & SIEGEL 2002, CHANG 2006). Wald gilt in diesem Zusammenhang unter den meisten Experten als Landnutzungsform, die sich sehr positiv auf die Bodenstruktur und somit auf das Wasserrückhaltevermögen auswirkt (HIBBERT 1967, LULL & REINHARDT 1972, LÜSCHER & ZÜRCHNER 2002, COSANDEY et al. 2005, u.a.).

Der Begriff Wald ist jedoch ein sehr weit gefasster Begriff. In Deutschland kommen heutzutage ausschließlich Wälder vor, die in irgendeiner Weise durch den Menschen geprägt sind. Als natürliche Waldgesellschaft würden im Bundesgebiet auf 74 % der Fläche Buchenwaldgesellschaften (häufig: Hainsimsen-Buchenwald) vorkommen (BMELV 2004). Die Realität sieht jedoch anders aus. Nach der letzten Bundeswaldinventur beträgt die aktuelle Nadelwaldfläche rund 62 %, während die Buchenwaldgesellschaften lediglich 16 % einnehmen (BMELV 2004). Diese hohe Nadelholzfläche steht in starker Diskrepanz zur natürlichen Verbreitung der Nadelwaldgesellschaften, die in Deutschland nur 3 % der Gesamtfläche ausmachen würden. Deren Schwerpunkte liegen auf den Hochlagen von Bayern, Baden-Württemberg und kleineren Teilen Thüringens (BMELV 2004). Die außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes gepflanzten Fichtenbestände unterliegen einem erhöhten Risiko gegenüber abiotischen und biotischen Schäden und können daher die Waldfunktionen (Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion) in vielen Fällen nur ungenügend sicherstellen (PROFFT et al. 2007). Dieser gegenwärtige Zustand kommt umso mehr zum Tragen, da die Ansprüche an den multifunktionellen Aufgabenbereich des Waldes wohl zukünftig weiter zunehmen werden. Die waldbaulichen Zielsetzungen aller Bundesländer streben daher auf einen naturnahen und standortgerechten Waldbau hin, der die natürliche Vielfalt fördert und die Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion optimal erfüllt. Welchen Stellenwert der Forstwirtschaft im Bezug zum Hochwasserschutz zukommt, lässt sich aus folgendem Zitat von KOPP und SCHWANECKE (2003), beide Pioniere der forstlichen Standortserkundung, abschätzen: *„Im Mittelgebirge ist überhaupt die Erhaltung bzw. Vergrößerung des Wasserspeichervermögens und die Regelung der Wasserabzugsgeschwindigkeit eine wichtige Aufgabe der Forstwirtschaft für die Wasserbilanz des ganzen Landes.“*

Der Boden erfüllt eine Vielzahl von Funktionen im Naturhaushalt und ist daher eine unserer wichtigsten Lebensgrundlagen. Trotz dieser wichtigen Aufgaben wird der Boden häufig unterschätzt und gilt daher oftmals als vergessene Ressource (GERZABEK et al. 2002). Neben der Produktionsfunktion dient er unter anderem als Filter für das Grundwasser und als Speicher für den Niederschlag. Der Boden und das geologische Ausgangsmaterial beeinflussen somit maßgeblich die Höhe und den Verlauf von Hochwasser (LÖHMANNSRÖBEN 2001, NAEF et al. 2002). In Abhängigkeit vom Relief, dem Wasserspeichervermögen des Standortes, den Infiltrationseigenschaften des Bodens und des Untergrundes wird überschüssiges Wasser mehr oder weniger schnell an die Bäche abgegeben (SCHERRER 2007). Die oft zitierte Waldwirkung auf das Abflussgeschehen ist daher in erster Linie von den gegebenen Bodeneigenschaften, das heißt vom Standort, abhängig. Je nachdem wie die Bodeneigenschaften (Porenvolumen) durch die Bestockung beeinflusst werden können, ergibt sich ein landnutzungsspezifischer Effekt (vgl. LÜSCHER & ZÜRCHER 2002). Aufgrund der meist großen Heterogenität der Böden entstehen unterschiedlich schnell reagierende Abflussbildungsareale, aus denen sich die Abflussbereitschaft eines Wassereinzugsgebiets zusammensetzt. Ein modernes Hochwassermanagement muss deshalb zunächst darauf abzielen, diejenigen Flächen innerhalb eines Wassereinzugsgebietes zu lokalisieren, die überproportional viel Wasser zum Abflussprozess beisteuern und sich durch waldbauliche Maßnahmen in ihrem Gefahrenpotenzial beeinflussen lassen. Die Darstellung solcher Abflussbildungsareale in Form von Abflussprozesskarten gibt es bereits für einige wenige Wassereinzugsgebiete, doch entweder erfüllen sie nicht den nötigen Detaillierungsgrad, um konkrete waldbauliche Maßnahmen einzuleiten oder sie erfordern zeit- und somit kostenintensive Detailuntersuchungen vor Ort, die nur für kleine Gebiete mit konkreter Hochwassergefahr gerechtfertigt sind (vgl. SCHERRER 2006).

In dieser Untersuchung soll anhand einer Auswertung des zur Verfügung stehenden bodenkundlichen Kartenmaterials und einfacher Reliefanalysen mit Hilfe digitaler Höhenmodelle (DHM) diejenigen Flächen aufgezeigt werden, auf denen die Forstwirtschaft besonders effektiv zum vorbeugenden, dezentralen Hochwasserschutz beitragen kann. Dazu ist ein praxisnahes Klassifikationssystem zu erstellen, das die einzelnen hochwasserrelevanten Kennwerte zusammenfasst und zu einem konkreten Abflusspotenzial verdichtet. Ziel ist eine flächenscharfe Abflussprozesskarte, die die einzelnen Abflussprozesse darstellt und sich dabei auf größerer Fläche kostengünstig umsetzen lässt. Das Anliegen der Arbeit liegt unter anderem auch darin begründet, dass eine externe, GIS-geschulte Fachkraft Schritt für Schritt die Klassifizierung nachvollziehen und selbstständig auf andere Wassereinzugsgebiete anwenden kann. Deshalb wurden einzelne Arbeitsschritte ausführlicher verfasst.

In einem zweiten Schritt soll anhand von künstlichen Starkregensimulationen geprüft werden, ob sich durch tiefer wurzelnde Baumarten (Buche/Bergahorn gegenüber Fichte) die Infiltrations- und Wasserspeicherkapazität der im Untergrund oft dichten, abflusssensitiven Franken-

waldböden gesteigert werden kann und somit der hochwasserwirksame Abflussprozess hinausgezögert wird. Sollte der Schutzerfüllungsgrad von Flächen von der Baumartenzusammensetzung abhängig sein, könnten Fördermaßnahmen ganz gezielt für einen Waldumbau in von Hochwasser gefährdeten Gebieten eingesetzt werden. Dabei sind Kenntnisse über die standörtlich unterschiedlichen Abflussprozesse eine Grundvoraussetzung, die ebenfalls über die Beregnungsversuche ermittelt werden sollen.

Da nicht jede Fläche innerhalb von Waldbeständen gleichermaßen zum Abflussprozess beiträgt oder sich über die Landnutzung in ihren Abflussverhalten beeinflussen lässt, soll schließlich über die Verknüpfung der Beregnungsergebnisse mit den erstellten Abflussprozesskarten eine Aussage zum Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz getroffen werden. Im Mittelpunkt steht dabei weniger die Grundlagenforschung, sondern das Bestreben, die bereits gewonnenen Ergebnisse in nachvollziehbarer Weise der forstlichen Praxis verfügbar zu machen, um den Waldumbau und somit auch den Hochwasserschutz an besonders abflusssensitiven Standorten zu unterstützen.

Zur Umsetzung des länderübergreifenden Pilotprojektes wurden zwei Einzugsgebiete [EZG] im thüringischen und bayerischen Teil des Frankenwaldes ausgewählt und hinsichtlich ihrer Hochwassergefahr analysiert.

Im Einzelnen soll auf folgende Fragestellungen eingegangen werden:

- Können auf Grundlage des allgemein verfügbaren forstlich-bodenkundlichen Kartenmaterials und einfacher Reliefanalysen abflusssensitive Flächen innerhalb der Wassereinzugsgebiete ausgewiesen werden?
- Welche Abflussprozesse dominieren in beiden Wassereinzugsgebieten im Frankenwald und wie viel steuern sie zur Hochwasserwelle bei?
- Kann die Forstwirtschaft den Wasserrückhalt durch eine veränderte Baumartenzusammensetzung erhöhen?
- Welche prozessorientierten Zielstrukturtypen können helfen, die Wasserspeicherkapazität der Waldböden zu erhöhen?

Die vorliegende Arbeit ist in 6 Kapitel untergliedert. Dem ersten Kapitel „Einleitung und Fragestellung“ folgt eine umfassende Literaturübersicht über die Grundlagen und den aktuellen Kenntnisstand der Hochwasserentstehung, verschiedene Abflusstheorien, den Einfluss des Waldes auf die Hochwasserentstehung, der Aufbau periglaziärer Lagen im Frankenwald und eine Übersicht über bestehende Klassifikationsverfahren zur Ausweisung abflusssensitiver

Flächen. Aus diesem Kapitel werden Rückschlüsse gezogen, wie sich die Hochwassergefahr im Mittelgebirgsraum zusammensetzt und auf welchen Standorten ein baumartenspezifischer Effekt auf den dominierenden Abflussprozess am wahrscheinlichsten erscheint.

In Kapitel 3 erfolgt die Beschreibung der beiden Wassereinzugsgebiete. Neben der Charakterisierung des Naturraums Frankenwald werden die Hochwassergefährdung und Abflusscharakteristik, bodenkundliche und klimatische Verhältnisse sowie die Landnutzung in beiden Untersuchungsgebieten vorgestellt. Im 4. Kapitel steht der methodische Teil im Mittelpunkt. Dieses Kapitel beschreibt die verwendeten Datengrundlagen, die Auswertungs- und Labormethoden, benennt die Kriterien für die Auswahl der Beregnungsversuche und deren Verfahrensablauf im Gelände.

Das Ergebniskapitel (Kap. 5) umfasst drei Teile. Teil 1 behandelt die Ergebnisse der Kartenanalyse, die Modellierung der Abflussprozesskarte sowie das Ergebnis der eigenen Standortskartierung. Im zweiten Teil werden die Resultate der Beregnungsversuche vorgestellt. In einem dritten Teil werden beide Teilergebnisse zusammengefügt und der Waldeinfluss auf den Wasserrückhalt abgeschätzt. Kapitel 6 stellt die wichtigsten Ergebnisse noch einmal kurz vor, die im Anschluss diskutiert werden. Im Kapitel 7 werden konkrete waldbauliche Maßnahmen benannt, die helfen, die Wasserabzugsgeschwindigkeit zu reduzieren. Der Textteil der Arbeit endet mit der Zusammenfassung im Kapitel 8.



Ziel ist die Entwicklung eines wissenschaftlich fundierten, aber dennoch praxisgerechten Verfahrens zur Klassifizierung hochwassersensitiver Waldflächen im Frankenwald. Darauf aufbauend soll mit Hilfe von Beregnungsversuchen abgeschätzt werden, ob durch standortsgerechte, tiefwurzelnde Baumarten der Wasserrückhalt abflusssensitiver Waldböden gesteigert werden kann. Sollte dies möglich sein, werden aus den Ergebnissen Empfehlungen zu prozessorientierten Zielstrukturtypen für die forstliche Praxis abgeleitet.

2. Grundlagen und aktueller Kenntnisstand

2.1 Wassereinzugsgebiet und Gebietsabfluss

Als Wassereinzugsgebiet wird derjenige Bereich der Landschaft bezeichnet, bei dem der Niederschlag in Form von oberirdischen und unterirdischen Abflüssen¹ einem Gerinne zufließt (Abb. 2). Laut BAUMGARTNER & LIEBSCHER (1996) ist zwischen dem oberirdischen (A_{Eo}) und dem unterirdischen Einzugsgebiet (A_{Eu}) zu unterscheiden, deren Grenzen die sogenannten Wasserscheiden bilden. Das Wassereinzugsgebiet reicht damit von der äußersten Grenzlinie der Gebietsoberfläche bis zur Sohle des an der Abflussbildung beteiligten Grundwasserleiters. Die Größe des tatsächlichen Wassereinzugsgebietes muss daher nicht der Größe des oberirdischen Einzugsgebietes entsprechen. Die Angabe der Flächengröße bezieht sich häufig auf die Horizontalprojektion des entsprechenden Gebietes in km^2 , während die A_{Eu} dagegen nicht immer exakt bekannt ist.

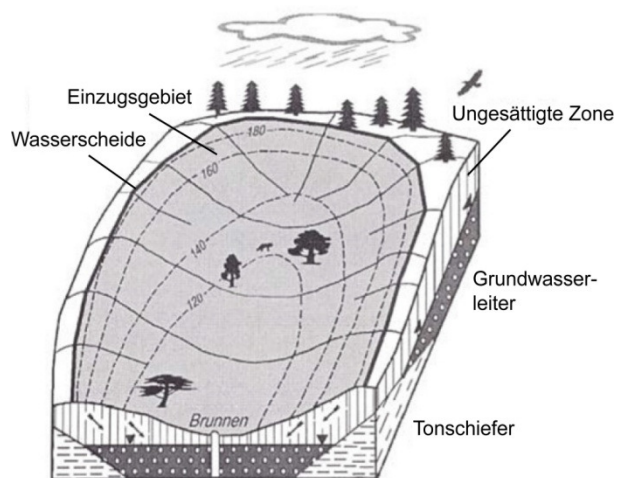


Abbildung 2: Schema eines Wassereinzugsgebietes (aus: Skript der Fakultät für Bauingenieurwesen, TUM)

Die Größe des tatsächlichen Wassereinzugsgebietes muss daher nicht der Größe des oberirdischen Einzugsgebietes entsprechen. Die Angabe der Flächengröße bezieht sich häufig auf die Horizontalprojektion des entsprechenden Gebietes in km^2 , während die A_{Eu} dagegen nicht immer exakt bekannt ist.

Der Gebietsabfluss (Q) eines Einzugsgebietes ergibt sich aus dem Wasservolumen, das pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt durchfließt. Er setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen und kann über die Wasserhaushaltsgleichung beschrieben werden. Demnach ergibt sich der abfließende Anteil aus dem Freilandniederschlag (N_f) abzüglich des Interzeptionsverlustes (I) durch die Vegetation, der Evaporation (E) über Wasseroberflächen und Boden, der Transpiration (T) und der Wasservorratsänderung (ΔS) im Boden.

$$Q = N_f - I - E - T - \Delta S$$

2.2 Hochwasser und Faktoren der Hochwasserentstehung

Hochwasser ist eine zeitlich begrenzte Anschwellung des Durchflusses, die einen bestimmten Schwellenwert überschreitet (DIN 4049-1). Die Aufzeichnung des Wasserstandes oder des Abflusses beim Durchgang einer Hochwasserwelle an einem Abflussquerschnitt wird als Hochwasserganglinie bezeichnet. Als die wichtigsten Kenngrößen gelten der Hochwasserscheitel, als oberster Grenzwert der Hochwasserganglinie, die Dauer des Hochwasserereignisses

¹ Unter dem Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche sich bewegendes Wasser (DIN 4049)

nisses und die Abflussmenge. In der Hydrologie werden den Spitzenabflussmengen verschiedene Wahrscheinlichkeiten des Auftretens (jährlich, 10- oder 100-jährlichen Hochwasser) beigemessen. Für die Hochwasserentstehung sind mehrere Faktoren verantwortlich (Abb. 3). Eine große Rolle spielen die spezifischen Gebietseigenschaften, die Anfangsbedingungen und die Witterung (Ereignischarakteristika). Diese Faktoren sind vorgegeben und können nicht durch menschliches Handeln beeinflusst werden.

Damit Hochwasser überhaupt entstehen kann, braucht es ergiebige Niederschläge. Dabei stehen die *Niederschlagsmenge*, die *Niederschlagsintensität* und die *Bodeneigenschaften* im engen Zusammenhang mit der Abflussganglinie² eines Wassereinzugsgebietes.

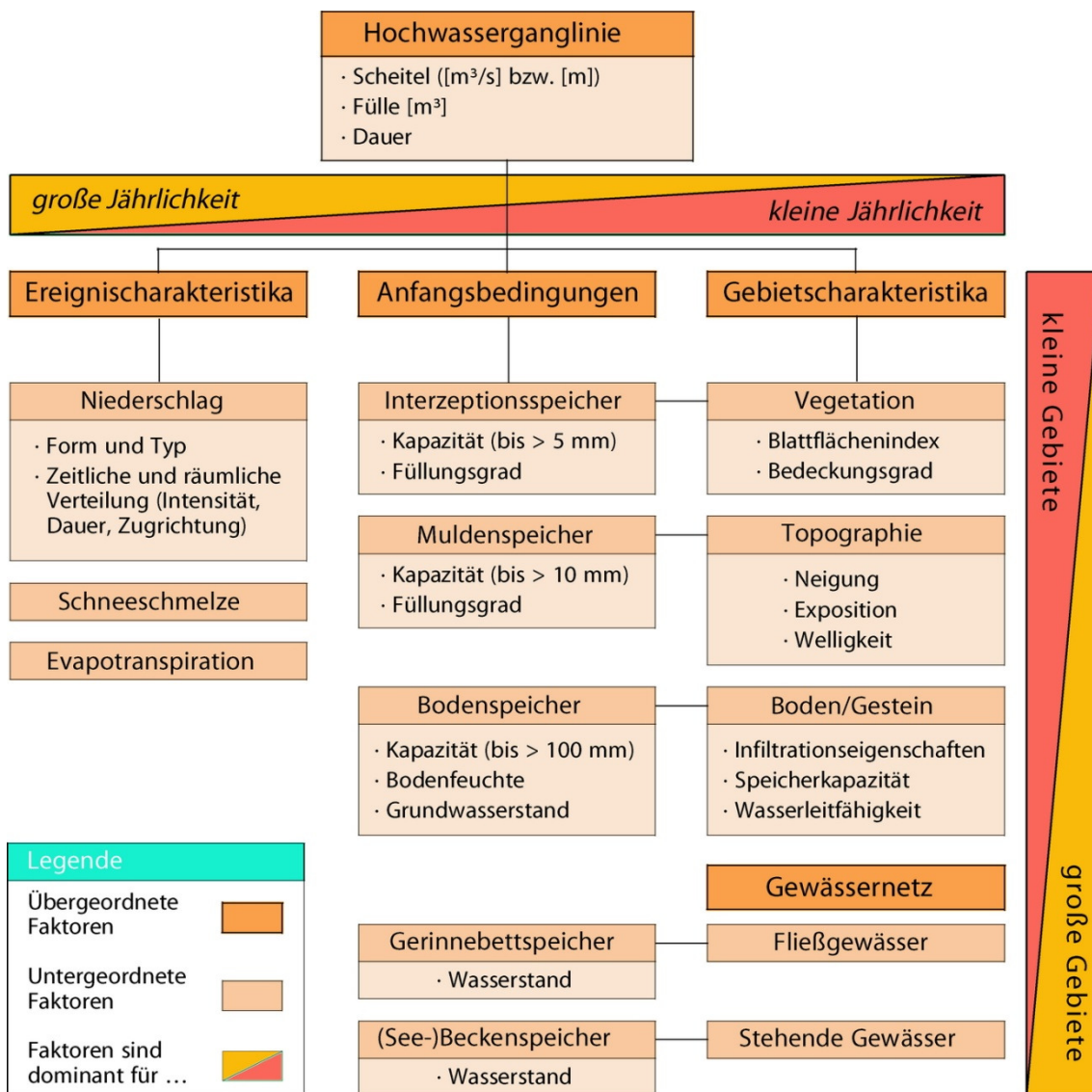


Abbildung 3: Steuergrößen, die das Ereignis Hochwasser prägen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Niederschlagsmenge (aus: NIEHOFF 2001)

² Darstellung des Wasservolumens (Q in l/s oder m^3/s), das in einer Zeitreihe einen definierten Fließquerschnitt passiert und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist

Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens, entstehen Abflusskomponenten, die schnell abflusswirksam werden und zu einer raschen Abflussreaktion führen (Abb. 4). Auf den im Allgemeinen grobporenen und daher gut durchlässigen Waldböden infiltriert normalerweise das gesamte Niederschlagswasser und wird dort für eine gewisse Zeit zwischengespeichert. Wie viel Wasser der Boden aufnehmen kann, hängt von den *Bodeneigenschaften* und der *Witterungsvorgeschichte* ab. Ist der Boden infolge vorheriger Niederschlagsereignisse bereits gesättigt, kann kein weiteres Wasser mehr gespeichert werden und überschüssiges Wasser rinnt ober-/unterirdisch ab (Zwischenabfluss) oder trägt in Form von Tiefensickerung zur Grundwasserneubildung bei. Welcher Abflussprozess dabei zum Tragen kommt, hängt im Wesentlichen von den *bodenphysikalischen Eigenschaften* und den *geologischen Ausgangsbedingungen* ab.

Ein von Menschenhand beeinflussbarer Faktor ist die *Landnutzung*. Waldbestände vermögen zum Beispiel durch ihr Wurzelsystem den Boden tiefgründig zu lockern und sorgen für eine verbesserte Retention, während durch Viehtritt verdichtete Graslandschaften oder auch Skipisten häufig auf Starkregenereignisse mit Oberflächenabfluss reagieren (KARL et al. 1985, MARKART et al. 2000, MARKART & KOHL 2004).

Durch die Transpiration wird dem Boden tiefgründig Wasser entzogen und gelangt somit nicht zum Abfluss. Im Sommer können konvektive Gewitterniederschläge, deren Wirkung durch orografische Effekte, wie *Relief*, *Hangneigung* und *Exposition* (Stauwirkung) des Einzugsgebietes, verstärkt werden, eine große Rolle spielen. Sie treten meist lokal auf und können zu heftigen Überschwemmungen, vor allem in kleinen Einzugsgebieten, führen (KLEEBERG & ROTHER 1996).

Diese Gebiete werden bei einem Unwetter meist vollständig überregnet. In deren Folge springen die Abflüsse sehr schnell und mit unruhigem Verlauf an.

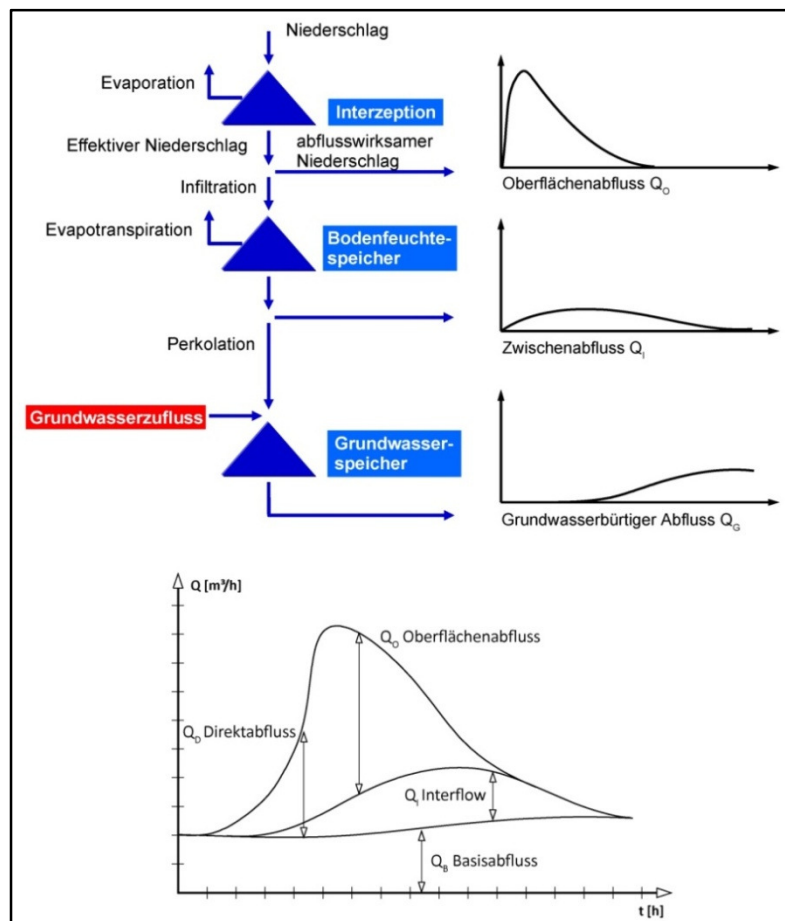


Abbildung 4: Übersicht der potenziell entstehenden Abflussprozesse in einem Wassereinzugsgebiet und deren Wirkung auf die Abflussganglinie (aus: NACKEN (2006, oben) und DIN 4049-1 (unten))

Ein großes Einzugsgebiet besteht dagegen aus mehreren Teileinzugsgebieten, die durch eine Gewitterzelle nicht alle erfasst werden können. Die Ganglinie verläuft daher sehr viel ausgeglichener (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Großflächige und meist tagelang anhaltende advektive Niederschläge führen hingegen auch in großen Flussgebieten zu großflächigen Überschwemmungen. In den Mittelgebirgen besteht zudem eine erhöhte Gefahr durch Hochwasser im Frühjahr, wenn die Schneeschmelze von starken Frühjahrsniederschlägen begleitet wird (DYCK & PESCHKE 1995). Gefrorene Böden wirken dabei Hochwasser fördernd, da das Niederschlagswasser nicht in den Boden infiltrieren kann und sofort oberflächlich abfließt.

Die räumliche Ausbildung der Abflusswege hängt maßgeblich von der *Geomorphologie* eines Einzugsgebietes ab (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996, BUTTLE et al. 2004). Der Abfluss konzentriert sich meist in wasserzuflussbegünstigten Hangformen (Mulden) und fließt dort dem nächsten Gerinne entgegen. Die Hangneigung wird dabei häufig als Regler für die Geschwindigkeit der Abflusststehung angesehen (WALDENMEYER 2003, SCHÜLER 2005b, SCHERRER 2006). Je kürzer und steiler die Fließwege, umso schneller konzentriert sich das Wasser im Einzugsgebiet.

Auch die Form des Einzugsgebietes wirkt sich auf die Hochwasserwelle aus. Sie bestimmt die Zeit, die das Wasser benötigt, um vom entferntesten Punkt des Einzugsgebietes den Pegel zu erreichen (Abb. 5). So kommt Niederschlagswasser aus einem kreisrunden Gebiet nahezu gleichzeitig am Gebietsauslass an und führt zu einer kurzen aber steilen Abflussreaktion, während sich in einem lang gestreckten Einzugsgebiet der Abfluss über die gesamte Länge des Gebietes verteilt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Durch die unterschiedlich langen Fließwege der verschiedenen Teileinzugsgebiete entsteht eine zeitlich gestreckte und weniger intensive Abflusswelle.

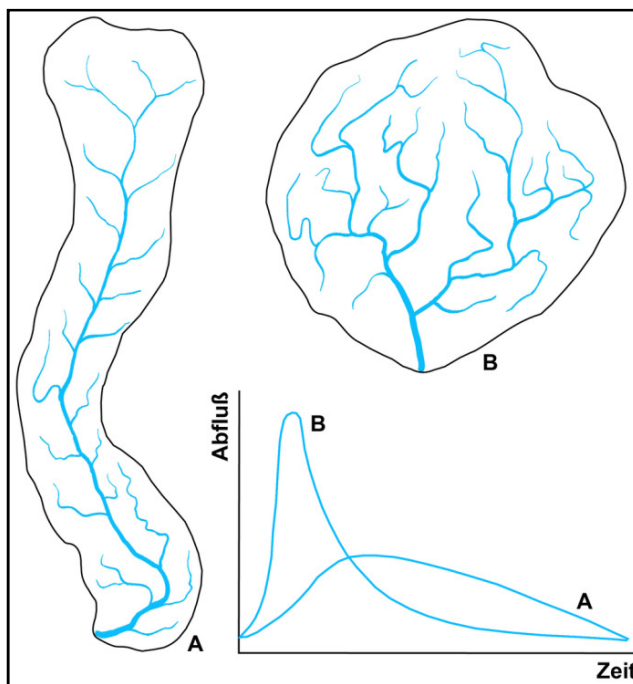


Abbildung 5: Abflussganglinien unterschiedlicher Einzugsgebietsformen (aus: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996)

Hochwasserereignisse können verschiedene Ursachen haben. In Abhängigkeit ihrer Entstehung zeichnen sie sich durch charakteristische Abflussverläufe aus. Die Hochwasserarten, die im Mittelgebirgsraum und im Umland eine Rolle spielen, lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Sturzfluten („Flash Floods“) entstehen infolge lokaler Starkregenereignisse in kleinen und steil abfallenden Wassereinzugsgebieten (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 1997). Auslöser sind typischerweise ergiebige konvektive Gewitterniederschläge. Dabei übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens und Niederschlagswasser fließt rasch oberirdisch ab. Sturzfluten können auch im Winter entstehen, wenn die Bodenoberfläche durch starke Frosteinwirkung kein Niederschlagswasser aufnehmen kann oder die Böden bereits wassergesättigt sind. Durch das meist steile Gefälle und die kurzen Fließwege kommt es zu einer rasch abflusswirksamen Hochwasserwelle mit kurzer Scheitelzeit, bei der sich kleine Bäche zu reißenden Fluten verwandeln und eine enorme zerstörerische Kraft entwickeln können.

Überflutungen sind das Ergebnis von Starkregenereignissen in flachen Wassereinzugsgebieten. Durch die längere Konzentrationszeit und die geringere Fließgeschwindigkeit des Wassers kommt es zu einem zeitlich gestreckten Abflussgeschehen.

Flussüberschwemmungen („River Floods“) entstehen durch mehrere Tage bis Wochen anhaltende und großflächige Niederschläge oder durch das zeitliche Zusammentreffen von Schneeschmelze und ausgiebigen Regenfällen im Frühjahr (MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT 1997). Durch die längeren Fließwege des Wassers kommt es oft erst Tage nach dem Regenereignis zu einer merklichen Erhöhung des Wasserspiegels. Während bei einer Sturzflut das überschüssige Wasser sehr schnell abfließt und die Hochwasserwelle somit auch rasch wieder abnimmt, dauert es meist Tage bis Wochen, bis in einem großen Einzugsgebiet alle Teileinzugsgebiete wieder entwässert sind.



Für die Hochwasserentstehung sind viele Faktoren verantwortlich. Der Mensch kann einzig über die Landnutzung auf die Bodeneigenschaften und somit auf die Hochwasserentstehung einwirken. Die Hochwasserwelle setzt sich aus mehreren Abflusskomponenten zusammen. Dabei spielt der sogenannte Direktabfluss, bestehend aus Oberflächenabfluss und schnellem Zwischenabfluss, die größte Rolle. Durch unterschiedliche Ursachen der Abflusentstehung kommt es zu charakteristischen Abflussverläufen, die sich in Sturzfluten, Überflutungen und Flussüberschwemmungen einteilen lassen.

2.3 Raumskalen in der Hydrologie

Hydrologie ist nach DIN 4049-1 die Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften und seinen Erscheinungsformen auf und unter der Landoberfläche. Die Raumskala umfasst das einzelne Wassermolekül bis hin zu atmosphärischen Zirkulationsprozessen. Da sich in Abhängigkeit zur beobachteten Dimension unterschiedliche Fragen und Zielstellungen ergeben, wird in der Hochwasserentstehung zwischen der Mikroskala (lokal, Plotebene), Mesoskala (Hang, Bestand) und der Makroskala (Einzugsgebiet, Region) unterschieden (MENDEL 2000, Tab. 1). Während auf Plotebene (eindimensional, vertikale Fließprozesse) die bodenphysikalischen Eigenschaften und kleinräumigen Unterschiede in der Geomorphometrie die Abflussgeschwindigkeit, -richtung und -menge direkt bestimmen, dominiert in der Hangskala (zweidimensional, vertikal und horizontal) die durch die Hangneigung und die bodenphysikalischen Eigenschaften des Boden-Vegetationskomplex bedingte Aufteilung des Abflusses in Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung (LEROCH 2006). Höhenverteilungen, Längen und Formen, die ein Einzugsgebiet charakterisieren, spielen dagegen erst auf der dreidimensional betrachteten Einzugsgebietsskala eine zunehmend bedeutendere Rolle. Im Hinblick auf die im Rahmen dieser Untersuchung beobachteten dominierenden Abflussprozesse der 100 m² großen Beregnungsversuche (siehe Kap. 5.2) liegt das Hauptaugenmerk auf der Plot-skala, wobei die Übertragung, der aus den Beregnungsversuchen gewonnenen Ergebnisse auf die Hang- und Einzugsgebietsebene, auch die jeweils größeren Skalen umfasst.

Tabelle 1: Skalenbereiche zur Untersuchung hydrologischer Prozesse (aus: MENDEL 2000)

Räumlicher Skalenbereich von ... bis ...	Untersuchungsgebiet	Zeitlicher Skalenbereich	Abflußprozess		
≤ 1 cm ² bis 10 cm ² bis 1 dm ²	Mikro- und Mesopore Gropore, Pipe Bodenkompartiment, Pflanze	Sekunden - -	Infiltration, Versickerung Bodenröhrenfließen Verdunstung	Mikroskala (lokal)	
bis 10 dm ² bis 1 m ²	Kleinlysimeter Lysimeter	Minuten -	Bodenwasser Oberflächenabfluss, Erosion		
bis 10 m ² bis 100 m ²	Kleinberegnungsfläche -	- -	Bodenwasserabfluss Niederschlag		
bis 1000 m ² bis 1 ha	Großberegnungsfläche Feld, Hang, Parzelle, Schlag	- -	Grundwasserabfluss		
bis 10 ha bis 1 km ²	Gewann, Bestand Teilgebiet	- Stunden	Gerinneabfluss		
bis 10 km ² bis 100 km ²	Kleines Einzugsgebiet -	- -	Gerinnespeicherung Wellenablauf		
> 1000 km ²	Großes Einzugsgebiet	Tage	Wellenüberlagerung		Makroskala

Da sich eine Änderungen in der Landnutzung, vornehmlich in kleineren Wassereinzugsgebieten, merklich auswirkt (NIEHOFF 2001, CHANG 2006), sind Maßnahmen zum vorbeugenden Hochwasserschutz vor allem in diesen Gebieten zu intensivieren. Von einem kleinen Wassereinzugsgebiet spricht man, wenn eine Fläche von 10 km² nicht wesentlich überschritten wird (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996, BLÖSCHL 1996). Hier kann eine kleine, lokale Gewitterzelle einen Gebirgsbach in kurzer Zeit in einen reißenden Fluss verwandeln. Die Vorwarnzeit ist dementsprechend kurz und die verursachten Schäden meist hoch. Die Auswirkungen konvektiver Niederschläge auf das Schadenspotenzial können jedoch über eine Änderung in der Landnutzung verringert werden (NIEHOFF 2001).

2.4 Hydrogeologie - Aquifertypen

Die Hydrogeologie, als Teildisziplin der Hydrologie, beschäftigt sich mit den Erscheinungen und den Wirkungen des Wassers in den Hohlräumen der Erde, insbesondere mit dem Grundwasser (WOHLRAB et al. 1992). Als Grundwasser bezeichnet man „*unterirdisches Wasser, das die Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich oder nahezu ausschließlich von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird*“ (DIN 4049-1). Die geologischen Verhältnisse spielen im Abflussgeschehen eine wichtige Rolle. Je nach Ausprägung (Klüftigkeit, Hohlraumanteil) der Lithosphäre geht ein mehr oder weniger großer Teil des perkolierenden Wassers in den Grundwasserleiter über (Tiefensickerung) und füllt diesen auf. Wasser, das in den Grundwasserkörper gelangt ist, trägt im Allgemeinen stark verzögert in Form von Basisabfluss zum Gebietsabfluss bei und ist im Sinne des Wasserrückhaltes positiv zu bewerten.

Als Grundwasserleiter (Aquifere) bezeichnet man lockere oder feste Gesteinsschichten, in denen Grundwasser weitergeleitet wird (WOHLRAB et al. 1992) und sich meist durch lange Fließwege und -zeiten auszeichnet. In Abhängigkeit nach ihrer Festigkeit und nach dem durchflusswirksamen Hohlraumanteil des Gesteins unterscheidet man Poren-, Kluft- und Karstaquifere.

- Porenaquifere bestehen aus Lockergesteinen (Geröll, Schotter, Kies), dessen Hohlraumanteil aus Poren gebildet wird. Sie bilden im Allgemeinen eine gute Drainage nach unten aus. Durch das porenreiche Substrat kann viel Wasser in tiefere Bodenschichten geleitet und zwischengespeichert werden. Porenaquifere geben das Wasser aus Starkregenereignissen zeitverzögert an den Vorfluter ab und wirken sich positiv auf den Wasserrückhalt aus.
- Karstaquifere sind in leicht löslichen Karbonat- und Sulfatgesteinen (Kalk, Dolomit, Gips) zu finden (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Sie stellen besonders im Alpenraum einen Aquifertyp mit sehr kurzen Verweilzeiten dar. Das mit Kohlendioxid angereicherte Niederschlagswasser (Kohlensäure) greift besonders an den Schnittflächen der Gesteine an und

hinterlässt Lösungshohlräume. Über die Zeit entsteht ein mehr oder weniger verzweigtes Netz an Karströhren und Klüften. Durch die herausgelösten Klüfte wird das infiltrierte Wasser stark konzentriert („kanalisiert“) und erreicht hohe Fließgeschwindigkeiten. Daher wird in der Regel das Wasser sehr schnell wieder abgegeben. In Kombination mit flachgründigen und steinigen Böden (z.B. Rendzinen) können solche Regionen sehr rasch und intensiv hochwasserwirksam werden.

- Kluftaquifere weisen weder zusammenhängende Poren Hohlräume noch Karsthöhlen auf. Sie kommen auf Festgesteinen (Tonschiefer, Grauwacke, Sandsteine etc.) vor und sind durch Spalten und Klüfte gekennzeichnet. In Abhängigkeit von Gesteinsart und tektonischer Beanspruchung bilden sich Trennflächengefüge mit unterschiedlichen Öffnungsweiten (Trennfugenvolumen) aus, die Einfluss auf die Tiefensickerungsleistung haben. Kluftgrundwasserleiter sind in der Regel Speicher mit geringer Durchlässigkeit (DIETRICH & SCHÖNINGER 2007), aber hoher Verweildauer für das infiltrierte Wasser. Ein Großteil des Niederschlags, der nicht im Boden gespeichert werden kann, fließt daher zwangsläufig oberflächennah ab.

2.5 Abflussprozesse

Als Abfluss wird nach DIN 4049-1 die Wasserbewegung unter dem Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche bezeichnet. Die Gesamtheit an Vorgängen, die der Niederschlag beim Auftreffen auf die Landoberfläche bis hin zum Abfluss in einem offenen Gerinne nimmt, wird als Abflussprozess bezeichnet. Die einzelnen Phasen, die der Niederschlag bis hin zum Gebietsabfluss durchläuft, lassen sich in *Abflussbildung*, *Abflusskonzentration* und dem *Fließprozess im offenen Gerinne* zusammenfassen (Abb. 6).

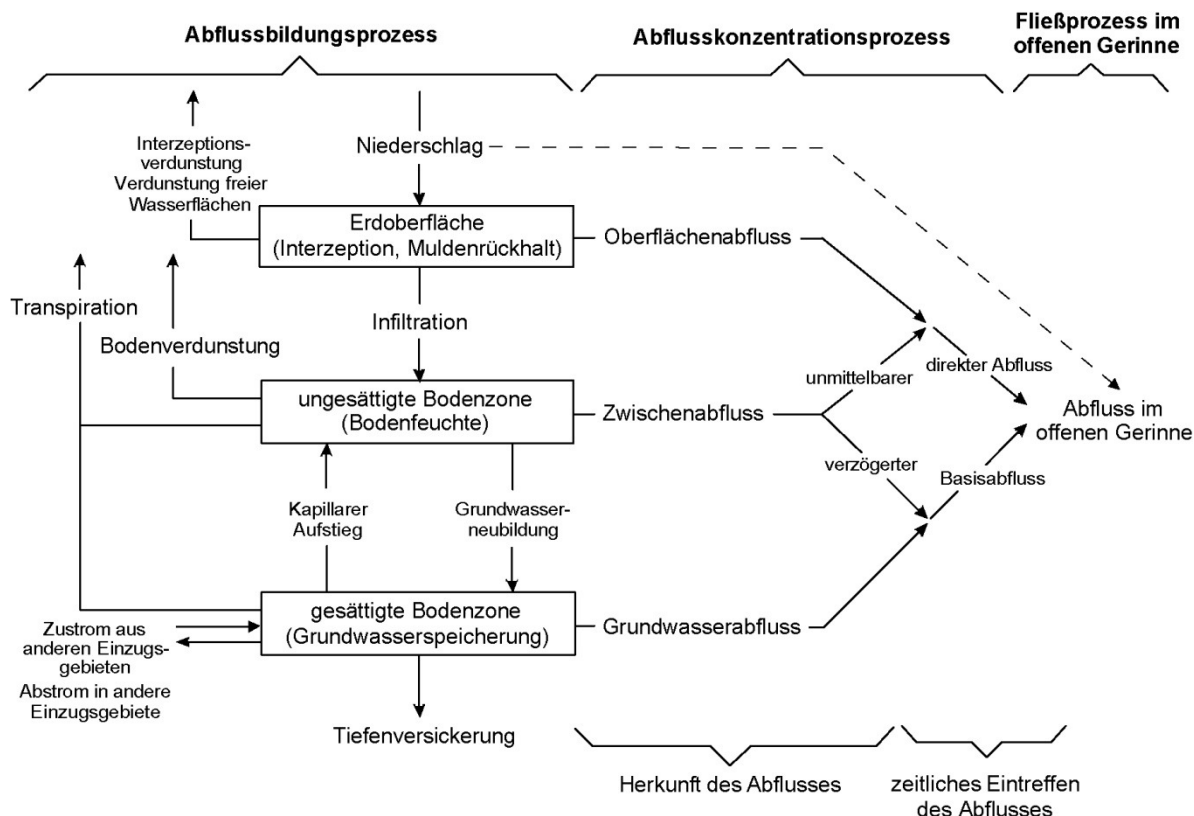


Abbildung 6: Schematische Darstellung der einzelnen Komponenten des Abflussprozesses (aus: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996)

2.5.1 Abflussbildung

Unter Abflussbildung versteht man alle hydrologischen Prozesse, die sich auf oder unter der Landoberfläche abspielen und zur Bildung von abflusswirksamen Niederschlag³ führen (DIETRICH & SCHÖNIGER 2007).

Die Bildung von Abfluss ist abhängig von physio-geografischen und hydroklimatischen Parametern (LANGGUTH & VOIGT 2004). Dazu zählen die Böden und das Ausgangsgestein (Wasserspeicherung, Infiltration, Tiefenversickerung, Muldenspeicher), die Landnutzung (Interzeption etc.), Morphologie des Einzugsgebietes, Verdunstungsprozesse (Boden und Vegetation),

³ Teil des Gebietsniederschlags, der zum Direktabfluss wird

Bodenfrost und Schneeschmelze sowie anthropogene Veränderungen, wie Bodenversiegelung und Verschlämmung. Wasserverluste, die nicht oder nicht unmittelbar abflusswirksam werden, entstehen durch Zwischenspeicherung in den Baumkronen, durch Verdunstungsprozesse und durch die Akkumulation in Form von Schnee.

Wie viel Wasser der Boden zurückhalten kann und welchen Weg überschüssiges Wasser in Richtung Vorfluter nimmt, hängt maßgeblich von der Kombination der Gebietseigenschaften, der Bodenvorfeuchte und den hydrogeologischen Voraussetzungen ab (Abb. 7). Sehr schnelle Abflusskomponenten entstehen zum Beispiel auf stark verdichteten oder vernässten Böden, auf denen die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt oder keine zusätzlichen Wasserspeicherpotenziale zur Verfügung stehen. Der gefallene Niederschlag führt unweigerlich zu einem Wasserüberschuss an der Geländeoberfläche, der bei ausreichendem Gefälle rasch oberflächlich abfließt.

Im Normalfall infiltriert in Waldbeständen das gesamte Niederschlagswasser in den Boden und trägt zur Grundwasserneubildung (durchlässiges Grundgestein) bei oder trifft auf wasserundurchlässige Bodenschichten und fließt im geeigneten Gelände innerhalb des Bodens den Tiefenlinien entgegen. Dieser als Zwischenabfluss bezeichnete Prozess (siehe Kap. 2.5.2) spielt im Mittelgebirgsraum eine bedeutende Rolle (SCHWARZ 1985).

Der Verlustanteil, der durch die vielfältigen Prozesse im Laufe eines Niederschlagsereignisses entsteht, nimmt mit zunehmender Dauer immer weiter ab, während der Anteil des abflusswirksamen Niederschlags zunimmt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). So kann ein optimal angepasster, gut strukturierter und dichter Mischwaldbestand den fallenden Niederschlag auf vielfältige Weise beeinflussen, während eine asphaltierte, glatte Oberfläche keine nennenswerte Speicherleistung besitzt und sofort abflusswirksamer Oberflächenabfluss gebildet werden kann. Durch die stetige Abnahme der Speicherleistung während eines Starkregenereignisses sind allerdings auch die positiven Effekte des Waldes begrenzt.

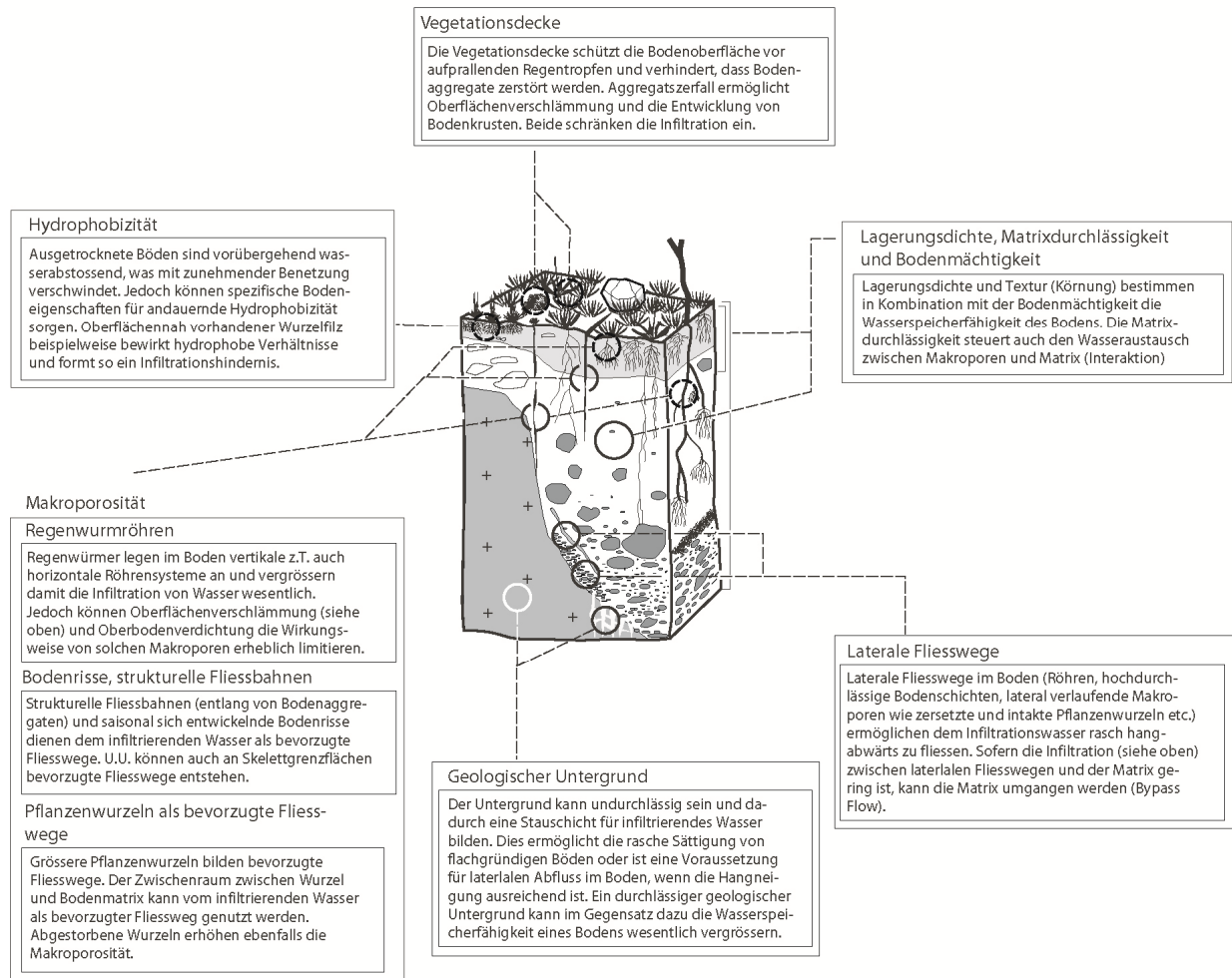


Abbildung 7: Faktoren, welche die Infiltration und Wasserbewegung im Boden beeinflussen (aus: BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE 2003)

2.5.2 Abflusskonzentration

Durch den Prozess der Abflusskonzentration wird der abflusswirksame Niederschlag (siehe „Abflussbildung“) auf der Landoberfläche oder im Boden zum nächstgelegenen Vorfluter geleitet (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). In Abhängigkeit vom Weg, auf dem das Wasser zum Gerinnenetz gelangt, wird zwischen verschiedenen Abflussprozessstypen („runoff processes“) unterschieden (Abb. 8).

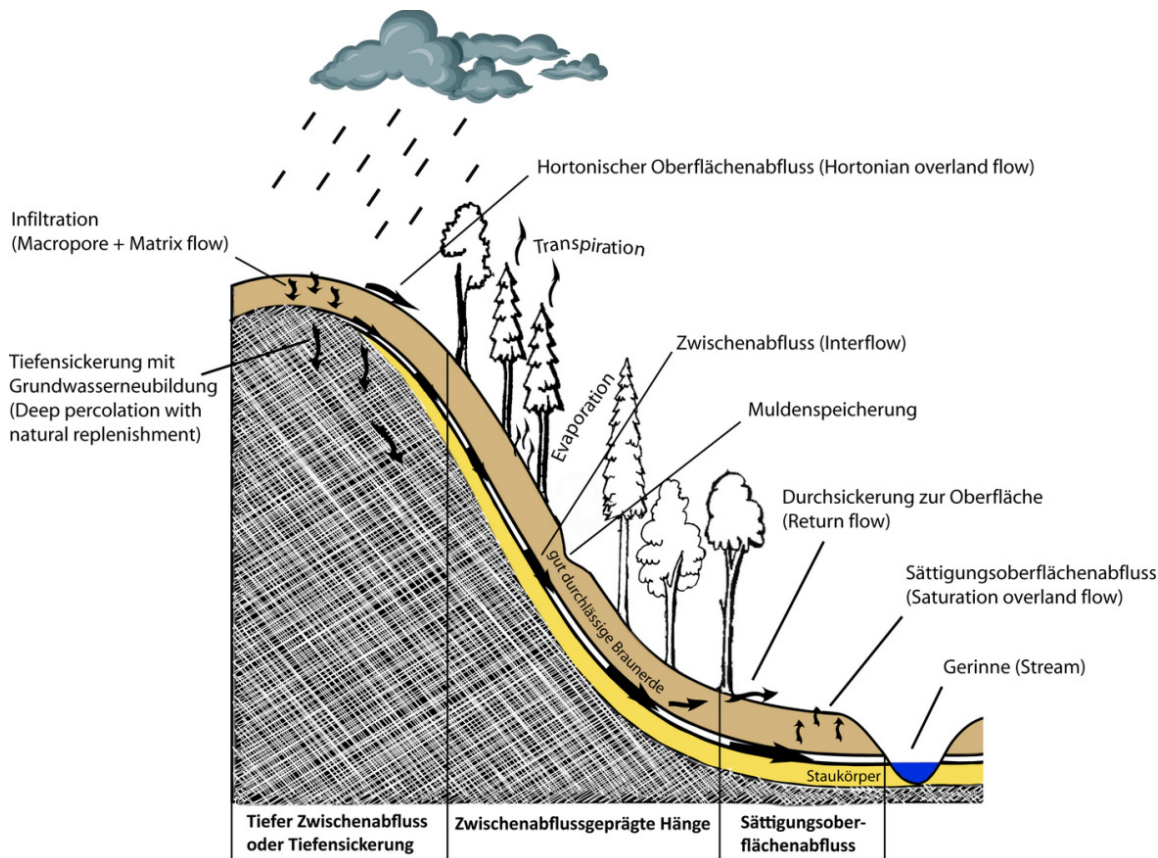


Abbildung 8: Abflussprozesse am Hang (aus: NORDMANN et al. 2009a, verändert)

2.5.2.1 Oberflächenabfluss

Unter Oberflächenabfluss versteht man den Teil des Abflusses, der direkt auf der Landoberfläche abfließt. Man unterscheidet zwischen dem Hortonischen Oberflächenabfluss, dem Sättigungsflächenabfluss und der Durchsickerung zur Oberfläche (return flow).

Hortonischer Oberflächenabfluss („Hortonian overland flow“, HOF):

Hortonischer Oberflächenabfluss entsteht, wenn die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Oberbodens übersteigt (HORTON 1933). Das ist meist auf verdichteten und gefrorenen Böden oder versiegelten Flächen der Fall (UHLENBROOK 1999). Das Niederschlagswasser fließt ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung, dem Gefälle folgend, oberirdisch ab, um entweder nach einer mehr oder minder langen Fließstrecke wieder im Boden zu versickern, in Mulden gespeichert zu werden oder im ungünstigsten Fall, direkt in den Vorfluter zu

entwässern (WOHLRAB et al. 1992). Die Infiltrationskapazität bzw. Durchlässigkeit verschiedener Bodenarten wird durch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Ks-Wert) wiedergegeben. Sie reicht von 1 cm/d (0,4 mm/h) in stark verdichteten, schwach sandigen Tonböden bis auf über 300 cm/d (>125 mm/h) in reinen lockeren Sandböden (AD HOC AG BODEN 2005). Da die Makroporenverteilung in Waldböden meist sehr gut ausgeprägt ist, ist nur unter sehr ungünstigen Verhältnissen, zum Beispiel auf Rückegassen und Waldwegen, mit Oberflächenabfluss zu rechnen (SCHWARZ 1985, BONELL 1993).

Sättigungsflächenabfluss („Saturation Overland Flow“, SOF):

Sättigungsflächenabfluss entsteht auf wassergesättigten Böden. Meist sind die Böden durch dichtere Schichten (Ortsteinbildung, dichter Unterboden, wasserundurchlässiges Grundgestein) nach unten hin abgeriegelt und überschüssiges Wasser kann im Boden nicht lateral abfließen. Niederschläge oder seitlich zufließendes Wasser angrenzender Hänge sättigen den Boden so weit auf, bis kein Niederschlagswasser mehr aufgenommen werden kann (DUNNE & BLACK 1970a). Alles zusätzliche Niederschlagswasser fließt daraufhin oberflächlich ab (KIRKBY & CHORLEY 1967). Die Wasserspeicherkapazität beschränkt sich nur auf den nicht wassergesättigten Bereich des Bodens. Die Wasserspeicherkapazität der betroffenen (Feucht-)Flächen ist meist gering. Oftmals sind sie durch Vernässungsmerkmale im Oberboden gekennzeichnet (Abb. 9). Sättigungsabfluss ist häufig in ausgedehnten Talböden, Bachtälchen und konkaven Hangprofilen zu beobachten (UHLENBROOK 1999). Hier schwankt die Wasserspeicherkapazität meist mit der jahreszeitlichen Dynamik des anstehenden Grund- oder Stauwassers.



Abbildung 9: Verschiedene Ausprägungen von gesättigten Flächen. Links: Durch Hangwasserzug stark vernässtes Bachtälchen; Rechts: Braunaueboden über holozänen Schotter mit jahreszeitlich stark wechselndem Grundwasserstand und der dazugehörigen Bohrstockprobe (unten) mit deutlich erkennbarer Rostfleckung ab 0,15 m unter der Geländeoberfläche (GOF)

Durchsickerung (Return Flow, RF):

Als Return Flow bezeichnet man bereits infiltriertes Niederschlagswasser, das nach einer mehr oder minder langen unterirdischen Fließstrecke (Zwischenabfluss) wieder konzentriert an der Oberfläche austritt und oberflächlich abfließt (DUNNE & BLACK 1970a) (Abb. 25), meist verursacht durch eine Reduktion der Transportkapazität entlang von Bodenhorizonten. Das können bis an die Oberfläche reichende Makroporen, das Ausstreichen gering wasserdurchlässiger Bodenhorizonte/Grundgestein sowie eine Änderung der Hangneigung (auslaufende Hänge) sein (SCHERRER 2006).

2.5.2.2 Zwischenabfluss („Interflow“, „Subsurface flow“, SSF)

Als Zwischenabfluss wird derjenige Teil des effektiven Niederschlags bezeichnet, der dem Vorfluter auf unterirdischem Weg zufließt. Er entsteht auf geschichteten Böden, wenn die vertikale Sickerichtung des infiltrierten Wassers durch einen geringer wasserwegsamem Bodenhorizont (Zwischenabfluss) oder über Festgestein (Tiefer Zwischenabfluss, DSSF) in eine laterale Richtung abgelenkt wird und hangparallel abfließt (ANDERSON & BURT 1990). Auch kann durch lateral eingelagerte plattige Tonschieferverwitterung eine hydraulische Anisotropie⁴ entstehen („Dachziegeleffekt“), die ebenfalls zu hangparallelen Fließrichtungen führt (KLEBER et al. 1998). Nach BONELL (1998) wird ein Großteil des Abflusses in Waldbeständen in Form von Zwischenabfluss gebildet, der langsam und schnell erfolgen kann. Schneller Zwischenabfluss (subsurface stormflow) kann innerhalb von nur wenigen Minuten abflusswirksam werden (MOSLEY 1982). Er entsteht bevorzugt in hochdurchlässigen Substraten mit einem hohen Anteil an Makroporen (Grobporenfließen), die ein schnelles laterales Fließen ermöglichen, wie z.B. periglazialer Solifluktionsschutt (BEVEN & GERMANN 1982, Abb. 10). Durch ständige Auswaschung von Feinmaterial aus diesen ohnehin grobskelettreichen Schichten können sich die Fließgeschwindigkeiten weiter erhöhen. Schnelle Wasserbewegungen können auch durch Schwundrisse, Mauselöcher und Wurzelkanäle entstehen („pipe flow“). Durch den großen Fließquerschnitt, häufig über 10 mm, können auch hier die Fließgeschwindigkeiten hohe Werte erreichen (vgl. MOSLEY 1982, FLÜGEL & SCHWARZ 1983, SCHUME et al. 2003). In laterale Richtung miteinander verbundene Makroporen werden als sogenannte „pipes“ bezeichnet. Zusammen mit dem Oberflächenabfluss bildet der schnelle Zwischenabfluss den sogenannten Direktabfluss, der nur mit geringer Verzögerung den Vorfluter erreicht.

Bei bevorzugt kapillarem Fließen in den Fein- ($d = \leq 0,2 \mu\text{m}$) und Mittelporen ($0,2 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$) der Bodenmatrix entsteht langsamer Zwischenabfluss. Die Wasserdurchlässigkeit wird durch die Bodenart bestimmt. Bei kapillarem Fließen benötigt das Niederschlagswasser länger, um die Verwitterungsschichten des Bodens zu passieren. Je tiefgründiger dabei der Boden ist,

⁴ Bodenprofil, bei dem die horizontale Durchlässigkeit deutlich höher ist als die Vertikale

desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für Zwischenabfluss. Das Niederschlagswasser wird deutlich zeitversetzt zum Regenereignis an das Fließgewässer abgegeben.

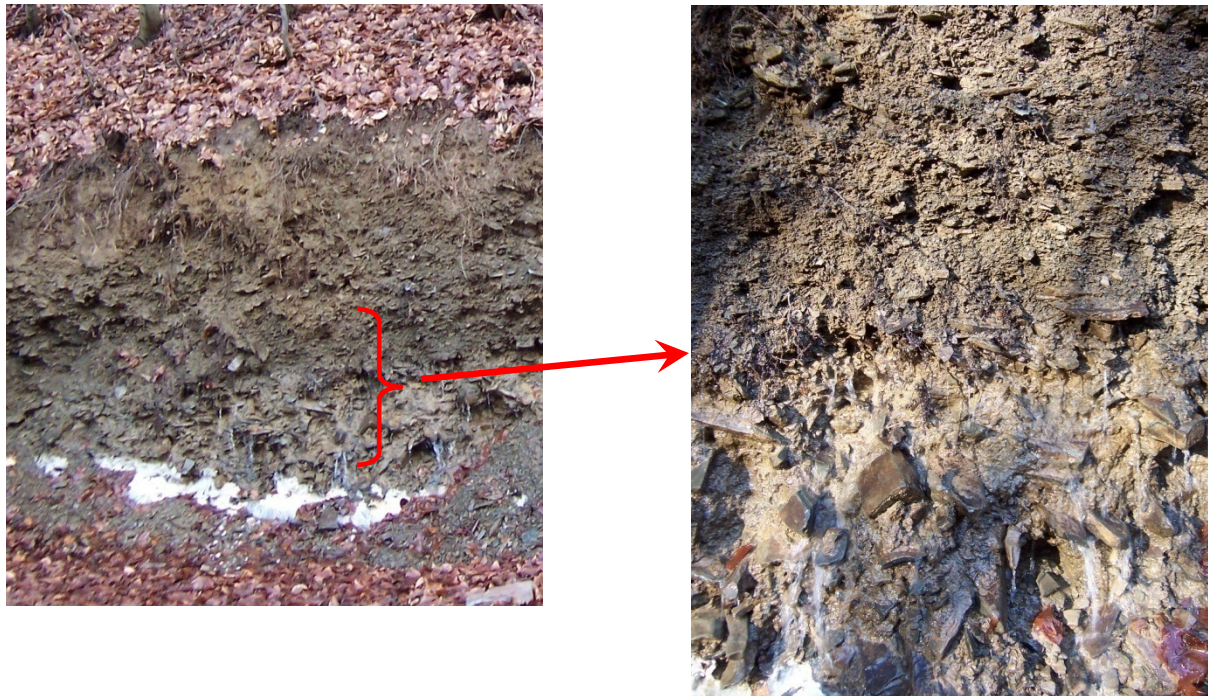


Abbildung 10: Bodenanschnitt eines zwischenabflussgeprägten Hanges im thüringischen Untersuchungsgebiet. Der Wasserleitfähigkeitssprung zwischen dem locker gelagerten Grus und dem dichten Untergrund führt an der Grenzschicht zum lateralen Wasserfluss.

2.5.2.3 Tiefensickerung („Deep Percolation“, DP)

Infiltriert Wasser ins Grundgestein, wird dies als Tiefensickerung bezeichnet. Voraussetzung ist ein gut wasserdurchlässiges Bodensubstrat ohne große Hangneigung und Schichtung (WALDENMEYER 2003) und ein gut wasserdurchlässiger Untergrund (z. B. Kiese, Kalkstein, zerklüftete Gesteine). Das Niederschlagswasser wird für einen bestimmten Zeitraum im Grundwasserleiter zwischengespeichert (siehe Kap. 2.4) und in der Regel deutlich verzögert als Basisabfluss an das Gerinne abgegeben. Durch die lange Verweildauer im Aquifer und die gleichmäßige Abgabe an das Gerinne (Grundwasserabfluss) wirkt der Basisabfluss Hochwasser mindernd und bestimmt im Wesentlichen in niederschlagsarmen Zeiten die Wasserführung des Gewässers.

Eine Ausnahme bildet das sogenannte groundwater ridging oder der piston flow Effekt. Hierbei handelt es sich um eine Druckfortsetzung im Aquifer in Richtung Gerinnebett, was bei einem Regenereignis zu einem schnellen Auspressen von altem Wasser in der Talsohle führt (SKLASH & FARVOLDEN 1979). Voraussetzung ist eine durchgängige hydraulische Verbindung.

2.5.3 Fließvorgang im offenen Gerinne

Der Gewässerabfluss setzt sich aus dem Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss zusammen, sammelt sich im Bachbett an und folgt dem größten Gefälle ins Tal. Der Fließvorgang wird durch topografische und anthropogen geschaffene Verhältnisse (Flussbegradigungen, Eindeichungen, Stauwerke) beeinflusst (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Der Hochwasserwellenablauf und das Abflussregime eines Wassereinzugsgebietes werden durch die in Kapitel 2.2 dargestellten Faktoren geprägt. Die Fließgeschwindigkeit im Gerinne ist abhängig vom Gefälle, der Reibung und der Wasserführung.

Darüber hinaus steht das Wasser mit den Böden im Uferbereich in einer engen Wechselbeziehung. Einerseits kann Wasser dem Gerinne zugeführt werden, andererseits ist auch eine Wasserabgabe vom Gerinne in die Böden des unmittelbar angrenzenden Uferbereichs denkbar. Die gespeicherte Wassermenge wird bei fallenden Pegelständen allmählich ans Gerinne abgegeben und führt zu einer flacheren und zeitlich gestreckten Abflussganglinie. Ein intakter Uferbereich ist daher für die Hochwasservorsorge nicht zu unterschätzen.

2.5.4 Hochwasserbeitrag der einzelnen Abflussbildungsprozesse


Die Information des dominierenden Abflussbildungstyps (z. B. Zwischenabfluss, SSF) eines bestimmten Geländebereichs gibt den Weg an, wie sich das Wasser zum Vorfluter bewegt. Eine detaillierte Aussage, wie schnell das Wasser zum Abfluss gelangt, ist damit jedoch noch nicht möglich. Daher werden jedem Abflussbildungsprozess verschiedene Intensitätsstufen vergeben, die eine Wertung über die Reaktionsfähigkeit beinhaltet (vgl. SCHERRER 1997, SCHÜLER 2005a). Die Spannweite reicht von rasch zum Hochwasser beitragenden Abflussreaktionen (Intensität **1**), über verzögerte Reaktionen (Intensität **2**) bis hin zur stark verzögerten Abflussbildung (Intensität **3**). Die Intensitätsabstufung gilt nur innerhalb einer Prozessgruppe. Vergleiche zwischen den Gruppen sind nicht möglich (Scherrer 2006). So haben Standorte mit raschem Sättigungsflächenabfluss (SOF **1**) einen geringeren Wasserrückhalt als Standorte mit raschem Zwischenabfluss (SSF **1**), da im Falle von dominierendem Zwischenabfluss erst verschiedene Verwitterungsschichten passiert werden müssen, um abflusswirksam zu werden, während auf permanent gesättigten Flächen in der Bachau sehr rasch abflusswirksamer Niederschlag entsteht (vgl. Abb. 9, links).

Tabelle 2 zeigt die Einteilung der Abflussprozesse und deren Beitrag zum Abflussgeschehen nach den Überlegungen von SCHÜLER (2005a). Die Tabelle wurde an die Verhältnisse des Frankenwaldes angepasst und ergänzt. Zusätzlich fand der Abflussprozess SSF 1 (rascher Zwischenabfluss) und SSF 2⁺ (leicht verzögerter Abfluss in Rinnen und Mulden) Aufnahme in die Bewertung. Weiterhin wurde der Tiefe Zwischenabfluss (DSSF) mit drei unterschiedlichen Intensitäten belegt. Neben dem „normalen“ Tiefen Zwischenabfluss über geologisch dichtem Ausgangsmaterial kann auch auf stark geneigten Hängen in wasserzuflussbegünstigten Lagen

sehr schnell einsetzender Tiefer Zwischenabfluss (DSSF⁺) entstehen, der überproportional stark zur Hochwasserentstehung beitragen kann. Auf Plateaulagen und gering geneigten Hängen wird angenommen, dass ein höherer Teil des Niederschlagswassers ins Grundgestein infiltriert, für längere Zeit zurückgehalten wird und nicht unmittelbar zum Abflussgeschehen beiträgt. Es entsteht somit eine Mischung aus Tiefensickerung und Tiefem Zwischenabfluss (DP/DSSF). Weiterhin erfolgte auf Grundlage von Berechnungsversuchen und Literaturlauswertungen eine Einschätzung des Einflusses der Bestockung auf den Wasserrückhalt in Bezug auf die einzelnen Abflussprozesse (Tab. 2).

Tabelle 2: Aufteilung der Abflussprozesse hinsichtlich des Hochwasserbeitrages (Tabellenaufbau in Anlehnung an SCHÜLER 2005a)

Abflussprozess	Beitrag zum Abflussgeschehen	Zu erwartender Einfluss der Bestockung auf den Abflussprozess
HOF: sofortiger Oberflächenabfluss	Abflusstyp 1: stark beitragend	HOF spielt innerhalb von Waldbeständen des Frankenwaldes keine Rolle - Einfluss daher gering
SOF 1: rascher Sättigungsoberflächenabfluss		gering
SSF 1: rascher Zwischenabfluss	Abflusstyp 2: leicht verzögert beitragend	gering
SOF 2: verzögerter Sättigungsoberflächenabfluss		hoch
SSF 2⁺: leicht verzögert beitragender Zwischenabfluss in Rinnen und Mulden		mittel
DSSF⁺: Tiefer Zwischenabfluss an steilen Hängen in wasserzuflussbegünstigten Lagen		sehr gering
SSF 2: verzögerter Zwischenabfluss	Abflusstyp 3: verzögert beitragend	hoch
SOF 3: stark verzögerter Sättigungsoberflächenabfluss		mittel
DSSF: Tiefer Zwischenabfluss der Steilhänge (HN > 26°)		sehr gering
SSF 3: stark verzögerter Zwischenabfluss	Abflusstyp 4: stark verzögert beitragend	gering-mittel
DP: Tiefensickerung DSSF/DP: Tiefer Zwischenabfluss und Tiefensickerung	Abflusstyp 5: sehr stark verzögert beitragend	gering

 Die Gesamtheit an Vorgängen, die der Niederschlag beim Auftreffen auf die Landoberfläche bis hin zum Abfluss in einem offenen Gerinne nimmt, wird als **Abflussprozess** bezeichnet. Dabei wird zwischen der **Abflussbildung**, der **Abflusskonzentration** und dem **Fließprozess** im offenen Gerinne unterschieden. Der Vorgang der **Abflussbildung** beschreibt alle ober- und unterirdischen Prozesse, die zur Bildung von abflusswirksamen Niederschlag führen. Über die **Abflusskonzentration** wird der abflusswirksame Niederschlag auf dem Boden (**Oberflächen-/Sättigungsoberflächenabfluss**) oder innerhalb des Bodens (**Zwischenabfluss, Grundwasserabfluss**) zum nächsten Gerinne geleitet. Von dort aus gelangt das Wasser im offenen Gerinne ins Tal.

Die Unterteilung der Abflussbildungsprozesse in Oberflächenabfluss, Sättigungsflächenabfluss, Zwischenabfluss und Tiefensickerung gibt an, auf welchem Weg der abflusswirksame Niederschlag in Richtung Tiefenlinie fließt. Angaben, mit welcher Intensität der jeweilige Abflussprozess zur Hochwasserwelle beiträgt, werden über Intensitätsstufen von 1 (sofort beitragend) bis 3 (stark verzögert beitragend) ausgedrückt.

2.6 Periglaziale Fließerden – Entstehung und Aufbau

Die im Mittelgebirgsraum vorkommenden Böden entstanden nicht wie ursprünglich gedacht aus dem unmittelbar anstehenden Festgestein, sondern sind das Ergebnis aus periglazialen Verwitterungs- und Verlagerungsvorgängen sowie der Einmischung äolischen Materials während der letzten Eiszeiten (SEMMELE 2005). SCHOLTEN (2003) beschreibt die periglazialen Lagen als „geologisch eigenständige, ... lithostratigraphisch differenzierbare Einheiten der Verwitterungsdecke, die sich im Periglazialraum durch solifluidale Prozesse aus ... dem aufgelockerten Anstehenden und äolisch eingetragenen Material gebildet haben“. Der Begriff Solifluktion (Bodenfließen) umschreibt dabei die langsame, hangabwärtsgerichtete Bewegung des wassergesättigten Bodenmaterials des oberflächennahen Auftaubereiches (ANDERSSON 1906, BÜDEL 1977). Durch das Wechselspiel von Auftau- und Gefrierprozessen während der Eiszeiten entstand ein typischer Deckschichtenaufbau, der in verschiedenen Ausprägungen nahezu flächendeckend die deutschen Mittelgebirge überzieht und das Ausgangsmaterial für die holozäne Bodenentwicklung darstellt (VÖLKELE et al. 2002, SAUER 2002, SEMMELE 2005, CHIFFLARD et al. 2008). Die lithologische Einteilung periglazialer Lagen erfolgt laut AD HOC AG BODEN (2005) in Oberlage – Hauptlage – Mittellage – Basislage.

Die Basislage, als unterstes Glied der lithologischen Differenzierung, geht aus dem Liegenden oder dem unmittelbar hangaufwärts vorkommenden Gestein hervor und enthält in der Regel keine äolischen Komponenten (Löss). Einige Gesteine, wie Tonschiefer oder Phyllit, verwittern sehr schluffreich, sodass auch die Basislagen einen höheren Anteil an Schluff enthalten können, der nicht äolischer Herkunft ist (KLEBER 1991). Bodenart und Farbe richten sich nach dem Ausgangsmaterial. Durch hangparallele Fließbewegungen ist das Skelettmaterial hangparallel eingeregelt. Die Basislage weist gegenüber der Hauptlage meist höhere Lagerungsdichten auf, kann aber auch aus lockerem Verwitterungsschutt (grober Frostschutt) der anstehenden Gesteine bestehen. Durch Dichtschlammung können selbst sandige Basislagen wasserstauend wirken. Die Mächtigkeit richtet sich nach der Menge des solifluidal akkumulierten Materials (ALTERMANN et al. 2008). Generell erreicht die Basislage meist Mächtigkeiten zwischen 20 - 100 cm (AK BODENSYSTEMATIK 1998). In Muldenbereichen und ausstreichenden Hängen können Basislagen aus mehreren übereinander geflossenen Schichten bestehen und mehrere

Meter mächtig werden (STAHR 1979). Die sich darauf entwickelnden Böden zeigen häufig Vernässungserscheinungen. Als Bodentypen können pseudovergleyte Braunerden bis hin zu (Hang-)Pseudogleyen alle Übergänge vorkommen (SCHILLING & SPIES 1991).

Durch die Substrateigenschaften bestimmt die Obergrenze der Basislage häufig die Gründigkeit des Standortes und hat damit direkten Einfluss auf die nutzbare Wasserspeicherkapazität der Böden. Basislagen sind weit verbreitet und treten nur an ausgesprochenen Steilhängen (Frostschutthänge) und exponierten (konvexen) Lagen in ihrer Verbreitung zurück (SCHILLING & SPIES 1991, TILCH et al. 2002).

Die Hauptlage ist, außer auf holozänen Erosions- und Akkumulationsstandorten, fast überall zu finden (AD HOC AG BODEN 2005). Die Mächtigkeit ist sehr konstant und bewegt sich häufig zwischen 40 - 60 cm (ALTERMANN 1993). Sie bildet vielerorts die oberflächenbildende Lage und bestimmt mit ihrer Mächtigkeit und Textur die Standortseigenschaften des Hauptwurzelhorizontes. Sie weist neben dem geologischen Ausgangsmaterial auch einen deutlichen Anteil an eingewehtem Löss auf. Sie ist meist locker gelagert, besitzt einen hohen Grobporenanteil und kann in Abhängigkeit vom Relief unterschiedlich hohe Skelettgehalte aufweisen (SCHILLING & SPIES 1991). An der Basis sind oftmals Steinanreicherungen zu finden (SCHOLTEN 2003).

Zwischen Haupt- und Basislage kann in erosionsgeschützten Positionen auch eine Mittellage vorkommen. Diese enthält fast immer äolisches Material und ist häufig als verdichtete, wasserstauende Fließerde ausgebildet (SCHILLING & SPIES 1991).

In den Hochlagen der Mittelgebirge (>700 - 800 m ü. NN) kann über der Hauptlage auch eine Oberlage ausgebildet sein. Diese besteht aus feinerdearmem Gesteinsschutt und ist oft im Umfeld von Felsdurchragungen und steilen Hangflanken anzutreffen (SCHILLING & SPIES 1991). Unter den periglaziär geprägten Schichten befindet sich das von den Umlagerungsprozessen unbeeinflusste Ausgangsgestein. Die Gesteinskomponenten liegen im natürlichen Gesteinsverband vor. Die Zone ist im oberen Bereich häufig physikalisch aufgelockert und verwittert (Zersatz- und Zerfallszone) und geht im weiteren Verlauf ins massive Festgestein über.

Obwohl bereits Ende des 19. Jahrhunderts auf das Vorhandensein von periglazialen Lagen durch geosolifluidale Prozesse verwiesen wurde (BLANCKENHORN 1895), wurde erst zu Beginn der 60er Jahre durch die Arbeiten von SCHILLING & WIEFEL (1962) sowie SEMMEL (1964) das flächendeckende Vorhandensein und die Schichtgliederung periglazialer Solifluktionlagen in den Mittelgebirgen zunehmend anerkannt (SAUER 2002). Trotzdem dauerte es noch lange, bis sich die Erkenntnisse in der Bodenkunde durchsetzten. Ein Beleg dafür ist die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA4), die erst 1994 ein Kapitel über die Beschreibung periglazialer Lagen in ihr Werk aufnahm. Da viele bodenkundliche Kartenwerke vor dieser Zeit entstanden, fehlen häufig Informationen zum periglazialen Schichtaufbau. Aufgrund der Teilung Deutschlands entwickelten sich zudem unterschiedliche Konzepte zur Gliederung und Kennzeichnung peri-

glazialer Lagen, die eine einheitliche und allgemein anerkannte Kennzeichnung und Benennung bis heute schwierig macht. Einen aktuellen Vorschlag, wie sich die Periglazialphänomene der Pedosphäre allgemeingültig beschreiben lassen, geben das Autorenkollektiv ALTERMANN et al. (2008).



Die Böden im Mittelgebirgsraum sind oftmals das Produkt pleistozäner Umlagerungsprozesse. Diese auch als Solifluktionböden bezeichneten jungen Böden weisen in Abhängigkeit vom Relief bestimmte Lagenbildungen über dem geologischen Ausgangsmaterial auf. Sie lassen sich unterteilen in Ober-, Haupt-, Mittel- und Basislage. Während die Ober- und Hauptlage meist locker gelagert sind, können in Hangdellen, Talanfangsmulden, an Unterhängen und auf flach geneigten Hochflächen stark verdichtete Basis- und Mittellagen auftreten, die eine Barriere für die vertikale Wasserführung darstellen.

2.7 Hanghydrologie – Theorie der abflusswirksamen Flächen

HORTON (1933) stellte Anfang der 30iger Jahre des 20. Jahrhunderts als erster seine Theorie zur Abflussbildung und Hochwasserentstehung vor. Demnach setzt sich der abflusswirksame Teil des Niederschlags aus der Differenz der Niederschlagsintensität und der Infiltrationsrate des Bodens zusammen. Nach seinen Überlegungen entsteht die Hochwasserwelle allein durch Oberflächenabfluss („Hortonischer Oberflächenabfluss“). Nachdem sich diese Theorie über drei Jahrzehnte lang hielt, wurde sie in den 60iger Jahren immer mehr in Frage gestellt.

In dieser Zeit beschäftigte man sich intensiv mit Wasserabflüssen an Hängen („*hillslope hydrology*“) und deren Beitrag zur Hochwasserentstehung (vgl. HEWLETT 1961, HEWLETT & HIBBERT 1967, KIRKBY & CHORLEY 1967, DUNNE & BLACK 1970a, 1970b). Man erkannte schon damals, dass Waldböden eine hohe Wasserleitfähigkeit aufwiesen und nur selten Oberflächenabfluss auftrat. Dennoch konnten immer wieder Überschwemmungen als Reaktion auf Starkregenereignisse beobachtet werden, was sich mit der Theorie von Horton nicht erklären ließ. HEWLETT (1961) und HEWLETT & HIBBERT (1967) präsentierten in den 60iger Jahren ihr Konzept der Abflussbildung. Sie vermuteten, dass das Auftreten von rasch abflusswirksamen Feuchtflächen an Unterhängen, Talgründen und Mulden nicht nur mit hoch anstehendem Grundwasser, sondern in hohem Maße mit dem Zufluss von Wasser aus der ungesättigten Bodenzone („*translatory flow*“) in Verbindung stehen muss. KIRKBY & CHORLEY (1967) beschrieben das gleiche Phänomen als „*throughflow*“. Gemeint waren damit hangparallele Wasserflüsse inner-

halb des Bodens, die das Potenzial besitzen, Hochwasserspitzen auslösen zu können (KIRKBY & CHORLEY 1967). PILGRIM et al. (1978) fassten daher den Oberflächenabfluss und den schnellen Zwischenabfluss als die wichtigsten hochwasser-auslösenden Abflussprozesse zusammen. Auch wurde diskutiert, ob sich die hochwasserbeitragenden Sättigungsflächen in Abhängigkeit zur Witterung verändern. Mit dem Begriff des „*variable source area concept*“ beschrieben HEWLETT (1961), HEWLETT & HIBBERT (1967) sowie DUNNE & BLACK (1970a, 1970b) die horizontale Ausdehnung von hochwasserwirksamen Sättigungsflächen in Abhängigkeit zum Niederschlagsereignis (Abb. 11). Das heißt, die abflussbeitragenden Flächen sind jahreszeitlichen und witterungsspezifischen Dynamiken unterworfen.

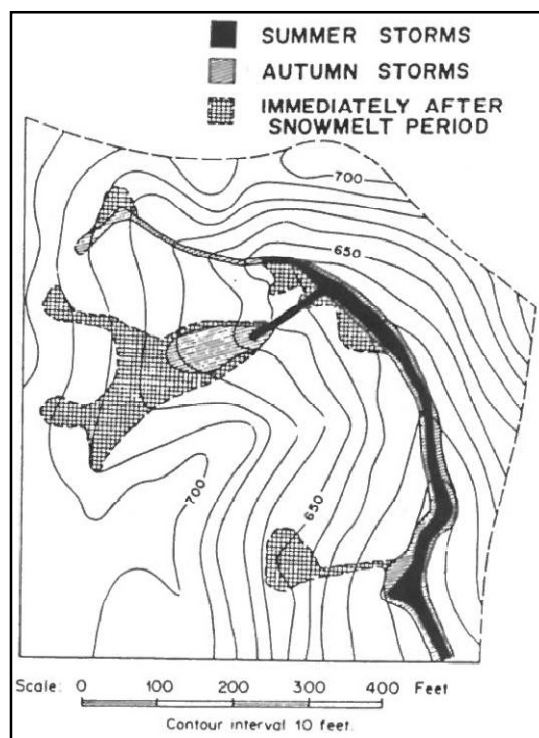


Abbildung 11: Saisonale Variabilität der abflussbeitragenden Flächen nach DUNNE (1978)

Während sich im Sommer die Abflussbildung bis in die Tiefenlinie zurückzieht, kann sie im Frühjahr zur Schneeschmelze große Flächen einnehmen, die entscheidend zum Hochwasserabfluss beitragen können (DUNNE & BLACK 1970a, 1970b). Das Konzept der variablen Flächen teilt das Wassereinzugsgebiet somit in abflusswirksame und nicht abflusswirksame Gebiete auf. Die direkt zur Hochwasserwelle beitragenden, abflusswirksamen Flächen sind dabei häufig nur auf einen kleinen Teil des Wassereinzugsgebietes beschränkt (Abb. 11).

Da die Gebiete mit dominierendem Sättigungsoberflächenabfluss häufig von hangaufwärts vorkommendem Zwischenabfluss gespeist werden (BECKER et al. 1999), ist davon auszugehen, dass sich die zwischenabflussbeeinflusste Flächengröße nach längeren Niederschlagsereignissen ebenfalls deutlich erhöht.

Nachdem Hortonischer Oberflächenabfluss bei pfleglicher Waldbewirtschaftung innerhalb des Mittelgebirgsraumes ausgeschlossen werden kann (KARL 1983, LEHNARDT 1985, SCHWARZ 1985), müssen die Prozesse des Zwischenabflusses und des Sättigungsoberflächenabflusses, die an Hängen direkt miteinander in Verbindung stehen (Abb. 8), entscheidend zum Hochwassergeschehen beitragen. Einen Überblick, wie sich abflusswirksame Flächen im Frankenwald zusammensetzen können, geben KLEBER & SCHELLENBERGER (1998). Ihre Karte (Abb. 12) zeigt diejenigen Bereiche, die durch Hydromorphiemerkmale geprägt und somit durch Zwischenabfluss gekennzeichnet sind.

Periglaziale Deckschichten spielen dabei eine weitere wichtige Rolle. So kommt SCHWARZ (1985) zu dem Schluss, dass in Waldgebieten des Mittelgebirgsraumes vornehmlich der laterale Wasserfluss über dichteren Bodenschichten (Zwischenabfluss) zur Hochwasserentstehung beitragen muss und *„in Sonderfällen durchaus beachtliche Hochwasserabflüsse erreichen kann“* (vgl. auch HARR 1977, BONELL 1998, SCHÜLER et al. 2002, CHIFFLARD et al. 2008, u.a.). WILPERT & ZIRLEWAGEN (2005) resümieren, dass in bewaldeten Einzugsgebieten der Mittelgebirge, wo *„Lockerböden und periglaziale Hangschuttdecken über dichtem Unterböden und/oder Felsuntergrund vorkommen“*, ein Hochwasserrisiko durch Zwischenabfluss besteht.

Ausschlaggebend für die schnellen Abflussprozesse im Frankenwald ist, laut VÖLKELE et al. (2002), die Kombination aus locker gelagerten, grusigen und grobporenen Oberböden und der im Unterboden ansetzenden Verdichtung, die in Form von periglazialen Basislagen oder einer verlehmteten Zersatz- und Zerfallszone des geologischen Ausgangsmaterials ausgebildet sein kann. Die starken Gegensätze führen im Untergrund zu einer sprunghaften Verminderung der Wasserleitfähigkeit. Dadurch wird die vertikale Wasserbewegung in eine laterale Richtung ablenkt.

Durch die lateral eingeregelteten Tonschieferscherben kann das Wasser fast ungehindert hangabwärts fließen. KLEBER et al. (1998) bezeichnen diesen Effekt als hydraulische Anisotropie. Daneben kann sich ein zweites Interflowstockwerk innerhalb der Basislage ausbilden, wenn

Wasser durch Störungen im Sedimentgefüge oder durch abgestorbene Wurzelbahnen in die Basislage infiltriert und innerhalb bevorzugter Fließwege dem Gerinne entgegen fließt (KLEBER et al. 1998, VÖLKELE et al. 2002). Laut CHIFFLARD et al. (2008) fungiert die Basislage vor allem als Stauer für die vertikale Wasserbewegung. Durch den zunehmenden Wasserstau nach einem Starkregenereignis und einer ereignisabhängigen hohen Bodenfeuchte kann auch Wasser in die Basislage übertreten und zu einem gesättigten Wasserfluss innerhalb der Basislage führen. Ob die Basislage als Wasserstauer und gleichzeitig als Transportweg dient, hängt nach den Untersuchungen von CHIFFLARD et al. (2008) hauptsächlich von der Vorfeuchte der einzelnen Deckschichten ab.

Neben den bodenphysikalischen und witterungsspezifischen Komponenten muss im Mittelgebirgsraum auch dem Relief eine entscheidende Bedeutung im Abflussgeschehen beigemessen werden (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996). Da das Infiltrationswasser häufig nicht in den Grundwasserleiter übertreten kann, folgt es dem größten hydraulischen Gradienten und fließt oberflächenparallel ins nächste Gerinne ab. Bereiche mit hohen Abflusskonzentrationen sind daher häufig in wasserzuflussbegünstigten Hangformen, wie Mulden und Dellen zu finden (KLEBER & SCHELLENBERGER 1998).

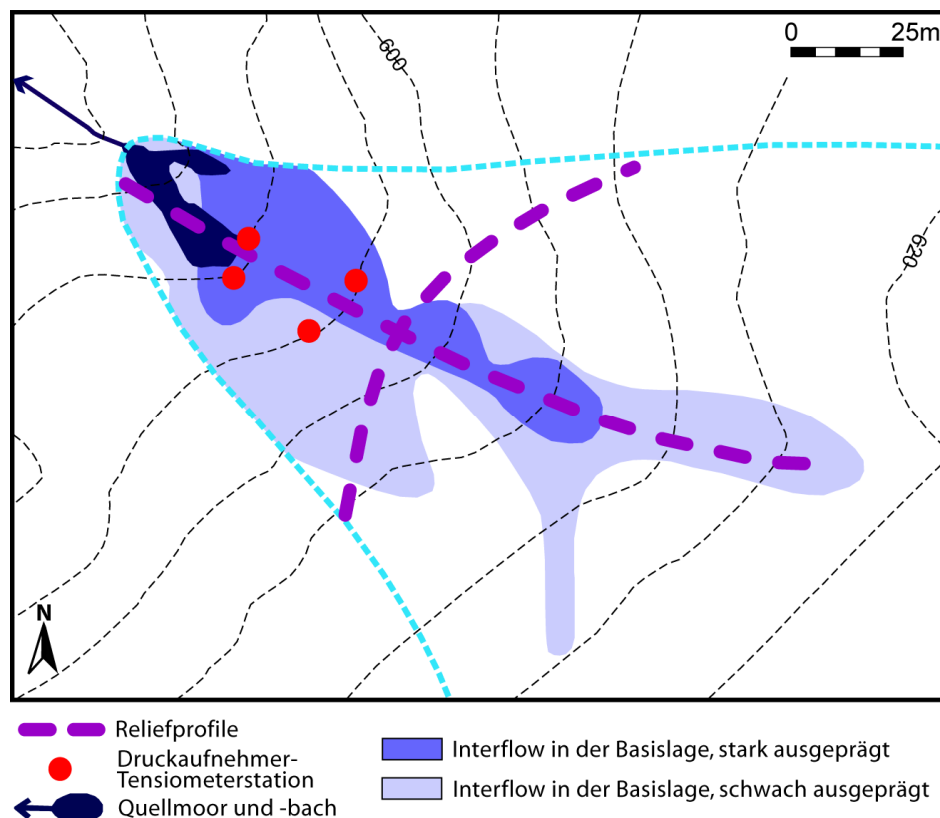


Abbildung 12: Intensität und Ausdehnung des Zwischenabflusses anhand der Ausprägung von Hydromorphiemarken innerhalb eines kleinen Quelleinzugsgebietes im Frankenwald. Gestrichelte Linien stellen Isohypsen und Wasserscheiden des Einzugsgebietes dar. (Vereinfacht nach Kleber & Schellenberger 1998; aus: Homepage des Lehrstuhls für Geographie, TUM Dresden/Forschung)



Die locker gelagerten, periglazialen Hangschuttdecken im Frankenwald befinden sich häufig über dicht gelagerten Bodenschichten und/oder über wasserundurchlässigem Grundgestein mit einer deutlich geringeren Wasserleitfähigkeit. Übersteigt das Niederschlagsvolumen die Wasseraufnahmekapazität der Böden, führt dies zu einem Wasserstau im Untergrund und letztendlich im geneigten Gelände zu oberflächennahen, lateralen Fließbewegungen, die beachtliche Hochwasserabflüsse auslösen können.



Der Begriff des „*variable source area concept*“ beschreibt die horizontale Ausdehnung abflussbeitragender Flächen in Abhängigkeit zum Niederschlagsereignis und ist heutzutage ein anerkanntes Konzept zur Hochwasserentstehung.



Neben den bodenphysikalischen und witterungsspezifischen Komponenten spielt im Mittelgebirgsraum auch das Relief eine entscheidende Bedeutung in der Entstehung abflusssensitiver Waldflächen.

2.8 Klassifikationsverfahren zur Ausweisung hydrologischer Homogenitätsbereiche

Das Abflussregime eines Wassereinzugsgebietes setzt sich in der Regel aus verschiedenen Abflussprozessstypen zusammen, die unterschiedlich stark zur Hochwasserwelle beitragen. Je nachdem, wie stark die Gebietseigenschaften variieren, entsteht eine mehr oder weniger hohe Prozessvielfalt innerhalb des Wassereinzugsgebietes. Aus der Sicht des vorbeugenden Hochwasserschutzes bedürfen die verschiedenen Abflussprozesse unterschiedliche Herangehensweisen. Daher ist es sinnvoll, Bereiche mit gleichem dominierenden Abflussprozess zu sogenannten hydrologischen Homogenitätsbereichen (Hydrotopen) zusammenzufassen und in Form einer Abflussprozesskarte flächenscharf darzustellen. Hydrologische Klassifikationen auf Grundlage bodenkundlicher Informationsquellen gibt es bereits. Sie verfolgen unterschiedliche Ansätze, von denen einige kurz vorgestellt werden.

PESCHKE et al. (1999) entwickelten für den Mittelgebirgsbereich ein wissensbasiertes Regionalisierungsmodell (FLAB), das auf Grundlage von breitenverfügbaren Flächeninformationen (topografischen Karten, Bodenkarten etc.) Bereiche mit gleicher Abflussbildungsdominanz identifiziert. Dies geschieht durch die Überlagerung von Eingangsgrößen, wie Hangneigungsklassen, Bodenarten, Landnutzung und Gewässernetz, um daraus auf den „*potenziell dominanten Abflussprozess*“ zu schließen. Das entstehende Flächenmosaik aus vielen verschiedenen Elementarflächen⁵ wird in einem zweiten Bearbeitungsschritt mit bestimmten Ereignisbedingungen (Niederschlagsereignisse und trockener/feuchter Gebietszustand) verschnitten. Über eine Auswertung wird in einem weiteren Schritt der „*real dominante Abflussbildungsprozess*“ ermittelt und zu hydrologischen Raumeinheiten aggregiert. PESCHKE et al. (1999) unterscheiden dabei nicht zwischen verschiedenen Abflussintensitäten innerhalb eines Abflussbildungsprozess.

LÖHMANNSRÖBEN (2001) beruft sich bei der Ausweisung des Abflusspotenzials allein auf den Bodentyp als Träger einer hydrologischen Kompaktinformation. Durch charakteristische und definierte Horizontabfolgen und -eigenschaften stellt der Bodentyp einen komplexen Parameter dar, dem sich bestimmte Abflussverhalten sehr gut zuordnen lassen (LÖHMANNSRÖBEN 1999). Fließen die Faktoren Bodenart, Mächtigkeit, Speicherkapazität und Stauhazonte mit ein, lassen sich daraus Informationen hinsichtlich des Abflusspotenzials gewinnen (vgl. auch BUNZA et al. 1996). Gegenteiliger Meinung sind SCHERRER und NAEF (2003), die in ihrer Arbeit urteilen, dass auf alleiniger Grundlage des Bodentyps es nicht möglich sei, die Abflussprozesse korrekt zu beschreiben.

⁵ Flächen mit gleichen Eigenschaftskombinationen

Für die Ausweisung von Gefahrenkarten im alpinen Raum nutzen MARKART et al. (2004) die Indikatorfunktion bestimmter Vegetationseinheiten und verknüpfen diese mit den hydrologischen Eigenschaften verschiedener Bodentypen. Weiterhin fließen in die Feldmethode Informationen zur Art und Intensität der Nutzung mit ein. Aus den sich ergebenden Kombinationen leitet sich eine Abflussbeiwertklasse ab, die die Bereitschaft zum Oberflächenabfluss charakterisiert. Die flächige Darstellung der einzelnen Klassen innerhalb eines Wassereinzugsgebietes erfolgt in Form von Abflussbeiwertkarten (Abb. 13).

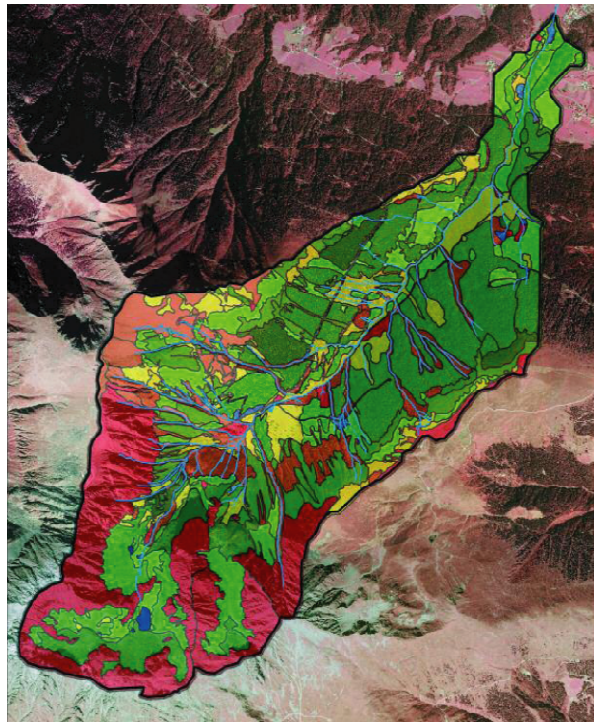


Abbildung 13: Beispiel einer Abflussbeiwertkarte nach dem Ampelprinzip (Rot: hohe Disposition zum Oberflächenabfluss, Grün: geringe Bereitschaft zum Oberflächenabfluss (aus: KOHL & STEPANEK (2005))

SCHERRER (2006) greift neben bodenkundlichen Grundlageninformationen (Bodenmächtigkeit, Matrixdurchlässigkeit) auf umfangreiche Bodenuntersuchungen vor Ort zurück, um räumlich hoch differenzierte Aussagen zu erhalten, die eine Wertung der Standorte hinsichtlich ihrer Abflussreaktion erlauben. Der zusätzliche Arbeitsumfang verspricht zwar detaillierte Ergebnisse, rechtfertigt sich aber nur für kleine Gebiete mit konkreter Hochwassergefahr, so SCHERRER (2006).

Einen anderen Weg geht SCHÜLER (2005b), der sich bewusst nur auf bereits vorhandenes bodenkundliches Wissen der forstlichen Standortkartierung und auf einfache Ableitungen aus der Geomorphologie (z.B. Gewässerumgebung) beschränkt (Abb. 14). Dieser Ansatz eignet sich für Klassifikationen mesoskaliger Gebiete und stellt im Grunde den einzigen praxisnahen Bestimmungsschlüssel für hochwassersensitive Standorte dar. Allerdings ist das Ergebnis der Klassifikation stark von der Qualität der Kartierungen abhängig. In standörtlich sehr einheitlich kartierten Gebieten besteht die Gefahr, dass die ausgeschiedenen hydrologischen Homogenitätsbereiche sehr großflächig sind und die unterschiedlichen Abflussbildungsareale nur unzureichend wiedergeben. Die Folge ist eine weitgehend einheitlich gefärbte Karte ohne Abstufungen hinsichtlich des Reaktionspotenzials der Standorte (Abb. 14).

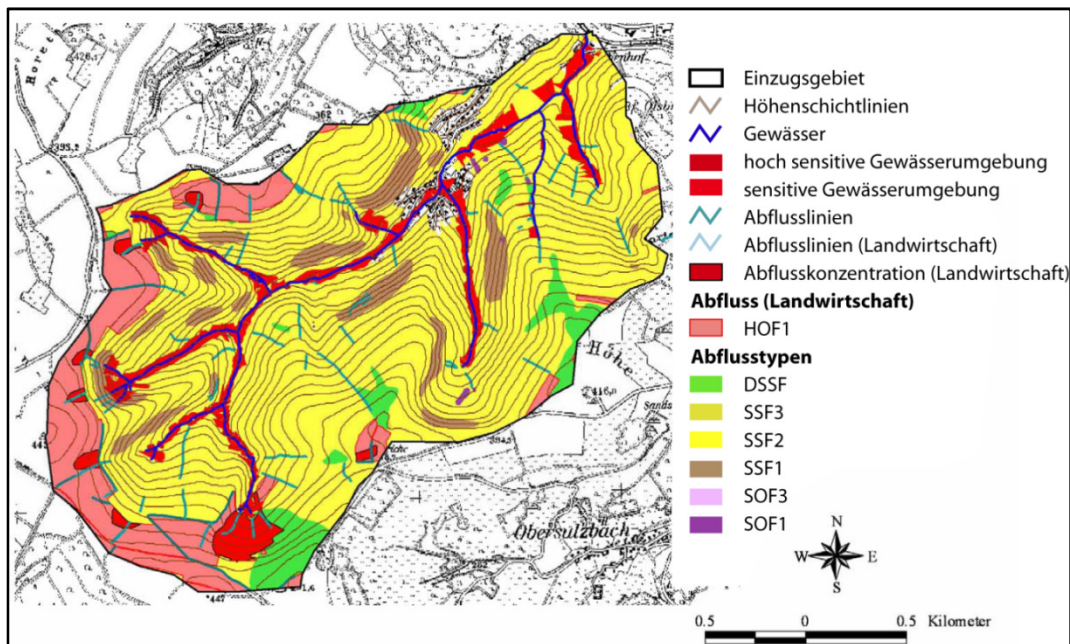


Abbildung 14: Erstellte Abflussprozesskarte im Nordpfälzer Berg- und Hügelland auf Grundlage standortkundlicher Bodeninformationen und der Hangneigung (aus: SCHÜLER 2006)

In stark zwischenabflussgeprägten Gebieten bestehen zudem noch große Unsicherheiten bei der Lokalisation von abflusssensitiven Flächen. Durch die unterirdische Fließphase bedingt, zeigen sich an der Geländeoberfläche häufig keine Merkmale, die auf ein erhöhtes Abflussgefahrenpotenzial in der Tiefe schließen lassen. Ein allgemein gültiges Verfahren zur flächenscharfen Ausweisung ohne umfangreiche Bodenanalysen gibt es daher bis heute nicht (WALDENMEYER 2003).

WALDENMEYER (2003) versuchte daher eine integrierte Lösung für das Problem des Zwischenabflusses zu finden. Er kombinierte Bodeneigenschaften mit der Hangneigung und entwickelte daraus einen Interflowindex, der die Zwischenabflussneigung nachbildet:

$$I_{\text{pot}} = \sin\beta * \left| \log \frac{K_{S_o}}{K_{S_u}} \right| * K_{S_o}$$

Der Ansatz beruht auf dem Produkt zwischen dem logarithmierten Schichtungsquotient (K_{S_o}/K_{S_u}), d.h. aus den Durchlässigkeitsbeiwerten des Ober- und Unterbodens als potenzieller Staukörper und der Hangneigung ($\sin\beta$). Über den Skalierungsfaktor K_{S_o} kann in Gebieten mit stark wechselnden Durchlässigkeiten im Oberboden der Wert skaliert werden. Steile Hänge in Kombination mit einer stark unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeit zwischen Ober- und Unterboden lassen demnach auf eine hohe Zwischenabflussaktivität schließen. Über ein digitales Höhenmodell ist dieser Index leicht zu bestimmen. Voraussetzung für ein solches Konzept sind allerdings auch hier flächendetaillierte Informationen zu Schichtungseigenschaften aller am Abflussprozess beteiligten Bodenhorizonte, die in der entsprechenden Auflösung nicht

oder nur für kleinere Gebiete vorliegen dürften. In diesem Falle reduziert sich der Index wiederum allein auf die Hangneigung. Generell haben fast alle bisherigen Ausweisungen eines gemeinsam. Sie verwenden die Hangneigung als zentrale Steuergröße für die Art und Geschwindigkeit der Abflusssentstehung.

In dieser Arbeit soll ein Verfahren entwickelt werden, dass sich nicht allein auf die Hangneigung fokussiert. Aufbauend auf boden-, standortkundlichen und geologischen Kartengrundlagen und unter Einbeziehung komplexer geomorphometrischer Parameter (Fließakkumulation) soll versucht werden, ein detaillierteres Bild der Abflusssituation vor Ort zu erstellen. Dabei sind nicht nur die potenziellen Entstehungsgebiete des Abflusses von Interesse, sondern auch der weitere Verlauf des Abflusses in Richtung Tiefenlinie.



Klassifikationssysteme zur Ausweisung hochwassersensitiver Waldflächen gibt es bereits für den Alpin- und Mittelgebirgsraum. Doch vielfach erfüllen sie entweder nicht die nötige Detailgenauigkeit oder sie erfordern zeitaufwendige Geländeaufnahmen vor Ort, die nur für kleine Wassereinzugsgebiete mit konkreter Hochwassergefährdung gerechtfertigt sind. Für den großflächigen Einsatz als Planungsinstrument der Forsteinrichtung steht bisher kein gängiges Verfahren zur Verfügung, das die Anforderung von flächenscharfer Ausweisung der Abflussprozesse auf Bestandesebene mit einem einfachen und nachvollziehbaren Verfahren vereint.

2.9 Einfluss des Waldes auf die Abflussbildung

Wasserrückhalt drückt sich in der Fähigkeit des Bodens aus, so viel Wasser wie möglich zu speichern. Die natürlichen Bodeneigenschaften, wie Bodenmächtigkeit, Bodenart, Skeletthalt und Lagerungsdichte sowie das geologische Ausgangsmaterial und die Gebietsmorphologie üben neben der witterungsbedingten Vorgeuchte den weitaus größten Einfluss auf das Speichervermögen und damit auf die Höhe des Hochwasserscheitels aus (HEWLETT 1982). Über die Landnutzungsform kann der Mensch indirekt auf die Bodeneigenschaften (Porenvolumen, Aggregatstabilität, Anteil organischer Substanz, Bodenfeuchte) und damit auf die Abflussbildung und Abflusskonzentration einwirken.

Die Landnutzungsform Wald, so sind sich die meisten Experten einig, übt dabei den günstigsten Einfluss auf die Abflussverzögerung aus (ENGLER 1919, GÜNTHER 1979, SCHWARZ 1985, MOESCHKE 1987, LÜSCHER & ZÜRCHNER 2002 u.a.). Er beeinflusst den Niederschlag in der Art, wie er den Waldboden erreicht, in ihm speichert und wie er den Boden wieder verlässt (LULL &

REINHART 1972). Durch die meist größere Wasserspeicherkapazität der Waldböden gegenüber Freilandflächen, aufgrund eines verbesserten Bodengefüges, den hohen Anteil an Humusstoffen und den tiefreichenden Wasserentzug durch Verdunstung können Waldbestände den Direktabfluss mindern und Abflussspitzen kappen (DE HAAR & HOFFMANN 1982, HEGG et al. 2004). Die Speicherkapazität eines bestimmten Standortes ergibt sich demnach aus der natürlichen Retentionsfähigkeit des Bodens und einem möglichen waldspezifischen Effekt. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind:

- **Verbesserung der Infiltrationsleistung des Bodens**

Durch das Wurzelwachstum wird das Bodengefüge gelockert und mehr dränfähige Poren geschaffen. Nach Untersuchungen aus dem Alpenraum ist die Gefahr von Oberflächenabfluss unter gut strukturierten, naturnahen Bergmischwaldbeständen am geringsten, während sie unter einschichtigen Fichtenreinbeständen stark ansteigen kann (KARL et al. 1985, BUNZA & SCHAUER 1989). Außerdem vermögen Baumarten mit hoher Wurzelenergie selbst dichte Bodenschichten zu erschließen und über die Erhöhung des Hohlraumsystems die Infiltrationskapazität und die nutzbare Wasserspeicherkapazität zu steigern (WITZIG et al. 2004). Abflusssimulationen erwiesen, dass das Makroporensystem bei sommerlichen Extremniederschlägen im Osterzgebirge eine wesentliche Rolle zur Direktabflussminderung spielt (SCHERZER et al. 2005).

Durch die Zersetzung der Streu bilden sich verschiedenartige Humusaufgaben aus. Sie sind meist locker gelagert und weisen einen deutlich größeren Porenraum als Mineralböden auf (HAMMEL & KENNEL 2001). Die organischen Auflagen können pro Gramm Bodensubstanz bis zu 1,5 - 4,5x mehr Wasser speichern als Mineralböden. Sie sind daher bei der Betrachtung des Wasserhaushaltes nicht zu vernachlässigen (LEUSCHNER 1998, SCHÄFER et al. 2002) und tragen, trotz ihres vermeintlich geringen Anteils am Bodenaufbau, bedeutend zur Wasserspeicherkapazität bei.

- **Verdunstung von Wasser (Transpiration)**

Landpflanzen geben aufgrund des negativen Wasserpotenzials mit der Atmosphäre und dem entstehenden Dampfdruckgefälle Wasser an die Umgebung ab (NULTSCH 2001). Dieser Vorgang wird als Transpiration bezeichnet. Über die stomatäre Verdunstung regelt die Pflanze den notwendigen Gasaustausch für die Photosynthese und schützt die Blätter vor Überhitzung. Der Wasserverlust, der durch die Verdunstung entsteht, wird über die Wasseraufnahme durch die Wurzeln ausgeglichen. Die treibende Kraft entsteht durch die Verdunstung an den Blättern und des damit erzeugten Unterdrucks (Sogeffekt) im Inneren der Pflanze. Da Bäume in aller Regel ein sehr tiefreichendes und kräftiges Wurzelsystem ausbilden, können sie auf Wasserressourcen zugreifen, die für andere Pflanzen nicht mehr erreichbar sind. Dies führt zu einem tiefgründigen Wasserentzug (Schaffung freien Porenraumes), der als zusätzlicher Bo-

denwasserspeicher bei Starkregenereignissen wieder zur Verfügung steht. POLSTER (1950) beziffert den mittleren täglichen Verbrauch an Wasser während der Vegetationszeit bei Buchen auf 3,8 mm, Fichten 4,3 mm und Douglasien auf etwa 5,3 mm pro Tag. Doch gibt es große regionale Unterschiede. Für das Gesamtjahr berechneten zum Beispiel HAMMEL & KENNEL (2001) aus Daten der Waldklimastationen eine Gesamttranspiration von Buchen im Spessart (Bad Brückenau) von 188 mm und in Ebrach von 329 mm. Speziell für den Frankenwald liegen Werte für Fichtenbestände von 364 mm (Rothenkirchen) und 343 mm (Goldkronach) vor. Dies entspricht etwa 35 % - 40 % des Freilandniederschlags in der Region.

Zusätzlich verdunsten immergrüne Nadelwälder in den zuletzt immer häufiger auftretenden milden Winter noch zusätzlich erhebliche Wassermengen auch außerhalb der Vegetationszeit (RASPE et al. 2008, vgl. auch Abb. 15).

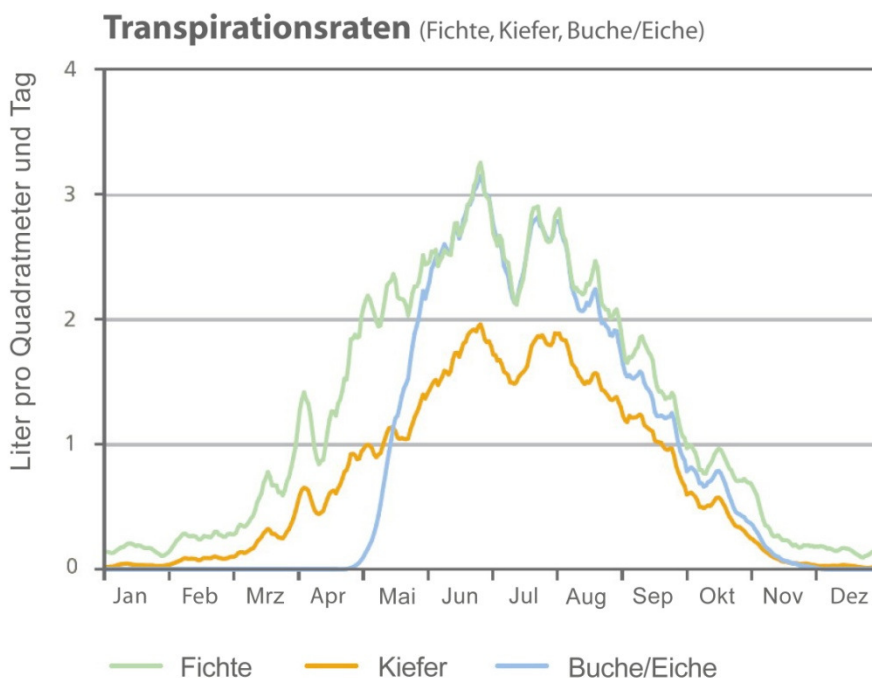


Abbildung 15: Berechnete tägliche Transpirationsraten der Nadelbaumarten Fichte und Kiefer und der Laubbaumarten Buche/Eiche im Durchschnitt aller Waldklimastationen in Bayern für den Zeitraum von 1998 - 2007 (aus: ZIMMERMANN et al. 2008)

- **Interzeptionsspeicher**

Als Interzeptionsspeicher bezeichnet man die Menge des Niederschlags, der von den Blatt- und Nadelflächen zurückgehalten und in der Regel durch Verdunstung wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Je nach Alter und Dichtschluss der Bestände liegt der Speicher für Nadelholz (Fichte) bei etwa 4 mm (DELFS et al. 1958) und für Laubholz (Buche) bei 2,6 mm Niederschlag (BENECKE & v.D. PLOEG 1978). Im Vergleich dazu ist der Interzeptionsverlust für Gras- und Strauchflächen mit 1 - 1,5 mm (LEYTON et al. 1967, ZINKE 1967) merklich geringer. Das führt dazu, dass der Waldboden im Jahresverlauf etwa 20 % - 40 % weniger Niederschlag, im Vergleich zum Freiland, erhält (vgl. MENDEL 2000). Zusammen mit der Transpiration

ergeben sich für die Sommermonate oft negative Wasserbilanzen, die in den Wintermonaten bei reduzierter Verdunstung wieder kompensiert werden (vgl. PATZNER 2004).

Durch die geringere Vorfeuchte können Waldbestände im Jahresverlauf größere Wasserspeicherpotenziale aufbauen. Durch den Laubfall bedingt, kommt es jedoch zu saisonalen Unterschieden zwischen Laub- und immergrünen Nadelbaumarten (JONES & POST 2004). So ist die Bodenfeuchte unter Laub abwerfenden Baumarten im Winter meist höher als unter Nadelhölzern (BOSCH & HEWLETT 1982, JOST et al. 2004). In der Untersuchung von SCHERZER et al. (2005) zeigte sich, dass zur Schneeschmelze unter winterkahlen Laubhölzern wesentlich mehr Direktabfluss gebildet wird (48 mm/a) als unter Nadelbeständen (18 mm/a) – in Mittelgebirgsregionen mit Winterhochwasser eine nicht zu vernachlässigende Tatsache.

Als direkte Antwort auf Starkregenereignisse ist der Interzeptionsspeicher der Bäume allerdings nahezu bedeutungslos. Nach MÄGDEFRAU & WUTZ (1951) kann im Vergleich dazu allein die Moosdecke im Wald bis zu 14,7 mm Niederschlag aufnehmen.

Weiterhin tragen Waldbestände über das Kronendach zu einer ungleichmäßigen räumlichen Verteilung der Niederschläge bei. Gleichzeitig wird die Energie der fallenden Regentropfen gemindert und damit Bodenerosion verhindert.

2.10 Untersuchungen zur Waldwirkung – eine Literaturstudie

An dieser Stelle seien nur einige wichtige Autoren erwähnt. Einen Gesamtüberblick über die Geschichte der Forsthydrologie geben MCCULLOCH & ROBINSON (1993).

ENGLER (1919) veröffentlichte die erste bedeutsame forsthydrologische Vergleichsstudie zur Schutzwirkung des Waldes bei Starkregenereignissen. Er belegte durch einen Einzugsgebietsvergleich, dass Wälder bei kurzen und intensiven Niederschlägen einen wirksamen Schutz zur Minderung der Hochwasserwelle leisten können. ENGLER (1919) verweist aber schon damals auf die abnehmende Waldwirkung bei zunehmendem Niederschlagsvolumen. Er begründet dies dadurch, dass auch in optimal angepassten Waldbeständen der Bodenspeicher irgendwann erschöpft ist und kein weiteres Wasser mehr aufgenommen werden kann. Alles zusätzliche Niederschlagswasser fließt daraufhin, unabhängig von der Waldwirkung, ab.

Ein Vergleich zwischen einem bewaldeten und einem nicht bewaldeten benachbarten Einzugsgebiet in Frankreich hat gezeigt (COSANDEY et al. 2005), dass der Gesamtabfluss bei einem 53 mm Regenereignis im nicht bewaldeten Einzugsgebiet um 50 % höher ist. Es zeigte sich, dass der Wald Abflussspitzen kappt und so zum vorbeugenden Hochwasserschutz beitragen kann.

BURGER (1922) beschäftigte sich mit Infiltrationsversuchen. Er belegte, dass sich Wald positiv auf das Grobporenvolumen und somit auf die Versickerungsrate des Wassers in den Boden auswirkt. Wald kann daher Oberflächenabflüsse wirkungsvoll verhindern.

Über die Nutzung des Waldes verändert der Mensch die Baumartenzusammensetzung und entnimmt dem Wald Biomasse. Welchen Einfluss diese Maßnahmen auf die Abflussbildung ausüben, widmeten sich bereits einige Untersuchungen. FÜHRER (1990) beschäftigte sich im „Krofdorfer Forst“ (Hessen) mit der Veränderung der Abflusshöhe, der zeitlichen Verteilung und der chemischen Qualität des Wasserdargebots von bewaldeten Einzugsgebieten und deren Veränderung aufgrund waldbaulicher Maßnahmen. Er kam zu dem Ergebnis, dass eine Reduzierung der Grundfläche eines Buchenaltbestandes auf einen Bestockungsgrad von 0.6 keine signifikante Erhöhung des Jahresabflusses (+7 %) nach sich zieht. Erst bei einer weiteren Reduzierung des Bestockungsgrades auf 0.4 konnte eine signifikante Abflusserhöhung festgestellt werden.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt MOESCHKE (1987). Er reduzierte in einem Wassereinzugsgebiet den aufstockenden Vorrat durch Löcherhiebe um 40 %, während der Holzvorrat in einem benachbarten Einzugsgebiet durch gleichmäßige und einzelbaumweise Entnahme auf 30 % abgesenkt wurde (Schirmhieb). Die sommerlichen Abflussspitzen erhöhten sich daraufhin um 30 % im Lochhiebexperiment, während im benachbarten Einzugsgebiet keine Veränderungen im Abflussgeschehen festzustellen waren. Demnach wirkt sich erst eine starke Auflichtung des Bestandes auf die Abflussmenge aus. Durch die Verminderung der Evapotranspiration und Interzeption steigt der Bodenwasservorrat an und es steht weniger Porenvolumen zur Wasserspeicherung zur Verfügung. Kahlschlagsexperimente, wie sie u.a. JONES & GRANT (1996) und GUILLEMETTE et al. (2005) vornahmen, belegen eine Abflusserhöhung von 0 bis über 300 % in den ersten Jahren. Diese Ergebnisse zeigen auch, dass eine Abflusserhöhung in Abhängigkeit zur Holzernte differenziert betrachtet werden muss. Wie hochwasserrelevant eine Reduzierung der Bestockungsdichte ist, hängt demnach auch maßgeblich von der Position der Hiebe zu abflusssensitiven Flächen ab (BOSCH & HEWLETT 1982).

LÜSCHER & ZÜRCHER (2002) sowie HEGG et al. (2004) geben einen Einblick, wo Waldbestände besonders effektiv zur Hochwasserminderung beitragen können. Auf vielen Standorten überprägen die Bodeneigenschaften (Bodenmächtigkeit, Textur und Lagerung) einen baumartenabhängigen Effekt. So ist auf tiefgründigen und lockeren Substraten, mit einer ohnehin sehr hohen Wasserspeicherkapazität, kein zusätzlicher Effekt durch den Wald zu erwarten. Auch auf sehr flachgründigen Böden mit geringem Bodenwasserspeicher ist der Einfluss gering. Hier reicht entsprechend weniger Niederschlag aus, damit die Waldwirkung keine Rolle mehr spielt (HEWLETT 1982, HEGG et al. 2004).

Der größte Einfluss sollte auf Standorten bestehen, wo dichte Lagen die Durchwurzelungsfähigkeit der Baumarten begrenzen (HEGG et al. 2004). Sickerwasser kann nicht in den Unterboden infiltrieren und fließt über dem verdichteten Horizont als Zwischenabfluss dem nächsten Gerinne entgegen. Tiefwurzelnde Baumarten könnten in diese Schicht eindringen und so die Infiltrationskapazität des Unterbodens erhöhen. Es wird mehr Wasser im Unterboden zwi-

schengespeichert und wieder verdunstet und fließt nicht als Direktabfluss ab. So hängt der Einfluss auf die Abflussbereitschaft eines Waldstandortes im Wesentlichen von den Bodeneigenschaften und deren Möglichkeit zur Modifizierung durch den Wald ab.

WEINMEISTER (2003) resümiert dabei treffend „*Der Wald wirkt über den Boden gegen Hochwasserkatastrophen*“. Somit sollte auch klar sein, dass Wälder Hochwasser nicht völlig verhindern können (LULL & REINHARDT 1972).

WEILER (1997) untersuchte Böden von zwei 20° und 25° geneigten Hängen auf gleichem Ausgangssubstrat. Aufgrund des Einflusses der unterschiedlichen Landnutzung (Wald/Feuchtwiese) unterschieden sich die untersuchten Flächen hinsichtlich Bodenentwicklung und Bodeneigenschaften. Auf dem Wiesenstandort kam es bereits nach 20 mm künstlichem Niederschlag zu einem ersten oberflächigen Abfluss, während die mit Wald bestockte Fläche erst nach rund 30 mm zeichnete. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch BOTT (2002), der dem Wald gegenüber Wiesenflächen ein wesentlich höheres Rückhaltevermögen bescheinigt. Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss der jeweiligen Landnutzungsform auf den Abflussprozess auf Böden mit gleichem Ausgangssubstrat.

KARL et al. (1985) untersuchten das Oberflächenabflussverhalten von alpinen und außeralpinen Wäldern, Zwergstrauchbeständen, Grünland, Skiabfahrten und Maiskulturen. Sie kamen dabei zur Erkenntnis, dass in naturnahen Mischwäldern der montanen Stufe (Fichte, Tanne, Buche) sowie in Buchenbeständen auf Braun- und Parabraunerden bei Beregnungsintensitäten von 100 mm/h mit so gut wie keinem Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Auf durch Viehtritt oder durch Befahrung verdichteten Waldflächen, Bodenverschlammungen, Skiabfahrten und landwirtschaftlichen Flächen war jedoch sehr wohl Oberflächenabfluss festzustellen. Auch die zum Teil stark austrocknenden Humusaufgaben unter ungepflegten Fichtenbeständen können benetzungshemmend wirken und Oberflächenabfluss bilden (BUNZA & SCHAUER 1989, MARKART & KOHL 2004).

Alle diese Untersuchungen sehen jedoch den Wald als Ganzes und vergleichen die Waldwirkung mit den Wirkungen anderer Landnutzungsformen auf dem Standort. Wald setzt sich im Idealfall jedoch aus mehreren Baumarten zusammen, die den Boden unterschiedlich tief erschließen und charakteristische Humusformen bilden und somit die Bodeneigenschaften im Sinne der Hochwasservorsorge unterschiedlich beeinflussen. „*Wald ist nicht gleich Wald*“, wie WITZIG et al. (2004) trefflich anführen. Sie wiesen in ihrem Untersuchungsgebiet nach, dass die Baumarten Fichte, Buche und Tanne den potenziellen Wurzelraum unterschiedlich tief durchwurzeln. Die flachwurzelnende Fichte nutzt den zur Verfügung stehenden Wurzelraum nur teilweise, während die tiefwurzelnende Tanne den periodisch vernässten Boden tiefgründig erschließt, den Wurzelraum nach unten ausweitet und damit die Wasserspeicherkapazität erhöht (WITZIG et al. 2004). Den größten baumartenabhängigen Einfluss auf den Wasserrück-

halt schreiben sie Böden zu, die oberflächennah (< 50 cm) stauwasserbeeinflusst sind. Auf tief pseudovergleyten Böden oder gut wasserdurchlässigen Braunerden in Hanglage werten sie hingegen den Einfluss als gering ein.

Eine andere Untersuchung wies den tiefer wurzelnden Baumarten hingegen einen abflussverschärfenden Effekt nach (SCHUME et al. 2003). Auf einem schweren, mit Fichte bestockten, Stagnogley (Tongehalt 36 % - 56 %) zögerte die Fichte den Abfluss gegenüber der Buche um über eine halbe Stunde länger hinaus. Für den schneller reagierenden Standort unter dem Buchenbestand machen SCHUME et al. (2003) die höhere biogene Aktivität, das tiefer reichende, intensivere Wurzelsystem und die damit einhergehenden größeren Porendurchmesser im Vergleich zur Fichte verantwortlich. Das Wasser erreicht in den Wurzelröhren höhere Fließgeschwindigkeiten und wird rascher zwischenabflussaktiv. Auf der anderen Seite könnten die geringeren volumetrischen Fließgeschwindigkeiten unter der Fichte zu einer Aufsättigung des Bodenprofils und zum Oberflächenabfluss führen, so SCHUME et al. (2003). Die Schutzwirkung des Waldes (i.e.S. der Baumarten) kann daher in Abhängigkeit des Bodentyps und der Bodenart sehr unterschiedlich ausfallen und muss grundsätzlich differenziert angegangen werden (HEGG et al. 2004). Untersuchungen dazu liegen jedoch so gut wie keine vor.

Weiterhin ist nicht geklärt, wie sich unterschiedliche Belaubungszustände (Interzeption) und Transpirationsrhythmen sowie Transpirationsraten verschiedener Baumarten auf die Wasserspeicherkapazität und den Wasserrückhalt auswirken. So wiesen SCHUME et al. (2004) in einem Buchen-Fichten-Mischbestand (78 % Buchenanteil) im Frühjahr eine höhere Bodenfeuchte als unter dem Fichtenreinbestand nach. Durch die winterkahle Buche und den erhöhten Bestandesniederschlag füllt sich der Bodenwasserspeicher im Winterhalbjahr rascher auf. Die anfangs höhere Bodenfeuchtigkeit im Frühjahr wird durch die deutlich höhere Transpirationsrate der Buchen während der Vegetationszeit zur Fichte wieder ausgeglichen. Zudem entzieht der Mischbestand dem Unterboden deutlich mehr Wasser als die flacher wurzelnde Fichte. Im Jahresverlauf weist die Mischbestandsfläche so eine deutlich höhere Schwankung des Bodenwasservorrats auf (SCHUME et al. 2004).



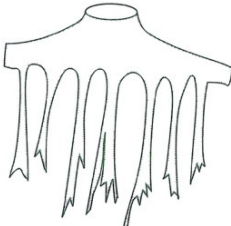
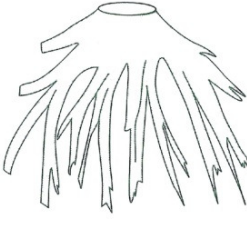
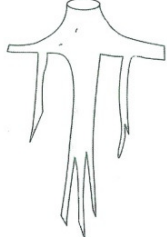
Wälder können durch ihren tiefgründigen Wasserentzug über die Wurzeln, die Lockerung des Bodengefüges, die Anreicherung des Mineralbodens mit Humusstoffen und durch die Interzeption in den Baumkronen den Direktabfluss mindern und Abflussspitzen kappen. Dieser Effekt ist jedoch nicht auf allen Standorten gleichermaßen zu beobachten. Der größte Einfluss sollte auf Standorten bestehen, bei denen dichte Lagen die vertikale Wassersickerung begrenzen. Das kräftige Wurzelsystem tiefwurzelnder Baumarten kann gegenüber ihren flachwurzelnden Konkurrenten dichte Lagen intensiver erschließen, zusätzlichen Porenraum schaffen und somit die Abflussreaktion hinauszögern.

2.11 Durchwurzelungssysteme der Waldbäume

Die Erschließung des Bodenraumes durch Bäume erfolgt artspezifisch. Dabei wirken besonders die Bodeneigenschaften (i.w.S. Standortbedingungen) modifizierend auf die Ausbildung des Wurzelsystems (POLOMSKI & KUHN 1998) ein. Ein Vergleich des „normalen“ Wurzelwachstums zwischen den einzelnen Baumarten ist daher nur unter gleichen Standortbedingungen bei ungehemmter Entwicklung möglich (KÖSTLER et al. 1968).

Unterschieden wird zwischen Horizontalwurzeln, die oberflächennah und annähernd parallel zur Bodenoberfläche verlaufen und Vertikalwurzeln, die senkrecht oder schräg vom Stock, einschließlich ihrer in größerer Tiefe verlaufenden horizontalen Abzweigungen, den Boden erschließen (KÖSTLER et al. 1968). Untergliedert werden die Vertikalwurzeln in Abhängigkeit zur vorherrschenden Ausbildung in Pfahl-, Herz- und Senkerwurzelsysteme (Tab. 3). Wurzeln können nach ihrer Funktion in Skelettwurzeln (Wurzeln $\varnothing > 2$ mm) mit ausgeprägtem sekundären Dickenwachstum (Gerüstwurzeln, langlebig ohne Sorptionsfähigkeit) und in verzweigte Feinwurzeln ($\varnothing < 2$ mm, Saugwurzeln) eingestuft werden. Für den Grund- und Hochwasserschutz spielt die Verteilung der Skelettwurzeln eine Rolle, da diese im Zuge der Verankerung den Boden lockern und vertikale Fließwege für das perkolierende Wasser schaffen. Die in diese Untersuchung einbezogenen Baumarten Buche, Fichte und Bergahorn werden nachfolgend näher beschrieben.

Tabelle 3: Grundtypen von Wurzelsystemen, Beschreibung und Beispiele (zusammengestellt nach: Köstler et al. 1968)

Senkerwurzelsystem	Herzwurzelsystem	Pfahlwurzelsystem
Flachstreichende, kräftige Hauptseitenwurzeln, von denen senkrecht nach unten wachsende Wurzeln abzweigen (Senker)	Halbkugelförmige, meist intensive Durchwurzelung des engeren Stockbereiches	Kräftige, senkrecht nach unten wachsende Hauptwurzel
		
Fichte (<i>Picea abies</i>) Strobe (<i>Pinus strobus</i>) Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>) Aspe (<i>Populus tremula</i>) Vogelbeere (<i>Sorbus aucuparia</i>) Schwarzerle (<i>Alnus glutinosa</i>) Ulme (<i>Ulmus glabra</i>) Bergahorn (<i>Acer pseudoplatanus</i>)	Lärche (<i>Larix decidua</i>) Douglasie (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) Buche (<i>Fagus sylvatica</i>) Birke (<i>Betula pendula</i>) Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>) Hainbuche (<i>Carpinus betulus</i>)	Tanne (<i>Abies alba</i>) Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>) Eibe (<i>Taxus baccata</i>) Eiche (<i>Quercus rob./petraea</i>)

2.11.1 Fichte (*Picea abies* L. (Karst.))

Die Fichte als ein typischer Vertreter des Senkerwurzelsystems bildet ein oberflächennahes, weit verzweigtes, tellerartiges Horizontalwurzelsystem aus. An den dickeren, flachstreichenden Seitenwurzeln entspringen vor allem im Stockbereich einzelne Wurzelstränge (Senker) nach unten (Abb. 16), die je nach Standort mehr oder weniger tief in den Boden vordringen (KÖSTLER et al. 1968, KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002). Die Horizontalwurzeln verlaufen auf allen Standorten häufig in den obersten 1 - 3 dm (KÖSTLER et al. 1968). Die Ausbreitung in die Horizontale ist dabei größer als bei den meisten anderen Baumarten (HILF 1927, zitiert nach KÖSTLER 1968).

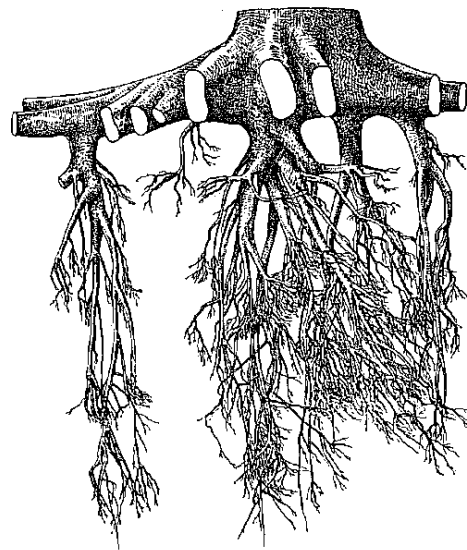


Abbildung 16: Wurzelwerk der Fichte (aus: KÖSTLER et al. 1968)

Die Vertikalwurzelentwicklung kann auf gut durchlüfteten, lockeren und tiefgründigen Böden Tiefen von über 2 m erreichen (VATER 1927). Auf verdichteten, staunassen und grundwasserbeeinflussten Standorten hingegen beschränkt sich die Fichte, wenn überhaupt Senkwurzeln ausgebildet werden, auf die obersten, besser durchlüfteten Bodenbereiche und bildet ein sehr flaches Wurzelsystem aus. Als Hauptgrund für die flachgründige Erschließung wird einheitlich Sauerstoffmangel und weniger die Dichtlagerung der Standorte genannt (vgl. WITTICH 1948).

Das Tiefenwachstum bei der Fichte ist in den ersten Jahrzehnten sehr stark ausgeprägt und nach Ansicht von RACHTEJENKO (1952, zitiert nach KUHR 1999) mit 30 - 40 Jahren im Wesentlichen abgeschlossen (vgl. auch KUHR 1999).

Die Feinwurzeldichte der Fichte hängt stark von der Temperatur und der Bodenfeuchte ab. So ist in „*humussauren, kühlen Gebirgsbraunerden mit podsoliger Dynamik*“ mit einem bedeutend geringeren Feinwurzelsbesatz zu rechnen als in „*basenreichen Mullhumusböden der Tieflagen*“ (BARTSCH 1985). Auch nimmt die Feinwurzeldichte stark mit zunehmender Bodentiefe ab. So ist das größte Aufkommen am Übergangshorizont zwischen organischer Auflage und Mineralboden zu finden (KÖSTLER et al. 1968).

2.11.2 Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)

Die Rotbuche ist ein typischer Vertreter des Herzwurzelsystems (Abb. 17). Die außerordentlich intensive und dichte Durchwurzelung des Stockbereichs ist ein typisches Merkmal. Eine klare Trennung zwischen Vertikal- und Horizontalwurzeln ist durch die starke Verzweigungstendenz der Wurzeln nur schwer möglich (SCHOCH 1964). Die horizontale Ausdehnung reicht, im Gegensatz zur Fichte, meist

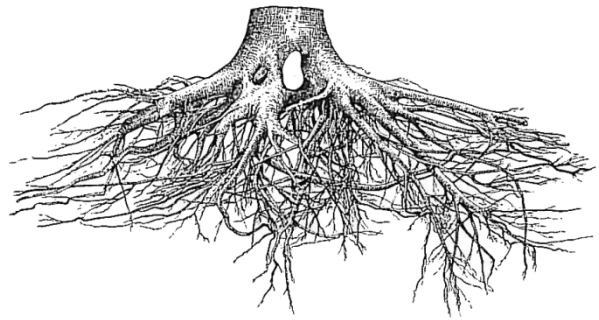


Abbildung 17: Wurzeltracht der Buche (aus: KÖSTLER et al. 1968)

nicht über den eigenen Kronenbereich hinaus (HILF 1927, zitiert nach KÖSTLER 1968). Die Vertikalwurzelentwicklung auf tiefgründigen und gut durchlüfteten Böden ist in der Regel besser als bei der Fichte. Durch die starke Aufzweigungstendenz erreichen die Vertikalwurzeln jedoch nur selten Tiefen über 1,6 - 1,8 m (KÖSTLER et al. 1968). METELMANN (1935, zitiert nach KÖSTLER 1968) bescheinigt ihr darüber hinaus ein gutes Eindringungsvermögen in lehmgefüllte Gesteinsklüfte. Der wesentliche Hauptteil der Tiefenerschließung ist, wie bei der Fichte, nach 30 - 40 Jahren erreicht. Mit Ende des Tiefenstrebens der Polwurzel beginnen die Seitenwurzeln sich kräftig zu entwickeln und es entsteht das typische Herzwurzelsystem.

Laut KRAUSS et al. (1939) und KÖSTLER et al. (1968) wurzelt die Buche auf allen dichteren und schlecht durchlüfteten, stauwassergeprägten Böden ausgesprochen flach (Abb. 18). Je ungünstiger die Bedingungen werden, desto mehr konzentriert sich die Durchwurzelung der Buche auf die obersten Bodenbereiche und stellt damit eine hohe intra- und interspezifische Konkurrenz für andere Individuen dar (POLOMSKI & KUHN 1998). Dennoch wurzelt die Buche zum Beispiel auf mäßig stauwasserbeeinflussten Böden merklich tiefer als die Fichte (vgl. Abb. 18 und Tab. 4). Der hohe Feinwurzelanteil im Oberboden erzeugt eine Anreicherung von Humus, welcher sich positiv auf die Wasserrückhaltekapazität auswirken dürfte.

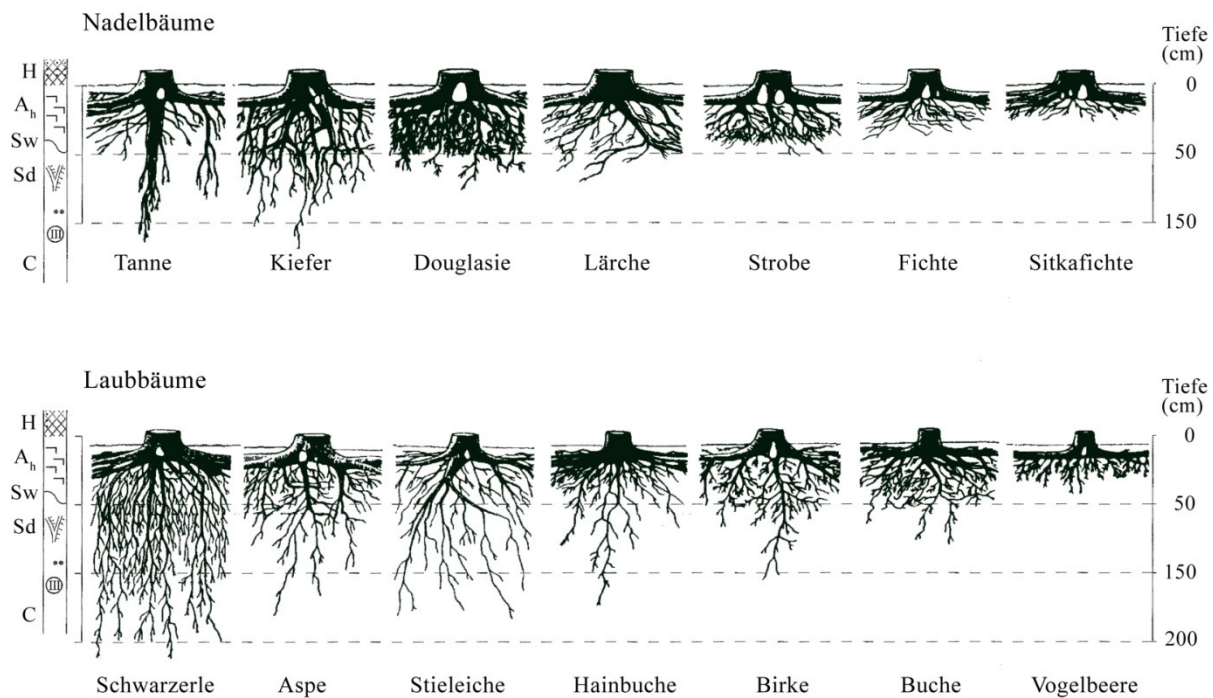


Abbildung 18: Wurzelbildung verschiedener Waldbaumarten auf einem mäßig wechsellückigen Pseudogley. Alter der Nadelbäume: 25 - 50 Jahre; Laubbäume: 35 - 38 Jahre (aus: POLOMSKI & KUHN 1998, Fichte/Sitkafichte eingefügt nach KREUTZER 1961)

2.11.3 Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.)

Über das Wurzelwerk des Bergahorns existieren heute noch große Wissenslücken. KÖSTLER et al. (1968) charakterisieren das Wurzelwerk als eine Art Mischform aus Herzwurzel- und Senkerwurzelsystem (Abb. 19). Bei ungehemmter Entwicklung sind in allen Wurzelhorizonten zahlreiche vertikale und horizontale Verzweigungen möglich. Generell ist das Wurzelwachstum mit dem der Buche vergleichbar (KÖSTLER et al. 1968). Die Feinwurzelndichte ist vor allem im Oberboden hoch. Wegen der starken Verzweigungstendenz sind die Wurzeln häufig untereinander verwachsen und bilden ein spinnwebartiges Wurzelgeflecht aus (KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002).

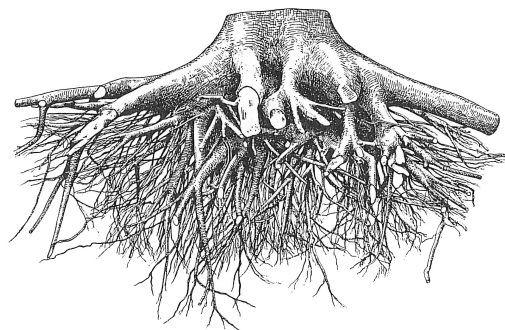


Abbildung 19: Wurzelbildung des Bergahorn (aus: KÖSTLER et al. 1968)

Außergewöhnlich an Jungpflanzen ist das zielstrebige Tiefenwachstum der Keimwurzel, die bereits im zweiten Lebensjahr eine Tiefe von 3 bis 5 dm erreicht (KÖSTLER et al. 1968). Über die Fähigkeit der Tiefenerschließung gibt es jedoch stark widersprüchliche Angaben. Während GUTSCHICK (1950), HOFFMANN (1960) und SCHOCH (1964) ihm eine gute Tiefendurchwurzelung zuschreiben, sind KÖSTLER et al. (1968) gegenteiliger Meinung. An den 40 von ihnen untersuchten Bäumen konnten sie nur ein recht flaches Herz-Senkerwurzelsystem feststellen,

das bereits auf mäßig verdichteten Lehmböden mit einer deutlichen Verflachung reagiert. Treffen die Wurzeln auf dichtere Bodenschichten, Bereiche mit Sauerstoffmangel oder erhöhtem Skelettgehalt verzweigt sich die Wurzeltracht und dehnt sich horizontal aus (KÖSTLER et al. 1968). Laut KUTSCHERA & LICHTENEGGER (2002) wirkt sich in erster Linie die rasche Abnahme der Bodentemperatur und die Bodenfeuchteverteilung der sommerkühlen Bergahornstandorte auf die nur mäßige Tiefenerschließung aus.

Auf wasserbeeinflussten Standorten ist das Wurzelwachstum differenziert zu betrachten. Auch wenn HOFFMANN (1960) dem Bergahorn auf Pseudogleyböden eine gute Tiefenerschließung bescheinigt, überwiegen die kritischen Stimmen. Laut Köstler et al. (1968) reagiert der Bergahorn empfindlich auf Sauerstoffmangel. Auf strengen Pseudogleyböden über dichtem Ton wird daher ein sehr flaches, aber außerordentlich reich verzweigtes Wurzelwerk angelegt. Auch JENSEN et al. (2008) wiesen ihm auf Standorten mit oberflächennah stagnierender Nässe (40 cm unter der Geländeoberfläche) eine Verminderung des Tiefenstrebens nach. Die flach angelegten Wurzelsysteme wirken sich dabei sehr ungünstig auf Wachstum, Stabilität und Ernährungszustand aus (DAHMER 1997, JENSEN et al. 2008).

Leicht pseudovergleyte Böden mit sauerstoffreichem (temporärem) Hangwasserzug hingegen, scheinen sich nach der Arbeit von WEBER und BAHR (2000) sehr positiv auf das Wurzel- und vor allem das Baumwachstum auszuwirken.

Tabelle 4: Ergebnis einer Literaturrecherche. Zusammenstellung der standortsabhängigen, maximalen Durchwurzelungstiefen verschiedener Baumarten (aus: BINDER & MACHER 2006). Die in dieser Arbeit untersuchten Baumarten sind grau hinterlegt.

	Maximale Durchwurzelungstiefe in cm:							Wachstumsdynamik: 90% der Durchwurzelungstiefe ist mit welchem Alter erreicht?	Bemerkung
	sandige Lehme	Skelettreiche Böden, Pararendzina	leicht pseudo-vergleyt	stark pseudo-vergleyt	Gleye mit ursprünglich mittl. bis tiefen GW-Stand	Gley mit ursprünglich hoch anstehendem Grundwasser	Moorböden		
Fichte	170	110	60	30	30	20	20	40	bei Gley bis höchsten GW-Horizont; auf Pseudogley abhängig von Nassphase
Rotbuche	180	80	70	50	50	40	20	40	bei Gley begrenzt durch mittleren GW-Horizont
Bergahorn	160	70	130	70	30	20	20	40	bei Gley bis höchsten GW-Horizont; ungeeignet auf Moorböden
Tanne	250	160	160	120	50	40	40	70	auf allen STO die am tiefsten wurzelnde Nadelbaumart; bei Gley begrenzt durch mittleren GW-Horizont; ungeeignet auf Moorböden
Lärche	170	160	100	70	30	20	20	90	ungeeignet auf Gley und Moorböden
Schwarzerle	250	160	200	180	200	200	150	20	Voraussetzung: nicht stagnierendes GW

3. Untersuchungsgebiet

3.1 Der Frankenwald

Mit derzeit 60 % waldbedeckter Fläche gehört der Frankenwald zu einer der walddreichsten Gegenden Bayerns. Der größere Teil des Mittelgebirges liegt in Bayern, ein kleinerer Teil liegt auf thüringischer Seite. Der Höhenzug, der sich vom Döbraberg nach Nordwest über Steinbach am Wald in Richtung Thüringer Schiefergebirge erstreckt, bildet dabei die Wasserscheide zwischen Elbe und Main. Nach Norden hin nimmt das Wasser seinen Weg über die Flüsse Loquitz, Selbitz und Muschwitz in die Saale und schließlich in die Elbe, nach Süden entwässert das Gebiet über die Flüsse Rodach und Haßlach in das Gerinnenetz des Mains.

3.1.1 Besiedelung und Waldentwicklung

Der "Nortwald", der frühere Name des Frankenwaldes, wurde aufgrund des rauen Klimas und der für die Landwirtschaft wenig ertragreichen Böden erst relativ spät besiedelt. Erste Besiedelungsversuche der nördlichen Abdachung sowie Teile der Hochflächen erfolgten durch das in Thüringen gelegene Kloster in Saalfeld im 11. Jahrhundert (WITTKAMP & DEIL 1996). Aus dem Süden wurde der Frankenwald deutlich später bevölkert (13. Jahrhundert). Es dauerte bis ins 15. Jahrhundert hinein, bis auch die Kammlagen erschlossen waren. Relativ früh erkannte man, dass die Waldwirtschaft gegenüber der Agrarwirtschaft bedeutend lukrativer war, sodass bereits im 13. Jahrhundert der Holzhandel in größerem Umfang zunahm (LIEBHARD 1973). Besiedelt und gerodet wurden zunächst die ausgedehnten Hochplateaus. Die Talgründe hingegen wurden gemieden, da man die Hochwasser im Frühjahr fürchtete (SCHNEIDER 1998). Zu Beginn dieser Zeit bestand die Baumartenzusammensetzung aus 60 % Tanne und 40 % Laubhölzer. Einen Großteil der Laubhölzer nahm die Buche ein. Darüber hinaus kamen laut SCHNEIDER (1998) im Süden und in wärmeren Tallagen auch Bergahorn, Ulme, Linde, Kirsche und Eiche vor. Bereits zu dieser Zeit konnte über das gut ausgebaute Gewässernetz das Holz aus dem Wald geflößt werden. Da das harte Laubholz von den Sägewerken nur schwer zu verarbeiten war und sich zudem schlecht flößen ließ, wurden die Buchen und Edellaubhölzer immer weiter zurückgedrängt und erreichten gegen Ende des 17. Jahrhunderts kaum mehr als 10 % (GUNZELMANN & DORN 2006). Auch die sich im 16. und 17. Jahrhundert auf den walddreichen Höhenlagen entwickelnde Glasindustrie (z. T. Wanderglashütten) und die damit verbundene Köhlerei (Holzkohle- und Pottascheherstellung) sowie die im 18. Jahrhundert entstehenden Porzellanhütten verbrauchten eine enorme Menge Holz, was schließlich zu einer Verknappung und Verteuerung der Ressource führte. Die einst weit verbreiteten Buchen-Tannen-Mischwälder wurden von der Tanne (80 %) und der neu hinzukommenden Fichte

(10 %) abgelöst (WIRTH 1956). Edellaubhölzer gab es am Ende dieser Zeit so gut wie gar nicht mehr (LIEBHARD 1973).

Während der „Kleinen Kaltzeit“ im 17. und 18. Jahrhundert fielen viele Siedlungen wüst (GLASER 2001). Das änderte jedoch nichts an der Tatsache, dass die Waldwirtschaft Ende des 18. Jahrhunderts immer mehr zum Raubbau forcierte. Durch die zusätzlich kriegsbedingte hohe Nachfrage an Holz in der napoleonischen Zeit wurden die Bestände immer mehr ausgeplündert (LIEBHARD 1973). So wuchs die Anzahl der Wasserschneidemühlen bis zum ausgehenden 19. Jahrhundert auf über 130 in der Region an (GUNZELMANN & DORN 2006). Genau zu dieser Zeit (1890) wurde auch das bisher verheerendste Hochwasser an der Röthen gemeldet.

Forstwirtschaftliche Beschlüsse sorgten schließlich für den Siegeszug der schnell wachsenden Fichte (SCHENK 1996). Zwar sollte die Tanne wegen ihrer hohen Wuchskraft auch weiterhin die führende Baumart im Frankenwald bleiben, doch durch die nicht tannengerechte Bewirtschaftungsweise, die Waldweide und die Mischung mit der schnellwüchsigen Fichte konnte sie sich nicht behaupten. Auch die hinzukommenden Rauchschäden im 20. Jahrhundert ließen sie weiter an Vitalität verlieren und machten sie für verschiedene Tannenschädlinge und Witterungsextreme (Trockenjahr 1976, Temperatursturz zum Jahreswechsel 1978/79) anfällig (ACKERMANN 1996). Dies führte dazu, dass heutzutage die Fichte mit 82 % das Landschaftsbild des Frankenwaldes prägt. Im nordöstlichen Frankenwald und auf den Kammlagen steigt der Fichtenanteil sogar bis auf 94 % an (BURSE 2006). Die Tanne, als einstige Hauptbaumart, ist nur noch mit rund 1 % am Bestandaufbau beteiligt (SCHMIDT 2004, Forsteinrichtungswerk Rothenkirchen 2008). Durch die verstärkte Wiedereinbringung von Tanne und Buche in den beiden letzten Jahrzehnten, der Verminderung der Schademissionen und der Reduktion der Schalenwildbestände auf „buchenverträgliche“, mancherorts auch „tannenverträgliche“, Dichten sind die Weichen für einen standortgemäßen Buchen-Fichten-Tannen Mischwald im Frankenwald gestellt.

Die engen Talgründe des Frankenwaldes wurden lange Zeit als Grünlandflächen genutzt (WOLF 1998, HANNIG 2008 - mündliche Mitteilung). Noch heute sind die dafür angelegten Bewässerungsgräben und verfallenen Staudämme in den Kastentälern zu erkennen. Durch die Umstrukturierung der Landwirtschaft wurde die Grünlandnutzung in den 50iger Jahren eingestellt und die feuchten Wiesengründe mit nicht standortgerechten Fichten aufgeforstet. In vielen Talgründen stocken daher windwurfanfällige Fichten mittleren Alters (Abb. 20).



Abbildung 20: Ein in den 50iger Jahren mit Fichten aufgeforsteter, wasserbeeinflusster Talboden im Wassereinzugsgebiet der Mauthaustalsperre

Als potenzielle natürliche Vegetation im Frankenwald wären die montane und hochmontane Ausbildung des *Luzulo luzuloidis*-Fagetums (Bergland-Hainsimsen-Buchenwald) vorherrschend (LAWUF 2000, WALENTOWSKI et al. 2006). Die Baumartenzusammensetzung wird durch die Hauptbaumarten Buche (dominiert), Tanne und Fichte (Hainsimsen(Tannen-Fichten)-Buchenwald) in wechselnden Anteilen unter Beteiligung von Edellaubhölzern (besonders in feuchten und sickerfeuchten Mulden) bestimmt (Abb. 21). In wärmebegünstigen Lagen unter 500 m ü. NN gesellt sich die Eiche hinzu (LAWUF 2000). Daneben tritt kleinflächig auf nährstoffreicheren, frischen Standortsverhältnissen der Waldmeister-Buchenwald (*Galio odorati*-Fagetum) auf (WALENTOWSKI et al. 2006). Auf den Kammlagen, im Verzahnungsbereich zum Thüringischen Schiefergebirge und des Thüringer Waldes, ragen die Ausläufer des Wollreitgras-Fichtenwaldes (*Calamagrostio villosae*-Piceetum) und des Beerstrauch-Fichten-Tannenwaldes (*Vaccinio-Abietetum*) in den Frankenwald hinein (SCHMIDT 2004, SCHRAMM & BURSE 2006). In den bachbegleitenden und wassergeprägten Tälern (Gleyböden) stellt der Waldsternmieren-Schwarzerlen-Bachauenwald (*Stellario nemori*-Alnetum) und der Fichten-Schwarzerlen-Sumpfwald (*Circaeo alpinae*-Alnetum) die natürliche Bestockung dar (KÖLLING 2005).

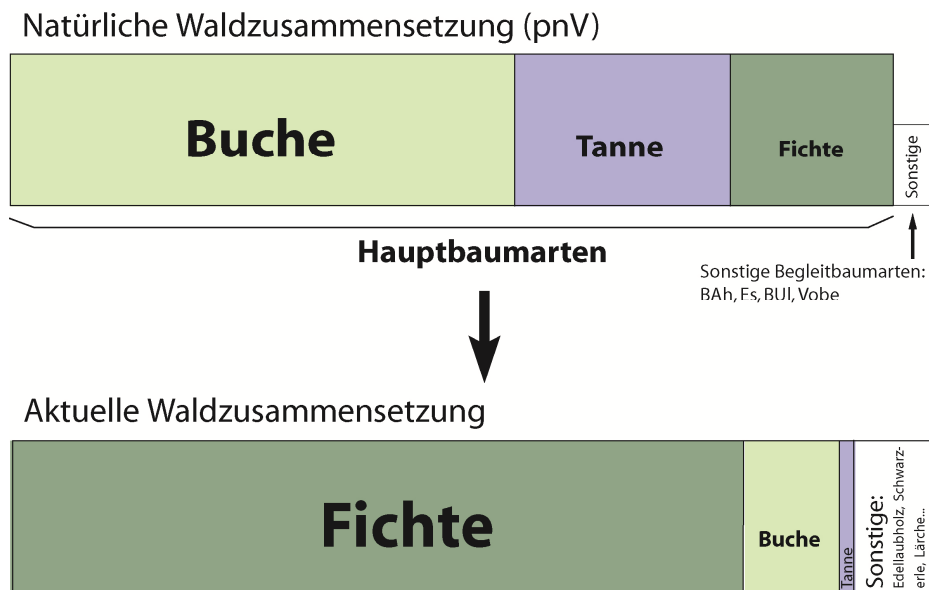


Abbildung 21: Natürliche und aktuelle Waldzusammensetzung im Frankenwald (aus: WALENTOWSKI et al. 2006, verändert)

3.1.2 Klima

Die klimatischen Bedingungen des Frankenwaldes entsprechen einem typischen, kühlfeuchten Mittelgebirgsklima. Durch die Verlängerung zum Thüringer Wald von Südost nach Nordwest und durch weitgehend südwestlich feuchte Luftströmungen (Abb. 22) kommt es am Südwestrand zu Stauwirkungen mit intensiven Niederschlägen (HOFFMANN 1959). Vom Gebirgskamm aus Richtung Nordosten folgt ein ausgeprägtes Leegebiet mit deutlichem Rückgang der Niederschläge. Die Klimatönung ist subatlantisch (submontan) bis montan (LÜERS & FOKEN 2004). Dabei nimmt die Südwestabdachung im Luvbereich atlantische Züge an, während die Nordostabdachung kontinentale Verhältnisse zeigt. Die mittleren Temperaturen bewegen sich zwischen 6 - 7°C, bei einem Jahresniederschlag im westlichen Frankenwald von rund 900 - 1200 mm (TLWJF 2000). Spitzenwerte gibt es am Südwestrand (z. B. Steinach) mit bis zu 1300 mm (MEINHARDT 2006). Im östlichen Frankenwald nehmen die Niederschläge ab und erreichen Werte zwischen 700 - 1000 mm (SCHRAMM & BURSE 2008). In der 130 - 140 Tage andauernden Vegetationsperiode (Tage über 10°C) fallen zwischen 400 - 450 mm Niederschlag (40 % vom Gesamtniederschlag). Das Niederschlagsmaximum liegt in den Monaten Januar und Februar mit einem zweiten schwächeren Maximum im Sommer (Winterregentyp). Als Schnee fallen bis zu 20 % des jährlichen Gesamtniederschlags (DWD & LWF 2009). Orografisch bedingt sammeln sich im Winter größere Niederschlagsrücklagen auf den Höhenlagen an. Gewitterniederschläge mit sommerlichen Starkregenereignissen kommen häufig von Südwest, können aber auch über nordwestliche Luftströmungen hereinziehen und im Bereich der Nordostabdachung zu lokal hohen Niederschlagssummen führen (MEINHARDT 2006).

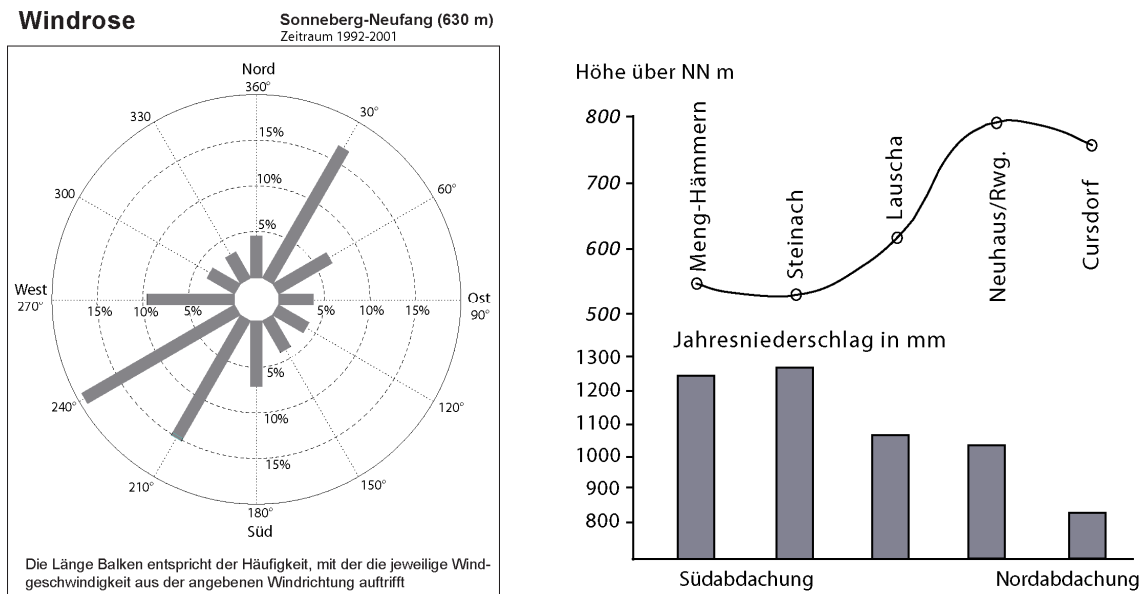


Abbildung 22: Die linke Abbildung zeigt die Häufigkeiten des Auftretens der Windrichtungen an der Wetterstation Sonneberg-Neufang (Quelle: DWD), rechts die Niederschlagsverteilung von Südwest nach Nordost vom thüringischen Teil des Wuchsgebietes „westlicher Frankenwald“ zu den Höhenlagen des Thüringer Schiefergebirges (HOFFMANN 1959, verändert)

3.1.3 Geologie und Böden

Während des Paläozoikums bis hin zum Unterkarbon befand sich im Bereich des heutigen Frankenwaldes ein langgestreckter Meerestrog (variskische Geosynklinale). In diesem lagerten sich Ströme aus marinen Sedimenten vom Präkambrium bis hin zum Unterkarbon ab. Hierbei handelt es sich um mehrere tausend Meter mächtige Ablagerungen aus tonig-sandigen Sedimenten, die gefaltet und zum variskischen Gebirge herausgehoben wurden (ALTERMANN et al. 1995). Die heutige Landschaft ist das Ergebnis einer im Pleistozän einsetzenden fluviatilen Erosionsphase (EMMERT & HORSTIG 1972), die von gewaltigen Hochwassern mit hoher erosiver Kraft angetrieben wurde (HORSTIG 1979). Die ehemaligen Meeresablagerungen liegen im Norden (Thüringische Fazies) und Süden (Bayerische Fazies) des Frankenwaldes in verschiedenen Fazies⁶ vor (WURM 1925). Die Grenze zwischen beiden Ausprägungen zieht sich entlang einer gedachten Linie von Wallenfels – Schwarzenbach – Selbitz – Hof. Die thüringische Fazies, in denen sich die Untersuchungsgebiete befinden, kann als Normalform betrachtet

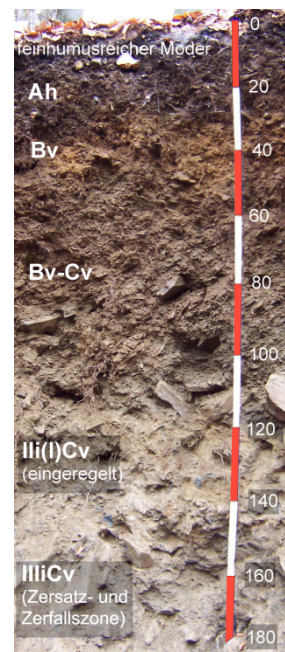


Abbildung 23: Typische Braunerde im Frankenwald

⁶ Gleichalthe Gesteine, die sich in mineralogischer und chemischer Zusammensetzung unterscheiden

werden und nimmt den weitaus größten Teil des Frankenwaldes ein. Nach RUTTE (1981) entstammen die Sedimente sehr tiefen Meeresbereichen, das zu einem stetig-ruhigen Aufbau der Gesteine führte.

Die im Untersuchungsgebiet hauptsächlich auftretenden basenarmen und silikatreichen Tonschiefer-Grauwacke-Wechselagerungen des Unterkarbons weisen durch den Gebirgsbildungsprozess eine mehr oder weniger ausgeprägte Schieferung auf. Grauwacke ist ein sehr festes, sandsteinartiges Sedimentgestein mit einer dunkel- bis hellgrauen Grundmasse (Abb. 24, a). Aufgrund des hohen Quarzanteils ist Grauwacke sehr verwitterungsbeständig und häufig von kleineren Quarzitgängen durchzogen. Die sich daraus entwickelnden Böden sind meist sandiger als die unter Tonschiefer und von gelblicher Farbe.

Der Tonschiefer (Abb. 24, b) als metamorphes Sedimentgestein entsteht aus verfestigtem Ton. Böden aus Tonschiefer haben dadurch meist einen höheren Tonanteil als Grauwackeböden und durch den Anteil von Hämatit im Mineralbestand des Gesteins eine intensiv braune Färbung. Die klastische Verwitterung des Tonschiefers liefert plattige Gesteinsscherben (Grus), die durch Solifluktion dachziegelartig und hangparallel einregeln. Bei Zunahme des Gehaltes an Grauwacke und vor allem Quarziten (Wetzsteinquarzit) ist eine Tendenz zu höherer Steinigkeit der Böden zu beobachten (HORSTIG 1979).

Die großflächig auftretenden, nährstoffärmeren Braunerden (Abb. 23) zeigen eine mittlere bis große Entwicklungstiefe und sind nur an einigen wenigen Stellen direkt aus den anstehenden Gesteinen entstanden (z.B. ebene Hochlagen). Sie sind vielmehr das Produkt aus periglazialen Verwitterungs- und Verlagerungsprozessen. Der Untergrundhorizont (C_v) besteht häufig aus eingeregelter Verwitterungsschutt der paläozoischen Gesteine und grenzt sich in Farbe (graubraun) und Bodenart (sandiger) deutlich vom gelblich-braunen Solum ab. Als unterste Lage liegen die Gesteine, mehr oder weniger verwittert, im natürlichen Gesteinsverband vor.

An Unterhängen, auf flach geneigten Plateaulagen und in Talmulden können unter den locker gelagerten Deckschichten auch verfestigte Fließerden auftreten. Der Übergang ist durch eine zum Teil abrupte Änderung der Lagerungsdichte und der Bodenart gekennzeichnet, die vielfach als Staukörper für den vertikalen Wassertransport fungiert. Die Ablagerungen können mehrere Dezimeter mächtig werden. In den Talböden sammelten sich holozäne Umlagerungsprodukte.



Abbildung 24: Die wichtigsten am Bodenbildungsprozess beteiligten Gesteine im Untersuchungsgebiet: a) Grauwacke, b) Tonschiefer

3.1.4 Quelltypen – Abflusscharakteristik – Hochwassergefährdung

Die Tonschiefer-Grauwacke Wechsellagerungen zählen zu den Klüftgrundwasserleitern. Die Grundwasserneubildungsrate hängt daher im entscheidenden Maße von der Trennfugendurchlässigkeit ab. Aufgrund des sehr gering nutzbaren Porenvolumens zählt das Unterkarbon als verhältnismäßig dichter Bereich ohne nennenswerte Grundwasserführung (HORSTIG 1979). Höhere Grundwasserneubildungsraten sind auf tektonische Störungszonen (Klüfte) beschränkt. Zudem bildet das Unterkarbon keinen zusammenhängenden Grundwasserleiter. Niederschläge, die nicht verdunsten oder im Boden gespeichert werden, fließen zwangsläufig oberflächennah ab.

Aufgrund der dichten paläozoischen Gesteine kommen in den silikatischen Mittelgebirgen des Franken- und Thüringer Waldes hauptsächlich Sicker-/Sumpfquellen, sogenannte helokrene Quellen, vor (BEIERKUHNEIN 1994). Daneben können einzelne Fließquellen (rheokrene Quellen) auftreten, die an wasserführende Klüfte in Bereichen von geologischen Verwerfungszonen gebunden sind (BEIERKUHNEIN et al. 1999).

Sickerquellen werden von oberflächennahem, hangparallel abfließendem Wasser gespeist (KLEBER & SCHELLENBERGER 1998), das häufig nach einer verhältnismäßig kurzen unterirdischen Fließstrecke wieder an die Oberfläche austritt und einen Vernässungsbereich bildet (Abb. 25). Durch die effektive Abführung der Niederschläge im Frankenwald gibt es eine Vielzahl von Bächen und Rinnsälen mit verhältnismäßig kleinen Teileinzugsgebieten. Die oberflächennah gespeisten, helokrenen Quellen weisen daher auch charakteristische Schüttungen im Jahresverlauf auf (BEIERKUHNEIN & GRÄSLE 1993). So können die zahlreichen wasserführenden

den Nebentälchen in den Sommer- und Herbstmonaten völlig trocken fallen, während sie im Frühjahr zur Schneeschmelze oder nach einem heftigen Gewitterregen sehr rasch hohe Quellschüttungen aufweisen (KLEBER & SCHELLENBERGER 1998). Durch das schnelle Abführen der Niederschläge kann es zu hohen Hochwasserscheiteln kommen, die jedoch genauso schnell wieder abklingen (ZWURTSCHKEK 1998, VON HEßBERG 2003, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2008). Das Abflussregime ist dem pluvio-nivalen Typ, mit einem Maximum im März/April und einem im November/Dezember, zuzuordnen.

Der jahreszeitlich bedingte große Unterschied im Abflussregime verdeutlicht das Beispiel des Wasserstandes der Haßlach bei Neukenroth (Einzugsgebietsgröße: 141 km²). Hier notiert der niedrigste gemessene Durchfluss bei 10 l/s, während bei einem errechneten 100jährigen Hochwasser 106000 l/s aus dem Gebiet abfließen können (aus: Pegeldata vom Bayerischen Landesamt für Umwelt – Hochwassernachrichtendienst). Solche Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalabfluss sind nicht einmal im Alpenraum zu beobachten.



Abbildung 25: Helokrene Quellaustritte können in beiden Untersuchungsgebieten sehr häufig beobachtet werden. Sie sind Anzeiger für hangaufwärts vorkommende laterale Hangwasserbewegungen im Boden.

3.2 Wassereinzugsgebiete der Röthen und der Tschirner Ködel

Zur Beantwortung des Fragenkomplexes (siehe Kap. 1) wurden das Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel im bayerischen Teil des Frankenwaldes und das Wassereinzugsgebiet der Röthen im thüringischen Teil (Abb. 26) ausgewählt. Die UTM - Koordinaten am Gebietsauslass der Tschirner Ködel betragen 4463430/5580489 (Rechtswert/Hochwert), die der Röthen 4441135/5582629 (Rechtswert/Hochwert).

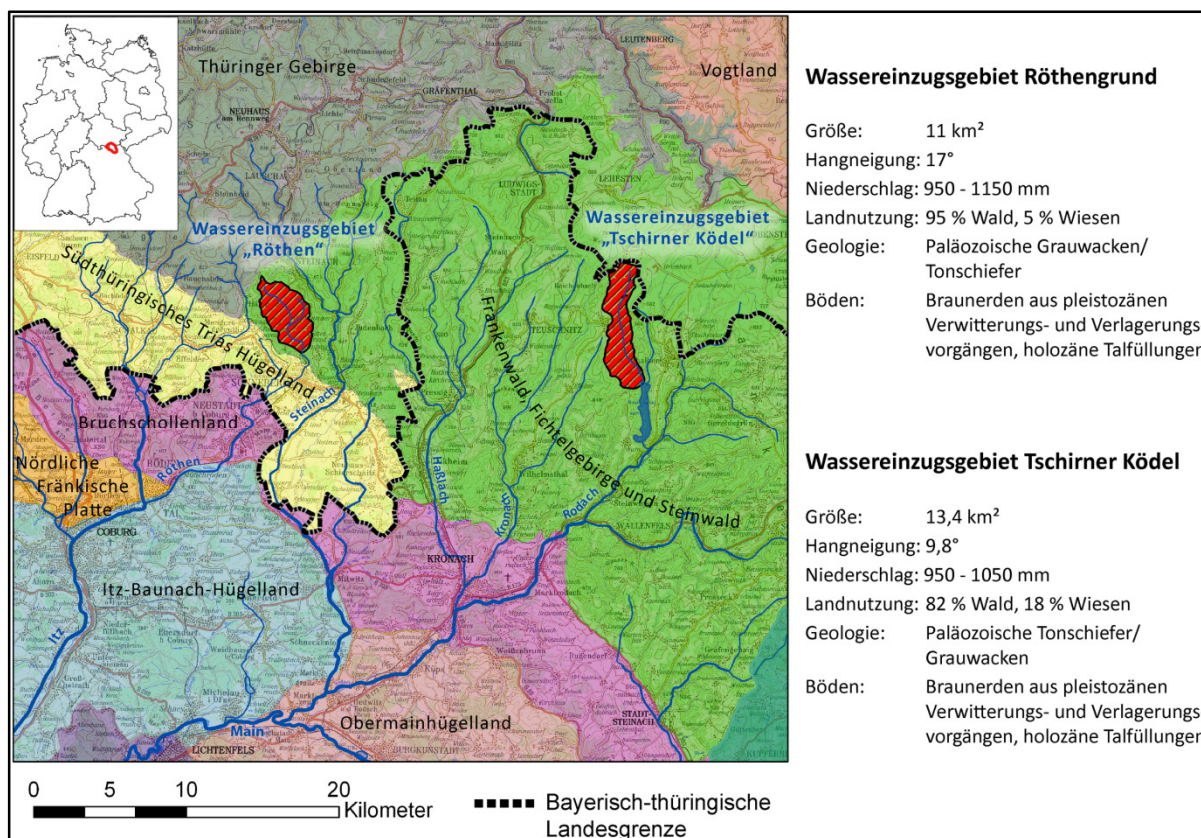


Abbildung 26: Lage der Untersuchungsgebiete (Datengrundlage: TK50, Bayerische Vermessungsverwaltung; Gewässernetz des Mains (DWGN25), Landesamt für Umwelt; Wuchsgebietsgliederung Bayern (LWF 2001); Thüringen (TLWJF 1997))

3.2.1 Wassereinzugsgebiet der Röthen (Thüringen)

In Thüringen wurde das Einzugsgebiet der Röthen, nördlich von Sonneberg gelegen, ausgewählt. Das Gebiet liegt im Übergang vom Sonneberger Tiefland zu den Hochlagen des Thüringer Waldes (Abb. 26). Es ist gekennzeichnet durch hochflächenähnliche Kuppen und tief eingeschnittene Kerbsohlentäler mit rasch ansteigender Sohle (SCHABER 1933). Die Einzugsgebietsfläche hat eine Ausdehnung von rund 11 km². Der Höhenbereich erstreckt sich von 422 m an der nördlichen Stadtgrenze von Sonneberg (Grüntal) bis 717 m über NN am Quellgebiet der Röthen. Das ovale Einzugsgebiet weist eine mittlere Hangneigung von 17° auf und ist in mehrere kleinere Teileinzugsgebiete untergliedert.

Die Temperatur bewegt sich im langjährigen Mittel (1980 - 2007) zwischen 6 und 7°C, die jährliche Niederschlagsmenge reicht von 950 - 1150 mm (aus: Niederschlagsdaten des Deutscher Wetterdienst 2008). Die Schichtserie des geologischen Untergrundes setzt sich aus wechsellagernden Grauwacken, kulmischen Tonschiefern und Quarziten des Unterkarbons („oberer Kulm“) zusammen (BIEWALD & VOIGT 2004). Im oberen Drittel des Einzugsgebietes quert ein schmales Kalkknotenschieferband aus der Schichtserie des Oberdevons. Die vorkommenden Deckschichten und der deutlich sichtbar, lateral eingeregelt Schieferschutt zeugen von periglazialen Solifluktionserscheinungen. Basislagen sind nach SCHILLING und SPIES (1991) in der Region weit verbreitet und treten nur auf Kuppen, Oberhängen, konvexen Hangabschnitten und sehr steilen Hängen in ihrer Verbreitung zurück. Die Bodenart ist ein schluffig-lehmiger Sand. Als Bodentyp herrscht eine meist mäßig trockene bis mäßig frische, stark bis zum Teil extrem grushaltige Braunerde mit ausgeprägter vertikaler Wasserführung vor.

(Halb-)Hydromorphe Böden (Pseudogleye, Hanggley-Braunerde, Pseudogley-Braunerde u.a.) sind reliefbedingt und bilden sich bevorzugt in Hangmulden, Senken, Unterhängen und in schmalen Abflusstälern aus (ALTERMANN et al. 1995). Im Bereich der Talsohlen kommen geröllführende (Schotter) Auenlehme (teilweise vergleitet) aus dem Holozän vor.

Auf 95 % der Fläche stockt Wald. Der Wald setzt sich aus 80 % Fichte, 19 % Buche und 1 % sonstigen Baumarten zusammen (Luftbilddauswertung). Bachbegleitende, frische bis feuchte Gebirgswiesen sind mit rund 5 % vertreten. Der obere Röthengrund stellt ein „abwechslungsreiches Mosaik charakteristischer, artenreicher und zum Teil seltener Mittelgebirgsbiotope“ dar und steht unter Naturschutz (TLUG 2010).

3.2.2 Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Bayern)

Auf der bayerischen Seite des Frankenwaldes fiel die Wahl auf das Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Abb. 26). Zusammen mit der Nordhalbener Ködel speist sie die Trinkwassersperre Mauthaus (Ködeltalsperre). Neben der Trinkwasseraufbereitung dient die Talsperre zur Zwischenspeicherung der verhältnismäßig hohen Winterabflüsse (STMLU 1997). Das mesoskalige Wassereinzugsgebiet umfasst eine Fläche von rund 13,8 km². Der Höhenbereich erstreckt sich von 440 bis 722 m über NN. Wie im Sonneberger Untersuchungsgebiet verläuft das Einzugsgebiet in Nord-Süd Richtung und entwässert über die Rodach in das Gerinnenetz des Mains. Das Tal der Tschirner Ködel ist geprägt durch steilwandige Kastentäler mit schmalen, aber ebenen Talböden, die durch Schmelzwassermassen während des Pleistozäns entstanden sind und ihr Aussehen in jüngster Zeit nur durch die Ablagerung von Auenlehm und Gehängeschutt in den Seitentälern veränderten. Hangneigungen von bis zu 45° (mittlere Hangneigung 9,8°) sind dabei keine Seltenheit. Die klimatischen Verhältnisse sind gekennzeichnet durch ein kühl-feuchtes Mittelgebirgsklima im Übergangsbereich zu ozeanisch-kontinental geprägten Klimaten.

Die Jahresdurchschnittstemperatur (1980 - 2007) beträgt 6,7°C (aus: Temperatur- und Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes 2008). Die mittleren Jahresniederschläge im gleichen Zeitraum betragen bei dem im Luv des Frankenwaldes gelegenen Gebiet um 1000 mm. Geologisch-petrographisch dominieren Tonschiefer (Silt-, Dach- und Bordenschiefer) in Wechsellagerung mit feinkörnigen Grauwacken und Wetzsteinquarziten des Unterkarbons (HORSTIG 1979). Durch die höheren Anteile von Tonschiefer wird das Gebiet, im Gegensatz zum Sonneberger Röthengrund, in den unteren Kulm gegliedert.

Aus den im Spätpleistozän entstandenen Solifluktsdecken entwickeln sich mittel- bis tiefgründige, lehmige Braunerden (SPIES 1991) mit einer typischen A_n-B_v-C_v Horizontfolge. In Lagen oberhalb 500 m ü. NN sind rostgelbe Lockerbraunerden anzutreffen (SCHILLING & SPIES 1991). Die Oberböden sind locker gelagert, gut durchwurzelbar und weisen einen hohen Steinanteil auf. Besonders augenscheinlich sind die hangparallel ausgerichteten Schiefer-scherben. Die gut drainierten Deckschichten sind auch hier durch eine hohe vertikale Wasserleitfähigkeit charakterisiert (HORSTIG 1979). Die vorkommenden Zweischichtböden sind im Untergrund durch eine zum Teil abrupte Änderung der Lagerungsdichte und der Bodenart gekennzeichnet, die als Staukörper für den vertikalen Wassertransport fungiert.

Auf den Hochflächen, in wasserzuflussbegünstigten Mulden und an den Unterhängen kommen kleinflächig stau- und grundwasserbeeinflusste Böden (Pseudogleye, Braunerde-Hanggleye) hinzu (ZUCKER 1996). Die Talaue und die Seitentäler sind aufgrund des ganzjährig hohen Grundwasserspiegels von Gleyen und Anmoorgleyen geprägt.

Das Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel ist zu 83 % bewaldet (Luftbildauswertung). Fichtenreinbestände stocken auf rund 62 % der Fläche. Einen größeren Teil nehmen gemischte Bestände aus Fichte und Buche mit 29 % ein. Buchenreinbestände sind auf rund 6 % der Fläche vertreten. Der Rest (3 %) setzt sich aus verschiedenen Edel- und Weichlaubhölzern zusammen.

4. Material und Methoden

4.1 Datengrundlage

Für die Untersuchungsgebiete wurden sämtliche Flächendaten, die sich zur potenziellen Hochwasserabschätzung eignen könnten, in der Tabelle 5 zusammengestellt. Viele der Daten lagen bereits in digitalisierter Form vor, andere mussten überarbeitet werden. Da eine Karte immer eine Generalisierung⁷ von in der Fläche gefundenen Informationen hinsichtlich bestimmter Zielstellungen und Anwendungsmöglichkeiten darstellt, wird geprüft, ob sich diese für eine hydrologische Klassifizierung verwenden lassen.

Tabelle 5: Übersicht des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials auf den Projektflächen im Frankenwald

Thüringen	Dateiformat	Ausgabejahr	Maßstab	Datenquelle
Einzugsgebietsshape "Röthen"	Shape	2008	-	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Geologische Karte alt/neu (GK25)	Karte	1882/2004	1:25000	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Hydrogeologisches Kartenwerk (HK50)	Karte	1984	1:50000	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Digitale Bodengeologische Konzeptkarte (BGKK100)	Shape/Karte	1974	1:100000	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Forstliche Standortkarte (FSK10)	Shape	1963/1983	1:10000	ThüringenForst
Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK100)	Karte	1978	1:100000	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
Digitales Höhenmodell (DGM5)	Raster 5x5	seit 1996	1:5000	Landesamt für Vermessung und Geoinformation
Echtfarbenorthophotos	Raster 20 cm	05.2006	-	Landesamt für Vermessung und Geoinformation

Bayern	Dateiformat	Ausgabejahr	Maßstab	Datenquelle
Einzugsgebietsshape "Tschirner Ködel"	Shape	2008	-	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Geologische Karte (GK25)	Karte	1979	1:25000	Bayerisches Geologisches Landesamt
Konzeptbodenkarte (KBK25)	Shape	2008	1:25000	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Forstliche Standortkarte (FSK10)	Shape/Karte	1996/1996	1:10000	Bayerische Staatsforstverwaltung
Bodenschätzungskarte (BSK25)	Shape	1974	1:25000	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Digitales Höhenmodell (DHM5/DHM10)	5x5 / 10x10	seit 1996	1:5000	Landesamt für Vermessung und Geoinformation
Echtfarbenorthophotos	Raster 40 cm	06.2005	-	Landesamt für Vermessung und Geoinformation

4.1.1 Geologische und hydrogeologische Karten

Eine geologische Karte bildet die Verteilung von Locker- und Festgesteinen, deren Lagerungsverhältnisse und Alterstellung einer Region in einer Tiefe von 0 - 2 m Tiefe ab. Sie ist eine wichtige Planungsgrundlage für die Trinkwassergewinnung, Raumplanung, Gefahrenabschätzung für Abfluss- und Erosionsvorgänge besonders im Alpenraum und Grundlage für Bodenkarten. Darüber hinaus bildet sie die Basis für weitere abgeleitete Kartenwerke. Hydrogeologische Karten geben Auskunft über die Durchlässigkeit des anstehenden Locker- und Festgesteins, die Richtung der Grundwasserzirkulation und das Vorhandensein von Quellen.

⁷ Generalisierung = Verallgemeinerung. Auswahl des Wichtigsten, Wesentlichsten und dessen zielgerichtete Verallgemeinerung (ARNBERGER 1994). Die Generalisierung besteht hauptsächlich aus der zweckentsprechenden Auswahl und Zusammenfassung der Objekte sowie der möglichst lagegenauen, charakteristischen, richtigen und eindeutigen grafischen Darstellung (SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FÜR KARTOGRAPHIE 2002)

Für das thüringische Untersuchungsgebiet liegt eine alte geologische Karte (1:25.000) von 1882 mit Erläuterungsband vor. Die Kartierungen erfolgten in den Jahren 1876 und 1881. Eine aktuellere Kartierung⁸ stammt aus dem Jahre 2004 (BIEWALD & VOIGT 2004, Blattnummer 5532), die allerdings nur das obere Drittel des Wassereinzugsgebietes abdeckt. Zur Abschätzung der Tiefensickerungsleistung (Grundwasserneubildungsrate) und Grundwasserführung des geologischen Ausgangsmaterials liegen hydrogeologische Karten (VOIGT 1983) vor.

Das bayerische Untersuchungsgebiet (Karte 5633/5634) wurde in den Jahren von 1970 bis 1975 kartiert (1:25.000). Im Unterschied zum thüringischen Gebiet basiert die Kartierung auf der Schichtgliederung nach VON GAERTNER (1950), der mit seinen Arbeiten eine genauere Untergliederung des vorkommenden Unterkarbons ermöglichte. Zur geologischen Karte gehört eine ausführliche Erläuterung, die Angaben zu hydrogeologischen Verhältnissen und typischen Böden aus den Gesteinen des Unterkarbons enthält.

4.1.2 Konzeptbodenkarten

Konzeptbodenkarten entstehen „am Schreibtisch“ durch Auswertung und Regionalisierung von flächenhaft verfügbaren Informationen. Als Grundlagendaten werden geologische Karten, Bodenkarten, Bodenschätzungskarten und forstliche Standortskarten für den Bewertungsprozess herangezogen. Ableitungen zu bodenrelevanten Geofaktoren und bodenphysikalische Kennwerte bestehender Bodenprofile unterstützen die flächenhafte Ausweisung der Kartiereinheiten. (Konzept-)Bodenkarten stellen in der Regel die obersten 2 m der Erdoberfläche dar.

In Thüringen liegt eine kleinmaßstäbliche digitale Bodengeologische Konzeptkarte (BGKK50) vor, die Information zu Leitbodenformen⁹ enthält. Erstellt wurde das Kartenwerk in den Jahren von 1969 bis 1974 und spiegelt somit den bodenkundlichen Kenntnisstand der 60iger und 70iger Jahre wider (RAU et al. 2000).

In Bayern werden aktuell Konzeptbodenkarten (KBK25) im Maßstab 1:25.000 erarbeitet, die zukünftig als Grundlage der bayernweiten Bodenübersichtskarte (1:200.000) dienen sollen. Für das bayerische Untersuchungsgebiet lagen die Konzeptbodenkarten 5634 (Teuschnitz) und 5534 (Lehesten) bereits vor. Ergänzend zur Karte konnte auf zwei unveröffentlichte Manuskripte des ausführenden Kartierteams aus dem Jahr 2002 zurückgegriffen werden (GEO-TEAM 2002). Sie enthalten die erarbeiteten Gebietsgrundlagen und eine knappe Beschreibung der ausgewiesenen Kartiereinheiten.

⁸ In Thüringen liegen neuere geologische Kartierungen nur für einige wenige Bereiche vor

⁹ Für ein bestimmtes Gebiet typische, flächenhaft auftretende Bodenform

4.1.3 Forstliche Standortskarten

Die forstlichen Standortskarten (1:10.000) dienen als Übersicht der einzelnen Standortstypen/-einheiten und sind ein wichtiges Entscheidungskriterium für waldbauliche Fragen zur Erziehung ertragreicher und stabiler (Misch-)Waldbestände. Die forstliche Standortserkundung stellt dabei Karten zur Verfügung, die umfangreiche Auskunft über den Waldbodenzustand geben. Sie stehen dem forstlichen Wirtschaftler vor Ort zur Verfügung und sind eine wichtige Planungsgrundlage für sein waldbauliches Handeln. Ziel der Standortkartierung ist die Erfassung aller für das Pflanzenwachstum wichtigen Umweltfaktoren, wie sie im Gelände durch Klima, Lage und Boden bestimmt werden. Der Standortstyp als forstökologische Grundeinheit ist ein Zusammenschluss von Standorten, die sich hinsichtlich ihrer Ertragsfähigkeit, der Gefährdung und den waldbaulichen Möglichkeiten einander ähnlich sind (ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG 2003).

Im Mittelpunkt des überregionalen (einstufigen) Aufnahmeverfahrens von Thüringen steht die Klassifikation und Abgrenzung von Standortsformen und Standortsformengruppen. Die Standortsformen ergeben sich aus dem Relief, dem Boden, der Vegetation und des Klimas. Dabei wird zwischen den veränderbaren Zustandseigenschaften (z. B. Humusform) und den nicht veränderbaren Stammeigenschaften (Boden, Grund- und Stauwasserstufe etc.) unterschieden. Die sehr viele Informationen enthaltenden Standortskarten wurden im Zuge des neu eingeführten Forsteinrichtungsverfahrens 1992 zur Standortseinheitenkarte vereinfacht, ohne die hinterlegten Bodeninformationen zu ändern. Für die Auswertung wurden beide Darstellungsformen im Maßstab 1:10.000 verwendet. Die Standortskarte im Untersuchungsgebiet „Röthengrund“ wurde in den Jahren 1961 - 1963 erarbeitet und 1978/79 aktualisiert (SCHRAMM 1983).

Die Forstliche Standortserkundung in Bayern wird nach einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Dabei erfolgt zunächst eine regionale Gliederung nach ökologischen Aspekten, auf deren Basis Wuchsgebiete (geographisch-physiografisch) und Wuchsbezirke (klimatisch) ausgeschieden werden. In einem zweiten Schritt erfolgt die Untergliederung der ausgewiesenen regionalen Einheiten (Substrattyp, Geländewasserhaushalt, Geländemorphologie, Vegetation und standörtliche Besonderheiten) hin zum Standortstyp, der die kleinste forstökologische Einheit darstellt (WOLFF et al. 1998). Zur Beschreibung der jeweiligen Standortstypen liegen den Standortskarten Erläuterungen bei. Die Standortskarte im bayerischen Untersuchungsgebiet setzt sich aus Kartierungen im Privatwald (1994 - 1995) und den Aufnahmen der Staatswaldflächen von 1982 - 1983 zusammen.

4.1.4 Bodenschätzungskarten

Laut Bodenschätzungsgesetz vom 16.10.1934 wird eine flächendeckende Kartierung sämtlicher landwirtschaftlicher Kulturböden innerhalb Deutschlands verlangt. Der Zweck lag und liegt in einer einheitlichen Bemessungsgrundlage für die Besteuerung landwirtschaftlicher Flächen. Dazu wurde der Boden hinsichtlich seiner Beschaffenheit, der räumlichen Abgrenzung sowie der Ertragsfähigkeit geprüft (BODSCHÄTZG 2007). Sie stellt die einzige vergleichbare Informationsquelle beider Ländern dar. In Thüringen ist die Bodenschätzungskarte jedoch nicht frei erhältlich und muss zentral eingesehen werden. In Bayern wird sie als georeferenzierte Karte im Maßstab 1:25.000 herausgegeben.

4.1.5 Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (Thüringen)

Grundlage der landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK100) sind die Manuskriptkarten der bodengeologischen Konzeptkarten. Für das Untersuchungsgebiet wurde sie nicht verwendet werden, da im Einzugsgebiet keine ackerbaulichen Flächen vorhanden sind. Grundsätzlich sind diese Karten zum Gebietsverständnis mit einzubeziehen, da sie Informationen über Bodenformen, Hangneigungen, Oberflächenrelief, Hydromorphie und Substratflächentyp enthalten.

4.1.6 Forstbetriebskarten/Forsteinrichtungsdaten

Forstbetriebskarten (1:10.000) und die dazugehörigen Revierbücher zeigen den Zustand der Bestockung zum Stichtag der Forsteinrichtungsplanung und dienen primär dem Vollzug des langfristigen Forstbetriebsplanes der jeweiligen Bestände. Als Bestand wird eine Ansammlung von Bäumen bezeichnet, die eine einheitliche waldbauliche Bewirtschaftung ermöglicht. Sie ist zugleich die kleinste Bewirtschaftungseinheit. Ferner sind das Einteilungs- und Wegenetz sowie die wesentlichsten Bewirtschaftungsmaßnahmen in ihr enthalten. Sie ist die Arbeitsgrundlage für die forstliche Praxis und dient darüber hinaus als Eigentums- und Grenznachweis. Nach Art. 18 Abs. 2 und Art 19 Abs. 2 des BayWaldG und § 20 Abs. 1 des ThürWaldG sind Forstbetriebspläne für Staatswald- und Körperschaftswaldflächen zu erstellen. In bayerischen Privatwald steht die Bewirtschaftung auf Grundlage von Forstbetriebsplänen frei. In Thüringen ist für Privatwaldflächen über 50 ha ein vereinfachter Betriebsplan zu erstellen.

4.1.7 Digitale Höhenmodelle und Orthophotos

Nach O`CALLAGHAN und MARK (1984) versteht man unter einem digitalen Höhenmodell eine numerische oder digitale Darstellung von Höhenwerten, die als Funktion die Oberflächenstruktur eines bestimmten Geländeausschnittes repräsentiert. Die einzelnen Datenpunkte werden durch x,y,z-Koordinaten definiert. x und y - Werte beschreiben die Lage in der horizontalen

Projektion der Erdoberfläche (Rechts- und Hochwerte), Z-Werte geben die zugehörige Höheninformation des dargestellten Geländeausschnittes wieder. Mit den drei Werten lässt sich ein dreidimensionales Abbild der Geländeoberfläche darstellen. Werden weitere Elemente, wie Siedlungsflächen, Verkehrsnetze, Geländekanten oder Gräben in das Höhenmodell integriert, spricht man von digitalen Geländemodellen (DGM, *Digital Terrain Model - DTM*).

Digitale Höhenmodelle dienen als Datengrundlage für eine Vielzahl von Berechnungen. Neben der Analyse von Landschaftsstrukturen (Reliefanalysen) sind Anwendungsmöglichkeiten bei der Planung von großflächigen Bauvorhaben (Verkehr, Infrastruktur etc.), in der Hydrologie als Basis zur Modellierung von Abflussereignissen und zur Berechnung von Erosionserscheinungen an Hängen zu finden. Im Wesentlichen unterscheidet man zwischen dem DGM5 (Zielmaßstab 1:5.000) und dem DGM25 (1:25.000). Die Zahlenangaben beziehen sich auf den Zielmaßstab und nicht, wie oftmals angenommen, auf die Rastergröße.

Die Detailgenauigkeit der Höhenmodelle hängt stark vom gewählten oder verfügbaren Aufnahmeverfahren und der Rastergröße ab. Hier bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Digitalisierung der Höhenflurkarte
- Terrestrische Geländeaufnahmen
- Fotogrammetrische Auswertung aus Stereo-Luftbildern
- Seit Mitte der 90iger Jahre: Laserscanning-Befliegungen

Die hier verwendeten Höhenmodelle stammen überwiegend aus Laserscanbefliegungen und weisen eine Rasterweite von 5 x 5 m mit einer Höhengenaugigkeit von $\pm 0,5$ m auf. Höhenmodelle aus Laserscanningdaten stellen eine sehr präzise Datengrundlage dar. Sie werden im Auftrag der Landesvermessungsämter erhoben und werden in naher Zukunft flächendeckend vorliegen. Im Bereich der Tschirner Ködel musste im südlichen Teil des Wassereinzugsgebietes auf ein Höhenmodell zurückgegriffen werden, das aus Höhenschichtlinien von 1903 erstellt wurde. Die Auflösung beträgt hier 10 x 10 m.

Als ein Orthophoto bezeichnet man vollständig entzerrte und georeferenzierte, maßstabsgetreue Luftbilder der Erdoberfläche. Die Bilder werden mit Hilfe von Befliegungen aufgenommen. Durch den relativ geringen Aufwand werden die Daten alle 3 Jahre aktualisiert. Mit Orthophotos ist es unter anderem möglich, einen flächenhaften Überblick über die Landnutzungsform und deren Struktur zu gewinnen. Weiterhin ist es möglich, durch Wasser geformte Reliefstrukturen zu erkennen, die auf Erosion infolge periodischen Wasserüberschusses schließen lassen können. Im bayerischen Untersuchungsgebiet fand der letzte Bildflug 2005 statt. Die Bilder liegen mit einer Bodenauflösung von 40 cm vor. In Thüringen erfolgte die Aufnahme ein Jahr später mit einer Auflösung von 20 cm.

4.2 Methodische Grundlagen

4.2.1 Geoinformationssysteme (GIS) und verwendete Software

„Geografische Informationssysteme wurden zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Darstellung raumbezogener Daten entwickelt“ (FÜRST 2004). Sie bestehen aus einem Computersystem (Hardware), der Anwendungssoftware und den digitalen geografischen Grundlagendaten. Im Umgang mit einem GIS unterscheidet man grundsätzlich zwischen zwei Konzepten. Vektordatenmodelle beschreiben statische Repräsentationen von Objekten, die sich eindeutig räumlich voneinander abgrenzen lassen. Sie werden durch Punkte, Linien und Polygone dargestellt, deren Raumbezug durch Koordinaten festgelegt ist (FÜRST 2004). Informationen zu den einzelnen Elementen werden in Attributtabelle hinterlegt und geben einen thematischen Inhalt wieder (sog. Sachdaten). Sachdaten können entweder im GIS selbst gespeichert oder in einer mit dem GIS verbundenen Datenbank hinterlegt werden.

Oberflächenstrukturen werden im Rasterformat gespeichert. Am weitesten verbreitet ist die Strukturierung in einem regelmäßigen Raster in Form von quadratischen Zellen („Pixel“). Durch die Umwandlung ungleichmäßig verteilter Rasterzellen in ein gleichförmiges Gitteraster (Interpolation) entsteht eine zusammenhängende Fläche mit geometrischem Bezug, deren Einzelpunkte in Verbindung zueinander analysiert werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Genauigkeit des Höhenmodells in Abhängigkeit vom gewählten Interpolationsverfahren unterschiedlich gut ausfallen kann.

Einen weitaus größeren Effekt auf die Genauigkeit hat die Größe der einzelnen Rasterzelle. Ist die Auflösung zu gering, sprich die einzelne Rasterzelle zu groß, wird die Geländeoberfläche zu stark geglättet („generalisiert“) und Änderungen in der Oberflächenstruktur (Geländekanten, Hangmulden, Hangrinnen etc.) werden nicht detailliert oder gar nicht dargestellt. Weiterhin kann an gekrümmten Flächen der sog. „Treppeneffekt“ auftreten. Für Abflussmodellierungen und geomorphographische Reliefanalysen in kleineren Wassereinzugsgebieten sollte daher die Rastergröße einen Wert von 25 x 25 m nicht übersteigen, um eine realitätsnahe Abbildung der Oberfläche zu erhalten (QUINN et al. 1994).

Da die verfügbare GIS-Software unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweist, wurden für die Auswertung, Verschneidung, Modellierung, Datenorganisation und Darstellung der Ergebnisse verschiedene Programme eingesetzt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

ArcGIS 9.2 (©1999-2006 ESRI Inc.)

ArcGIS von der Firma *ESRI* (Environmental Systems Research Institute) ist die mit Sicherheit bekannteste und am häufigsten verwendete GIS-Software. ArcGIS ist ein kommerzielles Produkt und ist gemessen an der Funktionalität der bereits bestehenden, kostenlosen Produktpalette für GIS-Systeme im Internet ein Programm mit recht hohem Anschaffungspreis. Mit der

hier verwendeten Version ArcGIS 9.2 wird eine Arbeitsplattform bereitgestellt, mit der sich in Abhängigkeit zur benötigten Funktionalität, das Programm mit drei unterschiedlichen Ausbaustufen verwenden lässt.

ArcInfo – die Ausbaustufe für professionelle Anwender mit einer Vielzahl von verschiedenen Funktionen; ArcMap – für anspruchsvolle Erfassungsaufgaben und ArcView, das vornehmlich der Visualisierung und der explorativen Analyse von Daten entwickelt wurde (ESRI 2009). Darüberhinaus lassen sich die Ausbaustufen durch Erweiterungen („Funktionsblöcke“) in ihrer Funktionalität nachrüsten. Die in dieser Arbeit durchgeführten Arbeitsschritte wurde mit der Ausbaustufe ArcMap für ArcGIS 9.2 und der Erweiterung „*Spatial Analyst*“ für die rasterbasierende-Analyse der digitalen Höhenmodelle umgesetzt. Weiterhin wurde das Programm für die Verschneidung und Verknüpfung verschiedener Sachdaten und die kartografische Darstellung der Abflussprozesskarten benutzt.

Darüber hinaus wurde eine frühere GIS-Version von ESRI - „ArcView3.2“ - verwendet. Zusammen mit der Erweiterung „Hydrotools 1.0“¹⁰ (SCHÄUBLE 2003, Version 1.0) brachte diese Programmkonstellation die besten Analyseergebnisse der spezifischen Einzugsgebietsgröße hervor. „Hydrotools 1.0“ ist für private und wissenschaftliche Zwecke frei erhältlich (SCHÄUBLE 2003) und stellt zusammen mit ArcView3.x eine einfach zu bedienende Softwarelösung dar, mit der umfangreiche hydrologische Funktionen praxisgerecht berechnet werden können.

SAGA2.0.3

Das im Internet frei erhältliche Geoinformationssystem SAGA¹¹ (System for Automated Geoscientific Analyses – Version 2.0.3 vom 30.10.2006) wird in einer Kooperation der Arbeitsgruppe Geosystemanalyse des Geographischen Instituts der Universität Göttingen mit der *scilands GmbH*, entwickelt. Es ist ein vollwertiges GIS das sowohl Raster- als auch Vektordaten verarbeitet. Neben standardmäßigen GIS-Funktionen verfügt das Programm auch über ein Werkzeug zur Reliefanalyse. SAGA wird von den Betriebssystemen Windows und Linux unterstützt und unterliegt der GNU-Public-License (GPL), was die freie Verfügbarkeit des Quelltextes (open source) garantiert. Weniger geeignet ist das Programm für die Erstellung aufwendiger Layouts und die Datenorganisation. Verwendet wurde SAGA 2.0 für die Berechnung des Saga Wetness Index.

¹⁰ <http://www.terracs.com/produkte/software/hydro-tools.html>

¹¹ <http://www.saga-gis.org>

BWinPro-S 9.7

Das Waldwachstumsprogramm BWINPro¹² ist eine Entwicklung der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt in Göttingen, die im Rahmen des Projektes TreeGrOSS die Software betreut (NAGEL et al. 2002). Dem Anwender stehen eine Reihe von Nutzungsmöglichkeiten bei der Simulation von Durchforstungs- und Erntemaßnahmen sowie der grafischen Darstellung der Bestände zur Verfügung. Neben der Originalversion gibt es verschiedene Regionalversionen, z. B. BWinPro-S = Sachsen. Verwendet wurde das Programm ausschließlich zur Erstellung von Stammverteilungsplänen der Berechnungsflächen (siehe Anhang, A 3 - A 7). Auch hier wird als Lizenzmodell die General Public Licence (GPL) eingesetzt.

¹² http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/simulator_ww.htm

4.2.2 Digitale Reliefanalyse und Abflussmodellierung

Laut DIKAU und SCHMIDT (1999) versteht man unter dem Georelief die Grenzfläche zwischen der Lithosphäre/Pedosphäre und der Atmosphäre/Hydrosphäre. Sie beschreibt somit die zwei-dimensionale Ausformung der Erdkruste im dreidimensionalen Raum, die sich im Laufe der Zeit durch geomorphologische Prozesse herausgebildet hat. Ausgangspunkt für eine Reliefanalyse ist das Vorhandensein eines digitalen Höhenmodells, das die Geländestruktur in Form von Punktwerten beschreibt. Die Georeliefklassifikation erfasst die räumlichen Merkmale des Georeliefs¹³ und fasst diese, anhand bestimmter Kriterien, zu korrespondierenden Reliefeinheiten zusammen. Dadurch ist eine Charakterisierung der Landschaft in Bezug auf prozesssteuernde Geländestrukturen möglich. „Die grundsätzlichen Stärken der digitalen Reliefmodellierung liegen in der automatisierbaren, objektiven geomorphografischen Reliefgliederung sowie der Analyse von reliefbezogenen ... Raumobjekten ...“ (DIKAU & FRIEDRICH 1999). Innerhalb der Reliefklassifikation gibt es verschiedene Verfahren zur Ableitung geomorphographischer Parameter. Man unterscheidet zwischen einfachen, komplexen und zusammengesetzten Parametern (DIKAU & SCHMIDT 1999). Ersterer werden durch eine Analyse der Beziehung eines Zentralpixels zu deren Nachbarpixel (Nachbarschaftsanalyse, meist in einer 3 x 3 Pixel Umgebung) berechnet und sind daher direkt aus den Höhendaten ableitbar.

Hierzu zählen die Erstellung von Hangneigungsklassen, Krümmung der Geländeoberfläche oder die Exposition. Die Berechnung von komplexen Parametern, wie zum Beispiel die spezifische Einzugsgebietsgröße (a) oder die Fließakkumulation (Abb. 27), die für die Berechnung von oberirdischen und lateralen Stoff- und Energieflüssen bedeutend ist, erfolgt nicht durch eine direkte Nachbarschaftsanalyse, sondern wird über die gesamte Matrix des DGM (über Lagebeziehungen) heraus analysiert (BRINKMANN 2002). Von zusammengesetzten Parametern spricht man, wenn eine Kombination aus einfachen und komplexen Parametern durch die Verknüpfung von Attributen und Objekten erfolgt. Hier ist der topografische Wetness Index $\ln(a/\tan\beta)$ als das Ergebnis aus der Kombination von spezifischer Einzugsgebietsgröße (a) und der lokalen Neigung (β) zu nennen (BEAVEN & KIRBY 1979).

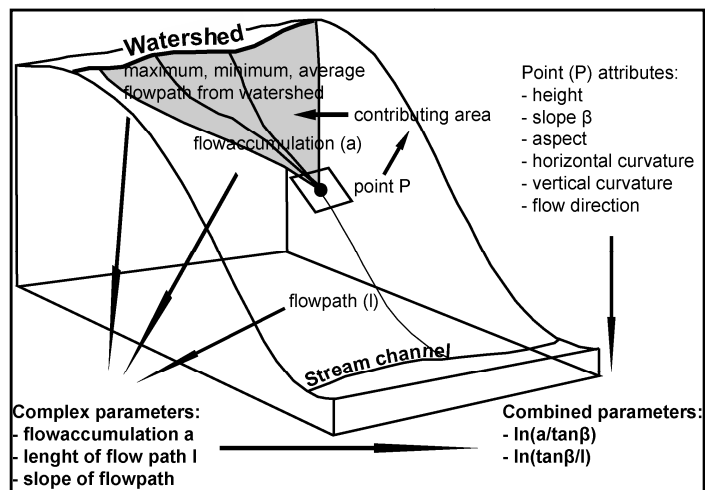


Abbildung 27: Schema zur Ableitung hydrologisch relevanter Parameter aus Geländemodellen (aus: DIKAU & SCHMIDT (1999), verändert)

Hierzu zählen die Erstellung von Hangneigungsklassen, Krümmung der Geländeoberfläche oder die Exposition. Die Berechnung von komplexen Parametern, wie zum Beispiel die spezifische Einzugsgebietsgröße (a) oder die Fließakkumulation (Abb. 27), die für die Berechnung von oberirdischen und lateralen Stoff- und Energieflüssen bedeutend ist, erfolgt nicht durch eine direkte Nachbarschaftsanalyse, sondern wird über die gesamte Matrix des DGM (über Lagebeziehungen) heraus analysiert (BRINKMANN 2002). Von zusammengesetzten Parametern spricht man, wenn eine Kombination aus einfachen und komplexen Parametern durch die Verknüpfung von Attributen und Objekten erfolgt. Hier ist der topografische Wetness Index $\ln(a/\tan\beta)$ als das Ergebnis aus der Kombination von spezifischer Einzugsgebietsgröße (a) und der lokalen Neigung (β) zu nennen (BEAVEN & KIRBY 1979).

¹³ geomorphometrische Daten wie Neigung, Höhe, Exposition etc.

4.2.3 Abflussalgorithmen

Abflussalgorithmen berechnen die Abflussrichtung, die ein hypothetischer Oberflächenabfluss, beginnend von den Wasserscheiden bis in die Tiefenlinie des Reliefs, nehmen würde. Grundvoraussetzung für die Abflussmodellierung ist ein senkenfreies Geländemodell. Senken sind abflusslose Bereiche, die häufig als Folge der Diskretisierung der Erdoberfläche im Geländemodell hervorgerufen sind („Artefakte“). Sie können eine bedeutende Fehlerquelle im simulierten Abflussprozess darstellen, da die Weitergabe des Stoffflusses immer an eine bzw. mehrere tiefer liegende Zellen gebunden ist. Ist dies aufgrund einer Senke oder Ebene nicht möglich, bricht der Algorithmus ab und beginnt vom Neuen. Durch die Funktion „Fill Sinks“ (ArcGis 9.2) werden abflusslose Senken so lange aufgefüllt, bis eine eindeutige Abflussrichtung zu einer der acht Nachbarzellen besteht. In der Hydrologie gibt es verschiedene Ansätze Fließwege zu berechnen.

Der „**single flow direction**“ Ansatz z.B. nach JENSON und DOMINIQUE (1988) oder O`CALLAGHAN und MARK (1984) beruht auf der Tatsache, dass eine Zelle immer nur in die Zelle mit dem größten Neigungsgradienten entwässert, d.h. das größte Gefälle bestimmt die Abflussrichtung. Eine Abflusstrennung erfolgt nicht. Dieser vereinfachte, eindimensionale Ansatz eignet sich zum Beispiel zur Modellierung von Gerinnenetzen.

Im Fall des „**multiple flow direction**“ Verfahrens (z.B. QUINN et al. 1991) oder dem „**Deterministic**“ Ansatz von TARBOTON (1997) wird der Abfluss divergent an die nächst tieferliegenden Nachbarzellen weitergegeben. Die Modellierung erfolgt durch die prozentuale Aufteilung der Wasserflüsse in Abhängigkeit zum Gefälle der betrachteten Zelle und ihrer Nachbarzellen (Abb. 28). Durch die unterschiedlich langen Fließwege zwischen den diagonal und vertikal verlaufenden Fließrichtungen muss die Neigung in diagonaler Richtung korrigiert werden. Dies kann auf verschiedene Weise erfolgen. Der verwendete multiple flow Ansatz von SCHÄUBLE (2003) berechnet das relative Gewicht

aus dem Höhenunterschied zwischen Quellpixel und dem darunterliegenden Pixel und dem Quotienten aus Wurzel 2 (Abb. 28). Im Unterschied zur Berechnung nach QUINN et al. (1991) wird der Abfluss in das am tiefsten liegende Pixel etwas weniger betont. Auf Grundlage der ermittelten Transportwege können verschiedene Abflussberechnungen durchgeführt werden. Die hier verwendeten Ansätze werden kurz vorgestellt.

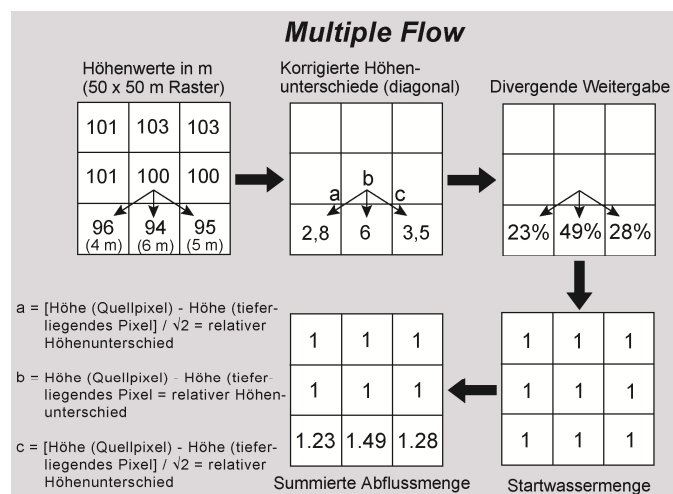


Abbildung 28: Darstellung des Berechnungsprinzips der Fließakkumulation nach dem multiple flow Verfahren (aus: SCHÄUBLE 2003, verändert)

Spezifische Einzugsgebietsgröße - Fließakkumulation

Die Fließakkumulation (Flow Accumulation) gibt Auskunft über die potenzielle Wassermenge, die auf einer undurchlässigen Oberfläche von der Wasserscheide bis zur Tiefenlinie zusammenfließen würde. Dazu wird eine Rasterdatei generiert, die für jede Zelle einen Wert berechnet, welcher der Menge an Zellen entspricht, die in die nächst tiefer liegenden Zellen entwässern (TARBOTON 1997, CONRAD 1998). Die wasserbeitragende Fläche (m²) ergibt sich aus dem Produkt der Flächengröße der Rasterzelle (hier: 5m x 5m = 25 m²) des Höhenmodells und der berechneten akkumulierten Abflussmenge.

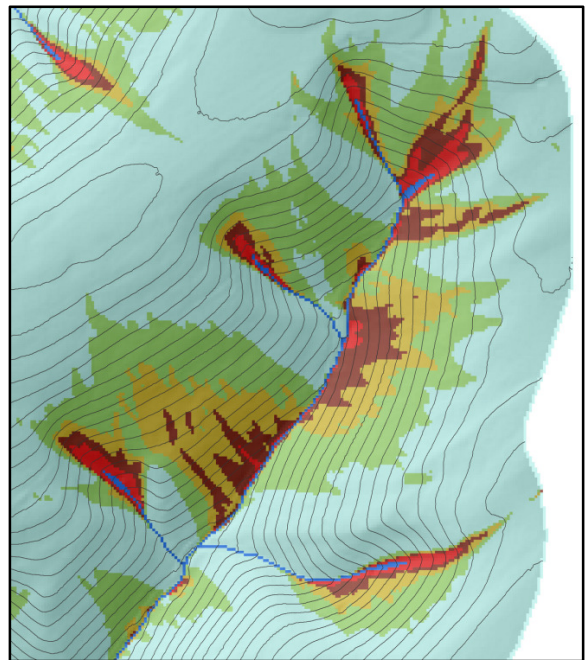


Abbildung 29: Fließakkumulation nach dem kombinierten Verfahren von Schäuble (2003) in einem Teileinzugsgebiet der Röthen (Stüb-leinsgrund). Die wasserbeitragenden Flächen nehmen von hellblau-grün-gelb über braun und rot zu. Der modellierte Bachlauf ist blau dargestellt.

Die Bestimmung des exakten Fließwegs ist für die Genauigkeit der beitragenden Fläche (a) ein entscheidender Faktor. Für die Berechnung wurde ein kombinierter Ansatz angewandt, der nach Erreichen eines nutzerspezifischen

Schwellenwertes zwischen dem multiple flow Ansatz und dem single flow Verfahren automatisch wechselt. So wird die unterirdische Abflusskomponente nach dem zweidimensionalen multiple flow Verfahren berechnet, während die Modellierung des Gerinnenetzes nach dem single flow Verfahren geschied. Umgesetzt wurde dies mit der Erweiterung „Hydrotools 1.0“ (SCHÄUBLE 2003, Version 1.0) für ArcView3.x.

Hohe Werte spiegeln Flächen wider, auf denen sich viel Abfluss konzentriert (Auen, Mulden), während Bereiche mit niedrigen Werten auf Standorte mit Abflussdivergenz (Streuung) hinweisen (Abb. 29). Die Größe des lokalen Einzugsgebietes wird in dieser Untersuchung mit dem Vorhandensein/Nichtvorhandensein von Zwischenabfluss (Abfluss in der gesättigten Zone) in Verbindung gebracht und anhand von gebietsspezifischen Schwellenwerten festgelegt. Über die Berechnung der Fließakkumulation lassen sich zudem Rückschlüsse zur reliefbedingten horizontalen Ausdehnung der Fließbahnen an Hängen ziehen.

QUINN et al. (1991) weisen aber auch darauf hin, dass die Fließwege des Interflows im Untergrund mit denen der Oberflächenstruktur in vielen Fällen nicht identisch sind und es zu Abweichungen der Modellergebnisse mit der Realität kommen kann. Aufgrund der großflächig verbreiteten periglazialen Lagenbildung des Frankenwaldes und der damit verbunden homogenen Bodenstruktur und der wasserundurchlässigen Grundgesteins/Verdichtungslagen, sollte der Fließweg des Interflows recht zuverlässig über die Geländeoberfläche herleitbar sein.

Topografischer Wetness Index

Der topografische Index $TWI = \ln \frac{a}{T \tan \beta}$ beschreibt die Bodenwassersättigung und die Bodenfeuchteverteilung anhand des Reliefs (MOORE et al. 1993, WILSON & GALLANT 2000, CONRAD 1998). Er entstammt dem hydrologischen Modell *Topmodel* (BEVEN & KIRBY 1979) und berechnet sich in einer nichtlinearen Abhängigkeit aus dem Verhältnis der spezifischen Einzugsgebietsgröße (a, zufließende Wassermenge) und der lokalen Hangneigung (β) als Grad für den zum Weitertransport benötigten Gradienten. Zur Vereinfachung wird auf Böden mit einheitlichen Bodeneigenschaften die gesättigte Wasserdurchlässigkeit (Transmissivität) des Bodens häufig gleich 1 gesetzt und daher vernachlässigt. Voraussetzungen für die Verwendung des Topografischen Wetness Index sind:

- gute Infiltration und homogene Bodendurchlässigkeit
- Durchlässigkeit nach unten hin begrenzt, Sperrschicht (kein Verlust ins Aquifer)

Hohe Indexwerte stehen für Flächen mit großen lokalen Einzugsgebiet und geringer Hangneigung, wie sie zum Beispiel am Auslauf konvergierender Hangformen häufig zu finden sind (Abb. 30). Neben der zweidimensionalen Modellierung von Wasserflüssen eignet sich der Ansatz auch zur Beschreibung der Akkumulationstendenz von solifluidal bewegtem Material (SCHOLTEN & BEHRENS 2004). Der in dieser Arbeit verwendete SAGA Wetness Index ist mit dem topografischen Index vergleichbar, verwendet laut BÖHNER et al. (2002) jedoch einen modifizierten Ansatz zur Berechnung der spezifischen Einzugsgebietsgröße.

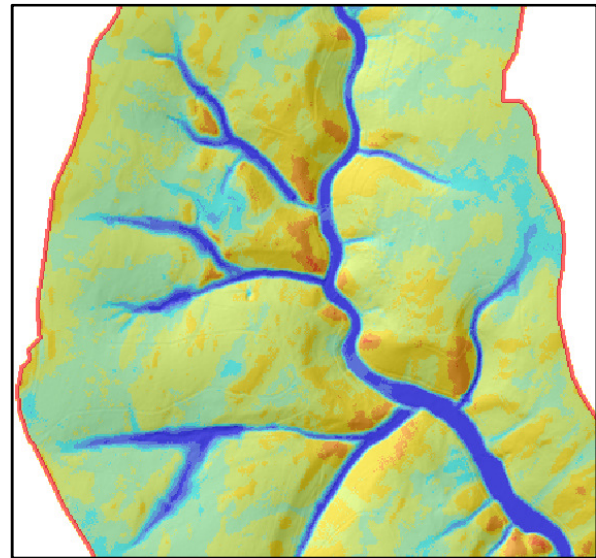


Abbildung 30: Topografischer Wetness Index am Beispiel eines Gebietsausschnitts der Tschirner Ködel. Gelb-orange Standorte kennzeichnen trockene Bereiche, blaue Standorte sind Standorte mit potenziellem Wasserüberschuss

Divergenz/Konvergenz Index

Ein weiterer Reliefparameter wurde über den Konvergenz-Index von KÖTHE und LEHMEIER (1996) hergeleitet (Abb. 31). Der Konvergenz-Index ist mit der einfachen Horizontalwölbung vergleichbar. Er gibt das Maß des Zusammenstrebens (Konvergenz) bzw. der Streuung (Divergenz) des Abflusses auf der Geländeoberfläche an (KÖTHE 1996). Das heißt, jede Rasterzelle enthält einen Wert, der beschreibt, in welchem Maße abfließendes Wasser auf die Nachbarzellen verteilt wird bzw. wie viel Wasser eine Zelle von den umliegenden Nachbarzellen erhält (KÖTHE 1996). Divergierende Flächen erhalten positive Werte, bei konvergierenden Reliefformen werden negative Werte vergeben.

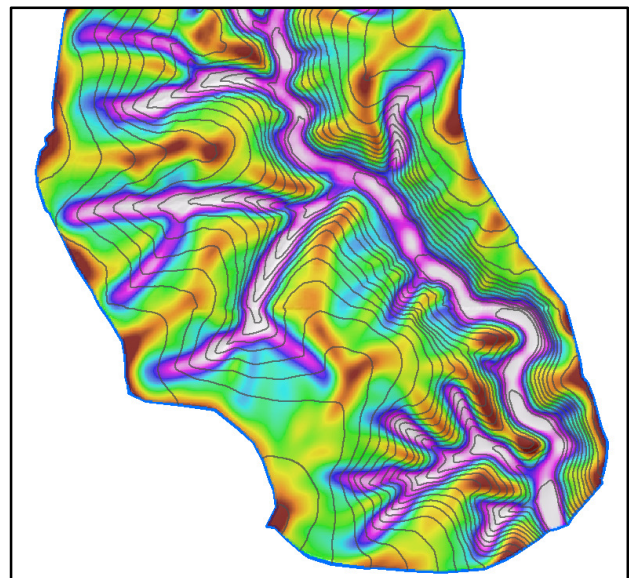


Abbildung 31: Konvergenz-Divergenz Index am Beispiel des Gebietsauslass der Tschirner Ködel. Rote Flächen kennzeichnen konvexe Hangformen, weiße Flächen stark konkave

Maximale Divergenz ergibt sich, wenn der Abfluss in acht verschiedene Richtungen weitergegeben wird (Abb. 32). Maximale Konvergenz, wenn alle acht Richtungen in einen Punkt entwässern. Mit Hilfe dieses Wertes können z. B. divergente Abtragungsbereiche, wie Kuppen, Hangrücken und Hangrippen im Einzugsgebiet ausgewiesen werden.

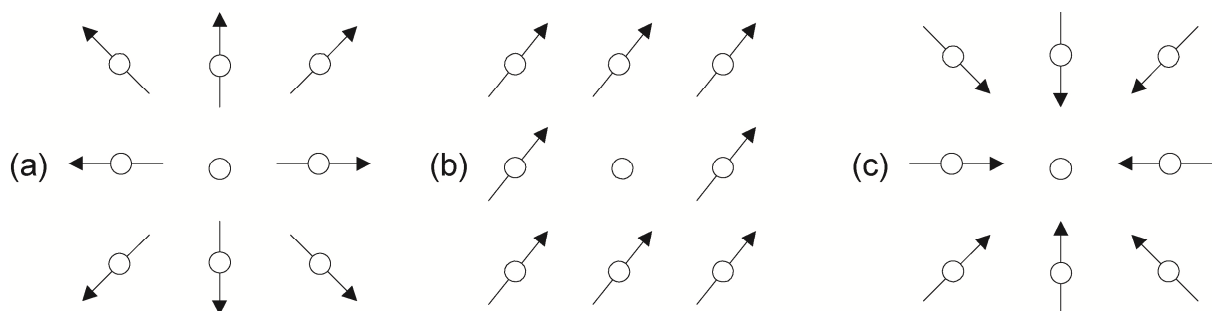


Abbildung 32: Divergenz/Konvergenz Index und seine Berechnung in Abhängigkeit zu den Expositionen der Nachbarzellen, a) 100% Divergenz, b) 0%, c) 100% Konvergenz, nach KÖTHE & LEHMEIER (1994), aus: CONRAD (1998)

4.3 Eigene Standortkartierung

Um die standörtlichen Verhältnisse vor Ort bewerten zu können und zu prüfen, ob mit den Aufnahmekriterien und den technischen Hilfsmitteln der Standortkartierung eine Klassifizierung von hochwassersensitiven Flächen überhaupt möglich ist, wurden im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel ein 70 ha großer Geländeausschnitt und zwei kleinere, zufällig ausgewählte Gebiete (2 x 5 ha) gemäß den bayerischen Aufnahmekriterien standortkundlich analysiert (Abb. 33). Im Vordergrund stand dabei die möglichst genaue Erfassung des Wasserhaushaltes in Hinblick auf potenzielle Hochwasserentstehungsgebiete. Insgesamt wurden 400 Pürckhauerbohrungen bis in eine Tiefe von 1 m bei einem variablen Kartierraster von 50 x 50 m durchgeführt. Auf Bereichen mit erkennbar erhöhter Abflussbereitschaft, das sind in der Regel alle grundfrische/feuchte, sickerfeuchte, und wechselfeuchte Standorte, wurde der Abstand zwischen den einzelnen Aufnahmepunkten verdichtet. Zusätzlich konnten auf 10 Bodengruben, die im Zuge der Beregnungsversuche angelegt wurden, zurückgegriffen werden.

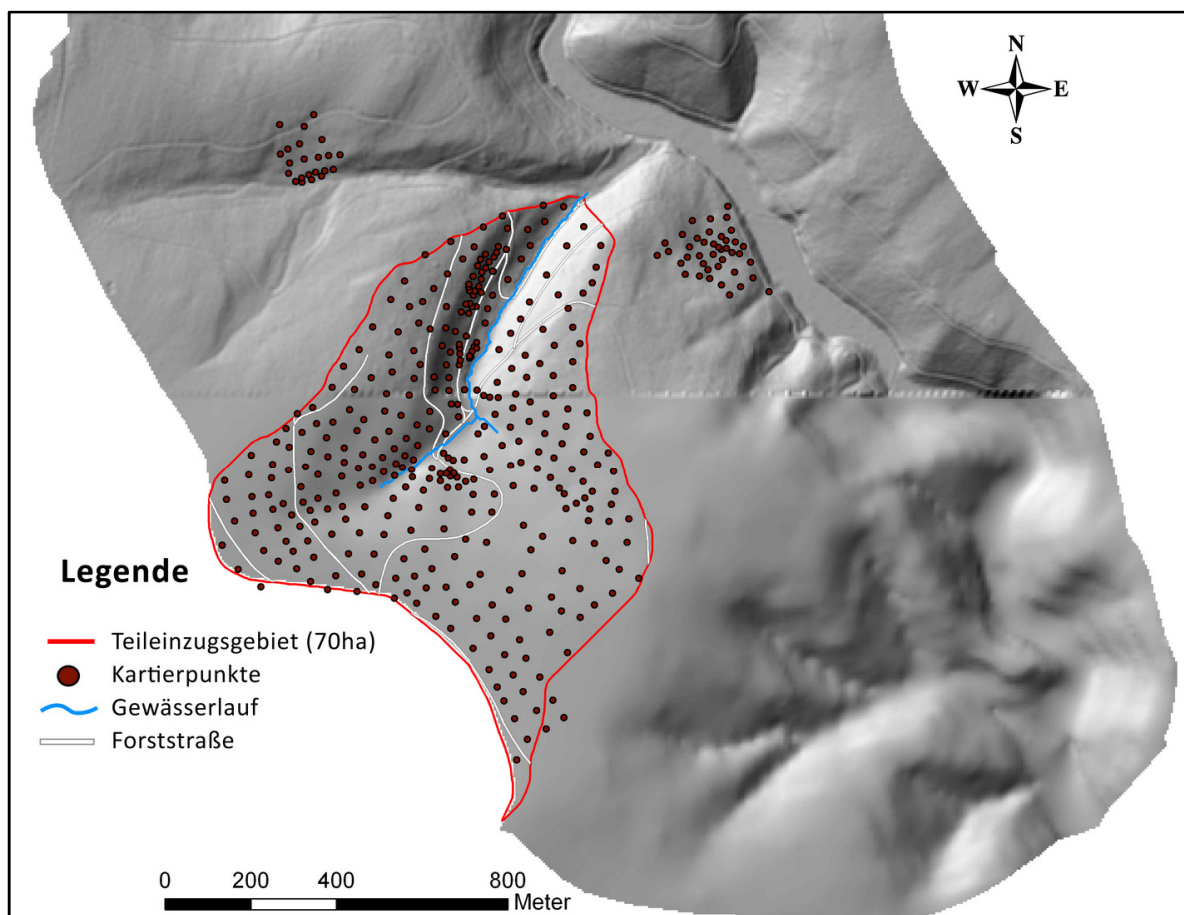


Abbildung 33: Verteilung der Bohrstockeinschläge im standortskartierten Teileinzugsgebiet sowie zwei weiterer Muldenstandorte im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel (Punktaufnahme mittels GPS); klar erkennbar auch die zwei unterschiedlich gut aufgelösten digitalen Höhenmodelle, die das Wassereinzugsgebiet abdecken (oben – DHM aus Laserscanbefliegung, unten – DHM aus Höhengichtlinien).

4.4 Berechnungsversuche – Aufbau und Methodik

Auswahl der Berechnungsflächen

Die Auswahl der Berechnungsflächen stellte die größte und anspruchsvollste Aufgabe für das Gelingen der Berechnungsversuche dar. In Wechselbeziehung mit der Vegetation wird der Abflussvorgang im Wesentlichen von den Bodeneigenschaften eines Standortes bestimmt (LEHNARDT 1985, LÜSCHER & ZÜRCHER 2002). Daher mussten Standorte gefunden werden, die aufgrund ihres Aufbaues einander ähnlich sind, sodass eventuelle baumartenabhängige Effekte im Abflussverhalten nicht durch standörtliche Unterschiede überlagert werden. Anhand von Kartenmaterial und Luftbildern wurden zunächst Wassereinzugsgebiete in der Region vorausgewählt, die sowohl Fichten- als auch Buchenbestände aufwiesen. Die auszuwählenden Bestände sollten annähernd gleichaltrig sein, um altersbedingte Unterschiede im Wurzelwachstum auszuschließen. Die am Schreibtisch vorselektierten Flächen wurden vor Ort aufgesucht. Als Auswahlkriterium im Bestand galt ein ruhiges Oberflächenrelief, um ein seitliches Abdriften des abfließenden Wassers zu vermeiden. Ebenso müssen alle Flächen eine vergleichbare Hangneigung aufweisen. Der von der forstlichen Standortskarte ausgewiesene Wasserhaushalt sollte mäßig frisch bis frisch sein. Weiterhin mussten die Berechnungspartellen gut erreichbar, am besten an einem Wegeanschnitt sowie an einer gesicherten Wasserversorgung liegen, um den Transport und Einsatz der Berechnungsanlage zu erleichtern.

Anhand zahlreich angelegter Bodengruben konnten weitgehend repräsentative Flächen ausgewiesen werden. In beiden Untersuchungsgebieten ist jeweils ein Standort dabei, der sich mit den übrigen nicht vergleichen lässt, da er im Untergrund einen temporär schüttenden Hangwasserzug aufweist (P3 & P10). Die beiden Standorte wurden trotzdem beregnet, da sie wichtige Informationen hinsichtlich der Reaktionsfähigkeit hochwassersensibler Standorten liefern können und zum Prozessverständnis der Hochwasserentstehung beitragen.

Hinsichtlich des Alters der Bestände mussten Kompromisse eingegangen werden, da es sonst nicht möglich war, alle Anforderungen an homogene Verhältnisse vor Ort zu verwirklichen. Insgesamt wurden fünf Flächen in Sonneberg (Thüringen) und sechs Flächen in Nordhalben (Bayern) für die Berechnungen ausgewählt (Abb. 34, 35). Die Bestandeskennwerte und die Stammverteilungspläne sind im Anhang A 1 - A 7 enthalten.

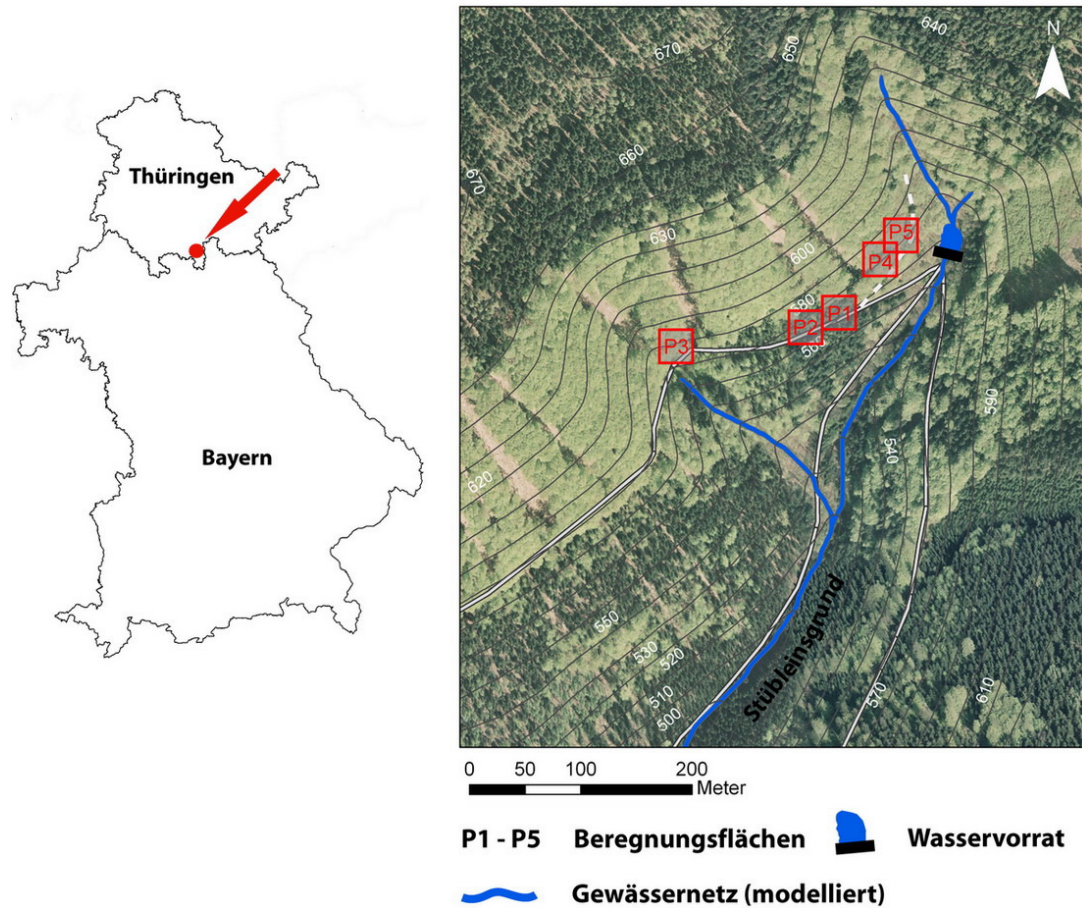


Abbildung 34: Anordnung der Berechnungsflächen im thüringischen Röhengrund (Datengrundlage: Echtfarbenorthobilder (Bildflug 2006); Höhenschichtlinien und Gewässernetz auf Basis DGM5 (Quelle: TLVermGeo)

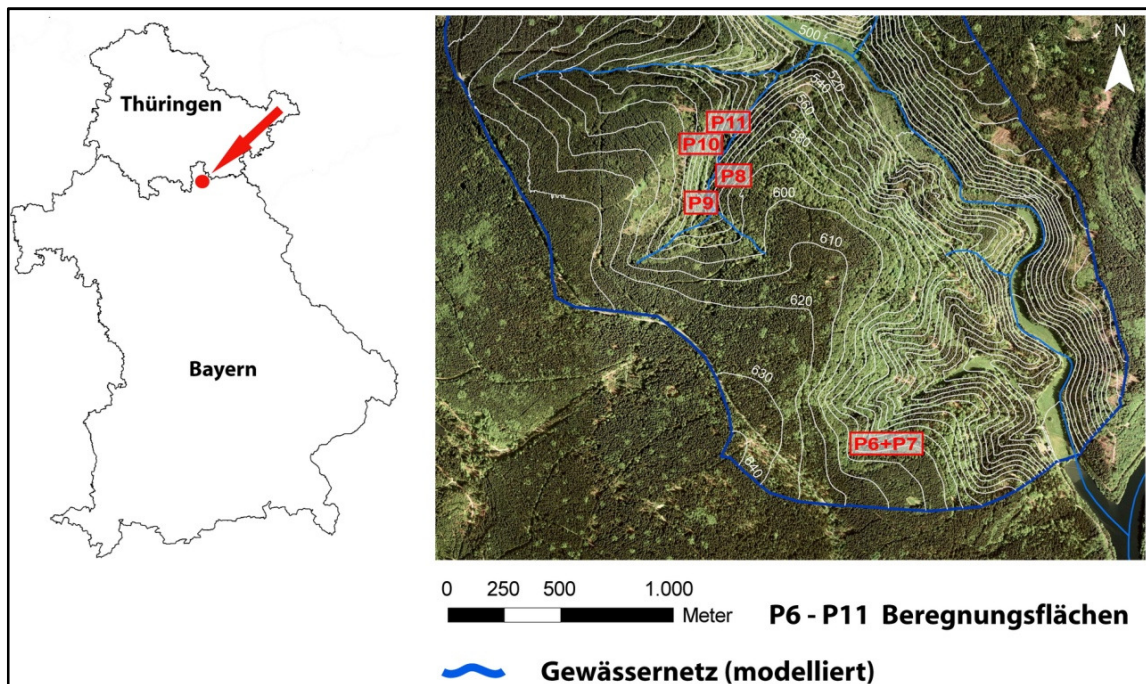


Abbildung 35: Anordnung der Berechnungsflächen im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Datengrundlage: Echtfarbenorthobilder (Bildflug 2005); Höhenschichtlinien und Gewässernetz auf Basis DGM5 (Quelle: Landesamt für Vermessung und Geoinformation)

Beregnungsanlage

Für die vorliegende Untersuchung kam eine Großregenanlage nach der Methode von KARL und TOLDRIAN (1973) zum Einsatz, die es unabhängig von der Witterung erlaubt, Starkregenereignisse mit festgelegter Niederschlagsintensität und Niederschlagsmenge zu simulieren (Abb. 36). Dadurch lassen sich beliebig viele Versuche auf unterschiedlichen Böden oder Vegetationskomplexen durchführen und wiederholen, sodass deren abgeflossene Niederschlagsmenge sich miteinander vergleichen lässt.

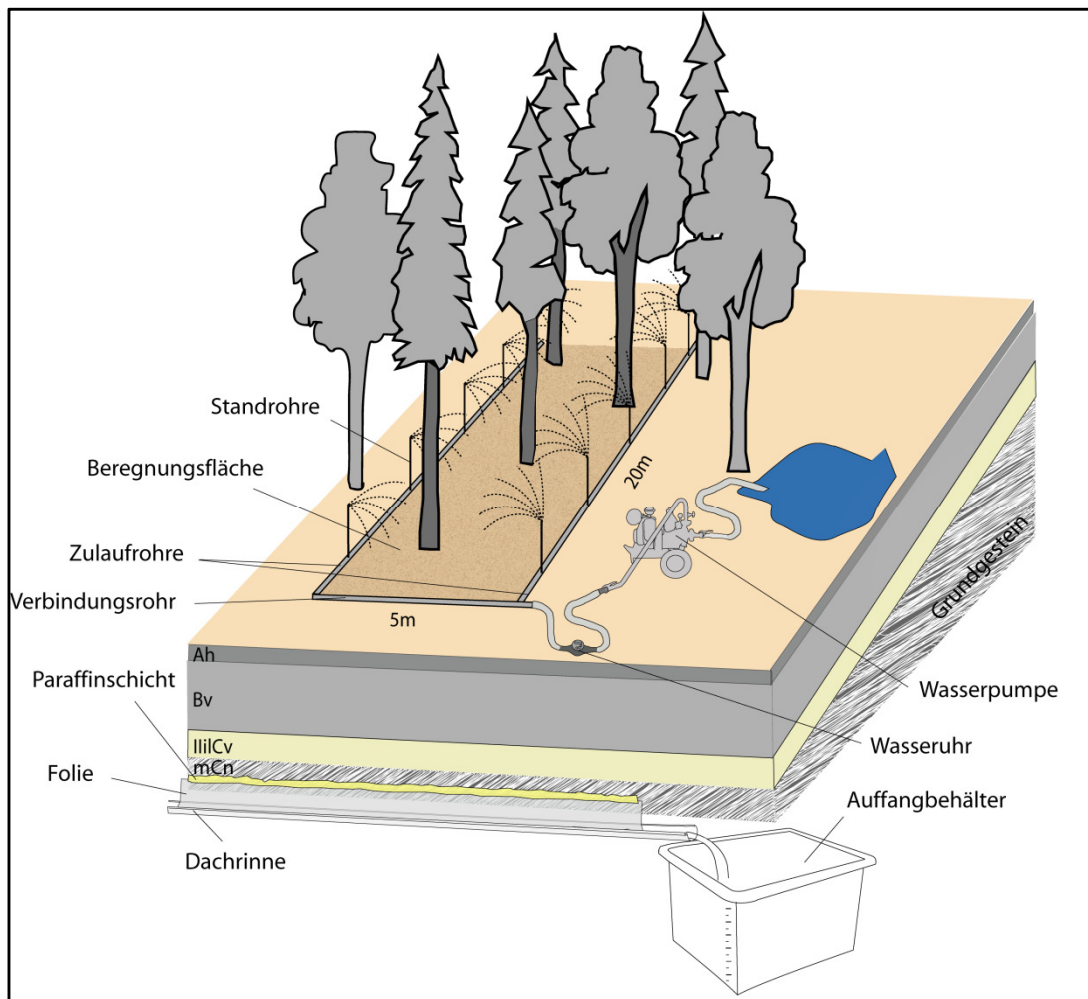


Abbildung 36: Schematisierter Versuchsaufbau der verwendeten, transportablen Beregnungsanlage

Das Rohrsystem besteht aus mehreren Edelstahlrohren die mit Kardangelen-Kupplungen miteinander verbunden sind. Die angebrachten Stützfüße halten das System stabil und gleichen kleinere Bodenunebenheiten aus. Die auf den Zulaufrohren befindlichen Niederdruckdüsen der Firma PERROT erzeugen einen 180° Regenfächer (Abb. 36). Der bei einer angestrebten Wurfweite von 5 m nötige Wasserdruck von 2,5 bar wurde durch eine benzinbetriebene Wasserpumpe erreicht. Durchflussbegrenzer in den Standrohren gewährleisten, dass auch im stark geneigten Gelände an allen Düsen der gleiche Wasserdruck anliegt. Die Bereg-

nungsintensität kann über die Anzahl der verwendeten Niederdruckdüsen gesteuert werden. Die Intensität wurde in dieser Untersuchung auf 50 mm/h (83 l/min) festgelegt, bei einer Beregnungsfläche von 100 m² (5 m breit x 20 m lang). Die simulierte Niederschlagsintensität entspricht laut Kostra-Atlas (DEUTSCHER WETTERDIENST 2005) in etwa einem 100-jährigen Starkregenereignis im Frankenwald und wird daher nur bei ausgesprochen heftigen Wolkenbrüchen erreicht. Davon unberührt bleiben kürzere Regenschauer, die durchaus eine noch höhere Niederschlagsintensität erreichen können. Die beaufschlagte Niederschlagsmenge pro Versuch (50 mm) liegt hingegen im Bereich eines jährlich auftretenden, 24stündigen Niederschlagsereignisses im Mittelgebirgsbereich. Nach zwei abgeschlossenen Beregnungen (2 x 50 mm) bewegt sich der Versuch innerhalb eines 100-jährlichen Ereignisses.

Zur Kontrolle der Niederschlagsmenge ist eine geeichte Wasseruhr in das Beregnungssystem integriert. Das für die Beregnung benötigte Wasser konnte direkt aus einem angestauten, wasserführenden Nebentälchen entnommen werden (Abb. 37).



Abbildung 37: Die Bereitstellung des Wassers für die Beregnungsversuche erfolgte über die Anlage von Sammelbecken

Beregnungsmethodik

Um auf den Beregnungsflächen gleiche Ausgangsbedingungen hinsichtlich der Bodenvorfeuchte zu gewährleisten, wurden zwei Vorberegnungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen bis zur vollständigen Aufsättigung der Profile durchgeführt. Sättigung wurde dann unterstellt, als deutlich Wasser aus der Profilwand austrat. Nach zwei Tagen Wartezeit (entleeren der schnell dränenden Grobporen) erfolgten zwei gemessene Beregnungen (2 x 50 mm) mit einer Niederschlagsdauer von jeweils einer Stunde und einer zweistündigen Pause zwischen den Versuchen. Im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel wurde in einer dritten Beregnung so lange beaufschlagt, bis keine weitere Erhöhung des Abflusses zu verzeichnen war, sprich Abflusskonstanz eintrat. Dies entsprach einer individuell unterschiedlichen Wassermenge, die sich in der Regel zwischen zusätzlichen 75 mm und 100 mm einstellte. Insgesamt wurden so

an einem Versuchstag zwischen 17500 l und 20000 l Wasser verbraucht (175 - 200 l/m²). Im Röhthengrund konnte aufgrund einer längeren Trockenperiode nicht genügend Wasser vorgehalten werden, um auch hier drei Beregnungsversuche durchführen zu können.

Um möglichst das gesamte abfließende Wasser wieder auffangen zu können, wurden unterhalb der Beregnungsfläche 8 m breite und 2 m tiefe Bodengruben bis zum anstehenden Grundgestein oder einer wasserundurchlässigen Schicht angelegt (Abb. 38).

Eine Pufferzone von mindestens einem Meter zu jeder Seite sollte seitliche Verluste durch abdriftendes Wasser minimieren.

Die übliche Methode zum Auffangen des Abflusses mittels Auffangblechen war aufgrund des hohen Skelettanteils der Böden und der zum Teil sehr dichten Lagerung im Untergrund nicht möglich. Als Alternative wurde eine reißfeste Folie mit Nägeln am Bodenprofil fixiert und anschließend mit erhitztem, flüssigem



Abbildung 38: Fertiges Bodenprofil mit laufender Beregnungsanlage im Hintergrund

Paraffin (Schmelztemperatur 52°C) und Druckluft mit der Profilwand verklebt. Um künstlich geschaffene Fließwege zu vermeiden, wurde das zuvor ausgekofferte Bodenprofil mit einem Handspaten nochmals einen halben Meter in die Tiefe abgestochen und tiefengelockerte Gesteinsteile entfernt. Das abfließende Wasser konnte so von der Profilwand über die Folie in eine Auffangrinne und von dort in eine kalibrierte Messeinrichtung abgeleitet werden.

Aufgrund des hohen Skelettgehaltes der verdichteten Horizonte und der Veränderung der Fließwege durch die nicht vermeidbare Bodenstörung wurde auf den aufwendigen Einbau von TDR-Sonden zur Wassergehaltsbestimmung innerhalb des Beregnungsfeldes verzichtet.

Abflusskennwerte

Aus den erfassten Abflussmengen und -zeiten ist es möglich, für jede Fläche Kennwerte zu ermitteln, die den Abflussprozess charakterisieren und so einen Vergleich der Flächen hinsichtlich ihrer Hochwassersensitivität erlauben (Abb. 39).

Der Kennwert *Abstraktionszeit* (in min) ist dabei die Zeit, die vom Beginn der Beregnung bis zum Einsetzen des Abflusses vergeht. Die Verzögerung der Abflussreaktion wird durch Anfangsverluste hervorgerufen, die durch Speicherung von Niederschlagswasser infolge von Interzeption, Muldenrückhalt, Wasserzischenspeicherung im Boden und der vertikalen und lateralen Fließgeschwindigkeit des Wassers in der Bodenmatrix entstehen (STEPANEK et al. 2004).

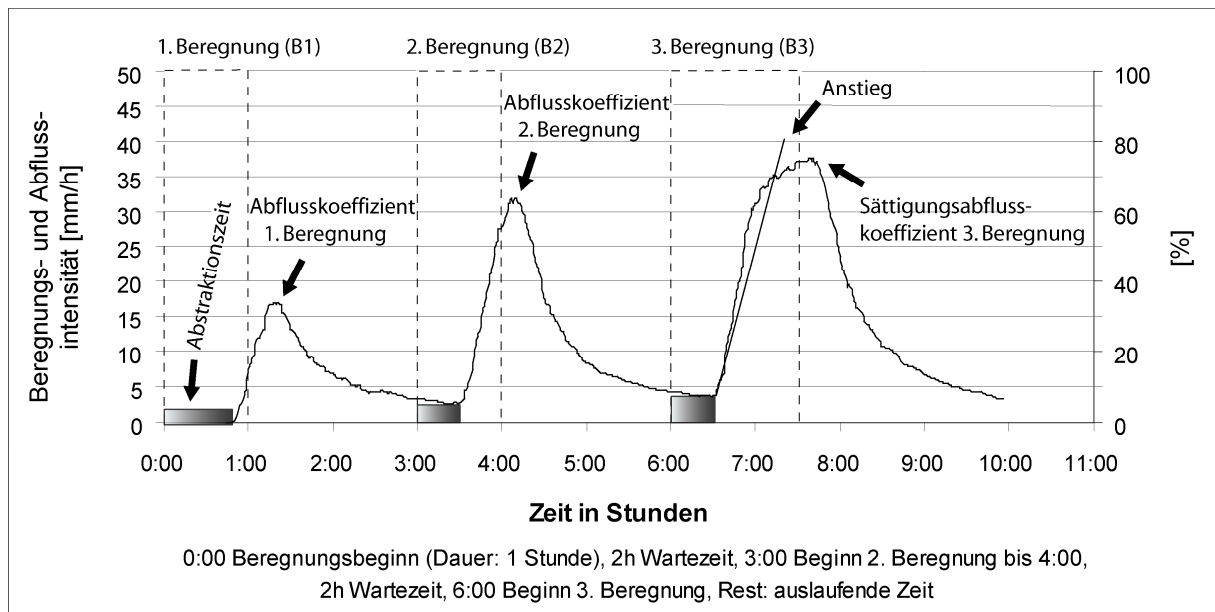


Abbildung 39: Beregnungsschema und ableitbare Parameter aus der Abflussmessung

Der *Sättigungsabflusskoeffizient* (Ψ_{const} , hier ausgedrückt in %) kennzeichnet diejenige Menge an Wasser, die bei Abflusskonstanz bei gegebener Niederschlagsintensität maximal zum Abfluss gelangt (steady state). Er beinhaltet nicht die Anfangsverluste, die durch die bereits erwähnten Faktoren entstehen. Vielmehr stellt er die maximale Wassermenge pro Zeiteinheit dar, die tatsächlich in die Auffangbehälter gelangt und abflusswirksam ist. Würde man eine geneigte, wasserundurchlässige Oberfläche beregnen (asphaltierte Straße etc.), so ließe sich annähernd die gleiche Abflussintensität im Verhältnis zur Beregnungsintensität feststellen, was einem Sättigungsabflusskoeffizienten von 100 % entspräche.

Da mit der Niederschlagsmenge der ersten zwei Beregnungen keine Abflusskonstanz erreicht wurde, sind die Abflussspitzen als momentane Abflusskoeffizienten zur 1. und 2. Beregnung zu verstehen (Abb. 39).

Aus dem Quotient der Abflusskoeffizienten der ersten und zweiten Beregnung und dem Sättigungsabflusskoeffizienten lässt sich ein Verhältniswert („*Abflussintensität*“) berechnen, der den Wasserrückhalt des Standortes in Abhängigkeit zum aufgebrauchten Niederschlag der vorherigen Beregnung charakterisiert. Geht man davon aus, dass während der dritten Beregnung bei Abflusskonstanz 100 % der standortsspezifischen, maximal möglichen Menge Wasser abfließt, charakterisiert der Verhältniswert das Wasserrückhaltepotenzial der vorangegangenen Beregnungen in Abhängigkeit zum maximal möglichen Abfluss bei gegebener Niederschlagsintensität. Eine Abflussintensität von 80 % zur zweiten Beregnung signalisiert somit einen Standort, der bereits nach 100 mm Niederschlag in der Nähe des maximal möglichen Abflusses liegt (Sättigungsabflusskoeffizient) und somit als abflussintensiv zu beurteilen wäre.

Weiterhin interessiert der Anteil des abfließenden Wassers, der als *volumetrischer Abflussbeiwert* (hier in Prozent) bezeichnet wird. Er ergibt sich aus dem Quotienten der Abflusssumme

und der Niederschlagsmenge ($\Psi = (\sum Q / \sum N) * 100$). Dieser Wert sinkt unter Freilandbedingungen um denjenigen Anteil an Wasser, der im Boden gespeichert wird, ins Grundgestein infiltriert oder auf anderem Weg die Messeinrichtung nicht erreicht. Es ist eine Verhältniszahl, die in Abhängigkeit zu spezifischen Gebietseigenschaften, wie Hangneigung, Form, Bodendurchlässigkeit und -speichervermögen sowie den Ausgangsbedingungen wie Vorfeuchte, Niederschlagsdauer und den Verlauf der Regenintensität steht (STEPANEK et al. 2004).

Als Kennwert, wie intensiv die Abflussreaktion einsetzt, wurde der *lineare Anstieg* ($y = mx+n$; y = Abfluss in mm/h, x = Zeitänderung) der Abflussreaktion berechnet. Dazu wurde eine lineare Funktion in die ansteigende Abflusskurve gelegt. Der Anfangspunkt der Geraden stellt den Beginn der Abflussreaktion dar, während der Endpunkt bei 95 % des maximal erreichten Abflusskoeffizienten liegt, um die Gerade bei zeitlich verzögerter Abflusskonstanz nicht zu weit zu verflachen. Ein theoretischer Anstieg von $m = 1$ weist darauf hin, dass die aufgebrachte Niederschlagsmenge in der gleichen Intensität zur Beregnungsstärke zum Abfluss gelangt und eine sehr hohe Fließgeschwindigkeit innerhalb der Bodenmatrix bestehen würde. Bei einem geringeren Anstieg setzt die Abflussreaktion entsprechend langsamer ein, da die einzelnen Bodenteilspeicher unterschiedlich schnell effektiven Abfluss bilden oder Wasser zu größeren Teilen ins Grundgestein infiltriert und so der Anstieg der Abflussgeschwindigkeit herabgesetzt wird.

4.5 Bodenphysikalische Kennwerte

4.5.1 Skelettgehalt und Korngrößenanalyse

Zur Erleichterung der Interpretation der Berechnungsergebnisse wurden die wichtigsten bodenphysikalischen Parameter bestimmt, die Einfluss auf die Wasserspeicherkapazität und die Durchlässigkeit der Böden haben. Aufgrund der zum Teil extrem grus- und steinhaltigen Böden erfolgte die Auswertung des Skelettanteils an gestörten Proben und damit gewichtsbezogen. Dazu wurden aus der Profilwand tiefenstufenbezogene Bodenproben entnommen, bereits vor Ort durch verschiedene Rundlochsiebe gesiebt und in verschiedene Skelettfraction getrennt (Abb. 40). Das Probenvolumen ergab sich aus einem ca. 30 x 30 x 30 cm ausgestochenen Bodenwürfel der Mineralbodenhorizonte und umfasste damit 27 dm³. Unterschieden wurde nach den Regeln der AD HOC AG BODEN (2005) zwischen *Grobskelett* (> 20 mm), *Mittelgrus* (6,3 - 20 mm), *Feingrus* (2 - 6,3 mm) und *Feinerde* (< 2 mm). Zur Bestimmung des Wassergehaltes des Feinbodens wurden aus dem gesiebten Boden Proben entnommen und bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz im Labor getrocknet und mit den übrigen Skelettfractionen ins Verhältnis gesetzt.

Die Bestimmung der Bodenart erfolgte durch Analyse der Korngrößenzusammensetzung für jede einzelne Tiefenstufe. Die Korngrößenanalyse wurde durch Nasssiebung der Fraktion 0,02 - 2 mm und Pipettanalyse von KÖHN (1928) des Bereiches < 0,02 mm nach DIN-ISO 11277 (2002) durchgeführt. Bei erkennbaren organischen Bestandteilen erfolgte zuvor die Zerstörung des Humus mit 30%iger Wasserstoffperoxidlösung. Die Angabe der Bodenart erfolgte nach AD HOC AG BODEN (2005) aus den Korngrößenanalysen.



Abbildung 40: Ausgesiebte Skelettfractionen - Feingrus (1), Mittelgrus (2), Grobskelett (3) - der beprobten Tiefenstufen am Beispiel des Bodenprofils P9

4.5.2 Effektive Lagerungsdichte

Aufgrund der sehr skelettreichen Böden konnten keine Normstechzylinder zur Probenentnahme verwendet werden. Eigens für die Außenaufnahmen im Frankwald kamen für die Bestimmung der Lagerungsdichte speziell angefertigte Ministechkappen zum Einsatz, die zwischen dem Skelettmaterial in den Boden gedrückt werden konnten (Abb. 41). Das Volumen der Stechkappen beträgt $1,571 \text{ cm}^3$. Aus jeder Tiefenstufe wurden mindestens drei Bodenproben entnommen und im Labor bei 105°C getrocknet und die Trockenrohdichte (TRD)



Abbildung 41: Stechkappe aus Chrom-Molybdän-Stahl

ermittelt. Im Anschluss erfolgte die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte. Sie setzt sich aus der Trockenrohdichte und dem Tongehalt des Bodens in Masse% zusammen und wurde nach der Formel von RENGER (1971): $L_{d,eff} = TRD [\text{g}/\text{cm}^3] + 0,009 \cdot \text{Ton}[\text{m}\%]$ berechnet.

4.5.3 Durchwurzelung

Da die Durchwurzelung einen maßgeblichen Einfluss auf das Abflussverhalten der Böden haben kann, wurden Wurzelanalysen vom Beginn des Mineralbodenhorizontes bis zum Grundgestein oder bis zu einer wurzelfreien Tiefenstufe durchgeführt. Die Probenentnahme erfolgte ebenfalls tiefenstufenbezogen am frisch abgestochenen Bodenprofil. Sämtliche Wurzeln wurden ausgesiebt, gewaschen, bei 40°C getrocknet, in Fein- ($< 2 \text{ mm}$), Mittel- ($2 - 10 \text{ mm}$) und Grobwurzeln ($> 10 \text{ mm}$) getrennt, gewogen und mit der Trockenmasse des Bodens der analysierten Tiefenstufe ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich ein Verhältniswert für die Wurzelmasse in g/kg Bodenmaterial, der als Weiser für die Durchwurzelung herangezogen wird. Ergänzend erfolgte eine makroskopische Ansprache der Durchwurzelungsintensität an der gesamten Profilwand nach den Regeln der AD HOC AG BODEN 2005.

4.5.4 Nutzbare Wasserspeicherkapazität

Um das potenzielle Wasserspeichervermögen der einzelnen Berechnungsprofile vergleichen zu können, wurde die nutzbare Wasserspeicherkapazität nach dem ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) geschätzt. Die nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK, Porenvolumen $0,2 \mu\text{m} - 50 \mu\text{m}$) berechnet sich aus dem Gesamtporenvolumen abzüglich der Luftkapazität (Poren $> 50 \mu\text{m}$) und der Restwasserspeicherkapazität (Poren $< 0,2 \mu\text{m}$) des Bodens. Die nWSK wird verwendet, da sehr kleine Poren mit hohem Totwasseranteil nicht als Wasserspeicher zur Verfügung stehen. Ebenso wenig tragen Grobporen zum Wasserrückhalt bei, da sie das Wasser rasch wieder abgeben.

4.6 Pegelsonden

Um den Einfluss der Baumart auf das Abflussgeschehen auch auf einer Einzugsgebietsskala zu dokumentieren, wurden Druckpegel­sonden in den Bachläufen installiert und der Wasserstand überwacht. Im Röhthengrund wurden dazu vier Teileinzugsgebiete ausgewählt. Sie sollten sich hinsichtlich der Baumartenzusammensetzung, nicht aber in der Größe, voneinander unterscheiden (Abb. 42). Im Bereich der Tschirner Ködel erfolgt die Messung des Wasserstandes durch das Wasserwirtschaftsamt Kronach. Zusätzlich wurde ein weiterer Pegellogger installiert. Der Messzeitraum bezog sich auf die Monate April - Mai. Der am Gebietsauslass der Röhthen installierte Pegel befand sich das ganze Jahr unter dem Wasserspiegel und zeichnete auch im Winter den Wasserstand auf, ohne dass Frostschäden an dem Pegel befürchtet werden mussten. Um die Pegel vor äußeren Einflüssen zu schützen, wurde ein Edelstahlrohr über die Sonden gestülpt und an der Bachmauer hochwassersicher befestigt.

Der von den Pegel­sonden gemessene Druck (temperaturkompensiert) setzt sich aus dem Druck der Wassersäule sowie dem barometrischen Luftdruck zusammen. Die Differenz der beiden Werte ermöglicht eine genaue Angabe des Wasserstandes (± 2 cm, Referenzluftdruck: Wetterautomat Sonneberg-Neufang). Die Werte wurden in Abständen von 30 min erhoben. Die technischen Spezifikationen der verwendeten Pegel­sonden liegen in Tabelle 6 vor.

Tabelle 6: Technische Spezifikationen der verwendeten Pegellogger

	Modell PLog2002	Modell PLog520 (INT)
Abmessungen	16x165 mm	23x200 mm
Gehäuse	Edelstahl	Edelstahl
Messwerte	Druck/Temperatur	Druck/Temperatur
Messbereich	0 - 10 bar/-20 ... +80°C	0 - 2 bar/0,2 ... +80°C
Messwertauflösung	0,25 mbar/0,003°C	0,16 mbar/0,01°C
Messgenauigkeit	0,1 % v. Messbereich/ $\pm 0,2$ °C	0,1 % v. Messbereich/ $\pm 0,1$ °C
Speicherkapazität	40000 Messwerte	500000 Messwerte
Aufnahmeintervall	2 Sek...24 h	0,05 Sek...24 h
Batterie	Lithiumbatterie	Lithiumbatterie
Batterielebensdauer	2 Jahre/Intervall 0,5 h	4 Jahre/Intervall 0,5 h

4.6.1 Pegelstandorte – Röthengrund

Pegel 1 („Stadt“; UTM- Koordinaten: Rechtswert 4441126 / Hochwert 5582663)

Um die Gesamtreaktion des bewaldeten Wassereinzugsgebietes auf ein Starkniederschlagsereignis zu untersuchen, wurde ein Pegel am Gebietsauslass am oberen Ende des Stadtgebietes installiert. Die überwachte Gebietsgröße beträgt 10,82 km².



Pegel 2 („Stübleinsgrund“; Rechtswert 4441024 / Hochwert 5583424)

Der zweite Pegel wurde am Gebietsauslass des Stübleingrundes befestigt. Das Gerinne weist hier eine markante Abflussamplitude auf. Während der Sommermonate fällt der kleine Bach fast vollständig trocken, während er im Winter meist hohe Abflüsse aufweist. Die entwässernde Fläche beträgt 1,07 km².

Pegel 3 („Wöhnbach“; Rechtswert 4440300 / Hochwert 5584181)

Die dritte Pegelsonde wurde im Teileinzugsgebiet „Wöhnbach“ installiert. Die Buche nimmt innerhalb des 1,12 km² großen Bereichs einen verhältnismäßig hohen Flächenanteil ein. Mit dem Pegel soll geprüft werden, ob das Gebiet auf konvektive Starkregenereignisse später reagiert als das Vergleichsgebiet (Pegel 4) mit flächiger Fichtenbestockung.



Pegel 4 („Gunnertsbach“; Rechtswert 4439871 / Hochwert 5585763)

Der letzte verbaute Pegel im Röthengrund ist das Gegenstück zu Pegel Nr. 3. Die Bestockung besteht hier größtenteils aus Fichte. Die Einzugsgebietsgröße beträgt 1,06 km².

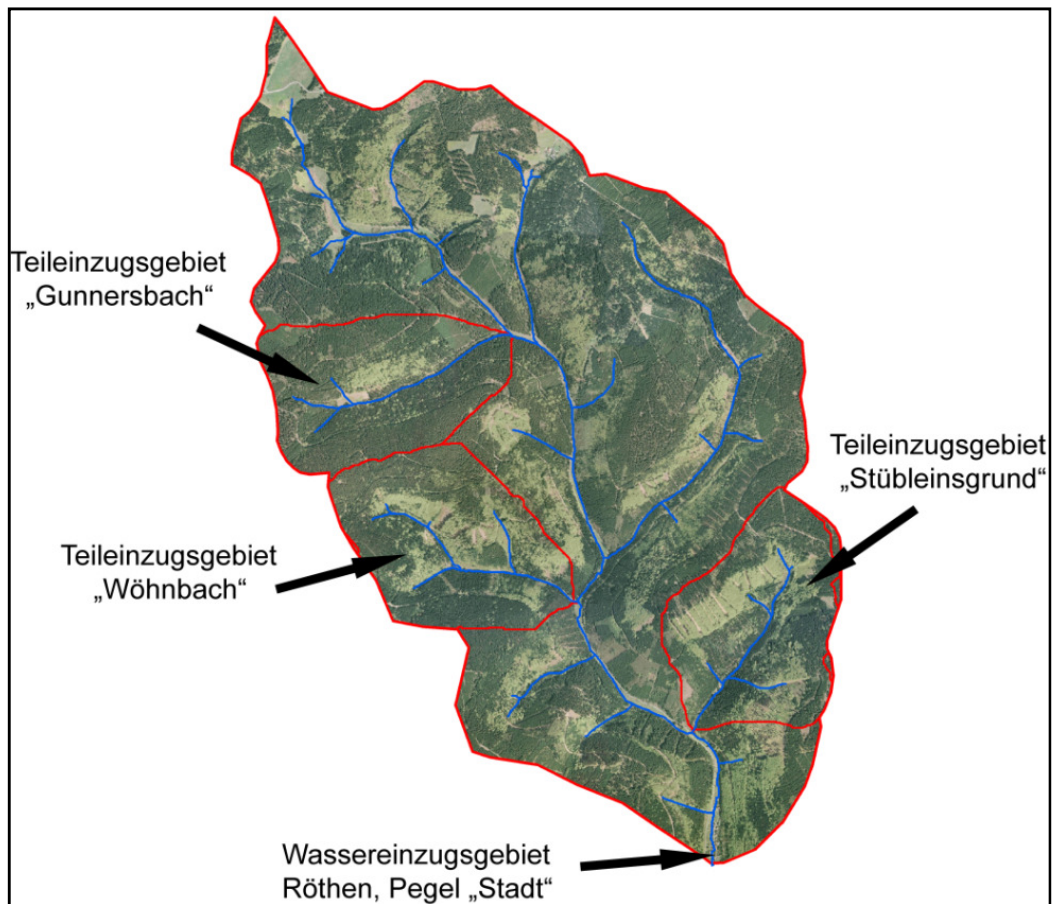


Abbildung 42: Überwachte Teileinzugsgebiete im Röhthengrund in der Übersicht

4.6.2 Pegelstandorte – Tschirner Ködel

Durch den lang gestreckten Lauf und die wenigen, nur schwach wasserführenden Seitenarme der Tschirner Ködel fanden sich keine vergleichbaren Teileinzugsgebiete. Neben dem Pegel des Wasserwirtschaftsamtes am Gebietsauslass wurde ein weiterer Pegel im eigens standortskartierten Gebiet befestigt.

5. Ergebnisse

Das Ergebniskapitel ist in drei Teile untergliedert. Teil 1 umfasst die Analyse des vorhandenen bodenkundlichen Kartenmaterials und bewertet dessen Eignung zur Klassifizierung abflusssensitiver Waldflächen (Kap. 5.1.1). Weiterhin wird in diesem Kapitel ein Klassifikationsverfahren vorgestellt, auf dessen Basis abflusssensitive Bereiche ermittelt und in Form einer Abflussprozesskarte dargestellt werden können (Kap. 5.1.2). Abschließend wird anhand einer eigens durchgeführten Standortkartierung die erstellte Abflussprozesskarte auf ihre Plausibilität hin geprüft (Kap. 5.1.3). Im 2. Teil werden die Ergebnisse der Berechnungsversuche in beiden Untersuchungsgebieten dargelegt (Kap. 5.2). Im letzten Teil erfolgt über eine Zusammenführung der beiden zuvor genannten Ergebnisteile eine Abschätzung des Waldeinflusses auf den vorbeugenden Hochwasserschutz in beiden Wassereinzugsgebieten (Kap. 5.3).

5.1 Ausweisung hochwassersensitiver Waldflächen

Die Idee, eine Karte zu erstellen, die die Landoberfläche in abflusssensitive und weniger abflusssensitive Bereiche gliedert, ist nicht neu (vgl. Kap. 2.8). Einzelne Abflussprozesskarten für bestimmte Regionen sind bereits veröffentlicht. Die Flächenscharfe dieser Karten hängt maßgeblich von der Qualität der zur Verfügung stehenden Grundlagendaten, wie Bodenkarten, forstliche Standortkarten und geologische Karten, ab. Eine flächenscharfe Ausweisung, auf deren Basis gezielte Waldumbau-, Aufforstungs- oder Bewirtschaftungsmaßnahmen abgeleitet werden können, steht bislang nicht zur Verfügung.

Im folgenden Ergebnisteil werden zunächst die forstlich-bodenkundlichen Grundlagendaten der Länder Bayern und Thüringen anhand von zwei Wassereinzugsgebieten im Frankenwald analysiert und geprüft, inwiefern sie sich zur Beantwortung hydrologischer Fragestellungen eignen. Aus dem vorhandenen Datenpool wird mit Hilfe von einfachen und nachvollziehbaren Reliefanalysen und Abflussmodellierungen versucht, die Informationen aus den Kartenwerken zu ergänzen und eine flächenscharfe Abflussprozesskarte zu erstellen. Weiterhin sollen aus der Analyse heraus, Hinweise für die Praxis gegeben werden, wie die bodenkundlichen Grundlagendaten verbessert werden könnten, sodass zukünftig hydrologische Fragestellungen gezielter beantwortet werden können.

5.1.1 Eignung bodenkundlicher Grundlegendaten – Ergebnisse aus der Sichtung verschiedener bodenkundlicher Kartenwerke der Untersuchungsgebiete

Geologische und hydrogeologische Karten (GK25/HK50)

Thüringen

Die veraltete geologische Kartierung aus dem Jahr 1882 klärt im Wesentlichen über die Entstehungszeit des anstehenden Ausgangsmaterials auf. Da die einzelnen Schichten des Unterkarbons früher als nicht kartierbar galten (HORSTIG, 1979), wurde lediglich zwischen dem tonschieferreicheren „Unteren Kulm“ und dem grauwackereicheren „Oberen Kulm“ unterschieden. Verknüpfungspunkte zur Bodenkunde bestehen nur wenige, da das geologische Ausgangsmaterial und dessen zeitliche Einordnung, nicht aber die Gesteinseigenschaften und die sich daraus entwickelnden Böden, untersucht wurden. Das Wassereinzugsgebiet der Röthen liegt laut LORETZ (1885) vollständig in der oberen Kulmbildung, die durch stark diagenetisch veränderte, kristalline Gesteine in Form von vorherrschenden Grauwacken und einzeln eingeschobenen Tonschieferschichten gekennzeichnet ist. Weiterführende Informationen fehlen. Auch Angaben zu periglazialen Solifluktsdecken, die erst in den 50/60iger Jahren durch den Beginn der systematischen Erforschung durch SCHILLING und WIEFEL (1962) sowie SEMMEL (1964) größere Aufmerksamkeit erfuhren, können in dem veralteten Kartenwerk nicht enthalten sein.


Die neuere geologische Kartierung aus dem Jahre 2004 enthält deutlich mehr Formationen des Unterkarbons und berücksichtigt darüber hinaus quartäre Bodenbildungen. Weite Teile der Hochflächen werden zusammenhängend in der Karte als Solifluktschutt ausgewiesen. Ohne Erläuterungen ist diese Kartiereinheit in Bezug auf Schichtgliederung, Bodenbildung und Grundwasserführung nur schwer zu interpretieren. Aufgrund der Verbreitungssystematik periglazialer Fließerden (vgl. SAUER 2002, TILCH et al. 2002) dürfte die Kartiereinheit durch autochthonen Hochlagenschutt und ein Zweischichtprofil (Hauptlage über Basislage) gekennzeichnet sein.

Für die Beurteilung des Abflussverhaltens ist die Tiefensickerung in den Grundwasserkörper von Bedeutung. Das in die Klüfte des Grundgesteins infiltrierte Wasser wird in der Regel für längere Zeit zurückgehalten und trägt daher nicht unmittelbar zum Hochwassergeschehen bei. Die hydrogeologischen Karten weisen den Tonschiefer/Grauwacke Wechsellagerungen im Röthengrund eine sehr niedrige Trennfugendurchlässigkeit ($< 1 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$) zu. Das geologische Ausgangsmaterial gilt daher als nahezu wasserundurchlässig (Tab. 7). Überschüssiges Wasser nach Starkregenereignissen fließt daher zwangsläufig oberflächennah ab.

Tabelle 7: Kennzeichnung der Grundwasserneubildungsrate (aus: Höll 2002)

Grundwasserneubildungsrate	sehr klein	klein	mittel	groß	sehr groß
L/(s*km ²)	< 1	1-5	5-10	10-15	> 15
etwa mm/a	< 30	30-160	160-300	300-500	> 500

Tschirner Ködel/Röthengrund
1-2l/s*km² (Horstig 1979)



Fazit: Aus der geologischen Karte von 1882 lassen sich nur wenige Informationen zum bodenbildenden Ausgangssubstrat ableiten. Für die Beurteilung der Hochwassergefährdung stellt sie keine Hilfe dar. Da geologische Karten häufig auch als Basis für die Erstellung von Folgewerken dienen, sind die Voraussetzungen für eine solche Ableitung denkbar schlecht. Es ist daher zu vermuten, dass die veralteten Kartierungen auch größere Auswirkungen auf die Qualität von Konzeptbodenkarten und die forstlichen Standortskarten hatten, die für die Beurteilung der Abflussprozesse eine entscheidende Informationsquelle darstellen.

Die geologische Kartierung von 2004 ist deutlich detaillierter. An steilen Hängen sind verschiedene Schichten des Unterkarbons kartiert, auf den Hochflächen quartäre Bodenbildungen. Ohne Erläuterungen zu den einzelnen Kartiereinheiten lässt sich diese Karte jedoch nur mit geologischem Expertenwissen interpretieren. Die Informationen, die aus den hydrogeologischen Karten zur Tiefensickerungsrate vorliegen, sind für die Abschätzung des Grundwasserabflusses gut geeignet.

Bayern (GK25)

Die geologische Karte des bayerischen Untersuchungsgebietes stellt nicht die quartäre Bodenbildung sondern die paläozoischen Gesteine in den Mittelpunkt der Kartierung. Die Karte enthält einzelne Formationen des Unterkarbons, die ein sehr detailliertes Bild über die geologische Situation zeigen (Abb. 43, Anhang A 16). Da sich die einzelnen Schichten im Wesentlichen nur durch eine veränderte Zusammensetzung der Tonschiefer-/Grauwackeanteile unterscheiden, können sie zu einer hydrogeologischen Einheit zusammengefasst werden (HORSTIG 1979). Das Gebiet wird petrographisch in den „Unteren Kulm“ gegliedert, der durch die Dominanz von schiefrigen Lagen gekennzeichnet ist. Die Tonschiefer-Grauwacke-Wechselagerungen gelten als wasserundurchlässig. Größere Grundwasserneubildungsraten sind laut HORSTIG (1979) auf tektonische Störungszonen beschränkt. Das Ausgangsmaterial weist daher im Bereich der Tschirner Ködel ebenfalls geringe hydraulische Durchlässigkeiten von 1-2 l/s*km² auf (HORSTIG 1979).

Die Karte verweist selten auf das Quartär. Allein in den umfassenden Erläuterungen werden Hinweise auf die periglaziale Vergangenheit gegeben und mit einigen Bodenprofilbeschreibungen untermauert, aus denen bereits erste Schlüsse zur Reaktionsfähigkeit des Gebietes gezogen werden können. Demnach sind die Böden auf der gesamten Fläche periglazial ge-

prägt und weisen reliefbedingte Mächtigkeiten der stark grusigen Hauptlage zwischen 3 - 8 dm auf. Die Böden sind locker gelagert und hoch wasserdurchlässig (HORSTIG 1979). In der Zusammenschau mit dem als wasserundurchlässig geltenden Grundgestein sind daher oberflächennahe, laterale Fließvorgänge wahrscheinlich. Angaben zu Eigenschaften der Basislage sind nur wenige vorhanden. HORSTIG (1979) teilt sie in drei Formen ein. Die „Normalform“ kommt an Hangrücken, -kuppen und steileren Hanglagen vor und besteht aus aufgelockertem, parautochthon verlagerten Schieferschutt der paläozoischen Gesteine ohne Dichtlagerung, an denen sich die Zersatz- und Zerfallszone des anstehenden Gesteins anschließt. Definitionsgemäß ist hier Tiefer Zwischenabfluss direkt über dem geologischen Ausgangsmaterial zu erwarten. Eine zweite Ausbildung der Basislage in Form von grusig-lehmigen, verdichteten Fließerden ist in weniger geneigten Lagen, besonders an Unterhängen und in Hangmulden sowie den Hochflächen, typisch. Durch diese Eigenschaften wurden die Fließerden explizit erfasst und in der geologischen Karte dargestellt. Aufgrund der Dichtlagerung neigen die Böden zur Pseudovergleyung und erfüllen im geneigten Gelände alle Voraussetzungen für dominierenden Zwischenabfluss. Sie befinden sich im Blattgebiet auf den flachen Hängen der Hochflächen und in Wannentälern, wo sie größere Bereiche einnehmen können. Nach Aussagen des damaligen Kartierers (G. Horstig) wurden periglaziale Fließerden jedoch nicht vollständig kartiert, da dies einen umfangreichen Einsatz von Flachbohrungen erfordert hätte. Im 13 km² großen Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel sind dadurch lediglich 8 ha, dies entspricht einer Fläche von 0,6 %, als solche kartiert.

Die ebenen Talsohlen sind meist mit holozänen Auesedimenten verfüllt (qh). Sie bestehen im Allgemeinen aus drei übereinanderliegenden Schichten (Schutt – Grobkies – Auelehm). Aufgrund des wasserundurchlässigen Ausgangsgesteins unter den Ablagerungen kann man auch in der Aue keine höhere Wasserdurchlässigkeit erwarten. Das meist grob strukturierte Substrat ermöglicht eine gute Wasserableitung im Boden. Durch die geringe Neigung, das hochanstehende Grundwasser im Frühjahr und den ständigen Wassernachschub der angrenzenden Hänge sind die Bereiche der Talwiesen häufig vernässt.

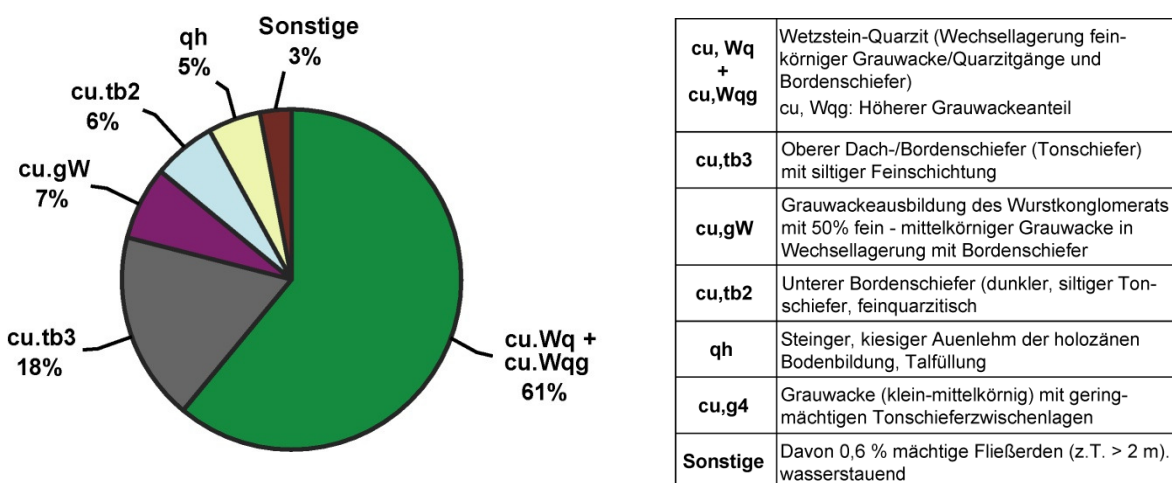


Abbildung 43: Vorkommende geologische Kartiereinheiten im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel

Fazit: Für die Beurteilung der Abflussprozesse sind die einzelnen Formationen des Unterkarbons weniger entscheidend, da sie sich hinsichtlich der Grundwasserneubildungsrate nur wenig unterscheiden. Eine höhere Bedeutung haben sie für die Interpretation der sich daraus entwickelnden Böden und Bodeneigenschaften in der Konzeptbodenkarte. Hier stellt die geologische Kartierung eine gute Grundlage dar. Neben den Schichten des Unterkarbons berücksichtigt die Karte auch mächtigere quartäre Ablagerungen in Form von periglazialen Fließerden, deren Verbreitung sich im Untersuchungsgebiet jedoch nur auf einzelne Wannentäler beschränkt. Für einen umfassenden Gesamtüberblick über die dominierenden Abflussprozesse auf Einzugsgebietsebene und die Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse ist die bayerische geologische Karte sehr gut geeignet. Sie eignet sich jedoch nicht, um abflussrelevante Flächen direkt auszuscheiden.

Konzeptbodenkarten

Thüringen (Bodengeologische Konzeptkarte 1:100.000)

Im Untersuchungsgebiet Röthengrund werden insgesamt vier Kartiereinheiten ausgewiesen. Der überwiegende Teil der Fläche (86 %) gehört zur Bodeneinheit der stark geneigten Skelettböden (Hangschuttböden). Den Rest nehmen Auenbereiche mit holozäner Bodenentwicklung (7 %), Schiefer-/Grauwackeschuttböden (6 %) und Staugleye mit < 1 % ein. Zur Beschreibung der Bodencharakteristik der Kartiereinheiten werden in der zugehörigen Legendenkartei die Petrographie des Substrates, das Bodenprofil und Informationen zur Bodenbewirtschaftung (z.B. Wasserspeichervermögen) aufgeführt. Dabei steht das bodenbildende Ausgangsgestein und in den Auenbereichen die Höhe des Grundwasserstandes im Vordergrund der Kartierung (RAU et al. 2000). Aufgrund des kleinen Maßstabes (1:100.000) und der auf Bodengesellschaften abgestellten Generalisierung besteht die Bodengeologische Konzeptkarte aus großflächigen Einheiten. So erstreckt sich zum Beispiel die Einheit der Hangschuttböden über mehrere Täler und Hangflanken hinweg. Sie schließen Hochflächen und Plateaulagen mit ein, ohne dass eine Differenzierung hinsichtlich der Kartiereinheit erfolgt. Der Untergrund besteht laut Legendenkartei aus aufgelockerten und klüftigen Gestein, das von flachgründigen, lehmigen Schutt überdeckt wird. Informationen zu unterschiedlichen Schichten fehlen fast vollständig. Die tiefgründigen Talauen sind durch kiesige Ablagerungen der holozänen Bodenentwicklung gekennzeichnet und neigen besonders im Frühjahr zur Vernässung.

Fazit: Aufgrund des Übersichtscharakters der Konzeptbodenkarte fehlt die Genauigkeit, um hydrologische Fragestellungen zu beantworten. Die Kartiereinheiten fassen eine Vielzahl von Böden mit unterschiedlichen hydrologischen Eigenschaften zusammen. Die Spreitung, der hinter den Bodengesellschaften hinterlegten Parameter, ist für eine differenzierte hydrologische Betrachtung zu groß. Allerdings stellt sie für größere bestockungslose Flächen des Einzugsgebietes (Talauen) die einzige Bodeninformationsquelle dar.

Bayern

In den bayerischen Konzeptbodenkarten (KBK25, Blattnummern: 5634/5534) sind für das Untersuchungsgebiet insgesamt acht Bodeneinheiten aufgeführt. Sie enthalten schichtbezogene Angaben zu Bodentyp, Bodenart, Skelettgehalt, Lagerungsdichte, Staunässe und Gründigkeit der Böden. Mit den Kennwerten sind vergleichende Berechnungen möglich, da sie der Nomenklatur AD HOC AG Boden (2005) entsprechen. Die hinterlegten bodenkundlichen Informationen liegen getrennt für Haupt- und Basislagen vor. Die häufig ausgewiesenen Braunerden/Regosole (Tab. 8) weisen nach den Erläuterungen der KBK periglaziale Solifluktionsercheinungen auf.

Auf den Hochflächen wurde der Schichtaufbau – Hauptlage über Basislage – anhand von Leitprofilen unterstellt und über Regionalisierungen flächig hergeleitet. Die ausgewiesenen Skelettgehalte der Haupt- und Basislagen zeugen von stark grusigen bis extrem grusig/steinigen Verhältnissen (Tab. 8). Die Erläuterungen zur Bodeneinheit 655 verweisen auf solifluidal verdichtete Schichten im Untergrund ohne Hydromorphiemerkmale. Sie nimmt rund ein Drittel des Untersuchungsgebietes ein.

In den Talanfangsmulden, Wannentälern und innerhalb der Hangdellen folgt die KBK den Ausführungen der geologischen Karte und übernimmt die dicht gelagerten periglazialen Fließerden (Kartiereinheit: 648). Durch zusätzliche Bohrstockerkundungen wurde die Kartierung dieser Flächen gegenüber der geologischen Kartierung deutlich verfeinert, um die wasserbeeinflussten Flächen von terrestrischen Standorten besser abzugrenzen (GeoTeam 2002). Auch sind innerhalb der zahlreichen Talanfangsmulden des Blattgebietes zusätzlich wasserbeeinflusste Fließerden neu ausgeschieden. Innerhalb des Untersuchungsgebietes steigt das Vorkommen an Fließerden jedoch nur gering von 0,6 % (geologische Karte) auf 1,4 % in der Konzeptbodenkarte an. Als Bodentypen werden Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye ausgewiesen.

Tabelle 8: Ausgewiesene Kartiereinheiten der Konzeptbodenkarte im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel

Einheit	Anteil am Untersuchungsgebiet	Bodentyp	Skelettgehalt	Gründigkeit	Bemerkungen
655	34,0 %	Braunerde-(Regosol)	sehr stark steinig	mittel bis tiefgründig	DS locker gelagert, Untergrund oft dicht
644	20,0 %	(Regosol)-Braunerde	sehr stark bis extrem grusig	mittel bis tiefgründig	DS gut drainiert, hoher Skelettgehalt in BL
682	19,7 %	- Hangschuttdecken - Regosole/ Ranker	stark bis sehr stark steinig grusig	variiert	Steile Hangflanken > 20°
657	18,5 %	Braunerde	sehr stark bis extrem grusig bis steinig	flach - mittelgründig	Hoher Feinsandanteil
99b	3,3 %	Nassogley/Auengley	skelettarm	-	Ganzjährig nass, Flusssedimente der Talsohlen
76a	2,4 %	Gleye, Nassogleye Anmoorgley	steinig bis grusig	mittelgründig	Quartäre, kiesige Talfüllungen der Seitentäler, Auesedimente
648	1,4 %	(Hang)Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye	mittel bis stark grusig und steinig	tiefgründig	Im Unterboden durch Bodenfließen stark verdichtete Staunässeböden
642	0,7 %	Braunerde	sehr stark bis extrem grusig	mittel bis tiefgründig	Deckschicht gut drainiert, BL schwach sandig

Steile Hangbereiche mit über 20° Neigung gehören zum Bodenkomplex der Hangschuttböden. Diese Kartiereinheit wird aufgrund der schwierigen Beprobung nicht substratspezifisch analysiert, sondern allein nach der Hangneigung ausgewiesen. In sehr steilen Wassereinzugsgebiete-

ten, wie sie im Frankenwald vorkommen, kann diese Kartiereinheit bedeutende Flächenanteile einnehmen. Als dominierende Bodentypen wurden Regosole, Braunerde-Regosole und flachgründige Braunerden, die durch locker gelagerten und schlecht sortierten Hangschutt charakterisiert sind, ausgewiesen (GeoTeam 2002). Aufgrund der hohen Reliefenergie kann davon ausgegangen werden, dass eine dichtere Lage unter dem lockeren Hangschutt fehlt.

Fazit: Für einen Überblick der Bodenverhältnisse auf Einzugsgebietsebene ist die Kartierung gut geeignet. Die schichtbezogene Angabe der Bodeneigenschaften stellt einen sehr guten Ansatz zur differenzierten Beschreibung der Bodenverhältnisse dar. Aufgrund des zu kleinen Maßstabs der KBK (1:25.000) und der bodengenetisch nur schwer differenzierbaren Böden ist der Detaillierungsgrad, vor allem in der horizontalen Ebene, nicht genau genug. Muldenlagen, die häufig im Untergrund pseudovergleyt sind und eine erhöhte Abflussbereitschaft aufweisen, lassen sich aus den Karten nicht ermitteln. Auch die wasserstauenden Fließerden nehmen mit 1,4 % der Fläche nur einen sehr geringen Anteil ein. Zudem fassen die generalisierten Kartiereinheiten Böden zusammen (z. B. Braunerde-Pseudogley und Pseudogleye), die hinsichtlich hydrologischer Fragestellungen differenzierter dargestellt werden müssten (Braunerde-Pseudogley: dominierender Zwischenabfluss; Pseudogley: Sättigungsoberflächenabfluss). Die Konzeptbodenkarte ist als Übersichtskarte sehr gut geeignet, es lassen sich allerdings keine flächenscharfen Aussagen hinsichtlich besonders abflusssensitiver Waldflächen innerhalb der recht großräumig ausgedehnten Kartiereinheiten treffen.

Standortskarten

Thüringen

Die großmaßstäbige forstliche Standortskarte (1:10.000) liegt in Thüringen für Staatswald-, Privatwald- und Körperschaftswaldflächen vor. Die für eine hydrologische Klassifizierung wichtigsten Informationen sind in den Erläuterungen zur Lokalbodenform und in den Feuchtebereichen der Standortformen (Tab. 9) enthalten. Die Lokalbodenform ergibt sich aus dem Substrattyp, dem Bodentyp, der Hauptbodenform und einem geografischen Ort, an dem die Bodenform zuerst beschrieben wurde oder gehäuft auftritt (KATZSCHNER 2007). Eine verschlüsselte Abkürzung zur Lokalbodenform findet sich in den zur Standortskarte zugehörigen Heftlegenden (SCHRAMM 1983). Hier wird für grund- und staunasse Standorte auch der Grad der Vernässung angegeben. Weiterhin geben die Legenden zu den ausgewiesenen Lokalbodenformen die wichtigsten Bodenmerkmale – Skelettgehalt, Gründigkeit, Bodenart, Lage und Nährkraftstufe – in knapper Form wieder. Ausführliche Beschreibungen zur Lokalbodenform sind in einem Bodenformenkatalog hinterlegt oder sind aus den Arbeitskarten der Kartierer zu recherchieren.

Tabelle 9: Bodenfeuchtestufen der thüringischen Standortkartierung nach dem vereinfachten Verfahren von 1992

Terrestrische Wasserhaushaltsstufe	Grund- und Stauwasserstufe		
Terrestrische Standorte (T)	Wechselfeuchte Standorte (W)	Bachtälchenstandorte (B)	Überflutungsstandorte (Ü)
frisch - sehr frisch	wechselfeucht	feuchte Bachtälchen	feuchte Auen
mäßig frisch	wechselfrisch	frische Bachtälchen	frische Auen
mäßig trocken	wechselfrisch	frische Talstandorte	
trocken			
sehr - extrem trocken			
luftfeuchte Schluchtstandorte			
Zusatzkennzeichnungen	Mineralische Nassstandorte (N)	Organische Nassstandorte (O)	Quellmuldenstandorte (Q)
w=Stauanässe im Unterboden (<30cm)	staunass	sehr sumpfig	(keine explizite Unterteilung von Feuchtestufen)
v=verhagerte Standorte	staufeucht	sumpfig	
U=standortsbedingter Schutzwald		nass	

Die Standortseinheit (Mindestgröße 1 - 2 ha), als Grundeinheit der forstlichen Kartierung, enthält Informationen zum Wasserhaushalt, Trophie und Substrat. Weitere wesentliche Standortmerkmale werden über eine an die Standortseinheit angehängte Zusatzkennzeichnung aufgezeigt. Beispielsweise weist die Kennzeichnung (w) auf Staunässe im Unterboden hin und kennzeichnet die für den vorbeugenden Hochwasserschutz im Frankenwald besonders bedeutsamen halbhymorphen Standorte. Laut Definition (SEA 74 1974) treten dabei die grund- oder stauwasserbeeinflussten Lagen in Tiefen von mindestens 30 cm, jedoch bis maximal 60 cm unter Flur auf (aus: GEILING & BURSE 2008). Kleinflächige Besonderheiten, die wegen der geringen Flächenausdehnung nicht als eigene Standortseinheiten berücksichtigt werden, z.B. Hangaustrittswasser, Felsen etc., können über Zusatzsymbole in der Standortskarte ausgewiesen werden. Die für die Abschätzung des Abflussprozesses bedeutsame Wasserbewegung (Hangwasserzug) wird über die Zusatzsignatur („+“) angegeben.

Die Situation innerhalb des 11 km² großen Wassereinzugsgebietes der Röthen stellt sich wie folgt dar. Auf über 98 % der Fläche dominieren die (unvernässten) terrestrischen Standorte ohne weitere Zusatzsignaturen. Laut Definition (SEA 74 1974) sind das Böden, die bis auf 60 cm Kartiertiefe keine wesentlichen Vernässungserscheinungen aufweisen. Böden mit geringen hydromorphen Merkmalen im Unterboden – in Thüringen als Braunstau- und Halbgleye bezeichnet – (Signatur: „w“ oder „n“), werden zu den terrestrischen Standorten gezählt und sind im gesamten Wassereinzugsgebiet der Röthen nicht kartiert. Es fehlen damit die abflusssensitiven, halbhymorphen Mineralböden (Pseudogley-Braunerde, Gley-Braunerde), die in der Regel recht häufig in Mulden und Dellen (Leitbahnen der lateralen Wasserbewegung) des periglazial geprägten Mittelgebirges verbreitet sind (vgl. SCHILLING & SPIES 1991, FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996, SAUER 2002).

Standorte der Stau- und Grundwasserstufe fehlen, bis auf kleinere Bereiche abgesehen (1 %), fast vollständig, weil weite Teile der schmalen aber bestockungslosen Bachaue und hydromorphen (Wiesen-)Quellbereiche am Oberlauf der Röthen durch die Standortserkundung nicht erfasst wurden. Periglaziale Fließerden sind im untersuchten Gebiet nicht kartiert.

Zur Abschätzung der zusätzlichen Wasseraufnahmekapazität der Böden spielt der Wasserhaushalt eine entscheidende Rolle. Die Wasserhaushaltsstufen der terrestrischen Standortstufen werden reliefbezogen hergeleitet und mit den in Tabelle 9 angegebenen Feuchtebereichen verschlüsselt. Dadurch ergibt sich in der Standortskarte eine klare, reliefabhängige Gliederung. Auf den Hochlagen und den Oberhängen (Kuppen, Hangrippen, sonnseitige Hänge) sind mäßig trockene, an den Mittelhängen (schattseitige Hänge und sonnseitige Hangmulden) mäßig frische und in Hangmulden (schattseitig) und Unterhängen sehr frisch bis frische Verhältnisse kartiert (siehe Anhang A 14).

Weiterhin weisen die in den Lokalbodenformen hinterlegten Bodenparameter auf sehr homogene Bedingungen hin. So kommen laut Standortskarte auf der gesamten Fläche mittelgründige Böden aus mäßig steinigen/grusigem Schluff vor.

Fazit: Da innerhalb des Einzugsgebietes weder grund-/stauwasserbeeinflusste Böden noch halbhydromorphe Standorte kartiert wurden, liegen keine Angaben über „abflusssensitive“ Flächen vor. Ohne zusätzliche Reliefanalysen lassen sich aus den großflächig ausgeschiedenen Standortseinheiten, die sich anhand der Bodenkennwerte nur geringfügig unterscheiden, keine Bereiche mit erhöhter Abflusssensitivität herleiten. Die in den Muldenlagen ausgewiesenen frischen Standorte sind Bereiche, die einen Hangwasserzug nach längeren Regenfällen im Untergrund vermuten lassen. Konkrete Hinweise seitens der Standortserkundung (Zusatz: „w“) bestehen allerdings nicht. Eine Klassifizierung abflusssensitiver Hangabschnitte ist daher mit der Standortkartierung im Röthengrund nur sehr eingeschränkt und stark abstrahiert möglich.

Bayern

In Bayern wird der Standort mit einem 3-Ziffernsystem verschlüsselt (Tab. 10). Die erste Ziffer kennzeichnet die Bodenart und die Schichtung des Substrates. Die zweite Ziffer gibt Hinweise auf Trophie und besondere Standortmerkmale, wie zum Beispiel Verdichtungen im Unterboden. Die letzte Ziffer beschreibt die Wasserhaushaltsstufe der Böden (ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG 2003).

Tabelle 10: Verschlüsselung der Standortseinheiten in Bayern

1. Ziffer	Bodenart und Schichtung	2. Ziffer	Besondere Standortmerkmale	3. Ziffer	Wasserhaushalt
0	Sand, Kies, Felsmosaik, Blockmosaik, Humuskarbonatboden	0	normal	0	(sehr) trocken
1	lehmiger Sand, sandiger Lehm	1	nährstoffarm, podsoliert	1	mäßig trocken, grundwechselfeucht
2	Lehm	2	nährstoffreich	2	mäßig frisch, mäßig grund-/hangfrisch
3	Feinlehm, Schlufflehm, Schluff	3	humusreich 2)	3	ziemlich frisch, frühjahrsfrisch, grundfrisch
4	milder Ton, Tonlehm, Kalkverwitterungslehm 1)	4	Karbonat oberhalb 50 cm	4	(sehr) frisch, hangfrisch, grundfeucht
5	strenger Ton 1)	5	Karbonat in 50 - 100 cm Tiefe	5	hangwasserzünftig, quellfrisch, wechseln hangfeucht, (mäßig) hang(wechsel)feucht
6	Decksand und -lehm (Ton-/Tonlehm höher 30 cm)	6	tongründig 3)	6	(mäßig) wechselfeucht
7	Schichtsand (Ton-/Tonlehm in 30 - 60 cm Tiefe)	7	Verdichtung im Unterboden 4)	7	mäßig wechselfeucht, schwach wechselfeucht
8	Schichtlehm (Ton-/Tonlehm in 30 - 60 cm Tiefe)	8	Hanglage	8	(stark) wechselfeucht, wechselnd feucht
9	Moor	9	anmoorig 5)	9	feucht (nass, staunass, quellnass)

1) Deckschicht bis 10(20) cm möglich
 2) **humusreich:** Anteil organischer Substanz im Boden 5 - 30 % (Feuchtboden max. 15 %) und Humus-Mineralbodenhorizont mind. 10 cm mächtig
 3) **tongründig:** Ton(lehm) tiefer als 60 cm
 4) **Unterboden:** tiefer als 60 cm
 5) **anmoorig:** Gehalt an organischer Substanz im Boden 15 - 30 %

Durch das 3-ziffrige System entstehen zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten und somit eine Vielzahl von möglichen Standortseinheiten. Um die Zahl der Kombinationen zu beschränken, sind für eine Region typisch vorkommende Standortseinheiten vordefiniert (z. B.: „Frankenwald-Legende“). Neben der Bodenart, dem Bodentyp, dem Skelettgehalt und der Gründigkeit sind noch Angaben zur Durchwurzelung und die für die Standortseinheit charakteristischen Weiserpflanzen angegeben. Die Mindestgröße der Standortseinheiten beträgt 1 ha. Zur Kennzeichnung kleinerer, aber dennoch bedeutsamer Standorte, sind auch hier Zusatzsignaturen vorgesehen. Insgesamt können mit dem Kartierschlüssel 10 verschiedene Wasserhaushaltsstufen angesprochen werden. Zweischichtstandorte mit gehemmter vertikaler Wasserführung (Hinweis auf laterale Fließprozesse) können über die Ziffer 7 für besondere Standortmerkmale (Tab. 10) gekennzeichnet werden. Als im Unterboden verdichtete Standorte werden solche angesprochen, deren Dichtlagerung ab einer Tiefe von 60 cm unter der Geländeoberfläche ansetzt. Die Nachweisgrenze ist jedoch durch den häufig verwendeten 1 m langen Pürckhauer-Bohrstock auf etwa 80 cm nach unten hin begrenzt. Der nachweisbare Bereich, der im Unterboden verdichteten Standorte, erstreckt sich daher nur auf wenige Dezimeter. Tiefer liegende, wasserstauende Bodenschichten werden daher nicht erfasst.

Der Wasserhaushalt der Zweischichtböden wird in Abhängigkeit der Ausprägung von Rostflecken und Mangankonkretionen im Unterboden als mäßig grundfrisch, grundfrisch (pseudovergleyte Braunerde) oder grundfeucht (z.B. Pseudogley-Braunerde) angesprochen. Damit kann die Dauer des Vernässungszeitraumes gewertet und Rückschlüsse auf das Abflussverhalten gezogen werden.

Im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel herrscht laut Karte (Anhang A 19) mit einem Anteil von rund 84 % die lockeren, ungeschichteten („terrestrischen“) Braunerden vor. Sie zeichnen sich durch eine ausgeprägte vertikale Wasserführung, ohne dichtere Zwischenlagen, aus.

73 % davon nehmen die mäßig frischen bis frischen Braunerden ein. Der Skelettanteil der großflächig ausgeschiedenen Standortseinheit variiert zwischen 10 - 50 % (schwach bis stark steinig/grusig) und weist mittel- bis tiefgründige Entwicklungstiefen auf (FÖRSTER 1996). Gegenüber der Konzeptbodenkarte („stark bis extrem steinig/grusig“) wird der Skelettgehalt der Böden deutlich geringer eingeschätzt.

Mit weiteren 6,3 % der Gesamtfläche sind die Umlagerungsböden mit verfestigtem Untergrund und gehemmter vertikaler Wasserführung (sogenannte Lehmkipper) vertreten. Den überwiegenden Anteil davon (96 %) nehmen mäßig grundfrische Lehmkipper ein. Der Unterboden dieser Einheit setzt sich aus einer dichteren Packung des Lehm-Stein-Gemisches zusammen, die keine oder nur geringe Hydromorphiemerkmale aufweist (FÖRSTER 1996). Im Untersuchungsgebiet sind sie auf den Verebnungen der Hochflächen in Form von Verdichtungsbändern ausgebildet. Aufgrund des Fehlens ausgeprägter Vernässungsmerkmale wurden diese Böden in die bereits vorgestellte neue Konzeptbodenkarte nicht mit übernommen.

Grundfrische, zeitweise grundfeuchte Lehmkipper (temporärer Hangwasserfluss) mit deutlichen Konkretionen und sehr dichtem Unterboden treten im Untersuchungsgebiet vernachlässigbar gering auf. Konkret kommen sie kleinflächig in zwei Muldenlagen oberhalb von Quellaustritten vor. Grundfeuchte Lehmkipper (Pseudogley-Braunerden) enthält der untersuchte Ausschnitt der Standortskarte nicht.

Den dritten Bereich bilden die klima- und lagebedingten Standorte mit 7,3 % der kartierten Fläche. Neben den frostgefährdeten Talgründen umfasst der Bereich auch die sickerfeuchten Rinnen und Mulden sowie die sickerfeuchten Schluchtwaldstandorte. Da sich in diesen Bereichen das Baumwachstum weniger an den substratspezifischen Eigenschaften, sondern vielmehr an den mikroklimatischen Bedingungen orientiert, werden die Standortseinheiten anhand des Reliefs ausgeschieden. Der Wasserhaushalt dieser Standorte reicht von frischen Bedingungen bis hin zum permanenten Wasserüberschuss. Die in der Konzeptbodenkarte ausgewiesenen wasserstauenden Fließerden (Braunerde-Pseudogleye) gehen zum Beispiel vollständig in der Standortseinheit der frostgefährdeten Talgründe auf.

Die restlichen Flächen (2,6 %) im Einzugsgebiet sind Standorte mit zeitweiligen oder permanenten Wasserüberschuss. In der Regel bildet auch hier der solifluidal verdichtete Unterboden den wasserstauenden Horizont. Hier entwickelten sich strenge Pseudogleye und sickerfeuchte Hanggleye. Sie kommen kleinflächig im Untersuchungsgebiet vor und sind hinsichtlich schneller Abflussreaktionen von Bedeutung.

Fazit: Auch im bayerischen Untersuchungsgebiet nehmen die ungeschichteten, terrestrischen Standorte einen Großteil der kartierten Fläche ein. Da die Standortseinheit die kleinste forstökologische Grundeinheit ist, lässt sich das Abflussreaktionspotenzial auf Grundlage hinterlegter Bodeneigenschaften nicht weiter untergliedern. Eine Ableitung auf dieser Grundlage führt zu großflächigen Einheiten, die den gleichen Abflussprozess zur Folge haben. Eine flächenscharfe Klassifikation der zwischenabflussgeprägten Hänge lässt sich auf Basis der forstlichen Standortskarte nicht zufriedenstellend umsetzen. Flächen mit potenziellem Sättigungsflächenabfluss lassen sich anhand der Standortskarten hingegen gut ausweisen.

Durch die Trennung von halbhydromorphen (Pseudogley-Braunerde, pseudovergleyten Braunerden) und hydromorphen Böden (Gleye, Pseudogleye) ist eine Unterscheidung zwischen Flächen mit potenziellem Zwischenabfluss und Sättigungsflächenabfluss über die forstliche Standortskarte theoretisch möglich. Die grundfrischen und grundfeuchten periglazialen Umlagerungsstandorte (Lehmkipper) dürften jedoch im Untersuchungsgebiet noch immer stark unterrepräsentiert sein. Wies die geologische Karte 0,6 %, die KBK 1,4 % wasserstauende Fließerden aus, sind in der 1982/1983 kartierten forstlichen Standortskarte immerhin knapp 9 % als solche kartiert. Die zahlreichen Hangwasseraustrittsstellen an den Unterhängen zeugen von einem darüber liegenden lateralen Hangwasserzug, der anscheinend so tief liegt, dass er durch die Bohrstockkartierung nicht erfasst wird (siehe Kap. 5.1.3 „Eigene Standortkartierung“). Zudem fielen die Umlagerungsböden Anfang der 90iger Jahre aus der Kartierlegende heraus, sodass auf den in den Jahren 1982/83 kartierten Privatwaldflächen (Flächenanteil von 22 % am Wassereinzugsgebiet) keine im Unterboden wasserstauenden Fließerden mehr ausgewiesen wurden.

Bodenschätzungskarte

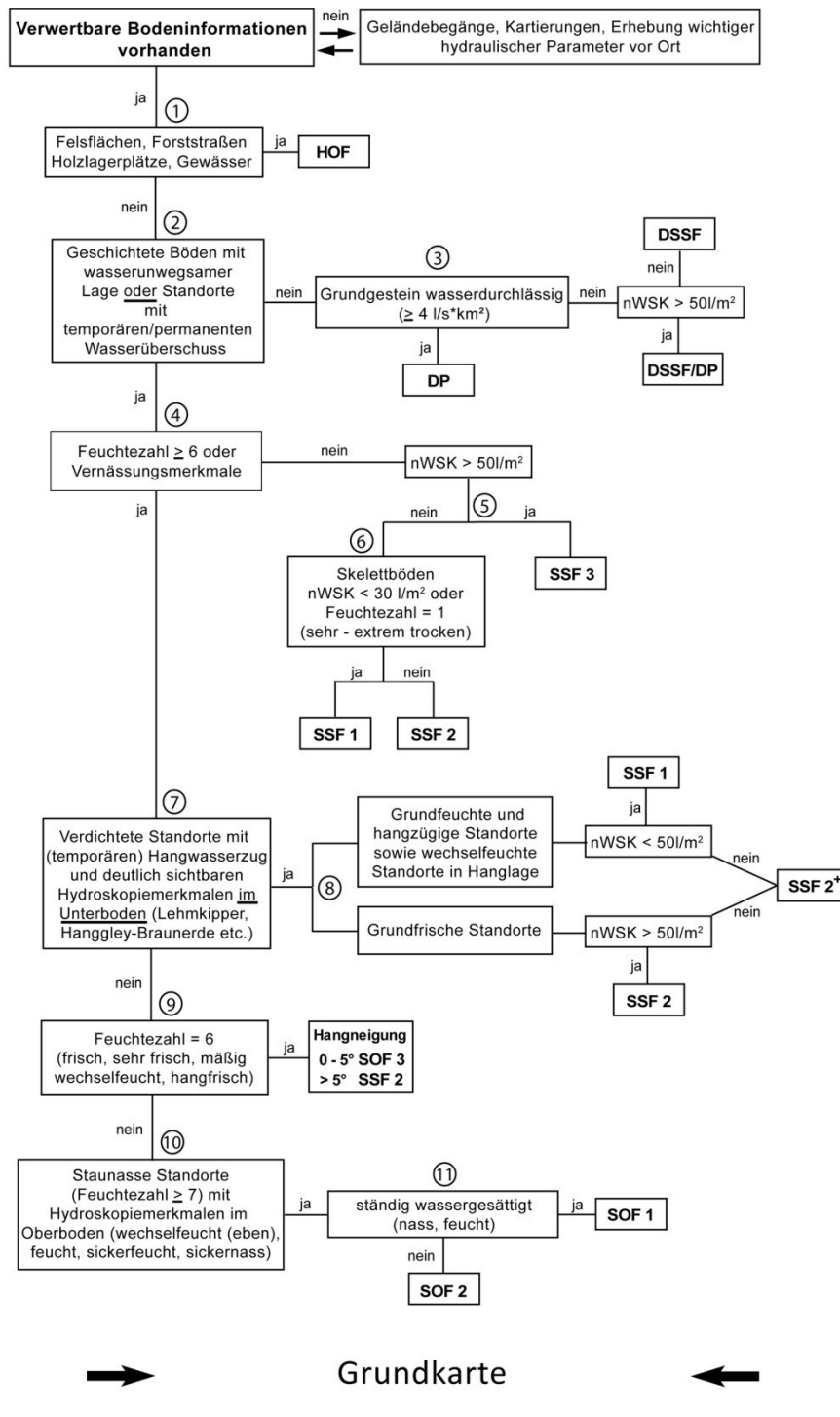
Aus den Bodenschätzungskarten im Maßstab 1:25.000 können Angaben zur Bodenart, Bodenzustandsstufe und Wasserstufe landwirtschaftlich genutzter Flächen, getrennt für Grünland (Grünlandschätzungsrahmen) und Acker (Ackerschätzungsrahmen), entnommen werden. Bei der Bewertung des Pflanzenwachstums spielt die Wasserverfügbarkeit der Grünlandböden eine wichtige Rolle. So werden in den Bodenschätzungskarten Wasserstufen von 1 = frische Lagen bis 5 = nasse, sumpfige Lagen ausgewiesen, die gegenüber den klima- und lagebedingt ausgewiesenen Standortseinheiten der forstlichen Standortkartierung oftmals eine genauere

Beschreibung der Wasserhaushaltsstufe beinhalten. Die verschiedenen Wasserspeicherpotenziale der Talaue können damit genauer angesprochen werden.

Die Bodenbewertungen für die Ackerböden erbringen gegenüber der KBK keine neuen Informationen. Die Bodenschätzung ist daher vor allem für Grünlandbereiche bedeutsam. Dies gilt in besonderem Maße für die bestockungslosen Auebereiche. In welchem Umfang die bodenkundlichen Informationen der Bodenschätzung verwendet werden können, ist im Einzelfall zu prüfen.

5.1.2 Klassifikationsverfahren zur Ausweisung abflusssensitiver Waldflächen

Das Klassifikationsverfahren gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil werden die verwertbaren Informationen der forstlichen Standortskarten, Konzeptbodenkarten und geologischen Karten mit Hilfe eines GIS miteinander ins Verhältnis gesetzt und verknüpft, um daraus eine hydrologische Grundkarte zu erstellen. Den Verfahrensablauf zur Erstellung der Grundkarte, beginnend von Punkt ① bis Punkt ⑪, zeigt die Abbildung 44. Die Grundkarte beinhaltet die aus den Kartiereinheiten resultierenden Abflussprozesse eines Gebietes (Abb. 45) und stellt die Basis für weitere Verfahrensschritte dar. Im zweiten Teil werden über Reliefanalysen und Abflussmodellierungen weitere Informationen in die Grundkarte integriert und zur Abflussprozesskarte vervollständigt.



Hortonischer Oberflächenabfluss

HOF: Oberflächenabfluss durch Infiltrationsengpässe

Sättigungsflächenabfluss

- SOF 1: sofortiger Sättigungsflächenabfluss
- SOF 2: verzögerter Sättigungsflächenabfluss
- SOF 3: stark verzögerter Sättigungsflächenabfluss

Tiefensickerung

DP: Tiefensickerung

Zwischenabfluss

- SSF 1: rascher Zwischenabfluss
- SSF 2: verzögerter Zwischenabfluss
- SSF 2⁺: leicht verzögerter Zwischenabfluss in Rinnen und Mulden
- SSF 3: stark verzögerter Zwischenabfluss

Tiefer Zwischenabfluss

DSSF/DP: Tiefer Zwischenabfluss und Tiefensickerung

Abbildung 44: Entscheidungsbaum zur Ausweisung abflusssensitiver Flächen auf Grundlage der forstlichen Standortserkundung

Erster Teil - Verknüpfung der vorhandenen Bodeninformationen

Schritt 1: Oberflächenabfluss und Feuchtezahl

Zuerst werden Flächen, auf denen potenziell Hortonischer Oberflächenabfluss entstehen kann, ausgewiesen (Abb. 44, ①). Da Oberflächenabfluss (HOF) innerhalb von Waldbeständen des Frankenwaldes so gut wie ausgeschlossen ist (siehe Kapitel „Beregnungsversuche“), beschränkt er sich meist auf anthropogen geschaffene und verdichtete Oberflächen, wie Forststraßen, Holzlagerplätze, Rückegassen sowie auf natürliche Sonderstandorte (offene Felspartien etc.). Informationen dazu können dem Standortkartenshape und dem Wegenetzshape der Forsteinrichtung entnommen werden. Die entsprechenden Flächen werden in ein leeres shape integriert. Da angenommen werden kann, dass ein Großteil des Wassers, das auf den Wegen abfließt, wieder in die Fläche infiltriert, erfolgt keine weitere Unterteilung hinsichtlich des Hochwasserbeitrags der HOF-Flächen.

Im Mittelgebirgsraum spielen Zwischenabflüsse über wasserundurchlässigem Grundgestein oder dichten Bodenschichten im Untergrund eine bedeutende Rolle bei der Hochwasserentstehung. Hinsichtlich des vorbeugenden Hochwasserschutzes ist es zunächst wichtig, diejenigen Standorte zu erfassen, auf denen die vertikale Wassersickerung im Untergrund durch dichtere Bodenschichten begrenzt sein könnte. Aus dem bodenkundlichen Kartenmaterial lassen sich dazu jedoch nur sehr wenige Informationen entnehmen. Während die mittelmaßstäbige Konzeptbodenkarte (KBK25) im bayerischen Untersuchungsgebiet auf größerer Fläche von dichter gelagerten Unterböden ausgeht, sind in der forstlichen Standortkarte häufig nur Informationen zu den oberflächennahen Deckschichten enthalten. Es wird daher zunächst davon ausgegangen, dass in beiden Untersuchungsgebieten auf der gesamten Fläche das Wasser über dichter gelagerten Bodenschichten abfließt (Abb. 44, ②). Anhand von Reliefanalysen werden in einem späteren Schritt diejenigen Standorte ermittelt, auf denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Verdichtungslagen als unwahrscheinlich erscheint (z.B. sehr steile Lagen, Kuppen etc.). Sollten die lockeren Deckschichten nachweislich direkt über dem geologischen Ausgangsmaterial aufliegen (autochthoner Hochlagenschutt etc.), sind über weitere Schritte (Abb. 44, ③) die unterschiedlichen Intensitäten des Tiefen Zwischenabflusses zu bestimmen. Die Einschätzung der Wasserdurchlässigkeit des Grundgesteins erfolgt über die Grundwasserneubildungsrate aus den geologischen und hydrogeologischen Karten. Sie sagt aus, wie viel Wasser in den Grundwasserkörper infiltriert und dort über längere Zeit zurückgehalten wird. Im Bereich des Frankenwaldes kommen nahezu flächendeckend Tonschiefer- und Grauwackewechselagerungen vor. Sie gelten als nahezu wasserundurchlässige Kluftgrundwasserleiter (HORSTIG 1979) mit einer entsprechend niedrigen Tiefensickerungsrate. Überschüssiges Wasser muss daher zwangsläufig oberflächennah abfließen. In dem hier vorgestellten Klassifikationsverfahren kann das Anstehende erst dann als durchlässig betrachtet werden, wenn eine Grundwasserneubildungsrate von mindestens $4 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$, wie es zum

Beispiel auf Buntsandstein, Unterem Muschelkalk oder Schotter erreicht wird. Als Steuerelement für die Intensität der Tiefenabflussbildung wird die Wasseraufnahmekapazität der darüber liegenden Deckschichten verwendet. Die Wasserspeicherkapazität wird über die vorhandenen Informationen zur Bodenart, zur Lagerungsdichte und zum Skelettgehalt aus der forstlichen Standortskarte nach den Regeln der ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) geschätzt. Als Grenzwert für die Abflussintensität wurde eine nutzbare Wasserspeicherkapazität von 50 l/m² gewählt. Entsprechend dem Ableitungsschema entsteht auf Böden ohne Dichtlagerung im Untergrund und geringer Wasserspeicherkapazität (< 50 l/m²) Tiefer Zwischenabfluss (DSSF), während bei höherer Speicherkapazität (> 50 l/m²) und langsamerer Abflussbildung (geringe Hangneigung) ein wesentlich höherer Teil des Wassers in die Verwitterungsklüfte des Ausgangsmaterials infiltrieren wird und eine Mischung aus Tiefem Zwischenabfluss und Tiefensickerung entsteht (DSSF/DP).

Da die Wasserhaushaltsstufen der forstlichen Standortskartierung nur unzureichend miteinander ins Verhältnis gesetzt werden können, eignen sie sich nicht als direkter Weiser zur standortsbedingten Vorfeuchte und somit zur Abschätzung des zusätzlichen Wasserspeicherpotenzials. Im nächsten Schritt (Abb. 44, ④) wird daher den von der Standortskartierung ausgewiesenen Wasserhaushaltsstufen eine entsprechende Feuchtezahl (Fz) zugeteilt. Die Wasserhaushaltsstufen werden, in Anlehnung an WALDENMEYER (2003), in eine Rangfolge von 1-10 gruppiert, beginnend vom sehr trockenen bis hin zum permanent vernässten Standort (Tab. 11).

Alle Standorte mit einer Feuchtezahl ≤ 6, das sind alle nicht wasserbeeinflussten Flächen, werden unter Abbildung 44, Punkt ④ beurteilt. Aufgrund des großflächig einheitlichen Schichtaufbaues im Frankenwald kann nach Überschreiten der Wasserhaltekapazität der Böden von dominierendem Zwischenabfluss ausgegangen werden. Hierunter fallen zum Beispiel auch die von der Standortserkundung ausgewiesenen mäßig grundfrischen Standorte.

Tabelle 11: Vergebene Feuchtezahlen (Fz) für die ausgeschiedenen Wasserhaushaltsstufen der Standortskartierung in Bayern und Thüringen, Sto = Standort

Wasserhaushaltsstufe, Bayern		Fz	Feuchtestufen Thüringen				
			Terrestrische Sto	Wechself. Sto	Auenartige Sto		
sehr trocken, wechsel trocken	1	frische - sehr frisch	6	wechselfeucht	7	feuchte Auen	8
trocken, grundwechsel trocken	2	mäßig frisch	4	wechselfrisch	5	frische Auen	6
mäßig trocken	3	mäßig trocken	3	wechsel trocken	1		
mäßig frisch, mäßig grundfrisch, mäßig hangfrisch	4	trocken	2				
ziemlich frisch	5	sehr - extrem trocken	1				
frisch, sehr frisch, hangfrisch, grundfrisch, mäßig wechselfeucht	6	luffeuchte Schluchtsto	5				
hangwasserzünftig, quellfrisch, hangwechselfeucht, grundfeucht, (stark) wechselfeucht	7						
sickerfeucht	8	Bachtälchen Sto		Mineral. Nass Sto		Org. Nass Sto	
feucht, nass, staunass, sickernass, quellnass	9	feuchte Bachtälchen	7	staunass	9	sehr sumpfig	10
überflutet	10	frische Bachtälchen	6	staufeucht	7	sumpfig	10
		frische Talstandorte	6			nass	9
		Quellmulden					
		(keine explizite Unterteilung von Feuchtestufen)					
		Q = 9					

Als Grad der Abflussintensität wird auch hier die Wasserspeicherkapazität herangezogen. Auf Standorten mit Speicherkapazitäten $\geq 50 \text{ l/m}^2$ (Abb. 44, ⑤) wird stark verzögerter Zwischenabfluss (SSF 3) angenommen.

Einen Sonderfall (Abb. 44, ⑥) stellen Skelettböden, wie Blockschuttstandorte, Frostschutthänge (meist Regosole, $nWSK \leq 30$) oder sehr trockene bzw. wechsellrockene Böden (Feuchtezahl = 1, Tab. 11) dar, die vielfach durch einen raschen Wechsel zwischen Vernässung und Abtrocknung und guter lateraler Abführung des Wassers gekennzeichnet sind. Das Wasserhaltevermögen dieser Standorte ist meist gering, sodass mit dem Entstehen von Bereichen mit hoher Wasserabzugsgeschwindigkeit gerechnet werden muss (SSF 1). Alle übrigen Standorte ($nWSK: 30 - 50 \text{ l/m}^2$) erhalten die Stufe SSF 2.

Schritt 2: Im Unterboden wasserbeeinflusste Standorte (Abb. 44, ⑦)

Standorte in Hanglage, die nur im tieferen Unterboden Rostfleckung aufweisen, wirken wasserstauend, bei gleichzeitig guter lateraler Wasserführung. Über den Verdichtungslagen liegt meist eine gut drainierte Deckschicht, die das Wasser ableitet. Als dominierender Abflussprozess entsteht Zwischenabfluss. Als Indikator für das Reaktionspotenzial der Standorte wird die Ausprägung der Vernässungsmerkmale herangezogen. Das Klassifikationssystem unterscheidet zwischen zwei Stufen (Abb. 44, ⑧). Die Gruppe der grundfeuchten, hangwechselfeuchten Standorte¹⁴ und die Gruppe der grundfrischen Standorte. Beide Gruppen sind geprägt durch wasserstauende Lagen im Unterboden mit mehr oder weniger deutlich sichtbaren Vernässungsmerkmalen. Grundfeuchte und hangwechselfeuchte Standorte weisen häufig einen temporären Hangwasserzug nach Niederschlagsereignissen auf. Hydroskopiemerkmale sind entsprechend stark ausgeprägt. Sollte der darüber liegende vernässungsfreie Bereich dazu noch eine geringe nutzbare Wasserspeicherkapazität ($< 50 \text{ l/m}^2$) aufweisen oder ist durch grobporenenreichen Blockschutt geprägt, wird unterstellt, dass rascher Zwischenabfluss entsteht (SSF 1).

Die grundfrischen, nur temporär grundfeuchten Standorte, zeichnen sich durch eine schwache Rostfleckung des Staukörpers aus und reagieren erst nach ergiebigeren Regenfällen mit Zwischenabfluss. Sie umschließen häufig grundfeuchte Standorte am Hang, deren Zwischenabfluss sich nach Starkregenereignissen horizontal ausdehnt. Eine Unterteilung zur Abflussintensität erfolgt auch hier durch die Anschätzung der nutzbaren Wasserspeicherkapazität aus den Daten der forstlichen Standortserkundung.

¹⁴ Hierunter fallen auch die in Thüringen ausgewiesenen feuchten sowie nassen, hangzügigen mineralischen Nassstandorte

Schritt 3: Gut wasserversorgte Standorte mit der Feuchtezahl 6 (Abb. 44, ⑨)

Im Allgemeinen sind Standorte der Feuchtezahl 6 sehr wüchsige Standorte mit ganzjährig guter Wasserversorgung. Sie weisen keine oder nur sehr schwache Vernässungsmerkmale in den oberen Horizonten auf. Die Wasserhaushaltsstufen reichen von frisch - sehr frisch, mäßig wechselfeucht/wechselfrisch bis hangfrisch. Unterschieden wird zwischen ebenen (0 - 5°) und geneigten Lagen (> 5°). Das ist notwendig, da es in den ebenen Lagen nur zu einem verzögerten seitlichen Wasserabfluss kommt. Insbesondere während der Schneeschmelze und nach länger anhaltenden Regenfällen kann der Wasserstau zu temporär gesättigten Verhältnissen führen. Verstärkt wird dies, wenn der transpirierende Baumbestand durch Windwürfe oder Käferkalamitäten auf diesen Flächen wegfällt. Ist die Speicherkapazität während eines Niederschlagsereignisses erschöpft, entsteht stark verzögerter Sättigungsoberflächenabfluss (SOF 3). Auf geneigten Flächen (> 5°) ist fast immer ein lateraler Wasserzug im grusigen Bodensubstrat zu erwarten. Hier entsteht verzögerter Zwischenabfluss (SSF 2).

Schritt 4: Standorte mit zeitweiser oder permanenter Staunässe im Oberboden (Abb. 44, ⑩)

Standorte mit einer Feuchtezahl ≥ 7 sind temporär oder permanent im Jahresverlauf vernässt und zeigen dies mit deutlich sichtbaren hydromorphen Merkmalen bis in den Oberboden hinein an. Die Spanne reicht von hangwasserzügigen bis hin zu anmoorigen Standorten. Im Klassifikationssystem wird unterschieden zwischen Standorten mit temporärer Vernässung und Bereichen, die nahezu das ganze Jahr über gesättigte Verhältnisse aufweisen. Da temporär vernässte Standorte (Abb. 44, ⑪) zumindest im Sommerhalbjahr gewisse Wasserspeicherpotenziale aufbauen, wird verzögerter Sättigungsoberflächenabfluss unterstellt (SOF 2). Permanent gesättigte Standorte verfügen hingegen über keine zusätzlichen Speicherpotenziale und reagieren daher sehr rasch mit Sättigungsoberflächenabfluss (SOF 1). Diese Bereiche befinden sich im Frankenwald sehr häufig in unmittelbarer Nähe zur Tiefenlinie (Auen, Schluchtwaldstandorte) und stehen in enger hydraulischer Anbindung zum Gewässernetz. Der auftreffende Niederschlag trägt daher in vielen Fällen unmittelbar und in voller Höhe zum Abfluss bei.

Schritt 5: Flächen ohne Standortinformationen

Sollten innerhalb des Einzugsgebietes Flächen vorkommen die nicht von der Standortkartierung erfasst sind, im Regelfall sind das waldfreie Flächen, ist zu prüfen, inwiefern sich andere Informationsquellen eignen (Bodenschätzung, Konzeptbodenkarte), um die Abflusssensibilität zu bewerten. Zum Beispiel werden auf den Hochflächen im Bereich der Tschirner Ködel größere Flächen landwirtschaftlich genutzt (Grünland). Die großmaßstäbigen Bodenschätzungen und die mittelmaßstäbige Konzeptbodenkarte weisen diese Flächen als skelettreiche

Verwitterungsböden aus. Als Bodenart kommen lehmige Sande/sandige Lehme mit einer nutzbaren Wasserspeicherkapazität von deutlich über 50 l/m² vor. Laut KBK ist der Untergrund oft dicht gelagert. Somit werden den landwirtschaftlich genutzten Böden auf den Hochlagen, gemäß dem Klassifikationsschema, der Abflussprozess SSF 3 zugeteilt. Im Bereich der Talauen sind einige von der forstlichen Standortserkundung nicht erfasste Grünlandflächen von der Bodenschätzung kartiert. Hier schwankt die Wasserstufe zwischen „feuchten Lagen ohne Staunässe“ (LIII₃ \triangleq frischer Standort) und der Übergangsstufe zu „nassen, stauenden Lagen“ (LIII₄ \triangleq sehr frischer bis feuchter Standort). Flächen der Wasserstufe 3 werden mit stark verzögertem Sättigungsabfluss ausgewiesen (SOF 3), während Flächen der Wasserstufe 4 verzögerter Sättigungsflächenabfluss (SOF 2) unterstellt wird. Erfahrungen vor Ort zeigten, dass die angegebenen Wasserhaushaltsstufen der Bodenschätzungskarten in der feuchten Talau gegenüber der forstlichen Standortskartierung zum Teil deutliche Vorteile haben. Ein Vergleich und gegebenenfalls eine Anpassung der ausgewiesenen Abflussintensität ist daher dringend notwendig.

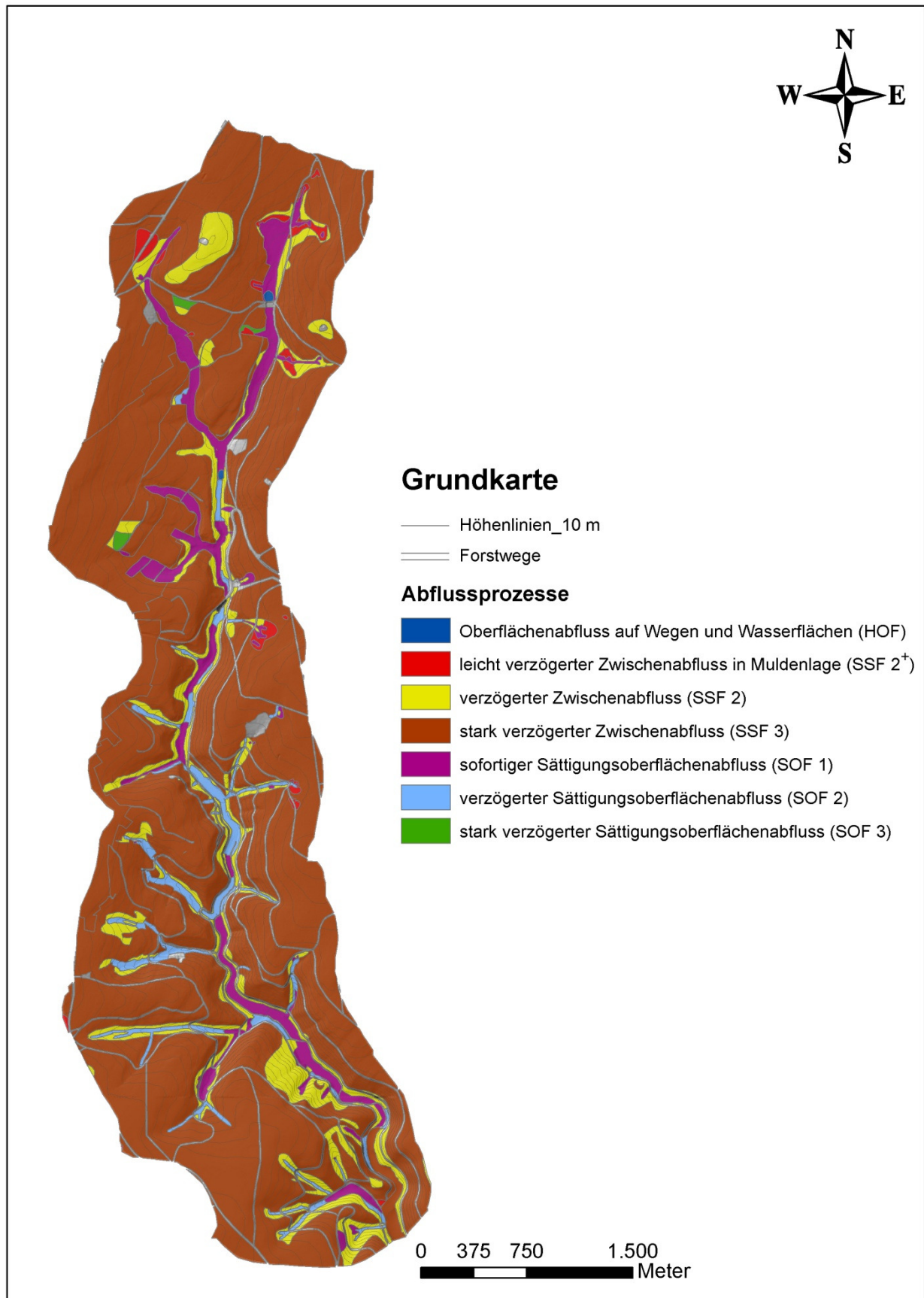
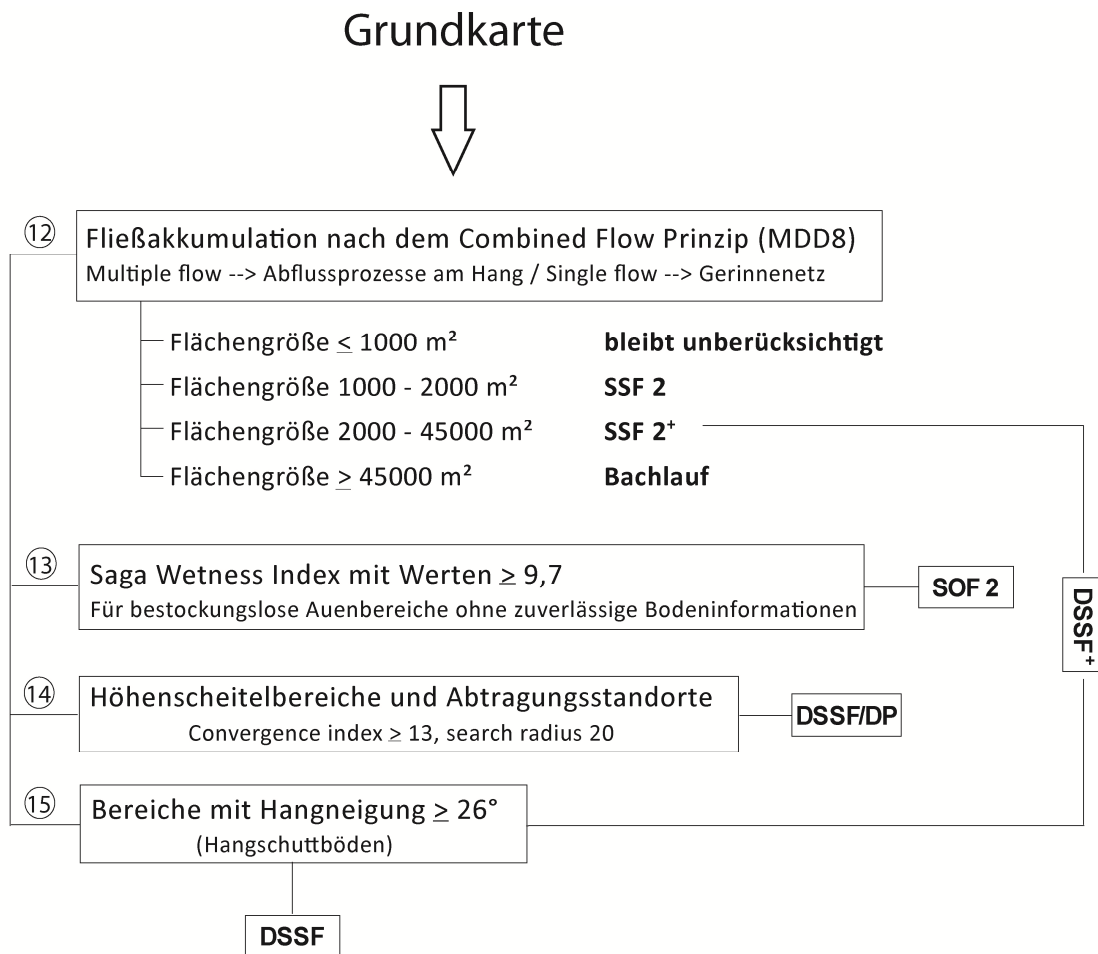


Abbildung 45: Auf Basis der forstlichen Standortskartierung erstellte Grundkarte für das Gebiet der Tschirner Ködel

Zweiter Teil – Einbeziehung von Reliefanalysen

Da die Kartenwerke häufig nicht alle am Abflussprozess beteiligten Bodenschichten und in der Tiefe ziehendes Hangwasser erfassen, müssen die fehlenden Informationen in einem zweiten Teil über Reliefanalysen hergeleitet werden (Abb. 46). Das Hauptziel ist die Identifikation von Flächen mit potenziellem Zwischenabfluss. Dazu werden Höhengipfelbereiche, Abtragungsstandorte, Muldenbereiche und Steilhänge mit Hilfe eines GIS ermittelt und mit der Grundkarte verschnitten. Als Ergebnis entsteht eine Abflussprozesskarte, die jedem Bereich innerhalb des Wassereinzugsgebietes eine Abflussintensität zuweist.



➔ Die angegebenen Werte sind Standardwerte, die an die Strukturen des betreffenden Gebietes angepasst werden müssen!

Abbildung 46: Ableitungen auf Grundlage des digitalen Höhenmodells

Schritt 6: GIS-gestützte Ableitung von Flächen mit temporärem und permanentem Zwischenabfluss (Abb. 46, 12)

Mit Hilfe des digitalen Höhenmodells (5 x 5 m) werden Flächen ausgegliedert, auf denen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Zwischenabfluss deutlich erhöht ist. Das sind in der Regel alle konvergierenden Hangformen. Es wird davon ausgegangen, dass die Intensität des Zwischenabfluss mit zunehmender Größe der beitragenden Fläche steigt, bis schließlich ein Gerinne entsteht (Abb. 47).

Die unterstellten Ausdehnungen der beitragenden Flächen für die Abflussintensitäten - SSF 2, SSF 2⁺, Gerinne - unterscheiden sich zwischen beiden Gebieten (Tab. 12) und gehen auf Vergleiche zwischen modellierten Ergebnissen und den Verhältnissen vor Ort zurück. Als Referenzpunkte dienten Quellaustrittsstellen kleinerer lokaler Teileinzugsgebiete.

Die Berechnung der spezifischen Einzugsgebietsgröße wurde über die Fließakkumulation nach einem kombinierten Ansatz von SCHÄUBLE (2003) berechnet. Das Modell wechselt dabei automatisch ab einem bestimmten Schwellenwert vom multiple flow Verfahren, für die unterstellte unterirdische Fließphase am Hang, zur single flow Methodik, zur Berechnung des Gerinnesystems (vgl. Tab. 12). Vor der Reliefanalyse empfiehlt sich das Höhenmodell mit einem 3 x 3 Filter zu glätten, um kleinräumige Inhomogenitäten und Artefakte zu beseitigen.

Problematisch gestaltet sich die Trennung im Grenzbereich zwischen unterirdischer und oberirdischer Fließphase (return flow-Flächen) durch das Modell. Gerade an auslaufenden Unterhängen kommt es vor Ort zu einer Vermischung von Sättigungsflächenabfluss und Zwischenabfluss. Diese Bereiche können mit dem Modell nur annähernd bestimmt werden und müssen über bodenkundliche Informationen oder Geländebegänge ausgewiesen bzw. nachkartiert werden. Forstliche Standortskarten haben zwar Schwächen in der Kennzeichnung unterirdischer Abflussprozesse, geben aber in der Regel (Ausnahme: lagebedingte Standorte) Feuchtfächen recht zufriedenstellend wieder. Aus diesem Grund werden die Überlappungsflächen zwischen dominierendem Zwischenabfluss aus der Reliefanalyse und den aus der Standortskarte ermittelten Flächen mit dominierendem Sättigungsflächenabfluss zugunsten der Sättigungsflächen priorisiert.

Tabelle 12: Anpassung der Schwellenwerte zur Kalibrierung der Abflusssimulation eines 5 x 5 m gerasterten Höhenmodells

		—	SSF 2	SSF 2+	Gerinne
Röthengrund Raster 5x5m	Schwellenwert (Anzahl Pixel)	1 - 47	47 - 80	80 - 1600	> 1600
	≙ Fläche [m ²]	≤1175	1175 - 2000	2000 - 40000	> 40000
Tschirner Ködel Raster 5x5m	Schwellenwert (Anzahl Pixel)	1 - 40	40 - 85	85 - 2000	> 2000
	≙ Fläche [m ²]	≤1000	1000 - 2125	2125 - 50000	> 50000

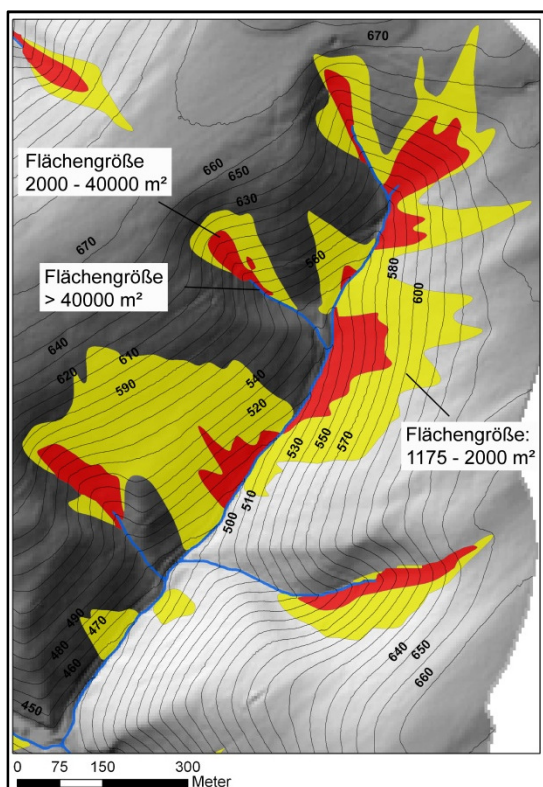


Abbildung 47: Ergebnis der Fließakkumulation nach den festgelegten Schwellenwerten am Beispiel eines Teileinzugsgebietes aus dem Röhthengrund. Die Intensität des Zwischenabfluss nimmt von Gelb (SSF 2) nach Rot (SSF 2⁺) zu.

Schritt 7: Ausweisen gerinnenaher Sättigungsbereiche im Röhthengrund (Abb. 46, ⑬)

Die Standortskartierung im Röhthengrund erfasst nur kleine Teile der bestockungslosen Aue. Sie wurden daher ersatzweise mit dem SAGA Wetness Index modelliert (Abb. 46, ⑬). Als Referenz dienten alle Standortseinheiten im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel, die auf Staunässe hindeuten. Die Gegenüberstellung zwischen modellierten Sättigungsbereichen und den kartierten staunassen Standorten erbrachte im Gebiet der Tschirner Ködel eine lagegetreue Übereinstimmung von 55 % (Abb. 48).

Auf Grundlage dieser Schwellenwerte wurden die Sättigungsbereiche der Aue im Röhthengrund berechnet. Dabei werden alle Flächen mit Indexwerten $\geq 9,7$ (Min: 3,6/Max: 19,8) zu Bereichen mit verzögertem Sättigungsflächenabfluss (SOF 2) erklärt. Auf die Ausweisung unterschiedlicher Intensitätsstufen wurde wegen der hohen Heterogenität des Indexes auf kleinstem Raum verzichtet.

Einzugsgebiet Tschirner Ködel

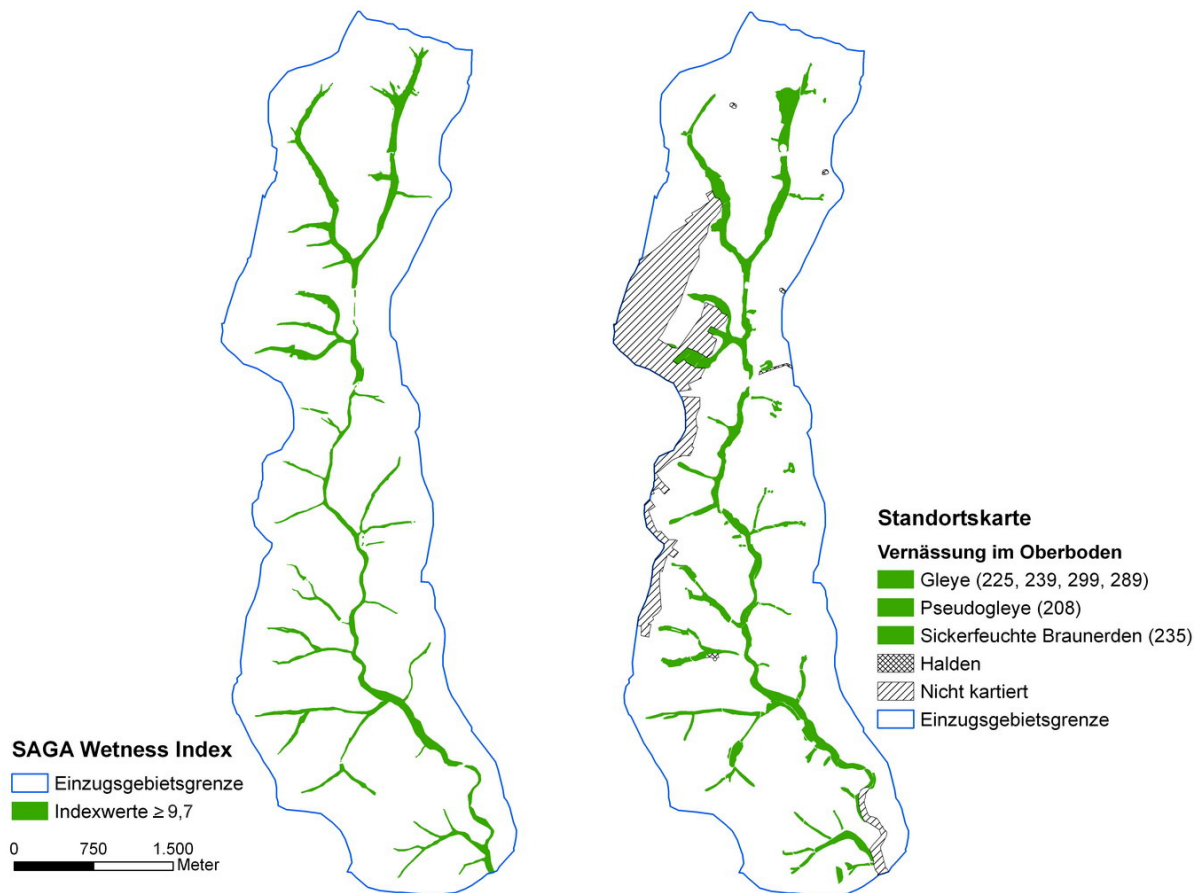


Abbildung 48: Potenzielle Sättigungsabflussflächen nach dem SAGA Wetness Index (links) und die in den Standortskarten ausgewiesenen Standorteinheiten mit Vernässungsmerkmalen im Oberboden (rechts) für das Einzugsgebiet der Tschirner Ködel

Da die Talauen von unterirdisch zufließendem Hangwasser der Bergflanken gespeist werden, können kleinflächige Bereiche entstehen, die gerade im Frühjahr vollständig wassergesättigt sind und sofort abflusswirksam werden. Mit Hilfe von hochauflösenden Echtfarbenorthofotos wurden die bestockungslosen Auenbereiche auf Feuchtstellen abgesucht. Häufig deuten Erosionserscheinungen oder ein Farbwechsel des Bodens auf solche Flächen hin (Abb. 49). Diese Stellen wurden mit sofortigem Sättigungsflächenabfluss (SOF 1) klassifiziert.



Abbildung 49: Bestockungslose Fläche mit deutlich sichtbaren Strukturen, die auf oberflächlich abfließendes Wasser infolge gesättigter Flächen hindeuten.

Schritt 8: Ausweisung von Abtragungsstandorten – Konvergenz/Divergenz Index (Abb. 46, ¹⁴)

Nach dem Zusammenführen der Informationen aus der Standortkarte und der Abflussmodellierung werden die Bereiche ausgewiesen, bei denen aufgrund der Reliefsituation eine solifluidale Ablagerung von Bodenmaterial als nicht wahrscheinlich erscheint (Abb. 46, ¹⁴). Die Hauptlage überzieht hier in der Regel direkt das anstehende Ausgangsgestein. Nach den Untersuchungen von SCHILLING und SPIES (1991), SAUER (2002), TILCH et al. (2002) und SCHOLTEN (2003) ist dies auf Abtragungsstandorten, wie Kuppen, Rücken, Oberhängen sowie konvexen Hangabschnitten der Fall. Die Ausweisung divergenter Bereiche erfolgt mit Hilfe des *convergence_radius index* ($\ln[A/\tan(\beta)]$, search radius: 20, direction to the center cell), der in die frei erhältliche Software SagaGis2.0 eingebunden ist. In der daraus entstehenden Rasterdatei erhalten konvergierende Zellen negative Werte, divergierende Zellen erhalten positive Werte. Der Schwellenwert für potenzielle Erosionsstandorte und Höhenbereiche wurde gutachterlich für beide Gebiete auf +13 festgelegt (Min: -56/Max: 85). Die Rasterdatei wird entsprechend reklassifiziert und alle divergierenden Flächen, sprich konvexe Hangformen und Höhengipfel, in die Grundkarte übernommen. Als dominierender Abflussprozess wird verzögerter Tiefer Zwischenabfluss (DSSF) und Tiefensickerung (DP) angenommen. Da auf den

Höhenbereichen Verdichtungsbänder vorkommen können, sind Bereiche, die von der Standortkartierung als verdichtet angesprochen wurden, der Regionalisierung in jedem Falle vorzuziehen. Hier ändert sich der Abflussprozess von DSSF/DP zu SSF 3.

Schritt 9: Ausweisen von Hangschuttböden (Abb. 46, ⑤)

Nach BÜDEL (1981) überwiegt ab einer bestimmten Hangneigung die Schwerkraft gegenüber der gerichteten Solifluktion. Als Folge werden die periglazialen Deckschichten durch die hohe Reliefenergie ausgeräumt und es bilden sich lockere, schlecht sortierte und grusreiche Hangschuttdecken (Regosole, Braunerde-Regosole) aus. Die Verdichtung beschränkt sich, wenn überhaupt, nur auf den rudimentär ausgebildeten, gelockerten Basisschutt. Häufig behindert die Zersatz- und Zerfallszone des anstehenden Ausgangsmaterials die vertikale Perkolation. Als dominierender Abflussprozess muss mit gering beeinflussbarem, tiefem Zwischenabfluss (DSSF) gerechnet werden. Der Hangneigungswinkel, der dabei nötig ist, ist vom Scherwiderstand des Bodensubstrates abhängig. Für schluffig-sandige Böden gibt REUTER et al. (1992) einen Winkel zwischen 21° bis 33° an. Durch die Analyse verschiedenster Bodengruben in den Untersuchungsgebieten wird der Grenzwinkel in dieser Untersuchung gutachterlich bei 26° festgelegt (Abb. 46, ⑤). Um eine zu starke Zersplitterung der Hangschuttböden durch das hoch aufgelöste digitale Höhenmodell zu vermeiden und um sinnvolle Bewirtschaftungseinheiten zu erhalten, wurden alle zusammenhängenden Flächen, die eine Mindestgröße von 2500 m² unterschreiten, den benachbarten Polygonen mit der längsten gemeinsamen Kantenlänge zugeordnet (Befehl „eliminate“, ArcInfo). Die Ausdehnung der kleinsten Einheit der Hangschuttböden beträgt daher mindestens 2500 m².

Die ausgewiesenen Hangschuttböden werden mit der Grundkarte verschnitten und gegenüber den bereits ausgewiesenen Abflussprozessen priorisiert. Eine Ausnahme bilden Hangschuttböden, die in wasserzuflussbegünstigte Bereiche fallen. Hier wird aufgrund des Fehlens eines Stauhorizontes und der Nähe zum Gerinnenetz der schnell abflusswirksame Prozessstyp DSSF⁺ zugeordnet.

5.1.2.1 Abflussprozesskarten der beiden Untersuchungsgebiete

Die Abbildungen 50/51 zeigen die mit Hilfe eines GIS erstellten Abflussprozesskarten der untersuchten Gebiete. Aufgrund des wasserundurchlässigen Untergrundes und den darüber liegenden durchlässigen und gut drainierten Deckschichten dominieren in beiden Wassereinzugsgebieten unterirdische, laterale Abflussprozesse. Standorte mit Zwischenabfluss (SSF) und Tiefem Zwischenabfluss (DSSF, DSSF/DP) nehmen im Röthengrund 91 % und im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel 87 % der untersuchten Fläche ein (Abb. 50/51). Sofortiger Zwischenabfluss (SSF 1) konnte in keinem Gebiet ausgewiesen werden.

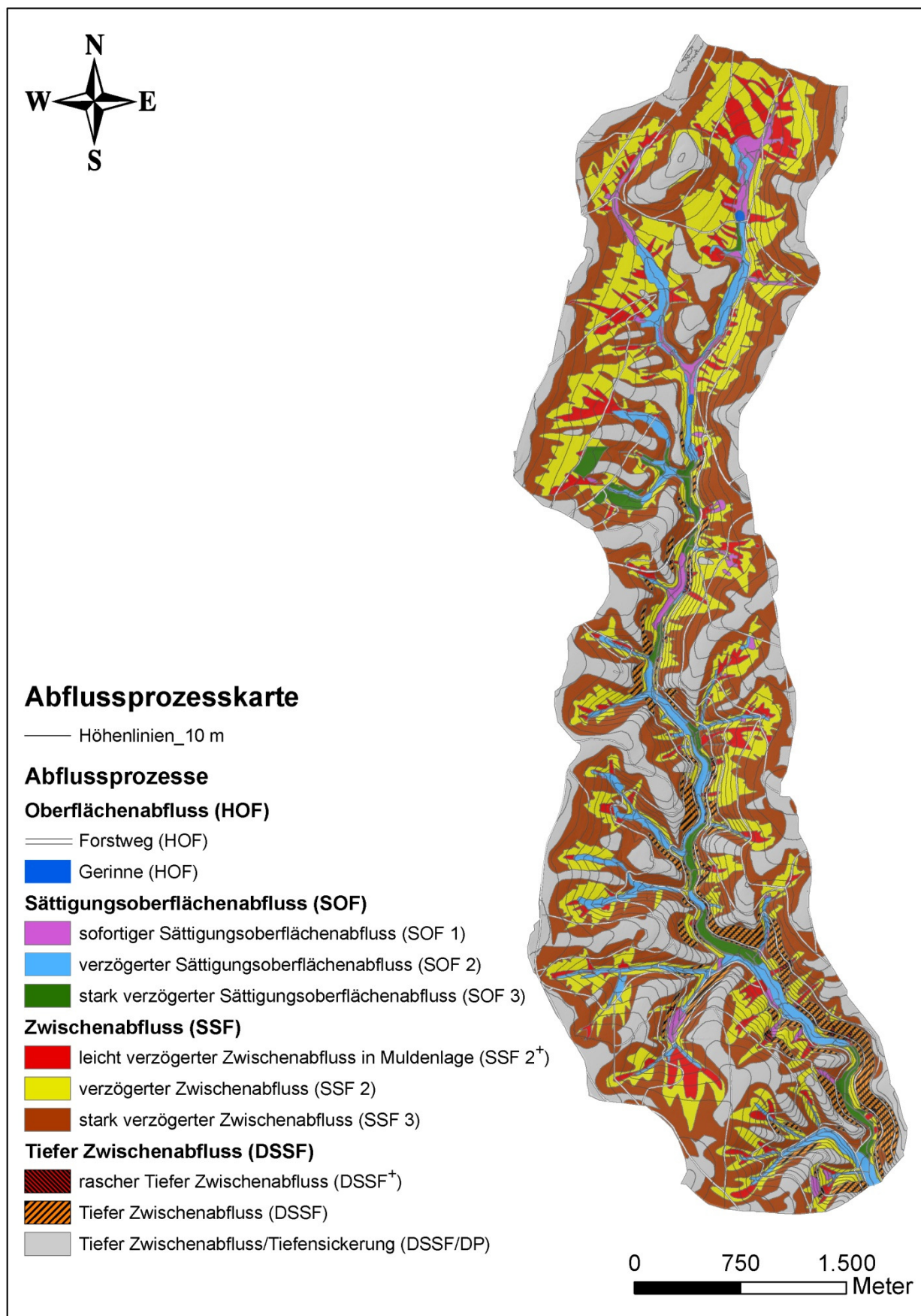


Abbildung 50: Abflussprozesskarte im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel

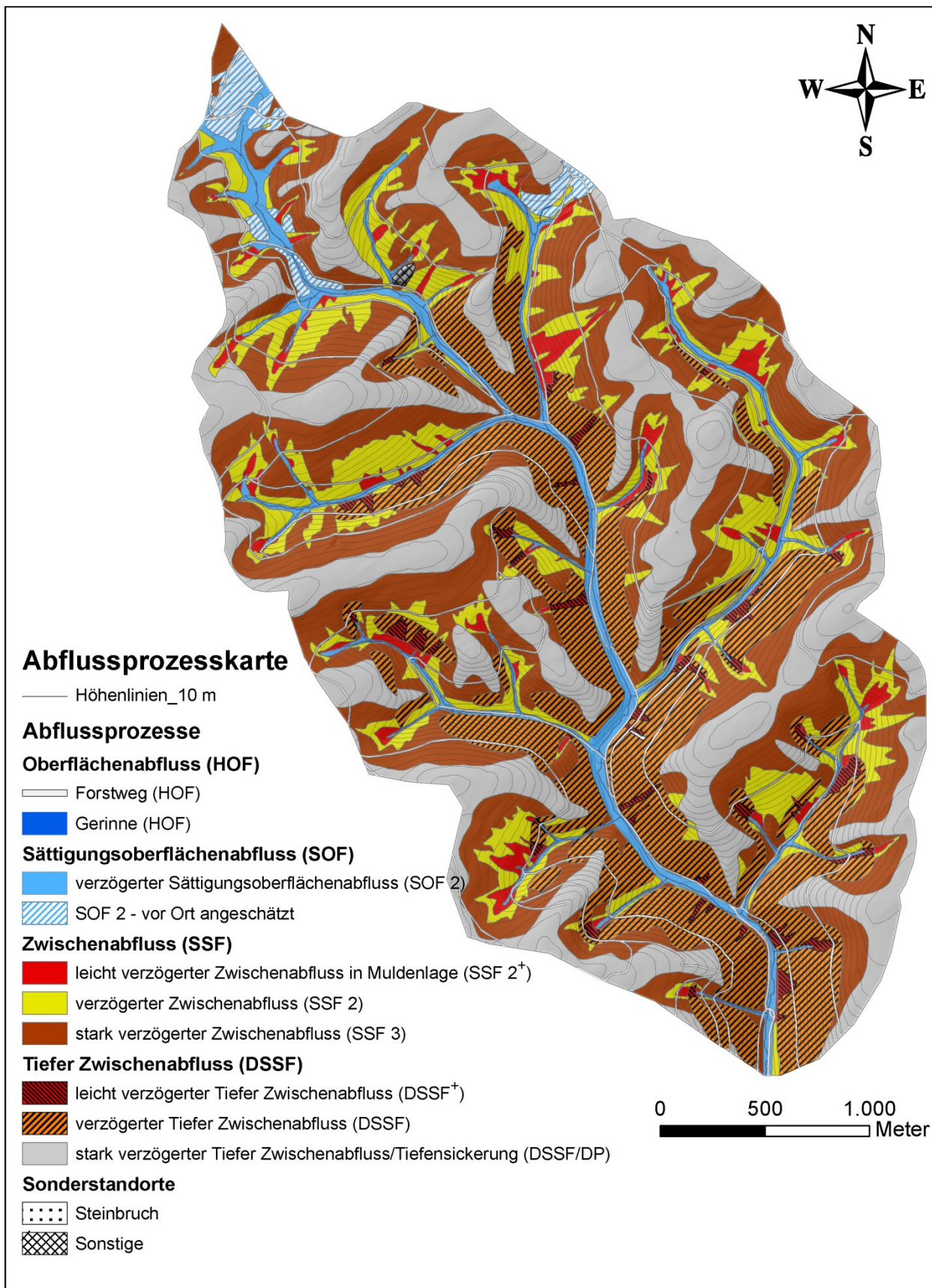


Abbildung 51: Abflussprozesskarte im Wassereinzugsgebiet der Röthen. Die blau-gestreift ausgewiesenen Bereiche (SOF 2) sind das Ergebnis von Geländebegehungen, da in diesen Bereichen keine verwertbaren bodenkundlichen Informationen vorlagen

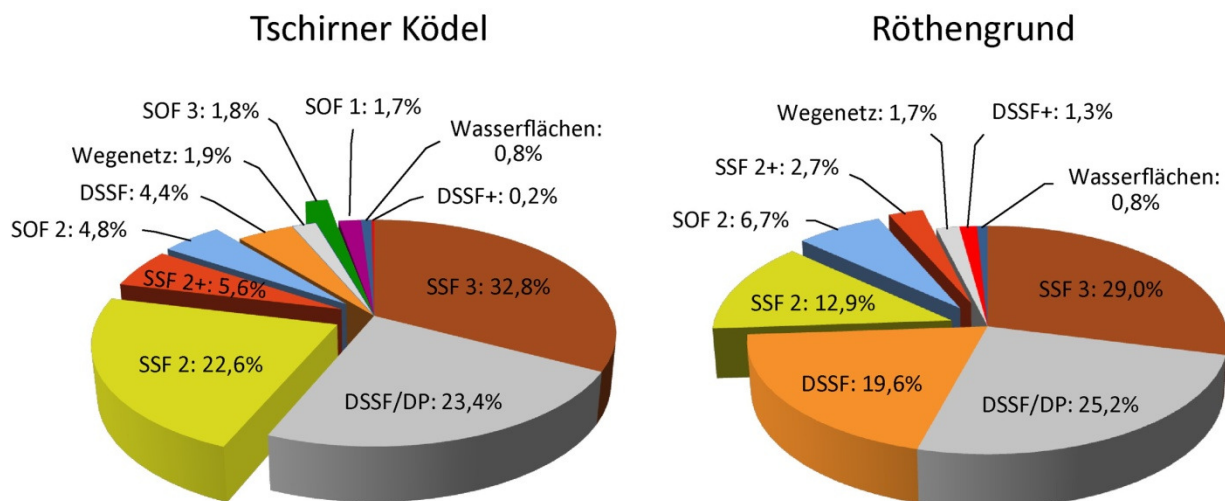


Abbildung 52: Aufteilung der Abflussprozesse im Gesamteinzugsgebiet. Beeinflussbare Flächen sind herausgestellt.

Leicht verzögerter Zwischenabfluss (SSF 2) kommt im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel deutlich häufiger vor als im Röhthengrund. Hier nimmt die Abflusskomponente fast 1/4 des klassifizierten Bereichs ein. Im Bereich des stark verzögerten Zwischenabflusses (SSF 3) unterscheiden sich beide Gebiete nur geringfügig (Abb. 52).

Bereiche mit Sättigungsflächenabfluss konzentrieren sich auf die gerinnenahen Auen- und Quellbereiche (Abb. 50/51) und sind mit 8,3 % (Tschirner Ködel) bzw. mit 6,7 % (Röhthengrund) vertreten. Dabei spielt der sofortige Sättigungsflächenabfluss (SOF 1) reliefbedingt im Bereich der Tschirner Ködel mit 1,7 % eine bedeutendere Rolle als im Röhthengrund, wo dieser Abflussprozess nicht ausgeschieden ist. Die Kastentäler der Tschirner Ködel und deren



Nebenarme weisen das gesamte Jahr über hohe Grundwasserstände aus, während in den tief eingeschnittenen Tälern mit rasch ansteigender Sohle des Röhthengrundes nur die unmittelbaren Austrittsstellen des Zwischenabflusses (return flow) kleinflächige Vernäsungen bilden.

Abbildung 53: Rasches Eintrüben des Baches nach einem ca. 15-minütigen heftigen Gewitterschauer. Das gesamte Wasser entstammt aus schnell reagierenden Flächen. In der rechten, unteren Bildecke sind die ausgewaschenen, hellen mineralischen Bestandteile der Wegeableitung (HOF) deutlich zu erkennen. Die dunklen Eintrübungen des Hauptbaches resultieren von Auswaschungen der darüber liegenden wassergesättigten Talböden und Hangmulden (SOF 1).

Durch ausgeschwemmte organische Bestandteile und andere Sedimente der grundwassernahen Standorte trübt sich das Wasser der Tschirner Ködel selbst nach kurzen Regenschauern rasch ein (Abb. 53). Mit einer angenommenen Wegebreite von 3,5 m bzw. auf Bundesstraßen von 5,0 m entsteht rechnerisch in beiden Gebieten auf 1,8 % der Fläche Oberflächenabfluss (Wegenetzdichte $\approx 5,0 \text{ km/km}^2$ bzw. 50 lfm/ha). Da ein Großteil davon wieder in die Fläche reinfiltriert und nur vorfluternahe Wege unmittelbar zum schnellen Abflussgeschehen beitragen, ist nicht davon auszugehen, dass sich der Wegeabfluss entscheidend auf den Hochwasserscheitel auswirkt. An einigen Stellen im Röthengrund konnte auch beobachtet werden, dass mit den Wegen wasserführende Schichten angeschnitten wurden. Nach längeren Regenereignissen tritt hier das Wasser aus dem Hang heraus und wird, falls keine Querentwässerung vorhanden ist, über den Weg regelrecht zum Vorfluter „kanalisiert“. Offene Wasserflächen (Bäche, Seen, Weiher) sind mit rund 0,8 % an der Einzugsgebietsfläche beteiligt.

5.1.3 Eigene Standortkartierung

Um die Aussagekraft der forstlichen Standortskarte bewerten zu können, wurde auf einem etwa 80 ha großen Teilgebiet der Tschirner Ködel und zwei kleineren Gebieten mit markantem Wasserhaushalt eigene Bohrstockkartierungen durchgeführt. Das Ziel lag in einer möglichst genauen Beschreibung der Wasserverhältnisse vor Ort. Zudem sollte geprüft werden, ob die auf Basis des digitalen Höhenmodells berechneten unterirdischen Abflussbahnen mit den Verhältnissen vor Ort auch tatsächlich übereinstimmen. Da der Nachweis von unterirdisch fließendem Wasser mit dem Bohrstock häufig nicht möglich ist, wurden gefundene Hangwasseraustrittsstellen, die einen Hinweis auf laterale Fließprozesse im Boden geben, zusätzlich mit grünen Punkten in die Karte integriert.

5.1.3.1 Standörtliche Verhältnisse im Kartiergebiet

Nach den Kartiererergebnissen können die geologischen Verhältnisse des untersuchten Gebietes in zwei Einheiten zusammengefasst werden, die im Wesentlichen mit denen der geologischen Karte übereinstimmen. Zum einen die von gelbgrauen Tonschiefer (Bordenschiefer) dominierten Mittel- und Unterhänge, auf denen sich schwach tonige Lehmböden mit mittlerer bis großer Entwicklungstiefe ausbildeten. Zum anderen die Bereiche der Kuppen- und Plateaulagen, die von mittelkörniger Grauwacke in Wechsellagerung mit Tonschiefer gekennzeichnet sind. Hier tendieren die lockeren Deckschichten zum sandigen Lehm, die aufgelockerte Zersatz- und Zerfallszone zu schluffig-lehmigen Sand, bei einer mittleren Entwicklungstiefe. Für die Vergabe einer weiteren Substratgruppe (1 = sandiger Lehm/lehmiger Sand) wurde aufgrund der grenzwertigen Bodenart und der Übersichtlichkeit verzichtet. An einigen Stellen am Unterhang konnten stark verdichtete Fließerden festgestellt werden, die in der eigenen Stand-

ortskarte als geschichtete Standorte verschlüsselt wurden (Abb. 55). Dabei weist das verlagerte Bodensubstrat auch an den Unterhängen einen deutlich höheren Sandgehalt auf.

Auch auf den leicht geneigten Plateaulagen sind neben autochthonen Braunerden eingeschobene Bänder mit periglazialen Verdichtungserscheinungen anzutreffen (Abb. 54/55). Die Verdichtung setzt hier in einer Tiefe zwischen 50 bis 80 cm unter der Geländeoberfläche an und ist mit dem Bohrstock, im Gegensatz zu den Hängen, verhältnismäßig gut zu erreichen. Die Fließrichtung der Solifluktion ist am rezenten Relief nicht mehr nachvollziehbar. Mäßige Rostfleckung im Unterboden zeugt von stagnierenden Verhältnissen während längerer feuchter Witterungsperioden und zur Schneeschmelze im Frühjahr. Fehlt die wasserverdunstende Waldbestockung bilden sich auf den Fließerden Braunerde-Pseudogleye aus.

Im Allgemeinen konnte festgestellt werden, dass der Untergrund auf einer Vielzahl von Standorten eine dichtere Lagerung über dem Ausgangsmaterial aufweist. Von einer geringmächtigen Zersatz- und Zerfallszone bis hin zu mächtigen Akkumulationslagen kommen alle Ausprägungen vor. Damit dürfte die Infiltration in den Kluftgrundwasserleiter auf vielen Standorten zusätzlich beeinträchtigt sein. In Bereichen hoher Abflusskonzentration, häufig oberhalb der Gerinnebildung, sind die erosiven Kräfte des Wassers oftmals so groß, dass die Verdichtungslage mit dem Bohrstock nicht mehr nachweisbar und als ausgeräumt zu bezeichnen ist.

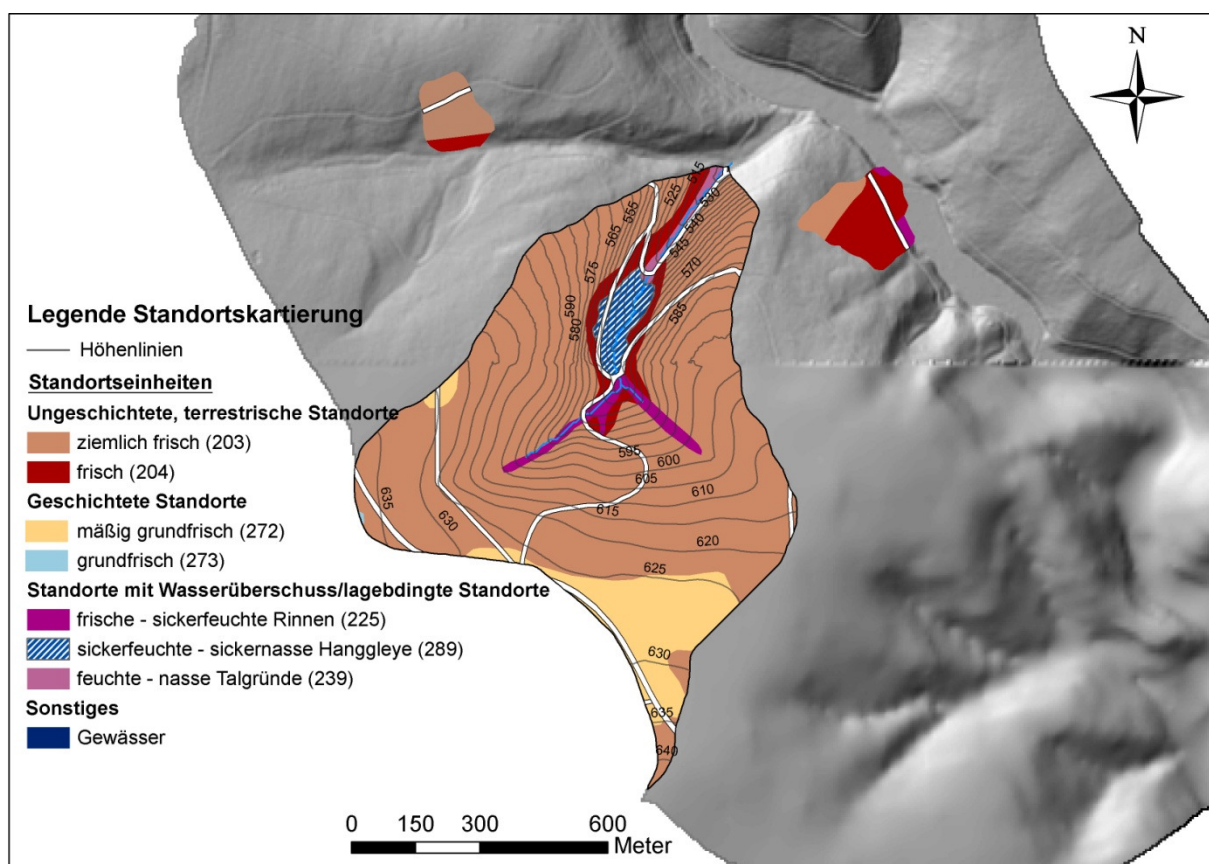


Abbildung 54: Ausschnitt der aktuell vorliegenden Standortskarte der untersuchten Teilbereiche, Aufnahmezeitraum: 1982 - 1983

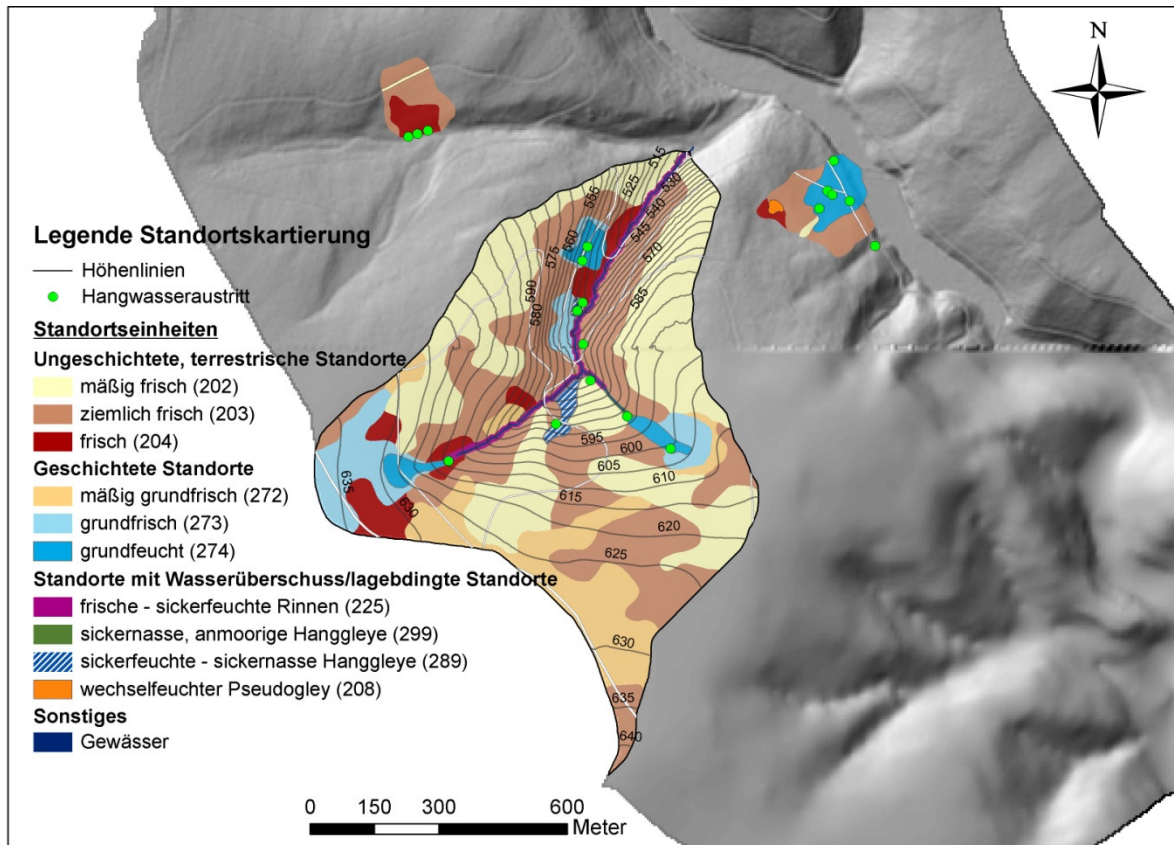


Abbildung 55: Ergebnis der eigenen Standortkartierung. Halbhydromorphe Standorte mit dominierendem Zwischenabfluss sind hellblau/blau-gesteift dargestellt. Hangwasseraustrittsstellen sind mit grünen Punkten markiert.

5.1.3.2 Vergleich der erstellten Abflussprozesskarte mit der vor Ort ermittelten Abflussintensität

Aus den Kartierergebnissen und Beobachtungen vor Ort wurde der konkrete Flächenbeitrag zur Abflussbildung angesprochen und der modellierten Abflussprozesskarte gegenübergestellt (Abb. 56). Aufgrund der bereits erwähnten Schwierigkeiten bei der Beprobung der Standorte wurden vor Ort vermutlich nicht alle abflusssensitiven Standorte erfasst. Ein direkter Vergleich fällt damit schwer, wurde aber dennoch versucht. Das gilt auch für die horizontalen Ausdehnungsflächen (gelb, SSF 2) der grundfeuchten Standorte (rot, SSF 2⁺), die nur nach starken Regenfällen längere Zeit wasserbeeinflusst sind. Durch die verhältnismäßig kurzen, reduzierenden Bedingungen weisen diese häufig keine Vernässungsmerkmale im Unterboden auf und sind daher hinsichtlich des Hochwasserbeitrags mit dem Bohrstock nicht zu interpretieren. Der Anteil dieser Flächen wurde daher vermutlich unterschätzt (vgl. Abb. 56). Die im Gelände gefundenen Hangwasseraustrittsstellen (überwiegend temporär schüttend) sind durch grüne Punkte in der Karte (Abb. 56) markiert. Aufgrund des weitgehend wasserundurchlässigen Grundgesteins sind solche Stellen ein sicheres Zeichen für oberflächennahe, laterale Wasserbewegungen oberhalb der Austrittsstellen.

Im Bereich 1 (Abb. 56, unten) konnten z.T. sehr stark verdichtete Fließerden, beginnend vom Mittelhang in Richtung Talmulde, kartiert werden. Der gesamte Unterhang weist im Unterboden schwache bis mäßige Rostfleckung auf, die auf einen temporären Wasserüberschuss hindeuten (Bereich 2). Am nördlichen Ende der Markierung konnten an einer Bodengrube (Berechnungsparzelle 10) intensive Zwischenabflüsse nach Regenereignissen nachgewiesen werden. Erkennbar auch an der deutlich ausgeprägten Rostfleckung der wassertragenden Schicht im Untergrund. Auf den stark geneigten Hängen wurde lockerer Hangschutt festgestellt und Tiefer Zwischenabfluss kartiert.

Der Vergleich mit der erstellten Abflussprozesskarte zeigt eine gute Übereinstimmung. Die modellierte Abflussprozesskarte weist definitionsgemäß auf den stark geneigten Hängen Tiefen Zwischenabfluss aus. Auch der Bereich mit erhöhter Abflusskonzentration konnte durch die Abflussmodellierung erfasst werden.

Eine oberflächennahe Vernässung des Unterhangs im Bereich 2, wie sie die alte Standortskarte auf größerer Fläche ausweist, konnte nicht festgestellt werden. Die angrenzenden Hangbereiche sind durch grundfrische/-feuchte Braunerden im Übergang zu Pseudogley-Braunerden mit verhältnismäßig guten lateralen Wassertransportkapazitäten der oberen Bodenhorizonte geprägt. Kleinflächige Pseudogleye sind lediglich in unmittelbarer Umgebung von zwei temporär schüttenden Hangwasseraustrittsstellen zu finden. Hinsichtlich der Ausweisung von Abflussprozessstypen stellt der Bereich in Gerinnenähe den Übergang vom Zwischen- zum Sättigungsflächenabfluss dar. Häufig tritt das Wasser jedoch erst unmittelbar durch angeschnittene wasserführende Schichten am Bachufer aus. Da die Abflussprozesskarte auf die Daten der Standortskartierung zurückgreift (sickerfeuchter – sickernasser Hanggley), wurde, laut dem Expertenschema, im gesamten Bereich sofortiger Sättigungsflächenabfluss (SOF 1) unterstellt. Nach dem Geländebezug müsste richtigerweise dominierender, verzögerter Zwischenabfluss (SSF 2), im Verzahnungsbereich verzögerter Sättigungsflächenabfluss (SOF 2) ausgewiesen werden. Nur innerhalb des schmalen Trogtales entsteht durch zufließendes Wasser der Hänge ein kleiner anmooriger Bereich mit sofortigem Sättigungsflächenabfluss.

Die Ausschnitte Nummer 3 und 4 werden durch das 10 x 10 m Geländemodell auf Basis von Höhenschichtlinien von 1903 modelliert. Die südwestlich gelegene Mulde (Bereich 3, Abb. 56, unten) weist mit der vor Ort angeschätzten Abflussintensität gute Übereinstimmungen auf. Unterschiede gibt es in der kartierten Ausdehnung der abflussbeitragenden Flächen. Da sich die Bohrstockprobe bei der Ausweisung auf das Vorhandensein von Rostflecken und Konkretionen stützt, die nur auf verhältnismäßig häufig wasserbeeinflussten Standorte nachweisbar sind, konnten abflusssensitive Flächen nur an den Unterhängen kartiert werden. Hangbereiche, die nur nach stärkeren Regenfällen einen Zwischenabfluss aufweisen, das sind die für den vorbeugenden Hochwasserschutz wichtigen grundfrischen Ausdehnungsflächen (SSF 2),

sind nicht kartierbar. Sie können nur durch einen angepassten Schwellenwert zur spezifischen Einzugsgebietsgröße über das Geländemodell näherungsweise dargestellt werden.

Im Bereich 4 (Abb. 56, unten) wurden durch die Abflusssimulation großflächig abflusssensitive Standorte ausgewiesen, die über die Bohrstockkartierung nicht bestätigt werden konnten. Dafür sind gleich mehrere Gründe ausschlaggebend. Zum einen gibt das Höhenmodell nicht exakt das Oberflächenrelief wieder. Das Gelände vor Ort weist eine deutliche Hangrippe innerhalb der Mulde auf, während das Höhenmodell eine mehr oder weniger einheitlich große Mulde suggeriert, in der sich entsprechend viel Wasser akkumulieren würde. Hier ist zu vermuten, dass die wenigen Stützpunkte aus den veralteten Höhenschichtlinien das Relief zu stark glätten. Auch die über die Bohrstockkartierung angesprochene Abflussintensität ist fehlerbehaftet. So konnten in dem stark stein- und blockschutthaltigen Substrat nur wenig vollständig erhaltene Bodenproben gezogen werden. Auch reichte die Bohrstocklänge oftmals nicht aus, um bis zum Untergrund vorzudringen. Damit liegen keine Informationen über laterale Wasserbewegungen im Hang vor. Hinweise, dass Zwischenabflüsse im Hang bestehen, geben drei gefundene Hangwasseraustrittsstellen in der Umgebung (Abb. 56). Aufgrund ihrer Schüttungsmenge und ihrem Schüttverhalten muss jedoch eher von kleinflächigem Zwischenabfluss ausgegangen werden, der keinesfalls die unterstellte Ausdehnung aus der modellierten Abflussprozesskarte erreicht.

In den beiden kleineren, abseits gelegenen Gebieten weist die Abflussprozesskarte ebenfalls intensivere Zwischenabflüsse auf. Sie konnten durch Bohrstockkartierungen vor Ort nachgewiesen werden. Allerdings fiel es auch hier schwer, einen Übergangshorizont zwischen grundfeuchten und grundfrischen Standorten zu kartieren. Besonders der Bereich 5 (Abb. 56, unten) ist durch eine schlagartig ansetzende, hohe Hangwasserkomponente geprägt. Hier hat es den Anschein, als ob der Hang durch Kluffquellen gespeist wird, die im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel vereinzelt auftreten können.

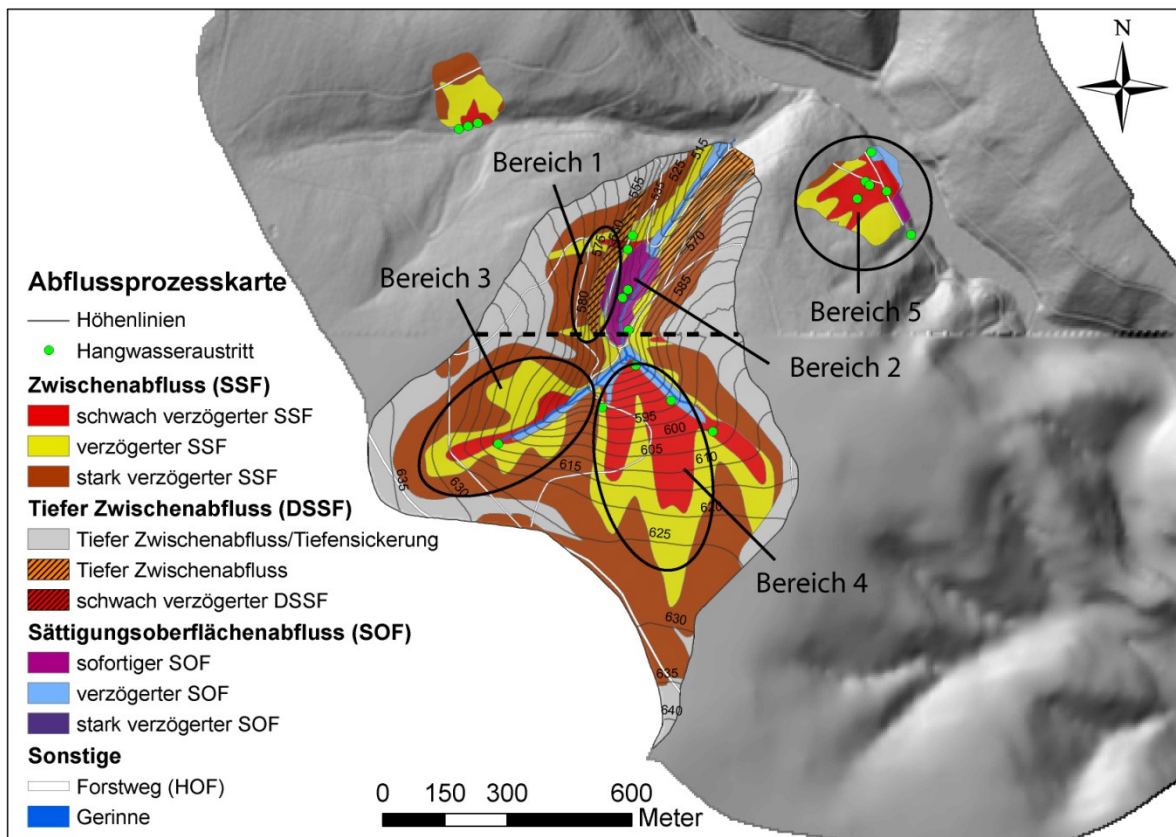
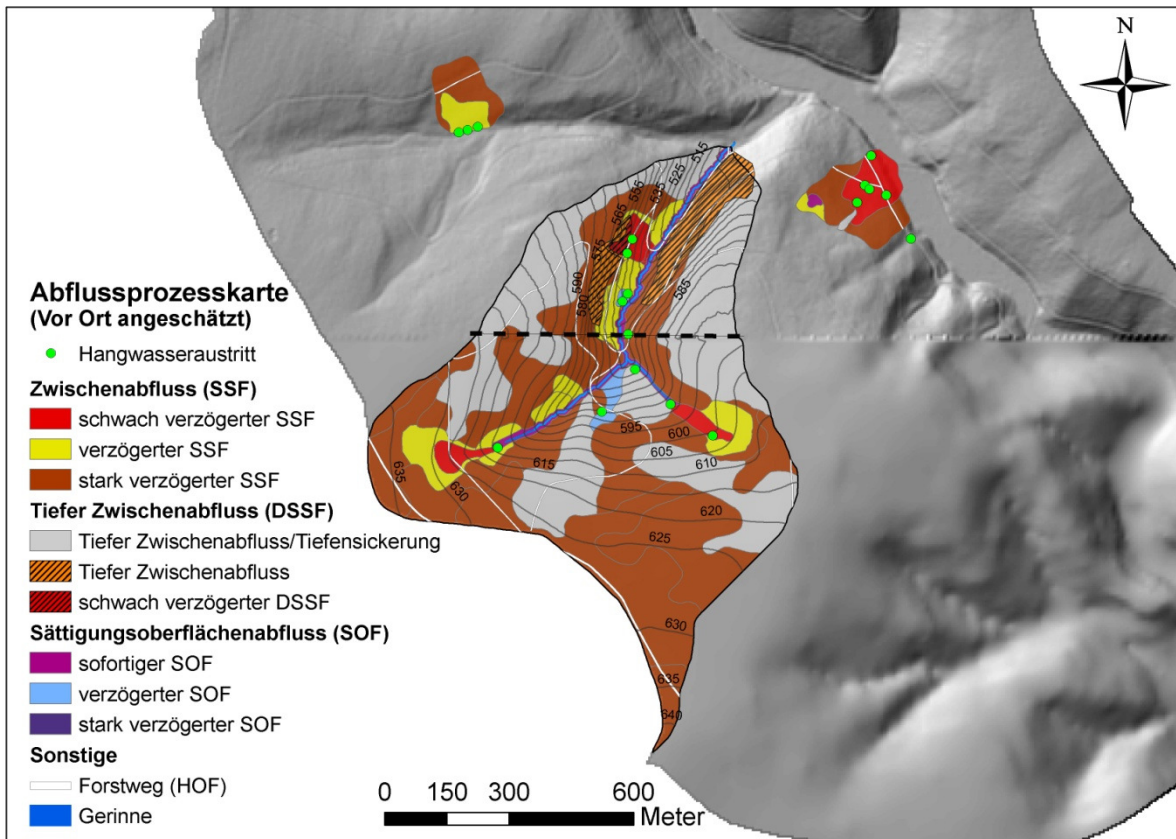


Abbildung 56: Vergleich zwischen der angeschätzten Abflusssensitivität (Bohrstock) und der erstellten Abflussprozesskarte auf Basis der forstlichen Standortkartierung und Ableitungen zur Geomorphologie (untere Abbildung)



In dem ersten Ergebniskapitel werden zunächst die einzelnen Bodeninformationsträger analysiert und auf hydrologisch verwertbare Angaben geprüft. Dabei zeigt sich, dass die Informationsfülle in beiden Ländern sehr unterschiedlich ausfällt. Generell sind die ausgewiesenen Kartiereinheiten in dem standörtlich sehr einheitlichen Frankenwald recht homogen und unterscheiden sich oftmals nur im Wasserhaushalt. In einem zweiten Schritt wird ein Klassifikationsschema zur Beurteilung der standörtlichen Abflusssensitivität vorgestellt und schrittweise erläutert. Durch die Kombination verfügbarer bodenkundlicher Informationen mit einfachen Reliefanalysen konnte für beide Untersuchungsgebiete eine Abflussprozesskarte erstellt werden. Sie teilt jeder Fläche innerhalb der Wassereinzugsgebiete flächenscharf einen Abflussprozess mit einer entsprechenden -intensität zu, auf deren Basis konkrete Maßnahmen zum Waldumbau eingeleitet werden können. Ein Vergleich mit der Situation vor Ort erbrachte eine zufriedenstellende Übereinstimmung der ausgewiesenen abflusssensitiven Waldflächen.

5.2 Berechnungsversuche

Nachdem gezeigt werden konnte, dass abflusssensitive Flächen aus den Daten der forstlichen Standortkartierung in Kombination mit einfachen Reliefanalysen ausgewiesen werden können, soll nun im zweiten Abschnitt geprüft werden, ob eine Beeinflussung des Abflusspotenzials durch die Bestockungsart möglich ist. Da aus dem Frankenwald bislang nur wenige Untersuchungen zur Abflussbildung vorliegen, stand zunächst die Ermittlung der dominierenden Abflussprozesse in der Hangskala. Anhand der Bodeneigenschaften konnte zwar vermutet werden, dass ein Großteil der Niederschläge schnell in die Tiefe weitergeleitet, nicht aber wie viel Wasser lateral zum Zwischenabfluss abgelenkt wird. Weiterhin sollten die Berechnungsversuche darüber Aufschluss bringen, ob tiefwurzelnde Baumarten die Standortseigenschaften im Sinne der Hochwasservorsorge positiv beeinflussen und den Wasserrückhalt der Waldböden weiter steigern können.

Um eine bessere Vergleichbarkeit mit der Berechnungsintensität zu erhalten, wurde die wieder aufgefangene Wassermenge (l/min) in eine Abflusshöhe (mm/h) umgerechnet. Da die Standortseigenschaften wesentlichen Einfluss auf die Abflussbildung ausüben, werden zu jeder Berechnungsparzelle die wichtigsten Bodenkennwerte kurz vorgestellt.

5.2.1 Berechnungsergebnisse im Röhthengrund

Aufgrund einer längeren Trockenperiode und der dadurch begrenzten Wasserverfügbarkeit im Gebiet wurden nur zwei gemessene Beregnungen pro Fläche durchgeführt. Die Abflussganglinien (Abb. 57) der Versuche im thüringischen Röhthengrund und die daraus abgeleiteten Kennwerte sind in der Tabelle 13 zusammengestellt und werden im Folgenden erläutert.

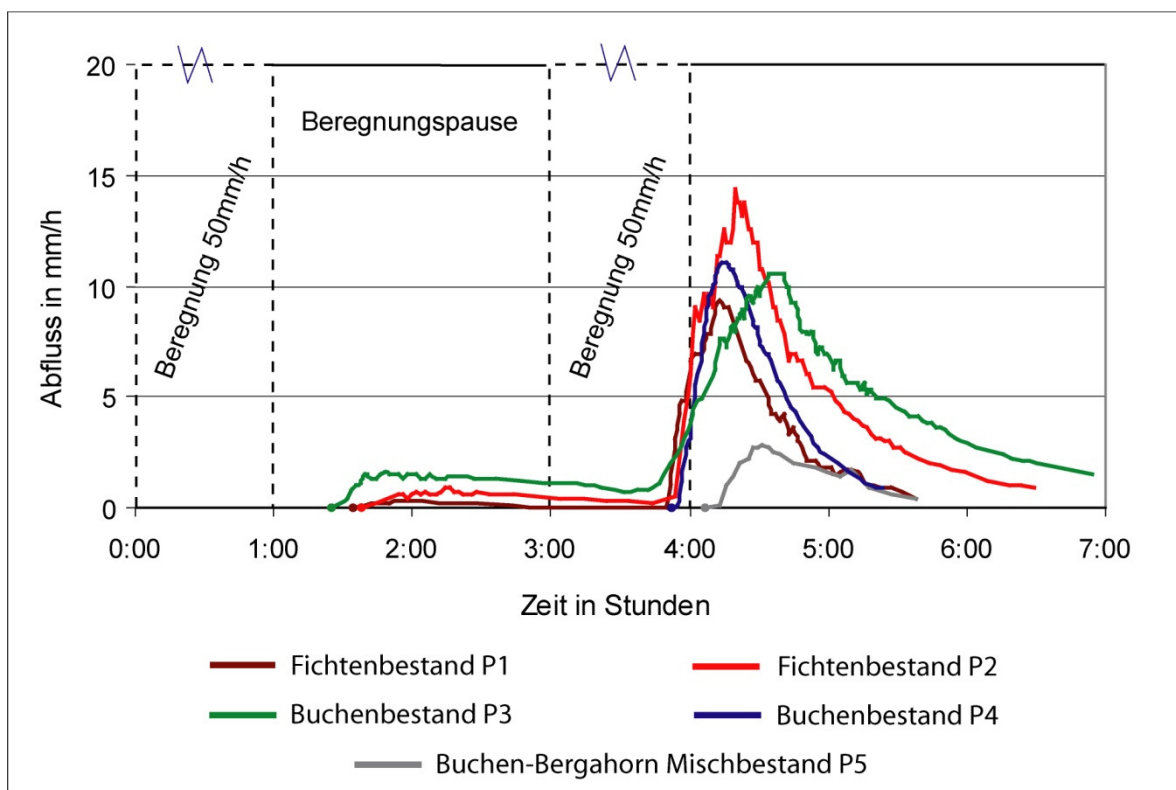


Abbildung 57: Abflussganglinien der untersuchten Bestände P1 - P5 (NORDMANN et al. 2009b)

Tabelle 13: Zusammenstellung der Beregnungskennwerte der Parzellen P1 - P5 (Fi = Fichte; Bu = Buche; BAh = Bergahorn) (NORDMANN et al. 2009b)

Kennwerte	Beregnung	P1 (Fi)	P2 (Fi)	P3 (Bu)* grundfeucht	P4 (Bu)	P5 (Bu/BAh)
Abstraktionszeit [min]	1. Beregnung	95	99	89	kein Abfluss	kein Abfluss
	2. Beregnung	50	50	40	52	67
Abflusskoeffizient [mm/h] (% von Beregnung)	1. Beregnung	0,4 mm/h (0,8%)	0,9 mm/h (1,8%)	1,5 mm/h (3,6%)	-	-
	2. Beregnung	9,3 mm/h (18,6%)	14,4 mm/h (28,8%)	10,5 mm/h (25%)	11,1 mm/h (22,2%)	2,9 mm/h (5,8%)
Abflussbeiwert [%]	1. Beregnung	0,06	2	5	-	-
	2. Beregnung	14	27	32	15	4
Anstieg [$y=mx+n$]	1. Beregnung	0,07	0,08	0,16	-	-
	2. Beregnung	0,69	0,62	0,31	0,82	0,39

* Beregnungsintensität nur 42mm/h; Gesamtmenge 50mm

Fichtenparzellen P1 und P2

Die mit Fichten bestockten Beregnungsflächen liegen alle an einem stark geneigten Hang (HN 29°). Der Boden ist gekennzeichnet durch einen locker gelagerten, mächtigen (1,2 m) und lateral eingeregeltten Hangschutt (B_v) mit hohen Skelettanteilen (Tab. 14). Der dicht gelagerte Übergangsbereich zum Grundgestein (C_v-Horizont) ist geringmächtig und nur rudimentär ausgebildet. Am Beregnungsprofil des Standortes P1 deutet sich in der äußersten rechten Ecke eine Störungszone mit zertrümmertem Grundgestein an. Die Untersuchungsfläche P2 weist ab 1,7 m unter der Geländeoberfläche kompaktes Ausgangsgestein auf. Bodenvegetation konnte sich unter dem dichten Fichtenstangenholz nicht ausbilden.

Tabelle 14: Bodenkennwerte der Parzellen P1 und P2 (Ld_{eff} = effektive Lagerungsdichte; Grobskelett > 20mm, Grus 2 - 20mm in Masse%; nWSK = nutzbare Wasserspeicherkapazität; Wurzelintensität (Wurzelintens.) nach Ad Hoc AG BODEN (KA5) (NORDMANN et al. 2009b)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	C _{org} [%]	Ld _{eff} [g/cm ³]	Grobskelett [m%]	Grusgehalt [m%]	ΣSkelett [m%]	nWSK [l/m ²]	Wurzelintens.
Fichte P1	0 - 30	SI4	3,17	1,13	36,9	40,9	77,8	20,1	W4
	30 - 60	Su3	1,97	Grus	17,7	59,4	77,1	24,0	W4
	60 - 90	Su2	0,59	Grus	23,4	62,4	85,8	13,0	W1
	90 - 120	Su3	0,53	1,66	28,4	60,8	89,2	17,2	W1
	120 - 150	Su3	0,37	1,71	63,7	19,3	83,0	14,8	W2
	150 - 180	Su3	0,37	1,58	68,4	13,3	81,7	18,2	W1
							107,3		
Fichte P2	0 - 30	Ls2	4,24	1,08	48,9	35,0	83,9	14,9	W4
	30 - 60	SI3	2,03	1,29	32,9	53,7	86,6	14,2	W4
	60 - 90	SI3	1,82	Grus	43,5	44,9	88,4	12,6	W2
	90 - 120	Su3	1,26	1,51	48,3	37,9	86,2	15,6	W3
	120 - 150	Su3	0,69	1,69	49,1	20,6	69,7	28,0	W1
	150 - 170	Su3	0,36	1,72	54,2	20,4	74,6	16,1	W0
							101,4		

Die Fichtenparzellen P1 und P2 wiesen bereits nach der ersten beaufschlagten Niederschlagsmenge von 50 l/m² einen Zwischenabfluss auf. Das abfließende Wasser drang jedoch erst über eine halbe Stunde nach Beregnungsende (95/99 Minuten) aus der Profilwand heraus. Die abgeflossene Niederschlagsmenge (Abflussbeiwert) erreichte mit 0,06 % \triangleq 3 l (P1) und 2 % \triangleq 100 l (P2) nur sehr geringe Werte (Tab. 13). Auf die zweite Beregnung antworteten beide Standorte exakt 50 Minuten nach Beginn der Beregnung. Das abfließende Wasser konzentrierte sich zu einem Teil über der rudimentär wasserstauenden Zersatzzone des Gesteins, der andere Teil floss direkt über dem geologischen Ausgangsmaterial ab. Als eigentlicher Staukörper ist auf der Parzelle 1 die sandig-schluffige Zersatzzone des geologischen Ausgangsmaterials zu identifizieren. Auf der Parzelle 2 ist der beobachtete Anteil an tiefem Zwischenabfluss aufgrund des kompakt anstehenden und wasserundurchlässigen Grundgesteins deutlich erhöht. Im darüber liegenden Verbraunungshorizont (B_v) traten keinerlei Wasserflüsse auf. Die Steigung der Ganglinien mit m = 0,69 (P1) und m = 0,62 (P2) zeugen von einer sehr rasch und intensiv einsetzenden Abflussreaktion (Abb. 57). Obwohl beide Standorte sehr schnell ansprachen, blieb der maximale Abflusskoeffizient der Parzelle P1 um 1/3 niedriger als auf der Nachbarfläche P2 (Tab. 13). Auch der Abflussbeiwert der Parzelle 1 ist mit 14 % (675 l) zur zweiten Beregnung nur halb so hoch wie auf der benachbarten Fläche mit

27 % (1350 l). Vermutlich infiltrierte eine größere Menge Wasser ins Grundgestein (Tiefensickerung) und wurde nicht abflusswirksam.

Wurzelanalysen

Die vertikale Tiefenerschließung der stark grusig-lockeren Hangschuttböden durch die Fichtenwurzeln erfolgt durchaus tiefgründig. Die Hauptwurzelmasse konzentriert sich auf den oberen 90 cm des Mineralbodens (Abb. 58). Einige Wurzeln dringen in der gering verdichteten Zersatzzone bis in Tiefen von 1,5 - 1,8 m vor (Parzelle 1).

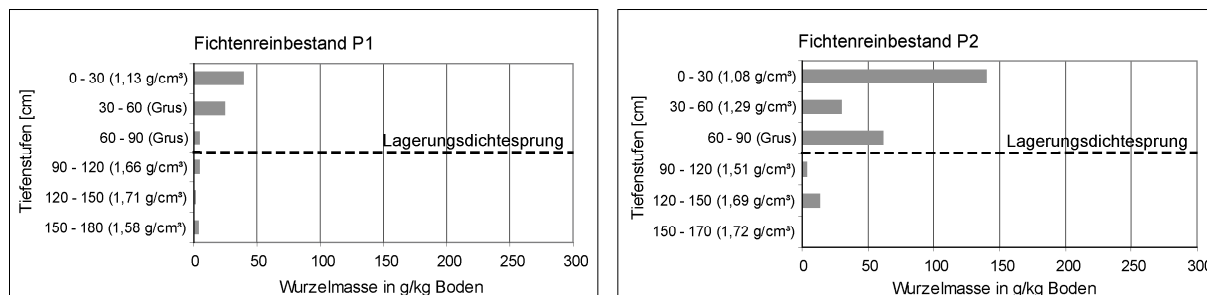


Abbildung 58: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P1 und P2 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b)

Buchenfläche P4 und Buchen-Bergahorn Mischbestand P5

Die Laubholzflächen stocken auf einem extrem grusreichen Hangschutt. Sie sind gekennzeichnet durch einen stark grusigen B_{hv}-B_v - Horizont, der von einem fast feinerdefreiem, lateral eingeregelt Grushorizont (Schieferscherben) unterlagert wird (B_v/C_v 0,6 - 1,2 m, Tab. 15). Der Untergrund ist charakterisiert durch eine merklich feinerdereichere Zersatz- und Zerfallzone. Die nach unten hin gröber werdenden Gesteinsfragmente liegen im natürlichen Verband vor und sind in einem mäßig dichten, schluffigen Sand eingebettet. Kompaktes Grundgestein liegt bis auf einer Tiefe von 1,8 m nicht an. Die geschlossenen Bestände weisen keine Bodenvegetation auf.

Tabelle 15: Bodenkennwerte der Parzellen 4 und 5 (Erläuterungen siehe Tab. 14) (NORDMANN et al. 2009b)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	C _{org} [%]	L _{d,eff} [g/cm³]	Grobskelett [m%]	Grusgehalt [m%]	ΣSkelett [m%]	nWSK [l/m²]	Wurzelintens.
Buche P4	0 - 30	Sl4	2,8	1,28	21,9	59,0	80,9	22,1	W4
	30 - 60	Sl4	1,38	1,38	14,1	68,4	82,5	18,4	W1
	60 - 90	Sl2	0,91	Grus	18,4	66,6	85,0	14,2	W1
	90 - 120	Su2	0,32	Grus	28,3	60,5	88,8	10,6	W1
	120 - 150	Su3	0,35	1,67	43,6	23,1	66,7	30,3	W2
	150 - 180	Su4	0,22	1,71	59,4	17,4	76,8	21,8	W1
								117,4	
Buche/Bergahorn P5	0 - 30	Ls3	3,58	1,21	22,3	51,8	74,1	33,0	W5
	30 - 60	Sl4	1,92	1,28	14,5	65,7	80,2	21,0	W4
	60 - 90	Su2	0,55	Grus	17,2	65,3	82,5	15,6	W1
	90 - 120	Su3	0,55	Grus	54,6	33,6	88,2	13,6	W3
	120 - 150	Su3	0,34	1,62	43,2	29,7	72,9	25,4	W3
	150 - 180	Su3	0,25	1,57	57,8	20,3	78,1	21,3	W1
								129,9	

Im Unterschied zu den Standorten mit Fichtenbestockung nahmen die Böden unter den Laubholzbeständen den ersten simulierten Starkniederschlag (50 mm) vollständig auf (Tab. 13).

Erst nach der zweiten Beregnung reagierte der Buchenreinbestand (P4) mit einer steil einsetzenden Abflussreaktion ($m = 0,82$, Abb. 57). Die Anlaufzeit des Abflusses auf dem nahezu gesättigten Boden gleicht sich den Fichtenbeständen an und zögert den Zwischenabfluss lediglich zwei Minuten länger hinaus (Tab. 13). Der maximale Abflusskoeffizient mit 22 % in Bezug zur Niederschlagsintensität reiht sich zwischen den beiden Fichtenflächen ein. Insgesamt flossen unter dem Buchenstandort (P4) 15 % (750 l) des beaufschlagten Wassers wieder in die Messbehälter.

Der benachbarte Buchen-Bergahorn-Mischbestand (P5) verzögerte den Abfluss von den untersuchten Flächen im Röthengrund am längsten. Erst 67 Minuten nach Beginn der zweiten Beregnung trat überhaupt Wasser aus dem Profil aus (Tab. 13). Der Abflusskoeffizient von 6 % und ein Abflussbeiwert von lediglich 4,3 % (215 l) zeugen von einem hohen Wasserrückhaltepotenzial des Laubmischwaldstandortes, der vermutlich selbst nach der zweiten Beregnung noch immer nicht vollständig erschöpft war. Mit einem Anstieg der Ganglinie von $m = 0,39$ stellt der Buchen-Bergahorn Mischwaldstandort für die beregneten Standorte den mit Abstand niedrigsten Wert dar und steht im starken Kontrast zum benachbarten Buchenreinbestand ($m = 0,82$).

Wurzelanalysen

Sowohl der Buchenreinbestand als auch der Mischbestand bilden in der obersten Tiefenstufe ein reich verzweigtes, intensives Wurzelwerk aus (Abb. 59). Die darauf folgenden extrem grusreichen Horizonte mit sehr wenig Bindungskraft für Wasser werden von beiden Baumarten gemieden. In der darunter ansetzenden, feinerdereicheren Schicht bilden beide Baumarten einen zweiten Wurzelhorizont aus. Durch den hohen Sandgehalt des C_v-Horizontes zerfällt der mäßig dicht gelagerte Boden bei höherer Beanspruchung und ist für tiefer wurzelnde Baumarten nutzbar. Dabei überrascht vor allem das Tiefenstreben des Bergahorns, der in der Tiefenstufe 1,2 - 1,5 m unter der Geländeoberfläche noch fingerstarke Wurzeln senkrecht in die Tiefe schiebt und ein reich verzweigtes Netz an Makroporen hinterlässt (Abb. 59/76).

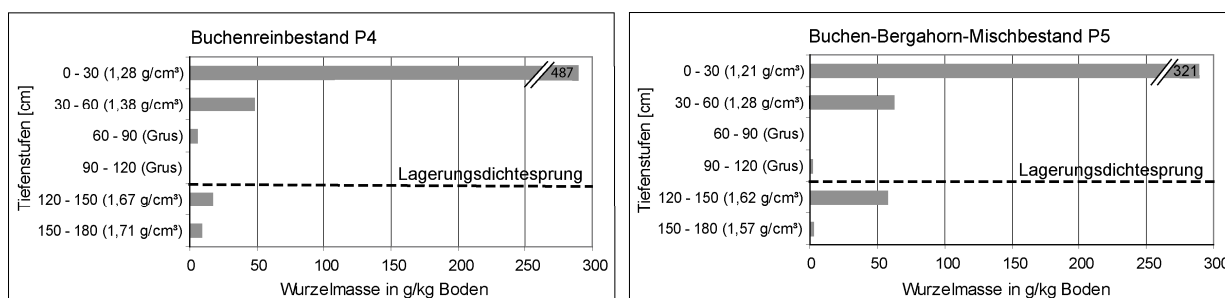


Abbildung 59: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P4 und P5 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b)

Buchenfläche P3 („Hanggley-Braunerde¹⁵“)

Die Buchenfläche P3 liegt am inneren Rand einer Hangmulde und ist geprägt durch einen temporären Hanggrundwasserzug in rund 1 m Tiefe. Rostbraune Eisenkonkretionen im Go-Horizont beschränken sich auf einen relativ kleinen Bereich der Dichtlagerung (0,9 - 1,2 m). Aufgrund des sauerstoffreichen Wassers sind diese schwach ausgeprägt. Der darüber liegende B_v-Horizont ist gut drainiert und durch einen geringmächtigen, grusigen B_v-Horizont (0 - 0,3 m) gekennzeichnet, an dem sich ein 0,6 Meter mächtiger, extrem grusiger B_v-C_v Horizont anschließt (Tab. 16).

Tabelle 16: Bodenkennwerte der Parzellen P3 (NORDMANN et al. 2009b)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	C _{org} [%]	L _{d,eff} [g/cm ³]	Grobskelett [m%]	Grusgehalt [m%]	ΣSkelett [m%]	nWSK [l/m ²]	Wurzeltens.
Buche P3	0 - 30	Su4	1,05	1,17	14,0	55,3	69,3	35,0	W4
	30 - 60	Su3	0,29	Grus	20,4	62,7	83,1	18,6	W2
	60 - 90	Su3	0,24	Grus	37,6	51,4	89,0	12,9	W3
	90 - 120	Su3	0,16	1,70	21,4	67,4	88,8	10,3	W1
	120 - 150	Su3	0,15	1,70	49,8	31,9	81,7	15,7	W0
								92,5	

Aufgrund eines Höhenunterschieds von 35 m zwischen Pumpenstandort und Beregnungsanlage wurde auf der Beregnungsparzelle P3 nur eine Beregnungsintensität von 42 mm/h erzielt. Trotz der etwas geringeren Intensität antwortete der Buchenstandort 29 Minuten nach Beregnungsende (89 Minuten nach Beginn) am schnellsten auf das erste simulierte Starkregenereignis (Tab. 13, Abb. 57). Der Zwischenabfluss setzte damit knapp 10 Minuten früher ein als unter den Fichtenparzellen. Während der zweiten Beregnungsphase verkürzte sich die Reaktionszeit auf 40 Minuten. Auffallend ist der deutlich flachere Anstieg ($m = 0,31$) der Abflussreaktion, der möglicherweise in der geringeren Beregnungsintensität und des etwas flacheren Hanges begründet liegt. Mit einem maximalen Abflusskoeffizienten von 25 % ist dieser vergleichbar mit der Fichtenparzelle P2. Neben dem geringeren Anstieg braucht der Standort auch lange, um wieder vollständig zu entwässern und weist am Ende mit 32 % (1600 l) abgeflossener Wassermenge den höchsten Abflussbeiwert aller Flächen auf.

Wurzelanalysen

Auf dem temporär vernässten und besonders im Frühjahr im Untergrund kalten Boden konnten keine Wurzeln in der dichten Lage nachgewiesen werden (Abb. 60). Die Buchenwurzeln zeigen in der Tiefe eine starke bürstenartige Verzweigungstendenz, die alle über dem Grundwasserleiter enden. So scheinen die Buchen das Wasserangebot bei ausreichender

¹⁵ Das von den Hangflanken zufließende Wasser wird als Grundwasser verstanden. Eine Bezeichnung, die das tief fließende, sauerstoffreiche Hangwasser und die darüber liegenden terrestrischen Bereiche berücksichtigt, gibt es in der Nomenklatur (AD HOC AG BODEN 2005) nicht. Die Böden werden daher als Hanggley-Braunerden bezeichnet.

Sauerstoffversorgung im Grus zu nutzen, meiden aber den dicht gelagerten, temporär wasserführenden Grundwasserleiter.

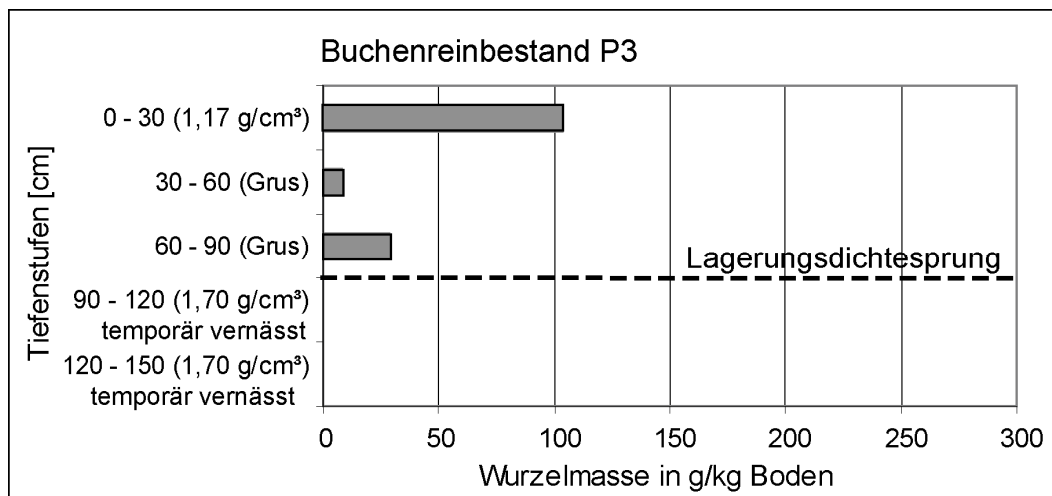


Abbildung 60: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen 3 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b)

5.2.2 Berechnungsergebnisse im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel

Im Bereich der Tschirner Ködel wurden sechs Berechnungen durchgeführt. Jede Parzelle wurde dreimal berechnet. Die ersten zwei Versuche sind mit denen des Röhthengrundes vergleichbar. Zusätzlich wurde eine dritte Berechnung so lange durchgeführt, bis sich eine konstante Abflussmenge einstellte, d. h. keine Steigerung des Abflusses mehr nachzuweisen war. Die aus den einzelnen Abflussganglinien berechneten Abflusskennwerte aller Berechnungsparzellen sind in Tabelle 17 gegenübergestellt.

Tabelle 17: Berechnungskennwerte im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel (Fi = Fichte, Bu = Buche, BAh = Bergahorn) (NORDMANN et al. 2009a)

Kennwerte	Berechnung	P6 (Fi/Bu)	P7 (Bu/Fi)	P8 (Fi)	P9 (Bu/BAh)	P10 (Bu/BAh) grundfeucht	P11 (Fi) mäßig grundfrisch
Abstraktionszeit [min]	1. Berechnung	kein Abfluss	kein Abfluss	144	kein Abfluss	44	kein Abfluss
	2. Berechnung	65	60	40	85	29	51
	3. Berechnung	50	45	42	81	30	55
Abflusskoeffizient [%]	1. Berechnung	-	-	0,5 (0,25 mm/h)	-	34 (17,1 mm/h)	-
	2. Berechnung	2 (1,1 mm/h)	3,5 (1,7 mm/h)	9 (4,5 mm/h)	2,5 (1,2 mm/h)	63,5 (31,8 mm/h)	18 (9 mm/h)
Sättigungsabflusskoeffizient [%]	3. Berechnung	16 (8,0 mm/h)	17,5 (8,7 mm/h)	22 (11,1 mm/h)	27 (13,8 mm/h)	75,5 (37,7 mm/h)	31 (15,6 mm/h)
Abflussbeiwert [%]	1. Berechnung	-	-	0,2	-	37,5	-
	2. Berechnung	1,5	3,5	9,5	3,5	84	24,5
	3. Berechnung	11	13	17,5	16,5	83	30
Abflussintensität [%]	1. Berechnung	-	-	2	-	45	-
	2. Berechnung	14	20	41	9	84	58
	3. Berechnung	100	100	100	100	100	100
Anstieg (m) der Abflussganglinie aus $[y=mx+n]$	1. Berechnung	-	-	-	-	0,73	-
	2. Berechnung	0,51	0,24	0,24	0,14	0,93	0,53
	3. Berechnung	0,30	0,28	0,23	0,44	0,94	0,30

Buchen-Fichten Mischbestandsparzellen P6 und P7

Die beiden Versuchsflächen P6 und P7 liegen, getrennt durch einen 2,5 m breiten Streifen, in direkter Nachbarschaft. Der Standort P6 befindet sich in einer Fichtengruppe, die Parzelle 7 in einem von Buchen dominierten Teil des Bestandes. Die Hangneigung beträgt 21°. Die gut einen halben Meter unter der Geländeoberfläche ansetzende Verdichtungslage geht fließend in die Zersatz- und Zerfallszone des anstehenden Ausgangsmaterials über. Die steil stehenden Schichtflächen des Grundgesteins sind leicht spaltbar und die Spalten mit braungelben, stark schluffigen Sand gefüllt. Der Feinboden zwischen den Schieferplatten weist eine mäßige Dichtlagerung auf. Beide Parzellen führen im B_v-Horizont (0 - 0,6 m) einen hohen Grobskelettanteil und sind sich, mit Ausnahme der unterschiedlichen Durchwurzelung, ähnlich (Tab. 18).

Tabelle 18: Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P6 (oben) und P7 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skeletthalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	Ld _{eff} [g/cm ³]	Grobskelett [m%]	Grusgehalt [m%]	ΣSkelett [m%]	nWSK [l/m ²]	Wurzelintens.
Fichte/Buche P6	0 - 30	Lt2	1,10	51,1	26,7	77,8	16,1	W4
	30 - 60	Ls3	1,28	57,9	26,4	84,3	14,2	W3
	60 - 90	Sl3	1,52	57,9	18,0	75,9	23,6	W1
	90 - 110	Su4	1,52	67,5	10,0	77,5	16,1	W1
							70,0	
Buche/Fichte P7	0 - 30	Lt2	1,07	59,7	18,8	78,5	15,7	W3
	30 - 60	Lt2	1,27	49,3	30,3	79,6	15,0	W4
	60 - 90	Slu	1,57	61,1	19,6	80,7	23,4	W4
	90 - 120	Su4	1,52	76,8	9,4	86,2	15,9	W2
							70,0	

Beide Parzellen zeichnen sich durch eine fast identische Abflusskurve aus (Abb. 61). Die ersten 50 l/m² speicherten sie ohne sichtbare Abflussreaktion. Nach dem zweiten simulierten Gewitterniederschlag tritt der Zwischenabflusses nach 65 Minuten bzw. 60 Minuten nahezu zeitgleich aus (Tab. 17). Während der dritten Beregnung kommt es zu einer Verzögerung von 50 bzw. 45 Minuten. Der gesamte sichtbare Abfluss vollzog sich im Bereich der dichter gelagerten Basislage und der Zerfallszone in Form von Zwischenabfluss. Oberflächenabfluss trat nicht auf. Die Abflussbeiwerte unterscheiden sich auf beiden Flächen nur geringfügig. So konnten 1,5 % (P6) bzw. 3,5 % (P7) der Niederschlagsmenge der zweiten Beregnung und 11 % bzw. 13 % während der dritten Beregnung als Zwischenabfluss wieder aufgefangen werden. Ein Großteil des Niederschlagswassers verbleibt also im Boden oder verlässt auf nicht sichtbarem Weg das Abflussgeschehen. Aufgrund der stehenden, schiefrigen Schichten des mittelgründigen Bodens und der guten Durchwurzelungsfähigkeit der mit Sand gefüllten Klüfte infiltriert vermutlich ein Großteil der Niederschlagsmenge ins Grundgestein und trägt in Form von Tiefensickerung zum Wasserrückhalt bei. Mit maximalen Abflusskoeffizienten von 2,2 % bzw. 3,4 % (P6/P7) zur zweiten und Sättigungsabflusskoeffizienten von 16 % bzw. 17,4 % zur dritten Beregnung konnte gerade einmal eine Abflussintensität von 14 % (P6) bzw. 20 % (P7) zum maximal möglichen Abfluss erreicht werden. Aufgrund des großen Unterschieds zwischen der zweiten und dritten Beregnung war das Wasserrückhaltepotenzial nach 2 x 50 mm demzufolge noch lange nicht vollständig erschöpft. Auch die geringen Anstiege der Abflussreaktion deuten darauf hin, dass diese beiden Standorte nur wenig zum Hochwassergeschehen beitragen.

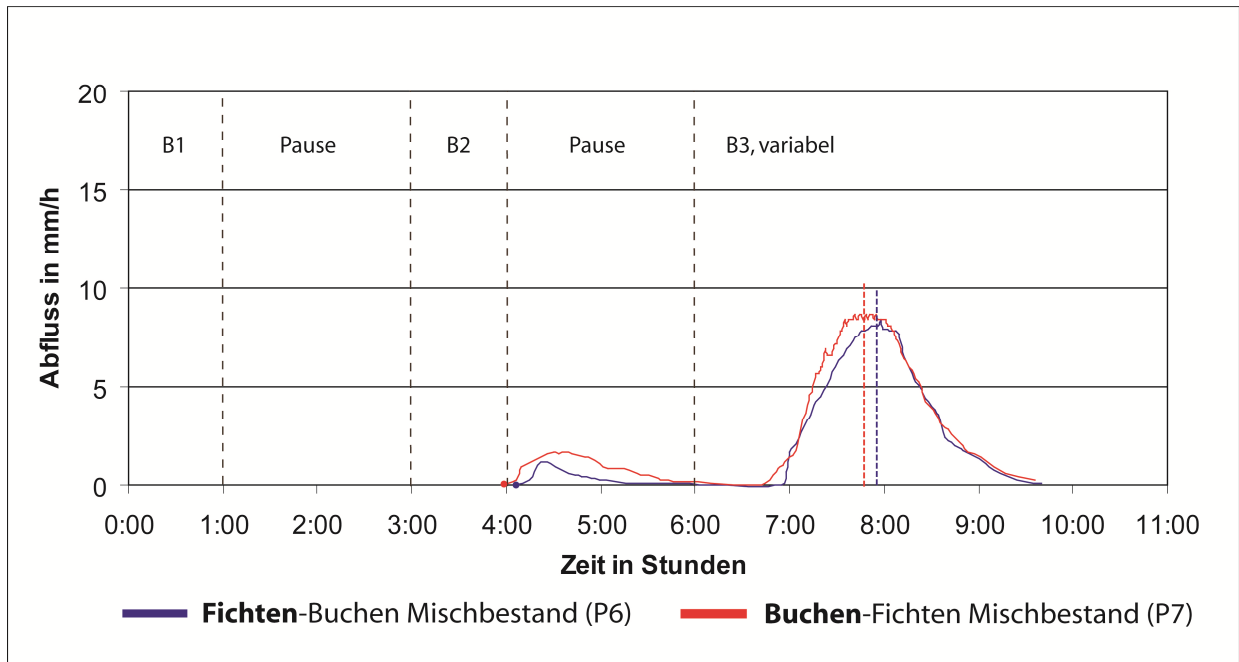


Abbildung 61: Berechnungskurven der Fichten-Buchen-Mischbestandsparzellen. Die farbig gestrichelten Linien markieren den Berechnungsstopp zur dritten Beregnung (NORDMANN et al. 2009a)

Wurzelanalysen

Die Durchwurzelung der beiden mittelgründigen Standorte zeigt markante Unterschiede auf (Abb. 62). Deutlich erkennbar wird die intensive Erschließung des oberen Mineralbodens durch das Herzwurzelsystem der Buche. Im Unterboden und zwischen den mit schluffigen Sand gefüllten Gesteinsklüften sind ebenfalls einzelne Buchenwurzeln zu finden. Die Durchwurzelung der Fichte ist durch eine kontinuierliche Abnahme der Wurzelintensität vom Oberboden hin zum Unterboden gekennzeichnet. Auch im zerklüfteten Gestein sind nur sehr geringe Anteile von Feinwurzeln anzutreffen.

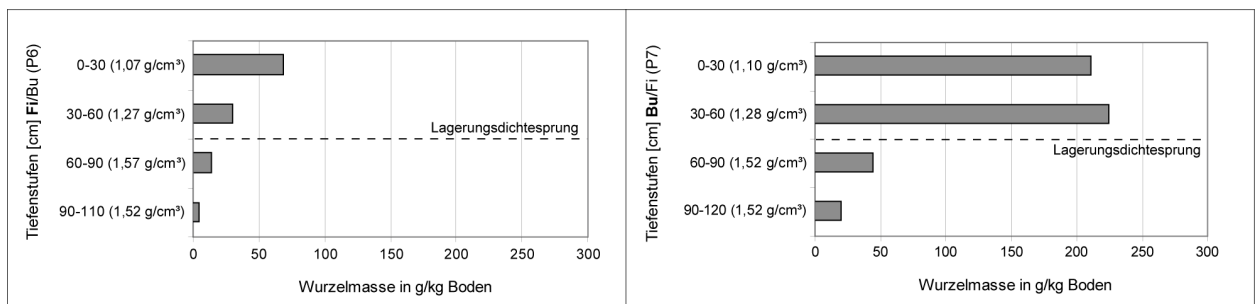


Abbildung 62: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P6 und P7 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009a)

Die Fichtenbestände P8 und P11

Die beiden Fichtenparzellen unterscheiden sich im Aufbau des Unterbodens deutlich (Tab. 19). Der Standort P8 ist gekennzeichnet durch einen 0,6 m mächtigen, lockeren B_v-Horizont (Lockerbraunerde), der von grobskeletthaltigem, eingeregelter Schutt unterlagert wird (0,6 - 0,9 m). Die ansetzende Zone höherer Lagerungsdichte ist geringmächtig (0,9 - 1,2 m) und geht unmittelbar in die Zerfallszone des anstehenden Grundgesteins über. Die Schichtungsrichtung des Anstehenden ist leicht überkippt und gut spaltbar.

Der Standort P11 besteht im Untergrund aus einer mächtigen Ablagerung von solifluidal verlagertem Material. Die Dichtlagerung setzt auf 0,9 Meter unter der Geländeoberfläche an. Erst auf 2,2 Meter unter Flur geht sie in die Zerfallszone über. Die mehrere Dezimeter mächtige, verdichtete Akkumulationslage besteht aus einem Gemisch aus sandigem Feinmaterial und eingeregelter Schieferschutt im festen Verband. Der ungewöhnlich hohe Sandanteil (Su3) der Fließerde entstammt aus dem grobkörnigen Wetzsteinquarzit des Oberhanges. Konkretionen sind auf der mäßig grundfrischen Braunerde nur wenige vorhanden. Darüber lagert eine, im Vergleich zu den anderen Standorten, feinerdereiche, gelblich-braune Lockerbraunerde (0 - 0,9 m). Die Neigung der Flächen beträgt 23°.

Tabelle 19: Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P8 (oben) und P11 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skelettgehalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	Ld _{eff} [g/cm ³]	Grobskelett [m%]	Mittel-/Feingrus [m%]	Σ Skelett [m%]	nWSK [l/m ²]	Wurzelintens.
Fichte P8	0 - 30	Lt2	1,05	22,4	26,3	48,7	32,1	W4
	30 - 60	Lt2	1,04	41,1	29,7	70,8	20,4	W3
	60 - 90	Sl4	Blockschutt	75,7	16,4	92,1	8,3	W2
	90 - 120	Sl3	1,66	76,2	8,8	85,0	12,9	W1
							73,7	
Fichte P11	0 - 30	Ls2	1,15	50,7	20,7	71,4	24,2	W5
	30 - 60	Slu	1,21	47,0	25,7	72,7	31,5	W3
	60 - 90	Slu	1,26	44,1	32,8	76,9	27,3	W4
	90 - 120	Ls2	1,84	61,8	18,0	79,8	13,1	W1
	120 - 150	Su3	1,79	57,2	18,2	75,4	—	W0
	150 - 180	Su3	1,82	62,8	17,5	80,3	—	W0
							96,1	

Der Fichtenstandort P8 ist neben dem grundfeuchten Standort (P10) der einzige, der auf die erste Beregnung, wenn auch stark verzögert (144 Minuten), reagiert (Tab. 17). Allerdings ist die abgeflossene Menge Wasser mit insgesamt 10 Litern (0,2 %) sehr gering. Im Verlauf der weiteren Beregnungen pendelt sich die Abstraktionszeit bei rund 40 Minuten nach Beregnungsbeginn ein¹⁶. Dieser Wert stellt im Vergleich zu allen anderen vernässungsfreien Standorten einen sehr raschen Beginn der Abflussreaktion dar.

¹⁶ Bei einigen Profilen ist die Abstraktionszeit der 3. Beregnung um wenige Minuten länger als zur 2. Beregnung. Das hat damit zu tun, dass auf der zuvor trockenen Profilwand der einsetzende Abfluss gut sichtbar war, während der beginnende Abfluss der letzten Beregnung erst nach einer kurzen Fließstrecke im Messbehälter zu erfassen ist. Die zeitlichen Unterschiede dürften 2 Minuten nicht überschreiten.

Der Hauptgrund dürfte in der geringeren Wasserspeicherkapazität und der hohen vertikalen Durchlässigkeit des stark stein- und blockhaltigen Unterbodens begründet sein (Tab. 19). Die Abflusskoeffizienten und Abflussbeiwerte bestätigen die schnelle Reaktion auf die aufgebrachte Beregnungsmenge. Mit 2 % bzw. 41 %, im Vergleich zum Sättigungsabflusskoeffizienten, erreicht die Fläche schon nach der zweiten Beregnung fast die Hälfte des Maximalabflusses der 3. Beregnung. Dieser Wert liegt bereits sehr viel höher als auf den Mischbestandsflächen. Abflussbeiwerte von 0,2 %/9,5 % und 17,5 % bestätigen die erhöhte Abflussbereitschaft. Der Sättigungsabflusskoeffizient bewegt sich mit 22 % im Mittelfeld der berechneten Flächen.

Die Parzelle 11 reagiert heftig auf das simulierte Starkregenereignis (Abb. 63). Zwar konnte während der ersten Beregnung das gesamte Wasser zwischengespeichert werden, allerdings setzte die Abflussreaktion mit Anstiegen von $m = 0,53$ bzw. $0,30$ zur zweiten und dritten Beregnung sehr intensiv ein. Die Abstraktionszeiten bei gesättigten Verhältnissen sind mit 51 und 55 Minuten nahezu zeitgleich. Auffallend war, dass sich der gesamte sichtbare Abfluss direkt am Übergangsbereich vom lockeren Oberboden zur schlagartig ansetzenden Dichtlagerung ausbildete. Innerhalb der verdichteten Lage trat hingegen kaum Abfluss auf. Mit einem Abflusskoeffizienten von 18 % ($9 \text{ mm/h} \triangleq 15 \text{ l/min}$ maximaler Abfluss auf der berechneten Fläche) zur zweiten Beregnung weist die Fläche mit Abstand die intensivste Reaktion im Vergleich zu allen vernässungsfreien Standorten auf. Dieser Wert entspricht bereits 58 % des erreichten Sättigungsabflusskoeffizienten und belegt die frühzeitige, intensive Abflussbildung des Standortes. Ähnlich verhalten sich die verhältnismäßig hohen Abflussbeiwerte. So fanden sich 0 %, 24,5 % und 30 % der aufgebrachten Niederschlagsmenge in den Auffangbehältern wieder.

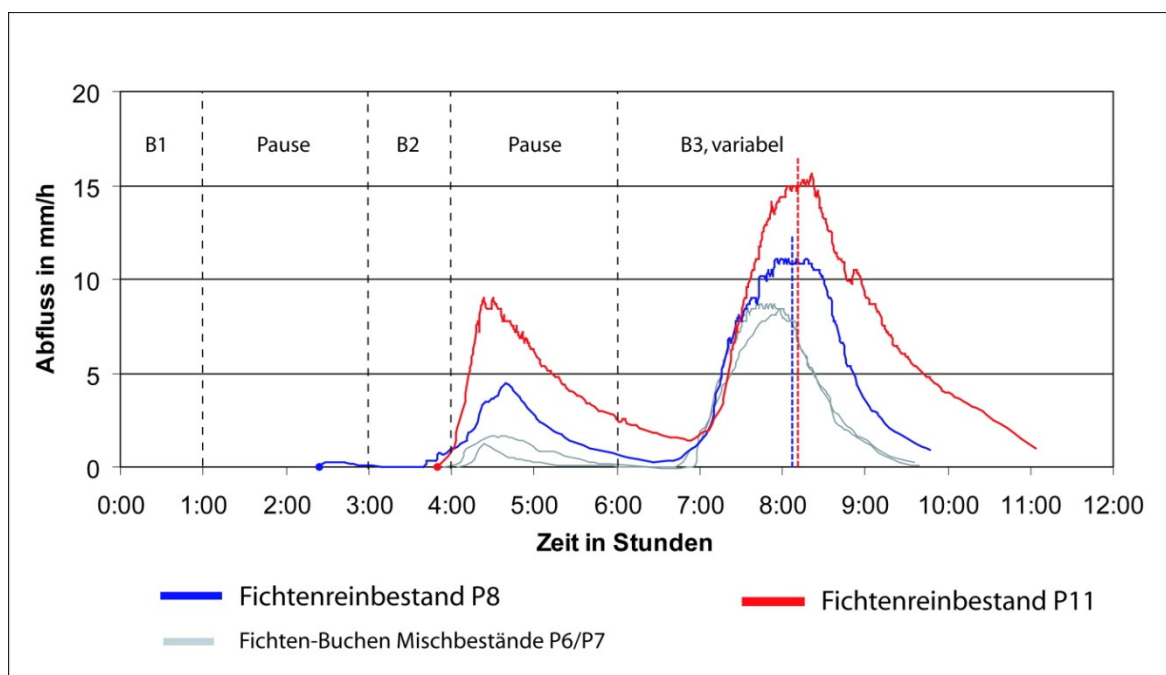


Abbildung 63: Abflussganglinien der Parzellen 8 (blau) und 11 (rot) im Vergleich zu den Parzellen 6 und 7 (grau). Die farbige gestrichelten Linien markieren den Beregnungsstopp zur dritten Beregnung (NORDMANN et al. 2009a)

Wurzelanalysen

Die Wurzelverteilung der Fichtenbestände P8 und P11 ist typisch für die Durchwurzelungsstrategie der Baumart Fichte. Sie bildet ein oberflächennahes und weit verzweigtes Feinwurzelsystem in den oberen 0 - 30 cm des Mineralbodens aus. Danach ist ein rasches Abnehmen der Wurzelintensität zu beobachten (Abb. 64). In der mächtigen Verdichtungslage des Standortes P11 konnten nur noch in den obersten Bereichen vereinzelt Feinwurzeln festgestellt werden. Vielmehr sitzt die Fichtenwurzel direkt auf der Dichtlagerung auf. Der Fichte scheint dies für die Wasserversorgung zu genügen, da auf diesem Standort sehr gute Wuchsleistungen erzielt werden. In den mit Lehm gefüllten Schieferklüften des Standortes P8 waren – im Gegensatz zur Buche – keinerlei Fichtenwurzeln feststellbar.

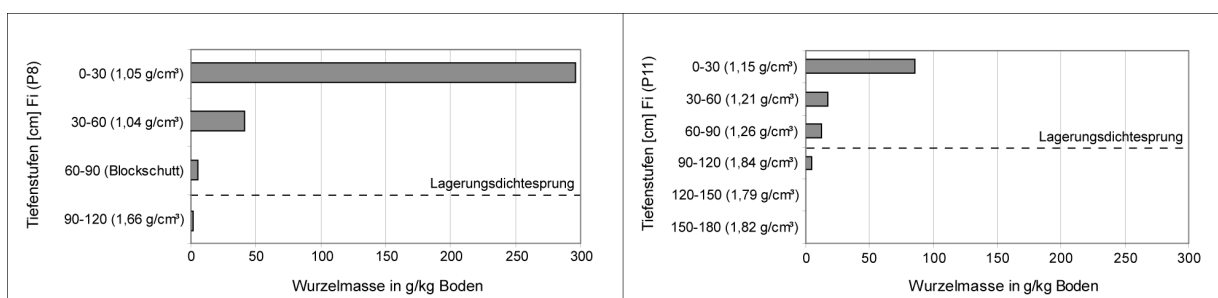


Abbildung 64: Durchwurzelung der Parzellen 8 und 11 (NORDMANN et al. 2009a)

Die Buchen/Bergahorn Mischbestandsflächen P9 und P10

Der Standort P9 ist ebenso, wie die bereits erwähnte Fichtenfläche P11, durch eine mächtige Fließerde geprägt. Die Beregnungsfläche liegt im Bereich eines auslaufenden Hanges. Der obere Teil der Beregnungszone weist eine Hangneigung von 32° auf, der untere 20°. Der Untergrund ist stark verdichtet, ohne erkennbar anstehenden Fels. Der Boden weist einen extrem hohen Grusgehalt auf, der auf gesamter Profiltiefe (1,8 m) lateral eingeregelt ist. Der rötlich-braune B_v-Horizont hat eine Mächtigkeit von 0,8 m. Die daran anschließende Basislage ist stark verdichtet. An der Grenzfläche zwischen der hochdurchlässigen Haupt- zur dichten Basislage bildete sich, vermutlich durch Erosion von Feinmaterial, ein fast reiner, lockerer Grushorizont aus (0,8 - 0,9 m).

Auf der Parzelle 10 lassen Mangan- und Eisenoxidkonkretionen auf einen temporären Hangwasserzug in Höhe der Dichtlagerung (120 cm unter GOF) schließen. An bevorzugten Fließwegen ist eine Ausräumung der Basislage zu erkennen. Über dem dichten Horizont liegt ein feinerdearmer Schutthorizont mit hohem Blockschuttanteil (0,6 - 1,2 m) auf. Auf dem sehr tiefgründigen und stark geneigten Hang (28°) bildete sich über dem Blockschutt eine für die Region typische Braunerde aus (Tab. 20).

Tabelle 20: Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P9 (oben) und P10 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skelettgehalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)

Standort	Tiefenstufe	Bodenart	Ld _{eff} [g/cm ³]	Grobskelett [m%]	Mittel-/Feingrus [m%]	Σ Skelett [m%]	nWSK [l/m ²]	Wurzelintens.
Buche/Berg- ahorn P9	0 - 30	Ls3	0,98	32,2	45,8	78,0	18,9	W6
	30 - 60	Lt2	1,00	43,0	41,7	84,7	11,7	W4
	60 - 90	Lt2	Grus	51,0	36,4	87,4	9,9	W5
	90 - 120	Sl3	1,99	36,3	47,5	83,8	11,9	W2
	120 - 150	Su4	1,97	30,4	44,8	75,2	23,1	W3
	150 - 180	Slu	> 2,00	19,9	50,7	70,6	23,0	W1
						98,5		
Buche/Berg- ahorn P10	0 - 30	Ls2	1,00	55,8	19,7	75,5	21,3	W4
	30 - 60	Ls2	1,26	53,7	21,6	75,3	21,4	W3
	60 - 90	Slu	1,35	56,2	21,7	77,9	26,3	W3
	90 - 120	Slu	Blockschutt	76,4	13,7	90,1	13,2	W2
	120 - 150	Sl3	1,62	78,8	8,9	87,7	10,9	W3
	150 - 180	Sl3	1,70	80,4	7,5	87,9	10,7	W2
						103,8		

Der Buchen/Bergahorn-Mischbestand P9 wies trotz der nicht optimalen standörtlichen Gegebenheiten mit Abstand den längsten Wasserrückhalt auf (-/1h24/1h21). Erst nach der dritten Beregnung und insgesamt 150 l/m² innerhalb von 7 Stunden reagierte der Standort mit einer stark und steil einsetzenden Abflusskurve (Abb. 65). Auch die Intensität des zum Abfluss gelangten Niederschlags der zweiten Beregnung im Bezug zur dritten Beregnung ist mit 9 % und einem Abflussbeiwert von gerade einmal 2,4 % äußerst niedrig. Aufgrund der standörtlichen Voraussetzungen wäre hier mit einer deutlich schnelleren und höheren Abflussreaktion zu rechnen gewesen. Auffällig gegenüber dem vergleichbaren Fichtenstandort P11 ist, dass der Abfluss nicht nur oberhalb der Verdichtungslage austrat, sondern auch in einem mehreren Dezimeter großen Bereich innerhalb des stark verdichteten Horizontes. Auf eine weitere Erhöhung der Niederschlagsmenge reagiert der Standort jedoch empfindlich. Trotz des anfänglich sehr langen Wasserrückhaltes setzt im Anschluss zur 3. Beregnung eine intensive Abflussbildung ein, die mit einem Anstieg von $m = 0,44$ alle anderen terrestrischen Standorte weit übertrifft. Mit einem Sättigungsabflusskoeffizienten von rund 28 % (14 mm/h \triangleq 23 l/min) zur dritten Beregnung zeigt sich deutlich die abnehmende (Bestandes-)Wirkung mit zunehmender Aufsättigung des Bodens.

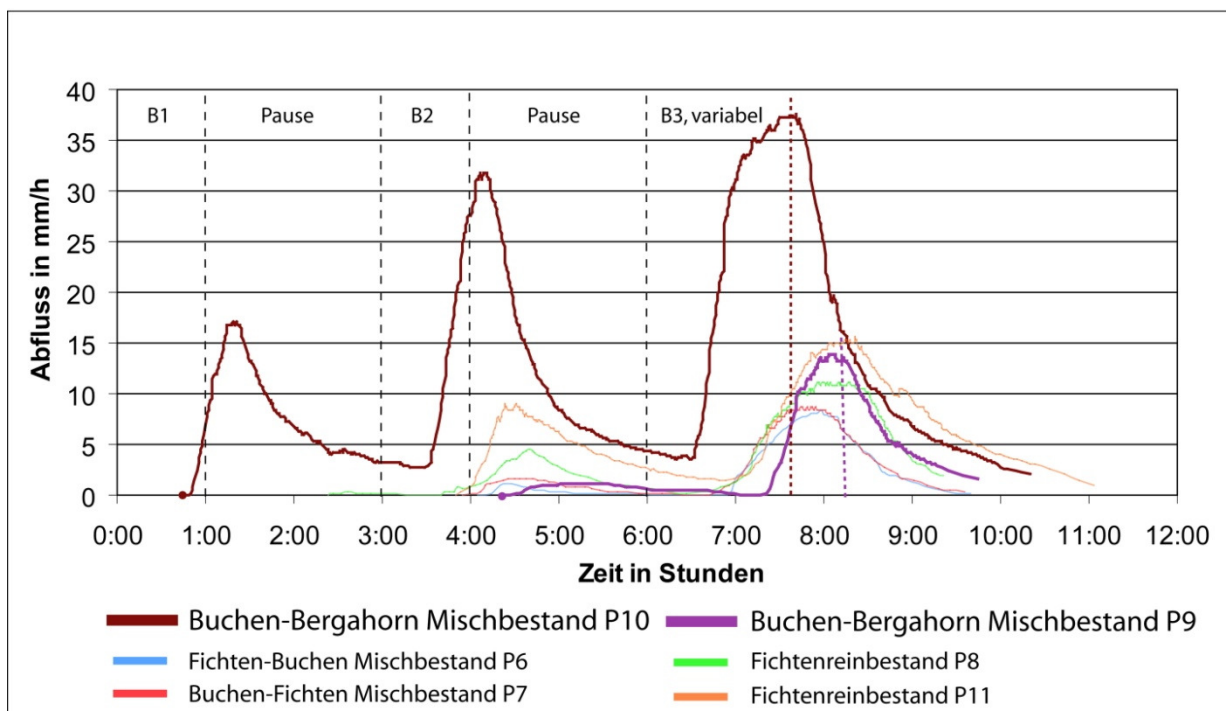


Abbildung 65: Abflussganglinien der Parzellen P10 (violett) und P9 (braun). Die farbig gestrichelten Linien markieren den Beregnungsstopp zur dritten Beregnung (NORDMANN et al. 2009a)

Der temporär grundfeuchte Standort P10 stellt mit seiner schnellen Abflussbildung alle anderen beregneten Flächen klar in den Hintergrund. Der Abfluss trat fast gleichzeitig an mehreren Stellen oberhalb und innerhalb der Verdichtungslage aus dem Profil aus. Die sehr kurzen Abstraktionszeiten von nur 44 Minuten zur ersten Beregnung (\triangle 36 mm Niederschlag) bzw. 30 Minuten zur zweiten und dritten Beregnung sowie die sehr steilen Anstiege von $m = 0,73/0,93$ und $0,94$ kennzeichnen die sehr hohe Reaktionsbereitschaft auf Niederschläge. Der nahezu ansatzlose und schlagartige Beginn der Abflussreaktion ist unter den untersuchten Standorten einmalig (Abb. 65). Die Abflusskoeffizienten (34 %/64 %) und der Sättigungsabflusskoeffizient von 75 % (62,5 l/min) bestätigen die sehr rasche Abführung des Wassers zum Vorfluter. Die Fläche erreichte bereits nach 50 mm Niederschlag annähernd 45 % des Sättigungsabflusses und 84 % zur zweiten Beregnung. Daher verwundert es nicht, dass die Fläche den höchsten Gesamtabfluss mit Abflussbeiwerten von 38 %, 84 % und 83 % erreicht, was die sehr effektive laterale Wasserführung des Standortes gut widerspiegelt.

Wurzelanalysen

Das vertikale Durchwurzelungspotenzial der Buchen/Bergahorn-Mischbestände (Abb. 66) ist im Vergleich zu den Fichtenreinbeständen deutlich höher ausgeprägt (Abb. 64). Trotz einer Lagerungsdichte der Parzelle P9 von über $2,0 \text{ g/cm}^3$ konnten auf einer Tiefe von über 1,50 m nennenswerte Wurzelanteile gefunden werden. Die oberen 60 cm werden ebenfalls intensiv erschlossen, wobei das Wurzelgeflecht des Bergahorn besonders hervorsticht. Die Wurzelmasse des grundfeuchten und blockschuttreichen Standortes P5 unterscheidet sich von denen

Ergebnisse

der vernässungsfreien Bereiche. Der typische Gradient vom wurzelreichen Oberboden zum wurzelärmeren Unterboden ist deutlich weniger ausgeprägt (Abb. 66). Das sauerstoffreiche Hangwasser wird selbst in 1,60 m Bodentiefe, vornehmlich durch den Bergahorn, sehr gut erschlossen und bewirkt eine Verlagerung der Wurzelmasse in die Tiefe. Buchenwurzeln konnten hingegen im wasserzügigen Bereich nur sehr vereinzelt am Bodenprofil angesprochen werden.

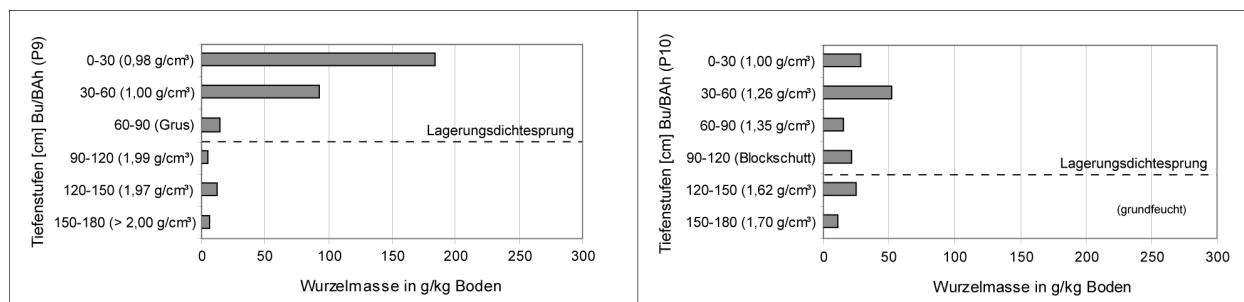


Abbildung 66: Durchwurzelungskennwerte der Parzellen P9 und P10 (NORDMANN et al. 2009a)

5.2.3 Vergleich und Zusammenführung der Berechnungsergebnisse

Die beiden Untersuchungsgebiete reagieren unterschiedlich schnell auf die simulierten Starkregenereignisse. Obwohl die durchschnittlich nutzbare Wasserspeicherkapazität der Bodenprofile im Röthengrund deutlich höher ist, reagieren die Standorte schneller auf das Starkregenereignis als die Profile im Bereich der Tschirner Ködel. Die steilen Anstiege der Abflussganglinien im Röthengrund lassen auf eine deutlich höhere Fließgeschwindigkeit innerhalb des Bodens schließen. Da sich die Lagerungsdichte und der Gesamtskelettgehalt (Tab. 21) der Deckschichten in beiden Untersuchungsgebieten nur geringfügig unterscheiden und der schluffige Sand des Hangschutts im Sonneberger Röthengrund sogar eine potenziell höhere Wasserspeicherkapazität aufweist (\emptyset SI3 (22,5 l/m²) vs. Ls2 (20 l/m²)) und die Böden tiefgründiger sind, muss eine höhere Wasserdurchlässigkeit des Bodens für die schnellere Weitergabe verantwortlich sein. Hier gibt es bereits deutliche Unterschiede in der hydraulischen Wasserleitfähigkeit der Bodenmatrix zwischen dem lehmigen Sand (SI3) im Röthengrund von 51 cm/d und dem schwach sandigen Lehm (Ls2) von 22 cm/d bei geringer Lagerungsdichte (Abb. 67). Auffällig ist auch der deutlich höhere Grusanteil im thüringischen Einzugsgebiet (Tab. 21). Die einzelnen kantigen Schieferscherben bilden einen äußerst grobporenen Solifluktionsschutt, in dem das Wasser sehr schnell in die Tiefe geleitet und abflusswirksam wird.

Gemeinsamkeiten bestehen in der Konzentration des abfließenden Wassers. Auf allen Standorten floss das Wasser entweder direkt über dem anstehenden Ausgangsgestein oder über den dicht gelagerten Fließerdenschichten unterhalb des B- bzw. B/C-Horizontes ab. Innerhalb der A- und B-Horizonte konnten, auch auf den etwas bindigeren Böden im Bereich der Tschirner Ködel (Abb. 68), keine Wasseraustrittsstellen am Berechnungsprofil festgestellt werden.

Tabelle 21: Zusammengestellte, durchschnittliche Anteile der Skelettfraktionen in Masseprozent (m%) zur Gesamtmasse des Bodens der Untersuchungsgebiete, getrennt nach Ober-/Unterbodenhorizont und Untergrundhorizont

	Skelettfraktion in Masse%		
	Grusgehalt (5-20mm)	Grobskelett (>20mm)	Σ Gesamtskelett
Röthen A-, B-Horizont	56,7	25,8	82,5
Tschirn A-, B-Horizont	27,9	50,2	78,1
Röthen C-Horizont	32,6	47,8	80,4
Tschirn C-Horizont	19,3	60,9	80,2

So können grobporene Lagen durch die hohe Infiltrationsrate Oberflächenabflüsse verhindern, im Umkehrschluss jedoch den schnellen Zwischenabfluss deutlich fördern. Eine Pauschalisierung, inwiefern in dem sonst hydrogeologisch einheitlichen Unterkarbon der grauackereichere „obere Kulm“ (Röthengrund) als abflussintensiver zu beurteilen ist als der

tonschieferreichere „untere Kulm“ (Tschirner Ködel), kann aufgrund der vergleichsweise wenigen Bodenprofile nicht abschließend beantwortet werden.

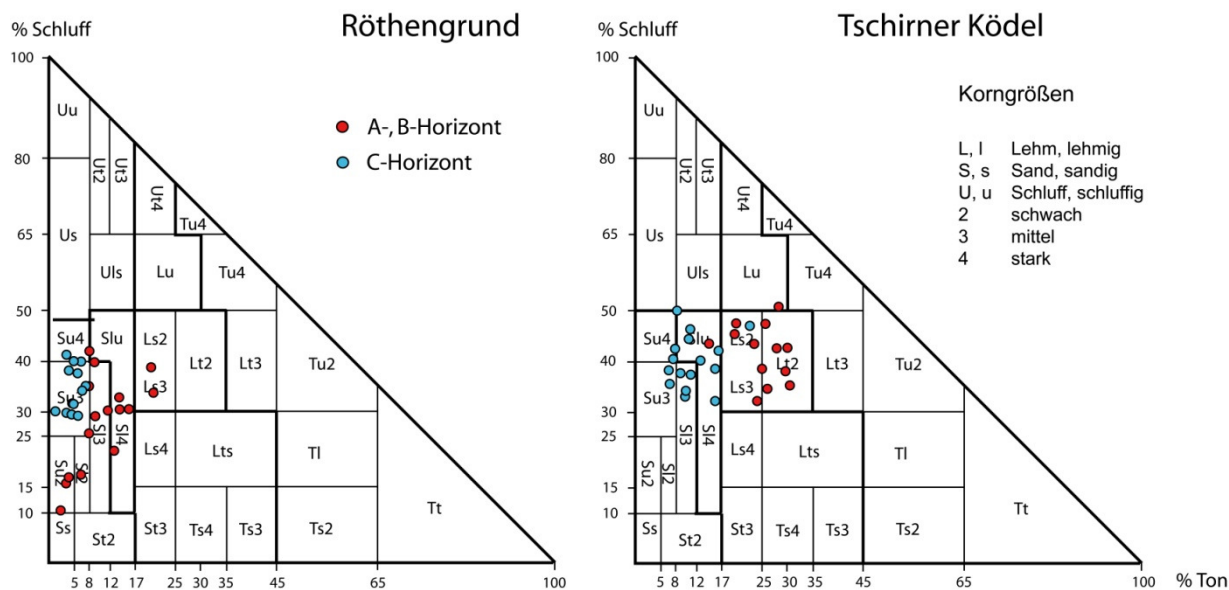


Abbildung 67: Korngrößenzusammensetzung der Ober- und Unterböden (A-, B-Horizont; rote Punkte) und des meist dichter gelagerten Untergrundhorizontes (C-Horizont; blaue Punkte) der Untersuchungsgebiete

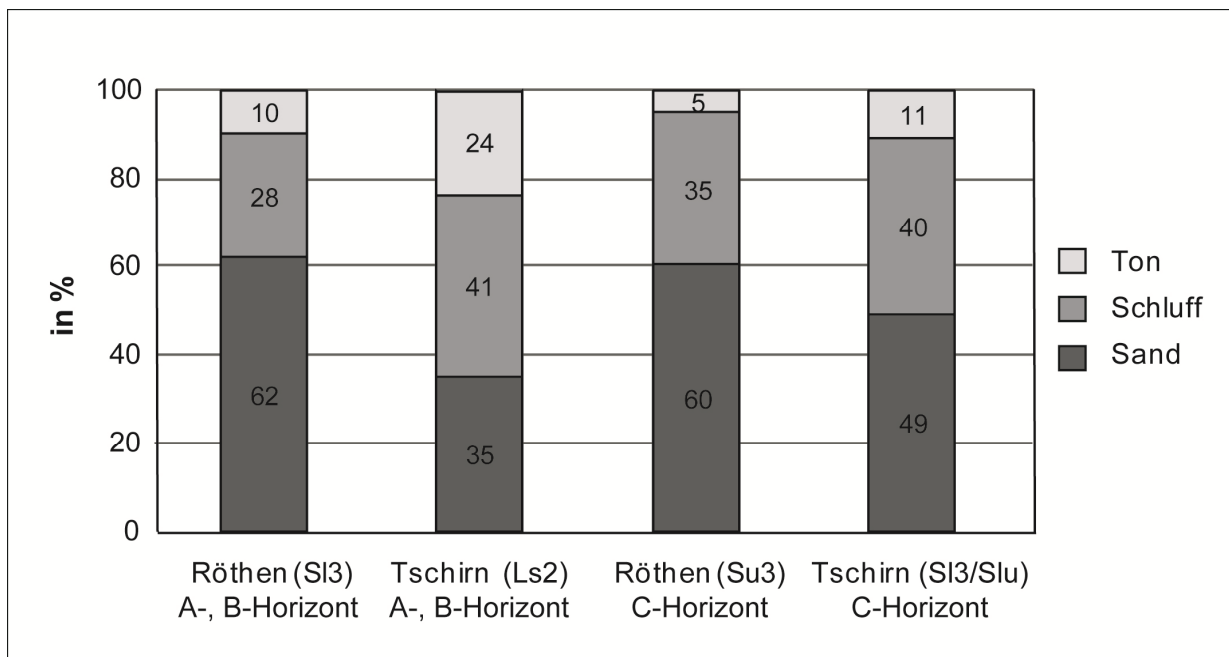


Abbildung 68: Gemittelte Korngrößenzusammensetzung der Ober-/Unterböden (A-, B-Horizont) und des Untergrundhorizontes (C-Horizont) der Untersuchungsgebiete

Um einen Überblick über die zurückgehaltene Wassermenge in Abhängigkeit zur Baumart zu erhalten, wurden die Abflussbeiwerte der zu vergleichenden Bestände der beiden Untersuchungsgebiete zusammengeführt und ein Durchschnittswert für jedes Berechnungsintervall errechnet (Abb. 69).

Alle Buchen- und Buchen-Bergahornbestände der Untersuchung konnten demnach die ersten 50 mm Niederschlag vollständig zwischenspeichern. Dagegen traten innerhalb der Fichtengruppen bereits erste Abflussreaktionen auf. Mit im Schnitt 1 % abgeflossener Niederschlagsmenge erreichten diese jedoch einen sehr geringen Wert.

Während der zweiten Beregnung reagierten auch die mit Laubholz bestockten Böden. Hier flossen 7 % des beaufschlagten Wassers wieder in die Auffangbehälter. 93 % der Beregnungsmenge konnten somit zurückgehalten werden. Die Parzellen mit Fichtenbestockung speicherten bei gleicher Niederschlagsmenge nur noch 85 %, d.h. 15 % der Regenmenge floss innerhalb des Bodens ab.

Zur dritten Beregnung, die nur noch die Ergebnisse der Tschirner Ködel umfasst, kommt es zu einer Annäherung des Wasserrückhaltes zwischen den Baumarten. Der Unterschied beträgt noch 5 % der abgeflossenen Niederschlagsmenge zugunsten des Laubholzes. Die Laubholzbestände wiesen nach über 150 l/m² vergleichbare Abflusswerte (15 %) wie die Fichtenbestände nach 100 l/m² (Abb. 69).

Nicht in den Baumartenvergleich flossen die beiden mit Laubhölzern bestockten, halbhydro-morphen Böden ein. Diese beiden Beregnungsflächen zeigen die starke Abhängigkeit des Wasserrückhaltes, der vom Standort ausgeht. So kommt es zu einer starken Abnahme der Retentionskapazität mit steigender Niederschlagsmenge. Bereits zur zweiten Beregnung speicherten die Böden weniger als die Hälfte des aufgegebenen Niederschlags. Zur dritten Beregnung sind es nur noch 17 % zurückgehaltene Wassermenge der abflusssensitiven Fläche im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel. Es ist daher sehr fraglich, ob eine veränderte Baumartenzusammensetzung den Abfluss auf solchen Hotspot-Standorten überhaupt verzögern kann. Hier kommt es vielmehr darauf an, eine stabile und standortgerechte Bestockung zu begründen, die einen dauerhaften Bestandesschluss garantiert.

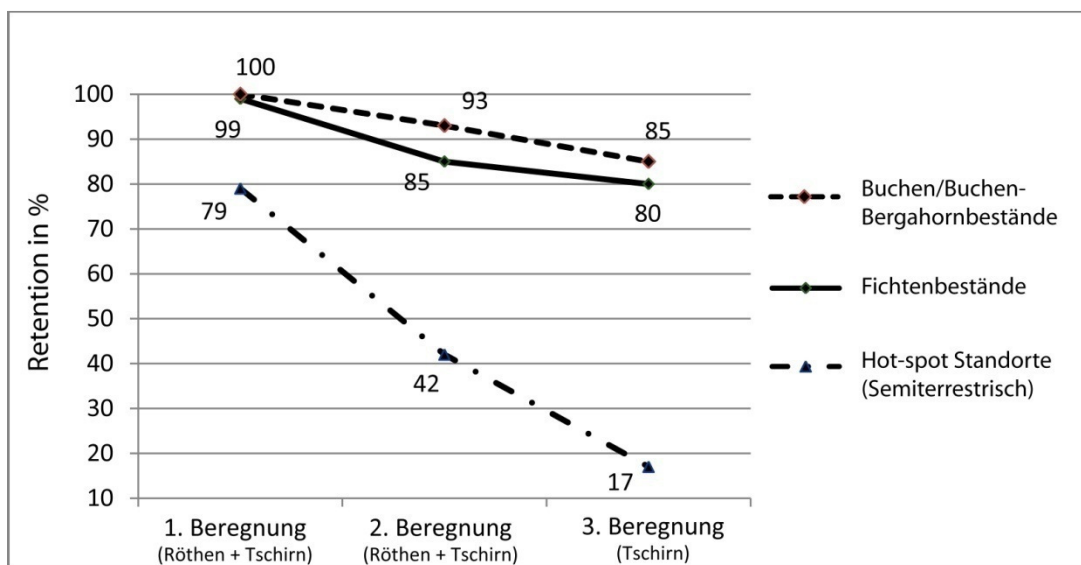


Abbildung 69: Gemittelte Wasserspeicherkapazität der Laub- und Nadelholzstandorte und deren Veränderung mit zunehmender Niederschlagsmenge (Beregnungsdurchgänge)



Oberflächenabfluss konnte weder unter den Fichten- noch unter den Laubholzbeständen festgestellt werden. Mit der Entstehung von Oberflächenabfluss infolge von Infiltrationshemmnissen während eines Starkniederschlags ist innerhalb von Waldbeständen der Untersuchungsgebiete nicht zu rechnen. Eine Erhöhung der bereits sehr guten Drainageeigenschaften der Oberböden durch verschiedene Durchwurzelungsstrategien scheint nicht möglich. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Zwischenabfluss die entscheidende Rolle im Abflussgeschehen der Wassereinzugsgebiete spielt. Verdichtete Basislagen oder die gering wasserwegsame Zerfalls- und Zersatzzone des anstehenden Ausgangsgesteins wirken dabei als Wasserstauer, an der die vertikale Fließrichtung des Sickerwassers in eine laterale Richtung ablenkt wird.

Die Ergebnisse des Baumartenvergleichs zwischen Fichten, Buchen und Bergahorn lassen einen baumartenabhängigen Trend im Wasserrückhalt zugunsten der tiefer wurzelnden Laubhölzer erkennen. Es wurde jedoch auch klar, dass mit der Baumartenwahl nur in einem begrenztem Umfang Einfluss auf das Abflussgeschehen ausgeübt werden kann. Die günstigsten Abflusswerte wiesen in beiden Untersuchungsgebieten die Buchen-Bergahorn-Mischbestände auf. Mit zunehmender Niederschlagsmenge ist jedoch auch hier eine stark abnehmende Bestandeswirkung feststellbar.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Minderung des hochwasserbürtigen Abflusses stark von den standörtlichen Voraussetzungen abhängig ist. Auf zum Beispiel stark wasserbeeinflussten Standorten in Hanglage tritt durch den fortwährenden Wassernachschub der Hänge ein baumartenspezifischer Effekt klar in den Hintergrund.

5.3 Abschätzung des Waldeinflusses auf Einzugsgebietsebene

In diesem Kapitel soll anhand einer Synthese der durchgeführten Berechnungsversuche und der erstellten Abflussprozesskarte versucht werden, den Einfluss einer geänderten Baumartenzusammensetzung auf die Abflussreduktion auf Einzugsgebietsebene abzuschätzen. Konkrete waldbauliche Maßnahmen, wie dies erreicht werden könnte, zeigt das Kapitel 7 („Waldbauliche Schlussfolgerungen“).

Die Böden in beiden Untersuchungsgebieten besitzen trotz ihres hohen Grusgehaltes flächendeckend im Schnitt eine mittlere nutzbare Wasserspeicherkapazität (70 - 120 l/m²). Der Grund liegt in ihrer mittleren- bis großen Entwicklungstiefe des locker gelagerten Frostschuttes. Da der infiltrierte Niederschlag größtenteils innerhalb des Bodens zum Vorfluter geleitet wird, entsteht durch das auflagernde, wasserspeichernde Bodensubstrat und die damit verbundenen längeren Fließzeiten ein natürlicher Puffereffekt. Mit Blitzfluten, wie sie auf dicht gelagerten oder flachgründigen Standorten vorkommen können und von schnellen Abflussprozessen (HOF, SOF 1, SOF 2, SSF 1) dominiert sind, ist damit nicht zu rechnen. Dass die Region dennoch häufig von Überflutungen betroffen ist, ist das Ergebnis von sich langsam aufsättigenden Böden, die aufgrund ihres homogenen Aufbaues auf größerer Fläche nach Erreichen des Sättigungspunktes nahezu gleichzeitig überschüssiges Wasser abgeben. Zusätzlich verstärken orografische Effekte, wie zum Beispiel eine erhöhte Schneeakkumulation auf den Höhenlagen im Staubereich des Mittelgebirges, die Abflussdisposition. Durch die locker gelagerten, grusigen Böden wird das überschüssige Wasser sehr schnell zum Vorfluter weiter geführt. Vor allem in dem extrem grusigen Hangschutt des Sonneberger Röthengrundes konnten nach Erreichen des Sättigungswertes sehr schnelle Abflussreaktionen beobachtet werden. Die Folge ist eine verzögerte, aber mit verhältnismäßig hohem Abflussvolumen einsetzende Hochwasserwelle.

Abflussprozesse, die im Sinne des Hochwasserschutzes potenziell am ehesten durch die Baumartenwahl beeinflusst werden können, sind im Tortendiagramm (Abb. 70) hervorgehoben. Im bayerischen Wassereinzugsgebiet umfassen sie eine Fläche von 35 %. Im thüringischen Gebiet nehmen sie eine Fläche von 22 % ein. Aufgrund der hohen Reliefenergie im Röthengrund nimmt der tiefe Zwischenabfluss (DSSF und DSSF⁺), als nicht beeinflussbare Abflusskomponente eine bedeutende Flächengröße von über 20 % ein (Tschirm 4,4 %). Hochflächen und stark konvexe Lagen, auf denen mit verzögertem tiefen Zwischenabfluss und Tiefensickerung gerechnet werden muss, sind im Röthengrund mit weiteren 25,2 % und im Bereich Tschirner Ködel mit 23,4 % vertreten. Auch die Flächen mit stark verzögertem Zwischenabfluss nehmen in beiden Gebieten etwa gleich große Flächenanteile ein (Tschirm: 32,8 %, Röthen: 29,0 %). Die Kastentäler der Tschirner Ködel sind in einigen Bereichen von ständig wassergesättigten Verhältnissen geprägt, die praktisch ohne nennenswerte Verzögerung auf

ein Niederschlagsereignis reagieren (SOF 1), für sich gesehen aber nicht die Größe erreichen, um ein Hochwasserereignis auslösen zu können.

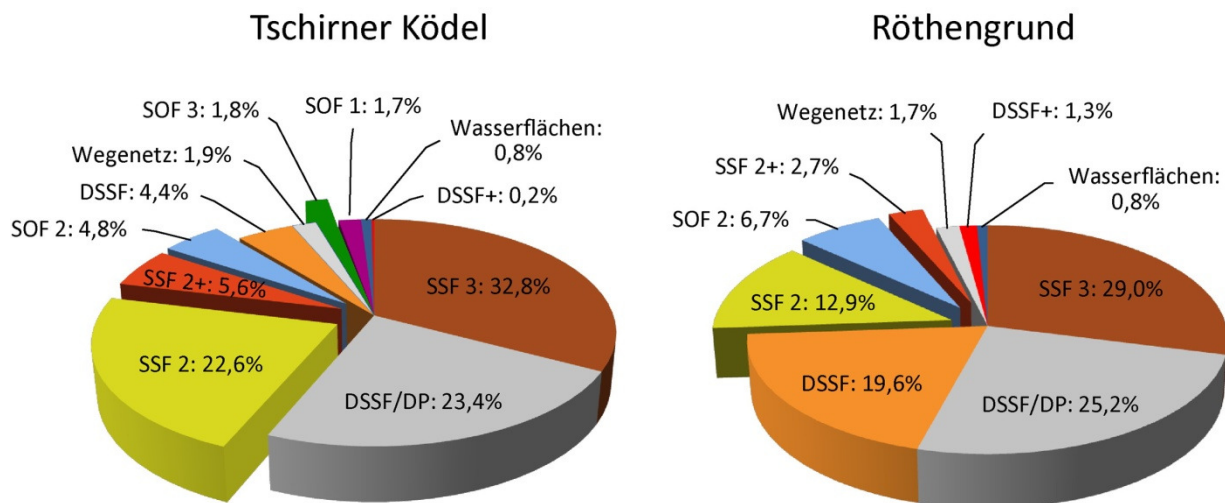


Abbildung 70: Aufteilung der Abflussprozesse im Gesamteinzugsgebiet. Beeinflussbare Flächen sind herausgestellt

Die Abflussprozesskarte unterstellt dem Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel einen höheren Anteil an beeinflussbaren Zwischenabflusskomponenten als im Röthengrund. Der Grund liegt in einer flacheren Gebietsausformung begründet. Während im Röthengrund, aufgrund der hohen Reliefenergie, von großflächig auftretenden, grusreichen Frostschuttdecken ausgegangen werden muss, deren Wasserspeicherkapazität durch verschiedene Wurzelstrategien nicht beeinflusst werden kann, wird angenommen, dass im Bereich der Tschirner Ködel der Anteil an pedogenen Dichtlagerungen zunimmt. Dadurch nimmt der Anteil an verzögert reagierendem Zwischenabfluss (SSF 2) deutlich zu.

Die Untersuchung unterstellt tiefwurzelnden Baumarten eine Erhöhung der Wasserspeicherkapazität. Hervorgerufen wird dies durch eine intensivere Durchwurzelung pedogener Stauhorizonte. Dadurch wird die Infiltrationskapazität der Stauschicht erhöht und dem Boden tiefgründig Wasser entzogen. Bei einem Starkregenereignis steht so zusätzlicher freier Porenraum zur Verfügung. Da diese Annahme an die Bedingung dicht gelagerter Bodenhorizonte geknüpft ist, wird klar, warum dem bayerischen Untersuchungsgebiet ein höheres Potenzial zum Wasserrückhalt durch Waldumbaumaßnahmen zugetraut wird.

6. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde der Frage nachgegangen, ob sich mit dem verfügbaren boden- und standortkundlichen Kartenmaterial der Länder Bayern und Thüringen sowie mit Hilfe einfacher Reliefanalysen anhand digitaler Höhenmodelle, abflusssensitive Waldflächen ausweisen lassen. Dazu wurden zwei Untersuchungsgebiete im bayerisch-thüringischen Grenzgebiet ausgewählt, die Datenlage analysiert, die verwendbaren Informationen mit Hilfe eines Expertensystems zu einer Abflussintensität verknüpft und die Ergebnisse in Form einer detaillierten Abflussprozesskarte dargestellt. Zusätzlich wurden unter Fichten- und Buchenreinbeständen sowie unter Buchen-Bergahorn-Mischbeständen Beregnungsversuche durchgeführt. Das während der Beregnungsversuche auftretende abflusswirksame Wasser wurde aufgefangen und miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass auf allen Untersuchungsflächen das abfließende Wasser sich in Form von Zwischenabfluss konzentriert. Oberflächenabfluss konnte bei einer Beregnungsintensität von 50 mm/h nicht festgestellt werden. Darüber hinaus hielten die Buchen-/Bergahorn-Mischbestände deutlich mehr Wasser zurück und zögerten dadurch den abflusswirksamen Teil des Niederschlags deutlich länger hinaus als die untersuchten Fichtenreinbestände.

6.1 Material- und Methodendiskussion

6.1.1 Wahl der Untersuchungsflächen

Um der länderübergreifenden Kooperation im Hochwasserschutz zwischen Bayern und Thüringen gerecht zu werden, wurde der grenzüberschreitende Frankenwald für die Versuche ausgewählt. Zudem stellt der Frankenwald aus Sicht des Hochwasserschutzes einen Brennpunkt dar, was die Hochwasser der letzten Jahre eindrucksvoll demonstrieren (Tab. 22).

Tabelle 22: Die fünf höchsten Hochwasserabflüsse der Tschirner Ködel (Nordhalben) im Zeitraum von 1966 - 2009 (Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) - Hochwassernachrichtendienst)

Pegel Tschirner Ködel

Jährlichkeiten der Höchstabflüsse (HQ)	
HQ1	2,6 m ³ /s
HQ2	3,3 m ³ /s
HQ5	4,2 m ³ /s
HQ10	5,4 m ³ /s
HQ20	6,8 m ³ /s
HQ50	9,0 m ³ /s
HQ100	11,0 m ³ /s

Höchste Abflüsse Zeitraum 1966 - 2009	Datum
5,70 m ³ /s	20.01.1995
5,90 m ³ /s	24.12.1967
6,90 m ³ /s	13.02.2005
7,69 m ³ /s	27.01.2002
7,74 m ³ /s	03.01.2003

Der Frankenwald ist mit einem Waldanteil von über 50 % eine der walddreichsten Gegenden Bayerns. In der Baumartenzusammensetzung dominiert die Fichte mit 82 %, gefolgt von der Buche mit 7 % (TÜRK 1993). Den Rest teilen sich verschiedene Edellaubhölzer, Kiefer, Tanne und Lärche. Durch den historisch bedingt hohen Fichtenanteil (Kap. 3.1.1) sind viele Flächen eintönig und nicht standortgerecht bestockt. Das Potenzial zum standortgerechten Waldumbau, in Hinblick auf den vorbeugenden Hochwasserschutz, ist daher in besonderem Maße gegeben.

Die Anforderungen für ein experimentell geeignetes Wassereinzugsgebiet in Bayern und Thüringen waren aufgrund der umfassenden Fragestellung sehr vielschichtig. So musste jeweils ein Gebiet gefunden werden, in dem die bodenkundliche Kartengrundlage überhaupt eine Klassifizierung zuließ und in etwa dem durchschnittlichen Informationsgehalt im Frankenwald entsprach. Da sich bereits zu Beginn herausstellte, dass die forstliche Standortskarte ein wichtiges Instrument werden würde, mussten die Untersuchungsgebiete ein hohes Bewaldungsprozent in staatlichem Besitz aufweisen, um flächendeckende Informationen zu erhalten. In den zwei auszuwählenden Gebieten sollten gleichzeitig die baumartenabhängigen Berechnungsversuche durchgeführt werden. Aufgrund der eingeschränkten Baumartenauswahl mussten die Berechnungsversuche auf einen Vergleich zwischen den Baumarten Fichte, Buche und Bergahorn abgestellt werden. Andere Baumarten schieden aus, da sie im Frankenwald nicht bestandesbildend auftraten. Um überhaupt Komplementärflächen zur Fichte zu finden, musste der Buchen-/Bergahornanteil im auszuwählenden Wassereinzugsgebiet im Vergleich zur normalen Bestockung des Frankenwaldes überdurchschnittlich hoch sein. Dies grenzte die Auswahl der Gebiete weiter stark ein.

Die Wahl fiel auf die Buche und den Bergahorn, da davon ausgegangen wurde, dass das intensive Herzwurzelsystem beider Baumarten Vorteile in der vertikalen Erschließung der Standorte gegenüber dem oberflächennahen, weit verzweigten und tellerartigen Senkerwurzelsystem der Fichte hat. Ein Vergleich des Abflussverhaltens zwischen diesen Baumarten scheint daher hinsichtlich des vorbeugenden Hochwasserschutzes als gerechtfertigt. Nach Abwägung aller Kriterien stellten sich das Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel und der Röthen als die geeignetsten Untersuchungsgebiete heraus.

Innerhalb der so ausgewählten Wassereinzugsgebiete wurden vor Ort Fichten- und Buchen(misch)bestände aufgesucht und die technische Umsetzbarkeit der Berechnungsversuche (Wasserquelle, Zugänglichkeit etc.) sowie die standörtlichen Voraussetzungen geprüft.

Da die bodenhydraulischen Eigenschaften den Wassertransport entscheidend beeinflussen (BOTT 2002), bestand die wichtigste Aufgabe darin, einheitliche Böden mit vergleichbarem Aufbau zu finden. Damit sollte verhindert werden, dass der Standort einen möglichen baumartenabhängigen Effekt auf das Abflussverhalten überlagert.

Trotz der standörtlich sehr ähnlichen Böden im Frankenwald fiel es schwer, die selbst gesteckten, strengen Auswahlkriterien (Kap. 4.4) alle einzuhalten. Die schlussendlich ausgewählten Beregnungsstandorte sind das Ergebnis aus tagelangem Suchen nach geeigneten Standorten und zahlreich ausgehobenen Bodengruben und stellen letztendlich einen Kompromiss aus der Gründigkeit, dem Skelettgehalt, der Mächtigkeit, den Eigenschaften der Verdichtungslage und der Baumartenzusammensetzung dar. Um überhaupt eine genügende Anzahl von Buchenbeständen für die Beregnung zu erhalten, wurde der Bergahorn als beigemischte Baumart erst nachträglich in das Konzept mit aufgenommen.

Bereits bei der Suche nach Beständen fiel auch die ungleichmäßige Verteilung der Bodenfeuchte an den Hängen auf, die von der Standortkartierung offensichtlich nicht erfasst wurde. Da organisatorisch bedingt die Festlegung auf die Beregnungsprofile noch vor der Erstellung der Abflussprozesskarte erfolgte, ist in beiden Untersuchungsgebieten jeweils ein Standort dabei, der im Untergrund einen temporär schüttenden Hangwasserzug aufweist und sich daher mit den übrigen Standorten nicht vergleichen lässt (Abb. 71).

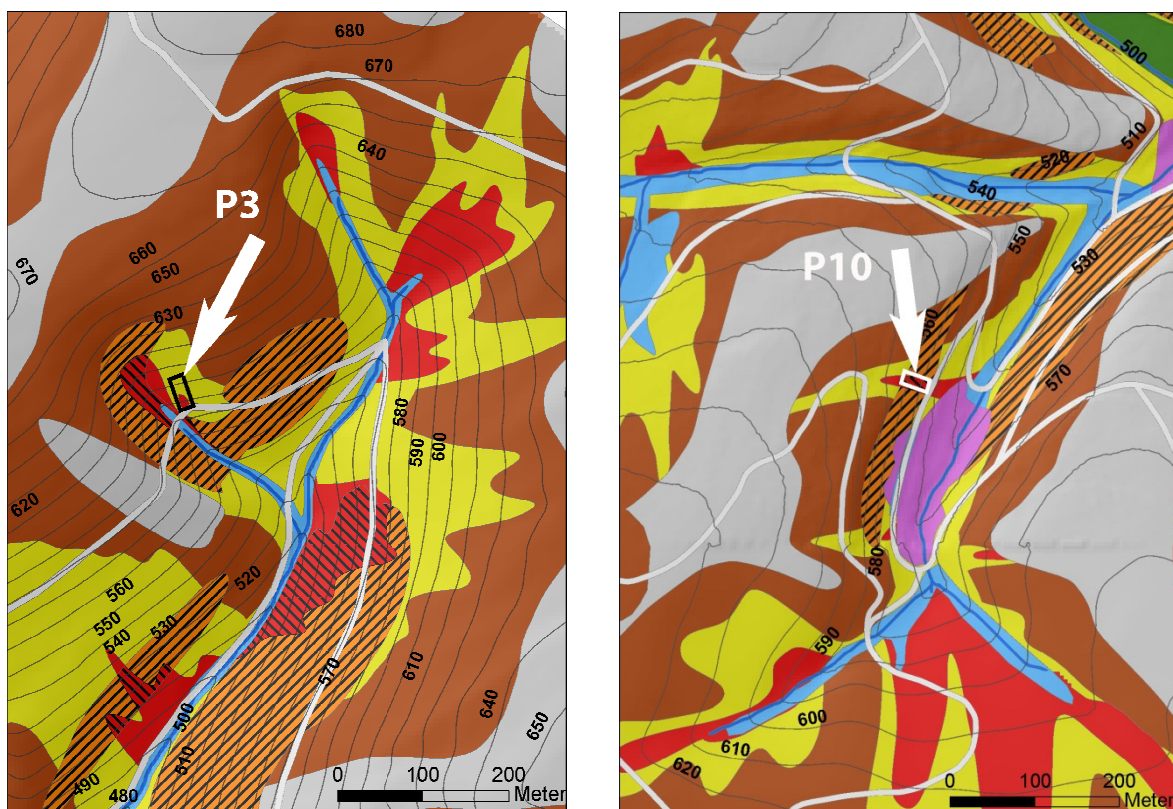


Abbildung 71: Ausschnitt der Abflussprozesskarten. Lage der beiden Hotspot-Standorte P3 & P10 mit temporärem Zwischenabfluss im Untergrund (Legende siehe Kapitel 5.1.2.1, S. 108 ff.)

In diesem Kontext wäre es besonders aufschlussreich gewesen, wie sich das tiefreichende Pfahlwurzelsystem der Tanne gerade auf Standorten, die einen temporären Hangwasserzug in der Tiefe aufweisen, auf den Abflussprozess auswirkt. Die versprengten einzel- bis gruppenweise Tannenvorkommen im Frankenwald ließen es jedoch nicht zu, geeignete Beregnungsplätze zu finden.

6.1.2 Aufnahmemethodik – Abflussprozesskarte

Das vorgestellte Klassifikationsverfahren stellt die Verknüpfung zwischen bodenkundlichen Grundlegendaten und Reliefanalysen her, auf deren Grundlage hydrologische Homogenitätsbereiche ermittelt und in einer Karte grafisch dargestellt werden können.

Viele der bereits erstellten Abflussprozesskarten erfüllen nicht die nötige Detailgenauigkeit oder beruhen auf zeit- und arbeitsintensiven Kartierungen vor Ort, die nur für kleinere Gebiete mit konkretem Hochwasserrisikopotenzial gerechtfertigt sind (SCHERRER 2006). Damit sind sie für eine großflächige und praxisnahe Ausweisung von abflusssensitiven Standorten nur bedingt geeignet (vgl. Kap. 2.8). Durch den beschränkten Informationsgehalt der boden- und standortkundlichen Kartenwerke wird zur Ableitung von Fließprozessen daher häufig die Hangneigung als Regler verwendet (vgl. WALDENMEYER 2003, SCHÜLER 2006, NAEF et al. 2007). Verschiedene Studien zeigen jedoch, dass die Hangneigung einen weitaus geringeren Einfluss auf den Abflussprozess und die Abflussintensität ausübt, als vielfach angenommen (LUDWIG 1969, SCHWARZ 1985, MOLLENHAUER et al. 1985, MARKART et al. 1997, SCHERRER 1997, LÖHMANNSRÖBEN 1999). Dabei muss gesagt werden, dass sich der überwiegende Teil dieser Ergebnisse auf den Oberflächenabfluss bezieht. Für Zwischenabflüsse liegen aufgrund der schwierigen Aufnahmebedingungen nur wenige Untersuchungen, ohne bislang eindeutigen Befund, vor (vgl. SCHERRER 1997).

Für den Alpenraum wurden Bestimmungsschlüssel zur Ausweisung hochwassersensitiver Flächen entwickelt, die sich im Wesentlichen mit der Klassifikation von Oberflächenabfluss und die dadurch verursachte fluviale Bodenerosion beschäftigen (vgl. RICKLI & FORSTER 1997, LÖHMANNSRÖBEN et al. 2000, MARKART et al. 2004). Die Ableitungen stützen sich hauptsächlich auf den Bodentyp und die vorkommenden Vegetationsgesellschaften. Da Oberflächenabflüsse in den Wäldern des Frankenwaldes nur eine verhältnismäßig geringe Rolle spielen, lassen sich diese Expertensysteme nicht oder nur auf Teilflächen im Mittelgebirgsraum anwenden. Bereits die Übertragbarkeit bestehender Expertensysteme für Mittelgebirgsräume auf andere Gebiete in der Region ist zu überprüfen und nicht ohne Weiteres möglich. So ist es zum Beispiel unwahrscheinlich, dass auf den hoch durchlässigen Schuttdecken des Frankenwaldes pauschal bei einer Hangneigung von 2-20° mit leicht verzögertem Zwischenabfluss (SSF 2), von 20-40° mit raschem Zwischenabfluss (SSF 1) und über 40° mit Oberflächenabfluss (HOF) gerechnet werden muss, wie es der Schlüssel von SCHÜLER (2006), der für ein Gebiet im Nordpfälzer Berg- und Hügelland entwickelt wurde, vorgibt.

Die Hangneigung als zentrale Größe scheint für die Prozessevaluierung ungeeignet, zumal sich aus den entstehenden Karten keine konkreten Waldumbauf Flächen ergeben.

Bereits KIRKBY und CHORLEY (1967), DUNNE und BLACK (1970a, 1970b), ANDERSON und BURT (1978) sowie im deutschsprachigen Raum KUGLER (1974) und LESER (1980) stellten die große Bedeutung der Wölbung auf hydrologische und geomorphologische Prozesse heraus. Auch

FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996), die sich intensiv mit der Steuerfunktion des Reliefs für die Abflussbildung befasste, bestätigte in ihrer Arbeit, dass der Reliefausformung ein entscheidender Faktor für die Abflusskonzentration im Mittelgebirgsraum beigemessen werden muss. So ist die Horizontal- und Vertikalwölbung eng mit den hydrologischen Eigenschaften eines Gebietes verbunden. Verstärkte Wasserbewegungen finden sich häufig in wasserzuflussbegünstigen (konvergierenden) Hangformen, z. B. Mulden und Dellen wieder (DUNNE & BLACK 1970a, 1970b). Zum anderen übt das Relief einen entscheidenden Einfluss auf die Ausformung und Eigenschaften der Böden und somit auf den Niederschlag-Abfluss-Prozess aus. Deshalb wurde neben dem bodenkundlichen Informationsgehalt der Kartenwerke in dieser Arbeit auch die Geomorphologie zur Ermittlung abflusssensitiver Flächen berücksichtigt.

6.1.2.1 Regionalisierung bestimmter Bodeneigenschaften

Das vorgestellte Klassifikationsschema unterstützt die vorhandenen Bodeninformationen mit nachvollziehbaren Reliefgliederungsverfahren und Abflussmodellierungen. Auf die meist sehr teuren GIS-Lizenzsysteme kann in vielen Fällen verzichtet werden, da die verwendeten Algorithmen mittlerweile auch in vielen frei erhältlichen Programmen, wie zum Beispiel SAGA-GIS¹⁷ oder GRASS¹⁸, enthalten sind, mit deren Hilfe in wenigen Schritten eine deskriptive Darstellung des Abflussregimes der Hänge möglich ist.

Böden weisen wegen ihrer Entwicklungsgenese typische Substrateigenschaften in Abhängigkeit zur Lage im Gelände auf (FRIEDRICH 1996, SCHOLTEN 2003). Erstmals leiteten THEWS und SEMMEL (1993) durch das Verschneiden von Bodenkarten (1:25.000) mit verschiedenen Reliefanalysen reliefabhängige Bodeneigenschaften ab. Sie fanden heraus, dass Hänge mit ähnlicher Neigung und Exposition einen vergleichbaren Aufbau der periglazialen Lagen aufwiesen. Durch die Weiterentwicklung Geografischer Informationssysteme (GIS) und dem Vorliegen zunehmend genauerer digitaler Höhenmodelle können über Reliefanalysen auch komplexe geomorphografische Parameter zur Ableitung bestimmter Bodeneigenschaften berechnet werden. Für periglaziale Fließerden werden solche Regionalisierungsansätze unter anderem von UHLENBROOK und LEIBUNDGUT (2002), TILCH et al. (2002) sowie SCHOLTEN (2003) vorgestellt.

Die wichtigste Frage, die es mit Blick auf den vorbeugenden Hochwasserschutz im Frankensteinwald zu beantworten galt, lautet:

- Ist die vertikale Wassersickerung durch dichtere Bodenhorizonte gehemmt oder fließt das Wasser direkt über dem geologischen Ausgangsmaterial ab?

¹⁷ <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de>

¹⁸ <http://grass.itc.it>

Das Klassifikationsschema unterstellt zunächst, dass dichtere Bodenschichten flächendeckend vorhanden sind. Ausnahmen stellen Reliefstrukturen dar, auf denen ein Abtrag von Bodenmaterial stattfindet. In der Regel sind das alle divergierenden Bereiche, wie Höhengipfel, Oberhänge und stark konvexe Hangabschnitte. Durch den Materialabtrag liegt hier häufig die lockere Hauptlage direkt auf dem weitgehend dichten geologischen Ausgangsmaterial auf (vgl. SAUER 2002). Da das geologische Ausgangsmaterial nicht als idealisiert „wasserdicht“ angesehen werden kann, sondern immer wieder von Spalten und Klüften durchzogen ist (auch abhängig von Schichtungsrichtung), infiltriert ein Teil des Wassers in den Grundwasserkörper. Damit entsteht auf größerer Fläche eine Mischung aus Tiefem Zwischenabfluss und Tiefensickerung (DSSF/DP). Diese divergierenden Bereiche wurden mit Hilfe des convergence Index (TCI) ermittelt.

Außerdem wird unterstellt, dass an sehr steilen Hängen ($\geq 26^\circ$, Richtwert, substratspezifisch) durch die beschleunigte Massenbewegung Material zu- und in gleichem Maße wieder abgeführt wird. Dadurch kommt es zur Ausbildung von locker gelagerten, skelettreichen Hangschuttdecken ohne Akkumulationslagen über dem geologischen Ausgangsmaterial (vgl. TILCH et al. 2002). Der Weg des abfließenden Wassers beschränkt sich hier auf die mit lehmigem Sand gefüllten Gesteinsspalten der Zersatzzone oder fließt direkt über dem kompakt anstehenden Gestein ab. Durch den hohen hydraulischen Gradienten der Steilhänge wird das Tiefensickerungspotenzial als gering eingeschätzt und als Abflussprozess schnell reagierender Tiefer Zwischenabfluss (DSSF⁺) angenommen. Auf allen anderen Standorten (Hangneigungen $< 26^\circ$ oder TCI < 13) wird davon ausgegangen, dass dichtere Bodenschichten das perkolierende Wasser in eine laterale Richtung ablenken und somit Zwischenabfluss entsteht.

6.1.2.2 Flächen mit rasch einsetzendem Zwischenabfluss

Laut WALDENMEYER (2003) existiert für die Lokalisation von Zwischenabfluss zurzeit kein gängiges Verfahren. Aufgrund der unterirdischen Fließphase sind bodenkundliche Kenngrößen aller am Abflussprozess beteiligten Schichten notwendig, die aber in der geforderten Auflösung aus den Kartenwerken nicht abgeleitet werden können. Laut SCHILLING und SPIES (1991) und GEOTEAM (2002) liegen in den Talanfangsmulden sowie in breiteren Mulden- und Wannentälern des Frankenwaldes oft mächtige, im Untergrund dichte und wasserstauende pleistozäne Fließerden. Auch SAUER (2002) nimmt in ihrer Arbeit grundsätzlich eine verstärkte Akkumulation von Basislagenmaterial in konkaven Lagen an. Durch die wasserzuflussbegünstigte Hangform finden sich auch häufig Zwischen- und Sättigungsabflüsse in diesen Lagen wieder (FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996). Üblicherweise werden solche Bereiche über Nachbarschaftsanalysen und gebietsspezifische Wölbungsradien mit Hilfe eines GIS ermittelt. Die Ausweisung auf Grundlage von Hangwölbungen mit Krümmungsradien (Befehl: curvature), so wie es FARRENKOPF-HILDEBRANDT (1996) vorschlägt oder dem MRVBF-Index (Multiresolution

Index of valley bottom flatness), erbrachten jedoch für die Untersuchungsgebiete keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

Deshalb wurde in dieser Arbeit ein anderer Weg gewählt und versucht, Mulden und Dellen über die Größe des spezifischen Einzugsgebietes abzubilden. MOORE et al. (1991) schreiben dazu, dass die horizontale Variation abflusswirksamer Sättigungsflächen durch die Festlegung verschiedener Schwellenwerte zur Größe des spezifischen Einzugsgebietes möglich sei. Während sich die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes als Indikator für (Sättigungs-)Oberflächenabfluss bereits etabliert hat, liegen für die Anwendbarkeit auf die unterirdisch gesättigte Bodenwasserzone bisher unterschiedliche Meinungen vor.

Die Behauptung in dieser Arbeit lautet daher: Je größer der wasserkonvergierende Bereich („beitragendes Teileinzugsgebiet“), desto größer ist die Wahrscheinlichkeit von Zwischenabfluss.

Laut BUTTLE et al. (2004) sind die Größe der beitragenden Fläche und die Bodenmächtigkeit für die Zwischenabflussaktivität eines Standortes verantwortlich. WEILER und McDONNELL (2004) stimmen dieser Aussage zu, präzisieren diese jedoch weiter. Sie fanden heraus, dass die Bodenmächtigkeit nur einen geringen Einfluss auf die räumliche Ausbildung von Zwischenabflussflächen hat, wohl aber auf die abfließende Wassermenge. Das heißt, je tiefgründiger der Boden ist, umso geringer ist die Gefahr von Zwischenabfluss. Mit der Berechnung von konvergierenden Hangformen durch die Fließakkumulation kann also auf die räumliche Ausdehnung, nicht aber auf die exakte Abflussmenge geschlossen werden. Für die Erstellung einer Abflussprozesskarte ist dies zunächst jedoch unbedeutend. Die Berechnung der Abflussmenge durch Aufsummierung der beitragenden Rasterzellen ist ohnehin fehleranfällig, da unterirdische Fließprozesse nicht idealisiert am Hang ablaufen, sondern immer wieder durch Störungszonen unterbrochen werden.

Eine weitere Unsicherheit besteht in der Analyse der Oberflächenstruktur. Genau genommen können mit einem Höhenmodell nur oberflächige Abflusskonzentrationen beschrieben werden. Die Fließrichtung von Zwischenabflüssen richtet sich hingegen nach der Lage der wassertragenden Schicht (Grundgestein, dicht gelagerte Bodenschicht), die vom Oberflächenrelief abweichen kann. Bei der Anwendung von Höhenmodellen für unterirdische Abflussprozesse wird somit vorausgesetzt, dass die Lage der wasserstauenden Schicht mit der Ausrichtung der Geländeoberfläche übereinstimmt und das abfließende Wasser auch nicht in größerem Umfang in den Grundwasserkörper infiltriert (vgl. FREER et al. 1997).

Diese Annahme und die Validierung der räumlich generierten Abflüsse vor Ort waren in der Vergangenheit bereits Mittelpunkt mehrerer Untersuchungen (WOODS & ROWE 1996, McDONNELL 1997), bei denen die Autoren zu unterschiedlichen und zum Teil sehr kontrovers diskutierten Ergebnissen kamen. Ausschlaggebend, ob die Verwendung von Reliefanalysen zur

Ausweisung hydrologischer Homogenitätsbereiche für ein Gebiet geeignet ist oder nicht, scheinen demnach die (hydro-)geologischen und bodenphysikalischen Bedingungen eines Gebietes zu sein.

Die Beregnungsversuche zeigten, dass die Infiltrationskapazität des Bodens und die vom Relief weitgehend unabhängige Perkolation in den schuttreichen Hauptlagen des Frankenwaldes für eine Verwendung von digitalen Höhenmodellen sprechen. Durch das weitgehend wasserundurchlässige Grundgestein (HORSTIG 1979), beziehungsweise durch die wasserstauend wirkenden und \pm oberflächenparallel ausgebildeten Basislagen und Zersatzzonen, kommt es zu einem Wasserstau in der Tiefe, bei gleichzeitig sehr guter lateraler Transportkapazität im Hangschutt. Das Wasser fließt daher im Wesentlichen in weiten Teilen des Mittelgebirges parallel zur Reliefoberfläche ab (VÖLKELE et al. 2002). Der höchste Transportgradient im Untergrund dürfte daher mit dem Gradienten des Oberflächenreliefs vergleichbar und eine oberflächenbasierende Modellierung der Hangwasserflüsse gerechtfertigt sein. Dabei sei noch einmal ausdrücklich erwähnt, dass in Regionen mit wasserdurchlässigem Grundgestein (Kalksteine, Sande, Schotter etc.) dieser Ansatz nicht anwendbar ist.

Durch die Verwendung von drei Schwellenwerten zur Kennzeichnung der unterirdischen Fließphase und einen zur Darstellung des Gerinnenetzes wurde versucht, die horizontale Ausdehnung der Flächen nach dem Vorbild des *variable source area concept* (HEWLETT 1961, HEWLETT & HIBBERT 1967, DUNNE & BLACK 1970a, 1970b) nachzubilden. Es teilt das Einzugsgebiet in abflusswirksame und nicht abflusswirksame Flächen auf. Die abflussbeitragenden Flächen dehnen sich nach DYCK (1980) in Abhängigkeit der Vorfeuchte des Bodens und des Niederschlagsereignisses (Niederschlagshöhe, -intensität und -dauer) aus, d. h. die Flächen sind jahreszeitlichen und witterungsspezifischen Schwankungen unterworfen. Während sich im Sommer die abflussbeitragende Fläche bis in die Tiefenlinie der Mulde zurückzieht oder komplett trocken fällt, kann sie sich im Frühjahr in Verbindung mit der Schneeschmelze auf große Flächen ausdehnen und entscheidend zum Hochwasserabfluss beitragen (Abb. 72). Die hier verwendeten Schwellenwerte wurden so gewählt, dass sie die unterschiedlich beitragenden Flächen nach einem Starkregenereignis widerspiegeln. Die modellierten potenziellen Abflussbahnen an den Hängen erfassen damit nicht die exakt berechneten beitragenden Flächen eines bestimmten Niederschlagsereignisses mit definierter Niederschlagsmenge und Gebietsvorfeuchte. Sie stellen lediglich die angenommene, reliefbedingte, maximale Ausdehnung der abflussbeitragenden Flächen bei einem Starkregenereignis dar und kennzeichnen die für den vorbeugenden Hochwasserschutz bedeutsamen Flächen. Die Differenzierung in unterschiedliche „Intensitätsstufen“ auf Grundlage der Einzugsgebietsgröße liegt daher eine vereinfachte Annahme zugrunde und geht von annähernd homogenem Bodenaufbau aus.

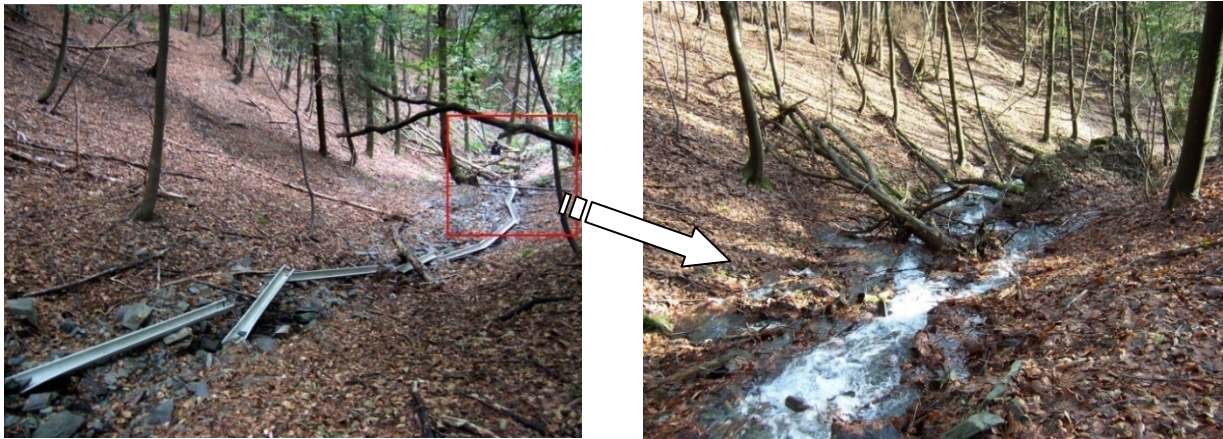


Abbildung 72: Quellschüttung eines Bachtälchens im Frühherbst (links) und das gleiche Tälchen wenige Tage später nach Durchzug eines Regengebietes

Die zugrunde gelegten Schwellenwerte, ab welcher Einzugsgebietsgröße ein Gerinne entsteht, sind von der Reliefausformung, den Bodeneigenschaften, den geologischen und den klimatischen Verhältnisse des Einzugsgebietes abhängig (MONTGOMERY & DIETRICH 1989, WILSON & GALLANT 2000). Weiterhin scheint auch die Landnutzung eine Rolle zu spielen (JAEGER 2007). All diese Faktoren werden bei der reliefbasierenden Ausweisung außer Acht gelassen. Der Ausweisung von Gerinnen auf alleiniger Basis der Größe des Oberflächeneinzugsgebietes stellt daher auch hier wieder eine vereinfachte Vorstellung des Systems voraus, das zu fehlerhaften Ausscheidungen führen kann. Es wird ein konstanter Schwellenwert benannt, der, unabhängig von der Hangneigung, die benötigte Mindestgröße der beitragenden Fläche benennt, ab dem ein Gerinne entsteht. Es ist das wohl häufigste angewandte Verfahren zur Ausweisung von Gerinnen in der Vergangenheit und aufgrund der vereinfachten Modellvorstellung stark diskutiert (vgl. MONTGOMERY & FOUFOULA-GEORGIU 1993, BISCHETTI et al. 1998). In den beiden Untersuchungsgebieten im Frankenwald führten die unterschiedlichen Hangneigungen auch zu Problemen bei der Ausweisung. Das Gebiet der Tschirner Ködel weist eine deutlich geringere mittlere Hangneigung auf. Beobachtungen vor Ort zeigten, dass dies gewöhnlich zu einer längeren unterirdischen Fließphase als im Röthengrund führt. Die Oberflächeneinzugsgebiete für das Entstehen eines Gerinnes sind dementsprechend größer. Problematisch sind demnach auch Gebiete mit stark wechselnden Reliefeigenschaften. So lässt sich zum Beispiel für den Bereich der Tschirner Ködel nur ein gemittelter Schwellenwert erstellen, der sowohl für die steilen Hänge am Gebietsausgang, als auch für das flache Quellgebiet gelten muss, obwohl sich das Wasser der Steilhängebereiche deutlich schneller konzentriert als am Oberlauf. Der ermittelte Schwellenwert für den Beginn eines Gerinnes bzw. für die unterirdischen Fließphasen stellt in beiden Gebieten daher einen Kompromiss aus den verschiedenen Hangneigungen dar. Dieses Problem erkannten DIETRICH et al. (1987) bereits Ende der 80iger Jahre. Sie stellen fest, dass die Größe der beitragenden Fläche oberhalb des Gerinneaustritts von der Hangneigung der Hangmulde abhängig ist. Je steiler der Hang, desto kleiner ist die beitragende

Fläche. DIETRICH und DUNNE (1993) entwickelten daraufhin einen hangneigungsabhängigen Algorithmus zur Ausweisung des Gerinnesystems. Die unterschiedlichen Methoden haben jedoch alle eins gemeinsam. Sie basieren allein auf dem Relief und können daher die Entstehungsgebiete der Gerinne nur näherungsweise bestimmen (MONTGOMERY & FOULLOU-GEORGIOU 1993). Allein schon die beobachtete starke Verschiebung des Quellaustritts im Jahresverlauf macht eine genauere Bestimmung auf Basis des Reliefs unmöglich. Während im Sommer der Quellaustritt in den Frankenwald-Nebentälern weit hangabwärts wandert oder völlig ausbleibt, tritt das Wasser im Winter nach ergiebigen Niederschlägen bereits nach einer kurzen unterirdischen Fließphase hangaufwärts wieder aus (Abb. 72). Die exakte Modellierung des Quellaustritts auf alleiniger Basis des Reliefs ohne Berücksichtigung des dynamischen Gebietszustandes und der Bodeneigenschaften ist daher nicht möglich. Für den Zweck einer Abflussprozesskarte ist die erzielte Genauigkeit jedoch vollkommen ausreichend. Andernfalls müssen die „dynamischen“ Austrittsstellen für das Gebiet nachträglich durch Geländebegänge in der Abflussprozesskarte angepasst werden.

Zur groben Anpassung der Parameter haben sich Luftbilder und geologische Karten bewährt. Oftmals verhindert jedoch das dichte Kronendach die Sicht auf Quellaustritte, sodass ein Vergleich vor Ort in vielen Fällen unumgänglich ist. Der verwendete Schwellenwert in dieser Arbeit für die Entstehung eines Gerinnes geht von einem feuchten Gebietszustand aus. Der Schwellenwert wurde im Röhthengrund auf 1600 Pixel (5 x 5 m Raster), dies entspricht einer Größe von 4 ha, und im etwas flacheren Einzugsgebiet der Tschirner Ködel auf 5 ha (2000 Pixel) festgelegt. Die verwendeten Werte liegen deutlich unter denen anderer Studien. So gibt FRIEDRICH (1996) einen Schwellenwert von 20 ha, ROEDER (2007) einen Wert von 25 ha und SCHOLTEN und BEHRENS (2004) sogar einen Schwellenwert von 160 ha an. Die im Verhältnis zu anderen Arbeiten sehr kleinen Werte verdeutlichen die kurze unterirdische Fließphase und die somit sehr rasche Abflusskonzentration im Frankenwald.

6.1.3 Berechnungsversuche

Im Folgenden werden die Berechnungsmethodik und der Versuchsaufbau kritisch betrachtet. Da es die ersten Berechnungsversuche im Frankenwald waren, bestanden nur Vermutungen, wie die Standorte auf die Starkregensimulationen reagieren würden. Berechnungsversuche, bei denen neben dem Oberflächenabfluss auch der Zwischenabfluss aufgefangen wurde, sind trotz der hohen Bedeutung für das Abflussgeschehen der Mittelgebirge bis heute nur wenige durchgeführt worden (KARL et al. 1985, SCHWARZ 1985). Weiterhin wurde das anspruchsvolle Ziel verfolgt, den Wald nicht als Ganzes zu betrachten, sondern die Wirkung der einzelnen Baumarten auf den Standort und damit auf das Wasserrückhaltevermögen. Nicht zuletzt soll dieser Abschnitt dazu dienen, die gemachten Erfahrungen für zukünftige Starkregensimulationen in dieser Region weiterzugeben.

6.1.3.1 Berechnungsmethodik und Versuchsaufbau

In der vorliegenden Untersuchung kam eine Großregenanlage (100 m²) nach der Methodik von KARL und TOLDRIAN (1973) zum Einsatz. Die gewählte Anlagengröße betrug 5 m in der Breite x 20 m in Falllinie. Die Anlagenform hat sich in vielen Versuchen im Alpenraum (BUNZA, 1978, 1989), im hessischen Mittelgebirge (KARL & PORZELT 1976, LEHNARDT 1985) und im rheinischen Tiefland (SCHWARZ 1985) bewährt und wurde für den Frankenwald übernommen. Zudem können damit ganze Baumgruppen beregnet werden und das System ist toleranter gegenüber kleinräumigen Heterogenitäten innerhalb des Bodens.

Der Nachteil einer so großen Beregnungsfläche liegt jedoch in einem nur schwer kalkulierbaren unterirdischen Fließweg des Wassers in Richtung Auffangvorrichtung, da sich die Lage der wasserstauenden Schicht im Untergrund anhand des Oberflächenreliefs nur annähernd bestimmen lässt. Störungszonen im Gestein, wie Klüfte und Spalten oder ein Abkippen des Anstehenden können ebenso dazu führen, dass die Fließwege nicht der Falllinie folgen und das abfließende Wasser an der Auffanganlage vorbei rinnt. So musste zum Beispiel die Parzelle 7 um mehrere Meter versetzt werden, da nach dem ersten Versuch ein Teil des Wassers knapp 3 m neben der Profilgrube aus dem Hang austrat. Die Gefahr, der so nicht registrierten Wassermenge, steigt mit zunehmender Entfernung zur Auffangvorrichtung unweigerlich an. Da dieser Wasserverlust außerhalb des ausgehobenen Bodenprofils häufig nicht sichtbar ist, führt dies zu Fehlinterpretationen hinsichtlich der Tiefensickerungsrate. Eine Verbreiterung der Profilgräben stellt auch keine zufriedenstellende Lösung dar, da nur der Abfluss bzw. die Wasserspeicherkapazität des tatsächlich beregneten Bodenvolumens interessiert und so der Flächenbezug nicht mehr gegeben ist.

SCHERRER (1997) versuchte das Problem zu lösen, indem er jeweils 1 m breite Puffer links und rechts an der Beregnungsfläche mit beregnete. Die Abflüsse wurden hingegen nur von der ursprünglichen Beregnungsfläche gemessen und der Niederschlagsinput entsprechend dem seitlichen Flächenzuwachs korrigiert. Inwiefern sich dieses Verfahren auf den Messfehler der hier verwendeten Methodik auswirken würde, ist nicht bekannt, da nicht alle Bereiche der Beregnungsfläche exakt die gleiche Menge an Niederschlag erhalten. Ein pauschaler Flächenabzug von der Beregnungsmenge scheint daher ebenso fehlerbehaftet. Klarheit, ob sich eine Beregnungsfläche eignete oder nicht, brachte im Frankenwald meist erst eine Beregnung mit anschließender Sichtung der Abflüsse mit sich.

Zur Erleichterung und zur höheren Genauigkeit der Messung des Zwischenabflusses werden als Konsequenz Anlagengrößen von 60 m² - 75 m² (z.B. 5 x 12 m oder 5 x 15 m) vorgeschlagen. Sie lassen sich besser handhaben und sind schneller umzusetzen, ohne den Vorteil einer flächigen Beregnung verwerfen zu müssen (vgl. SCHERRER 1997, WEILER 1997, MARKART et al. 2000). Auch die große Wassermenge, die benötigt wird, um zwei bis drei Beregnungsversuche an einem Tag zu simulieren (ca. 20000l), könnte durch eine kleinere Anlagengröße

reduziert werden. Unter 40 m² sollte die Anlagengröße für Beregnungen nicht fallen, um repräsentative Aufnahmen bei einer vertretbaren Anzahl von Versuchen zu erhalten (vgl. KAINZ et al. 1992). Um Erdbewegungen in vertretbarem Ausmaß zu halten, bieten sich Wegeanschnitte an, die darüber hinaus eine unkomplizierte Ausleitung des Wassers in die Auffangbehälter ermöglichen. Profilgruben im Hang sind weniger geeignet, da sich diese schnell mit Wasser füllen und aufwendig abgepumpt und gemessen werden müssen.

Neben der Beregnungsgröße spielt die Dauer und die Niederschlagsintensität eine Rolle. Der „Waldeffekt“ auf die Wasserrückhaltefunktion ist auf Zeiten beschränkt, in denen die Böden nicht wassergesättigt sind (SCHÜLER 2005). Der größte Einfluss sollte deshalb während der Vegetationsperiode im Sommer auf konvektive Gewitterniederschläge zu erwarten sein. Der gesamte Beregnungsablauf und die Intensität wurden daher auf ein seltenes, aber durchaus realistisches Starkregenszenario abgestellt.

Die Entscheidung, einzelne Gewitterniederschläge von 50 mm zu simulieren, bedeutet jedoch starre Beregnungszeiten (1 Stunde), die unabhängig von der Reaktion des Standortes fortgeführt oder beendet wurden. Dieser Ansatz unterscheidet sich von der allgemein verwendeten Methodik und erschwert dadurch den Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur. Allgemein üblich wird einmal beregnet und zwar so lange, bis sich über längere Zeit eine konstant abfließende Wassermenge einstellt. Die in diesem Versuch gewählte Niederschlagssimulation hat den Nachteil, dass die einsetzenden Abflüsse vielfach unterbrochen werden. Damit kann zwar aus den Ergebnissen geschlussfolgert werden, dass die eine oder andere Bestockung 50 mm Niederschlag speichert oder eben bereits mit Abfluss reagiert, nicht aber, wie lange sich der Abfluss, zum Beispiel wie in dieser Untersuchung, unter den Buchen(misch)beständen im Bezug zur Fichte noch hätte länger hinauszögern lassen können. Die zweite Beregnung erfolgte bereits auf annähernd wassergesättigtem Boden. Da mit zunehmender Bodenwassermenge der Einfluss des Waldes deutlich geringer wird (FREHNER et al. 2005), schieben sich die Unterschiede zwischen den Beständen immer weiter zusammen, bis sie schließlich nichtig werden. Ein Vergleich der Elastizität zwischen den Beständen, hinsichtlich der Verzögerung des Abflusses und des Wasserrückhaltes, wird dadurch verkompliziert.

Der gleiche Effekt entsteht durch die Vorberegnungen. Während der Aufsättigung der Profile konnte die gleiche Rangfolge in der Wasserrückhaltekapazität ermittelt werden, nur waren die Unterschiede zwischen den Nadel- und Laubhölzern deutlich größer. Vorberegnungen sind jedoch nicht zu vernachlässigen, da witterungs- und transpirationsbedingte Unterschiede in der Bodenfeuchte zwischen der ersten und letzten Beregnung zu vermeiden sind. Die Verdunstungsrate innerhalb einer Woche kann in Abhängigkeit zum Wassergehalt des Bodens und zur Witterung über 30 mm/m² betragen (siehe Kap. 2.9) und würde die Vergleichbarkeit der Versuche, die mehrere Wochen auseinanderliegen, stark beeinflussen.

6.1.3.2 Auffangvorrichtung

Das Auffangen des abfließenden Wassers geschieht üblicherweise über eingeschlagene Spatenbleche, die in einen Blechtrichter münden oder über eingeschlitzte Folien. Beide Ansätze stellten sich für den Frankenwald als unbrauchbar heraus. Bei dem Versuch, die Edelstahlbleche in die grusigen Hangschutte zu schlagen, fiel das lockere Bodensubstrat sofort aus der Profilwand heraus. Ebenso scheiterten die Versuche, Bodenschlitze anzulegen. In den zum Teil betonharten und skelettreichen Basislagen, auf denen sich ein Großteil des abfließenden Wassers konzentriert, konnten ebenfalls keine Bleche eingeschlagen werden. Daraufhin wurde eine neue Methode entwickelt. Mit Hilfe von Breitkopfnägeln wurde zunächst eine reißfeste, elastische Folie an der Basis des Auffangprofils fixiert. Anschließend wurde mit Hilfe eines Druckluftkompressors und einer Sprühpistole heißes Paraffin auf die Profilwand gesprüht und so die Folie mit dem Erdreich/Ausgangsgestein verbunden. Über Dachrinnen wurde das Wasser von der Folie aus der Profilgrube in einen Messbehälter geleitet und registriert.

Das austretende Wasser konnte ohne größere sichtbare Verluste in die Behälter abgeleitet werden. Künstlich geschaffene Fließwege, die zum Beispiel durch das Einschlagen von Blechen entstehen können, wurden mit der Klebetechnik umgangen. Größere Risse in der Folie durch herabfallendes Bodensubstrat blieben aus. Einige Schwächen zeigte das Verfahren auf glatten Schieferflächen, da das aushärtende Paraffin nicht haften blieb. Die auftretenden Spalten wurden mit schnell aushärtendem Zement verschlossen, sodass auch hier eine feste Verbindung mit der Profilwand vorlag. Ein generelles Problem sind verstopfte Regenrinnen, die durch herabfallendes Bodensubstrat auftreten können. Eine ständige Betreuung der Auffangvorrichtung ist daher unumgänglich. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich die Methodik im Frankenwald bewährt hat und eine zuverlässige Auffangvorrichtung darstellte.

6.2 Ergebnisdiskussion

6.2.1 Eignung der forstlich-bodenkundlichen Grundlagendaten

Der Boden beeinflusst durch seine Eigenschaften, wie Mächtigkeit, Skelettgehalt, Lagerungsdichte, Bodenart, Horizontierung und Hydromorphie, die Wasserspeicherkapazität und prägt damit in entscheidendem Maße das hydrologische Geschehen (LÖHMANNSRÖBEN 2001). Die oft zitierte Waldwirkung auf den Hochwasserschutz ist daher in erster Linie von den gegebenen Bodeneigenschaften abhängig. Je nachdem, wie die Bodeneigenschaften (Porenvolumen) durch die Bestockung verändert werden können, ergibt sich ein beeinflussbarer, landnutzungsspezifischer Effekt.

Nach heutigem Kenntnisstand sind die Böden im Mittelgebirgsraum nicht unmittelbar aus dem anstehenden Gestein entstanden, sondern das Ergebnis von periglazialen Umlagerungsvorgängen (SEMMELE 2005). Durch die Umlagerung von Bodenmaterial während der letzten Eiszeiten können in zuflussbegünstigten Hangformen zum Teil mächtige und wasserstauende Fließerdenschichten ausgebildet sein. Die im Untergrund sehr dicht gelagerten und skelettreichen Böden beeinflussen nicht nur die Wurzelbildung der Bäume (STAHR 1979, HEINRICH 1991), sie wirken sich auch auf die Hochwasserentstehung aus (SCHOLTEN 2003). Allein durch diese Faktorenkonstellation sollten sie im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes eine besondere Aufmerksamkeit erfahren.

Im Bereich der Wasserhaushaltsmodellierung sind Überlegungen zur Ausweisung hydrologischer Homogenitätsbereiche nicht neu. In der Vergangenheit wurden dazu bereits einige Entscheidungsbäume entwickelt. Grundlage dieser Klassifikationsschemas sind vorliegende Bodeninformationsträger, die einen Überblick über die bodenkundliche Situation und über die wichtigsten bodenphysikalischen Eigenschaften der vorkommenden Böden geben. Da sich oftmals der hochwasserwirksame Abfluss unterhalb der Geländeoberfläche konzentriert, werden an die Kartierungen hohe Anforderungen gestellt, da verschiedene bodenphysikalische Kennwerte der oberflächennahen Deckschichten, aber auch Informationen des Untergrundes, benötigt werden. Häufig enthalten die Kartenwerke nicht die nötige Informationsfülle und Detailgenauigkeit, um abflusssensitive Bereiche flächenscharf abzugrenzen.

Nach LÖHMANNSRÖBEN (2001), SCHMOCKER-FACKEL (2004) und SCHERRER (2006) sollten die verwendeten bodenkundlichen Datenträger einen Kartiermaßstab von mindestens 1:25.000 aufweisen, um überhaupt räumlich differenzierte Aussagen hinsichtlich hydrologischer Fragestellungen zu erlauben. Diese Vorgabe wird insbesondere für das Untersuchungsgebiet in Thüringen nicht erfüllt. Auch entsprechen viele der vorliegenden Kartenwerke nicht mehr dem heutigen Stand des bodenkundlichen Wissens. So ist die Ende des 19. Jahrhunderts erstellte geologische Karte (1:25.000) im thüringischen Untersuchungsgebiet ungeeignet für die Herleitung von hochwassersensitiven Bereichen. Sie zeigt weder Unterschiede hinsichtlich des

geologischen Ausgangsmaterials auf, noch enthält sie Angaben zum Periglazial. Für eine Interpretation, der sich aus dem Ausgangsgestein entwickelnden Böden und Bodeneigenschaften, z. B. für die Erstellung einer abgeleiteten Konzeptbodenkarte, stellt sie eine völlig unzureichende Beurteilungsgrundlage dar.

So besteht die auf Grundlage verschiedener Kartenwerke konzipierte Konzeptbodenkarte aus den Jahren 1969 - 1974 im Maßstab 1:100.000 aus großflächigen Bodeneinheiten, die für eine Detaillklassifizierung zu stark generalisiert sind. Als ein weiteres Problem stellen sich die meist stark nutzerorientierten Geländeaufnahmen heraus. Die vor Ort erhobenen Informationen werden auf ein bestimmtes Ziel hin verallgemeinert und sind nur beschränkt für hydrologische Fragestellungen interpretierbar. Zum Beispiel enthält die von SCHMOCKER-FACKEL (2004) verwendete, hoch aufgelöste Bodenkarte im Maßstab 1:5.000 aus der Schweiz keine Informationen zur Makroporosität, zu stauenden Schichten und auch keine Angaben zu bevorzugten lateralen Fließwegen innerhalb des Bodens, die nach Meinung der Autorin zur Beurteilung der Hochwassersensitivität von Belang wären.

Erst die geologische Kartierung für das bayerische Untersuchungsgebiet (1:25.000) aus den Jahren 1970 - 1976 weist zum ersten Mal ausdrücklich auf solifluidal verdichtete und wasserstauende Böden hin, die auf den flachen Hängen der Hochflächen und in den Wannentälern „in beträchtlichen Ausmaß“ (HORSTIG 1979) ihre Verbreitung finden. Der damalige Kartierer HORSTIG (1979) schreibt dazu: „Ihre Kartierung begegnet erheblichen Schwierigkeiten. ... Eine genaue Kartierung des Pleistozäns wäre nur durch einen umfangreichen Einsatz von Flachbohrungen möglich gewesen“. Folglich bleibt auch die Kartierung der im Untergrund wasserstauenden Fließerden auf wenige Standorte im Untersuchungsgebiet beschränkt.

Bei der Erstellung der neuen bayerischen Konzeptbodenkarte (KBK, 1:25.000) für den Frankenwald wurde durch zusätzliche Bohrstockeinschläge (GEOTEAM 2002) besonderes Augenmerk auf genau diese, häufig pseudovergleyten Standorte mit Sperrschicht im Untergrund gelegt. So finden sich einige neu erfasste Braunerde-Pseudogleye in Muldenlagen und an Unterhängen wieder. Solifluidal verdichtete Standorte sind daher deutlich häufiger vertreten als noch in der älteren geologischen Kartierung. Die in der bayerischen forstlichen Standortskartierung (Staatswaldflächen) ausgewiesenen Zweischichtböden, ohne oberflächennahe Verässsungsanzeichen (grundfeuchte/grundfrische Standorte), wurden in die KBK hingegen nicht integriert.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Ausweisung der Hangschuttböden. Die reliefbezogene Kartierung von Hangschuttböden stellt eine einfache und sinnvolle Methode dar, die steilen Hangbereiche im Frankenwald auszuscheiden. Da sich die Böden bodengenetisch nur wenig unterscheiden, erübrigt sich eine aufwendige und kostenintensive Analyse. Hangschuttböden (meist Regosol-Braunerden, Braunerde-Regosole, Braunerden) entstehen, wenn die Schwerkraft gegenüber der geregelten Solifluktion überwiegt und eine ständige Zu- sowie Abführung

von Bodenmaterial stattfindet. Sie sind gekennzeichnet durch locker gelagertes und grobporenreiches Bodenmaterial mit einer ausgeprägten vertikalen Wasserleitfähigkeit. Die Hangneigung, die dabei nötig ist, ist vom Scherwiderstand des Ausgangssubstrates abhängig. TILCH et al. (2002) verwendeten für die Regionalisierung von periglazialen Hangschuttböden im Südschwarzwald einen Grenzwinkel von 27° . In der Konzeptbodenkarte aus dem Frankenwald wurden hingegen Hangschuttböden bereits ab einer Neigung von 20° ausgewiesen. An den für die Beregnungsversuche ausgehobenen Bodengruben konnte festgestellt werden, dass auch an wesentlich steileren Hangabschnitten, besonders an Unterhängen und Mulden, ältere, wasserstauende Fließerden unter dem Hangschutt vorkommen können. Es ist zu überlegen, ob eine Erhöhung des Grenzwinkels, die zur Ausweisung von Hangschuttböden führt, sich nicht positiv auf die Genauigkeit der ausgewiesenen Bodeneinheiten auswirken kann. Es ist zu vermuten, dass der Grenzwinkel wohl auch aus verfahrenstechnischen Gründen bei 20° festgelegt wurde, da es bereits ab 20° Hangneigung schwierig wird, Bodenproben mit dem Bohrstock zu ziehen. In sehr steilen Einzugsgebieten kann allerdings diese Kartiereinheit schnell die Hälfte der untersuchten Fläche einnehmen, ohne dass eine substratspezifische Untersuchung erfolgt. Auch ein Vergleich der Flächenausdehnung der Steilhangbereiche ($HN > 20^\circ$) aus der Konzeptbodenkarte mit einer erstellten Neigungskarte aus dem Geländemodell zeigt eine, vermutlich maßstabsbedingt, sehr großzügige Auslegung des Bodenkomplexes der Hangschuttdecken mit einem Flächenplus von über 37 % gegenüber der Neigungskarte. Eine bessere Abgrenzung der Hangschuttböden wäre hier wünschenswert, da diese für die hydrologische Raumgliederung und somit für den vorbeugenden Hochwasserschutz von Bedeutung wären.

Die forstliche Standortkartierung stellt in beiden Ländern die beste bodenkundliche Grundlage zur Beurteilung hochwassersensitiver Standorte dar. Doch treten Unterschiede zwischen beiden Ländern auf. Die Eigenständigkeit der Bundesländer und die innerdeutsche Trennung führten zur Entwicklung diverser Kartierverfahren (WOLFF et al. 1998), die sich in den Ergebnissen und der Genauigkeit der Kartierungen widerspiegeln. Durch den frühen Beginn der forstlichen Standortserkundung (1961-1963) in den neuen Ländern kommt diesen auf dem Gebiet der Standortserkundung zwar eine Vorreiterrolle zu, zum Teil sind die Kartierungen jedoch überholt und müssen an den bodenkundlichen Kenntnisstand der Gegenwart angepasst werden. Wie sich der Informationsgehalt der Standortskarten und ihre Eignung als hydrologisches Klassifikationsinstrument zusammensetzt, wird im Folgenden anhand des Kartierablaufs im Gelände und den festgelegten Kartierkriterien kurz beschrieben.

Um einen ersten standörtlichen Überblick bei der Kartierung zu erhalten, wurden in Thüringen Bodengruben für die in einer Region typischen Böden angelegt. Wie viele Gruben dazu nötig waren, oblag dem zuständigen Kartierer. Generell lässt sich sagen, dass im Bergland im Vergleich zum Tiefland weit weniger Gruben angelegt wurden, da dem Klima in den oberen Lagen

eine sehr viel größere Bedeutung als Standortfaktor beigemessen wurde als dem Boden (KOPP 1958). In dem 11 km² großen Einzugsgebiet der Röthen sind vermutlich aus diesem Grund nur drei Bodengruben in den ehemaligen Arbeitskarten verzeichnet.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden anhand von sogenannten Tastgruben¹⁹ unter Berücksichtigung des Reliefs und der Vegetation die Standortsgrenzen auskartiert. Da Tastgruben mit Hilfe eines Handspatens angelegt wurden, kann hier nur von einer oberflächennahen Erkundung gesprochen werden. Bohrstöcke wurden in der Regel im Mittelgebirgsraum nicht verwendet. Laut den Kartierkriterien beschränkt sich die Tiefenerkundung auf rund 60 cm unter der Geländeoberfläche. Durch die verhältnismäßig flache Erkundung und den bodengenetisch sehr einheitlichen Deckschichten im Frankenwald ist die Standortskarte im Röthengrund hinsichtlich der vorkommenden Bodentypen recht homogen. Bis auf kleine Bereiche der Aue kommen ausschließlich terrestrische Standorte ohne Anzeichen auf Staunässe im Unterboden vor. Halbhudromorphe Böden (Vernässungsmerkmale laut Kartieranweisung zwischen 30 - 60 cm) sind nicht verzeichnet, was nicht verwundert, wenn man sich den typischen Schichtaufbau des Frankenwaldes vergegenwärtigt. Demnach lagern über den wasserstauend/-führend wirkenden, dichteren Lagen steinig-grusige Hauptlagen mit Mächtigkeiten zwischen 40 - 70 cm (KLEBER 1991), zusätzlich können noch Mittellagen zwischengeschaltet sein. Der lockere Frostschutt an den Hängen ist meist noch mächtiger. Rostfarbene bis schwarze Eisen- und Mangan(hydr)oxid-Konkretionen beschränken sich aufgrund der gut drainierten, lockeren Hauptlagen meist nur auf einen schmalen Bereich des Grundwasserleiters im tieferen Unterboden, während die darüber liegenden Schichten nicht hydromorph überprägt sind. Der stau- oder grundwasserbeeinflusste Bereich liegt daher häufig tiefer als 60 cm unter Flur. Pseudovergleyte Braunerden, Pseudogley-Braunerden oder Hanggley-Braunerden werden aufgrund der geringen Kartiertiefe daher häufig nicht erfasst.

Die Standortskartierung in Bayern geht einen etwas anderen Weg. Hier wurden die Standorte mit dem Pürckhauer-Bohrstock im 50 x 50 m Raster bis in Tiefen von 70 - 90 cm erkundet (ZUCKER 1996). Als im Unterboden verdichtete Standorte werden diejenigen Böden verstanden, die ab einer Tiefe von 60 cm dichtes Bodensubstrat aufweisen. Die in den 80iger Jahren durchgeführte Kartierung im Staatswald weist auf den Hochflächen des Blattgebietes noch in erheblichem Umfang Standorte mit dichteren Unterböden aus (sog. Lehmkipper = Umlagerungsböden). Die Ansprache des Wasserhaushaltes erfolgte anhand der Ausprägung von Hydromorphiemerkmalen im Unterboden. Für die hydrologische Auswertung erhält man damit eine zuverlässige Aussage über die Dauer der Vernässung. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Zwischenabflussaktivität des Standortes und ist für die Ausweisung hochwassersensitiver Standorte sehr gut geeignet.

¹⁹ mit Hacke und Handspaten gegrabene Erkundungsgruben

Als generelle Prüfgröße des Geländewasserhaushaltes dient die Zeitspanne, die aussagt, wie lange Bäume ohne Niederschläge nach vollständiger Aufsättigung des Bodens voll transpirieren können. Dieser Wert berechnet sich über die geschätzte nutzbare Wasserspeicherkapazität des Bodens, bei einer unterstellten Transpiration von 3 mm am Tag. Nachteilig wirkt sich das starre 3-ziffrige Verfahren aus. Neben dem Informationsverlust, der durch die Verschlüsselung entsteht, ist es zum Beispiel nicht möglich, den Wasserhaushalt von Zweischichtböden separat zu beurteilen, da er in Abhängigkeit des Standortes auf grundfeuchten Standorten stark variieren kann.

Die rein reliefbedingte Ausweisung der Feuchtestufen der terrestrischen Standorte der thüringischen Kartierung stellt sich im Vergleich zum bayerischen Verfahren als klarer Nachteil heraus. Zwar sammelt sich abfließendes Wasser in zuflussbegünstigten Hangformen, allerdings führt die Abkopplung des Substrates zu missverständlichen Annahmen im Wasserhaushalt der lockeren Hangschutte. So wertet die Standortkarte an Unterhängen und konkav geformten Muldenstandorten den Wasserhaushalt mit „frisch“ bis „sehr frisch“ ein. Die häufig vorkommenden stark, z.T. extrem grusreichen Hangschutte (Regosol-Braunerden etc.) unterliegen einer starken Austrocknungstendenz und können nur wenig Wasser halten. Wasserreserven sind daher häufig nur im aufgesetzten Grundwasserleiter in der Tiefe verfügbar, die, wenn überhaupt, nur durch tief wurzelnde Baumarten genutzt werden können. Abflusssensitive Flächen sind zwar in den frischen Talstandorten und Muldenlagen zu erwarten, aus dem Beschrieb jedoch nicht zu erkennen. Inwiefern die extrem grusreichen Böden im Untersuchungsgebiet flächig vorkommen, entzieht sich der Beurteilung. Die Kartierung dieses Substrats stellt den Erkunder vor erhebliche Schwierigkeiten, da dem Schutt das nötige Bindemittel fehlt und sofort wieder aus dem Bohrstock herausfällt. Eine Probennahme mit dem Bohrstock ist daher so gut wie nicht möglich. Eine Ansprache des Wasserhaushalts ist dann nur für die gut drainierten oberen Bodenschichten möglich. Aussagen zu lateralen Fließvorgängen im tieferen Unterboden entfallen.

Die für die Beregnungsversuche ausgehobenen neun Bodengruben auf thüringischer Seite hatten jedoch alle Skelettgehalte von durchschnittlich über 70 Vol%, mit wechselnden Anteilen von Grobskelett und Schieferscherben. Ein generelles Problem scheint auch die systematische Unterschätzung des Skelettgehaltes durch die Bohrstockkartierung zu sein. Auch grobskeletthaltige und blockschuttreiche Böden sind häufig nur durch die Eindringeeigenschaften des Bohrstocks zu erkennen. In diesem Zusammenhang fallen die relativ einheitlichen Bodenkennwerte innerhalb der Lokalbodenformen auf. In der Karte weisen die Standortseinheiten auf der gesamten Untersuchungsfläche mäßig steinige bis grusige, mittelgründige Böden aus. Vermutlich besitzen die hinter den Lokalbodenformen hinterlegten Parameter eine große Spannbreite, sodass sie in der Folge einen großen Spielraum für hydrologische Interpretatio-

nen zulassen. Ganz allgemein dürfte der Skelettgehalt im Untersuchungsgebiet, vor allem an steilen Hangschutthängen, unterschätzt worden sein.

Unabhängig von dem jeweiligen Kartierverfahren stellt die Abgrenzung von geschichteten und ungeschichteten Solifluktionböden in beiden Ländern hohe Anforderungen an den Standortskartierer. Das bestätigen eigene Untersuchungen. Durch die schwierige Ansprache der Vertikaldifferenzierung der einzelnen Lagen im Bohrstock und der begrenzten Tiefenerschließung von einem Meter werden solifluidal verdichtete Böden (Fließerden) häufig nicht vollständig erfasst. Dringt man bis zum dichter gelagerten Untergrund vor, ist die Unterscheidung, ob es sich um eine verdichtete Fließerde oder um die Zersatz- und Zerfallszone des Ausgangsmaterials handelt (gleiche Bodenfarbe und Bodenart), oft schwierig. Von den dichteren Lagen bleibt oftmals nicht genügend Bodenmaterial im Bohrstock hängen, um die Bodeneigenschaften des tieferen Unterbodens anzusprechen. So ist die korrekte Bestimmung des Wasserhaushaltes anhand von Hydromorphie Merkmalen in der Bohrstockprobe anspruchsvoll und benötigt viel Erfahrung. Durch das nur temporär auftretende Hangwasser zeichnen die Unterböden schlecht, sodass häufig nur wenige Konkretionen oder schwache Rostfleckung der (pseudo-) vergleyten Braunerden im Bohrstock zu finden sind. Nur in Ausnahmefällen ist freies Wasser („Klopfwasser“) direkt im Bohrstock erkennbar, obwohl im Untergrund nachweislich Wasser fließt.

Durch die horizontale Ausdehnung der abflussbeitragenden Flächen in Abhängigkeit zur Witterung gehen die Grenzen der terrestrischen und semiterrestrischen Böden fließend ineinander über. Vielerorts sind daher mehrere Bohrstockeinschläge nötig, um die Standortseinheiten exakt abzugrenzen. Dies macht die Aufnahme aufwendig und teuer.

Da die Böden in den Verbraunungshorizonten gut drainiert sind, ist eine Ansprache grundfeuchter/-frischer Böden über die Bodenvegetation („Feuchtezeiger“) häufig nicht möglich. Als Hilfsmittel zur Einschätzung des Wasserhaushaltes im Unterboden bleiben häufig nur das Relief und die Wuchsleistungen des aufstockenden Bestandes. Auch SAUER (2002) kommt im Rheinischen Schiefergebirge auf das gleiche Ergebnis. So wird auch dort die Verbreitung und Mächtigkeit der periglazialen Lagen durch die Bohrstockkartierung nicht exakt erfasst und daher die Böden häufig falsch eingeschätzt. Die Verwendung eines Georadars, das durch die Aussendung und Aufnahme reflektierter elektromagnetischer Wellen Schichtgrenzen und Blöcke im Boden erkennbar macht, kann zu einer Verbesserung der Ausweisung führen (SAUER 2002). Allerdings ist bei diesem Verfahren nicht immer klar, ob es sich bei der dargestellten Schichtgrenze um die Untergrenze der Basislage, Mittellage oder gar dem Festgestein handelt. Auch Basislagen, die aus aufgelockertem groben Frostschtutt bestehen, können nicht von der Zersatzzone des Anstehenden abgegrenzt werden (SAUER 2002). Ob sich der Aufwand einer solchen Messung im Frankenwald lohnt, ist daher fraglich. Die schlechte Nachweisbarkeit führte schließlich dazu, dass Anfang der 90iger Jahre in Bayern die

Lehmkipperstandorte aus der Kartierlegende herausfielen. Sie spielen auf der Standortkarte des Privat-/Körperschaftswaldes (53 km²) der Waldbauernvereinigung „*Frankenwald*“ daher keine Rolle mehr. Zu dieser Entscheidung mag auch die nutzerspezifische Ausrichtung der Standortkarte beigetragen haben. Die Eigenschaften der lockeren Hauptlagen sind für den Wasser- und Nährstoffhaushalt des Standortes und somit für das Wachstum der Bestockung entscheidend (STAHR 1979). Sie spielen als Hauptwurzelraum für die Standortkartierung daher eine sehr viel bedeutendere Rolle als dichte Fließerschichten im Untergrund. Neben der Bedeutung für die Hochwasserentstehung darf jedoch auch nicht vergessen werden, dass Zweischichtböden den Wasser- und Lufthaushalt im Untergrund und somit die mechanische und physiologische Durchwurzelbarkeit der Bestände beeinflussen (HEINRICH 1991). Tiefwurzelnde Baumarten dürften den Boden hier deutlich besser erschließen als die flach wurzelnde Fichte (vgl. STAHR 1979) und sich stabilisierend auf das gesamte Bestandesgefüge auswirken. Nicht zuletzt fordern die Waldgesetze, den Wald so zu gestalten, dass er die Schutz-, Nutz- und Erholungsfunktionen bestmöglich und nachhaltig erfüllt (vgl. § 1 Abs. 1 Bundeswaldgesetz, Art. 5 und Art. 18 Abs. 1 BayWaldG, § 1 Satz 5 und § 1 Abs. 1 Satz 2 ThürWaldG).

Standorte mit potenziellem Sättigungsflächenabfluss sind aus der Standortkarte generell besser ableitbar. Die Bereiche zeichnen sich meist durch Vernässungsmerkmale im Oberboden und eine geänderte Bodenvegetation aus. Dies erleichtert dem Kartierer die Aufnahme vor Ort. Doch auch hier gibt es Probleme. Viele wasserbeeinflusste Standorte der bayerischen Kartierung liegen innerhalb der „klima- und lagebedingten“ Standorte. Das sind Standorte, auf denen das reliefabhängige Mikroklima (Spätfroste etc.) das Pflanzenwachstum bestimmt. Die Bereiche werden allein über das Relief angesprochen, ohne dass eine substratspezifische Begutachtung erfolgt. So kommen in den „frostgefährdeten Talgründen“ der Tschirner Ködel von frischen Braunerden bis hin zu permanent wassergesättigten Bodentypen (Anmoore) alle Feuchtestufen vor. Eine genaue Einschätzung der Abflussintensität dieser Standortseinheit ist aufgrund der breiten Spanne der möglichen Wasserspeicherpotenziale nur durch zusätzliche Informationen aus der Bodenschätzungskarte und durch Luftbilder möglich. Bestockte Flächen müssen nötigenfalls durch zusätzliche Begänge vor Ort hinsichtlich ihres Reaktionspotenzials beurteilt werden.

Die permanent wasserbeeinflussten Böden der Talauen stehen in enger hydraulischer Verbindung zum Gerinnenetz und sind durch eine veränderte Baumartenzusammensetzung nur wenig beeinflussbar (Abb. 73). Durch den ständigen Wassernachschub der Hänge nach einem Starkregenereignis ist der Porenraum schnell gefüllt. Der Bodenschutz, der durch eine standortgerechte Bestockung optimal gewährleistet wird, spielt in den Auen eine sehr viel bedeutendere Rolle als eine geringe Erhöhung des Porenraumes. Der vorbeugende Hochwasserschutz muss daher darauf abzielen, so viel Wasser wie möglich bereits an den Hängen zurückzuhalten (Abb. 73).

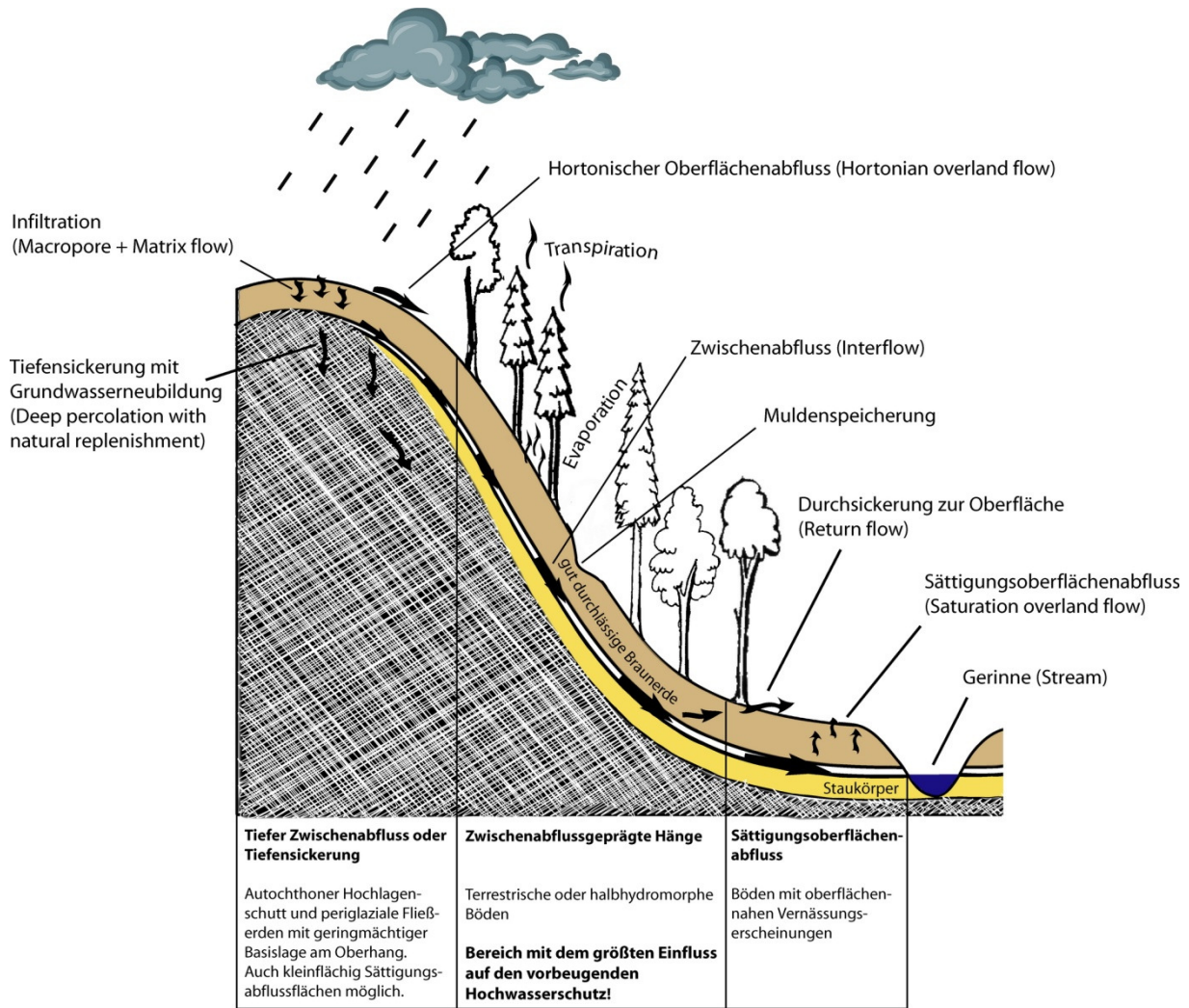


Abbildung 73: Vereinfachte Darstellung der Abflussprozesse am Hang und deren Bedeutung für den vorbeugenden Hochwasserschutz (NORDMANN et al. 2009a, verändert)

Dazu ist es notwendig, das Abflussgeschehen so genau wie möglich zu bestimmen, um eine zielgerichtete Veränderung der Baumartenzusammensetzung auf abflussintensiven Flächen planen und einleiten zu können. Um dies zukünftig besser gewährleisten zu können, werden folgende Hinweise und Empfehlungen gegeben:

- 1) Für die Beurteilung des Abflussgeschehens sind Informationen zu allen am Abflussprozess beteiligten Schichten notwendig. In vielen Fällen müssen die Standorte daher tiefgründiger (am besten bis zum anstehenden Grundgestein) und in einem größeren Maßstab kartiert werden. Die auf wenigen Leitprofilen basierenden Regionalisierungen der bayerischen und thüringischen Konzeptbodenkarte sollten anhand von zusätzlichen Bodengruben verdichtet werden.
- 2) Generell wäre ein dichteres Netz an Bodengruben, an denen die Mächtigkeit aller Lagen bis zum Anstehenden beurteilt werden könnte, notwendig.

- 3) Längere Bohrstöcke können bei der Kartierung helfen, die Schuttlagen zu durchdringen, um stichhaltigere Aussagen zum Unterboden treffen zu können. Für (körperlich) vertretbar werden Bohrstocklängen von 120 - 150 mm angesehen.
- 4) Das Relief muss, immer unter Berücksichtigung des Substrates, für die Beurteilung des Wasserhaushaltes stärker einbezogen werden. Hilfreich sind hier einfache Abflusssimulationen, die den Kartierer bereits vor Ort auf Standorte mit erhöhtem Bodenwassergehalt/Abflusspotenzial hinweisen. Sie könnten ohne großen Aufwand für die betreffenden Gebiete berechnet werden.
- 5) Die Hänge sollten so gut wie möglich in Form von Hangcatenen beprobt werden. Hangwasseraustritte im Unterhangbereich zeugen von darüber liegenden Standorten mit Zwischenabfluss, auch wenn Vernässungsmerkmale häufig im Bohrstock und an der Bodenvegetation nicht nachweisbar sind.
- 6) Das Wissen zur Verbreitungssystematik periglaziärer Fließerden und der daraus ableitbaren Bodeneigenschaften (Wasserspeicherkapazität, Gründigkeit, Staunäsebildung, Abflussgeschehen) sollte in der Praxis besser umgesetzt werden (vgl. dazu STAHR 1979, FARRENKOPF-HILDEBRANDT 1996, PFEIFFER 2002, SAUER 2002, SCHOLTEN 2003, CHIFFLARD 2006).
- 7) Für das thüringische Gebiet wäre eine neue geologische Kartierung, als wichtige Grundlage vieler abgeleiteter Bodenwerke, besonders wünschenswert.
- 8) Eine von der Höhenform unabhängige Kennzeichnung von halbhydromorphen Standorten für Thüringen ist zu empfehlen.

6.2.2 Abflussprozesskarte

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Expertensystem entwickelt, das allen Waldflächen flächenscharf eine Abflussintensität zuweist und dennoch ein Mindestmaß an Praxisnähe beibehält. Dazu wurden die verfügbaren boden- und standortkundlichen Informationen mit Ableitungen zur Geomorphologie ergänzt und zu einem konkreten Abflussprozess verdichtet. Da primäre Ableitungen, wie z.B. Hangneigungsklassen, die oftmals als Regler für die Abflussbildung und Wasserabzugsgeschwindigkeit angesehen werden, nicht die geforderte Präzision erfüllen können, wurden komplexe Reliefparameter (Fließakkumulation) zur Bestimmung des Abflusspotenzials in das Expertensystem integriert. Das verwendete Abflussmodell ist ein Bestandteil gängiger Geoinformationssysteme und deren Erweiterungen. Erfahrene Nutzer können innerhalb von wenigen Minuten ganze Einzugsgebiete analysieren. Die mit den Informationen aus den forstlichen Standortskarten erzeugte Abflussprozesskarte stellt eine Hilfe für forstliche Entscheidungsträger dar. Sie gibt Hinweise, auf welchen Standorten über die Baumartenwahl ein wirksamer Beitrag zum Hochwasserschutz geleistet werden kann. Im Zuge der Forsteinrichtung können die verschiedenen Bestände unter Zuhilfenahme der Abflussprozesskarte und der forstlichen Standortskarte zielgerichtet beurteilt und eingerichtet werden.

Der zentrale Punkt dieser Klassifizierung ist die Ermittlung der abflusssensitiven Flächen im Wassereinzugsgebiet. Wie hoch deren Flächenprozent, gemessen an der Gesamtgröße des Einzugsgebiets, werden kann, lässt sich nur schwer abschätzen. Auch oder gerade weil sich die Gebiete in ihrer Abflusscharakteristik unterscheiden und die abflussbeitragenden Flächen in Abhängigkeit zur Niederschlagsmenge variieren, gibt es viele unterschiedliche Angaben in der Literatur. Erachtet man die Abflussprozesse SSF 1, SSF 2⁺, SSF 2, SOF 1, SOF 2 und DSSF⁺ als hochwassersensitiv, so sind im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel rund 35 % der Fläche schnell hochwasserbeitragend, während es im Röthengrund rund 24 % sind. Bezieht man die über 26° steilen Hänge des Röthengrundes mit in die Betrachtung ein, erhöht sich der Wert auf 43 %. Insgesamt dominiert der Zwischenabfluss auf über 90 % der abflusssensitiven Flächen.

CHORLEY (1978) geht davon aus, dass maximal 4 % - 5 % der Fläche innerhalb eines Waldgebietes an der Abflussbildung beteiligt sind. Nach DUNNE und BLACK (1970b) dürfte insgesamt nur ein kleiner Teil des gesamten Wassereinzugsgebietes zur Hochwasserwelle beitragen, der sich jedoch mit zunehmender Dauer des Niederschlagsereignisses oder im Frühjahr zur Schneeschmelze deutlich ausdehnen kann. Die Abflussspitzen wurden hier hauptsächlich von oberflächigen Abflusskomponenten geprägt. HARR (1977) hingegen ermittelte in seinen Untersuchungen einen abflusswirksamen Anteil von über 38 % - überwiegend in Form von Zwischenabfluss. SCHERRER (2006) folgert in einem Wassereinzugsgebiet in der südwestlichen Pfalz (Massweiler-Kneispermühle), dass die rasche Abflussbildung nur auf wenige Muldenflächen begrenzt sei. Ganz gegenteilig reagiert das ebenfalls von SCHERRER (2006) untersuchte

Einzugsgebiet des Idarbaches. Hier ist rund die Hälfte der Gesamtfläche an der schnellen Abflussbildung beteiligt. Auch SCHMOCKER-FAKEL (2004) modellierte in zwei benachbarten, rund 2 km² großen Wassereinzugsgebieten in der Schweiz völlig unterschiedliche dominierende Abflussbildungstypen. So dominieren im hochwassersensiblen Roreinzugsgebiet auf rund 40 % der Fläche Bereiche mit schnell reagierendem Sättigungsflächenabfluss (SOF), während auf den durchlässigen Böden und Gesteinen des träge reagierenden und nur vier Kilometer entfernten Iserteinzugsgebietes ein Großteil des Niederschlags ins Grundgestein infiltriert (Tiefensickerung) oder erst stark verzögert unterirdisch abfließt (SSF 3). Dass der Hochwasserscheitel in den Entstehungsgebieten kleinerer Bäche auch fast ausschließlich aus Zwischenabfluss bestehen kann, zeigten RICE und HORNBERGER (1998). Sie ermittelten in einer tracergestützten Analyse von 10 Hochwasserereignissen in den USA Werte zwischen 45 % und 100 %. Die in dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse bestätigen diese Werte.

Alle diese Ergebnisse zeigen, dass sich die konkrete Hochwassergefährdung eines Gebietes auf ganz unterschiedliche Weise zusammensetzt. Vergleiche zwischen unterschiedlichen Regionen sind daher bestenfalls auf hydrogeologisch einheitlichen Landschaftsteilen möglich. Legt man dazu den Anspruch einer flächenscharfen Klassifikation der Abflussprozesse zugrunde, wird ein allgemeingültiges Klassifikationsschema ohne Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten nicht zum gewünschten Erfolg führen.

Die erstellten Abflussprozesskarten wurden über die standortskartierte Fläche im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel hinaus mehrmals auf ihre Anwendbarkeit geprüft. Dabei ergaben sich gute bis sehr gute Übereinstimmungen mit lateralen Wasserbewegungen vor Ort. Es traten jedoch auch einige Probleme auf.

Das auf den Höhenschichtlinien basierende, digitale Höhenmodell glättet die Oberflächenstruktur zu stark. Abflussbahnen können damit nicht exakt wiedergegeben werden. Während diese Ungenauigkeit in sehr steilen und engen Tälern und Mulden weniger stark zum Tragen kommt, kann es in ausladenden Hangformen zu einem nicht zu unterschätzenden Fehler führen. Für eine Modellierung sollten daher Geländemodelle aus hochauflösenden Laserscanningdaten verwendet werden. Mit einer Rastergröße von 5 x 5 m konnten gute Erfahrungen gemacht werden.

Nicht exakt berechnet wurde der natürliche Lauf der Fließgewässer in der breiten Bachau. So weicht, trotz der hohen Auflösung des digitalen Höhenmodells (DHM), der natürliche Lauf des Gerinnes von dem modellierten Gewässernetz häufig ab. Auf dieses Problem wies bereits FÜRST (2004) hin. So kann in ebenen Wannentälern die Tiefenlinie oft nicht exakt bestimmt werden. Hier ist es sinnvoller – soweit vorhanden – auf ein digitalisiertes Gewässernetz zurückzugreifen.

Die hohe Auflösung des DHM's hat zur Folge, dass eine sehr realitätsnahe Modellierung der Prozessverläufe erfolgt. Forstwege sind im DHM so gut aufgelöst, dass sie den Prozessverlauf im Modell beeinflussen. Dies führt häufig zum Abbruch der Berechnung und zur Bildung eines Gerinnes entlang des entsprechenden Weges. Inwiefern der einzelne Straßenabschnitt vor Ort tatsächlich eine Wasser führende Schicht anschneidet oder nicht, lässt sich häufig nur durch einen Geländebehang feststellen (vgl. auch MEGAHAN et al. 2001, SIDLE et al. 2006).

Probleme gab es auch mit der Ausweisung von Sättigungsflächen in den Talauen und Bachtälichen. Diese Bereiche wären allerdings von der Standortkartierung gut zu erfassen, da sich Vernässungsmerkmale häufig bis in den Oberboden hinein ausbilden. Viele Auenbereiche sind im bayerischen Untersuchungsgebiet über das Relief hergeleitet (klima- und lagebedingte Standorte), sodass nur vage Annahmen über den Wasserhaushalt und somit über das zusätzliche Wasserspeicherpotenzial getroffen werden können (vgl. Kap. 5.1.1). Aufgrund des Maßstabs (1:10.000), der Mindestgröße einer Kartiereinheit (1 ha) und der fließenden Grenzen der Standortseinheiten werden die Übergangsbereiche zwischen unterirdischen und oberirdischen Fließprozessen nicht exakt dargestellt. Als dominierender Abflussprozess wurde hier oftmals der abflussintensivere Sättigungsabfluss ausgewiesen. Zur besseren Ausweisung der Übergangsbereiche ist ein Geländebehang zur Einschätzung der Abflussbereitschaft unverzichtbar. Ein größeres Problem stellen auch größere bestockungslose Auenbereiche dar, über die keinerlei bodenkundliche Informationen in wünschenswertem Maßstab vorliegen, wie es im thüringischen Röthengrund der Fall ist. Um dennoch diese Bereiche zu klassifizieren, wurde die Bodenwassersättigung der Aue über Abflusssimulationen berechnet. Ein Vergleich verschiedener Berechnungsverfahren (Topografischer Index/SAGA Wetness Index) mit den in der Standortskunde ausgewiesenen wasserbeeinflussten Standorten im benachbarten Einzugsgebiet der Tschirner Ködel ergab, dass mit dem topografischen Index nur eine lagegetreue Übereinstimmung von 37 % erzielt wurde, während der SAGA Wetness Index eine Übereinstimmung von 55 % aufwies. Das bessere Abschneiden des Saga Wetness Index liegt in einer modifizierten Berechnung der spezifischen Einzugsgebietsgröße begründet, die zu einer realistischeren Modellierung der Bodenwassergehalte in den Talebenen führt. PESCHKE et al. (1999) folgerten in ihrer Untersuchung, dass die tatsächliche Ausdehnung der gesättigten Flächen über den topografischen Index nur unzureichend wiedergegeben werden kann. Nichtsdestotrotz stellt die automatisierte Bestimmung von Sättigungsflächen über den Wetness Index eine Hilfe auf den nicht kartierten Flächen dar.

Es ist ungewiss, inwiefern dieser Wert durch Anpassungen weiter verbessert werden kann, da ein Vergleich mit der Standortskarte bestimmte Fehlerquellen von vornherein mit einschließt. Maßstabsbedingt werden in der forstlichen Standortkartierung schmale Standortseinheiten (Bachauen/Rinnen etc.) zum Teil überhöht dargestellt. Einer sehr differenzierten Modellierung des TWI auf Grundlage eines Höhenmodells mit einer Gitternetzweite von 5 x 5 m steht die

Standortskarte im Maßstab 1:10.000 gegenüber. Eine Verschneidung führt daher zwangsläufig zu Fehlern. Zudem lagen die kartierten Standortseinheiten nicht immer exakt im Raum, sodass es hier leicht zu Verschiebungen um einige Meter kommen kann. Durch diesen Fehler wird ein Vergleich bereits deutlich erschwert, zeigt aber auch, dass die erzielte Übereinstimmung akzeptabel ist.

Auf die Ausweisung von unterschiedlich hohen Sättigungsgraden über das Modell wurde verzichtet, da sich häufig eine umgekehrte Verteilung der Bodenfeuchte ergab. Da das Modell die Bodenfeuchte neben der Hangneigung auch über die Größe der beitragenden Fläche berechnet, weisen die Talanfangsmulden (Quellmulden) mit einem verhältnismäßig kleinen spezifischen Einzugsgebiet niedrigere Werte auf als die Auenbereiche, denen durchweg ein hohes Feuchtepotenzial zugewiesen wird. Würde man diesen Ansatz auf die Fläche übertragen, müssten die Quellmulden mit stark verzögertem Sättigungsabfluss reagieren, während die Talauen sofortige Sättigungsabflüsse aufweisen. Dieser einfache Ansatz stellte sich vor Ort jedoch als nicht praxistauglich heraus, da die Auen oftmals gut drainiert sind und im Sommer hohe Wasserspeicherpotenziale aufbauen können. Im umgekehrten Falle sind die Quelleinzugsgebiete der Oberläufe meist das ganze Jahr sehr feucht und bilden damit wesentlich schneller hochwasserwirksamen Abfluss als die Braunaueböden. Aufgrund dieser Problematik wurden die herausmodellierten Auenbereiche und Bachtälchen pauschal mit verzögertem Sättigungsabfluss (SOF 2) belegt.

Fazit: Eine Klassifizierung für periglazial geprägte Böden ist nach dem vorgestellten Verfahren möglich und stellt eine einfache und kostengünstige Möglichkeit dar, potenzielle Hochwasserentstehungsgebiete zu ermitteln. Inwieweit sich diese Überlegungen auch auf andere Gebiete außerhalb des Frankenwaldes übertragen lassen, ist aufgrund unterschiedlicher Grundlageninformationen und hydrogeologischer Verhältnisse zu prüfen. Die Abflussprozesskarten können für die Standortkartierung als Arbeitsgrundlage zur genaueren Ausweisung unterirdischer Wasserreserven dienen. Auf dieser Basis kann die Forsteinrichtung ihren gesetzlichen Auftrag zur Herstellung eines standortgemäßen Waldzustandes, der die Schutzfähigkeit des Waldes stärkt, zielgerichtet umsetzen.

6.2.3 Berechnungsversuche

Der wichtige Teilabschnitt „Berechnungsversuche“ sollte prüfen, inwiefern tiefer wurzelnde Baumarten einen Einfluss auf den hochwasserauslösenden Abflussprozess ausüben. Wäre eine Abflussreduktion nachweisbar, könnten abflusssensitive Standorte gezielt mit standortgerechten Baumarten umgewandelt und damit ein wichtiger Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz geleistet werden.

Vergleichende Berechnungsexperimente in Abhängigkeit zur Baumart im Periglazial der Mittelgebirge gab es bislang nicht. Im Mittelpunkt standen bisher Versuche, die das Abflussverhalten unterschiedlicher Landnutzungsformen, wie Wald, Graslandschaften und Ackerflächen oder das Reaktionspotenzial verschiedener Bodentypen, untersuchten (vgl. Kap. 2.10). Zum Teil wurden verschiedene waldbauliche Behandlungsweisen (Lochhiebe, Schirmschläge etc.) und deren Einfluss auf die Abflussbildung geprüft (MOESCHKE 1987, FÜHRER 1990) oder Modellsimulationen für verschiedene Bestockungen durchgeführt (BOTT 2002). Da der Wald im Frankenwald im Idealfall aus einer Kombination von mehreren Baumarten besteht, ist davon auszugehen, dass jede Baumart für sich, die zur Verfügung stehenden Ressourcen artspezifisch erschließt und im Idealfall die Bodeneigenschaften im Sinne der Hochwasservorsorge positiv beeinflusst.

Ob sich dieser Effekt auf die Zweischichtböden im Frankenwald positiv auswirkt, ließ sich nur schwer quantifizieren, da die nötige Standortskonstanz, die einen Vergleich erlauben würde, in der Natur nicht vorkommt. So mussten hinsichtlich der Standorte und der Baumartenzusammensetzung Kompromisse eingegangen werden. Trotz der makroskopisch homogenen Profile ist davon auszugehen, dass sich der Faktor Standort immer wieder in den Vordergrund schiebt und die Vergleichbarkeit von Einzelergebnissen erschwert. Durch den hohen zeitlichen Aufwand, der für die Suche von geeigneten Berechnungsstandorten für eine Großregenanlage und für die Berechnung selbst ausgeht, stützen sich die Ergebnisse auf elf Berechnungen. Weitere Versuche sind daher sinnvoll.

Oberflächenabfluss

Die Ergebnisse in beiden Wassereinzugsgebieten zeigen, dass die Infiltrationskapazität des Oberbodens kein limitierender Faktor im Abflussprozess des Frankenwaldes zu sein scheint. Aufgrund der lockeren Lagerung und des zum Teil sehr hohen Grusgehalts der Braunerden (Tab. 21, Kap. 5.2.3) ist ein hoher Anteil an schnell dränfähigen Grobporen vorhanden, die zur Infiltration von vermutlich weit höheren Niederschlagsintensitäten, als die hier beaufschlagten 50 mm/h, befähigt sind. Eine weitere Erhöhung der Infiltrationsleistung des Oberbodens durch die Baumart scheint daher im Abflussgeschehen des Frankenwaldes nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Dass im Bereich hoher Skelettgehalte die Durchlässigkeitswerte der Böden steigen, belegten bereits KRÜGER und EHWALD (1978). Demnach nimmt der Anteil kleiner

Hohlräume mit zunehmendem Skelettanteil und Größe der Teilchen zu und die Durchlässigkeit steigt.

Die Gefahr von rasch hochwasserbeitragendem Oberflächenabfluss aufgrund von Infiltrationsengpässen ist dadurch sehr gering. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt auch LEHNARDT (1985) im hessischen Mittelgebirge. Er misst dem Zwischenabfluss eine weit größere Bedeutung zu, als dem, seiner Ansicht nach, nur lokal begrenzt auftretenden Oberflächenabfluss. Auch WITZIG et al. (2004) stufen die Waldwirkung auf die Infiltrationsleistung von grobporenrreichen Braunerden im Sperbelgraben (Schweiz) als gering ein, da die texturbedingte, hohe Infiltrationskapazität der Böden eine Waldwirkung bei weitem überwiegt.

Dies soll nicht darüber hinwegtäuschen, dass standortgerechte Waldbestände auf infiltrationsgehemmten Böden die Retention durchaus positiv beeinflussen und die Gefahr von Oberflächenabflüssen nach konvektiven Gewitterniederschlägen stark vermindern können (vgl. TOLDRIAN 1974, KARL et al. 1985, BUNZA & SCHAUER 1989, WEILER 1997, MARKART et al. 2000 & 2004, SCHUME et al. 2003).

Auch Benetzungswiderstände, wie sie auf ausgetrockneten Auflagehorizonten vorkommen können (DEBANO 2000, GREIFFENHAGEN 2005), konnten nicht festgestellt werden. BURCH et al. (1989) vertreten hier die Meinung, dass die Hydrophobizität auf Böden mit hohem Makroporenanteil ohnehin nur eine sehr geringe Rolle spielt. Dass dies nicht generell so ist, zeigen die Untersuchungen von MARKART und KOHL (2004). So können Moderhumusauflagen vor allem in ungepflegten Fichtendickungen und Fichtenstangenhölzern nach längeren Trockenperioden stark wasserabweisend wirken. Auch auf Flyschstandorten des Alpenraumes traten unter mittelalten Fichtenbeständen bei Niederschlagsintensitäten von 100 mm/h hohe Oberflächenabflüsse auf, während der Niederschlag unter naturnahen Fichten-Tannen-Buchen-Mischbeständen vollständig in den Boden sickerte (KARL & PORZELT 1976). Auch die bodenbedeckende Vegetation kann unter grob strukturierten Böden Oberflächenabflüsse entstehen lassen. Borstgras-Rasen (*Nardus stricta*) und einige Schwingelarten (*Festuca spec.*) können so dichte Vegetationsdecken bilden (Wurzelfilz/Strohdacheffekt), dass die Versickerung des Niederschlags in den Boden verhindert wird (MARKART et al. 2000).

Zwischenabfluss

Als einziger Abflussprozess konnte auf allen elf Beregnungsparzellen Zwischenabfluss festgestellt werden. Die sichtbaren Wasserflüsse traten in Abhängigkeit zur Tiefe der Stauschicht (Fließerde, Zersatz- und Zerfallszone, Gestein) im Bereich zwischen 0,6 m bis 1,6 m unter der Geländeoberfläche auf. Im Zusammenspiel mit den über den Hangwasserleiter liegenden, schnell drainfähigen Braunerden kommt es in der Tiefe zu einem hydraulischen Leitfähigkeitsprung, der den vertikalen Wasserfluss in eine laterale Richtung ablenkt. Die lockeren, hangparallel ausgerichteten Schieferscherben der auflagernden Schutte stellten dabei als hochdurchlässige Schichten sehr effektive Wasserleitbahnen für den lateralen Wasserabfluss

ins Tal dar (vgl. CHIFFLARD et al. 2008). Das gleichmäßig durchlässige Bodensubstrat bewirkt, dass auf der gesamten Beregnungsbreite das Wasser in einem schmalen Bereich direkt über dem Staukörper aus dem Profil trat (vgl. Abb. 74). Mauslöcher, Regenwurmgänge oder Wurzelkanäle konnten als Fließwege im A- und B-Horizont nicht beobachtet werden. Dies unterscheidet sich von den meisten in der Literatur beschriebenen Beregnungsversuchen, bei denen, allerdings auf deutlich tonreicheren Böden, ein Großteil des Wassers über präferentielle Fließwege, wie Mauslöcher und Wurzelkanäle, zum Vorfluter gelangte (SCHERRER 1997, SCHUME et al. 2003, SCHMOCKER-FACKEL 2004).

Im Frankenwald beschäftigten sich bereits KLEBER et al. (1998) und KLEBER und SCHELLENBERGER (1998) sehr intensiv mit der Identifizierung der Fließwege des Hangwassers. Sie stellten in einem von Tonschiefer dominierten Quelleinzugsgebiet fest, dass nach Starkregenereignissen das Wasser rasch in den Boden infiltriert und die Basislage der vorkommenden Solifluktionböden aufsättigt. Übersteigt dabei die zusickernde Wassermenge die hydraulische Wasserleitfähigkeit der Basislage, wird der Überdruck so groß, dass es zu einem Aufpressen des Wassers in die lockere Haupt- oder Mittellage kommt und sich der Abfluss am Übergang zwischen der Haupt- und Mittellage oder zwischen der Mittel- und Basislage ausbildet. Durch die lateral eingeregelteten Tonschieferscherben kann das Wasser fast ungehindert hangabwärts fließen.

Darüber hinaus kann sich ein zweites Interflowstockwerk innerhalb der Basislage ausbilden. Nämlich dann, wenn Wasser durch Störungen im Sedimentgefüge (Eiskeile etc.) oder durch abgestorbene Wurzelbahnen in die Basislage infiltriert und innerhalb bevorzugter Fließwege dem Gerinne entgegen fließt (KLEBER et al. 1998, VÖLKELE et al. 2002). KLEBER et al. (1998) beurteilen den Wassertransport innerhalb der Basislage sogar als den wichtigeren, während Wasserfluss oberhalb der Basislage nur vereinzelt und nach sehr starken Regenfällen zu beobachten wäre. Die Basislage kann also als Wasserstauer und gleichzeitig als Wasserleiter fungieren.

Ob die Basislage als Staukörper oder Wasserleiter auftritt, ist nach Meinung von CHIFFLARD et al. (2008) vor allem auf die Bodenfeuchte der einzelnen Lagen zurückzuführen. Liegt die Saugspannung der stauenden Basislage oberhalb der Sättigungsgrenze, tritt sie zunächst als Wasserstauer auf. Durch den zunehmenden Wasserstau nach einem Starkregenereignis und einer ereignisabhängigen hohen Bodenfeuchte tritt Wasser in die Basislage über und führt zu einem gesättigten Wasserfluss auch innerhalb der Basislage.



Abbildung 74: 93-jähriger Fichtenbestand auf einem mäßig grundfrischen Standort mit stark verdichtetem Untergrund. Das gesamte abfließende Wasser drang entlang der gestrichelten Linie direkt oberhalb der ansetzenden Verdichtung aus dem Bodenprofil aus.

Die in dieser Untersuchung ermittelten Abflussbeiwerte liegen im Rahmen vergleichbarer Untersuchungen. Insgesamt flossen nach zwei durchgeführten Beregnungen auf den terrestrischen Standorten zwischen 1,5 % - 9,5 % (Tschirner Ködel) und im Röhthengrund zwischen 4 % - 27 % des aufgebrachten Wassers wieder ab. Die dritte Beregnung bis zur Abflusskonstanz im Bereich der Tschirner Ködel ergab Werte zwischen 11 % - 30 %. HARR (1977) konnte bei seinen Versuchen an einem tiefgründigen Waldhang rund 38 % des Niederschlages als Zwischenabfluss wieder auffangen. HEWLETT et al. (1977) ermittelten Werte zwischen 20 % und 35 % und KARL et al. (1985) auf zwei Rendzinenstandorten mit Fichten-Tannen-Buchen-Bestockung 24 % und 36 %. SCHWARZ (1985) zeigte zudem eindrucksvoll, dass Zwischenabfluss sehr rasch zum Hochwassergeschehen beitragen kann. Auf einem dicht gelagerten und trockenrissigen Tonboden flossen nach 30 mm Niederschlag fast 100 % der beaufschlagten Niederschlagsmenge als Zwischenabfluss wieder ab.

Die deutlich höheren Abflussbeiwerte (32 % - 84 %) der temporär wasserbeeinflussten Böden im Frankenwald zeigen, dass es innerhalb des standörtlich sehr einheitlichen Gebietes Geländebereiche gibt, die sehr rasch und intensiv auf Starkregenereignisse reagieren.

Die schnell abflusswirksamen Flächen nehmen häufig nur einen verhältnismäßig kleinen Teil an der Gesamtfläche des Wassereinzugsgebiets ein, tragen aber überproportional zum Hochwasserabfluss bei (vgl. Kapitel 5.1.2).

Die vom Hangzugwasser beeinflussten Standorte weisen häufig eine feinerdearme, ausgewaschene Lage direkt oberhalb der Dichtlagerung auf. Der grobporenreiche Schutt setzt den Abfluss wenig Widerstand entgegen. Damit werden sehr hohe laterale Fließgeschwindigkeiten erreicht. Es ist zu vermuten, dass die abflussverschärfenden, feinerdearmen Lagen durch Ausspülen (Erosion) von Feinmaterial mit dem Zwischenabfluss nach Regenereignissen, insbesondere im Zusammenhang mit der Schneeschmelze, entstanden sind. Dass Erosion durch Zwischenabfluss innerhalb des Bodens auftreten kann, belegen bereits JONES (1987), UCHIDA et. al. (1999) und TERAJIMA et al. (2000).

Einfluss der Baumart

Der größte Einfluss des Waldes auf die Hochwasserentstehung sollte auf Standorten bestehen, auf denen die vertikale Sickerung des Wassers durch dichtere Bodenschichten im Untergrund gehemmt ist (LÜSCHER & ZÜRCHER 2002, HEGG et al. 2004). Baumarten, die mit ihren Wurzeln tiefer in den Boden eindringen, können diese Standorte besser erschließen, den Bodenwasserspeicher erhöhen und durch die Transpiration freien Porenraum schaffen (HEGG et al. 2004). Auf gut durchlässigen Standorten hingegen, dürften sich die unterschiedlichen Durchwurzelungsstrategien der Baumarten auf das Porenvolumen des Bodens kaum auswirken.

Auch auf zwischenabflussgeprägten Standorten ist nach Auffassung von WEILER et al. (2000) eine Beeinflussung durch die Landnutzung schwierig, da diese Standorte durch den längeren Fließweg des Wassers durch den meist mächtigeren Bodenkörper bereits einen verzögernden Effekt haben.

Da die Böden im Frankenwald eine hohe vertikale Wasserleitfähigkeit besitzen und die Menge an zusickerndem Wasser nur sehr begrenzt beeinflusst werden kann (Dichtstand der Bäume, Baumart, Bodenvegetation), beschränkt sich damit die Verminderung des Abflusspotenzials auf eine Erhöhung der Speicherfähigkeit dicht gelagerter Schichten und einen tiefgründigen Wasserentzug durch wurzelintensive Baumarten. Nach LEHNARDT (1985) sind insbesondere durch abgestorbene Baumwurzeln entstehende Hohlräume und Auflockerungen in verdichteten Substraten für die erhöhte Retention und Durchlässigkeit von Waldstandorten verantwortlich. Die hier unterstellte Theorie geht davon aus, dass tiefwurzelnde Baumarten die Böden deutlich tiefgründiger erschließen und sich dadurch die Infiltrationskapazität der wasserundurchlässigen Schicht erhöht und der Gegensatz zwischen den darüber liegenden hochdurchlässigen Schichten vermindert wird (Abb. 75). Weiterhin wird angenommen, dass die durch das Wurzelwachstum geschaffenen Sekundärporen im Staukörper blind enden oder gar einen Übertritt zum Grundgestein schaffen und somit eine Verbindung zum Grundwasserleiter her-

stellen (Abb. 75). Die tiefere Durchwurzelung bewirkt gleichzeitig einen tiefgründigen Wasserentzug und schafft zusätzlichen freien Porenraum. Über die Etablierung standortsgerechter, tiefwurzelnder Baumarten sollte daher in der Summe eine Steigerung des Wasserspeichervolumens im Boden und damit ein abpuffernder Effekt auf den Abflussprozess nach Starkregenereignissen möglich sein.

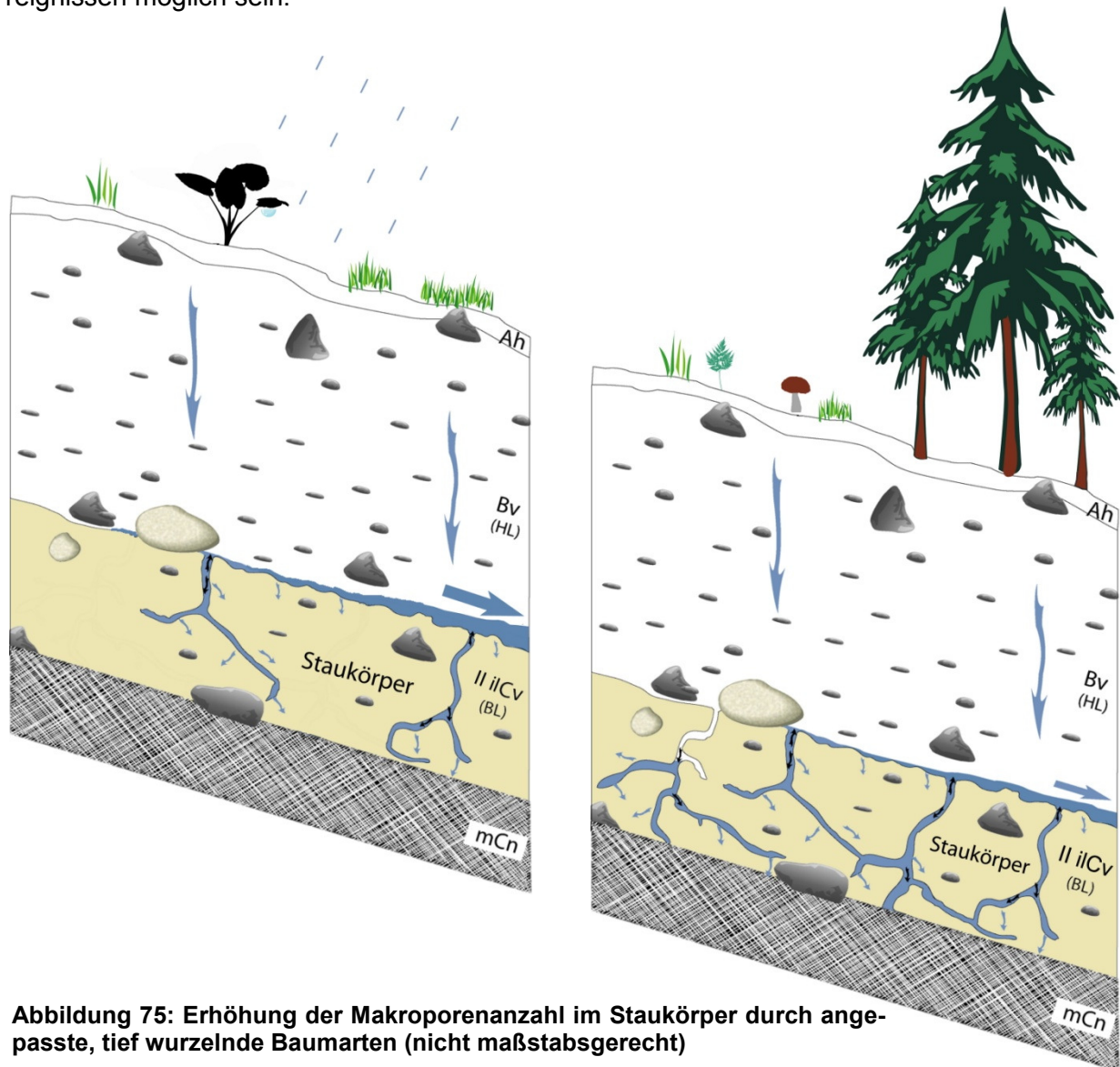


Abbildung 75: Erhöhung der Makroporenanzahl im Staukörper durch angepasste, tief wurzelnde Baumarten (nicht maßstabsgerecht)

Röthengrund

Bei den simulierten Starkregenereignissen wiesen die Hangschuttböden der Fichtenparzellen (P1 und P2) im Vergleich zu den Buchen-/Bergahorn-Beständen eine geringere Abflussverzögerung und eine höhere Abflussmenge auf. Ein Großteil des Wassers infiltrierte in die aufgelockerte und nur rudimentär ausgebildete Zersatzzone der Grauwacke und wurde zum Teil erst über dem geologischen Ausgangsmaterial lateral abgelenkt (Parzelle 2). Durch die fortwährende Bewegung des Hangschuttmaterials kann sich keine echte Verdichtungslage mit stauer Wirkung ausbilden. Dies führt zu einem deutlich höheren Anteil an Tiefem

Zwischenabfluss (DSSF) im Vergleich zu den anderen durchgeführten Beregnungsversuchen. An stark geneigten Hängen, an denen vornehmlich Tiefer Zwischenabfluss auftritt, kann daher durch die Baumart wohl kein merklicher Einfluss für den Hochwasserschutz ausgeübt werden. Die mit Buchen-/Bergahorn bestockten, unvernässten Standorte speicherten das Wasser der ersten Beregnung vollständig und zögerten damit die Abflussreaktion deutlich länger hinaus. Trotz stark grusiger Böden – ein Grusanteil von zum Teil deutlich über 65 Masse% – war der Wasserrückhalt unter dem Buchen-Bergahorn-Mischbestand am höchsten. Durch die außergewöhnlich gut durchwurzelte, feinerdereichere Stauschicht (Abb. 76) infiltrierte vermutlich ein Großteil des Wassers in tiefere Schichten und wurde dort zwischengespeichert. Der in direkter Nachbarschaft liegende Buchenreinbestand zeigte jedoch nach der zweiten Beregnung auch eine rasch und sehr steil einsetzende Abflussreaktion, der mit der Intensität der Fichtenflächen vergleichbar ist. Die Wurzeln der Buche reichen zwar auch hier bis in Tiefen von 1,80 m, allerdings ist die Wurzeldichte im Bereich zwischen 1,50 m - 1,80 m gegenüber dem Buchen-Bergahorn-Mischbestand nur etwa halb so hoch. Der intensive Zwischenabfluss deutet darauf hin, dass der zusätzlich geschaffene Porenraum nicht ausreichte, um das gesamte Niederschlagswasser aufnehmen zu können.

Durch die im Röhthengrund vorherrschende Grauwacke ist der Tongehalt im Staukörper deutlich geringer als im tonschieferreicheren Einzugsgebiet der Tschirner Ködel. Die sandigen Basislagen und die Zersatzzone enthalten nur wenig Bindemittel und setzen den Wurzeln kaum Widerstand entgegen. So konnte auch die Fichte mit ihren Wurzeln bis in eine Tiefe von über 1,60 m vordringen. Erwartungsgemäß wurden unter der Hanggley-Braunerde die höchsten Abflussbeiwerte gemessen. In Abhängigkeit von den physiologischen Ansprüchen der Baumarten (Sauerstoffversorgung der Wurzel) wirken sich Vernässungen auf den Wurzeltiefgang aus. So konnten innerhalb des temporär wassergesättigten Staukörpers keine Buchenwurzeln gefunden werden.



Abbildung 76: Wurzeln innerhalb des Staukörpers unter einem Buchen-Bergahorn-Mischbestand und das dadurch entstandene Sekundärporensystem im rechten Bild (Tiefe: 1,50 m, $L_{d,eff} = 1,58 \text{ g/cm}^3$, schluffiger Sand)

Fazit: Es gibt Standorte, wo die Wahl der Baumart keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf das Abflussverhalten hat. Das sind vor allem locker gelagerte Hangschuttböden, die im Untergrund keine dicht gelagerte Schicht aufweisen. Hier rinnt das Wasser völlig unabhängig von der Durchwurzelung direkt über dem weitgehend wasserundurchlässigen geologischen Ausgangsmaterial ab. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Buche auf zeitweise im Untergrund wasserführenden Standorten nicht tief genug wurzelt und daher im Staukörper keinen zusätzlichen Speicherraum schafft. Andere Baumarten (z.B. Bergahorn, Tanne) sollten aufgrund ihrer Wurzelphysiologie mit diesen Bedingungen deutlich besser zurecht kommen. Konkrete Wurzeluntersuchungen auf diesen Böden fehlen allerdings bislang.

Tschirner Ködel

Auch im Bereich der Tschirner Ködel verzögerte der Buchen-Bergahorn-Mischbestand (P4) den Abfluss am wirkungsvollsten, obwohl die Standortbedingungen mit einem hohen Grusgehalt und starker Dichtlagerung des Unterbodens nicht darauf schließen ließen. Durch die intensivere Durchwurzelung der Verdichtungslage durch den Mischbestand ist anzunehmen, dass auch hier zunächst mehr Wasser im tieferen Unterboden zwischengespeichert werden konnte. Der starke Anstieg zum Ende der dritten Beregnung zeugt von zunehmend gesättigten Bedingungen und wäre eine Erklärung für die in der Basislage blind endenden Makroporen, die sich so lange auffüllen, bis sie schließlich überlaufen. Alles zusätzliche Niederschlagswasser wird daraufhin rasch über den Staukörper abgeführt.

Die Grenzen der baumartspezifischen Durchwurzelung auf die Bodeneigenschaften zeigt eindrucksvoll der ebenfalls mit Buchen und Bergahorn bestockte, grundfeuchte Standort P10. Der äußerst abflussintensive Standort reagiert mit einer schnellen und konzentrierten Abführung des Beregnungswassers. Durch den temporären Wasserfluss wurde viel Feinmaterial ausgewaschen und der Abfluss erreicht im feinerdearmen Blockschutthorizont hohe Geschwindigkeiten. Das gesamte Wasser wird durch die ausgespülten Fließwege rasch abgeführt. Der ständige Wassernachschub am Hang führt häufig zu gesättigten Verhältnissen im Untergrund, die einen baumartenspezifischen Effekt überlagern. Im grundfeuchten, zügigen Stauhorizont wurden, wie auch am Buchenreinbestand (P3) im Röthengrund, zudem kaum Buchenwurzeln gefunden. Dass die Buche auf wasserbeeinflussten und frühjahrskalten Standorten empfindlich reagiert, wurde bereits von KRAUSS et al. (1939), HOFFMANN (1960) und KÖSTLER et al. (1968) hinlänglich belegt und verwundert daher nicht. Da das Wasser im Untergrund sauerstoffreich ist, führt dies nicht bei jeder Baumart zum Absterben der Wurzeln und damit zu einer Verflachung des Wurzelsystems. So konnte zum Beispiel der Bergahorn die wasserbeeinflusste Lage intensiv durchwurzeln und auf tief liegende Wasserreserven zugreifen, während er den darüber liegenden Blockschutt mied. BIBELRIETHER und SPERBER (1962) machten diese Entdeckung bereits Anfang der 60iger Jahre des vorigen Jahrhunderts.

Sie schlussfolgerten, dass sauerstoffreiches Hangwasser auf periglazialen Zweischichtböden die Tiefendurchwurzelung anregt, sodass häufig im Untergrund ein zweites Wurzelstockwerk entsteht. Dieser Effekt sollte bei allen Baumarten auftreten, die verhältnismäßig geringe Ansprüche an die Luftversorgung ihrer Wurzel stellen. Weitere Untersuchungen liegen dazu jedoch nicht vor. Hangzugwasser ist generell weniger problematisch als stagnierende Nässe. So reagiert der Bergahorn auf stauwassergeprägten Böden ebenso mit einer starken Verflachung seines Wurzelwerkes (KÖSTLER et al. 1968, JENSEN et al. 2008). Das vorrangige Ziel auf solchen, im Untergrund temporär vernässten, Flächen sollte daher in der Etablierung von standortgerechten, mehrstufig aufgebauten Mischwaldbeständen mit tiefwurzelnden Baumarten liegen, die in der Lage sind, auch das Wasserangebot in der Tiefe zu nutzen. Die Buche scheint auf solchen Standorten zwar gut zu wachsen, kann aber nicht oder nur unzureichend die Wasservorräte im Untergrund nutzen. Hinsichtlich des Hochwasserschutzes sind Zielstrukturen, die allein auf die Buche abzielen, zu vermeiden. Wie solche Bestände aufgebaut sein könnten, wird im Kapitel „Waldbauliche Schlussfolgerungen“ (Kapitel 7) erläutert.

Die Fichtenparzellen hielten, mit Ausnahme des grundfeuchten Standortes (P10), auch im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel das wenigste Wasser zurück. Allerdings sind die standörtlichen Gegebenheiten nicht immer exakt mit denen der Laubholzflächen vergleichbar. Die grundfrische Fichtenparzelle P11 ist, wie die Parzelle P9 (Buche-Bergahorn), durch eine schlagartige Änderung der Lagerungsdichte im Unterboden gekennzeichnet. Der Skelettgehalt im B_v -Horizont ist geringer als auf den Vergleichsflächen. Während die ersten 50 mm Niederschlag im lockeren B_v gespeichert werden konnten, zeugt der steile Anstieg der Abflussreaktion auf das zweite Niederschlagsereignis von einem sehr geringen Wasserspeicher im Untergrund (geringe Infiltration in den Staukörper) und im Umkehrschluss zu einer effektiven Wasserableitung zum Vorfluter. Dieses Bild passt zur gefundenen Wurzelverteilung. Die Fichtenwurzeln können offenbar nicht die dichteren Lagen erschließen.

Die recht moderate Reaktion der blockschutthaltigen, mittelgründigen Fichtenfläche (P8) weist darauf hin, dass auf Standorten ohne wasserstauende Akkumulationslage der Schichtungsrichtung des Grundgesteins ein bedeutender Wert beigemessen werden muss. Der Standort ist geprägt von stehenden Gesteinsschichten, die nur von einer geringmächtigen, mäßig verdichteten Zersatzzone überlagert wird. Hier scheint die vertikale Perkolation in den Grundwasserkörper weit weniger beeinflusst. Das physikalisch aufgelockerte Gestein bildet zudem Gesteinsklüfte, die mit sandigem Lehm gefüllt sind. Anders als auf dem mit Buchen dominierten Standort P7 konnten hier allerdings so gut wie keine Fichtenwurzeln in den Klüften gefunden werden.

Gut hielten, trotz der geringen nutzbaren Wasserspeicherkapazität (77/86 mm), auch die beiden Mischbestände aus Buche und Fichte das Wasser zurück (P6 und P7). Unterschiede im Abflussverhalten, die man durch die Dominanz der einen oder anderen Baumart hätte erklären

können, ließen sich nicht feststellen. Mit den gut spaltbaren, stehenden Schieferformationen bietet auch dieser Standort gute Voraussetzungen zur erhöhten Infiltration in den Grundwasserkörper. Durch die Wurzelgeflechte der Buche zwischen den Klüften ist ihr, im Vergleich zur Fichte, ein tieferer Wasserentzug zuzutrauen. Dass auch die Fichtenwurzel in der Mischung mit Buche profitieren kann, zeigt KUHR (1999). KUHR konnte in einer Tiefe von 90 cm eine um 80 % größere Wurzelquerschnittsflächensumme nachweisen als in einem vergleichbaren Fichtenreinbestand. Ungeachtet weiterer positiver Synergieeffekte durch Mischbestände sollte allein durch die im Allgemeinen bessere Durchwurzelung im Fichten-Buchen-Mischbestand der Wasserrückhalt als günstiger zu bewerten sein.

Dass die vorliegenden Berechnungsergebnisse nicht ohne Weiteres auf andere Regionen übertragbar sind, zeigen die Resultate von SCHUME et al. (2003). Hier konnte auf einem Stagnogley die Fichte gegenüber der Buche den Abfluss um über eine halbe Stunde länger hinauszögern. Für den schneller reagierenden Buchenbestand machen SCHUME et al. (2003) die höhere biogene Aktivität, das tiefer reichende Wurzelsystem und die intensivere Durchwurzelung und die damit einhergehenden größeren Porendurchmesser gegenüber der Fichte verantwortlich. Das Wasser erreicht so höhere Fließgeschwindigkeiten und wird rascher zwischenabflussaktiv. Auf der anderen Seite könnten die geringeren volumetrischen Fließgeschwindigkeiten unter der Fichte zu einer Aufsättigung des Bodenprofils und zum Oberflächenabfluss führen (SCHUME et al. 2003). Der baumartenabhängige Effekt kann daher in Abhängigkeit des Bodentyps und der Bodenart sehr unterschiedlich ausfallen. Es ist deshalb immer zu prüfen, inwiefern sich die baumartspezifische Durchwurzelung auf die Abflussverhältnisse vor Ort auswirken könnte.

Dass nicht auf allen Frankenwaldstandorten ein baumartenabhängiger Effekt nachweisbar ist, scheint eindeutig. Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein einer verdichteten Lage, die vom Wurzelsystem der Bäume erreicht und unterschiedlich tief durchwurzelt werden kann.

Bis in welche Tiefe die Durchwurzelung der Baumart einen merklichen Einfluss auf den Abflussbildungsprozess hat, ist schwierig zu beurteilen. Für pseudovergleyte Böden legen WITZIG et al. (2004) sich auf eine Tiefe des Staukörpers von nicht mehr als 50 cm unter der Geländeoberfläche fest. NAEF et al. (2002) äußern sich generell kritisch, dass zwischenabflussgeprägte Standorte überhaupt durch die Landnutzung nennenswert beeinflusst werden können, da der Staukörper häufig außerhalb des von der Landnutzung beeinflussbaren Bereiches liegt. Leider fehlen in der Literatur, bis auf wenige Standardwerke abgesehen (KÖSTLER et al. 1968, POLOMSKI & KUHN 1998, KUTSCHERA & LICHTENEGGER 2002), umfangreiche Untersuchungen zu Wurzeltiefen in Abhängigkeit vom Standort, sodass sich diese Frage nicht abschließend beantworten lässt. Auf dem Gebiet der Wurzelausbildung besteht daher weiterer Forschungsbedarf.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass auf den lockeren und gut durchlüfteten Braunerden des Frankenwaldes eine intensive Durchwurzelung möglich ist und dichte Lagen selbst in Tiefen zwischen 1,20 m - 1,50 m noch erschlossen werden.

Neben der Erhöhung des Bodenwasserspeichers und der Infiltrationskapazität des Staukörpers können tiefwurzelnde Bestände Wasserreserven aus der Tiefe nutzen, die z. B. für die Fichte nicht erreichbar sind. Eine Verbesserung der Nährstoffversorgung sowie der Standfestigkeit der Bäume ist anzunehmen. Standortlich angepasste, tief wurzelnde Bestände können nicht nur Trockenereignisse besser überstehen, sondern auch positiv zum Wasserrückhalt auf der Fläche beitragen.

Da der Abflussprozess an den Standort gebunden ist und nur dort ein positiver Effekt hervorgerufen werden kann, wo nach einem Regenereignis auch tatsächlich Wasser zum Abfluss gelangt, spielen hochwassersensitive Standorte eine bedeutende Rolle in der landnutzungsspezifischen Steuerung des Abflussprozesses. Die Ausbildung solcher sensiblen Hotspot-Flächen sind dynamisch und witterungsabhängig (vgl. HEWLETT 1961, DUNNE & BLACK 1970a, 1970b). Zur sinnvollen Steuerung finanzieller Mittel zum Waldumbau sind daher zunächst diejenigen Standorte zu ermitteln, auf denen positive Effekte auf das Gefährdungsrisiko durch tiefwurzelnde Baumarten nachhaltig verbessert oder gesichert werden können.

Fazit: Bei den Wurzelanalysen im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel konnte festgestellt werden, dass die Baumart Fichte, im Gegensatz zu den Buchen-/Bergahornbeständen, die dichten Fließerdeschichten nicht aufschließen kann. Gleichzeitig floss unter den Fichtenbeständen deutlich mehr Wasser wieder in den Auffangbehälter. Ein klares Indiz dafür, dass auf dicht gelagerten Standorten im Frankenwald mit tiefwurzelnden Baumarten die Wasserspeicherkapazität im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes gesteigert werden kann. Auf annähernd permanent wasserführenden Standorten scheint hingegen der Einfluss der Baumart gering zu sein. Zwar konnte festgestellt werden, dass der Bergahorn die wasserführenden Schichten intensiv durchwurzelt, allerdings führt das ständig nachströmende Wasser am Hang zu einer permanenten Sättigung des Unterbodens, was somit den Einfluss der Bestockung klar in den Hintergrund rückt. Nimmt der Einfluss des Wassers jedoch ab, wie zum Beispiel auf Standorten die nur nach kräftigen Regenschauern und somit wenige Tage im Jahr einen Zwischenabfluss aufweisen, ist sehr wohl mit einem positiven Einfluss tiefwurzelnder Baumarten auf die Wasserspeicherkapazität zu rechnen. Unberührt davon bleibt die Tatsache, dass Baumarten, die es vermögen, die wassergesättigten Stauhorizonte zu durchstoßen, eine deutlich stabilere Bestockung darstellen und allein deswegen für den vorbeugenden Hochwasserschutz von Bedeutung sind.

6.2.4 Behandlungsdringliche Flächen

Die Abflussprozesskarte wurde mit Informationen über die aktuelle Bestockung und mit vorhandenen Daten der Forsteinrichtung verschnitten, um eventuell Aussagen zur Dringlichkeit des Waldumbaus aus Sicht des Hochwasserrückhaltes zu treffen.

Als Datengrundlage bieten sich im Staats- und größerem Körperschaftswald die Forsteinrichtungs- und Inventurergebnisse und in nicht erfassten Waldbeständen aktuelle Luftbilder an. In Thüringen liegt eine sogenannte Hauptbaumartenkarte aus der Forsteinrichtung vor, die Informationen zur Hauptbaumart sowie der zwei häufigsten Mischbaumarten enthält, wenn diese mit mindestens 10 % beteiligt sind. Weiterhin können unter anderem das Alter, Vorräte und der Bestockungsgrad ermittelt werden. In Bayern werden die Ergebnisse in Forstbetriebskarten dargestellt, in denen die Nutzungsart im Vordergrund steht. Auch hier sind in einer zugehörigen Attributtabelle bzw. im Revierbuch Angaben zum Alter, zur führenden Baumart und den zwei häufigsten Mischbaumarten (mind. 5 % Anteil) sowie zum Überschirmungsgrad erfasst. Leider sind in beiden Ländern die einzeln ausgewiesenen Baumartenvorkommen innerhalb der Bewirtschaftungseinheit nicht ersichtlich (Ausnahme: Einpunktierungen).

Die Dringlichkeitsausweisung wurde zunächst mit Echtfarbenorthofotos durchgeführt. Über die Kombination mit den Daten der Forsteinrichtung wurde versucht, die aus Hochwasserschutzgründen dringlich umzubauenden Bestände zu selektieren (Abb. 77).

Mit dem Programm Access (Microsoft) wurden die dafür wichtigsten Bestandesparameter in einer Datenbankabfrage zusammengestellt und mit der Abflussprozesskarte verschnitten.

- Baumart/Mischung
- Altersklasse bzw. Nutzungsart
- Kronenschluss (geschlossen-licht-Freifläche)

Über eine Referenztablelle wurde für jede Kombinationsmöglichkeit eine entsprechende Dringlichkeitsstufe vergeben.



Abbildung 77: Auf Grundlage des Luftbildes eingeteilte Bestände nach Baumart, Alter und Bestandesschluss im Gebiet der Tschirner Ködel

Aufgrund der bereits dadurch entstehenden sehr vielen Kombinationsmöglichkeiten und der langwierigen Aufbereitung der Forsteinrichtungsdaten ist dieser Weg jedoch unübersichtlich und zeitaufwendig. Informationen über eine gesicherte Vorausverjüngung unter dem herrschenden Bestand sind für die meisten Bestände in der Inventurtabelle zwar enthalten, allerdings liegen aufgrund des Inventurrasters nur wenige bis keine Punkte innerhalb eines Bestandes. Eine Auswertung der Inventurergebnisse auf Bestandesebene ist daher nicht repräsentativ. Damit fehlen wichtige Informationen.

Weiterhin ist eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Laubhölzern anhand von Echtfarbenorthofotos sehr unsicher. In einem Schluchtwald ist daher die Ansprache der einzelnen Baumartenanteile (Buche, Esche, Bergahorn) nicht möglich, für den Hochwasserschutz jedoch relevant. CIR-Luftbilder (Color-Infrarot-Filme), aus denen einzelne Baumarten ersichtlich werden, lagen nicht vor.

Im Untersuchungsgebiet Tschirner Ködel stellte sich darüber hinaus ein weiteres Problem. Durch zahlreiche und wiederkehrende Borkenkäferkalamitäten der letzten Jahre und durch das Sturmtief „Kyrill“ wurden ganze Hangflanken entwaldet, die das Waldbild im Trinkwassereinzugsgebiet nachhaltig veränderten. Da auch die aktuelleren Luftbilder diese Veränderung nicht aufzeigen, gibt der Entwurf der Ampelkarte die aktuellen Verhältnisse nicht exakt wieder. Weiterhin ist im Frankenwald auf einem Großteil der abflusssensitiven Flächen die Fichte beteiligt, sodass es wenig sinnvoll erscheint, hier eine weitere Differenzierung durchzuführen.

Die erstellte Abflussprozesskarte sollte vielmehr, neben der Standortkartierung, als eine weitere Entscheidungsgrundlage für die turnusmäßige Forsteinrichtung herangezogen werden. Standorte mit erhöhtem Abflussgefahrenpotenzial sollten nach der Begutachtung des aufstokkenden Bestandes und des Standorts vor Ort von der Forsteinrichtung separat eingerichtet und mit erhöhter Priorität umgebaut und umgesetzt werden.

In Zukunft wird es wohl möglich sein, flächig über CIR-Luftbilder ein fotorealistisches 3d-Abbild der Bestände bereit zu stellen. So können neben der Ansprache der Bestände auch gleich Bestockungsinformationen, wie zum Beispiel der Vorrat berechnet werden. Auf größerer Fläche ist, beispielsweise zur Abgrenzung des Gefährdungspotenzials anhand der Bestockung zwischen den Einzugsgebieten, die automatische Klassifikation mittels Kronensegmentierung ein Erfolg versprechendes Verfahren. Trotz alledem kann die Luftbildauswertung immer nur eine Annäherung an die vor Ort anzutreffenden Situationen geben. Insbesondere dann, wenn es um konkrete Planungsmaßnahmen geht, ist die Anwesenheit des Forstwirtschafters vor Ort unabdingbar.

6.2.5 Pegellogger

Die Überwachung des Wasserstandes mit den verwendeten Pegelloggern erwies sich als völlig unzuverlässig. Nach einem ersten Testlauf unter Freilandbedingungen wiesen 3 von 4 Pegelloggern Wasserschäden auf. Als Ursache wurden zu klein gewählte Dichtungsringe von der Firma benannt. Das eindringende Wasser zerstörte die Platine und damit die aufgenommenen Daten. In der Folge entluden sich die Batterien der reparierten Pegellogger nach kurzer Zeit - vermutlich durch Kriechströme. Daraufhin wurden die Geräten durch ein anderes Modell ausgetauscht. Mit den neuen Pegeln konnte schließlich ein Jahr lang ohne auftretende Probleme der Wasserstand gemessen werden. Innerhalb dieses sehr kurzen Zeitraums traten allerdings keine nennenswerten Hochwasserabflüsse auf. Die Auswertung der Daten brachte hinsichtlich der Zielstellung daher keinen Zugewinn.

7. Waldbauliche Schlussfolgerungen

Wald verringert und verzögert die Hochwasserwelle. Soweit sind sich viele Experten einig (siehe Kap. 2.9/2.10). Dabei trägt weit weniger der Wald an sich bei, als viel mehr die Wirkung des Waldes auf den Boden. Auch kann aufgrund der baumartenabhängigen Morphologie und der verschiedenen Durchwurzelungsstrategien sowie durch interspezifische Konkurrenzverhältnisse in Mischbeständen mit einer jeweils anderen (Wald-)Wirkung auf den Boden gerechnet werden, was sich in unterschiedlichen Wasserrückhaltepotenzialen niederschlagen kann. So ist zum Beispiel der Humuszustand ein waldbaulich beeinflussbarer Faktor, der unter ungünstigen Umständen (z. B. rohhumusartiger Zustand unter mittelalten dichten Fichtenstangenwäldern) zu Oberflächenabfluss führen kann. Weiterhin stellt der Humus, trotz seiner vergleichsweise geringen Mächtigkeit, einen bedeutenden Wasserspeicher dar.

Durch die meist intensivere und unterschiedlich tiefe Durchwurzelung durch Mischbestände im Vergleich zu Fichtenreinbeständen wird nicht nur die Bestandesstabilität erhöht, sondern auch der Boden gelockert und das Porenvolumen erhöht. Durch das Wurzelwachstum und die entstehenden Sekundärporen durch absterbende Wurzeln werden Makroporen geschaffen, die das Wasser in tiefere Bodenschichten leiten. Dabei dürften besonders die tiefwurzelnden Baumarten (Tanne, Eiche oder Erle) die besten Voraussetzungen haben, wasserstauende Bodenhorizonte zu durchstoßen, dem Boden tiefreichend Wasser zu entziehen und somit die Wasserspeicherkapazität im Sinne der Hochwasservorsorge positiv zu beeinflussen. Bei einem Starkregenereignis kann dadurch mehr Wasser zwischengespeichert und der hochwasserwirksame Abflussprozess hinausgezögert werden. Auch die oberirdische Biomasse wirkt sich auf die Abflussdisposition aus. Immergrüne Nadelbäume haben gegenüber ihren laubabwerfenden Konkurrenten eine ganzjährig hohe Interzeption. Auch die Transpiration setzt wesentlich früher im Jahr ein und entzieht dem Boden frühzeitig Wasser. Hochwasser vorbeugende Mischwälder bestehen somit im Idealfall aus einer Kombination aus Laub- und Nadelbäumen.

Die Art der waldbaulichen Behandlung und die daraus resultierenden Waldstrukturen wirken ebenfalls auf den Abflussprozess ein (vgl. FÜHRER 1990). Generell ist darauf zu achten, dass standortsgerechte, gemischte und ungleichaltrige Bestände mit früher Verjüngungsphase zu erschaffen bzw. zu erhalten sind. Das gilt insbesondere für die hochwassersensiblen Bereiche. Dieser Dauerwaldgedanke steht noch am Beginn der Umsetzung. Gegenwärtig werden verschiedene Verfahren entwickelt und getestet, um zukünftig dauerwaldartige Bestände zu erschaffen bzw. jüngere Altersklassenwälder einen dauerwaldartigen Charakter zu verleihen.

Auch die Arten der Verjüngungsverfahren sollten an die geforderten Strukturen angepasst werden. Untersuchungen zeigen, dass es zu einer merklichen Abflusserhöhung kommen kann, wenn der Bestockungsgrad schlagartig unter 0.6 abgesenkt wird (MOESCHKE 1987, FÜHRER

1990). Streifenkahlschläge auf abflusssensitiven Flächen (wasserzuflussbegünstigte Talein-
hänge etc.) sind daher möglichst zu vermeiden. Zur Verjüngung der Buche und der erwünsch-
ten – meist lichtbedürftigeren – Mischbaumarten sollte ein femelartiges Vorgehen angestrebt
werden, um neben geschlosseneren (dunkleren) Partien, aufgelichtete Strukturen zu schaffen.
Grundsätzlich sollte mit den Behandlungen eine hohe vertikale und horizontale Stufigkeit
angestrebt werden. Mischbaumarten sind bei Pflegeeingriffen großzügig zu fördern und als
Samenbäume zu erhalten. Betrachtet man zum Beispiel die Altersklassenverteilung der Tanne
im Forstbetrieb Rothenkirchen (Frankenwald), so ist diese in der Altersklasse von 101-120
Jahren noch mit 2 % und in der Altersklasse von 121-140 Jahren gar mit 5,1 % vertreten
(FORSTEINRICHTUNGSWERK ROTHENKIRCHEN 2008). Dieses Verjüngungspotenzial ist zu nutzen.
Gleiches gilt für beigemischtes Edellaubholz, insbesondere den Bergahorn und die Esche.

Historisch bedingt stocken auf vielen hochwassersensitiven Standorten Fichten. Durch zahlrei-
che Borkenkäferkalamitäten (Beginn Jahrhundertsommer 2003 bis in die Gegenwart) und
Sturmwurfereignisse (Januar 2007: Kyrill, März 2008: Emma) in den letzten Jahren lösten sich
viele dieser Bestände auf. Verjüngen sich die hinterlassenen Kahlfächen längere Zeit nicht
bzw. werden nicht wieder in Bestockung gebracht, ist vorübergehend mit einer deutlich erhöh-
ten Abflussmenge aus diesem Bereich zu rechnen. Der hohe Fichtenanteil und das erhöhte
Kalamitätsrisiko im Fichtenaltbestand haben zur Folge, dass eine neue, standortgerechte
Baumartengeneration häufig künstlich durch Voranbau und möglichst frühzeitig eingebracht
werden muss (Abb. 78). Eine Grundvoraussetzung für die zügige Steigerung der Baumarten-
vielfalt in einem vertretbaren finanziellen Aufwand sind angepasste Wildbestände, die ein
Wachstum der jungen Pflanzen ohne Zaun ermöglichen. Das beinhaltet auch, dass die weni-
gen verbliebenen Mischbaumarten Verjüngungskerne bilden können (Abb. 78).

Doch hier scheint vielerorts noch erheblicher Handlungsbedarf. Dies zeigen nicht nur die eige-
nen Erfahrungen vor Ort, sondern auch aktuelle Arbeiten und Studien, die sich mit Weißtan-
nen-Voranbauten und Tannennaturverjüngung beschäftigen (FRISCHBIER et al. 2009,
SCHRÖDER 2009). So wagen zum Beispiel FRISCHBIER et al. (2009) in einer Untersuchung zur
Situation der Weißtannen-Vorkommen in Thüringen auch einen ersten, vorsichtigen Blick zum
Verjüngungspotenzial der Tanne. Dabei lag die Verjüngungsdichte der Tanne (> 1,30 m), bei
Ausschluss des Rehwildes durch einen Zaun, um 440 % höher als außerhalb. Ein klares Indiz
dafür, dass außerhalb des Zaunes ein sehr viel höherer Verbissdruck auf den jungen Pflänz-
chen herrscht. MÜLLER (2010) wertete eine Gesamtstichprobe von 100 Voranbauten in Süd-
thüringen aus und verzeichnete dabei eine Gesamtverbissbelastung von Tannen-Voranbauten
von 25 % und das, obwohl 71 von 100 Versuchspartzen gezaunt waren. Im Sinne des Wald-
umbaus, hin zu stabilen und leistungsfähigen Mischbeständen, sollte der Verbissdruck weiter
deutlich gesenkt werden.



Abbildung 78: Begründung von Mischbeständen durch Voranbau von Weißtannen- und Buchengruppen unter einem Fichtenaltholzschirm (links) und Auflaufen eines natürlichen Verjüngungskerns, bestehend aus Tanne, Buche und Fichte im Frankenwald

Die Weißtanne gilt neben der Buche und Fichte als natürliche Hauptbaumart des Frankenwaldes. Das in die Tiefe strebende Pfahlwurzelsystem vermag Bodenbereiche zu erschließen, die für andere Baumarten nicht erreichbar sind. Durch die höhere Stabilität, das verbesserte Nährstoffangebot und den Zugriff auf tiefe Wasserreserven während länger anhaltenden Trockenperioden hat sie einen klaren Vorteil in Zeiten des Klimawandels gegenüber der flachwurzelnenden Fichte.

In dem Kontext einer möglichst großen, an den Standort angepassten Baumartenvielfalt sollte auch überlegt werden, inwiefern sich fremdländische Baumarten als Mischbaumarten in das Konzept integrieren lassen. Als die wichtigsten Vertreter sind die Küstentanne (*Abies grandis*) und die bereits vor der Eiszeit einmal heimische Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) zu nennen. Küstentannen vermögen mit ihrem Wurzelsystem mäßig stauwassergeprägte Böden oder Standorte mit tief sitzender Feuchtigkeit (halbhydromorphe Standorte) zu erschließen und sind daher für zwischenabflussgeprägte Mulden als Beimischung in geringen Anteilen bedeutsam. Der Douglasie werden in Regionen mit (sub-)atlantischer Klimatönung die besten Zukunftsaussichten bescheinigt (FOERST 1980). In den kühl-feuchten Mittelgebirgen war in der Vergangenheit häufig die Vegetationsperiode zu kurz und es konnten Frostschäden, vor allem Frosttrocknis an Jungpflanzen, auftreten (KÖLLING 2008). Mit dem Klimawandel dürften sich jedoch die Anbaubedingungen in den kühlen Wuchsgebieten verbessern (KÖLLING 2008). Um das Risiko zu streuen, ist auch die Douglasie stets mit standortgerechten und heimischen Baumarten (vor allem Buche) in trupp- und gruppenweiser Mischung in die (Laubholz-)Bestände einzubringen.

Generell ist darauf zu achten, dass der Nadelholzanteil auf stark zwischenabflussgeprägten Standorten nicht unter 60 % absinkt. Durch die Interzeptionsverdunstung sowie die Transpiration der immergrünen Nadelbäume wird auch im Winterhalbjahr Wasser an die Atmosphäre abgegeben. Winterkahle Buchenreinbestände sind in diesen Bereichen zu vermeiden, da diese durch ihren Stammabfluss noch zusätzlich Wasser zum Boden leiten und dadurch eine

deutlich höhere Tiefensickerung während des Winterhalbjahres erreicht wird (MÜLLER et al. 2002). Auch scheint die Buche, die frühjahrskalten und grundfeuchten Standorte nicht besonders zu mögen. Die Wurzeln meiden die vernässten und dicht gelagerten Zweischichtböden.

Im folgenden Kapitel soll eine auf die Abflussprozesstypen abgestimmte Baumartenzusammensetzung, die hinsichtlich des Hochwasserschutzes auf den jeweiligen Standorten als optimal angesehen wird, vorgeschlagen werden. Da die Baumarteneignung nicht nur von der Wasserversorgung abhängig ist, sondern gerade im Mittelgebirge stark vom Klima beeinflusst wird, lassen sich keine allgemeingültigen Zielstrukturtypen auf alleiniger Grundlage der Abflussprozesstypen ableiten. Die Zielstrukturen sind daher Vorschläge, die mit der ausgewiesenen Baumarteneignung der Standortkartierung und den Verhältnissen vor Ort unbedingt abgeglichen werden müssen. Hauptziel ist die Etablierung und Sicherung standortgerechter und damit stabiler, funktionsfähiger Wälder. Einen umfassenden Kriterienkatalog zur Erhöhung und Sicherung des natürlichen Wasserrückhaltes in Wassereinzugsgebieten über den Bestockungswechsel hinaus, ist SCHÜLER (2001) zu entnehmen.

7.1 Flächen mit Hortonischen Oberflächenabfluss (HOF)

Auf den makroporenen Waldböden im Frankenwald ist Hortonischer Oberflächenabfluss nicht zu erwarten. Ausnahmen bilden extrem steile Taleinhänge mit oberflächennah anstehendem Festgestein oder anthropogen geschaffene, verdichtete Bereiche, wie Forststraßen, Rückegassen und -wege sowie Holzlagerplätze. Eine Reduktion des ohnehin geringen Anteils an Oberflächenabfluss im Frankenwald ist durch waldbauliche Schritte nicht möglich. Geeignete Maßnahmen, den Anteil am Oberflächenabfluss so gering wie möglich zu halten, beschränken sich auf die allgemeinen Grundsätze einer pfleglichen Holzwirtschaft. Diese sind:

- Rückbau nicht benötigter Waldwege in geneigten und gerinnenahen Geländebereichen
- Abführung des Wassers auf Wegen über Querentwässerungen zurück in die benachbarte Waldfläche
- Regelmäßige Kontrolle der Wasserabführung
- Bodenschonende Holzernte und -rückung nach dem aktuellsten Stand der Technik
 - Geringes Eigengewicht der Maschine
 - Breitreifen, möglichst ≥ 700 mm, Boogiebänder, aufziehbare gummierte Panzergurte über herkömmliche Baggerketten/Radlaufwerke, vertikal bewegliche Laufrollen (Panzerlaufwerke), die Unebenheiten „schlucken“, Hartgummikettendirektantriebe
 - Gummierte Panzergurte oder Boogiebänder auf Weichböden
 - Reduzierter Reifeninnendruck
 - Großer Raddurchmesser
 - Erhöhung der Achsenanzahl
- Festlegung eines dauerhaften Rückegassensystems mit ≥ 30 m Gassenabstand
- Anlegen von Reisigmatten auf Rückegassen
- Keine flächige Befahrung

Einen Hinweis auf besonders gefährdete Teilstücke können auch die erstellten Abflussprozesskarten geben, da häufig das ablaufende Wasser auf Forstwegen aus Zwischenabfluss führenden Schichten stammt, die durch den Wegeneubau angeschnitten wurden. An diesen Bereichen ist eine gezielte Ableitung des Wassers von der Straße (ggf. Durchlässe) in den Waldboden unablässig.

7.2 Flächen mit Sättigungsoberflächenabfluss (SOF)

Bereiche mit oberflächlichem Abfluss infolge eintretender Sättigung kommen bevorzugt auf schlecht drainierten, tonig-lehmigen Böden, Böden mit Stauschichten im Unterboden und Bereichen mit ständigem Wasserzufluss, wie zum Beispiel an Hangfüßen oder in der Talau, vor. Charakteristisch ist der in Abhängigkeit zur Witterung periodisch erhöhte Feuchtegehalt des Bodens, der bis hin zu vollständig gesättigten Verhältnissen führen kann. Hier kommt es oft zu einer Vermischung von Sättigungsoberflächen- und Zwischenabfluss, da beide Prozesse am Hang ineinandergreifen.

SOF 1 – nasse und anmoorige Bereiche mit annähernd ganzjährigem Wasserüberschuss

Eine Erhöhung der natürlichen Retentionsleistung durch waldbauliche Mittel ist auf derart vernässten Standorten so gut wie nicht möglich (Abb. 79). Aus naturschutzfachlicher Sicht und wegen der hohen Sensibilität dieser Standorte sollten permanent gesättigte Bereiche aus der kommerziellen Nutzung herausgenommen werden. Hier stehen landschaftsgestaltende und naturschutzfachliche Aspekte klar im Vordergrund. Es sollte darauf geachtet werden, dass sich eine flächendeckende, dichte Bodenvegetationsgesellschaft einstellt, die bei Starkregeneignissen die Energie der Regentropfen mindert und mit dichtem Wurzelwerk die Ausschwemmung von Bodenteilchen verhindert. All zu oft sind die Auenbereiche im Frankenwald mit Fichtenbeständen bis an die Gewässerlinie hin bestockt. Durch die starke Beschattung fehlt häufig die Bodenvegetation. Weiterhin sind die Bestände höchst instabil und führen zu einer biologischen Eintönigkeit.

Im Allgemeinen sollte auf Bestände mit lichtdurchlässigen Baumarten (Schwarzerlen, Baumweiden, Aspen, Moorbirken) und einer dauerhaften Bestockung im lichten Bestandesschluss hingearbeitet werden, unter denen sich eine artenreiche Kraut- und Strauchschicht entwickeln kann. Dies ist insbesondere in Trinkwassereinzugsgebieten von Relevanz, um den Eintrag von Sedimenten zu vermindern. Die Flächen können auch der natürlichen Sukzession überlassen werden, solange nicht die Gefahr besteht, dass sich die Fichte flächig verjüngt und die Krautschicht ausdunkelt. Offene Landschaftsstrukturen, die aus naturschutzfachlichen Aspekten schützenswert sind, sind zu erhalten bzw. zu fördern.

Die Anlage von ineinander vernetzten, kleinen Teichen (Teilspeicher) innerhalb des Feuchtbiotops dient zur Lebensraumverbesserung feuchteliebender Fauna und Flora und trägt zum Wasserrückhalt bei.



Abbildung 79: Stark vernässte SOF 1 - Fläche im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel

SOF 2 – verzögerter Sättigungsoberflächenabfluss

SOF 2 – Flächen umfassen Standorte mit mäßiger natürlicher Retentionsleistung, auf denen das Niederschlagswasser nicht oder nur verzögert seitlich abziehen oder in den Grundwasserleiter infiltrieren kann. Der Bodenfeuchtegehalt schwankt in der Regel im Laufe des Jahres ganz erheblich. So ist im Winterhalbjahr (Oktober - März) mit annähernd gesättigten Verhältnissen zu rechnen, während die zusätzliche Wasseraufnahmekapazität im Sommer deutlich erhöht ist (Abb. 80). Stellvertretend für solche Standorte gelten Braunaueböden mit schwankendem Grundwasserstand, Braunerde-Gleye der Schluchtwaldstandorte mit deutlichen Reduktions- und Oxidationsmerkmalen und stauwassergeprägte, schlecht drainierte Bereiche auf Plateaulagen (z.B. wechselfeuchte Braunerde-Pseudogleye).



Abbildung 80: Gesättigter Talboden als Folge permanenter Wasserzufuhr durch den angrenzenden Hang (Bild: Röthengrund, im Nov. 07)

Hauptaugenmerk sollte auf stabile Bestände mit intensiver Durchwurzelung des feuchten Bodens gelegt werden. Untersuchungen von HEGG (2004) lassen darauf schließen, dass über die intensive Durchwurzelung die Infiltration in tiefere Bodenschichten gesteigert werden kann und der Anteil an Sättigungsflächenabfluss reduziert wird. Fichtenreinbestände weisen auch hier aufgrund des hohen Sauerstoffbedürfnisses der Fichtenwurzel nur eine geringe Durchwurzelungstiefe auf und sind windwurfgefährdet (Abb. 82). Als Bestockung im Schluchtwald, an Hangfüßen und entlang von Bachrinnen mit sauerstoffreichem Hangzugwasser (sickerfeuchte Hanggleye) eignen sich wurzelintensive Edellaubhölzer, wie z. B. Bergulme, Esche und Bergahorn (z. B. Ahorn-Eschen-Wald). Lässt der Wasserzug nach, gesellt sich die Schwarzerle hinzu. Pseudovergleyte Böden auf den verebneten Hangrücken sind ideale Tannenstandorte, ebenso die wechselfeuchten Unterhänge. Auch die Talböden sind für die Tanne geeignet, sofern keine Frostgefährdung besteht. Der Bergahorn ist auf stauwassergeprägten Standorten nicht geeignet, da er hier mit einer extremen Verflachung des Wurzeltellers (Abb. 81) und mit einem Rückgang in der Wuchsleistung reagiert (vgl. Kap. 2.11.3).



Abbildung 81: Während der Bergahorn hangwasserzügige, grundfeuchte Standorte sehr gut erschließt, reagiert das Wurzelwerk unter dem Einfluss von sauerstoffarmen Stauwasser äußerst empfindlich. Wurzelballen eines geworfenen Bergahorn auf Braunerde-Pseudogley; Hangverflachung im Mittelhangbereich mit stagnierender Staunässe auf 0,4 m unter der Geländeoberfläche

Als Baumart der natürlichen Vegetation stellt die frostharte Schwarzerle in den wasserbeeinflussten Talböden die Hauptbaumart dar. Außerdem leistet sie mit ihrem intensiven und sehr tiefreichenden Wurzelsystem einen wertvollen Beitrag zum Bodenschutz. In den zahlreichen von Fichten dominierten Bachtälchen ist der Schwarzerlenanteil zulasten der Fichte deutlich zu erhöhen (Abb. 83). Auch die Stieleiche ist bei geeigneter Höhenlage (Wärmehaushalt und Spätfrostgefahr) auf vergleyten Talböden zu berücksichtigen. Besondere Aufmerksamkeit ist den Quellgebieten zu widmen. Hier ist eine standortsgerechte, wasserverdunstende Bestockung vorteilhaft. Rodungen sind im Quellgebiet der Oberläufe streng zu prüfen, um ein Ausdehnen schnell reagierender Sättigungsbereiche durch den Verlust der Bestandestranspiration zu verhindern.



Abbildung 82: Instabile, standortswidrige Fichtenbestockung



Abbildung 83: Ein naturnah mit Schwarzerlen aufgeforsteter „Quellmuldenstandort“ im Fichten dominierten Frankenwald (Forstbetrieb Rothenkirchen, Forstrevier Tettau)

SOF 3 – stark verzögerter Sättigungsflächenabfluss

SOF 3 klassifizierte Standorte sättigen sich nur nach lang anhaltenden und ergiebigen Regenfällen auf und tragen nicht unmittelbar zur Hochwasserwelle bei. Vernässungsmerkmale treten - wenn überhaupt - nur sehr schwach in Erscheinung. Im Allgemeinen umfassen diese Bereiche frische – sehr frische, mittel- bis tiefgründige Lehme mit leicht verzögertem, lateralem Wasserabzug. Alle Baumarten des herzynischen Bergmischwaldes (Buche, Tanne, Fichte und Bergahorn) zeigen hier hervorragende Wachstumsleistungen. Als geeignete Baumarten empfehlen sich alle Baumarten der potenziell natürlichen Vegetation (Buchen-Tannen-Fichten Mischbestände) sowie alle Edellaubhölzer. Eine trupp- bis gruppenweise Beimischung der wurzelintensiven Stieleiche sollte auf geeigneten Standorten (West-, Südwesthänge), auch im Hinblick auf den Klimawandel, mit berücksichtigt werden (FÖRSTER 1996). Einzelne Sommer- und Winterlinden können ebenfalls wertvolle Mischbaumarten (auch im Nebenbestand) darstellen.

7.3 Flächen mit Zwischenabfluss (SSF)

Ein Großteil des abflusswirksamen Wassers im Frankenwald wird dem Vorfluter in Form von Zwischenabfluss zugeführt. Da die waldbaulichen Möglichkeiten auf den wassergesättigten Unterhangbereichen als gering einzuschätzen sind und vorwiegend mit der Etablierung standortgerechter und damit stabiler, dauerwaldartiger Bestände einhergeht, sind die zwischenabflussgeprägten Hänge dagegen waldbaulich-hydrologisch von großer Bedeutung. Durch die gut durchlüfteten, vernässungsfreien Verbraunungshorizonte (Bv) und der nur im tieferen Unterboden temporären Nassphase ist die Baumarteneinschränkung gering, sofern flachwurzelnende Baumarten durch Tiefwurzler, im besonderem Maße mit der Tanne, stabilisiert werden (FÖRSTER 1996). Die Beregnungsversuche zeigen, dass anhand der Baumartenwahl ein standortsspezifischer Effekt auf den Zwischenabflussprozess wahrscheinlich ist. Als Hauptgrund wird die unterschiedliche Durchwurzelungstiefe und Durchwurzelungsintensität der einzelnen Baumarten angesehen. Während wurzelintensivere Baumarten den Staukörper an- bzw. durchwurzeln und durch den tiefen Wasserentzug zusätzlich freien Porenraum zur Verfügung stellen, beschränkt sich das Wurzelwachstum der Fichte meist nur auf die locker gelagerten und vernässungsfreien oberen Horizonte. Deshalb werden Flächen mit dominierendem Zwischenabfluss als die bedeutendsten für den vorbeugenden Hochwasserschutz angesehen, auf denen die Begründung von standortgerechten Mischwäldern die größte Bedeutung erlangt.

SSF 1 – rasch einsetzender Zwischenabfluss

SSF 1 – Flächen wurden in beiden Einzugsgebieten nicht kartiert. Es sind meist konvergierende, grundfeuchte Standorte, die einen hohen Blockschuttanteil aufweisen. Durch den Blockschutt ist die Wasseraufnahmefähigkeit stark eingeschränkt. Gleichzeitig besitzen sie eine sehr hohe vertikale Durchlässigkeit. Dass es solche, meist kleinflächigen Standorte, auch in den beiden Untersuchungsgebieten gibt, ist unbestritten (siehe Beregnungsparzelle P10). Allerdings ist die Ausweisung der Standortseinheiten für solcherlei kleinstandörtliche Bereiche nicht geeignet. Sie müssten vor Ort mit genauer Ansprache des Bodenaufbaues aus den SSF 2⁺ Flächen ermittelt werden. Der waldbauliche Effekt ist als gering zu beurteilen, da durch den hohen Skelettgehalt und den annähernd ständig gesättigten Wasserfluss im tieferen Unterboden keine spürbare Erhöhung der Retentionsfähigkeit zu erzielen ist. Die Eigenschaften des Standorts überwiegen den landnutzungsspezifischen Effekt bei Weitem. Als Bodentypen sind pseudovergleyte Braunerden und Hanggley-Braunerden typisch.

Auf diesen Standorten sollte die Bestandesstabilität eine bedeutende Rolle spielen. Durch das sauerstoffreiche, ziehende Grundwasser sind es klassische Standorte für Edellaubholzbestände (Bergahorn, Bergulme, Esche). Gerade die Esche sollte mit ihren kräftigen Senkern den wasserzügigen Unterboden erschließen können. Auch der Bergahorn vermag auf grundfeuchten Standorten am Hang den Boden tiefgründig zu durchwurzeln. Darüber hinaus ist insbesondere die Tanne mit ihrer kräftigen Pfahlwurzel zu beteiligen, sowie in Lagen unter 600 m die Trauben-/Stieleiche in geringerem Umfang

SSF 2⁺ – konvergierende Standorte mit schnell reagierendem Zwischenabfluss

SSF 2⁺ – Flächen grenzen sich von SSF 1 Flächen durch eine etwas höhere Wasseraufnahmekapazität der vernässungsfreien Horizonte ab. Es sind wasserzuflussbegünstigte Hangformen, die in Abhängigkeit zur Witterung einen temporären Zwischenabfluss aufweisen. So kann in niederschlagsarmen Sommern ein Zwischenabfluss vollständig ausbleiben, während er nach einem Gewitterniederschlag verhältnismäßig rasch wieder anspringt. Durch die zum Teil mächtigen Hangschutte werden die Niederschläge zeitlich gepuffert an den Grundwasserleiter abgegeben. Von dort wird er sehr schnell lateral zum nächsten Vorfluter weitergeleitet. Auch auf diesen Standorten sind die waldbaulichen Möglichkeiten eingeschränkt. Durch die häufige und mitunter lang anhaltende Fließphase sind die Unterböden vor allem im Frühjahr kalt und nass und somit schwer zu erschließen. Als Zielstrukturtypen dienen auch hier tiefwurzelnde Edellaubholzbestände (Bergahorn, Bergulme, Esche) in Mischung mit Tanne, in geringen Anteilen Fichte und Buche. Trauben- und Stieleiche sind in wärmebegünstigten Lagen ebenfalls zu beteiligen. In Hinblick auf den „Hochwasserschutzwald“ sollte der Nadelholzanteil jedoch nicht unter 60 % absinken, um durch die höheren Transpirations- und Interzeptionsraten der Nadelbäume die vernässungsfreien Horizonte so aufnahmefähig wie möglich zu halten.

SSF 2 – verzögernd reagierende Flächen

Diese Bereiche umschließen häufig die schnell reagierenden Zwischenabflussflächen (SSF 1/SSF 2⁺) und zeichnen nur nach länger anhaltenden Niederschlägen. Nach dem Regenereignis „entwässern“ die Böden wieder relativ rasch und sind daher im Unterboden noch verhältnismäßig gut luftversorgt. Die stellenweise auftretenden betonharten Fließerden können nur durch wurzelintensive Baumarten erschlossen werden. Aufgrund der nur vorübergehenden Nässe im Unterboden sollten tiefwurzelnde Baumarten einen merklichen Beitrag zum Wasserspeicherpotenzial beitragen, indem sie zwischen den Nassphasen freien Porenraum schaffen. Als wichtigste Baumart ist dafür die Tanne zu benennen. Als Mischbaumart bietet sich der auf Standorten mit Hangwasserzug tiefwurzelnde Bergahorn an. Ferner sind Buchen, Fichten und Stieleichen in geringen Anteilen zu beteiligen.

SSF 3, DSSF und DP – stark verzögerter (Tiefer) Zwischenabfluss und Flächen mit Tiefensickerung

Auf den beiden letzten Abflussprozessen ist der baumartenspezifische Effekt als vernachlässigbar gering zu beurteilen. Die Antwort des Systems hängt stark vom Relief, dem Skeletthalt und der Gründigkeit des Bodens ab. SSF 3 – Flächen zeichnen sich meist durch mäßig trockene Verhältnisse und eine nicht reliefverschärfende Geländeform aus. DSSF – Bereiche sind aufgrund des Mangels einer allfälligen Stauschicht nur gering forstwirtschaftlich beeinflussbar. Die Spielräume für Baumartenkombinationen reichen demzufolge von Buchen-Tannen-Fichten-Mischbeständen über Buchen-Lärchen-Bestände bis hin zu Buchen-Douglasien-Mischwäldern. Auf besseren Humuszuständen kann auch der Bergahorn beige-mischt werden. Insgesamt sollte der an Trockenheit genetisch angepassten Douglasie mehr Beachtung in diesen Bereichen geschenkt werden. Laut dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (LMS vom 5.5.1997, F4-W 106-65) „*sind lockere, bodenwarme, mittel- und tiefgründige, grusige Lehme oder sandige Lehme bzw. lehmige Sande mittlerer Nährstoffversorgung und Wasserspeicherkapazität*“ als günstig für den Douglasienanbau zu beurteilen. Standorte also, die im Frankenwald eine weite Verbreitung finden.

8. Zusammenfassung

Hochwasser kennt jeder von uns. Und jedes Mal ist es nur schwer vorstellbar, wie sich ein kleiner Bach innerhalb weniger Stunden in einen reißenden Strom verwandelt kann, der alles, was ihm im Weg steht, mit seiner schier unbändigen Kraft mitreißt.

Hochwasserereignisse sind jedoch nicht neu und ein völlig normales Naturphänomen. Neu sind die enormen Schäden, die das Hochwasser hinterlässt. Neben der Flächenversiegelung, der intensiven Landwirtschaft und die Begradigung und Eindeichung der Flusssysteme dürfte auch die Waldzusammensetzung bei der Hochwasserentstehung eine Rolle spielen. Der massive Bestockungswechsel zugunsten der Fichte im 20. Jahrhundert auf nicht geeigneten Standorten führte zu instabilen Waldbeständen, die die vielfältigen Funktionen des Waldes nicht im gewünschten Maße erfüllen. Ausgelöst durch die Häufung von Hochwasserereignissen zu Beginn des neuen Jahrtausends stellt sich daher zunehmend die Frage, ob die Forstwirtschaft den vorbeugenden Hochwasserschutz durch entsprechende Maßnahmen unterstützen kann. Mit vorliegender Untersuchung soll der Versuch unternommen werden, die Frage zu beantworten, ob die Baumartenwahl eine solche Maßnahme darstellt und welche Standorte hierzu den größten Beitrag leisten können. Für die Umsetzung dieses Vorhabens wurde der grenzüberschreitende Frankenwald für die Versuche gewählt.

Ein zielgerichteter Hochwasserschutz verlangt eine genaue Analyse der Waldstandorte, um diejenigen Flächen zu ermitteln, auf denen ein Baumartenwechsel überhaupt einen merklichen Einfluss auf das hochwasserauslösende Abflussgeschehen hat. Um diejenigen Standorte zu ermitteln, die voraussichtlich überproportional viel zur Hochwasserwelle beitragen, wurde die Eignung vorhandener bodenkundlicher Kartierungen (Geologische und Hydrogeologische Karten, Konzeptbodenkarten, Forstliche Standortskarten, Bodenschätzungskarten) zur Ausweisung hochwasserbeitragender Flächen am Beispiel der zwei mesoskaligen Wassereinzugsgebieten im bayerischen (Tschirner Ködel) und thüringischen Teil (Röthengrund) des Frankenwald geprüft und getestet und mit Hilfe einfacher Reliefklassifikationen ein Klassifikationsverfahren für den Frankenwald entwickelt. Auf Basis des Klassifikationssystems wurde die Abflusssensitivität auf einer Abflussprozesskarte dargestellt, auf deren Basis konkrete Handlungsempfehlungen zur Erhöhung oder Sicherung des Wasserrückhaltes für die forstliche Praxis abgeleitet wurden. Um abschätzen zu können, in welcher Art und Weise sich eine geänderte Baumartenzusammensetzung auf die Wasserspeicherkapazität der Frankenwaldstandorte und somit auf den Abflussprozess auswirken könnte, wurden zusätzlich mit Hilfe einer Beregnungsanlage einstündige Starkregenereignisse auf einer Fläche von 100 m² und mit einer Intensität von 50 mm/h in Buchen-, Buchen-Bergahorn- und Fichtenbeständen simuliert. Die auftretenden Abflüsse wurden gemessen und verglichen.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Auswertung des vorliegenden Kartenmaterials ergab, dass die geforderte Genauigkeit für eine räumlich differenzierte Analyse der hydrologischen Gebietseigenschaften von keinem Kartenwerk hinreichend genau erfüllt wird. Die Gründe liegen in einer stark nutzerorientierten Ausrichtung der meisten Kartierungen, am Fehlen von groß- und mittelmaßstäbigen Kartenwerken und an der für hydrologische Fragestellungen oft unzureichenden Erfassung der Standorte in der vertikalen und horizontalen Ebene.
- Die forstliche Standortskartierung stellt in diesem Kontext die Kartengrundlage mit der höchsten Informationsdichte dar. Eine Ableitung auf alleiniger Basis der Standortskarten führt jedoch zu großflächigen Bereichen, die den gleichen Abflussbildungsprozess zur Folge haben. Auf dieser Basis können keine dringlichen Waldumbauflächen flächenscharf abgegrenzt werden.
- Mit Unterstützung digitaler Reliefanalysen konnte gezeigt werden, dass eine flächenscharfe Ausweisung von hydrologischen Homogenitätsbereichen möglich ist, auf deren Basis auch konkrete Planungsschritte zur Steigerung des Wasserrückhaltes erarbeitet werden können.
- Auf den Beregnungspartellen im Frankenwald traten bei Niederschlagsintensitäten um 50mm/h weder unter den Fichten- noch unter den Buchenbeständen Oberflächenabflüsse auf. Die stark grushaltigen, lockeren Braunerden leiten das Wasser über schnell dränfähige Poren rasch in die Tiefe. Eine weitere Erhöhung der bereits sehr guten Drainageeigenschaften der Oberböden durch verschiedene Durchwurzelungsstrategien scheint nicht möglich.
- Die Basislage der Solifluktionböden bzw. die dichte Zersatz- und Zerfallszone des anstehenden Ausgangsmaterials wirkt in der Tiefe als Staukörper für den vertikalen Wasserfluss. Bei den Beregnungsversuchen floss das gesamte Wasser in Form von Zwischenabfluss auf diesen dichten Lagen unterirdisch ab. Es ist davon auszugehen, dass im Frankenwald der Zwischenabfluss die entscheidende Rolle bei der Hochwasserentstehung spielt.
- Die hangparallel ausgerichteten Schieferscherben stellen als hochdurchlässige Schichten sehr effektive Wasserleitbahnen für den lateralen Wasserabfluss ins Tal dar.
- Die mit Laubholz bestockten Flächen zögerten während der Versuche den Abfluss länger hinaus und wiesen geringere Abflussbeiwerte auf als die von Fichten dominierten Standorte. Gleichzeitig erschlossen der Bergahorn und die Buche die im Untergrund dicht gelagerten Standorte deutlich tiefgründiger als die Fichten.

- Es ist zu beachten, dass die Minderung des hochwasserbürtigen Abflusses nicht auf allen Standorten gleich ist, sondern stark von pedologischen, geologischen und morphologischen Bedingungen abhängt.
- Die Ergebnisse sind nicht ohne Weiteres auf andere geologische Einheiten übertragbar und eine Überprüfung der dominierenden Abflussprozesse vor Ort stellt daher die Basis eines jeden integralen Planungskonzeptes für hochwassergefährdete Einzugsgebiete dar.

Mit den zwei erstellten Abflussprozesskarten konnte gezeigt werden, dass eine flächenscharfe Klassifikation der Abflussprozesse für den Frankenwald möglich ist, auf deren Grundlage konkrete Planungen für den Waldumbau umgesetzt werden können. Die Fülle an Bewertungskriterien, die allerdings für eine korrekte Ansprache der Dringlichkeit des Waldumbau vor Ort sprechen und letztendlich einen Mitteleinsatz rechtfertigen würden, können über den Schreibtisch nicht ermittelt werden. Die Abflussprozesskarten stellen vielmehr eine weitere Planungsgrundlage für die Forsteinrichtung dar, um vor Ort über ein standortgemäßes Bestockungsziel zu entscheiden. Dabei könnten abflusssensitive Standorte als potenzielle Hochwasserschutzwälder ausgewiesen werden, in denen der Waldbau zur Erhöhung des Wasserrückhaltes gezielt umgesetzt werden könnte.

9. Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, G.E. (1996): Vorausverjüngung der Weißtanne im Forstamt Nordhalben (Frankenwald). Tannensymposium am 30. und 31. Mai 1996 in Schwarzburg. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Gotha
- AD HOC AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S.
- ALTERMANN, M. (1993): Gliederung von pleistozänen Lagen. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges., 72, S. 825-828
- ALTERMANN, M., STEININGER, M., ABDANK, H. u.a. (1995): Böden, Landnutzung, Natur- und Gewässerschutz im östlichen Harz. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges., 77, S. 155-206
- ALTERMANN, M., JÄGER, K.D., KOPP, D. u.a. (2008): Zur Kennzeichnung und Gliederung von periglaziär bedingten Differenzierungen in der Pedosphäre. AFSV, Waldökologie-Online, 6, S. 5-42
- ANDERSON M.G. & T.P. BURT (1978): The role of topography in controlling throughflow generation. Earth Surf. Process. Landf. 3(4), S. 331-344
- ANDERSON, M.G. & T.P. BURT (1990): Process studies in hillslope hydrology. John Wiley and Sons, Chichester, 539 S.
- ANDERSSON, J.G. (1906): Solifluction, a component of subaerial denudation. Journal of Geology, 14, S. 91-112
- ARBEITSKREIS FÜR BODENSYSTEMATIK der DBG; Federführung: Altermann, M. & D. Kühn (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges., 86, S. 1-180
- ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. Arbeitskreis Standortserkundung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 6. Auflage, 352 S.
- ARNBERGER, E. (1994): Thematische Kartographie. Das Geographische Seminar. Westermann-Verlag Braunschweig
- BARTSCH, N. (1985): Ökologische Untersuchungen zur Wurzelentwicklung an Jungpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Kiefer (*Pinus sylvestris*). Ber. Forsch.zent. Waldökosyst., Universität Göttingen, 230 S.
- BAUMGARTNER, A. & H.J. LIEBSCHER (Hrsg.) (1996): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie, Zweite Auflage, 1, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2008): Leben mit dem Fluss – Hochwasser im Spiegel der Zeit. Augsburg
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (2004): Hochwasser – Naturereignis und Gefahr (SpektrumWasser 1), München

- BECKER, A., GÜNTNER, A. & D. KATZENMAIER (1999): Required integrated approach to understand runoff generation and flow path dynamics in catchments. In: Leibundgut, C., McDonnell, J. & G. Schultz (Eds.): Integrated methods in catchment hydrology – tracer, remote sensing and new hydrometric techniques, IAHS Publication, 258, S. 3-9
- BEIERKUHNLEIN, C. (1994): Waldquellfluren im Frankenwald – Untersuchungen zur reaktiven Bioindikation. Bayreuther Forum für Ökologie, 10, S. 1-253
- BEIERKUHNLEIN, C. & W. GRÄSLE (1993) Zum Temperaturverhalten von Waldquellen des Frankenwaldes (Nordostbayern). Crunoecia, 2, S. 5-14
- BEIERKUHNLEIN, C., RIEDEL, R. & V. AUDORFF (1999): Vergleich der wasserchemischen Eigenschaften von Waldquellen der silikatischen Mittelgebirge. Bayreuther Forum Ökologie, 71, S. 87-101
- BENECKE, P. & R.R. VAN DER PLOEG (1978): Wald und Wasser – II Quantifizierung des Wasserumsatzes am Beispiel eines Buchen- und eines Fichtenbestandes im Solling. Forstarchiv, 49, S. 26-32
- BERNHOFER, B., GOLDBERG, V. & J. FRANKE (2005): REKLI II – Optimierung der Klimadatenbank REKLI für Auswertungen im Bereich der Wasserwirtschaft. Institut für Hydrologie und Meteorologie der Universität Dresden
- BEVEN, K.J. & M. KIRKBY (1979): A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24(1), S. 43-69
- BEVEN, K.J. & P.F. GERMANN (1982): Macropores and water flow in soils. Wat. Resour. Res. 18(5), S. 1311-1325
- BIEWALD, W. & T. VOIGT (2004): Geologische Karte von Thüringen, 1:25.000, Blatt 5532 (Steinach), 2. neu bearbeitete Auflage, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena
- BINDER, F. & C. MACHER (2006): Integrale Planung von Erstaufforstungen zur Minderung der Hochwassergefahr im Einzugsbereich von Fließgewässern 3. Ordnung - Beispielsgebiet „Die Paar im Gemeindebereich Geltendorf“; unveröffentlichter Forschungsbericht, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 23 S.
- BISCHETTI, G.B., GANDOLFI, C. & M.J. WHELAN (1998): The definition of stream channel head location using digital elevation data. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters (Proceedings of the HeadWater'98 Conference held at Meran/Merano, Italy). IAHS Publ., 248
- BLANCKENHORN, M. (1895): Pseudoglaciale Erscheinungen in mitteldeutschen Gebirgen. Z. Dt. Geol. Ges., 47, S. 576-581
- BLÖSCHL, G. (1996): Scale and Scaling in Hydrology. Habilitationsschrift, Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, 132, Institut für Hydraulik, Technische Universität Wien, 346 S.
- BMELV - BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (Hrsg.) (2004): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI². Das Wichtigste in Kürze. 87 S.
- BODSCHÄTZG (2007): Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz - BodSchätzG) vom 20. Dezember 2007, BGBl. I, S. 3150-3176

- BÖHNER, J., KÖTHE, R., CONRAD, O., GROSS, J., RINGELER, A. & T. SELIGE (2002): Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation. In: Micheli, E., Nachtergaele, F. & L. Montanarella (Eds.): Soil Classification 2001. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg, S. 213-222
- BONELL, M. (1993): Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *J. Hydrol.*, 150, S. 217-276
- BONELL, M. (1998): Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34(4), S. 765-785
- BORK, H.R., BORK, H., DALCHOW, C., FAUST, B., PIORR, H.P. & T. SCHATZ (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa: Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Klett-Perthes-Verlag, Gotha, 328 S.
- BOSCH, J.M. & J.D. HEWLETT (1982): A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55, S. 3-23.
- BOTT, W. (2002): Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten, Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
- BRINKMANN, J. (2002): Räumliche Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften auf dem landwirtschaftlichem Versuchsgut Frankenforst im Pleiser Hügelland. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- BÜDEL, J. (1977): Klima-Geomorphologie. Stuttgart, 304 S.
- BÜDEL, J. (1981): Klimageomorphologie. 2. veränderte Auflage, Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart, 304 S.
- BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Berichte des BWG, Serie Wasser, Bern, 118 S.
- BUNZA, G. (1978): Vergleichende Messungen von Abfluß- und Bodenabtrag auf Almflächen des Stubnerkogels im Gasteiner Tal. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck
- BUNZA, G. & T. SCHAUER (1989): Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen. Informationsbericht 2/89 des Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft, München, S. 127-150
- BUNZA, G., JÜRGING, P., LÖHMANNSRÖBEN, R., SCHAUER, TH. & R. ZIEGLER (1996): Abfluss- und Abtragungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten – Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schr.reihe Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, 27, 90 S.
- BURCH, G.J., I.D. MOORE & J. BURNS (1989): Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrol. Process.*, 3, S. 211-222
- BURGER, H. (1922) Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. *Mitt. Schweiz. Central-anst. forstl. Vers'wes.* XIII(1), S. 3-221

- BURSE, K. (2006): Postglaziale Waldgeschichte. In: Burse, K., Geiling, S., Meinhardt, H. & J. Schramm: Die forstlich-standörtlichen Verhältnisse Thüringens – Teil A. Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, unveröffentlicht
- BUTTLE, J.M., DILLON, P.J. & G.R. EERKES (2004): Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield. *J. Hydrol.*, 287(1-4), S. 161-177
- CHANG, M. (2006): *Forest Hydrology*. 2. Auflage, CRC Press, New York, 474 S.
- CHIFFLARD, P. (2006): Einfluss des Reliefs, der Hangsedimente und der Bodenfeuchte auf die Abflussbildung im Mittelgebirge – Experimentelle Prozess-Studien im Sauerland. Dissertation, Bochumer Geographische Arbeiten, 76, Geografisches Institut der Ruhr-Universität Bochum
- CHIFFLARD, P., J. DIDSZUN & H. ZEPP (2008): Skalenübergreifende Prozess-Studien zur Abflussbildung in Gebieten mit periglazialen Deckschichten (Sauerland, Deutschland). *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 13, S. 27-41
- CHORLEY, R.J. (1978): Chapter 1: The hillslope hydrologic cycle. In: M.J., Kirkby (Eds.), *Hillslope Hydrology*. Wiley and Sons, Chichester, S. 1-42
- CONRAD, O. (1998): Die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter aus digitalen Geländemodellen – am Beispiel des Einzugsgebietes Linnengrund/Kaufunger Wald. Diplomarbeit, Georg-August-Universität Göttingen, Internet: www.mirror-service.org/sites/download.sourceforge.net/pub/sourceforge/s/sa/sagagis/conrad_1998_diplom.pdf, (abgefragt am: 12.10.2008)
- COSANDEY, C., ANDRÉASSIAN, V, DIDON-LESCOT J.F. u.a. (2005): The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.*, 301, S. 235-249
- DAHMER, J. (1997): Wurzelentwicklung von Laubholzpflanzen auf Sturmkahlfächen. In: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Pflanzverfahren und Wurzelentwicklung. LWF-Bericht Nr. 15, Freising
- DEBANO, L.F. (2000): Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.*, 231-232, S. 4-32
- DE HAAR, U. & D. HOFFMANN (Hrsg.) (1982): *Wasser aus dem Wald – Wasser für den Wald*. Ein Rundgespräch der Deutschen Forschungsgemeinschaft. *Beitr. z. Hydrol.*, 4, 343 S.
- DELFS, J., FRIEDRICH, W., KIESEKAMP, H. & A. WAGENHOFF (1958): Der Einfluss des Waldes und des Kahlschlags auf den Abflussvorgang, den Wasserhaushalt und den Bodenabtrag. *Aus dem Walde – Mitteilungen aus der niedersächsischen Landesforstverwaltung*, 3, 223 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2005): Starkniederschlagshöhen für Deutschland. Fortschreibungs- und Grundlagenbericht. KOSTRA-DWD-2000-Atlas (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen), Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.
- DIETRICH, W.E., RENEAU, S.L. & C.J. WILSON (1987): „Zero-order basins“ and problems of drainage density, sediment transport and hillslope morphology. In: Beschta, R.L., Blinn, T., Grant, C.E., Swanson, F.J. & G.G. Ice (Eds.): *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim*, IAHS Publ., 165, S. 27-37

- DIETRICH, W.E. & T. DUNNE (1993): The channel head. In: K. Beven & M.J.Kirkby (Eds.): Channel network hydrology. S. 175-219
- DIETRICH, J. & M. SCHÖNIGER (2007): HydroSkript der TU Braunschweig. Version 3.1 vom 01.10.2007, http://www.hydroskript.de/html/_index.html?page=/html/hykp0402.html (abgerufen am: 26.01.2009)
- DIKAU, R. & J. SCHMIDT (1999): Georeliefklassifikation. In: Schneider-Sliwa, R., Schaub, D. & G. Gerold (Hrsg.): Angewandte Landschaftsökologie – Grundlagen und Methoden. Springer-Verlag, Berlin, 560 S.
- DIKAU, R. & K. FRIEDRICH (1999): Digitale Reliefmodellierung. In: Zepp, H. & M.J. Müller (Hrsg.): Landschaftsökologische Erfassungsstandards – Ein Methodenbuch. Forschungen zur deutschen Landeskunde, 244, Flensburg, S. 50-74
- DIN 4049-Teil 1 (1992): Hydrologie, Grundbegriffe. Normenausschuss für Wasserwesen, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN ISO 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. S. 1-37
- DUNNE, T. & R.D. BLACK (1970a): A experimental investigation of runoff production in permeable soils. Water Resour. Res., 6, S. 478-490
- DUNNE, T. & R.D. BLACK (1970b): Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. Water Resour. Res., 6(5), S. 1296-1311
- DWD & LWF (Hrsg.) (2009): Neue hoch aufgelöste Klimakarten für die Wälder Bayerns als Bestandteil eines forstlichen Standortinformationssystems. Projekt ST192, bearbeitet von geoKLIM, Abschlussbericht
- DYCK, S. (Hrsg.) (1980): Angewandte Hydrologie – Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flußgebiete. VEB Verlag für Bauwesen, 2. Auflage, 544 S., Berlin
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen zur Hydrologie. Verlag für Bauwesen, 3. Auflage, 536 S., Berlin
- EMMERT, U. & G. VON HORSTIG (1972): Geologische Karte von Bayern 1:25.000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 5734 Wallenfels, 240 S.
- ENGLER, A. (1919): Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitt. Schweiz. Centralanst. forstl. Vers'wes., 12
- ESRI - Environmental Systems Research Institute (2009): Online-Produktbeschreibung. Internet: <http://www.esri-germany.de/products/arcgis/about/desktop.html> (abgerufen am: 22.08.2009)
- FARRENKOPF-HILDEBRANDT, D. (1996): Die Steuerfunktion des Reliefs für die Abflussbildung. Dissertation, Geographisches Institut der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 243 S.
- FLÜGEL, W.A. & O. SCHWARZ (1983): Oberflächenabfluss und Interflow auf einem Braunerde-Pelosol Standort im Schönbuch; Ergebnisse eines Beregnungsversuchs. Allg. Forst-Jagdztg., 154(3), S. 59-64

- FOERST, K. (1980): Standort, Wuchsleistung und Ernährungszustand älterer bayerischer Bestände der grünen Douglasie. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, 41, S. 1-256
- FORSTEINRICHTUNGSWERK ROTHENKIRCHEN (2008): Forsteinrichtungswerk des Forstbetriebes Rothenkirchen (Frankenwald). Unveröffentlicht
- FÖRSTER (1996): Standortswerk für die Forstämter Bad Steben und Nordhalben. Unveröffentlicht
- FREHNER, M., WASSER, B. & R. SCHWITTER (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- FREER, J., MCDONNELL, J., BEVEN, K.J., BRAMMER, D., BURNS, D., HOOPER, R.P. & C. KENDAL (1997): Topographic controls on subsurface storm flow at the hillslope scale for two hydrologically distinct small catchments. Hydrol. Process., 11, S. 1347-1352
- FRIEDRICH, K. (1996): Digitale Reliefklassifikationsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, 21, 213 S.
- FRISCH, M. (1979): Der Mensch erscheint im Holozän. Suhrkamp, Frankfurt am Main
- FRISCHBIER, N., KAHLERT, K. WEBER, S. & W. ARENHÖVEL: Zur Situation der Weiß-Tannen-Vorkommen in Thüringen. AFZ-DerWald, 17/2009, S. 922-924
- FÜHRER, W.W. (1990): Einflüsse des Waldes und waldbaulicher Maßnahmen auf Höhe, zeitliche Verteilung und Qualität des Abflusses aus kleinen Einzugsgebieten – Projektstudie im Krofdorfer Buchenforst. Schriftenreihe der forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München, 106, 353 S.
- FÜRST, J. (2004): GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. Herbert Wichmann Verlag. Heidelberg, 336 S.
- GAYER, K. (1889): Der Waldbau. 3. Aufl., Berlin, 619 S.
- GEILING S. & K. BURSE (2008): Standortsformen. In: Burse, K., Geiling, S., Meinhardt, H. & J. Schramm: Die forstlich-standörtlichen Verhältnisse Thüringens – Teil B. Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, unveröffentlicht
- GEOTEAM (2002): Erstellung der Konzeptbodenkarte für die bayerischen Anteile der Blätter Nr. 5634 (Teuschnitz), 5534 (Lehesten) und 5434 (Leutenberg) im Maßstab 1:25.000 und Kurzbeschreibungen der Kartierverfahren und Erfahrungen zur Kartiermethodik. Gesellschaft für angewandte Geoökologie und Umweltschutz mbH, Naila, unveröffentlicht
- GERZABEK, M. H., SCHWARZ, S., ENGLISCH, M. & A. BAUMGARTEN (2002): Boden – die unterschätzte Ressource? Wege zur Nutzung österreichischer Bodendatens(ch)ätze. Ländlicher Raum, 1, S. 1-13
- GLASER, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Primus Verlag, Darmstadt, 227 S.,
- GÖTTLE, A. (2006): Was erwartet die Wasserwirtschaft von der Forstwirtschaft hinsichtlich der Hochwasservorsorge? LWF Wissen 55, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, S. 24-28

- GREIFFENHAGEN, A. (2005): Einfluss der Humusaufgabe auf das Benetzungsverhalten und den Wasserhaushalt von Kiefernstandorten (Berlin). Dissertation, Bodenökologie und Bodengenese, 37, Technische Universität Berlin
- GUILLEMETTE, F., PLAMONDON, A.P., PREVOST, M. & D. LEVESQUE (2005): Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: peak flow comparison with 50 world-wide basin studies. *J. Hydrol.*, 302, S. 137-153.
- GÜNTHER, K.H. (1979): *Wald und Wasser – Entwicklung und Stand*. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin
- GUNZELMANN, T. & C. Dorn (2006): Die Kulturlandschaft der Flößerei im Frankenwald – ein komplexes System und seine Relikte. In: *Heimatkundliches Jahrbuch des Landkreises Kronach*, 24/2003 - 2006, S. 83-161
- GUTSCHICK, V. (1950): *Forstliche Standortskunde als Grundlage für den praktischen Waldbau*. Schaper Verlag, 259 S.
- HAMMEL, K. & M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell Brook90. *Forstl. Forschungsber. München*, 185
- HARR, R.D. (1977): Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *J. Hydrol.*, 33, S. 37-58.
- HEGG, C., A. BADOUX, P. LÜSCHER & J. WITZIG (2004): Zur Schutzwirkung des Waldes gegen Hochwasser. *Forum für Wissen 2004*, S. 15-20
- HEINRICH, J. (1991): Ursachen von Sturmschäden in Buchenbeständen (*Fagus silvatica*) aus bodengeographischer Sicht. *Allg. Forst- Jagdztg.*, 162(8), S. 145-149
- HENNEGRIFF, W., KOLOKOTRONIS, W., WEBER, H. & H. BARTELS (2006): Klimawandel und Hochwasser. *ATV-DVWK KA-Abwasser, Abfall* 8
- HEWLETT, J.D. (1961): *Soil moisture as a source of baseflow from steep mountain watersheds*. US Forest Service Southeast, Forest Experimental Station Research Paper SE 132
- HEWLETT, J.D. (1982): *Principles of forest hydrology*. University of Georgia Press, Athens
- HEWLETT, J.D. & A.R. HIBBERT (1967): Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: *Sopper, W.E. & H.W. Lull (Eds.): International Symposium on Forest Hydrology*, S. 275-290
- HEWLETT, J.D., FORSTON, J.C. & G.B. CUNNINGHAM (1977): The effect of rainfall intensity of stormflow and peak discharge from forest land. *Water Resour. Res.*, 13, S. 259-266
- HIBBERT, A.R. (1967): Forest treatment effects on water yield. In: *Sopper W.E. & H.W. Lull (Eds.), International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon Press, New York, S. 527-543
- HILF, H.H. (1927): *Studien über die Wurzel-Ausbreitung von Fichte, Buche und Kiefer, in geschlossenen älteren Beständen, insbesondere auf Sandböden*. Dissertation, Eberswalde, 121 S.
- HOFFMANN, J. (1959): Untersuchungen über das Wachstum der Fichte auf einigen Standortformen des südöstlichen Thüringer Waldes. *Arch. Forstwes.*, 8(6/7), S. 536-591

- HOFFMANN, E. (1960): Der Ahorn. Wald-, Park- und Straßenbaum. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Leipzig, 190 S.
- HORSTIG, G. (1979): Geologische Karte von Bayern, 1:25.000, Blattnummer 5633 (Sonneberg) und 5634 (Teuschnitz). Bayrisches Geologisches Landesamt München
- HORSTIG, G., Apel, R., Bader, K., Berger, K. & O. Wittmann (1979): Erläuterungen zum Blatt Nr. 5633 (Sonneberg) und Nr. 5634 (Teuschnitz). Bayrisches Geologisches Landesamt München
- HORTON, R.E. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. EOS Trans. AGU, 14, S. 460-466
- IPCC (2007): Climate change 2007. Summary for Policymakers: Impacts, Adaption and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - Cambridge University Press, Cambridge
- JAEGER, K.L., MONTGOMERY, D.R. & S.M. BOLTON (2007): Channel and perennial flow initiation in headwater streams: Management implications of variability in source-area size. Environ Manage, 40, S. 775-786
- JENSON, S.K. & J.O. DOMINIQUE (1988): Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis. Photogramm. Eng. Remote Sens., 54(11), S. 1593-1600
- JENSEN, J.K., RASMUSSEN, L.H., RAULUND-RASMUSSEN, K. & O.K. BORGGAARD (2008): Influence of soil properties on the growth of sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) in Denmark. Eur. J. For. Res., 127, S. 263-274
- JONES, J.A.A. (1987): The effects of soil piping on contributing area and erosion pattern. Earth Surf. Process. Landf., 12, S. 229-248
- JONES, J.A. & G.E. GRANT (1996): Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon. Water Resour. Res., 32, S. 959-974.
- JONES, J.A. & D.A. POST (2004): Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States. Water Resour. Res., 40, S. 1-19
- JOST, G., SCHUME, H. & H. HAGER (2004): Factors controlling soil water-recharge in a mixed European beech (*Fagus sylvatica* L.) – Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] stand. Eur. J. For. Res., 123(2), S. 93-104
- KAINZ, M., AUERSWALD, K. & R. VÖHRINGER (1992): Comparison of German and Swiss rainfall simulators – utility, labour demands and costs. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 155, S. 7-11
- KARL, J. (1983): 10 Jahre Abfluß- und Erosionsmessungen auf land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen mit Hilfe künstlicher Starkregen. Informationsber. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft Nr. 1/1983, S. 190-204
- KARL, J. & H. TOLDRIAN (1973): Eine transportable Berechnungsanlage für die Messung von Oberflächenabfluss und Bodenabtrag. Wasser u. Boden, 25, S. 63-65

- KARL, J. & M. PORZELT (1976): Vergleichende Messungen von Abfluss- u. Bodenabtrag. Bau Intern, 3
- KARL, J., PORZELT, M. & G. BUNZA (1985): Oberflächenabfluss und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. DVWK-Schr., Paul Parey Verlag, 71, S. 37-102
- KATZSCHNER, W. (Hrsg.) (2007): Das Verfahren der forstlichen Standortserkundung in Sachsen unter besonderer Berücksichtigung des reliefbedingten Wasserhaushaltes. In: Wasserhaushalt von Waldstandorten des Tharandter Waldes. Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 2.-9. Sept. 2007 in Dresden, Exkursionsführer G3. Internet: http://boku.forst.tu-dresden.de/Boden/pdf/Exkursionsfuehrer_G3.pdf (abgerufen am: 23.11.2008)
- KIRKBY, M.J. & R.J. CHORLEY (1967): Throughflow, overland flow and erosion. Internat. Assoc. Sci. Hydrology Bull., 12(3), S. 5-21
- KLEBER, A. (1991): Die Böden Mittel- und Oberfrankens. In: Zech, W. (Hrsg.): Exkursionsführer zur Jahrestagung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft 1991 in Bayreuth. Bayreuther Bodenkundlicher Berichte, 17, S. 83-105
- KLEBER, A. & A. SCHELLENBERGER (1998): Slope hydrology triggered by cover-beds. With an example from the Frankenwald Mountains, northeastern Bavaria. Z. Geomorphol., 42, S. 469-482
- KLEBER, A., LINDEMANN, J., SCHELLENBERGER, A., Beierkuhnlen, C., Kaupenjohann, M. & S. Pfeiffer (1998): Slope deposits and water paths in a spring catchment, Frankenwald, Bavaria. Nutri. Cycl. Agroecosyst., 50, S. 119-126
- KLEEBERG, H.B. & K.H. ROTHER (1996): Hochwasserflächenmanagement in Flusseinzugsgebieten. Wasser & Boden, 48(2), S. 24-32
- KOHL, B. & L. STEPANEK (2005): ZEMOKOST – neues Programm für die Abschätzung von Hochwasserabflüssen. BFW-Praxisinformation 8/2005, S. 21-22
- KÖHN, M. (1928): Bemerkungen zur mechanischen Bodenanalyse. III. Ein neuer Pipettapparat. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, A. Wissenschaftlicher Teil, XI., S. 50-54
- KÖLLING (2005): Waldatlas Bayern – Karten, Tabellen und Texte zur Forstlichen Wuchsgebietsgliederung. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising
- KÖLLING, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. In: LWF-Wissen: Die Douglasie – Perspektiven im Klimawandel, Berichte der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 59, S. 12-21
- KÖSTLER, J.N., BRÜCKNER, E. & H. BIBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume – Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin, 284 S.
- KÖTHE, R. (1996): Entwicklung eines Systems der digitalen Reliefanalyse für geowissenschaftliche Anwendungen – insbesondere als Element bodenkundlicher Vorhersagemodelle. Abschlussbericht zum DFG-Projekt "Digi-Relief" (1989 - 1993), Geografisches Institut der Universität Göttingen, unveröffentlicht, 94 S.

- KÖTHE, R. & F. LEHMEIER (1996): SARA – Ein System zur automatischen Relief-Analyse. Benutzerhandbuch, Göttingen, unveröffentlicht
- KOPP, D. (1958): Standortslehre – Lehrbrief 12, Angewandte forstliche Standortkunde, Lehrbriefe für das Fachschul-Fernstudium. Fachschule für Forstwirtschaft Schwarzburg, unveröffentlicht
- KOPP, D. & W. SCHWANECKE (2003): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft – Grundzüge von Verfahren und Ergebnissen der forstlichen Standortserkundung in den fünf ostdeutschen Bundesländern. Verlag Dr. Kessel, Reprint der Originalausgabe von 1994, Remagen
- KRAUSS, G., MÜLLER, K., GÄRTNER, G., HÄRTEL, F., SCHANZ, H. & H. BLANCKMEISTER (1939): Standortgemäße Durchführung der Abkehr von der Fichtenwirtschaft im nordwestsächsischen Niederland. Tharandter Forstl. Jahrb., 90, S. 481-715
- KREUTZER, K. (1961): Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwiss. Cent.bl., 80, S. 356-392
- KRON, W. (2005): Sturmfluten, Flussüberschwemmungen, Sturzfluten – Schäden und Vorsorgestrategien. In: Schadenspiegel – Themenheft Wasser. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 3/2005, 48, München
- KRÜGER, W. & E. EHWALD (1978): Zusammenhänge zwischen Wasserdurchlässigkeit und anderen Bodenparametern in skeletthaltigen Substraten. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde, 22(1), S. 15-22
- KUGLER, H. (1974): Das Georelief und seine kartographische Modellierung. Dissertation, Martin Luther Universität Halle
- KUHR, M. (1999): Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- KUTSCHERA, L. & E. LICHTENEGGER (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker Verlag, Graz-Stuttgart, 604 S.
- LANGGUTH, R.H. & R. VOIGT (2004): Hydrogeologische Methoden. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York,
- LAWUF (2000): Legende zu den forstlichen Standortskarten Wuchsbezirk „Hohes Schiefergebirge“ und Teilwuchsbezirk „Westlicher Frankenwald“. Thüringer Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft – Referat Standorts-, Boden- und Vegetationskunde, 51 S.
- LEHNARDT, F. (1985): Einfluss morphopedologischer Eigenschaften auf Infiltration und Abflussverhalten von Waldstandorten. DVWK-Schr., 71, Paul Parey Verlag, Hamburg-Berlin S. 231-260
- LEROCH, K. (2006): Hydrologische Modellbildung auf verschiedenen Skalen unter Einbeziehung großflächiger Beregnungsversuche. Dissertation, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien
- LESER, H. (1980): Die Wölbung in der geomorphologischen Karte. Kartographische Nachrichten, 30, S. 11-24

- LEUSCHNER, C. (1998): Water extraction by tree fine roots in the forest floor of a temperate Fagus-Quercus forest. *Ann. Sci. For.*, 55, S. 141-157
- LEYTON, L.E., REYNOLDS, R. C. & F.B. THOMPSON (1967): Rainfall interception in forest and moorland. *International Symposium on Forest Hydrology Proc.*, Oxford - England, S. 163-177
- LIEBHARD, A. (1973): Der Frankenwald. Die Auswirkungen von Flößerei und Forstwirtschaft auf die Waldbestockung. *Allgemeine Forstzeitschrift* 28/1973, S. 640-645
- LIEBSCHER, H.J. (1991): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt. In: *Wasserwirtschaft*, 81(1), S. 5-10.
- LÖHMANNSRÖBEN, R. (1999): Die Analyse von Abflussprozessen und ihr Zusammenhang mit beschleunigten Abtragsprozessen im Gebirge. *Relief, Boden, Paläoklima*, 14, Gebr. Borntraeger, S. 129-148
- LÖHMANNSRÖBEN, R. (2001): Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. *Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose*, *Wiener Mitteilungen*, 164, S. 201-213
- LÖHMANNSRÖBEN, R., ALTFELD, O, BUNZA, G., EIDT, M., FISCHER, A. JÜRGING, P., SCHAUER, T. & R. ZIEGLER (2000): Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluß- und Abtragsgeschehen in Wildbacheinzugsgebieten. Bayer. Landesamt f. Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 87, München
- LORETZ, H. (1885): Erläuterungen zur Geologische Spezialkarte von Preußen 1:25.000, Blatt 5633 (Sonneberg)
- LUDWIG, K. (1969): Oberflächenabfluss. Bodenerosion und vorbeugender Hochwasserschutz. *Wasserwirtschaft, Wassertechnik*, 19(4), S. 130-134
- LÜERS, J. & T. FOKEN (2004): Klimawandel in Oberfranken. *Der Siebenstern*, 73, S. 149-153
- LULL, H. & K. REINHARDT (1972): Forest and Floods in the Eastern United States. U.S.D.A. – Forest Service Research Paper NE-226
- LÜSCHER, P. & K. ZÜRCHER (2002): Wald schützt nicht immer vor Hochwasser. *Eidg. Forschungsanstalt WSL, Informationsblatt Forschungsbereich Wald*, 9, S. 1-2
- LWF (2001): Forstliche Wuchsgebietsgliederung Bayerns. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- MÄGDEFRAU, K. & A. WUTZ (1951): Die Wasserkapazität der Moos- und Flechtendecke des Waldes. *Forstwiss. Cbl.* 70(2), S. 103-117
- MARKART, G., KOHL, B. & P. ZANETTI (1997): Oberflächenabfluss bei Starkregen – Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchtfächen, (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesa – Bürserberg, Vorarlberg). *Cblt. ges. Forstwesen*, 114(2/3), S. 123-144
- MARKART, G., KOHL, B., PRAMSTRALLER, A. & W. GALLMETZER (2000): Wirkungen von Begrünungen auf das Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei Starkregen. *Interpraevent*, 2, S. 53-64
- MARKART, G, KOHL, B., SOTIER, B., SCHAUER, T., BUNZA, G. & R. STERN (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Bo-

- den-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Schriftenreihe des Bundesamts und Forschungszentrums für Wald, 3, 83 S.
- MARKART, G & B. KOHL (2004): Abflussverhalten in Wildbacheinzugsgebieten bei unterschiedlicher Landnutzung. Wildbach- und Lawinenverbau, 149, S. 9-20
- MCCULLOCH, J. & M. ROBINSON (1993): History of forest hydrology. J. Hydrol., 150, S. 189-216
- MCDONNELL, J.J. (1997): Comment on „The changing spatial variability of subsurface flow across a hillside” by Ross Woods and Lindsay Rowe. J. Hydrol., 36(1), S. 97-100
- MEGAHAN, W.F., WILSON, M. & S.B. MONSEN (2001): Sediment production from granitic cut-slopes on forest roads in Idaho. Earth Surf. Proc. Land., 26, S. 153-163
- MEINHARDT, H. (2006): Landschaftliche Gliederung. In: Burse, K., Geiling, S., Meinhardt, H. & J. Schramm (2006): Die forstlich-standörtlichen Verhältnisse Thüringens – Teil A, Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, unveröffentlicht
- MENDEL, H.G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufes: Eine kommentierte Bibliographie zur Abflußbildung. Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Analytica, Berlin
- MOESCHKE, H. (1998): Abflussgeschehen im Bergwald – Untersuchungen in drei bewaldeten Kleineinzugsgebieten im Flysch der Tegernseer Berge. Forstliche Forschungsberichte München, 169
- MOLLENHAUER, K., MÜLLER, S. & B. WOHLRAB (1985): Oberflächenabfluss und Stoffabtrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen – Untersuchungsergebnisse aus dem Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre. DVWK-Schr., 71, Paul Parey Verlag, S. 37-102
- MONTGOMERY, D.R. & W.E. DIETRICH (1989): Channel initiation, drainage density and slope. Water Resour. Res., 25(8), S. 1907-1918
- MONTGOMERY, D.R. & E. FOUFOULA-GEORGIU (1993): Channel network source representation using digital elevation models. Water Resour. Res., 29(12), S. 3925-3934
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. & A.R. LADSON (1991): Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. Hydrol. Process., 5, S. 3-30
- MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A. & G.A. PETERSON (1993): Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, S. 443-452
- MOSLEY, M.P. (1982): Subsurface flow velocities through selected forest soils, South Island, New Zealand, J. Hydrol., 55, S. 65-92
- MÜLLER, J., BECK, W., HORNSCHUCH, F. & A. STEINER (2002): Quantifizierung der ökologischen Wirkungen aufwachsender Kiefern-Buchen-Mischbestände im nordostdeutschen Tiefland. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol., 3, S. 125-131.
- MÜLLER, S.A. (2010): Lohnen die Mühen und Kosten? Zum aktuellen Zustand der Weißtannen-Voranbauten in Thüringen. Das Blatt – Mitarbeiterinformationen der Thüringer Landesforstverwaltung. Ausgabe 1/2010, S. 11-14, unveröffentlicht
- MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNG-GESELLSCHAFT (1997): Überschwemmung und Versicherung. München

- MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT (2007): Zwischen Hoch und Tief. Wetterrisiken in Mitteleuropa. München
- NACKEN, H. (2006): Wasserwirtschaft und Hydrologie I. Vorlesungsskript der RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Ingenieurhydrologie, unveröffentlicht
- NAEF, F., SCHERRER, S. & M. WEILER (2002): A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change, *J. Hydrol.*, 267, S. 74-79.
- NAEF, F., MARGRETH, M., SCHMOCKER-FACKEL, P. & S. SCHERRER (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser Energie Luft*, 99(3), S. 267-272
- NAGEL, J., ALBERT, M. & M. SCHMIDT (2002): Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1. *Forst u. Holz*, 57(15/16), S. 486-493
- NIEHOFF, D. (2001): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Potsdam
- NORDMANN, B., GÖTTLEIN, A. & F. BINDER (2009a): Einfluss unterschiedlicher Waldbestockung auf die Abflussbildung – ein Beispiel aus einem Wassereinzugsgebiet im Frankenwald. *Hydrol. Wasserbewirtsch.*, 53(2), S. 80-95
- NORDMANN, B., GÖTTLEIN, A. & F. BINDER (2009b): Einfluss verschiedener Baumarten auf das Abflussgeschehen – Ergebnisse eines Berechnungsversuchs im Frankenwald, *Thüringen. Forst und Holz*, 64, S. 2-11
- NULTSCH, W. (2001): Allgemeine Botanik. 11. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart und New York, 663 S.
- PATZNER, K.M. (2004): Die Transpiration von Waldbäumen als Grundlage der Validierung und Modellierung der Bestandestranspiration in einem Wassereinzugsgebiet des Flusses 'Ammer'. Dissertation, Technische Universität München
- PESCHKE, G., C. ETZENBERG, G. MÜLLER, J. TÖPFER & S. ZIMMERMANN (1999): Das wissenschaftsbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. *IHI-Schriften*, 10, Zittau, 122 S.
- PFEIFFER, M. (2002): Periglaziale Lagen – ihre Zuordnung zum Relief und ihre sedimentologisch-pedologische Differenzierung sowie ihre Auswirkungen auf Standortqualitäten anhand ausgewählter Beispiele aus dem Steigerwald. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Ludwig-Maximilians-Universität München
- PILGRIM, D.H., HUFF, D.D. & T.D. STEELE (1978): A field evaluation of subsurface and surface runoff. *Runoff processes. J. Hydrol.*, 38, S. 319-341
- PLOMBSKI, J. & N. KUHN (1998): Wurzelsysteme. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Bern, Stuttgart, Wien, 290 S.
- POLSTER, H. (1950): Die physiologischen Grundlagen der Stoffherzeugung im Walde. Bayerischer Landwirtschaftsverlag München
- PROFFT, I., SEILER, M. & W. ARENHÖVEL (2007): Die Fichte im Spiegel des Klimawandels – Zukunftsorientierte Fichtenwirtschaft. *Schriftenreihe des TLWJF* 28/2007, S. 68-79

- O`CALLAGHAN, J.F. & D.M. MARK (1984): The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, S. 323-344
- QUINN, P.F., BEVEN, P., CHEVALLIER, P. & O. PLANCHON (1991): The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrol. Process.*, 5, S. 59-79
- QUINN, P.F., BEVEN, K.J. & R. LAMB (1994): The $\ln(a/\tan\alpha)$ index: How to calculate it and how to use it within the Topmodel framework. *Hydrol. Process.*, 9, S. 161-182
- RACHTEJENKO, J.N. (1952): Die Wurzelsysteme der Baum- und Straucharten. Golesumisdat, Moskau. Zitiert in: Kuhr, M. (1999): Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- RAPP, J. (Hrsg.) (2008): *Promet – Meteorologie und Versicherungswirtschaft*. Deutscher Wetterdienst - Meteorologische Fortbildung, 34(1/2), 76 S.
- RASPE, S., HÄBERLE, K.H., ZIMMERMANN, L. & W. GRIMMEISEN (2008): Was bedeuten milde Winter für den Wasserhaushalt unserer Wälder?. In: FVA Freiburg (2008): Tagungsbericht. Kolloquium des DBG-Arbeitskreises Waldböden und der Sektion Wald und Wasser im Verband Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalten in Freiburg am 24. und 25. April 2008
- RAU, D., SCHRAMM, H. & J. WUNDERLICH (2000): Die Leitbodenformen Thüringens. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, *Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen*, 3, Weimar, 100 S.
- Renger, M. (1971): Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 130(1), S. 53-67
- REUTER, F., KLENGEL, K.J. & J. PAŠEK (1992): *Ingenieurgeologie*. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig/Stuttgart, 603 S.
- RICE, K.C. & G.M. HORNBERGER (1998): Comparison of hydrochemical tracers to estimate source contributions to peak flow in a small, forested, headwater catchment. *WRR* 34(7), S. 1755-1766
- RICHTER, G. & B. SIEGEL (2002): Vorbeugender Hochwasserschutz – eine Aufgabe der Raumordnung. *Wasser & Boden* 54(1/2), S. 47-51
- RICKLI, C. & F. FORSTER (1997): Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 148(5), S. 367-385
- ROEDER, J. (2007): Digitale Reliefklassifikation und Erstellung eines Prognosemodells zur räumlichen Variabilität von periglazialen Deckschichten auf unterschiedlichen Skalen räumlicher Auflösung im Otterbachtal (Falkensteiner Vorwald) als Einzugsgebiet 2. Ordnung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Regensburg
- RUTTE, E. (1981): *Bayerns Erdgeschichte*. Der geologische Führer durch Bayern. 1. Aufl., Ehrenwirt, München, 266 S.

- SAUER, D. (2002): Genese, Verbreitung und Eigenschaften periglaziärer Lagen im rheinischen Schiefergebirge – anhand von Beispielen aus Westerwald, Hunsrück und Eifel. Dissertation, Universität Marburg/Gießen,
- SCHABER, R. (1933): Waldbauliches aus Thüringen. Thüringische Hauptlandwirtschaftskammer, 16, Weimar, 253 S.
- SCHÄFER, B., BENS, O. FISCHER, H. & R.F. HÜTTL (2002): Einfluss des Baumartenwechsels auf die Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden Nordost-Brandenburgs. Forst und Holz, 57, S. 571-575
- SCHÄUBLE, H. (2003): HydroTools 1.0 für ArcView 3.x., TERRACS – Geographische Informationssysteme und Dienstleistungen, Tübingen,
Internet: www.terracs.com/hydrotools_deu.pdf (abgerufen am: 13. 01. 2009)
- SCHENK, W. (1996): Waldnutzung, Waldzustand und regionale Entwicklung in vorindustrieller Zeit im mittleren Deutschland. Historisch-geographische Beiträge zur Erforschung von Kulturlandschaften in Mainfranken und Nordhessen. Erdkundliches Wissen, 117, Stuttgart, 271 S.
- SCHERRER, S. (1997): Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 147
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Bericht 18/2006
- SCHERRER, S. (2007): Hochwasserabschätzung als Synthese von Statistik, Historie und Abflussprozessen. Wiener Mitteilungen, S. 1-15
- SCHERRER, S. & F. NAEF (2003): A decision scheme to identify dominant hydrological flow processes on temperate grassland. Hydrol. Process., 17, S. 391-401
- SCHERZER, J., IRRGANG, S. & S. SONNEMANN (2005): Wasserhaushalt und Niederschlag-Abfluss-Prozesse bei Landnutzungsänderungen im Osterzgebirge I: Einfluss von Aufforstung und Waldumbau auf den Wasserhaushalt von sächsischen Mittelgebirgsstandorten; Tagungsband EMTAL-Workshop 6./7.10.2005 in Freiberg, Matschullat, J. (Hrsg.), IÖZ der TU Bergakademie Freiberg, S. 69-78.
- SCHILLING, W. & H. WIEFEL (1962): Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes. Geologie, 11, S. 428-460
- SCHILLING, B. & E.D. SPIES (1991): Die Böden Mittel- und Oberfrankens. Bayreuther bodenkundliche Berichte, 14, S. 67-81
- SCHMIDT, O. (2004): Die Tanne im Frankenwald. LWF Wissen, 45, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising
- Schmocker-Fackel, P. (2004): A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 15638
- SCHNEIDER, M. (1998): 25 Jahre Naturpark Frankenwald e.V.. Verein Naturpark Frankenwald e.V., Kronach

- SCHOCH, O. (1964): Untersuchungen über die Stockraumbewurzelung verschiedener Baumarten im Gebiet der oberschwäbischen Jung- und Altmoräne. Standort, Wald und Waldwirtschaft in Oberschwaben, Arbeitsgemeinschaft «Oberschwäbische Fichtenreviere» (Hrsg.), Stuttgart, S. 93-148
- SCHOLTEN, T. (2003): Beitrag zur flächendeckenden Ableitung der Verbreitungssystematik und Eigenschaften periglaziärer Lagen in deutschen Mittelgebirgen. Relief - Boden - Paläoklima, 19, Gebr. Borntraeger, Berlin/Stuttgart
- SCHOLTEN, T. & T. BEHRENS (2004): Methoden der GIS-gestützten Erstellung von Bodenprognosekarten am Beispiel des Ostharrzes und des Schwarzerdegebiets in Sachsen-Anhalt. In: Möller, M. & H. Helbig (Hrsg.): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze, Heidelberg, S. 45-66
- SCHRAMM, H.J. (1983): Legende zu den Standortskarten des Staatlichen Forstwirtschaftsbetriebes Sonneberg. VEB Forstprojektplanung Sonneberg, unveröffentlicht
- SCHRAMM, J. & K. BURSE (2008): Standortseinheiten. In: Burse, K., Geiling, S., Meinhardt, H. & J. Schramm: Die forstlich-standörtlichen Verhältnisse Thüringens – Teil B, Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, unveröffentlicht
- SCHRÖDER, K. (2009): Weiß-Tannen-Pflanzung ohne künstlichen Schutz. AFZ-DerWald, 17/2009, S. 925
- SCHÜLER, G. (2001): Leitfaden und Leitbilder "Schonende Bewirtschaftung sensibler Niederschlagsflächen und Bachauen in der Waldwirtschaft – Materialsammlung". Trippstadt, Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Abteilung Waldwachstum, 42 S.
- SCHÜLER, G. (2005a): Wasserrückhalt und Hochwasserschutz durch vorsorgende Waldbewirtschaftung. In: Wagner, W. (Hrsg.): Abwassertechnik und Gewässerschutz. Loseblattwerk, Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, Heidelberg, 60 S.
- SCHÜLER, G. (2005b): Herleitung von abflussrelevanten Flächen zur Steuerung von Wasserrückhaltmaßnahmen im Wald. Freiburger Forstliche Forschung, 16
- SCHÜLER, G. (2006): Dezentraler Wasserrückhalt im Wald in Abhängigkeit des Standortpotenzials. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. 17.06, S. 131-161
- SCHÜLER, G., BOTT, W. & D. SCHENK (2002): Hochwasservorsorge durch Waldbewirtschaftung. Forst und Holz, S. 3-9
- SCHUME, H., HAGER, H. & G. JOST (2003): Quantifizierung der Wasserflüsse in einem Fichtenreinbestand und einem Fichten-Buchen Mischbestand auf Bestandesebene. Endbericht, Internet: <http://www.nationalpark.or.at/article/articleview/25102/1/4921> (abgerufen am: 20.05.2008)
- SCHUME, H, JOST, G. & H. HAGER (2004): Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. J. Hydrol., 289, S. 258-274
- SCHWARZ, O. (1985): Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen – Messungen mit einer transportablen Berechnungsanlage in Baden-Württemberg. DVWK-Schr., 71, Paul Parey Verlag, S. 185-230

- SCHWEIZERISCHE GESELLSCHAFT FÜR KARTOGRAPHIE (Hrsg.) (2002): Topografische Karten – Kartengrafik und Generalisierung. Schweizerische Gesellschaft für Kartographie, Kartographische Publikationsreihe, 16
- SEA 74 (1974) C 2. II: Standortsformen. VEB Forstprojektion Potsdam, unveröffentlicht
- SEMMELE, A. (1964): Junge Schuttdecken in hessischen Mittelgebirgen. Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., 92, S. 275-285
- SEMMELE, A. (2005): Periglaziale Vergangenheit und bodenkundliche Gegenwart in deutschen Mittelgebirgen. Wald in Sachsen-Anhalt, 15/05, S. 35-59
- SIDLE, R.C., TANI, M. & A.D. ZIEGLER (2006): Catchment processes in Southeast Asia: atmospheric hydrologic, erosion, nutrient cycling, and management effects. For. Ecol. Manage., 224, S. 1-4.
- SKLASH, M.G. & R.N. FARVOLDEN (1979): The role of groundwater in storm runoff. J. Hydrol., 43, S. 45-65
- SPIES, E.D. (1991): Böden und Deckschichten der Münchberger Hochfläche und des Frankenwaldes. Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges., 64, S. 139-210
- STAHR, K. (1979): Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald. Freibg. bodenk. Abh., Dissertation, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg, 273 S.
- STEPANEK, L., KOHL, B. & G. MARKART (2004): Von der Starkregensimulation zum Spitzenabfluss. Interpraevent, Klagenfurt, (1): II/101-II/112
- STMLU – Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (1997): Stauseen in Bayern. Staatliche Wasserspeicher sorgen für unser Wohl. Wasserwirtschaft in Bayern, 31
- TARBOTON, D.G. (1997): A new method for the determination flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resour. Res., 33/2, S. 309-319
- TERAJIMA, T., SAKAMOTO, T. & T. SHIRAI (2000): Morphology, structure and flow phrases in soil pipes developing in forested hillslopes underlain by a Quaternary sand-gravel formation. Hydrol. Process., 14, S. 713-726
- THEWS, J.D. & A. SEMMELE (1993): Anwendung digitaler Höhenmodelle zur automatisierten Kartierung von Deckschichten. Abschlussbericht, 17 S.
- TLUG – Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2010): Naturschutzgebiete im Landkreis Sonneberg – Stand 11/2004. Internet: http://www.tlug-jena.de/uw_raum/umweltregional/son/index.html?son10.html (abgerufen am 06.03.2010)
- TILCH, N., UHLENBROOK, S. & C. LEIBUNDGUT (2002): Regionalisierungsverfahren zur Ausweisung von Hydrotopen in von periglazialen Hangschutt geprägten Gebieten. Grundwasser 7(4), S. 206-216
- TLWJF (1997): Die forstlichen Wuchsgebiete Thüringens. Mitteilungen der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. 13/1997, Gotha
- TOLDRIAN, H. (1974): Wasserabfluss und Bodenabtrag in verschiedenen Waldbeständen. AFZ-Der Wald 29/49, S. 1107-1109

- TÜRK, W. (1993): Pflanzengesellschaften und Vegetationsmosaike im nördlichen Oberfranken. *Dissertationes Botanicae*, 207
- UCHIDA, T., KOSUGI, K. & T. MIZUYAMA (1999): Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. *J. Hydrol.* 222, S. 18-36
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflußbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. *Freibg. Schr. Hydrol.*, 10, 201 S.
- UHLENBROOK, S. & C. LEIBUNDGUT (2002): Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation. *Water Resour. Res.*, 16(2), S. 423-440
- VATER, H. (1927): Die Bewurzelung der Kiefer, Fichte und Buche. *Forstl. Jahrb.*, 78, S. 65-85, Tharandt
- VOIGT, H.J. (1983): Hydrogeologische Grundkarte, Karte der Hydroisohypsen und Karte der hydrogeologischen Kennwerte im Maßstab 1 : 50.000 (HK50) von Sonneberg/Lehesten 1404-3/4, Thüringer Landesanstalt für Geologie, Weimar
- VÖLKELE, J., ZEPP, H. & A. KLEBER (2002): Periglaziale Deckschichten in Mittelgebirgen – ein offenes Forschungsfeld. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 76(2/3), S. 101-114
- VON GAERTNER, H.R. (1950): Probleme des Saxothuringikums. *Geol. Jahrb.*, 65, S. 409-450
- VON HEßBERG, A. (2003): Landschafts- und Vegetationsdynamik entlang renaturierter Flussabschnitte von Obermain und Rodach. *Dissertation*, Universität Bayreuth
- WALDENMEYER, G. (2003): Abflussbildung und Regionalisierung in einem forstlich genutzten Einzugsgebiet. *Dissertation*, Institut für Geographie und Geoökologie, Universität Karlsruhe, 192 S.
- WALENTOWSKI, H., EWALD, J., FISCHER, A., KÖLLING, C. & W. TÜRK (2006): *Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. Ein auf geobotanischer Grundlage entwickelter Leitfaden für die Praxis in Forstwirtschaft und Naturschutz*, 2. überarb. Auflage, 441 S., Geobotanica-Verlag, Freising
- WEBER, G. & B. BAHR (2000): Eignung bayerischer Standorte für den Anbau von Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.). *Forstwiss. Cent.bl.*, 119, S. 263-275
- WEILER, M. (1997): Untersuchung zur Abflussbildung an Hängen mit Tracerversuchen und numerischer Modellierung der Wasserbewegung. *Diplomarbeit*, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg
- WEILER, M., Scherrer, S., Thoma, C., Fackel, P. & F. Naef (2000): The potential to influence runoff processes by changes in land-use. In: Bronstert, A., Bismuth, Ch. & L. Menzel (Eds.): *Proceedings of European conference on advances in flood research*, Vol. 1, Potsdam Institute for climate impact research, S. 286-295.
- WEILER, M. & J. McDONNELL (2004): Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology. *J. Hydrol.*, 285(1-4), S. 3-18

- WEINMEISTER, H.W. (2003): Fähigkeiten des Waldes zur Verminderung von Hochwasser und Erosionsschäden. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 40, S. 15-29
- WILPERT, K. VON & D. ZIRLEWAGEN (2005): Oberflächennahe Abflussbildung in einem sickergehemmten Boden. Gemeinsames Kolloquium des Arbeitskreises Waldböden der DBG und der Sektion Wald und Wasser im DVFFA in Freiburg am 2.-3. Juni 2005. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, 62, S. 119-124.
- WILSON, J.P. & J.G. GALLANT (2000): Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc., New York, 479 S.
- WIRTH, F. (1956): Wandel der Bestockung im Frankenwald. Mitt. Staatsforstverw. Bay., 28, München, S. 179-205
- WITTICH, W. (1948): Die heutigen Grundlagen der Holzartenwahl. 2. Auflage, Schaper, Hannover, 67 S.
- WITTKAMP, J. & U. DEIL (1996): Zur Dorfvegetation in Nordbayern und Südthüringen. Tuexenia 16, S. 509-538
- WITZIG, J., BADOUX, A., HEGG, C. & P. LÜSCHER (2004): Waldwirkung und Hochwasserschutz – eine standörtlich differenzierte Betrachtung. Forst und Holz, 10, S. 476-479
- WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A. & V. SOKOLLEK (1992): Landschaftswasserhaushalt – Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin, 352 S.
- WOLF, U. (1998): Gerodete Hochfläche – Waldhang – Wiesental. In: Verein Naturpark Frankenwald e.V., Schrift zum 25jährigen Bestehen des Verein Naturpark Frankenwald e.V., Kronach
- WOLFF, B., HÖLZER, W., FRÖMDLING, D. & S. BONK (1998): Datenaufbereitung für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 98/3. Eberswalde. <http://www.forstliches-umweltmonitoring.de/Downloadbereich/pik.pdf>, (abgerufen am 12.08.2007)
- WORRESCHK, B. (2002): Vorsorgender Hochwasserschutz – Vorträge, Seminarveranstaltung vom 21. Februar 2002 der Universität Essen. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen der Universität Essen, 96, S. 1-14
- WOODS, R. & L. ROWE (1996): The changing spatial variability of subsurface runoff using the topographic index. Water Resour. Res., 33(5), S. 1061-1073
- WURM, A. (1925): Geologie von Bayern; 1. Nordbayern, Fichtelgebirge, Frankenwald. Handbuch Bodenschätze Deutschlands, Berlin, 374 S.
- ZIMMERMANN, L., RASPE, S., SCHULZ, C. & W. GRIMMEISEN (2008): Wasserverbrauch von Wäldern. LWF-Aktuell, 66, S. 16-20
- ZINKE, P.J. (1967): Forest interception studies in the United States. In: Sopper W.E. & H.W. Lull (Eds.), International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press, S. 137-161

- ZUCKER, A. (1996): Erläuterungsband zur Standortserkundung im Bereich der Waldbauernvereinigung Frankenwald. Boden & Standort, Stand: 1996, unveröffentlicht
- ZWURTSCHKEK, F. (1998): Eine Reise durch das „nasse Element“. In: Verein Naturpark Frankenwald e.V., Schrift zum 25jährigen Bestehen des Verein Naturpark Frankenwald e.V., Kronach

10. Anhang

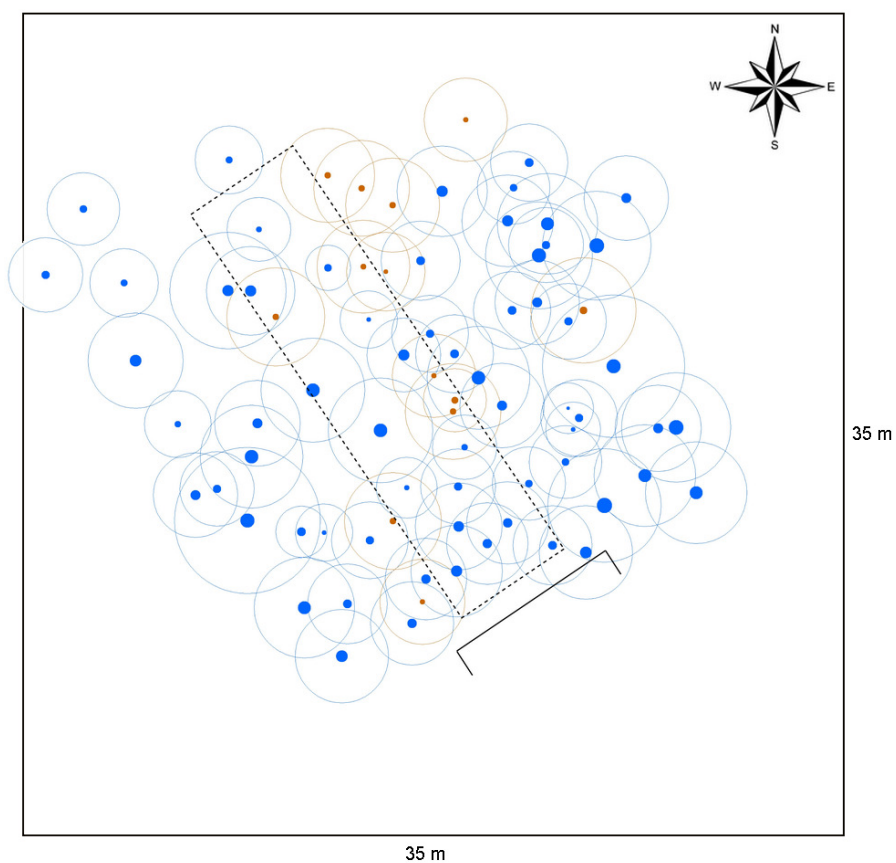
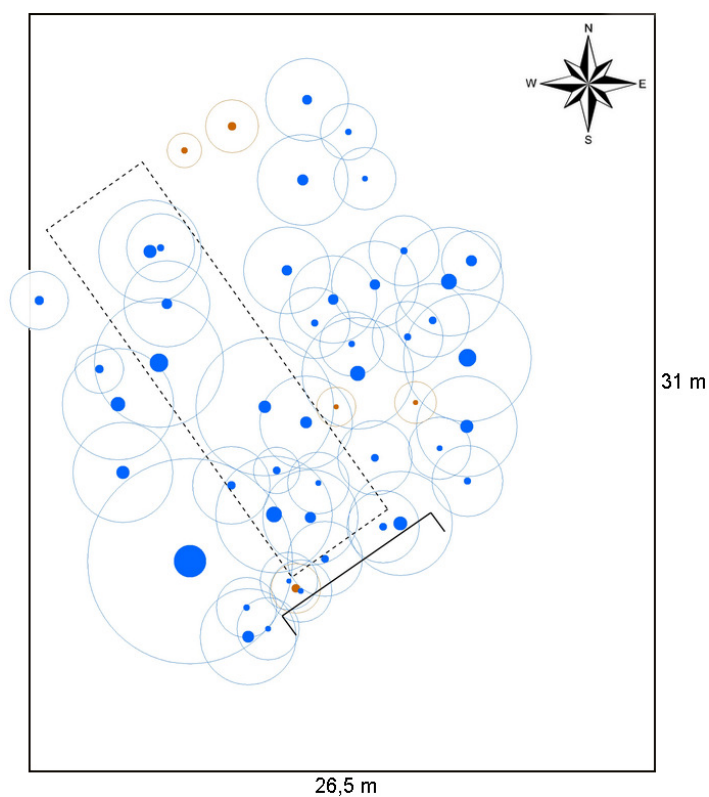
A 1: Bestandeskennwerte der Berechnungsflächen im Wassereinzugsgebiet der Röthen

Bundesland	Freistaat Thüringen					
Forstamt	Sonneberg					
Revier	Sonneberg					
Einzugsgebietsgröße [km ²]	11,0					
Höhe ü. NN [m]	422 - 715					
Mittlere Hangneigung [°]	17,0					
Jahresdurchschnittstemperatur [°C]	6,7					
Jahresniederschlag [mm]	950 - 1150					
Wuchsgebiet	"Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald"					
Wuchsraum	9.1.1 „Westlicher Frankenwald“					
Potentielle natürliche Waldgesellschaft (PnV)	Luzulo luzuloidis-Fagetum					
	Parzelle 1+2		Parzelle 3	Parzelle 4	Parzelle 5	
Bestand	328 b ⁴		328 b ⁵	328 b ⁵	328 b ⁴	
UTM-Koordinaten	Rechtswert Hochwert	4441487 5584280	4441476 5584274	4441341 5584245	4441533 5584323	4441555 5584361
Höhe ü. NN [m]	575		590	580	580	
Bestandesalter [Jahre]	48		131	131	60/55	
Stammzahl/ha	1258		396	385	970	
Ertragsklasse (Wenk et al./Schober)	M 31		2.6	2.7	1.2/0.9	
Bestockungsgrad	0,93		1,2	1,06	1,02	
Bestandesgrundfläche [m ² /ha]	43,2		39,0	34,8	24,6	
Vorrat [fm/ha]	401		570	487	234	
Baumartenprozent [%]	Fichte 93, Buche 7, Sonstige < 1		Buche 100	Buche 90, Bergahorn 10, Sonstige < 1		
Hangneigung [°]	29		26	27		
Exposition	Südost		Süd	Südost		
Hanglage	Mittelhang					
Geologie	Grauwacke-Tonschiefer Wechsellagerung (oberer Kulm), vereinzelte Quarzitgänge					
Bodentyp	Braunerde (Hangschutt)		Hanggley-Braunerde (Hangschutt)	schwach podsolierte Braunerde (Hangschutt)		
Humusform	rohhumusartiger Moder		feinhumusarmer Moder	feinhumusreicher Moder		

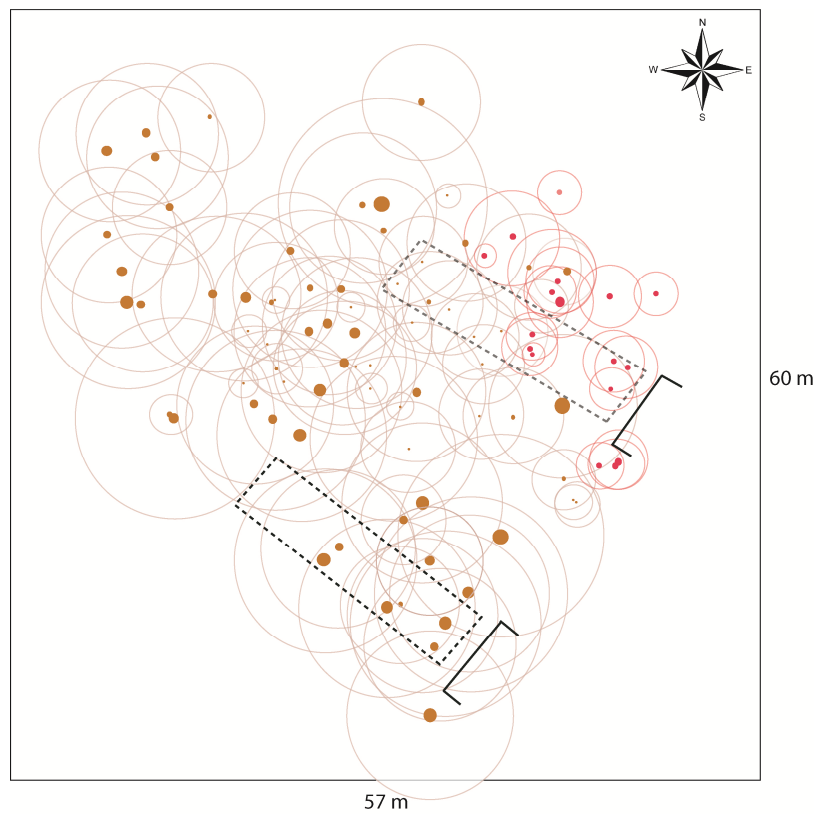
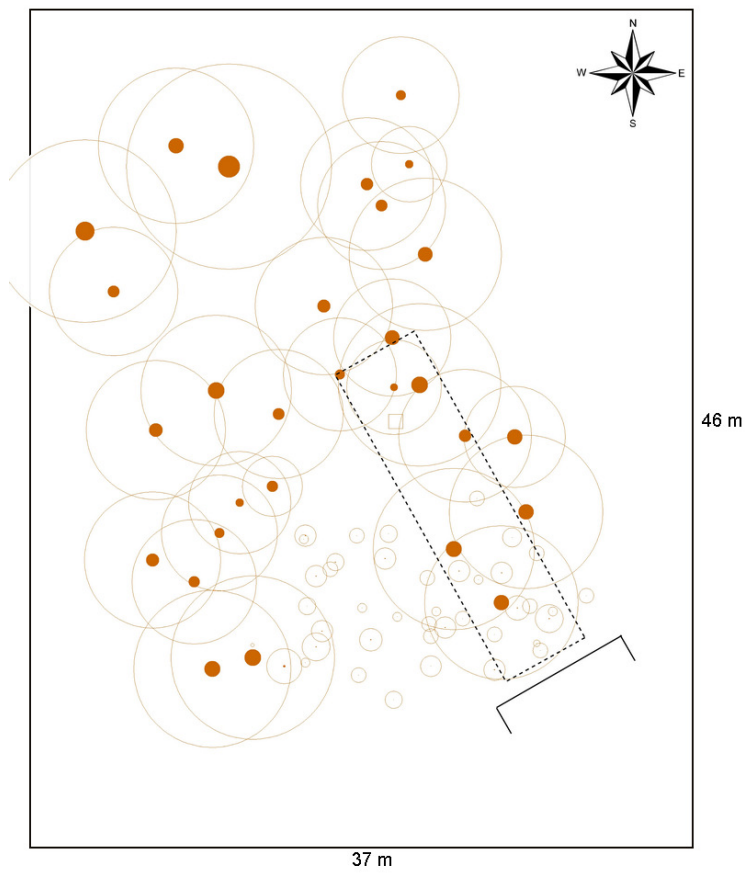
A 2: Bestandeskennwerte der Berechnungsflächen im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel

Bundesland	Freistaat Bayern				
Forstbetrieb	Rothenkirchen				
Revier	Ködel				
Einzugsgebietsgröße [km ²]	13,8				
Höhe ü. NN [m]	440 - 722				
Mittlere Hangneigung [°]	9,8				
Jahresdurchschnittstemperatur [°C]	6,7				
Jahresniederschlag [mm]	900 - 1100				
Wuchsgebiet	"Frankenwald, Fichtelgebirge und Steinwald"				
Wuchsbezirk	8.1 "Frankenwald"				
Potentielle natürliche Waldgesellschaft (PnV)	Luzula Fagetum/Galio odorati Fagetum				
	Parzelle 1+2	Parzelle 3	Parzelle 4	Parzelle 5	Parzelle 6
Distrikt und Abteilung	XIII 9a ⁰	XIII 6b ²	XIII 4a ¹	XIII 4a ¹	XIII 4a ¹
UTM-Koordinaten	Rechtswert 4462736 Hochwert 5580540	4462097 5581598	4461969 5581497	4462031 5581766	4462047 5581796
Höhe ü. NN [m]	565	570	560	555	550
Bestandesalter [Jahre]	103	70	70	88	93
Stammzahl/ha	337	519	250	355	
Ertragsklasse (Wenk et al./ Schober)	M 34(Fi)/2.4(Bu)	M 36(Fi)/1.2(Bu)	1.2(Bu)/0.9(BAh)	0.5	L38
Bestockungsgrad	0,92	1,0	0,62	1,2	
Bestandesgrundfläche [m ² /ha]	36,7	43,6	16,5	54,8	
Vorrat [fm/ha]	515	578	187	826	
Baumartenprozent [%]	Buche 60 Fichte 40	Fichte 70 Buche 30	Buche 62 Bergahorn 38	Fichte 52 Buche/Bergahorn 48	
Hangneigung [°]	21	21	31	28	24
Exposition	Nordwest	Nordwest	Nordost	Südost	
Hanglage	oberer Mittelhang			Mittelhang	
Geologie	Tonschiefer-Wetzsteinquarzit Wechsellagerung (unterer Kulm)				
Bodentyp	Braunerde (Hangschutt)			Hanggley-Braunerde	Braunerde
Humusform	feinhumusreicher Moder				

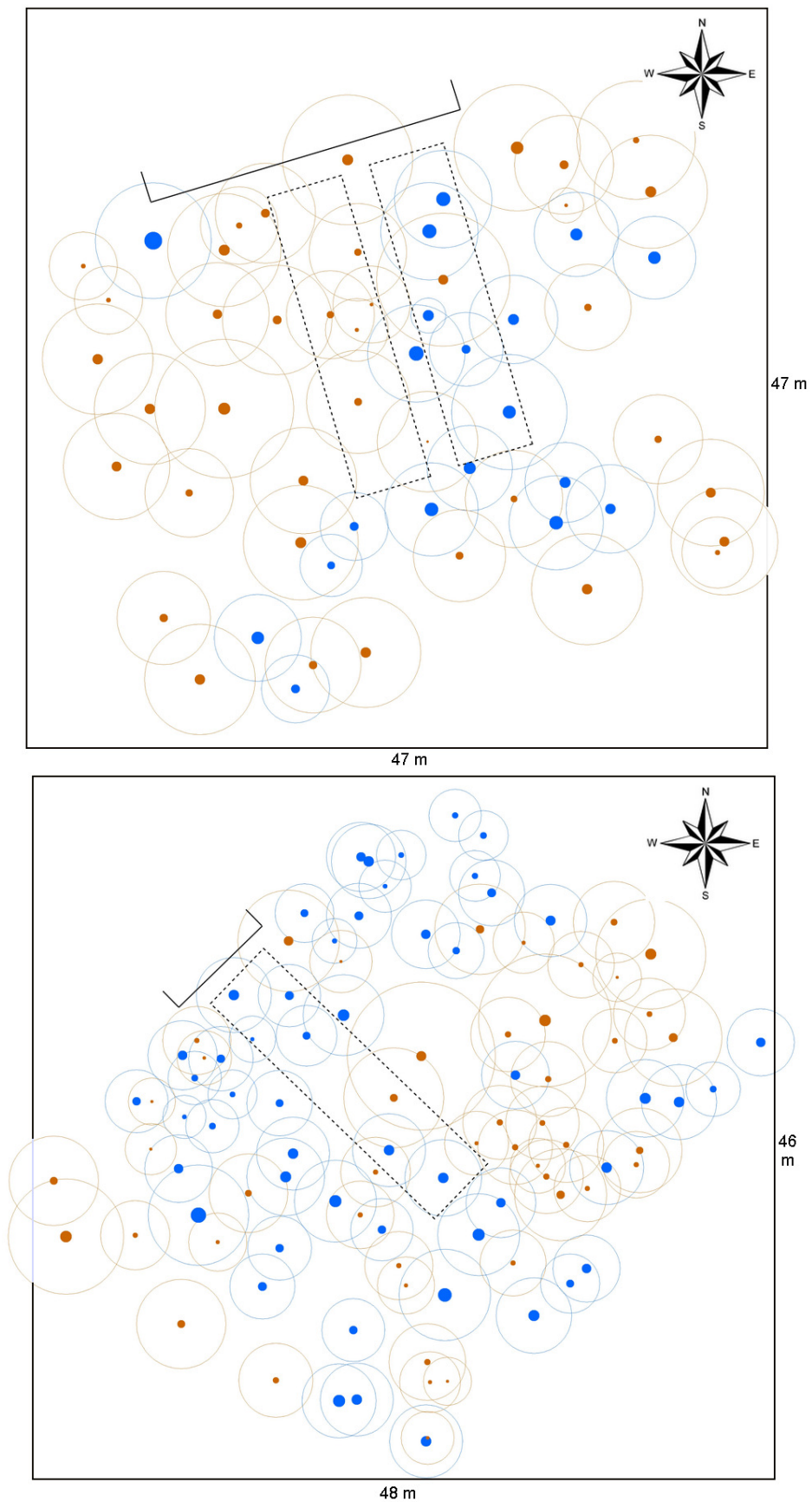
A 3: Stammverteilungspläne mit durchschnittlicher Kronenbreite (Mittelwert von vier gemessenen Himmelsrichtungen) der Untersuchungsflächen P1 (oben) und P2 (unten). Blau = Fichte, Braun = Buche (verwendetes Programm: BWinPro 7 - S (http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/simulator_ww.htm))



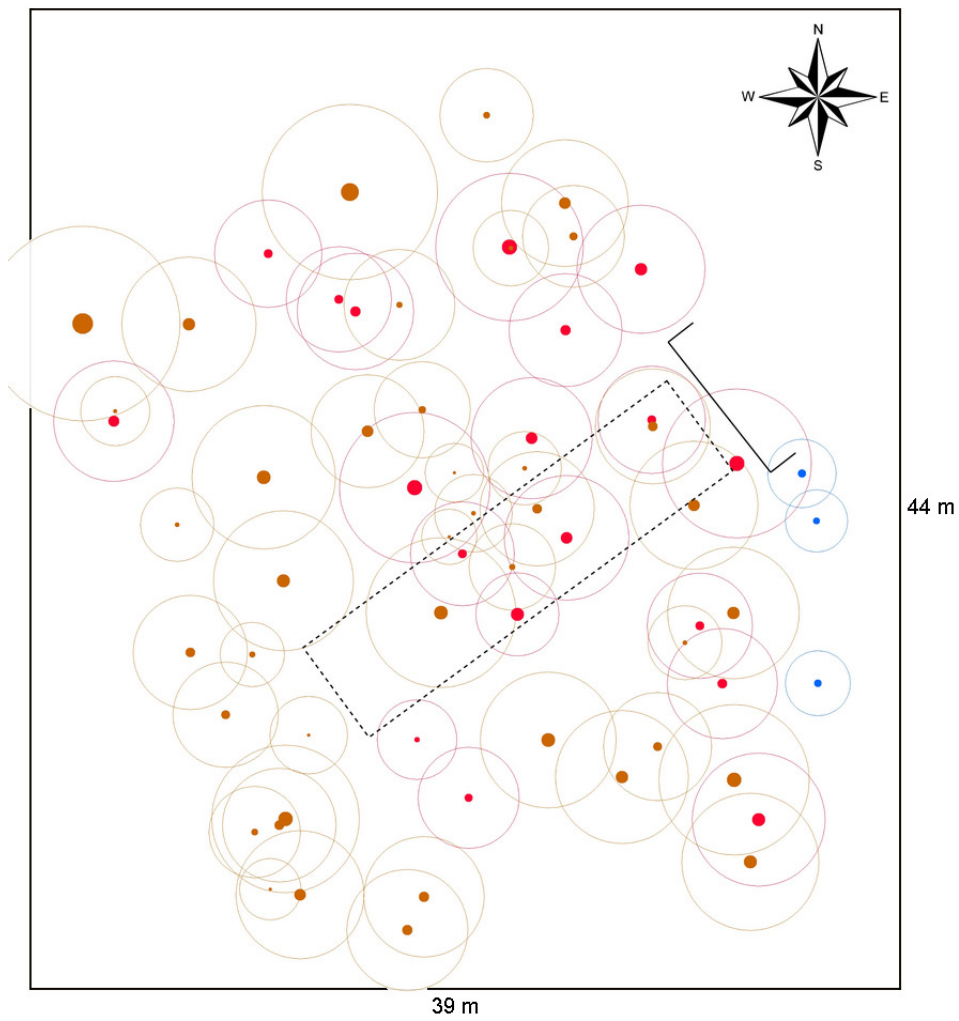
A 4: Stammverteilungspläne mit durchschnittlicher Kronenbreite (Mittelwert von vier gemessenen Himmelsrichtungen) der Untersuchungsflächen P3 (oben) und P4/5 (unten). Braun = Buche, Rot = Bergahorn (verwendetes Programm: BWinPro 7 - S)



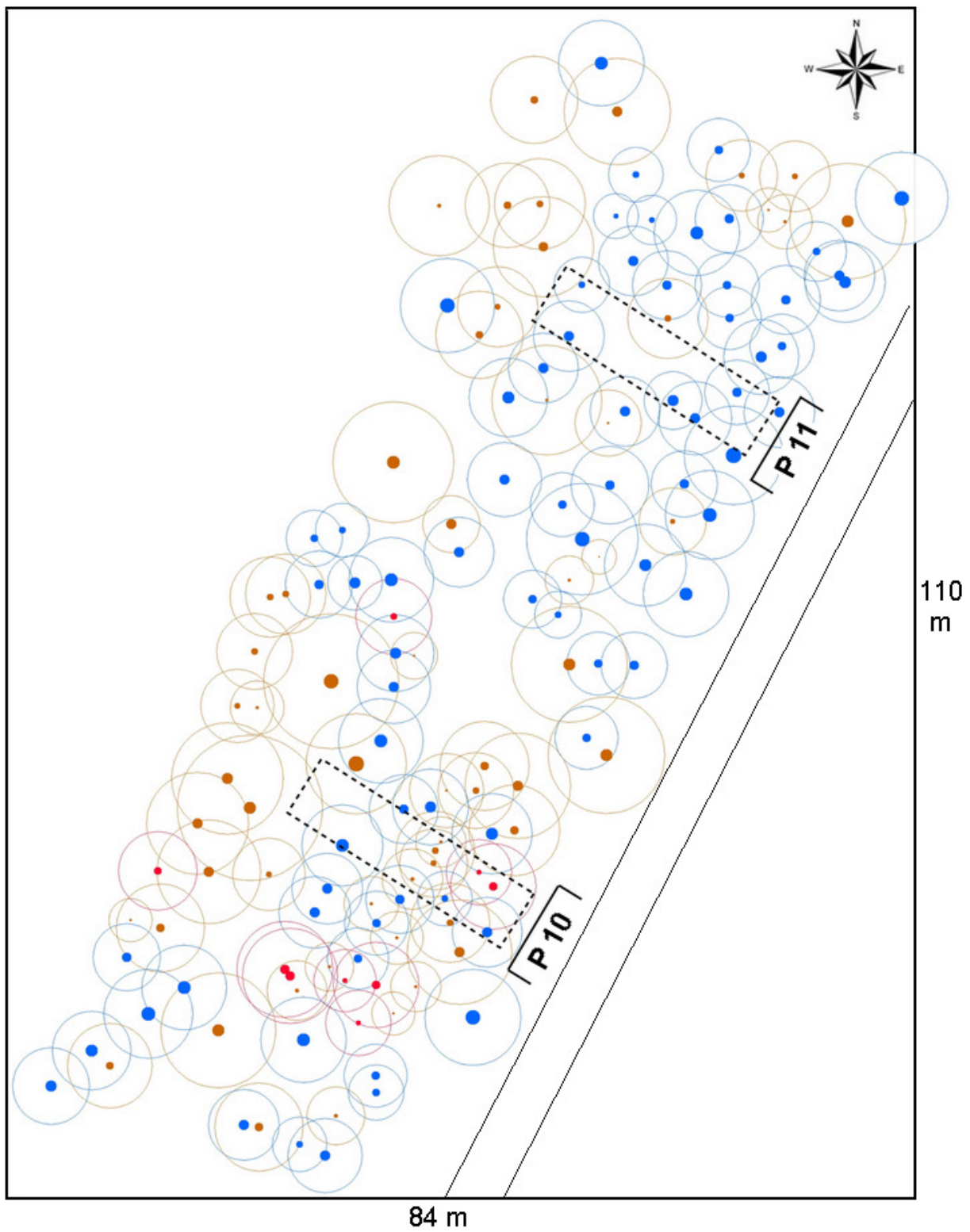
A 5: Stammverteilungspläne mit durchschnittlicher Kronenbreite (Mittelwert von vier gemessenen Himmelsrichtungen) der Untersuchungsflächen P6/7 (oben) und P8 (unten). Blau = Fichte, Braun = Buche (verwendetes Programm: BWinPro 7 - S)



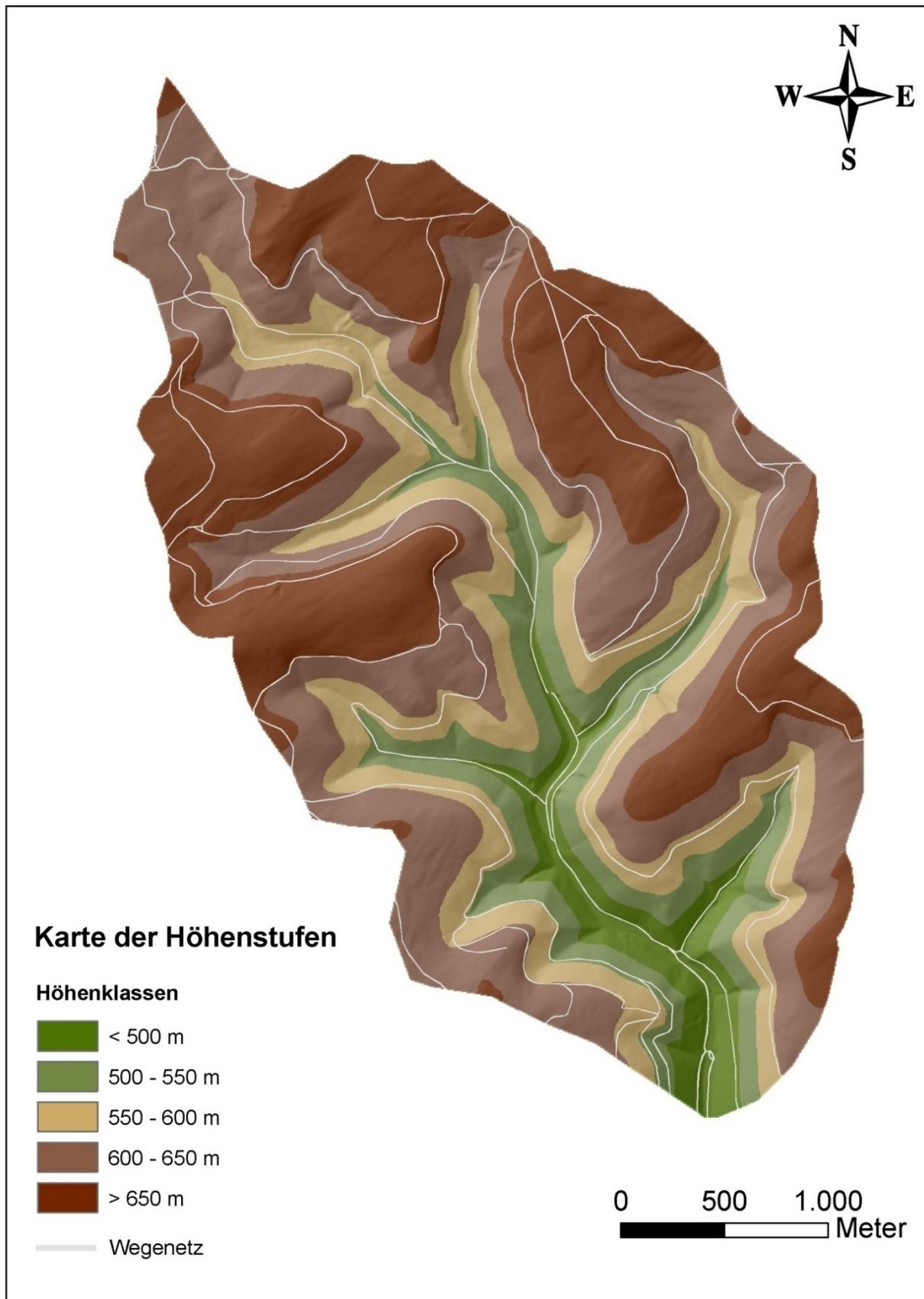
A 6: Stammverteilungsplan mit durchschnittlicher Kronenbreite (Mittelwert von vier gemessenen Himmelsrichtungen) der Untersuchungsfläche P9. Blau = Fichte, Braun = Buche, Rot = Bergahorn (verwendetes Programm: BWinPro 7 - S)



A 7: Stammverteilungsplan mit durchschnittlicher Kronenbreite (Mittelwert von vier gemessenen Himmelsrichtungen) der Untersuchungsflächen P10 und P11. Blau = Fichte, Braun = Buche, Rot = Bergahorn (verwendetes Programm: BWinPro 7 - S)



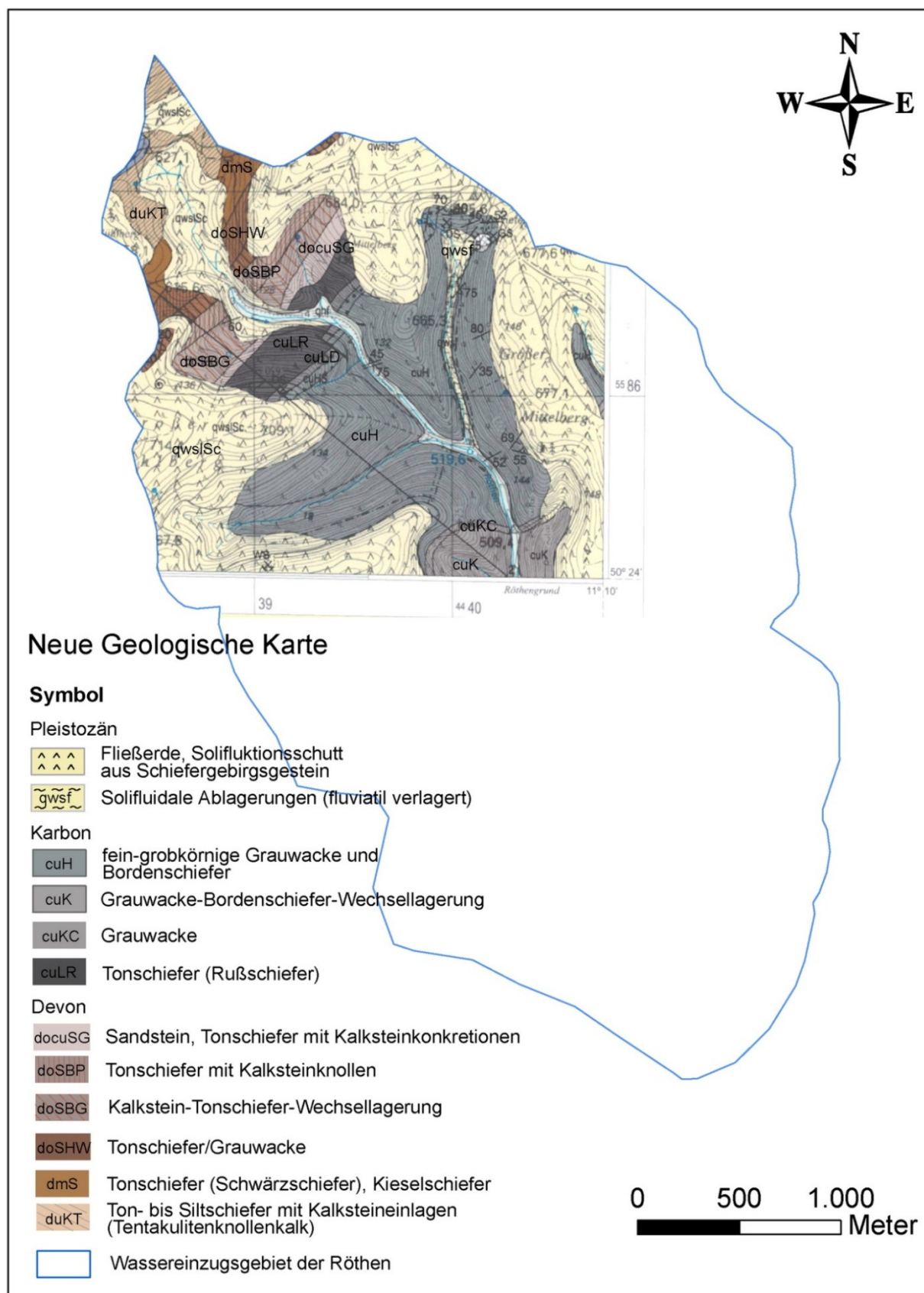
A 8: Höhenstufenkarte im Untersuchungsgebiet Röhthengrund, abgeleitet aus einem digitalen Höhenmodell im 5 x 5 m Raster (Datenquelle: Landesamt für Vermessung und Geoinformation) mit Hilfe des Programms ArcGis 9.2 und der Erweiterung „Spatial Analyst 9.2“ (© ESRI Inc.)



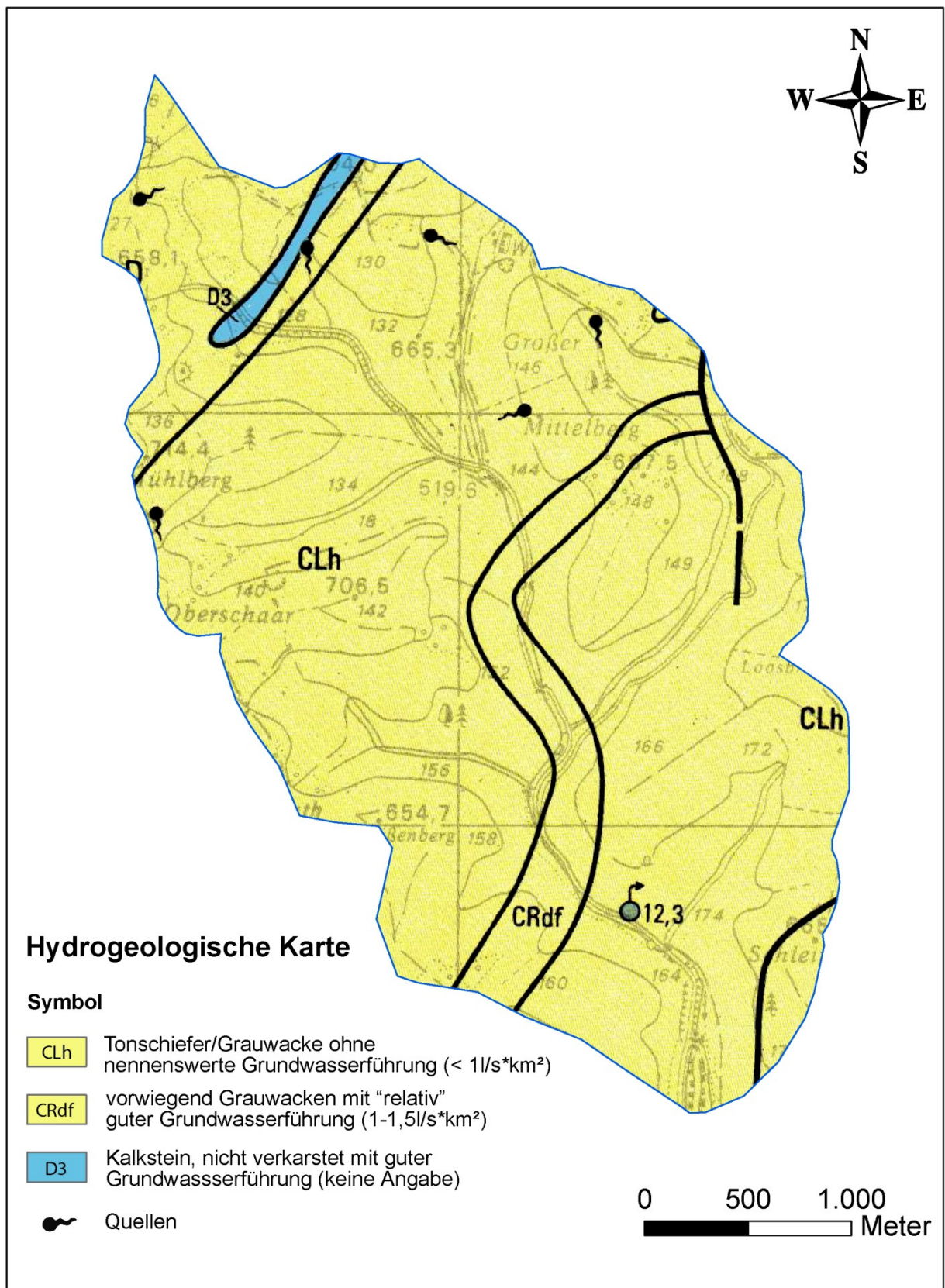
A 9: Ausschnitt aus der “geologischen Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten“ von 1882 – Blatt 5633 Sonneberg (Datenquelle: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie)



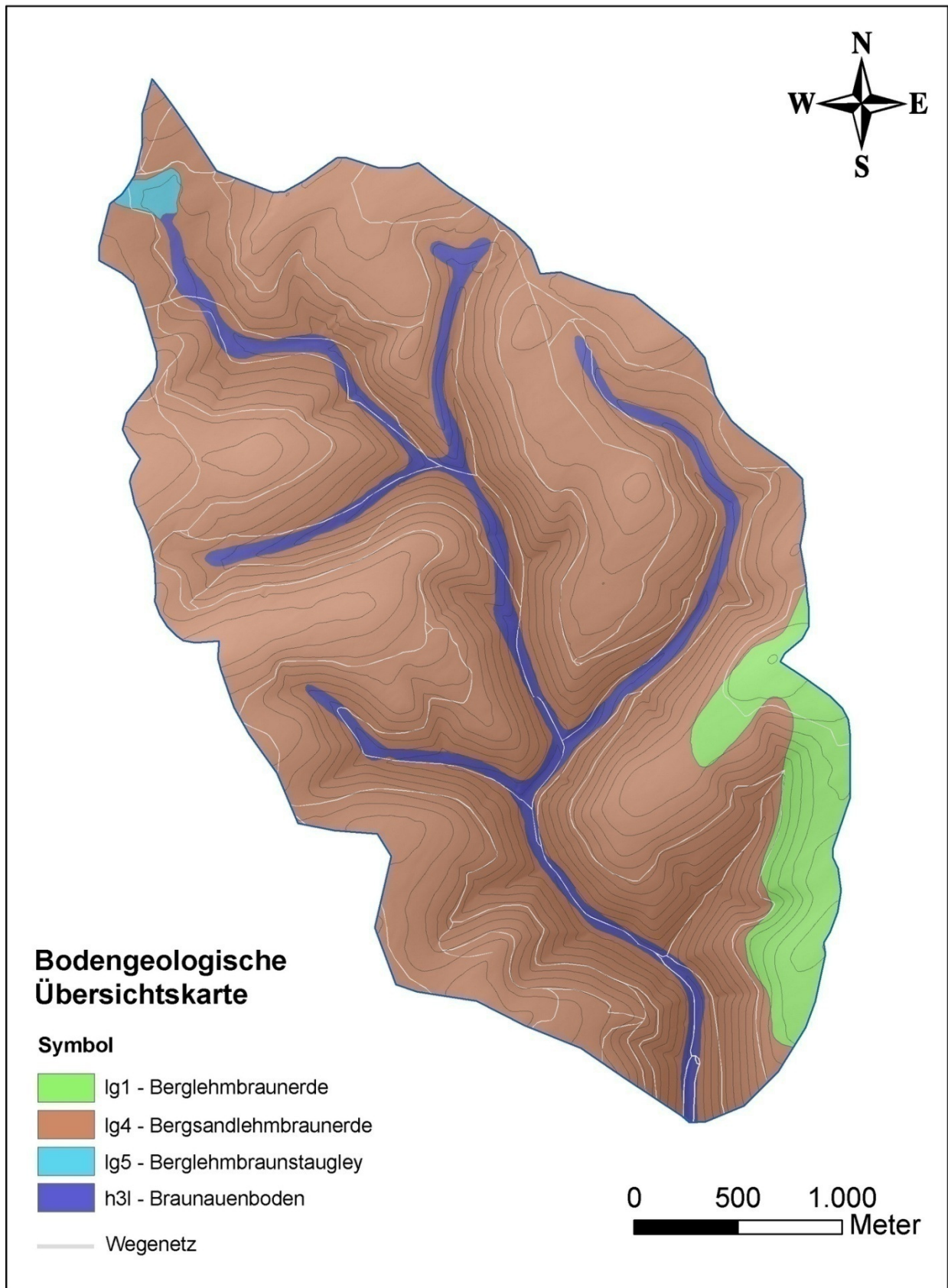
A 10: Kartenausschnitt des Blattes „Steinach“ aus der neuen geologischen Kartierung (Bearbeiter: Biewald & Voigt 2004; Datenquelle: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie)



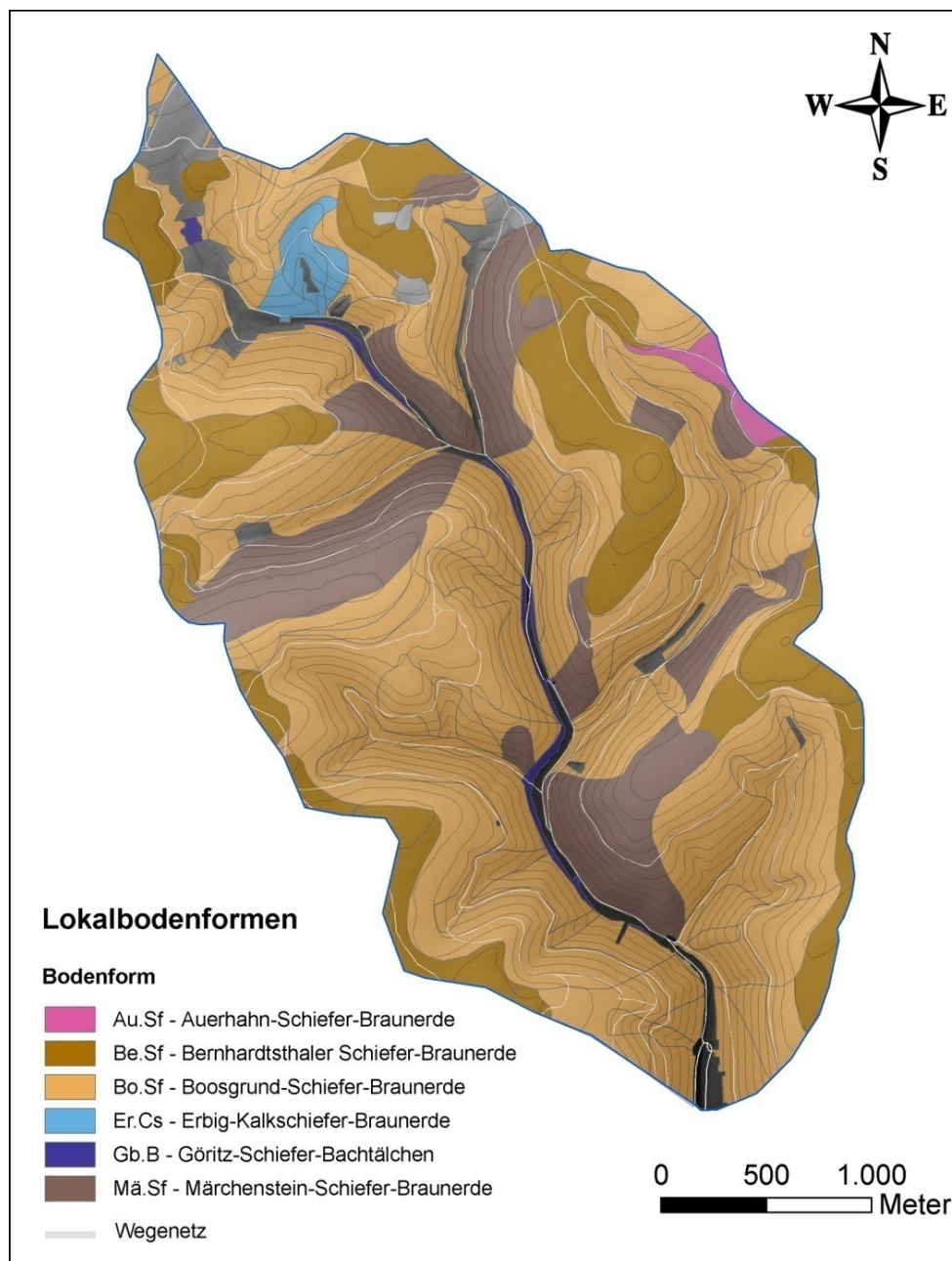
A 11: Hydrogeologisches Kartenwerk - Röthengrund (Bearbeiter: Voigt 1983; Datenquelle: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie)



A 12: Bodengeologische Übersichtskarte – Röhthengrund (Bearbeiter: Rau, Schramm, Pantel 1969–1974; Datenquelle: Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie)

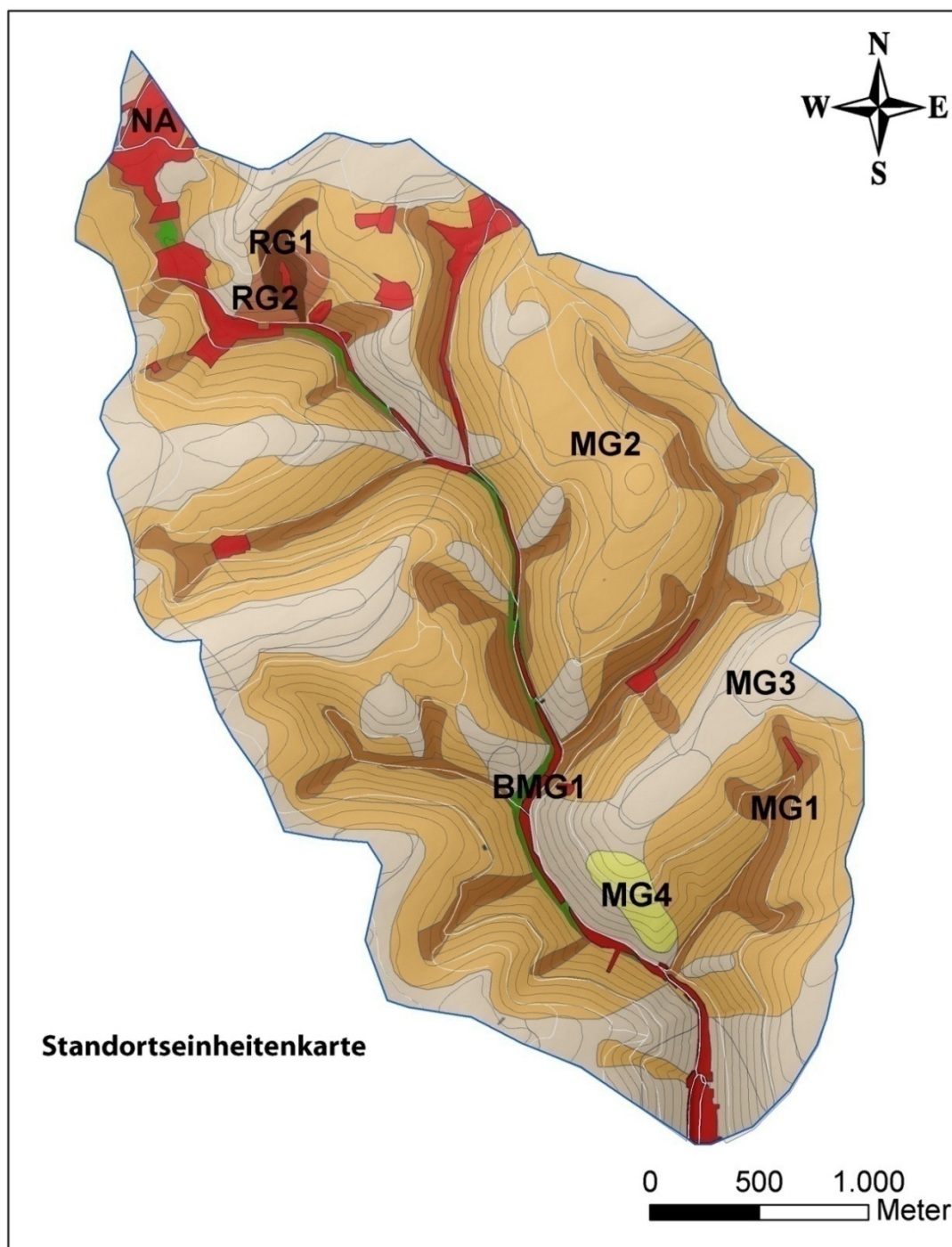


A 13: Lokalbodenformen der forstlichen Standortskartierung (Bearbeiter: Adolf, Engelhardt, Gralka, Körner, Müller, Rössel, Schmidt, Schramm 1961 – 1963; Datenquelle: ThüringenForst)



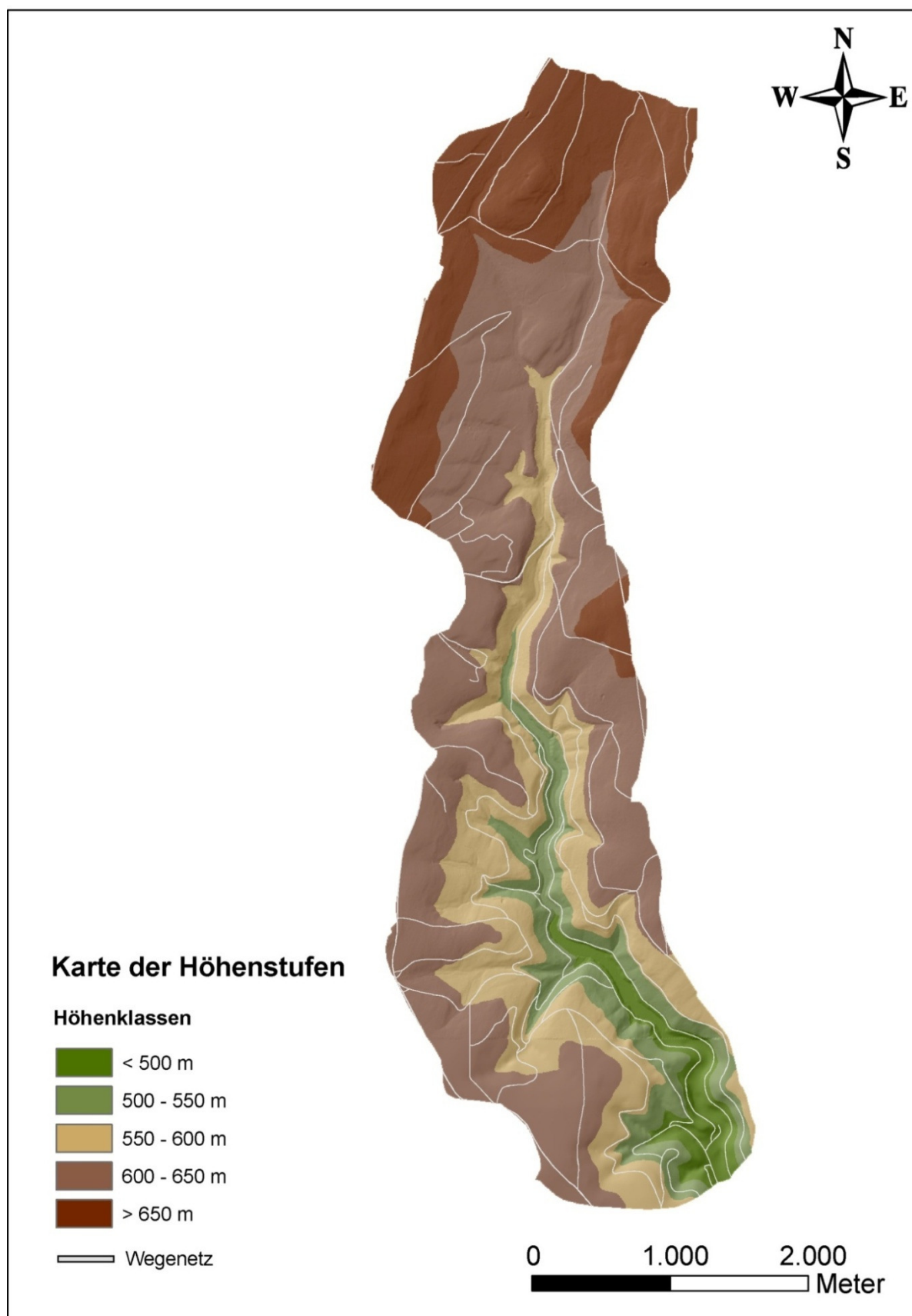
Symbol und Bezeichnung	Ausgangsgestein	Bodenart	Bodentyp
 Au.Sf - Auerhahn-Schiefer-Braunerde	Kulm-Schiefer und Grauwacken	mä. steiniger und grusiger lehmiger Schluff	podsolige Braunerde
 Be.Sf - Bernhardtsthaler Schiefer-Braunerde	Kulm-Schiefer und Grauwacken	schwach - stark steiniger, grusiger lehmiger Schluff	Braunerde
 Bo.Sf - Boosgrund-Schiefer-Braunerde	Kulm-Schiefer und Grauwacken	mä. steiniger und grusiger lehmiger Schluff	Braunerde
 Er.Cs - Erbig-Kalkschiefer-Braunerde	Kalkknotenschiefer	mä. steiniger und grusiger lehmiger Schluff	Braunerde (humos)
 Gb.B - Göritz-Schiefer-Bachtälchen	Schiefer und Grauwacken	mä. steiniger und grusiger sandiger Lehm	Vega
 Mä.Sf - Märchenstein-Schiefer-Braunerde	Kulm-Schiefer und Grauwacken	mä. steiniger und grusiger lehmiger Schluff	podsolige Braunerde
 NA - nicht standortskartiert	-	-	-

A 14: Standortseinheitenkarte der forstlichen Standortskartierung (Bearbeiter: Adolf, Engelhardt, Gralka, Körner, Müller, Rössel, Schmidt, Schramm 1961 – 1963; Datenquelle: ThüringenForst)

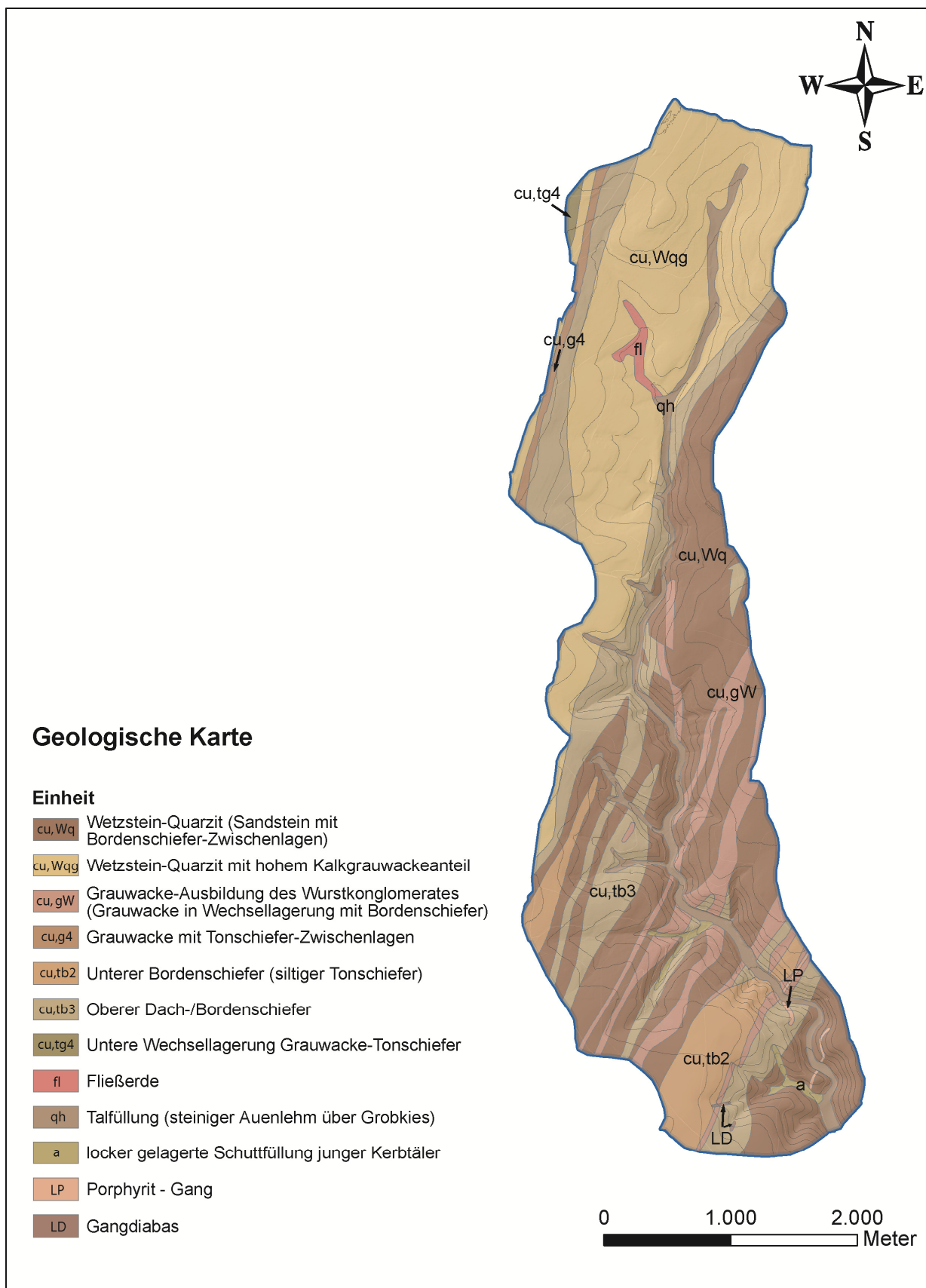


Symbol und Bezeichnung	Lage
MG1 - sehr frische bis frische skelettärmere Silikatgesteinsstandorte	Tälchen, Mulden, schattseitige Unterhänge
MG2 - mäßig frische skelettärmere Silikatgesteinsstandorte	schattseitige Hänge, ebene Lagen
MG3 - mäßig trockene skelettärmere Silikatgesteinsstandorte	sonnseitige Hänge, flache Rücken
MG4 - mäßig trockene bis trockene skelettärmere Silikatgesteinsstandorte	sonnseitig exponierte Hanglagen
RG1 - frische, nährstoffreichere, skelettärmere Silikatgesteinsstandorte	Mulden, schattseitige Unterhänge
RG2 - mäßig frische, nährstoffreichere Silikatgesteinsstandorte	schattseitige Hänge
BMG1 - feuchte bzw. grundfeuchte Bachtälchenstandorte	Talsolesen am Oberlauf der Bäche
NA - nicht standortskartiert	-

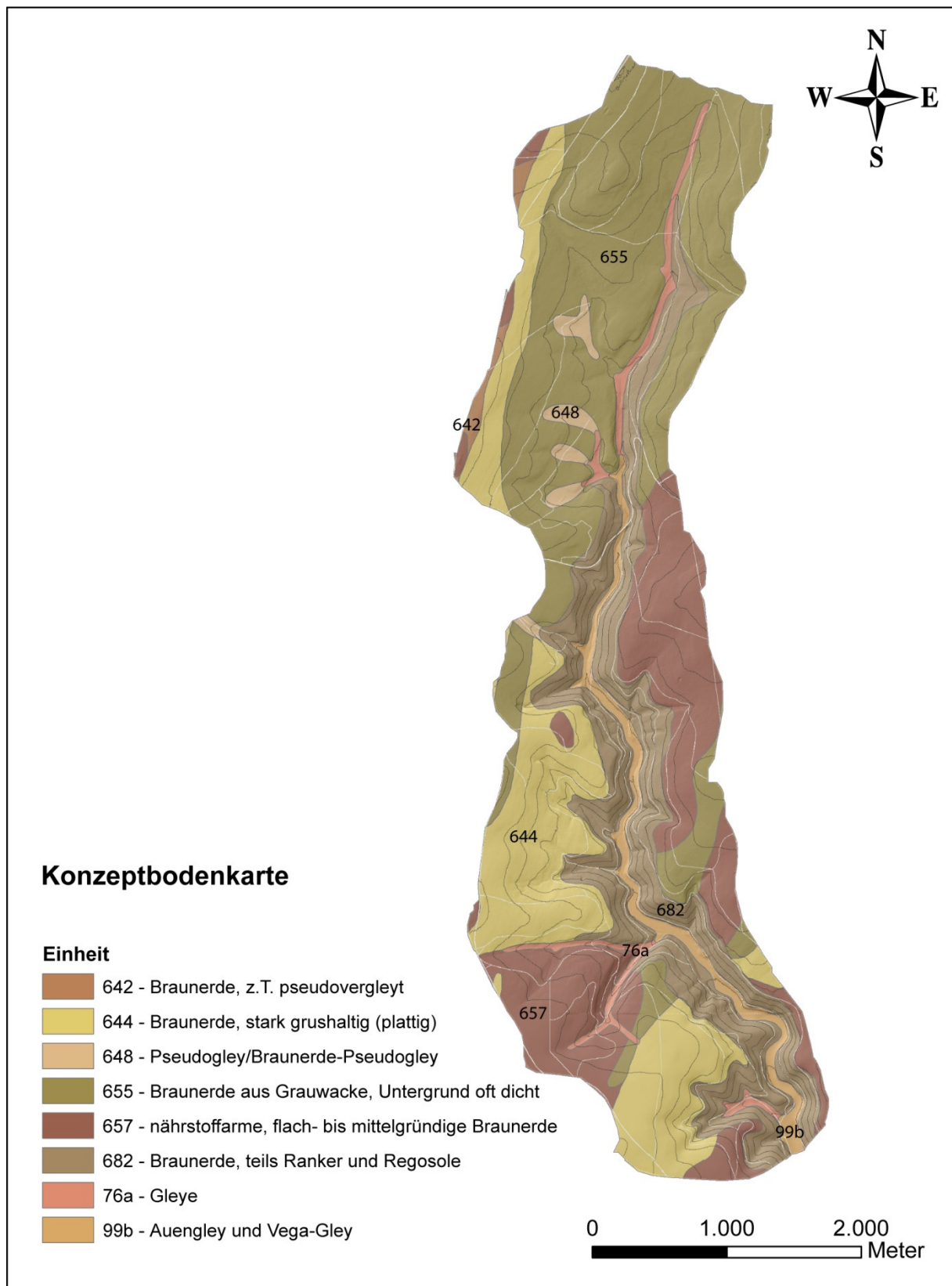
A 15: Höhenstufenkarte im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel, abgeleitet aus einem digitalen Höhenmodell im 5 x 5 m Raster (Datenquelle: Landesamt für Vermessung und Geoinformation) mit Hilfe des Programms ArcGis 9.2 und der Erweiterung „Spatial Analyst 9.2“ (© ESRI Inc.)



A 16: Geologische Karte des Einzugsbereichs der Tschirner Ködel, Blattnummer 5633/5634
 (Bearbeiter: Horstig 1979; Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Geologie)



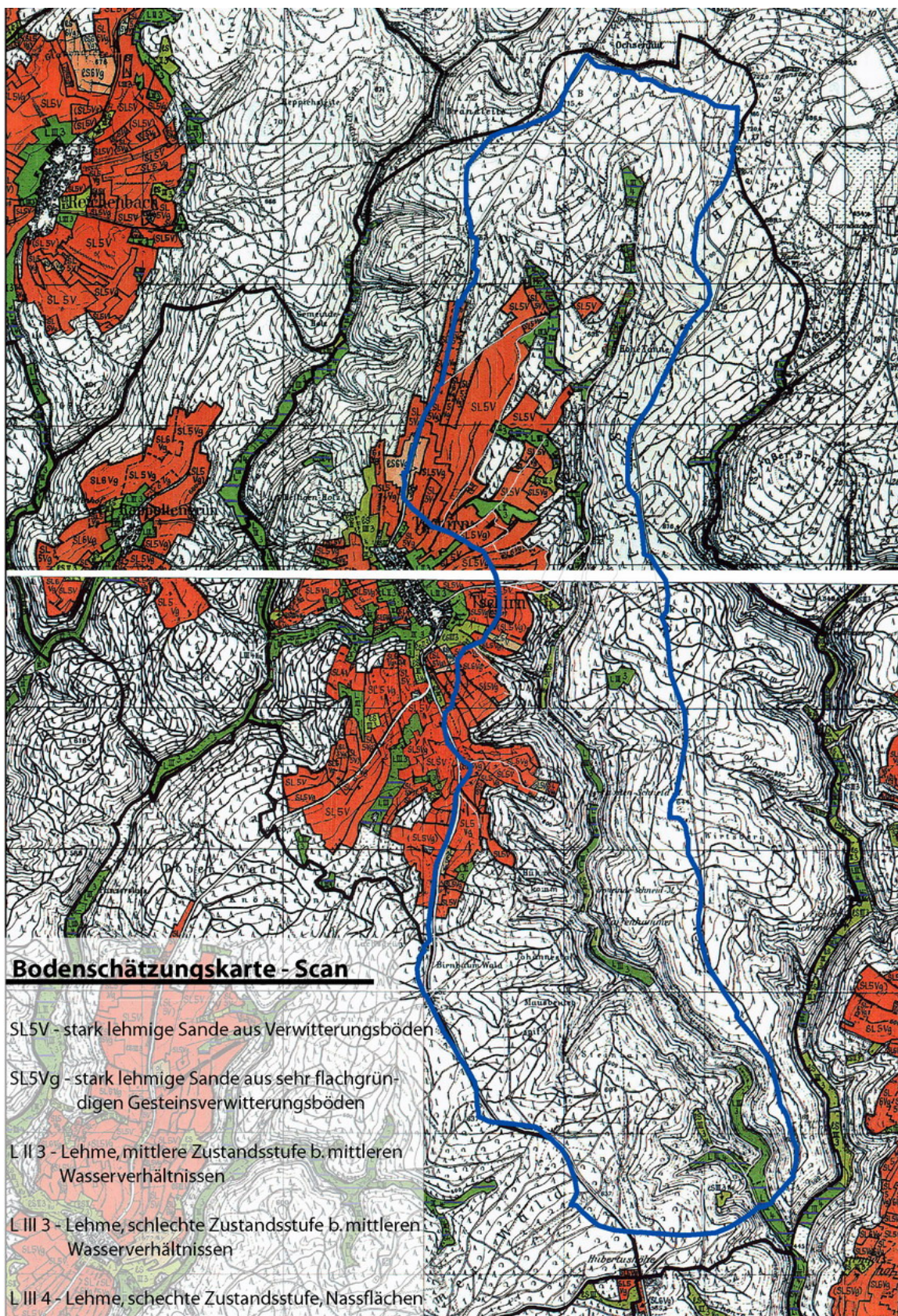
A 17a: Konzeptbodenkarte (Bearbeiter: GeoTeam 2002; Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt)



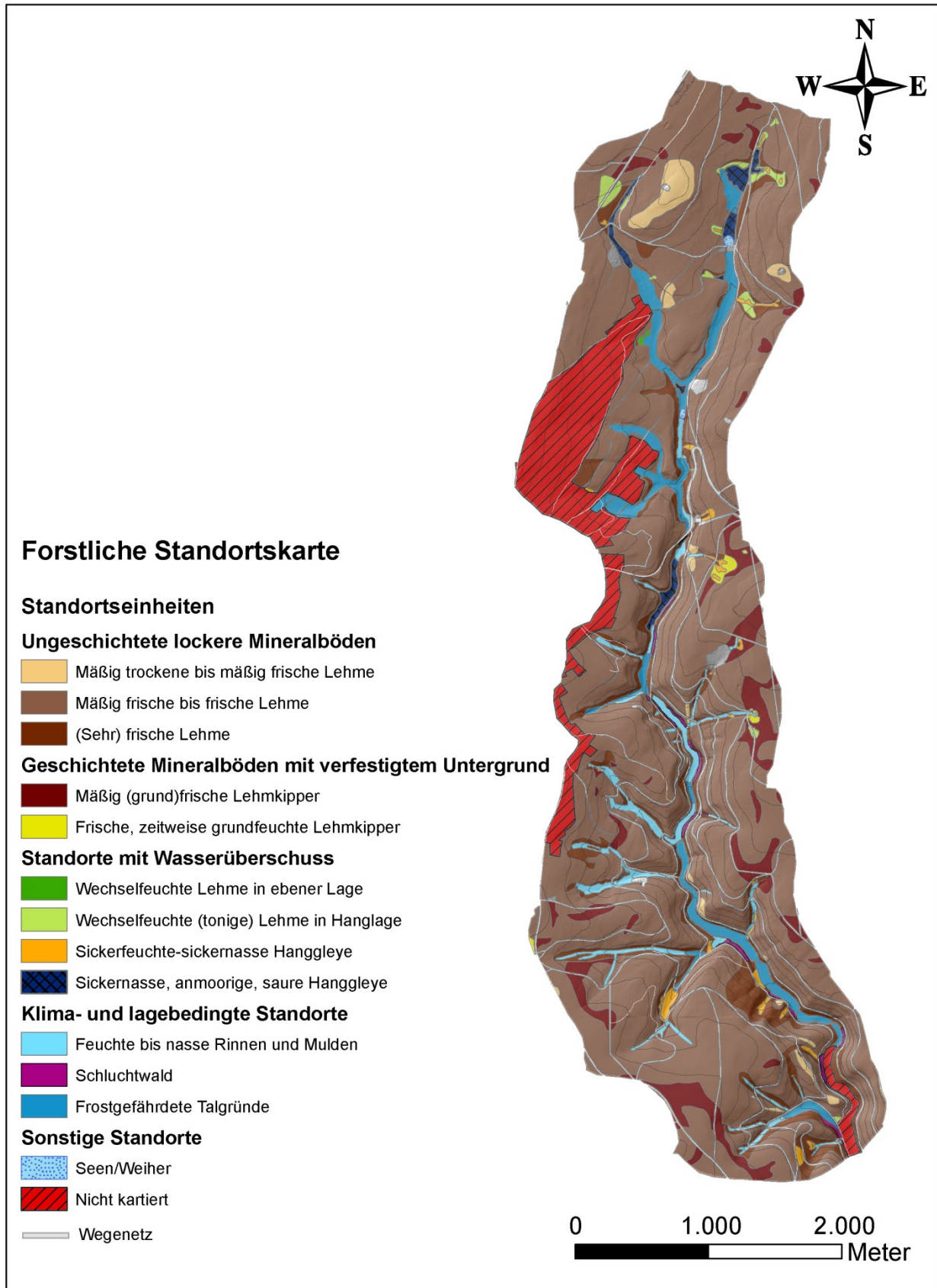
A 17b: Legende zur Konzeptbodenkarte

EINH	Text	Bodenform	Kurztext	Bodenart	Relief	Symbol
76a	Bodenkomplex der Gleye aus sandig, untergeordnet kiesig- bzw. grusig-sandigen Talsedimenten	Gley-Braunerde bis Anmoorgley	Vergesellschaftung der carbonatfreien sandigen bis kiesig- bzw. grusig-sandigen Grundwasserböden in Tälern und Mulden	Sande bis grusig-kiesige Sande	in Tälern und Mulden; im bay. Kristallin unterhalb 600 m	ff-s; (ff-ks)
99b	Auengley und Vega-Gley aus schluffig-lehmigen Flusssedimenten	Naßgley in Auenlage	lehmyger Grundwasserboden im Auenbereich	schluffige Lehme	Auenbereich	f-l
642	(Norm-)Braunerde aus sehr stark bis extrem grusigen, sandig-lehmigen, pleistozän umgelagerten Tonschiefer-Grauwacken-Substraten, oft mit grusärmerer, lehmiger Überdeckung	Braunerde, in Muldenlage Tendenz zur Pseudovergleyung	mittel-tiefgründige mesotrophe Braunerden aus siltigen Tonschiefer in Wechsellage mit dünnbankigen Grauwacken, Lyditanteil gering	schluffige und schwach feinsandige Lehme bis tonige Lehme	im gesamten Frankenwald weit verbreitet	p-zl/p-z(Tst)
644	(Norm-)Braunerde aus sehr stark bis extrem grusigen, lehmigen, pleistozän umgelagerten Dach- und Bordenschiefersubstraten	Braunerde, Regosol-Braunerde	stark grushaltige bis steinige (plattig), mittel- bis tiefgründige Braunerden, meist deutlich verbraunt, aus reinen bis schwach siltigen, harten Tonschiefer	schluffige, schwach feinsandige bis schwach tonige Lehme	Hochfläche, flache Hangbereiche, v.a. im westlichen Frankenwald weit verbreitet	p-lz/p-z
648	(Norm-)Pseudogley und Braunerde-Pseudogley aus mittel bis stark grusig-steinigen, lehmigen, pleistozän umgelagerten Tonschiefersubstraten mit Lehmantelen unterschiedlicher Herkunft	Hangpseudogley, Gley-Pseudogley	tiefgründige, im Unterboden durch Bodenfließen verdichtete Staunässeböden der flachen Senken und Mulden, überwiegend Mischsubstrate aus Tonschiefern, Grauwacken und Quarziten	schluffige, schwach tonige bis schwach feinsandige Lehme	Unterhang- und Hangfußbereiche flach geneigter Hänge, breite Mulden und Senken der Hochfläche	p-(z)/p-nl
655	(Norm-)Braunerde aus sehr stark steinigen, schluffig-sandigen Grauwackensubstraten, oft mit steinärmerer, lehmiger Überdeckung	Braunerde, Braunerde-Regosol	mittel-tiefgründige Braunerden aus dickbankigen Grauwacken, im Bv meist gelblich bis rötlich braune Farben, im Untergrund oft dicht gelagert und mit Schluffüberzügen auf Steinen	schluffig-sandige Lehme bis schluffig-lehmige Sande	leicht gewellte Hochflächen bis mittelsteile Hangbereiche	p-(n)/p-sn
657	(Norm-)Braunerde, örtlich Podsol-Braunerde, aus sehr stark bis extrem grusig-steinigen, schluffig-sandigen Substraten quarzitischeschiefer Gesteine, oft mit skeletärmerer, lehmiger Überdeckung	-	sehr nährstoffarme, flach- bis mittelgründige Braunerden, im Bv fahlbraune bis gelbbraune Farben	stark sandige Lehme bis lehmige Sande	im Frankenwald weit verbreitet, v.a. Hochfläche und flach geneigte Hänge	p-(z)/p-sn
682	Bodenkomplex der (Norm-) Braunerden, teils Ranker und Regosole, aus stark bis sehr stark steinig-grusigen, lehmigen Steilhangesubstraten quarzitischeschiefer bzw. tonschieferreicher Gesteine	-	-	sandige bis schluffige Lehme	steile Talflanken(> ca. 20 °) im Frankenwald und Fichtelgebirge	u-zl/u-lz

A 18: Bodenschätzungskarte mit eingezeichnetem Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel
(Datenquelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt)



A 19: Forstliche Standortskarte (Bearbeiter: Zucker 1994 - 1995 im Privatwald und Förster 1982 - 1983 im Staatswald; Datenquelle: Bayerische Staatsforstverwaltung)



11. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die „WeltOnline“ berichtete am 29. Januar 2002 von schweren Überschwemmungen im Grenzbereich von Bayern und Thüringen	1
Abbildung 2: Schema eines Wassereinzugsgebietes (aus: Skript der Fakultät für Bauingenieurwesen, TUM).....	7
Abbildung 3: Steuergrößen, die das Ereignis Hochwasser prägen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Niederschlagsmenge (aus: NIEHOFF 2001)	8
Abbildung 4: Übersicht der potenziell entstehenden Abflussprozesse in einem Wassereinzugsgebiet und deren Wirkung auf die Abflussganglinie (aus: NACKEN (2006, oben) und DIN 4049-1 (unten)	9
Abbildung 5: Abflussganglinien unterschiedlicher Einzugsgebietsformen (aus: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).....	10
Abbildung 6: Schematische Darstellung der einzelnen Komponenten des Abflussprozesses (aus: BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996)	15
Abbildung 7: Faktoren, welche die Infiltration und Wasserbewegung im Boden beeinflussen (aus: BUNDESAMT FÜR WASSER UND GEOLOGIE 2003)	17
Abbildung 8: Abflussprozesse am Hang (aus: NORDMANN et al. 2009a, verändert)	18
Abbildung 9: Verschiedene Ausprägungen von gesättigten Flächen. Links: Durch Hangwasserzug stark vernässtes Bachtälchen; Rechts: Braunaueboden über holozänen Schotter mit jahreszeitlich stark wechselndem Grundwasserstand und der dazugehörigen Bohrstockprobe (unten) mit deutlich erkennbarer Rostfleckung ab 0,15 m unter der Geländeoberfläche (GOF)	19
Abbildung 10: Bodenanschnitt eines zwischenabflussgeprägten Hanges im thüringischen Untersuchungsgebiet. Der Wasserleitfähigkeitssprung zwischen dem locker gelagerten Grus und dem dichten Untergrund führt an der Grenzschicht zum lateralen Wasserfluss.	21
Abbildung 11: Saisonale Variabilität der abflussbeitragenden Flächen nach DUNNE (1978).....	27
Abbildung 12: Intensität und Ausdehnung des Zwischenabflusses anhand der Ausprägung von Hydromorphiemerkmalen innerhalb eines kleinen Quelleinzugsgebietes im Frankenwald. Gestrichelte Linien stellen Isohypsen und Wasserscheiden des Einzugsgebietes dar. (Vereinfacht nach Kleber & Schellenberger 1998; aus: Homepage des Lehrstuhls für Geographie, TUM Dresden/Forschung)	29
Abbildung 13: Beispiel einer Abflussbeiwertkarte nach dem Ampelprinzip (Rot: hohe Disposition zum Oberflächenabfluss, Grün: geringe Bereitschaft zum Oberflächenabfluss (aus: KOHL & STEPANEK (2005).....	32
Abbildung 14: Erstellte Abflussprozesskarte im Nordpfälzer Berg- und Hügelland auf Grundlage standortskundlicher Bodeninformationen und der Hangneigung (aus: SCHÜLER 2006)	33
Abbildung 15: Berechnete tägliche Transpirationsraten der Nadelbaumarten Fichte und Kiefer und der Laubbaumarten Buche/Eiche im Durchschnitt aller Waldklimastationen in Bayern für den Zeitraum von 1998 - 2007 (aus: ZIMMERMANN et al. 2008).....	36
Abbildung 16: Wurzelwerk der Fichte (aus: KÖSTLER et al. 1968)	42
Abbildung 17: Wurzeltracht der Buche (aus: KÖSTLER et al. 1968).....	43
Abbildung 18: Wurzel Ausbildung verschiedener Waldbaumarten auf einem mäßig wechseltroffenen Pseudogley. Alter der Nadelbäume: 25 - 50 Jahre; Laubbäume: 35 - 38 Jahre (aus: POLOMSKI & KUHN 1998, Fichte/Sitkafichte eingefügt nach KREUTZER 1961)	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 19: Wurzel Ausbildung des Bergahorn (aus: KÖSTLER et al. 1968).....	44
Abbildung 20: Ein in den 50iger Jahren mit Fichten aufgeforsteter, wasserbeeinflusster Talboden im Wassereinzugsgebiet der Mauthaustalsperre	48
Abbildung 21: Natürliche und aktuelle Waldzusammensetzung im Frankenwald (aus: WALENTOWSKI et al. 2006, verändert).....	49
Abbildung 22: Die linke Abbildung zeigt die Häufigkeiten des Auftretens der Windrichtungen an der Wetterstation Sonneberg-Neufang (Quelle: DWD), rechts die Niederschlagsverteilung von Südwest nach Nordost vom thüringischen Teil des Wuchsgebietes „westlicher Frankenwald“ zu den Höhenlagen des Thüringer Schiefergebirges (HOFFMANN 1959, verändert).....	50
Abbildung 23: Typische Braunerde im Frankenwald.....	50
Abbildung 24: Die wichtigsten am Bodenbildungsprozess beteiligten Gesteine im Untersuchungsgebiet: a) Grauwacke, b) Tonschiefer.....	52
Abbildung 25: Helokrene Quellaustritte können in beiden Untersuchungsgebieten sehr häufig beobachtet werden. Sie sind Anzeiger für hangaufwärts vorkommende laterale Hangwasserbewegungen im Boden.....	53
Abbildung 26: Lage der Untersuchungsgebiete (Datengrundlage: TK50, Bayerische Vermessungsverwaltung; Gewässernetz des Mains (DWGN25), Landesamt für Umwelt; Wuchsgebietgliederung Bayern (LWF 2001); Thüringen (TLWJF 1997).....	54
Abbildung 27: Schema zur Ableitung hydrologisch relevanter Parameter aus Geländemodellen (aus: DIKAU & SCHMIDT (1999), verändert).....	65
Abbildung 28: Darstellung des Berechnungsprinzips der Fließakkumulation nach dem multiple flow Verfahren (aus: SCHÄUBLE 2003, verändert).....	66
Abbildung 29: Fließakkumulation nach dem kombinierten Verfahren von Schäuble (2003) in einem Teileinzugsgebiet der Röthen (Stübleinsgrund). Die wasserbeitragenden Flächen nehmen von hellblau-grün-gelb über braun und rot zu. Der modellierte Bachlauf ist blau dargestellt.	67
Abbildung 30: Topografischer Wetness Index am Beispiel eines Gebietsausschnitts der Tschirner Ködel. Gelb-orange Standorte kennzeichnen trockene Bereiche, blaue Standorte sind Standorte mit potenziellem Wasserüberschuss	68
Abbildung 31: Konvergenz-Divergenz Index am Beispiel des Gebietsauslass der Tschirner Ködel. Rote Flächen kennzeichnen konvexe Hangformen, weiße Flächen stark konkave Bereiche.	69
Abbildung 32: Divergenz/Konvergenz Index und seine Berechnung in Abhängigkeit zu den Expositionen der Nachbarzellen, a) 100% Divergenz, b) 0%, c) 100% Konvergenz, nach KÖTHE & LEHMEIER (1994), aus: CONRAD (1998)	69
Abbildung 33: Verteilung der Bohrstockeinschläge im standortskartierten Teileinzugsgebiet sowie zwei weiterer Muldenstandorte im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel (Punktaufnahme mittels GPS); klar erkennbar auch die zwei unterschiedlich gut aufgelösten digitalen Höhenmodelle, die das Wassereinzugsgebiet abdecken (oben – DHM aus Laserscanbefliegung, unten – DHM aus Höhenschichtlinien.	70
Abbildung 34: Anordnung der Beregnungsflächen im thüringischen Röhthengrund (Datengrundlage: Echtfarbenorthobilder (Bildflug 2006); Höhenschichtlinien und Gewässernetz auf Basis DGM5 (Quelle: TLVermGeo).....	72
Abbildung 35: Anordnung der Beregnungsflächen im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel (Datengrundlage: Echtfarbenorthobilder (Bildflug 2005); Höhenschichtlinien und Gewässernetz auf Basis DGM5 (Quelle: Landesamt für Vermessung und Geoinformation).....	72
Abbildung 36: Schematisierter Versuchsaufbau der verwendeten, transportablen Beregnungsanlage	73

Abbildung 37: Die Bereitstellung des Wassers für die Beregnungsversuche erfolgte über die Anlage von Sammelbecken.....	74
Abbildung 38: Fertiges Bodenprofil mit laufender Beregnungsanlage im Hintergrund	75
Abbildung 39: Beregnungsschema und ableitbare Parameter aus der Abflussmessung.....	76
Abbildung 40: Ausgesiebte Skelettfractionen - Feingrus (1), Mittelgrus (2), Grobskelett (3) - der beprobten Tiefenstufen am Beispiel des Bodenprofils P9	78
Abbildung 41: Stechkappe aus Chrom-Molybdän-Stahl	79
Abbildung 42: Überwachte Teileinzugsgebiete im Röhthengrund in der Übersicht.....	82
Abbildung 43: Vorkommende geologische Kartiereinheiten im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel	86
Abbildung 44: Entscheidungsbaum zur Ausweisung abflusssensitiver Flächen auf Grundlage der forstlichen Standortserkundung.....	96
Abbildung 45: Auf Basis der forstlichen Standortskartierung erstellte Grundkarte für das Gebiet der Tschirner Ködel	102
Abbildung 46: Ableitungen auf Grundlage des digitalen Höhenmodells	103
Abbildung 47: Ergebnis der Fließakkumulation nach den festgelegten Schwellenwerten am Beispiel eines Teileinzugsgebietes aus dem Röhthengrund. Die Intensität des Zwischenabfluss nimmt von Gelb (SSF 2) nach Rot (SSF 2 ⁺) zu.	105
Abbildung 48: Potenzielle Sättigungsabflussflächen nach dem SAGA Wetness Index (links) und die in den Standortskarten ausgewiesenen Standortseinheiten mit Vernässungsmerkmalen im Oberboden (rechts) für das Einzugsgebiet der Tschirner Ködel	106
Abbildung 49: Bestockungslose Fläche mit deutlich sichtbaren Strukturen, die auf oberflächlich abfließendes Wasser infolge gesättigter Flächen hindeuten.	107
Abbildung 50: Abflussprozesskarte im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel	109
Abbildung 51: Abflussprozesskarte im Wassereinzugsgebiet der Röhthen. Die blau-gestreift ausgewiesenen Bereiche (SOF 2) sind das Ergebnis von Geländebegängen, da in diesen Bereichen keine verwertbaren bodenkundlichen Informationen vorlagen	110
Abbildung 52: Aufteilung der Abflussprozesse im Gesamteinzugsgebiet. Beeinflussbare Flächen sind herausgestellt.	111
Abbildung 53: Rasches Eintrüben des Baches nach einem ca. 15-minütigen heftigen Gewitterschauer. Das gesamte Wasser entstammt aus schnell reagierenden Flächen. In der rechten, unteren Bildecke sind die ausgewaschenen, hellen mineralischen Bestandteile der Wegeableitung (HOF) deutlich zu erkennen. Die dunklen Eintrübungen des Hauptbaches resultieren von Auswaschungen der darüber liegenden wassergesättigten Talböden und Hangmulden (SOF 1).....	111
Abbildung 54: Ausschnitt der aktuell vorliegenden Standortskarte der untersuchten Teilbereiche, Aufnahmezeitraum: 1982 - 1983	113
Abbildung 55: Ergebnis der eigenen Standortskartierung. Halbhydromorphe Standorte mit dominierendem Zwischenabfluss sind hellblau/blau-gesteift dargestellt. Hangwasseraustrittsstellen sind mit grünen Punkten markiert.	114
Abbildung 56: Vergleich zwischen der angeschätzten Abflusssensitivität (Bohrstock) und der erstellten Abflussprozesskarte auf Basis der forstlichen Standortskartierung und Ableitungen zur Geomorphologie (untere Abbildung).....	117
Abbildung 57: Abflussganglinien der untersuchten Bestände P1 - P5 (NORDMANN et al. 2009b).....	119
Abbildung 58: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P1 und P2 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b).....	121
Abbildung 59: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P4 und P5 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b).....	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 60: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen 3 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009b).....	124
Abbildung 61: Berechnungskurven der Fichten-Buchen-Mischbestandsparzellen. Die farbig gestrichelten Linien markieren den Berechnungsstopp zur dritten Berechnung (NORDMANN et al. 2009a).....	127
Abbildung 62: Tiefenstufenabhängige Wurzelmassen der Parzellen P6 und P7 in g/kg Boden (NORDMANN et al. 2009a).....	127
Abbildung 63: Abflussganglinien der Parzellen 8 (blau) und 11 (rot) im Vergleich zu den Parzellen 6 und 7 (grau). Die farbig gestrichelten Linien markieren den Berechnungsstopp zur dritten Berechnung (NORDMANN et al. 2009a).....	129
Abbildung 64: Durchwurzelung der Parzellen 8 und 11 (NORDMANN et al. 2009a).....	130
Abbildung 65: Abflussganglinien der Parzellen P10 (violett) und P9 (braun). Die farbig gestrichelten Linien markieren den Berechnungsstopp zur dritten Berechnung (NORDMANN et al. 2009a).....	132
Abbildung 66: Durchwurzelungskennwerte der Parzellen P9 und P10 (NORDMANN et al. 2009a).....	133
Abbildung 68: Gemittelte Korngrößenzusammensetzung der Ober-/Unterböden (A-, B-Horizont) und des Untergrundhorizontes (C-Horizont) der Untersuchungsgebiete.....	135
Abbildung 67: Korngrößenzusammensetzung der Ober- und Unterböden (A-, B-Horizont; rote Punkte) und des meist dichter gelagerten Untergrundhorizontes (C-Horizont; blaue Punkte) der Untersuchungsgebiete.....	135
Abbildung 69: Gemittelte Wasserspeicherkapazität der Laub- und Nadelholzstandorte und deren Veränderung mit zunehmender Niederschlagsmenge (Berechnungsdurchgänge).....	136
Abbildung 70: Aufteilung der Abflussprozesse im Gesamteinzugsgebiet. Beeinflussbare Flächen sind herausgestellt.....	139
Abbildung 71: Ausschnitt der Abflussprozesskarten. Lage der beiden Hotspot-Standorte P3 & P10 mit temporärem Zwischenabfluss im Untergrund (Legende siehe Kapitel 5.1.2.1, S. 108 ff.).....	142
Abbildung 72: Quellschüttung eines Bachtälchens im Frühherbst (links) und das gleiche Tälchen wenige Tage später nach Durchzug eines Regengebietes.....	148
Abbildung 73: Vereinfachte Darstellung der Abflussprozesse am Hang und deren Bedeutung für den vorbeugenden Hochwasserschutz (NORDMANN et al. 2009a, verändert).....	160
Abbildung 74: 93-jähriger Fichtenbestand auf einem mäßig grundfrischen Standort mit stark verdichtetem Untergrund. Das gesamte abfließende Wasser drang entlang der gestrichelten Linie direkt oberhalb der ansetzenden Verdichtung aus dem Bodenprofil aus.....	169
Abbildung 75: Erhöhung der Makroporenanzahl im Staukörper durch angepasste, tief wurzelnde Baumarten (nicht maßstabsgerecht).....	171
Abbildung 76: Wurzeln innerhalb des Staukörpers unter einem Buchen-Bergahorn-Mischbestand und das dadurch entstandene Sekundärporensystem im linken Bild (Tiefe: 1,50 m, $L_{d\text{eff}} = 1,58 \text{ g/cm}^3$, schluffiger Sand).....	172
Abbildung 77: Auf Grundlage des Luftbildes eingeteilte Bestände nach Baumart, Alter und Bestandesschluss im Gebiet der Tschirner Ködel.....	177
Abbildung 78: Begründung von Mischbeständen durch Voranbau von Weißtannen- und Buchengruppen unter einem Fichtenaltholzschirm (links) und Auflaufen eines natürlichen Verjüngungskerns, bestehend aus Tanne, Buche und Fichte im Frankenwald.....	182
Abbildung 79: Stark vernässte SOF 1 - Fläche im Wassereinzugsgebiet der Tschirner Ködel.....	185
Abbildung 80: Gesättigter Talboden als Folge permanenter Wasserzufuhr durch den angrenzenden Hang (Bild: Röthengrund, im Nov. 07).....	186

Abbildung 81: Während der Bergahorn hangwasserzügige, grundfeuchte Standorte sehr gut erschließt, reagiert das Wurzelwerk unter dem Einfluss von sauerstoffarmen Stauwasser äußerst empfindlich. Wurzelballen eines geworfenen Bergahorn auf Braunerde-Pseudogley; Hangverflachung im Mittelhangbereich mit stagnierender Staunässe auf 0,4 m unter der Geländeoberfläche 187

Abbildung 82: Instabile, standortswidrige Fichtenbestockung 188

Abbildung 83: Ein naturnah mit Schwarzerlen aufgeforsteter „Quellmuldenstandort“ im Fichten dominierten Frankenwald (Forstbetrieb Rothenkirchen, Forstrevier Tettau) 188

12. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Skalenbereiche zur Untersuchung hydrologischer Prozesse (aus: MENDEL 2000)..... 12

Tabelle 2: Aufteilung der Abflussprozesse hinsichtlich des Hochwasserbeitrages (Tabellenaufbau in Anlehnung an SCHÜLER 2005a)..... 23

Tabelle 3: Grundtypen von Wurzelsystemen, Beschreibung und Beispiele (zusammengestellt nach: Köstler et al. 1968) 41

Tabelle 4: Ergebnis einer Literaturrecherche. Zusammenstellung der standortsabhängigen, maximalen Durchwurzelungstiefen verschiedener Baumarten (aus: BINDER & MACHER 2006). Die in dieser Arbeit untersuchten Baumarten sind grau hinterlegt. 45

Tabelle 5: Übersicht des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials auf den Projektflächen im Frankenwald 57

Tabelle 6: Technische Spezifikationen der verwendeten Pegellogger 80

Tabelle 7: Kennzeichnung der Grundwasserneubildungsrate (aus: Höll 2002)..... 85

Tabelle 8: Ausgewiesene Kartiereinheiten der Konzeptbodenkarte im Untersuchungsgebiet der Tschirner Ködel 88

Tabelle 9: Bodenfeuchtestufen der thüringischen Standortskartierung nach dem vereinfachten Verfahren von 1992 90

Tabelle 10: Verschlüsselung der Standortseinheiten in Bayern 92

Tabelle 11: Vergebene Feuchtezahlen (Fz) für die ausgeschiedenen Wasserhaushaltsstufen der Standortskartierung in Bayern und Thüringen, Sto = Standort..... 98

Tabelle 12: Anpassung der Schwellenwerte zur Kalibrierung der Abflusssimulation eines 5 x 5 m gerasterten Höhenmodells 104

Tabelle 13: Zusammenstellung der Berechnungskennwerte der Parzellen P1 - P5 (Fi = Fichte; Bu = Buche; BAh = Bergahorn) (NORDMANN et al. 2009b)..... 119

Tabelle 14: Bodenkennwerte der Parzellen P1 und P2 ($L_{d\text{eff}}$ = effektive Lagerungsdichte; Grobskelett > 20mm, Grus 2 - 20mm in Masse%; nWSK = nutzbare Wasserspeicherkapazität; Wurzelintensität (Wurzelintens.) nach AD HOC AG BODEN (KA5) (NORDMANN et al. 2009b) 120

Tabelle 15: Bodenkennwerte der Parzellen 4 und 5 (Erläuterungen siehe Tab. 14) (NORDMANN et al. 2009b)..... 121

Tabelle 16: Bodenkennwerte der Parzellen P3 (NORDMANN et al. 2009b)..... 123

Tabelle 17: Berechnungskennwerte im Einzugsgebiet der Tschirner Ködel (Fi = Fichte, Bu = Buche, BAh = Bergahorn) (NORDMANN et al. 2009a) 125

Tabelle 18: Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P6 (oben) und P7 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skelettgehalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)..... 126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 19:	Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P8 (oben) und P11 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skelettgehalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)	128
Tabelle 20:	Bodenkundliche Kennwerte der Parzellen P9 (oben) und P10 (unten), Lagerungsdichte (Ld), Skelettgehalt (Grobskelett >20 mm, Mittel-/Feingrus 2-20 mm) in Masse%, Wurzelintensität (Wurzelintens.) und Schätzung der nWSK nach ARBEITSKREIS STANDORTSERKUNDUNG (2003) (NORDMANN et al. 2009a)	131
Tabelle 21:	Zusammengestellte, durchschnittliche Anteile der Skelettfraktionen in Masseprozent (m%) zur Gesamtmasse des Bodens der Untersuchungsgebiete, getrennt nach Ober-/Unterbodenhorizont und Untergrundhorizont	134
Tabelle 22:	Die fünf höchsten Hochwasserabflüsse der Tschirner Ködel (Nordhalben) im Zeitraum von 1966 - 2009 (Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) - Hochwassernachrichtendienst)	140

13. Lebenslauf – Bastian Nordmann

Geboren am 27.06.1980 in Neuhaus am Rennweg

2001 – 2006 Studium der Forstwissenschaft an der Technischen Universität Dresden. Diplomarbeit: „Auswirkung verschiedener Hiebsarten auf die Strahlungs- und Bodenfeuchteverhältnisse in Fichtenbeständen des Tharandter Waldes.“



2006 – 2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) – Sachgebiet Schutzwald und Naturgefahren. Verantwortlich für das Projekt: „Beitrag der Forstwirtschaft zum vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung der Waldflächen“

seit 2009 Referendariat für den höheren Forstdienst in Bayern. Ausbildungsorte: Landsberg am Lech (BaySF) und Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AELF) Ingolstadt, Außenstelle Eichstätt

Publikationen und Manuskripte

(2008) Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung von Waldflächen. Nordmann, B., Göttlein, A., Arenhövel, W. & F. Binder. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, 76, S. 108

(2009) Einfluss unterschiedlicher Waldbestockung auf die Abflussbildung – ein Beispiel aus einem Wassereinzugsgebiet im Frankenwald. Nordmann, B., Göttlein, A. & F. Binder. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 53(2), S. 80-95

(2009) Einfluss verschiedener Baumarten auf das Abflussgeschehen – Ergebnisse eines Beregnungsversuchs im Frankenwald, Thüringen. Nordmann, B., Göttlein, A. & F. Binder. Forst und Holz, 64, S. 2-11

(2009) Das Wurzelwachstum des Bergahorns. B. Nordmann. LWF-Aktuell zum Baum des Jahres 2009, S. 30-32

Zeitungsberichte

14.10.2006 – Wasser marsch für Hochwasserschutz. Lokalzeitung Südthüringen „Freies Wort“

23.04.2009 – Waldumbau im Landkreis schützt vor Hochwasser.
Neue Presse Coburg-Kronach

Vorträge

- (2008) Erste Ergebnisse des Beregnungsversuchs in Sonneberg, Thüringen. Vortrag im Landesamt für Umwelt, München
- (2008) Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung abflusssensitiver Waldflächen. Vortrag im Rahmen des Arbeitskreises „Waldboden“ am 24. - 25. April in Freiburg
- (2008) Einfluss der Baumartenwahl auf den vorbeugenden Hochwasserschutz. Seminar „Waldbau, Inventur und nachhaltige Nutzung“ am 24.07.2008 in Freising
- (2009) Das Problem mit dem Interflow – Ein Verfahren zur Ausweisung hochwassersensitiver Waldflächen. Seminarreihe „Waldökosystemforschung“ am 04.02.2009 in Freising
- (2009) Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung abflusssensitiver Waldflächen. Abschlussveranstaltung am 22.04.2009 in Lauenstein/Frankenwald mit Vertreter verschiedener Institutionen und dem Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz

Posterpräsentationen

- (2008) Poster auf der forstwissenschaftlichen Tagung 2008 zum Thema: „Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft“ am 24. - 27. September in Freiburg

Teilnahme an Tagungen ohne eigenen Vortrag

- 24. - 26. September 2007: “1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation” in Trier