

## **Diplomarbeit**

# **Die bodenphysikalische Charakterisierung von Flächen unterschiedlicher Nutzung hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Natzschung – eine Untersuchung im Mittleren Erzgebirge –**



eingereicht am Geographischen Institut der Freien Universität Berlin

von

**Anja Löhe**

Berlin, im Februar 2006

Gutachter: Prof. Dr. Achim Schulte, PD Dr. Bernd Wünnemann

## **DANKSAGUNG**

Zur Vollendung dieser Arbeit haben viele Menschen einen wertvollen Beitrag geleistet. An dieser Stelle soll Ihnen ein herzlicher Dank zukommen.

Zunächst gebührt Herrn PROF. DR. SCHULTE ein großes Dankeschön für die Begleitung und Begutachtung dieser Arbeit. Bei Herrn PD DR. WÜNNEMANN möchte ich mich für die Annahme und Zweitbegutachtung dieser Arbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt JENS BÖLSCHER für die vielen fachlichen Anregungen und fruchtbaren Gespräche in guter Atmosphäre. In jeder schwierigen Phase hat er Zeit erübrigt um die manchmal unstrukturierten Gedanken wieder zu ordnen. In guter Erinnerung werde ich auch die gemeinsamen Geländeaufenthalte im Erzgebirge behalten.

Für die Betreuung bei den Laborarbeiten bedanke ich mich bei Herrn DR. H.-P. RÖPER und Frau M. BURMEISTER. Ebenso geht ein herzlicher Dank an MATHIAS RICKING und TOBIAS SCHULTZE, die die Arbeitsbedingungen im Labor in vielerlei Hinsicht verbessert haben.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch an MIKE RAMELOW aussprechen, dessen Begleitung durch die gesamte Diplomarbeitsphase ich keinesfalls missen möchte. Insbesondere seine Unterstützung bei den GIS- und Geländearbeiten war sehr wertvoll und bereichernd.

Ferner bedanke ich mich beim STAATSBETRIEB SACHSENFORST für die erteilte Unterstützung und die freundliche Überlassung einiger Studien, die in ihrem Auftrag durchgeführt wurden. In diesem Zusammenhang sei auch Herrn SCHERZER von der Firma UDATA gedankt. Ein besonderer Dank gebührt Herrn DR. DITTRICH vom Sächsischen Forstbetrieb Marienberg für die Bereitstellung von Daten und die Unterstützung bei den Geländearbeiten.

Mein herzlichster Dank gilt MICHAEL UNGERER, der mich nicht nur moralisch unterstützt hat, sondern auch wusste, wann Ablenkung unabdingbar war. Zusätzlich sei ihm für seinen tatkräftigen Einsatz zur Gewinnung der Geländedaten gedankt.

Ein Dank geht auch an die Teilnehmer der Erzgebirgs-Geländepraktika 2004 & 2005, die eine wichtige Unterstützung für die Gewinnung der Geländearbeiten geleistet haben.

Für das Korrekturlesen dieser Arbeit möchte ich S. CARSTEN, M. RICKING, M. SENNEKAMP und R. WAGNER danken. Den besonderen Einsatz von C. LÖHE bei der Vollendung dieser Arbeit werde ich immer in guter Erinnerung behalten.

Meine Dankbarkeit gilt insbesondere meiner Familie und meinen Freunden, die unermüdbare Zuhörer waren, und mit moralischer Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Berlin im Februar 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>X</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Problemstellung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Fragestellung und Zielsetzung .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Stand der Forschung.....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Theoretischer Forschungsstand zur Abflussbildung .....	3
1.3.2 Regionaler Forschungsstand zur Abflussbildung.....	10
<b>2 EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGBIET.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Lage des Einzugsgebietes .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Geologie und Geomorphologie .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Geologie.....	16
2.2.2 Geomorphologie .....	17
<b>2.3 Klima .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Oberflächengewässer und Hydrogeologie.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Böden.....</b>	<b>23</b>
2.5.1 Bodentypen und Bodenarten .....	23
2.5.2 Bodenwasserhaushalt.....	25
<b>2.6 Vegetation und Landnutzung .....</b>	<b>26</b>
2.6.1 Potenzielle natürliche Vegetation.....	26
2.6.2 Tatsächliche Vegetation.....	27
2.6.3 Landnutzung .....	28
<b>3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Geländearbeit.....</b>	<b>31</b>
3.1.1 Standortwahl .....	31
3.1.2 Bodenkundliche Profilaufnahme .....	32
3.1.3 Stechzylinderbeprobung .....	32
3.1.4 Infiltrationsmessung .....	33
<b>3.2 Laborarbeit .....</b>	<b>35</b>
3.2.1 Probenvorbereitung .....	35
3.2.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung .....	36
3.2.3 Bestimmung der Trockenrohichte .....	37
3.2.4 Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz .....	38

3.2.5 Bestimmung des Wassergehalts des Bodens als Volumenanteil .....	40
3.2.6 Bestimmung des organischen Gehalts des Bodens .....	41
<b>3.3 Datenberechnung und Datenableitung.....</b>	<b>42</b>
3.3.1 Berechnung des Porenvolumens .....	42
3.3.2 Berechnung der effektiven Lagerungsdichte .....	42
3.3.3 Ableitung der Porengrößenverteilung .....	42
3.3.4 Ableitung der gesättigten Wasserleitfähigkeit .....	43
<b>4 ERGEBNISSE.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Beschreibung der Untersuchungsstandorte.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen.....</b>	<b>50</b>
4.2.1 Ergebnisse der Bodenartenanalyse .....	50
4.2.2 Laborergebnisse der forstwirtschaftlich genutzten Standorte .....	51
4.2.3 Laborergebnisse der landwirtschaftlich genutzten Standorte .....	54
4.2.4 Gemeinsame Betrachtung aller Untersuchungsstandorte .....	55
4.2.5 Zusammenfassende Betrachtung .....	57
<b>4.3 Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsgrößen.....</b>	<b>57</b>
4.3.1 Bodenwasserhaushaltsgrößen der forstwirtschaftlich genutzten Standorte .....	58
4.3.2 Bodenwasserhaushaltsgrößen der landwirtschaftlich genutzten Standorte .....	61
4.3.3 Zusammenfassende Betrachtung aller Standorte.....	63
<b>4.4 Ergebnisse der Infiltrationsmessungen .....</b>	<b>64</b>
4.4.1 Minimale Infiltrationsrate .....	64
4.4.2 Streuung der gemessenen minimalen Infiltrationsrate.....	66
4.4.3 Gegenüberstellung von minimaler Infiltrationsrate und kf-Wert.....	67
4.4.4 Zusammenfassende Betrachtung .....	69
<b>5 DISKUSSION.....</b>	<b>70</b>
<b>5.1 Bewertung der bodenphysikalischen Laborwerte.....</b>	<b>70</b>
<b>5.2 Bewertung der Daten zur Porengrößenverteilung.....</b>	<b>73</b>
<b>5.3 Bewertung der gemessenen Infiltrationsraten.....</b>	<b>75</b>
5.3.1 Fehlerbetrachtung.....	75
5.3.2 Bewertung der Infiltrationsraten hinsichtlich des Porensystems .....	76
5.3.3 Standorteinteilung hinsichtlich des Infiltrationsmechanismus .....	78
5.3.4 Wirkungen der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Infiltrationsrate.....	79
5.3.5 Wirkungen der forstwirtschaftlichen Nutzung auf die Infiltrationsrate .....	83
5.3.6 Bedeutung von Lagerungsdichte und Porenvolumen für die Infiltrationsrate .....	90

5.3.7 Bedeutung der kf-Werte für die Infiltrationsrate .....	91
<b>5.4 Schlussfolgerungen zur Oberflächenabflusswirksamkeit.....</b>	<b>92</b>
5.4.1 Identifizierung oberflächenabflusswirksamer Standorte.....	92
5.4.2 Schlussfolgerungen zum Oberflächenabfluss im Untersuchungsgebiet .....	94
<b>5.5 Ableitungen für die Parametrisierung des NASIM-Modells .....</b>	<b>97</b>
5.5.1 Das Teilsystem Boden in NASIM.....	97
5.5.2 Empfehlungen für die Bodenkennwerte .....	98
<b>6 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>103</b>
<b>7 LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>107</b>
<b>8 ANHANG .....</b>	<b>120</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des typischen Verlaufs der Infiltrationsrate	4
Abbildung 2:	Schematische Darstellung der Makroporenwirkung	7
Abbildung 3:	Häufigkeitsverteilung der Flächenanteile gleicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Flöha (Pegel Borstendorf) und der Natzschung	12
Abbildung 4:	Lage des Untersuchungsgebietes	13
Abbildung 5:	Topographische Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Natzschung	15
Abbildung 6:	Geologie des Untersuchungsgebietes	17
Abbildung 7:	Jahresniederschlagssumme (mm) im Erzgebirge (1901-1950)	20
Abbildung 8:	Jahresdurchschnittstemperatur (C°) im Erzgebirge (1901-1950)	21
Abbildung 9:	Flächennutzungsanteile im Untersuchungsgebiet	29
Abbildung 10:	Landnutzungsverteilung im Jahr 1992/2000 im Untersuchungsgebiet	30
Abbildung 11:	Einschlagvorrichtung für Stechzylinder mit Einschlaghammer	32
Abbildung 12:	Eingetriebenes Doppelring-Infiltrometer mit Messbrücke	34
Abbildung 13:	Lage der Untersuchungsstandorte im Einzugsgebiet der Natzschung	45
Abbildung 14:	Standortbezogene Darstellung der effektiven Lagerungsdichte des obersten Horizontes aus beiden Nutzungsgruppen	56
Abbildung 15:	Prozentuale Klassenverteilung der FK-Werte der Forstgruppe	59
Abbildung 16:	Prozentuale Verteilung der kf-Klassen in der Gruppe der Forststandorte	60
Abbildung 17:	Prozentuale Verteilung der kf-Klassen bei den landwirtschaftlich genutzten Standorten	63
Abbildung 18:	Darstellung der Variationsbreite der minimalen Infiltrationsraten	67
Abbildung 19:	Logarithmische Darstellung der minimalen Infiltrationsraten im Vergleich zu den aus Lagerungsdichte und Bodenart abgeleiteten kf-Werten	68
Abbildung 20:	Zusammenhang zwischen organischer Substanz und Trockenroh-dichte	71
Abbildung 21:	Standort Ackerfläche 11	80
Abbildung 22:	Standort 15 mit Wiesenbewuchs	81
Abbildung 23:	Standort 16 mit Wiesenvegetation	81
Abbildung 24:	Standort 12 mit Grasvegetation	82
Abbildung 25:	Standort 1 mit Grasvegetation und lichtem Jungbaumbestand	84

---

Abbildung 26:	Standort 2 mit Grasvegetation und lichem (Jung-)Baumbestand	84
Abbildung 27:	Standort 5 mit Sukzessionsvegetation	85
Abbildung 28:	Standort 3 mit Hochwaldbewuchs	86
Abbildung 29:	Standort 13 mit Hochwaldbewuchs und dichter Grasvegetation	87
Abbildung 30:	Standort 14 mit Hochwaldbewuchs und Strauchschicht	87
Abbildung 31:	Standort 10 mit Baumbestand mittleren Alters und Jungbäumen	88
Abbildung 32:	Standort 4 mit Gras- und dichter Jungbaumvegetation	89
Abbildung 33:	Das Teilsystem Boden in NASIM	97
Abbildung 34:	Nicht-linearer Infiltrationsverlauf nach HOLTON	99
Abbildung 35:	Normalisierung der Bodenschichtung in NASIM	101
Abbildung 36:	Standort 1 - lichte Aufforstungsfläche im Randbereich eines Hochwaldes	120
Abbildung 37:	Standort 1 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	120
Abbildung 38:	Standort 1 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	120
Abbildung 39:	Standort 2 - lichte Wiederaufforstungsfläche	121
Abbildung 40:	Standort 2 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	121
Abbildung 41:	Standort 2 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	121
Abbildung 42:	Standort 3 - Hochwaldfläche	122
Abbildung 43:	Standort 3 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	122
Abbildung 44:	Standort 3 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	122
Abbildung 45:	Standort 4 - dicht bewachsene Aufforstungsfläche	123
Abbildung 46:	Standort 4 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	123
Abbildung 47:	Standort 4 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	123
Abbildung 48:	Standort 5 - Kahlschlagfläche mit Sukzessionsvegetation	124
Abbildung 49:	Standort 5 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	124
Abbildung 50:	Standort 5 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	124
Abbildung 51:	Standort 6 - dichte Aufforstungsfläche mit Sträuchern und Jungbäumen	125
Abbildung 52:	Standort 6 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	125
Abbildung 53:	Standort 6 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	125
Abbildung 54:	Standort 9 - Fichten-Hochwald	126
Abbildung 55:	Standort 9 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	126

---

Abbildung 56:	Standort 9 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	126
Abbildung 57:	Standort 10 - Mischwald mit Alt- und Jungbestand	127
Abbildung 58:	Standort 10 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	127
Abbildung 59:	Standort 10 - Tiefenfunktion der Porengrößenverteilung	127
Abbildung 60:	Standort 11 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	128
Abbildung 61:	Standort 11 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	128
Abbildung 62:	Standort 11 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	128
Abbildung 63:	Standort 12 - Rasenfläche	129
Abbildung 64:	Standort 12 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	129
Abbildung 65:	Standort 12 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	129
Abbildung 66:	Standort 13 - Hochwaldforst	130
Abbildung 67:	Standort 13 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	130
Abbildung 68:	Standort 13 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	130
Abbildung 69:	Standort 14 - Hochwaldforst	131
Abbildung 70:	Standort 14 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	131
Abbildung 71:	Standort 14 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	131
Abbildung 72:	Standort 15 - Grünlandstandort	132
Abbildung 73:	Standort 15 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	132
Abbildung 74:	Standort 16 - Grünlandstandort mit Stauwasserhorizont	133
Abbildung 75:	Standort 16 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	133
Abbildung 76:	Standort 16 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	133
Abbildung 77:	Standort 19 - Hochwaldforst	134
Abbildung 78:	Standort 19 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens	134
Abbildung 79:	Standort 19 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung	134

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Übersicht über die Beziehung zwischen Saugspannung, Porengröße und die daraus abgeleiteten Wasserbindungsformen im Boden	6
Tabelle 2:	Ergebnisse des Testdurchlaufs zur Dichtebestimmung an Quarz	40
Tabelle 3:	Darstellung der Laborwerte aller forstlich genutzten Untersuchungsstandorte	52
Tabelle 4:	Darstellung der Laborwerte aller landwirtschaftlich genutzten Untersuchungsstandorte	54
Tabelle 5:	Darstellung der aus Labor- und Geländeuntersuchungen gewonnenen bodenphysikalischen Kennwerte der Forststandorte sowie der nach HYDROTEC abgeleiteten kf-Werte	58
Tabelle 6:	Prozentuale Verteilung der LK-Klassen in der Forst-Gruppe	60
Tabelle 7:	Darstellung der aus Labor- und Geländeuntersuchungen gewonnenen bodenphysikalischen Kennwerte der Landwirtschaftsstandorte sowie der nach HYDROTEC abgeleiteten kf-Werte	61
Tabelle 8:	Prozentuale Verteilung der FK-Klassen in der Gruppe der Landwirtschaftsstandorte	62
Tabelle 9:	Überblick über alle gemessenen minimalen Infiltrationsraten (mm/h)	64
Tabelle 10:	Darstellung der beiden geringsten minimalen Infiltrationsraten (min. IR) und der repräsentativen Infiltrationsrate für jeden Standort	65
Tabelle 11:	Differenzen zwischen der gemessenen minimalen Infiltrationsrate und dem aus Körnung und Lagerungsdichte abgeleiteten kf-Wert	69
Tabelle 12:	Gegenüberstellung von minimaler Infiltrationsrate (min. IR) in mm/h und substratspezifischer kf-Wertklasse nach HYDROTEC (2003)	78
Tabelle 13:	Maximale Infiltrationsraten für kf-Wert-Bereiche	100
Tabelle 14:	Standort 1 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	120
Tabelle 15:	Standort 2 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	121
Tabelle 16:	Standort 3 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	122
Tabelle 17:	Standort 4 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	123

---

Tabelle 18:	Standort 5 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	124
Tabelle 19:	Standort 6 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	125
Tabelle 20:	Standort 9 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	126
Tabelle 21:	Standort 10 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	127
Tabelle 22:	Standort 11 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	128
Tabelle 23:	Standort 12 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	129
Tabelle 24:	Standort 13 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	130
Tabelle 25:	Standort 14 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	131
Tabelle 26:	Standort 15 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	132
Tabelle 27:	Standort 16 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	133
Tabelle 28:	Standort 19 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)	134

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

A	Ackerland
FB	Kahlschlag
FH	Hochwald-Forst
FK	Feldkapazität, in Vol.% bzw. mm/dm
FP	Pflanzung, Aufforstung
GI	Wiese
GOK	Geländeoberkante
GPV	Gesamtporenvolumen, in Vol.%
GW	Grünland - Wechselwirtschaft
HHQ	der höchste jemals gemessene Abflusswert, in m <sup>3</sup> /s
kf-Wert	gesättigte Wasserleitfähigkeit, in cm/d oder mm/h
Ld	effektive Lagerungsdichte (nach AG BODEN 1994)
LK	Luftkapazität, in Vol.% bzw. mm/dm
MQ	arithmetisches Mittel aller Hauptbeobachtungen des Abflusses im betrachteten Zeitraum einer festgelegten Reihe von Jahren, in m <sup>3</sup> /s
nFK	nutzbare Feldkapazität, in Vol.% bzw. mm/dm
NNQ	der niedrigste, jemals gemessene Abflusswert, in m <sup>3</sup> /s
pF-Wert	der logarithmierte Wert der Wasserspannung ( $pF = \log   \text{cm WS, hPa}  $ )
PV	Porenvolumen, in %
WP	Welkepunkt
$\rho_B$	Dichte der festen Bodensubstanz, in g/cm <sup>3</sup>
$\rho_t$	Trockenrohddichte, in g/cm <sup>3</sup>

## 1 EINLEITUNG

Diese Diplomarbeit entsteht im Kontext einer Dissertation zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung in der Angewandten Physischen Geographie der Freien Universität Berlin. Mit Hilfe des deterministischen Modells NASIM sollen die hydrologischen Verhältnisse für das Einzugsgebiet der Natzschung im Mittleren Erzgebirge in Sachsen modelliert werden. NASIM, als flächendetailliertes Modell, das auf der Basis von Teilflächen die Abflussbildung und -konzentration simuliert, benötigt eine Vielzahl von Informationen als Eingabeparameter. Dazu zählen unter anderem Parameter für die hydrologischen und hydraulischen Bodeneigenschaften. Alle definierten Teilflächen des Einzugsgebietes müssen mit diesen Kennwerten gespeist werden, um eine möglichst realitätstreue Abbildung der hydrologischen Eigenschaften des Gebietes leisten zu können. Bei der Gewinnung dieser gebietsspezifischen Parameter zur Eichung der Modellgrundlagen setzt diese Diplomarbeit an.

Eine detailliertere Darlegung der Problemstellung und der Fragestellung dieser Arbeit erfolgt im Verlauf des ersten Kapitels. Auch der aktuelle Stand der Forschung zur Abflussbildung wird darin aufgegriffen. Im folgenden Kapitel wird die physisch-geographische Ausstattung des Untersuchungsgebietes geschildert. Daran schließt sich in Kapitel 3 die Beschreibung der angewandten Untersuchungsmethoden an, zu denen sowohl Gelände- als auch Laborarbeiten zählen. Die Präsentation bzw. die Erörterung der Ergebnisse dieser Untersuchungen finden in Kapitel 4 respektive Kapitel 5 statt. In abschließenden Kapitel 6 erfolgt die Zusammenfassung der wesentlichen Untersuchungsergebnisse.

### 1.1 Problemstellung

Den Hintergrund der geplanten Modellierung bildet die Tatsache, dass sich bei Starkniederschlägen schon in den oberen Einzugsgebietslagen kleinere regional begrenzte Hochwässer mit großem Gefahrenpotenzial und hoher Schadenssumme ausbilden (LAWA 1995). Durch den größtenbedingt geringen Zeitversatz zwischen meteorologischem Ereignis und hydrologischer Erscheinung sind Hochwasserabflüsse in kleinen Einzugsgebieten von besonderer Gefährlichkeit, da Möglichkeiten zur Vorhersage und Warnung stark eingeschränkt sind (PESCHKE 2001). Dies trifft insbesondere auf die Kammlagen des sächsischen Erzgebirges zu. Die Starkregenereignisse vom August 2002 lösten in dieser Region zahlreiche extrem gefährliche Hochwässer aus, die teilweise Rekordstände an den Pegeln verzeichneten. Die Stadt Olbernhau beispielsweise, an der Mündung der Natzschung in die Flöha gelegen, entging nur knapp einer Katastrophe. Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes könnten eine mögliche Lösung bieten.

Das Konzept des dezentralen, integrierten Hochwasserschutzes beruht auf der Grundidee, den (quasi-)natürlichen Gebietsrückhalt für Niederschlagswasser zu erhöhen. Ansatzmög-

lichkeiten für entsprechende Maßnahmen sind schon in den oberen Lagen eines Einzugsgebietes denkbar. Dazu dienen neben der Integration von Retentionsarealen in die Oberläufe der Bäche weitere möglichst naturnahe Maßnahmen, wie der Rückbau begradigter Flussstrecken oder eine veränderte Bewirtschaftungsweise landwirtschaftlicher Flächen. Alle Maßnahmenbestandteile sollen in das natürliche Landschaftsbild eingepasst werden (ASSMANN et al. 1998; ASSMANN 1999). Da detaillierte hydrologische Kenntnisse des Gebietes die Voraussetzung für wirksame Schutzmaßnahmen bilden, ist der Maßnahmenplanung die Simulation der Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse vorangestellt. Um diese Simulation durch eine optimale Anpassung der Modellbedingungen an die Geländeverhältnisse zu ermöglichen, werden im Rahmen dieser Diplomarbeit Parameter erhoben, die für das bodenhydrologische Verhalten ausschlaggebend sind.

## 1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Der Boden besitzt eine verzögernde Wirkung auf den Wasserabfluss. Dies hängt einerseits von seinem aktuellen Speichervermögen ab, andererseits aber auch davon, wie schnell das Wasser infiltriert. Während eines bestimmten Niederschlagsereignisses entscheidet demnach das Ausmaß der aktuellen Infiltration, die Infiltrationsrate, über die Bildung von Oberflächenabfluss im Sinne HORTONS.

Für die Infiltrationsfähigkeit eines Bodens nehmen zusätzlich zur Körnung bodenphysikalische Parameter wie Lagerungsdichte und Porenvolumen eine bestimmende Größe ein. Ergänzend zu diesen Parametern sind die Porengrößenverteilung des Bodens sowie die gesättigte Wasserleitfähigkeit – im Folgenden als Kennwerte des Bodenwasserhaushalts bezeichnet – entscheidend. Dabei übt die Lagerungsdichte einen deutlichen Einfluss auf die Wasserhaushaltskennwerte aus (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Als weiterer Einflussfaktor auf die Infiltrationsfähigkeit eines Bodens ist die Landnutzung von Bedeutung. Diese kann sich durch die Bewirtschaftungsform lockernd oder verdichtend auf den Boden auswirken. Aus diesen Überlegungen ergeben sich die leitenden Fragestellungen dieser Arbeit:

- I. Wie sind die bodenphysikalischen Kennwerte sowie die abgeleiteten Bodenwasserhaushaltsgrößen (Porengrößenverteilung und  $k_f$ -Werte) an den Untersuchungsstandorten ausgeprägt?
- II. Lassen sich daraus Rückschlüsse auf die Infiltrationsleistung ziehen?
- III. Welche Infiltrationsraten weisen die untersuchten Standorte im gesättigten Feuchtezustand auf (minimale Infiltrationsrate)?
- IV. Inwiefern lassen sich zwischen den Standorten verschiedener Nutzung Unterschiede bei den bodenphysikalischen Kennwerten, bei den Bodenwasserhaushaltsgrößen und bei den Infiltrationsraten feststellen?

Um dies beantworten zu können erfolgt eine mikroskalige Untersuchung, die einen Teilausschnitt des komplexen Systems der Abflussbildung bzw. des Bodenwasserhaushaltes an Hand beispielhafter Standortuntersuchungen betrachtet. Daraus ergibt sich folgende Zielstellung:

- I. Es sollen mit Hilfe der ermittelten Infiltrationsrate sowie der physikalischen Bodeneigenschaften Aussagen zur Oberflächenabflusswirksamkeit der untersuchten Standorte abgeleitet werden
- II. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Einordnung gebietstypischer Starkniederschlagsintensitäten verschiedener Jährlichkeit
- III. Es sollen Empfehlungen zur Parametrisierung des NASIM-Modells abgeleitet werden

Mit diesen Aussagen soll eine Grundlage für die korrekte Parametrisierung und damit die Eichung des Niederschlags-Abfluss-Modells geschaffen werden.

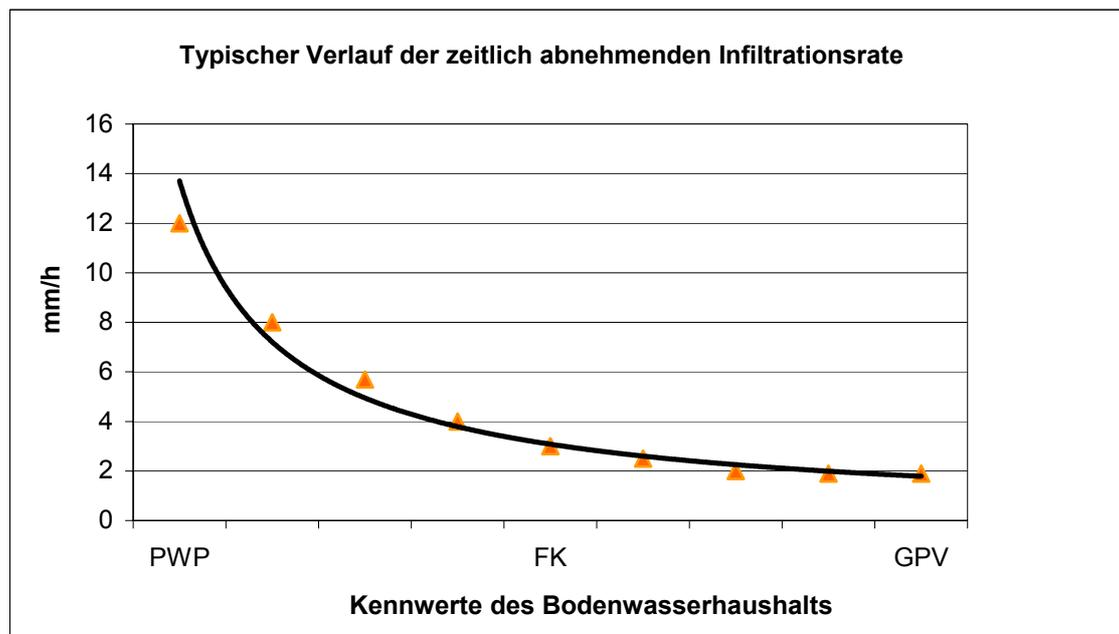
### **1.3 Stand der Forschung**

Die folgenden Kapitel sollen den wissenschaftlichen Hintergrund des behandelten Themas wiedergeben. In Kapitel 1.3.1 erfolgt eine kurze Aufarbeitung des Forschungsstandes zur Oberflächenabflussbildung, um dann in Kapitel 1.3.2 einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand im Untersuchungsgebiet zu geben.

#### **1.3.1 Theoretischer Forschungsstand zur Abflussbildung**

Zentrale Bedeutung für die Generierung schnell ansteigender Gewässerpegel in kleinen Einzugsgebieten besitzt der HORTON'sche Oberflächenabfluss, der die schnellste Abflusskomponente darstellt. Gemeinsam mit dem schnellen Zwischenabfluss, der nur mit geringer Verzögerung das Gerinne erreicht, bildet er den Direktabfluss (WILHELM 1997). Für das Entstehen dieser schnellen Abflusskomponente sowie für die Bildung des verzögerten Abflusses, der dem Grundwasserabfluss und dem langsamen Zwischenabfluss entspricht, ist der Boden das entscheidende Transformationsglied. Der auf den Boden auftreffende Niederschlag fließt entweder direkt ab oder er infiltriert und durchfeuchtet den Boden. Hinsichtlich der Oberflächenabflussbildung kommt den Infiltrationseigenschaften des Bodens eine Schlüsselstellung zu. Oberirdischer Landabfluss im Sinne HORTON's (1933) setzt ein, sobald die Niederschlagsintensität größer wird als die Infiltrationsfähigkeit des Bodens. Dabei kann zeitlich betrachtet zwischen *absolutem* und *verzögertem* HORTON'schem Oberflächenabfluss unterschieden werden. Der erste Fall tritt bei hoher Niederschlagsintensität und wenig durchlässigem Boden ein. Sind die Bedingungen umgekehrt, setzt der Oberflächenabfluss verzögert ein. Dabei nimmt die Infiltrationsrate mit zunehmender Bodenfeuchte ab und erreicht bei nahezu vollständiger Wassersättigung des

Bodens einen mehr oder weniger konstanten Wert (vgl. Abb. 1). Dieser wird als *minimale Infiltrationsrate* bezeichnet (SCHWARZ 1982, MENDEL 2000) und gibt die Geschwindigkeit wieder, mit der das Niederschlagswasser gravitativ in den groben Bodenporen versickern kann. BRONSTERT et. al. (2001) bezeichnet diese Form der Abflussbildung als Infiltrationsüberschuss. Beschrieben wird damit die Ausbildung einer stauenden Wasserschicht auf der Bodenoberfläche, die schwerkraftbedingt dem Gefälle folgend abfließt. Hydraulisch begünstigt wird dieser Prozess durch verminderte Oberflächenrauigkeit und wachsendes Geländegefälle (KUNTZE et al. 1994, PESCHKE 2001). Durch Feldstudien ist bekannt, dass das Gefälle die Abflussbildung nachweislich erst ab einem sehr hohen Neigungsgrad bei gleichzeitig geringem Vegetationsdeckungsgrad beeinflusst (LWF 2004). So konnten MOLLENHAUER et al. (1985) bei Beregnungsversuchen von landwirtschaftlich genutzten Flächen für den untersuchten Hangneigungsbereich von 8-18 % keinen nachweisbaren Einfluss auf den Oberflächenabfluss feststellen.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung des typischen Verlaufs der Infiltrationsrate, die mit zunehmender Wassersättigung des Bodens abnimmt (nach HYDROTEC 2003: 2-103)

Als Infiltration wird das Eindringen von Wasser in die Bodenoberfläche nach Niederschlägen, Beregnung oder Überstauung verstanden (BRONSTERT 1994). Grundlegend für die Infiltrationseigenschaften eines Bodens sind die Charakteristika der Bodenmatrix (MENDEL 2000). Dazu zählen die Körnung, die Ausbildung des Gefüges nebst Lagerungsdichte, das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung (BEUTH & WILEY-VCH 2000). Die aktuelle Infiltrationsrate, die häufig von der maximalen Infiltrationsrate abweicht, ist ebenso durch den Systemzustand (Bodenfeuchte) und die Ereigniseigenschaften (Intensität, Dauer, Menge des Niederschlags) bestimmt. Es lassen sich mit Hilfe der Kenntnis boden-

physikalischer Daten Schlussfolgerungen über den vertikalen Fließprozess des Wassers im Boden ziehen. Entscheidend für diesen Vorgang sind die Wasseraufnahmefähigkeit, die sättigungsabhängige Wasserleitfähigkeit sowie das Wasserhaltevermögen (Feldkapazität) des Bodens (RAWLS et al. 1992). Für den Fließprozess spielt die Porengrößenverteilung des Bodens eine zentrale Rolle, da sie die Wasserbindungsintensität bedingt (KUNTZE et al. 1994). Die Feldkapazität steht beispielsweise für einen Porengrößenbereich von  $< 0,2$  bis ca.  $50 \mu\text{m}$  (vgl. Tab.1), und gibt an, wie viel Wasser der Boden im wassergesättigten Zustand gegen die Schwerkraft halten kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). In diesem Sinne charakterisieren die Wasserhaushaltsgrößen den Bodenwasserhaushalt eines Standortes, indem sie als Maß für die Einteilung des Bodenwassers in Sickerwasser unterschiedlicher Geschwindigkeiten und in Haftwasser dienen (vgl. Tab.1).

Mit Hilfe mathematischer Ansätze, sogenannter Pedotransfer-Funktionen kann die Porengrößenverteilung von Bodenhorizonten auf Grundlage der Bodenart, des Tongehaltes, der Lagerungsdichte und des Organikanteiles errechnet werden (RENGER 1971, PESCHKE 2001, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Da den verschiedenen Porengrößenbereichen eine unterschiedliche Wirkung hinsichtlich der Wasserbewegung zugeordnet wird, stellen diese Größenklassen Synonyme für die Feldkapazität, die nutzbare Feldkapazität und die Luftkapazität dar (vgl. Tab.1). Auch der Wert für die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert), der in der Dimension einer Geschwindigkeit angegeben wird, korreliert eng mit der Bodenart und der Lagerungsdichte und ist somit ableitbar. Er beschreibt die vom Substrat abhängige hydraulische Leitfähigkeit im wassergesättigten Bodenzustand und wird auch als Permeabilität bezeichnet (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).

Die genannten Kennwerte (Lagerungsdichte, Porenvolumen, Porengrößenverteilung und kf-Wert) dienen als geeignete Indikatoren für das Infiltrationsverhalten von Böden. Auf Grund der Schwierigkeiten der direkten Messung der Infiltration im Gelände (vgl. Kapitel 3.1.4) wird heute überwiegend mit Indikatoren gearbeitet (SCHNUG & HANEKLAUS 2002).

Saugspannungsbereich		Äquivalentdurchmesser der Poren in $\mu\text{m}$	Bezeichnung der Poren	Unterteilung des Bodenwassers	Unterteilung der Speicherkapazität		
hPa (cm Wassersäule)	pF-Wert (lg cm WS)				Luftkapazität (LK) bzw. Speicherkapazität für Grund- & Stauwasser	nutzbare Feldkapazität (nFK)	Feldkapazität (FK)
< 60	< 1,8	> 50	weite Grobporen	schnell bewegliches Sickerwasser			
60 - 300	1,8 - 2,5	50 - 10	enge Grobporen	langsam bewegliches Sickerwasser			
300 - 15000	2,5 - 4,2	10 - 0,2	Mittelporen	Pflanzenverfügbares Haftwasser			
<b>Permanenter Welkepunkt (PWP)</b>							
> 15000	> 4,2	< 0,2	Feinporen	nicht pflanzenverfügbares Haftwasser	Totwasser (TW)		

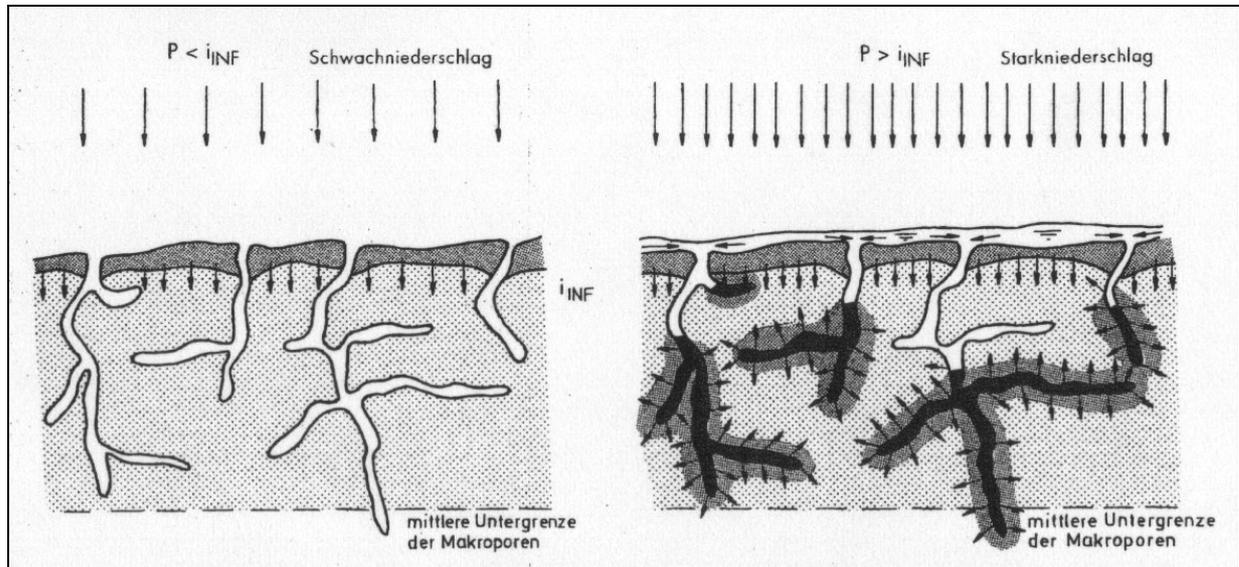
**Tab. 1:** Übersicht über die Beziehung zwischen Saugspannung, Porengröße und den daraus abgeleiteten Wasserbindungsformen im Boden (nach AG Boden 1994: 269)

Beim Infiltrationsvorgang muss grundsätzlich in Mikro- und Makroporeninfiltration unterschieden werden. Die Mikroporeninfiltration, auch Matrixinfiltration genannt, beschreibt den durch die Saugspannungskräfte des Bodens bedingten Anteil des Infiltrationsprozesses. Die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung der Wasserbewegung wurden mit der DARCY-Gleichung geschaffen (dargestellt z.B. in BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996: 396f). Dieser langsame Bodenwasserfluss ist an den kapillaren Porenraum im Inneren der Aggregate gebunden, so dass die langsam leitenden Poren ausschlaggebend sind. Bei diesem Infiltrationsprozess wird die maximale Einsickerungsrate durch die Bodenfeuchte an der Oberfläche und die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenmatrix bestimmt (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).

Der Makroporenfluss, der durch die Schwerkraft angetrieben wird, zeichnet sich durch eine deutlich schnellere Wasserbewegung aus, als die Bodenmatrix sie zulassen würde. Er findet in nicht-kapillaren Porengrößen und -strukturen statt (BEVEN & GERMANN 1982). Größenangaben für Makroporen schwanken in der Literatur zwischen  $> 30 \mu\text{m}$  und  $10.000 \mu\text{m}$  (UHLENBROOK & LEIBUNDGUT 1997: 16). Transportkanäle sind Trocken- und Schrumpfrisse, Pflanzenwurzeln und Wurmgänge, die das Wasser an Aggregatoberflächen entlang leiten (KUNTZE et al. 1994, ZEPP & HERGET 2001). Durch unzureichende Matrixinfiltration fließt das Wasser auf der Bodenoberfläche den Makroporen zu, füllt sie aus und wird unter Umgehung der Matrixkräfte als *bypass flow* schnell in tiefere Bodenschichten geleitet (vgl. Abb. 2). Die erhöhte Fließgeschwindigkeit im Makroporensystem, auch

präferenzielles Fließen genannt, kann bis zu 400 mal größer als in der Bodenmatrix sein (GERMANN 1981). Der Landoberflächenabfluss setzt ein, sobald die Aufnahmefähigkeit der Makroporen überschritten wird (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).

Die gesamte Infiltration kann somit als Summe der aktuellen Mikroporeninfiltration und der aktuellen Makroporeninfiltration beschrieben werden.



**Abb. 2:** Schematische Darstellung der Makroporenwirkung:

linkes Bild: Wirkung bei geringen Niederschlägen; rechtes Bild: Wirkung bei Starkregen  
(BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996: 396, nach PLATE & BRONSTERT 1994)

Die Infiltrationsfähigkeit wird als entscheidender Faktor für die Bildung von Oberflächenabfluss im Sinne HORTONS maßgeblich durch die Landnutzung respektive die Landbedeckung beeinflusst. Letztere resultiert aus der Bewirtschaftungsweise der Landfläche. Die Wirkung der Landbedeckung auf die Infiltration äußert sich in ihrem Einfluss auf die Beschaffenheit der Bodenoberfläche und Bodeneigenschaften (NIEHOFF 2001). Zu den Bodeneigenschaften zählen die Porengrößenverteilung, ihr Volumen und ihre Kontinuität. Dabei korreliert die Porengrößenverteilung der Primärporen stark mit der Korngrößenzusammensetzung der Bodenmatrix (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Im Gegensatz dazu hängt die Entstehung von Makroporen oder *Sekundärporen* stark von der Landnutzung und ihrer Bewirtschaftungsweise ab (NIEHOFF 2001).

Für hydrologische Untersuchungen im ländlichen Bereich sind zwei Landnutzungskategorien relevant: Zum einen landwirtschaftlich genutzte Flächen, und zum anderen forstwirtschaftlich genutzte und naturnahe Flächen. Diese beiden Kategorien werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung stärker differenziert. Bei der Verfeinerung der Kategorien innerhalb dieser beiden Gruppen wird auf die Differenzierung der Nutzungsart nach AG BODEN (1994: 72ff.) zurückgegriffen.

Untersuchungen zur Abflussbildung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen stehen in engem Zusammenhang zur Erosions- und Hochwasserproblematik. Als wesentliche Einflussgrößen auf die Infiltrations- und Versickerungsleistung der Böden wurde der Bewuchs sowie die Bodenbearbeitung identifiziert (MENDEL 2000: 132). Nach HORN & HARTGE (2001) führt faktisch jede Befahrung und jede Bearbeitung eines Bodens zur Zerstörung bzw. Veränderung gewachsener Strukturen. Dazu zählen die Unterbrechung der Grobporen, das Schaffen von Verdichtungshorizonten sowie die Veränderung der Porenverteilung und des Humusgehaltes. FENNER (1997) beschreibt die Verdichtungswirkung auf einem langjährigen Ackerstandort durch Befahrung in einem überproportionalen Rückgang des Grobporenvolumens. Die Bodenverdichtung und die damit einhergehenden veränderten Porensysteme wirken sich vermindern auf die Infiltrationskapazität aus (MORENO et al. 1974, BRONSTERT et al. 1993). Die Destabilisierung der Bodenstruktur und die Bodenverdichtung können somit zu erhöhtem Oberflächenabfluss beitragen (SOMMER 1998, FELDWISCH et al. 2001, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Gleichzeitig schafft die Bodenbearbeitung viele, auch horizontal ausgerichtete Poren im Pflughorizont, die wie Grobporen wirken. Folge einer Erhöhung der wirksamen Durchlässigkeit des Oberbodens ist in der Regel die Beschleunigung des hangparallelen, oberflächennahen Abflusses (BRONSTERT et al. 1993). Als anerkannt gilt die Aussage, dass eine extensive Bewirtschaftungsform positive Wirkungen auf das Bodengefüge und damit die Infiltrationsfähigkeit ausübt (SCHNUG & HANEKLAUS 2002). Bei Ackerflächen hat neben den physikalischen Bodeneigenschaften in besonderem Maße die Beschaffenheit der Bodenoberfläche einen Einfluss. Bei unbedeckter Bodenoberfläche besteht die Gefahr der Verschlammung, die den Infiltrationsvorgang gänzlich hemmen kann. Ausgelöst durch die niederschlagsbedingte mechanische Zerstörung der Bodenaggregate, kommt es zu einer Suspension des Bodenmaterials, die durch Infiltration eine dichtlagernde Sedimentationsschicht auf der Bodenoberfläche bildet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Verstärkter Oberflächenabfluss ist die Folge.

Untersuchungen von SCHÄFER (1981) in Bayern mit dem Doppel-Ringinfiltrometer auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ergaben mittlere Infiltrationswerte zwischen 10 und ca. 450 mm in der ersten Stunde. Diese Werte wurden auf Maisflächen verschiedener Bodenarten ermittelt.

Die Betrachtung der forstwirtschaftlichen Nutzung hinsichtlich ihrer hydrologischen Wirkung lässt darauf schließen, dass bewaldete Flächen auf Grund ihres hohen Wasserverbrauchs und ihrer hohen Speicherkapazität (Boden- und Interzeptionsspeicher) ausgleichend auf den Direktabfluss wirken (MENDEL 2000). Zudem ist unstrittig, dass die Versickerungsleistung im (naturnahen) Wald größer ist als auf landwirtschaftlichen Flächen. BURGER (1937) und ENGLER (1919) zeigten durch Untersuchungen mit einfachen Ring-

Infiltrationsmessungen in zwei Einzugsgebieten im Emmental/Schweiz, dass ungestörte Waldböden eine zehn- bis hundertmal höhere Infiltrationsleistung aufweisen, als benachbarte Feld- und Freiflächen. Sie führen dies auf die Bodenstruktur zurück. Andere Autoren konkretisieren die Begründung mit dem regelhaften Vorkommen von Grobporen in Waldböden, die bei landwirtschaftlichen Flächen die Ausnahme bilden (MORENO et al. 1974). Insgesamt ist die Porosität des Bodens vom Bewuchs abhängig (MENDEL 2000). Dabei begünstigt die Entwicklung von tiefreichenden Wurzelsystemen hohe Infiltrationswerte (MOLTSCHANOW 1957). Jedoch weisen Waldböden eine kleinräumige Variabilität bezüglich der minimalen Infiltrationsraten auf (SCHWARZ 1986). Bei Beregnungsexperimenten auf Waldstandorten ermittelten sowohl SCHWARZ (1985) als auch HERRMANN et al. (1989) erstaunlich hohe minimale Infiltrationsraten. Bei den Untersuchungen von SCHWARZ (1985) im Naturpark Schönbuch lagen diese Werte ungeachtet der verschiedenen Bodentypen zwischen  $52 - 79 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Bei anderen Beregnungsversuchen erreichten sie Spitzenwerte von  $183 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . HERRMANN et al. (1989) ermittelten in einem bewaldeten Mittelgebirgseinzugsgebiet im Harz minimale Infiltrationsraten über  $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Es wurde selbst nach neunstündiger Beregnung kein Oberflächenabfluss erzeugt. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass in naturnahen Waldflächen kein bzw. nur geringer HORTONScher Oberflächenabfluss zu beobachten ist (LEHNHARDT 1985, SCHWARZ 1985). Dabei wird auch der Bestandesdichte im Wald eine Wirkung auf die Abflussbeiwerte zugestanden. Es konnte auf Grund von SCS-Kurvennummervverfahren und auf Grundlage von Beregnungsversuchen festgestellt werden, dass eine abnehmende Bestandesdichte bis hin zur Kahlfäche tendenziell erhöhte Abflussbeiwerte erzeugt (LWF 2004 nach ROSEMAN 1988).

In der Literatur weniger diskutiert, bodenphysikalisch und damit abflussgenetisch aber von Bedeutung, sind mechanisch induzierte Schadverdichtungen in Forststandorten. Untersuchungen wie die von HILDEBRAND & WIEBEL (1982) weisen erhöhte Lagerungsdichten des Bodens nach Befahrung mit forstwirtschaftlichen Maschinen nach. Bei einem Vergleich der Lagerungsdichten befahrener und unbeeinflusster Lößlehme weisen die befahrenen Substrate im Oberboden bis ca. 30 cm Tiefe deutlich erhöhte Lagerungsdichten bis  $1,5 \text{ g/cm}^3$  auf. Die Lagerungsdichtewerte unbelasteter Vergleichsflächen liegen im Oberboden bis 40 cm Tiefe bei  $0,9$  bis  $1,3 \text{ g/cm}^3$ . Zusätzlich stellten HILDEBRAND & WIEBEL (1982) fest, dass die verdichtungsbedingte Verringerung des Porenvolumens hauptsächlich bei den weiten und engen Grobporen stattgefunden hat (ebd.).

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass trotz hoher Infiltrationsleistungen auch im Wald mit Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Und zwar kann dieser entweder direkt auf versiegelten Forstwegen entstehen, oder durch hangseitige Wegeanschnitte durch austretenden oberflächennahen Zwischenabfluss zustande kommen. Die Abflusswirksamkeit

hängt dann davon ab, ob das Wasser linear zum Vorfluter abfließt oder wieder versickern kann (LWF 2004).

### 1.3.2 Regionaler Forschungsstand zur Abflussbildung

Um eine Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit in den wissenschaftlichen Diskurs über die Region vornehmen zu können, werden an dieser Stelle Ergebnisse anderer Arbeiten zur (nutzungsbedingten) Abflussbereitschaft der vorhandenen Böden angeführt.

Ein Wissenschaftlerteam der TU Dresden<sup>1</sup> ging der Frage nach dem Effekt unterschiedlicher Landnutzungen auf die Dynamik des Gebietsabflusses nach. Zur Anwendung kam das forsthydrologische grey-box-Model BROOK90, mit dem für das 9,2 ha große Untersuchungsgebiet Rotherdbach (mittlere Hochlagen des Osterzgebirges) die Abflüsse sowohl für die bestehende Nutzung (Fichtenreinbestand) als auch für fiktive, für den Landschaftsraum jedoch typische alternative Landnutzungsformen (natürliche Buchenvegetation, Grünland, relativ lichte Waldschadens-Sukzession) simuliert wurden. Das Modell ist in der Lage die zeitliche und quantitative Abflussbildung inklusive wichtiger Mechanismen der Hochwasser-Abflussbildung (Sättigungsflächenabfluss, Fluss entlang vertikaler Makroporen) nachzuvollziehen. Die Simulation der Hochwasserwellen fand mit den Eingangsdaten des Extremniederschlags vom 9.-14. August 2002 (442 mm) statt. Zentrales Ergebnis der Arbeit ist eine verschärfte Abflussdynamik – schnellere und höhere Abflussmaxima - für die Nutzungsarten Grünland und Ersatzwald. Der Waldnutzung wird eine abflussdämpfende Wirkung nachgewiesen, die sich im Bereich geringerer Niederschlagsintensitäten deutlicher zeigt als im Bereich der Extremniederschläge. So äußern sich die maximalen Unterschiede bei einer Niederschlagsintensität, die nur 6 % des Starkregenereignisses vom 9.-14. August 2002 beträgt (26 mm). Die simulierten Abflussmaxima der Hochwasserwelle von Weide bzw. Ersatzwaldflächen betragen mit 4,2 bzw. 4,6 mm/Tag das Zweieinhalbfache der Abflussmaxima, die für eine Waldnutzung simuliert wurden (1,7 mm/Tag). Bei einer Simulation mit einer Niederschlagssumme von 442 mm für den Zeitraum vom 9. bis 14.08.2002 lag das Abflussmaximum bei Nicht-Waldnutzung um 15 bis 33 mm/Tag höher. Insgesamt weisen die reinen Grünlandflächen bei allen Niederschlagssummen die größten Abflusssummen auf. Die deutlichste Ausprägung bei den geringen Niederschlagssummen wird auf die schnellere Sättigung des Bodens auf Grund fehlender Makroporen zurückgeführt. Unterschiede in der Reaktion zwischen Fichten- und Buchenwald waren nicht feststellbar.

Die von SEEGERT et al. (2003) durchgeführten Modellrechnungen bestätigen die Annahme, dass intakte Wälder mindernd und entschärfend auf Höhe und zeitliche Dynamik von Hochwasserereignissen wirken. Nicht zuletzt führen sie als Begründung das Makroporensystem

---

<sup>1</sup> Mitarbeiter der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaft: Dipl. Hydrologe & Dipl. Forsting. J. SEEGERT, Dr. M. ARMBRUSTER, Prof. Dr. K. H. FEGER, Prof. Dr. C. BERNHOFER.

des Waldes an. Allerdings können die Ergebnisse auf Grund der für die fiktiven Nutzungen aus der Literatur abgeleiteten Modellparameter nur Tendenzen aufzeigen.

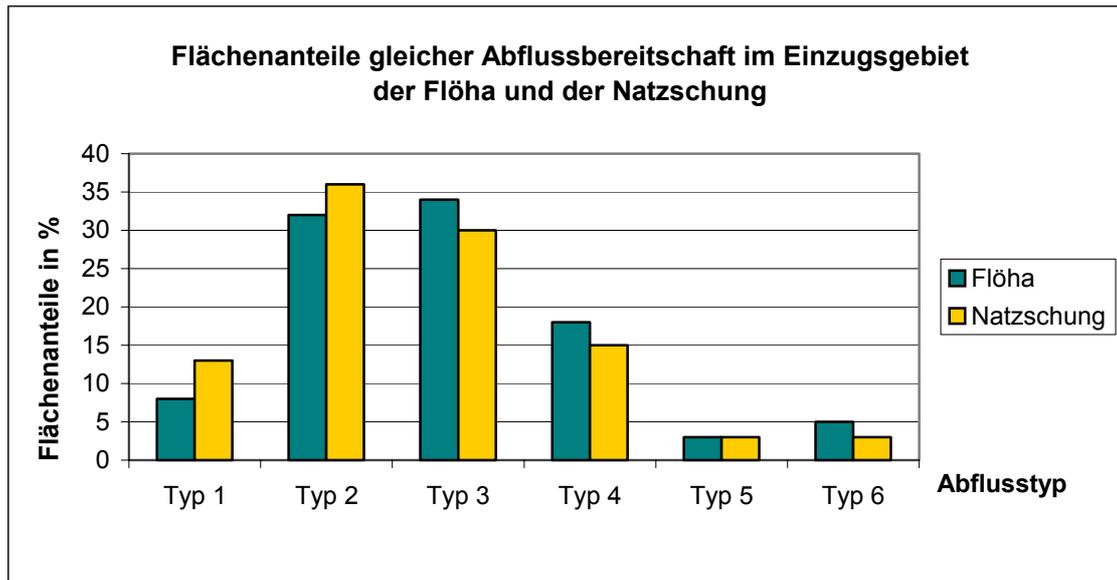
Vergleichbare Modellierungen zur Abflussdynamik im Einzugsgebiet der Natzschung sind nicht bekannt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Modellierung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet der Zschopau befasste sich ein Wissenschaftlerteam mit dem Einzugsgebiet der Flöha. Ziel der Untersuchungen war das Auffinden und Ausweisen funktional definierter Arealtypen, die bei Starkregenereignissen eine vergleichbare Abflussdynamik besitzen. Zusätzlich erfolgte eine Quantifizierung dieser Arealtypen mit relativen Kenngrößen.

BARTHEL, MANNSFELD und SANDNER (1973) führten für ihr Untersuchungsgebiet eine Analyse hinsichtlich der Bodennutzung, der Hangneigung und der Bodenform<sup>2</sup> durch. Mit Hilfe einer Kombinationsmatrix dieser drei Haupteinflussgrößen<sup>3</sup> wurden 32 Abflusstypen abgeleitet. Mittels eines Punktbewertungsverfahrens fand eine gewichtete Typenzusammenfassung zu sechs Flächentypen annähernd gleicher Abflussbereitschaft statt. Die Ergebnisse geben eine relative Klasseneinordnung mit den Stufen 1 (sehr geringe Abflussbereitschaft) bis 6 (sehr starke Abflussbereitschaft) wider. Für das Flöha – Einzugsgebiet stellt sich heraus, dass die Abflusstypen geringer und mäßiger Abflussbereitschaft mit einem Anteil von 32 % respektive 34 % an der Gesamtfläche am häufigsten vertreten sind. Abflusstyp 4 deckt einen Flächenanteil von 18 % ab, während die Typen 1, 5 und 6 nur untergeordnete Bedeutung besitzen. Die Betrachtung der Flächenanteile einzelner Abflusstypen im Einzugsgebiet der Natzschung zeigt eine leichte Verschiebung bei den Spitzenwerten in Richtung geringerer Abflussbereitschaft. Mit 36 % nimmt Abflusstyp 2 die größte Fläche ein. Es folgt in einer Größenordnung von 30 % Abflusstyp 3. Die Flächen mit mittlerer Abflussbereitschaft (Typ 4) erstrecken sich auf 15 % der Einzugsgebietsgröße, gefolgt von Typ 1 mit 13 % Flächenanteil. Nur 6 % der Einzugsgebietsfläche fallen in die Typenklasse starke Abflussbereitschaft (3 %) und sehr starke Abflussbereitschaft (3 %).

---

<sup>2</sup> Gemeint war nach der in der ehemaligen DDR gebräuchlichen Bodensystematik die Hauptbodenform, die eine Kombination aus Substrattyp und Bodentyp darstellt (z. B. Berglehm-Braunerden).

<sup>3</sup> Die Festlegung auf die o.g. drei Haupteinflussgrößen, die den Merkmalskomplex „Abflussbereitschaft“ wiedergeben sollen, erfolgte in methodischer Anlehnung an das Vorgehen in der Landschaftsökologie. Dieses orientiert sich an den mehr oder weniger stabilen Einflussgrößen.



**Abb. 3:** Häufigkeitsverteilung der Flächenanteile gleicher Abflussbereitschaft im Einzugsgebiet der Flöha (Pegel Borstendorf) und der Natzschung (nach BARTHEL et al. 1973).

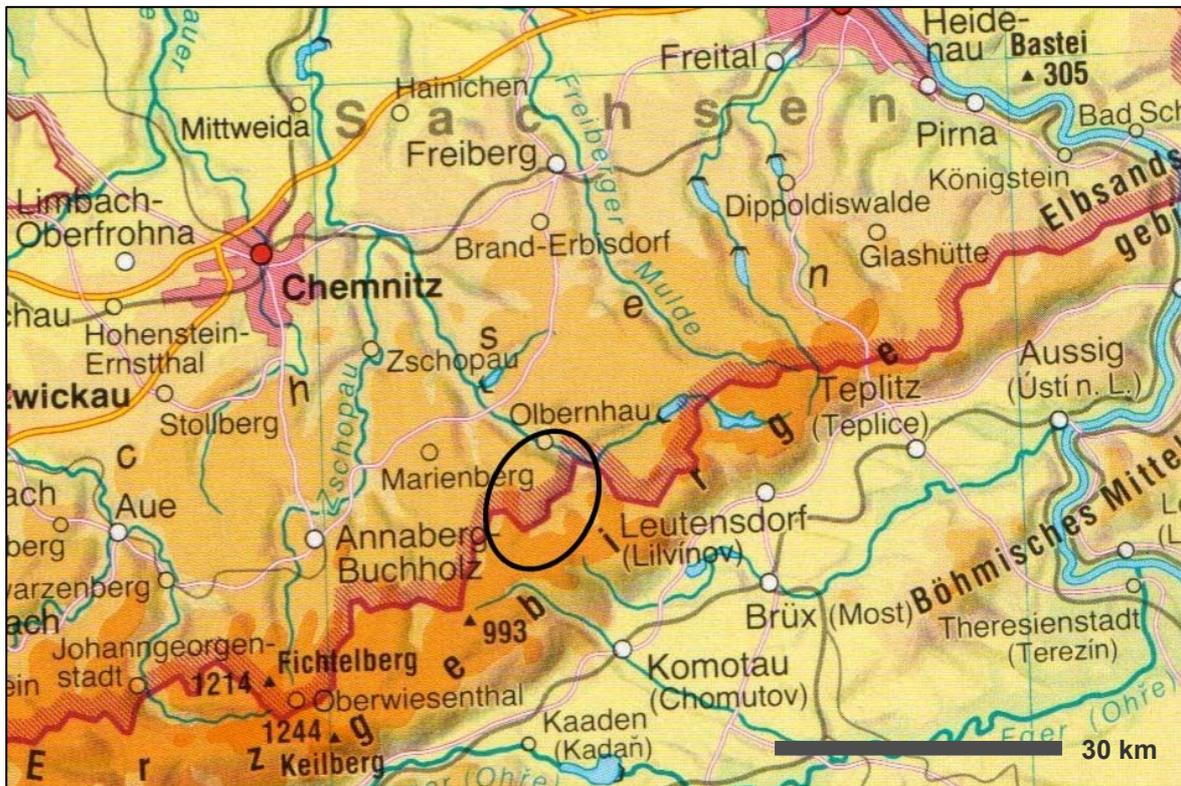
Es ist jedoch festzustellen, dass sich die Untersuchung ausschließlich auf DDR-Territorium bezieht. Im Falle des Einzugsgebietes der Natzschung bedeutet dies, dass nur ein Anteil von knapp 28 % des hydrologischen Einzugsgebietes in die Ergebnisse einfließt. Es fand keine empirische Überprüfung dieser Ergebnisse statt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einstufung der Flächen im deutschen Einzugsgebietteil der Natzschung zu 79 % in Klassen niedriger bzw. moderater Abflussbereitschaft vorgenommen wurde. Diese Einstufung basiert auf einem der Mesoskala angemessenen methodischen Vorgehen, so dass die Ergebnisse für kleinere Skalen recht undifferenziert ausfallen.

## 2 EINFÜHRUNG IN DAS UNTERSUCHUNGSGBIET

### 2.1 Lage des Untersuchungsgebietes

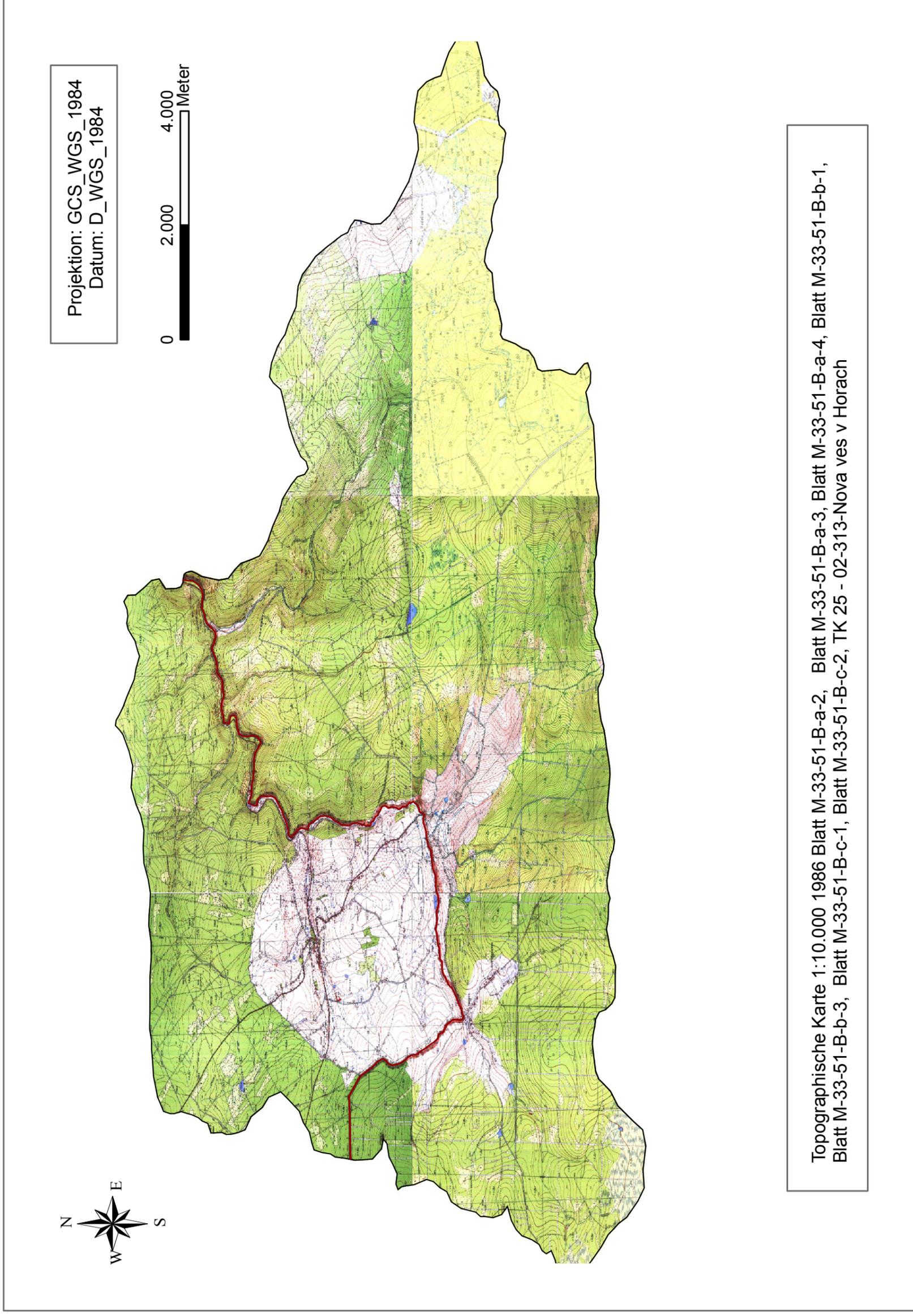
Das Untersuchungsgebiet ist naturräumlich in den östlichen Teil der deutschen Mittelgebirgsschwelle am Nordrand der Böhmisches Masse eingebettet (RICHTER 2002). Es entspricht räumlich dem hydrologischen Einzugsgebiet der Natzschung im deutsch-tschechischen Grenzbereich des Mittleren Erzgebirges. Es besitzt eine Ausdehnung von 75 km<sup>2</sup>, und erstreckt sich vom südlichen Teil Sachsens (50 km südöstlich von Chemnitz) bis in den in der Tschechischen Republik gelegenen Teil des Erzgebirges (tschech. *Krušné Hory*). In den tschechischen Kammlagen des Einzugsgebietes befindet sich das Quellgebiet der Natzschung.



**Abb. 4:** Lage des Untersuchungsgebietes  
(DIERCKE WELTATLAS 1996: 21, ergänzt)

Die Nord-Süd-Erstreckung beträgt 8 km und die Ost-West-Erstreckung 13,3 km (EIGENE VERMESSUNG IM GIS). Der deutsche Anteil am Einzugsgebiet beträgt 27,7 %. Auf tschechischem Staatsgebiet liegt der weitaus größere Anteil von 72,3 % (ABFRAGE IM GIS). Begrenzt wird das Untersuchungsgebiet im Nordosten durch den Pegel Rothenthal südlich der Ortschaft Olbernhau. Im Osten bildet die Wasserscheide des Tributärs *Teleský potok* die Grenze des Einzugsgebietes. Im Süden endet das Einzugsgebiet im Bereich der tschechischen Hochflächen, welche die oberirdische Wasserscheide bilden und teils Moor-

gebiete aufweisen. Das Quellgebiet der Natzschung (tschech. *Načetinský potok*) im Südwesten befindet sich in einem Hochmoorgebiet (*Novodomské rašeliniště*, 825 m ü.NN), durch das die Gebietsgrenze verläuft. Im Nordwesten wird das Untersuchungsgebiet durch die dem Rübenauer Bach und seinen Zuflüssen zugewandten Flächen begrenzt. Der Steinhübel im Quellbereich des Lehmheider Bachs stellt mit 816,9 m über NN den höchsten Punkt auf deutscher Seite dar.



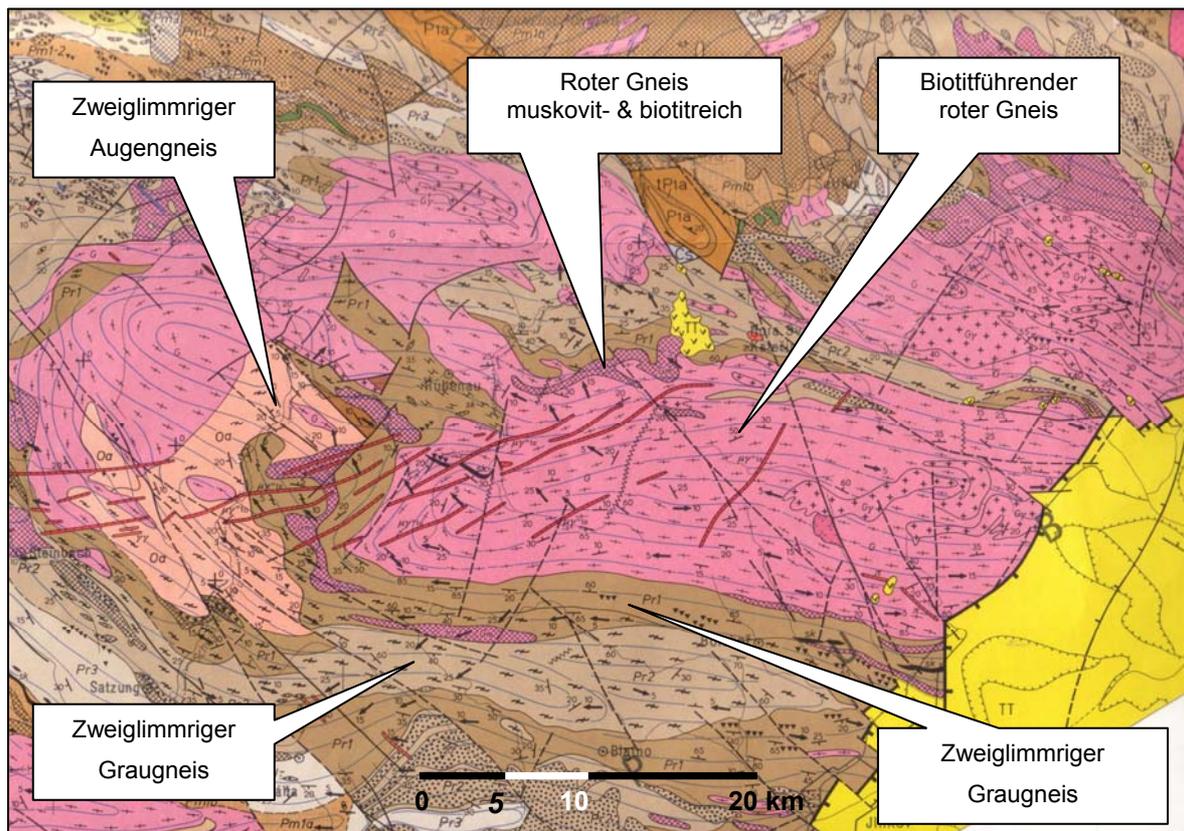
**Abb. 5:** Topographische Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Natzschung (Darstellung: M. RAMELOW)

## 2.2 Geologie und Geomorphologie

### 2.2.1 Geologie

Die Reliefentwicklung des Erzgebirges kann bis ins Devon zurückverfolgt werden. Bedingt durch die einsetzende Variszische Gebirgsbildung, die bis zum Perm andauerte, fand eine Faltung des ordovizisch bis präkambrischen Gesteins zu Sätteln und Mulden statt. Dabei wurden die aus altpaläozoischen Meeressedimenten stammenden Schiefer und Sande zu Gneisen metamorphisiert (AHNERT 1996, KADEN 2001a). Im Perm einsetzend erfolgten die Abtragung und Einebnung der gebildeten Gesteine und tektonischen Strukturen in diesem Gebiet. Während der folgenden alpidischen Orogenese in Kreide und Tertiär, vor rund 120 - 30 Millionen Jahren, wurde das nahezu eingeebnete Erzgebirge erneut durch Schollenbewegungen der Erdkruste emporgehoben. Die orogenetischen Hebungsvorgänge der Scholle, die mehr als 1000 m betrug, waren im Westen stärker als im Osten. Der Haupthebungsprozess des Erzgebirges zur Pultscholle fand im Pliozän (RICHTER 2002) über einen Zeitraum von etwa 30 Millionen Jahren statt. Begleitet wurde dieser Prozess insbesondere im frühen Stadium von Basaltvulkanismus (KADEN 2001a, WAGENBRETH & STEINER 1990). Als Folge der Hebung und Schrägstellung der Erzgebirgsscholle nach Nordwest, rissen südlich des heutigen Gebirges SW - NO gerichtete Spalten auf, an denen der Ohřetalgraben einsank.

Die geologische Ausstattung des Einzugsgebietes ist durch die variszisch gebildeten Gneise geprägt, die durch intensive Erosion und Abtragung freigelegt wurden. Im Wesentlichen treten drei Gneisvarietäten auf: Graugneise, ein zweiglimmriger Flaser- und Augengneis sowie biotitführende rote Gneise (vgl. Abb. 6). Der nördliche sowie der östliche Teil des Einzugsgebietes werden flächenhaft durch Rotgneise eingenommen. Der dominierende Rotgneis führt hauptsächlich Biotit, der andere weist einen starken Muskovitanteil auf (GEOLOGISCHE SPEZIALKARTE DES KÖNIGREICHS SACHSEN 1888). Im südlichen Teil des Einzugsgebietes stehen zwei Varietäten des zweiglimmrigen Graugneises an, die sich von Ost nach West ziehen. Der grobflaserige graue Gneis knickt im südwestlichen Einzugsgebiet nach Norden ab, wodurch er die westlichen Randgebiete von Rübenau streift. Im äußersten westlichen Teil des Einzugsgebietes (*Čiadlo*) steht ein zweiglimmriger Flaser- und Augengneis an. Der geologische Untergrund der oberen Talabschnitte und flachen Talwannen sowie der Flussläufe im gesamten Einzugsgebiet wird aus alluvialen holozänen Sedimenten wie Lehm, Sand und Schottern aufgebaut (GEOLOGISCHE KARTE VON SACHSEN 1922/1926). Vertorfte Flächen finden sich in Kuppenbereichen des südlichen und südwestlichen Einzugsgebietes sowie in den höheren Lagen zwischen Načetín und Rübenau (GEOLOGISCHE SPEZIALKARTE DES KÖNIGREICHS SACHSEN 1886).



**Abb. 6:** Geologie des Untersuchungsgebietes  
(GEOLOGISCHE KARTE VOGTLAND/ ERZGEBIRGE 1995)

### 2.2.2 Geomorphologie

Das Erzgebirge als Teil der deutschen Mittelgebirgsschwelle wird von RICHTER (2002: 522) als ideale Pultscholle beschrieben, die durch eine steile, kurze Südabdachung (5 km) und eine breite, sanfte Nordabdachung (35-40 km) charakterisiert wird. Es erstreckt sich über 100 km in West-Ost Richtung, wobei die größten Erhebungen im Westen liegen (Fichtelberg: 1214 m über NN, *Klinovec*: 1244 m über NN) und die Hochfläche nach Nordosten allmählich zur Elbtalebene abfällt. Als Indikator für den Beginn des Vorlandes kann die mächtige, in mehreren Phasen abgelagerte, Lössdecke herangezogen werden, die sich bis an den Erzgebirgsrand erstreckt (ebd.). In westlicher Richtung geht das Erzgebirge ohne eindeutige Begrenzung in das Vogtland über (WAGENBRETH & STEINER 1990) und nach Osten begrenzt das Elbsandsteingebirge und das Dresdner Elbtalgebiet das Gebirge. Im Süden bildet der morphologisch auffällige Hauptabbruch der Erzgebirgsscholle zum Egergraben die Grenze. Er folgt als tektonische Struktur den Hauptstrukturen des variszischen Gebirges. Die Grabenzone wird aus mehreren Becken mit teilweise bis zu 300 m mächtigen klastischen Sedimenten aufgebaut (RICHTER 2002).

Morphologisch kennzeichnend für die Nordabdachung sind breite Hochflächen mit Dellen und Mulden. Im Bereich des Mittleren Erzgebirges, dessen westliche Grenze das Schwarzwasser- und dessen östliche Grenze das Flöhatal bilden (BERNHARDT 1995), ist eine dichtere Zertalung festzustellen. Die Kreuzung der Täler bedingt, dass durchgehende Hochflächen fehlen (RICHTER 2002). Ein Nachweis über Rumpfflächen wie er von BÜDEL (1981) für das Westerzgebirge erbracht wurde, konnte für das Mittel- und Osterzgebirge nicht erbracht werden. Die ausgebildeten Kammhochflächen des Mittelerzgebirges werden nach Osten breiter (BASTIAN 2003). Im Untersuchungsgebiet sind die Hochflächen schwach geneigt ausgebildet (TOPOGRAPHISCHE KARTEN 1986). Die Flussoberläufe in diesem Bereich weisen geringe Eintiefungen auf. Die Mittelläufe des *Bily potok* sowie der Natzschung lassen Talweitungen erkennen, die als Muldentäler angesprochen werden können. Die Hänge dieser Täler sind schwach geneigt. Eine Versteilung der Hänge tritt nach der Mündung des *Bily potok* in die Natzschung ein. Maximale Hangneigungen von bis zu 40° werden nordöstlich von Rübenau erreicht. Die stärkere Vertiefung des Flusslaufs der Natzschung lässt ein Kerbtal erkennen. Ebenfalls steile Hänge in Verbindung mit einer Kerbtalform weisen Mittel- und Unterlauf von Steinbach und *Telčsky potok* auf (TOPOGRAPHISCHE KARTEN 1986).

Die Reliefhöhen im Einzugsgebiet entsprechen den mittleren und hohen Lagen des Erzgebirges. Der Nordabdachung folgend nehmen sie von 920 m über NN im Süden auf 538 m über NN auf Höhe des Pegels Rothenthal im Nordosten ab (LFUG 2002a). Der höchste Punkt befindet sich im Südosten auf einer Höhe von 921 m über NN.

Die rezente morphologische Ausstattung des Gebietes ist zu großen Teilen auf das periglaziale Klima Sachsens im Quartär zurückzuführen. In den vegetationslosen Gebieten des Periglazial, zu denen das Erzgebirge gehörte, fand intensive Kryoklastik statt (KOWALKE 2000). Der entstandene Frostschutt wurde in der sommerlichen Auftauzone ab einer Hangneigung von zwei Grad durch Gelisolifluktion hangabwärts transportiert und dort als periglaziale Deckschicht über dem Festgestein abgelagert. Nach VÖLKELE et al. (2002) bilden die periglazialen Deckschichten in aller Regel Schichtkomplexe. Ein Idealprofil ist aus drei Schichten unterschiedlicher Genese aufgebaut:

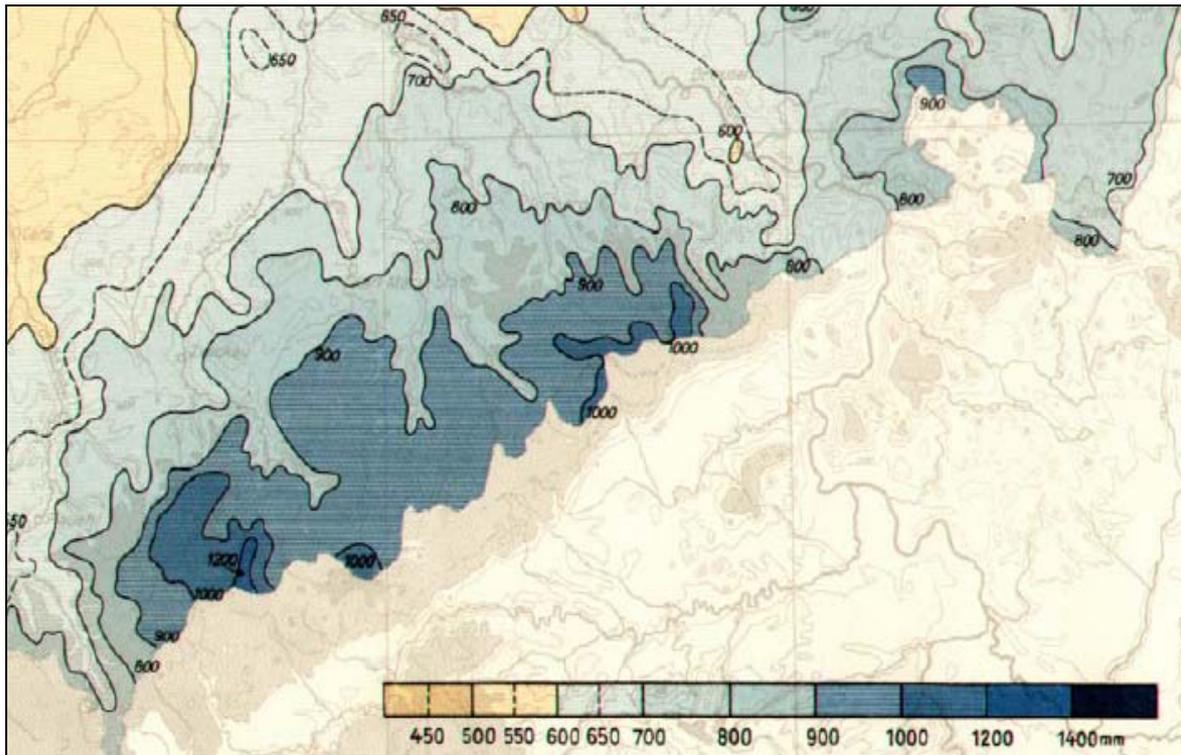
1. Die durch solimixtiv-kryoturbate Prozesse entstandene Hauptlage besitzt Löss-(lehm)anteile, einen deutlich erhöhten Feinkornanteil (< 63 µm) sowie geringe Anteile an Fein- und Mittelskelettkomponenten. Als Entstehungszeit wird das Hochglazial der Weichseleiszeit bis hin zum Übergang ins Spätglazial angenommen.
2. Die nur lokal in abtragungsgeschützten Hangpositionen auftretende Mittellage schließt sich darunter an. Sie weist hohe Löss(lehm)anteile auf und steht sedimentologisch der Hauptlage nah.

3. Nach unten schließt die gelisolifluidal im feucht-periglazialen Klima der Weichselzeit (EISMANN 1995) entstandene Basislage den Schichtkomplex ab. Sie ist lössfrei und weist hangabwärts eingeregelt Skelettkomponenten auf. Ihr großer Skelettanteil, der oftmals hangparallel eingeregelt ist, grenzt sie zu den überlagernden Schichten ab. Sie weisen eine dichtere Lagerung auf.

Das Landesforstpräsidium bestätigt für die höheren Berg- und Kammlagen des Erzgebirges die überwiegende Ausbildung der Böden als Dreischichttyp (INFORMATIONSMATERIAL LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHAU 2005). Die rezente Bedeutung dieser Periglazialmorphodynamik liegt in der reliefbegleichenden Wirkung derselben. So bedingt die Verfüllung konkaver Hangbereiche mit Frostschutt die für Mittelgebirge typische gestreckte Hangform mit gleichmäßigem Gefälle (VÖLKELE 1995). Die Bedeutung dieser Verwitterungsschuttdecken für die Fragestellung wird in Kapitel 2.5.2 aufgegriffen.

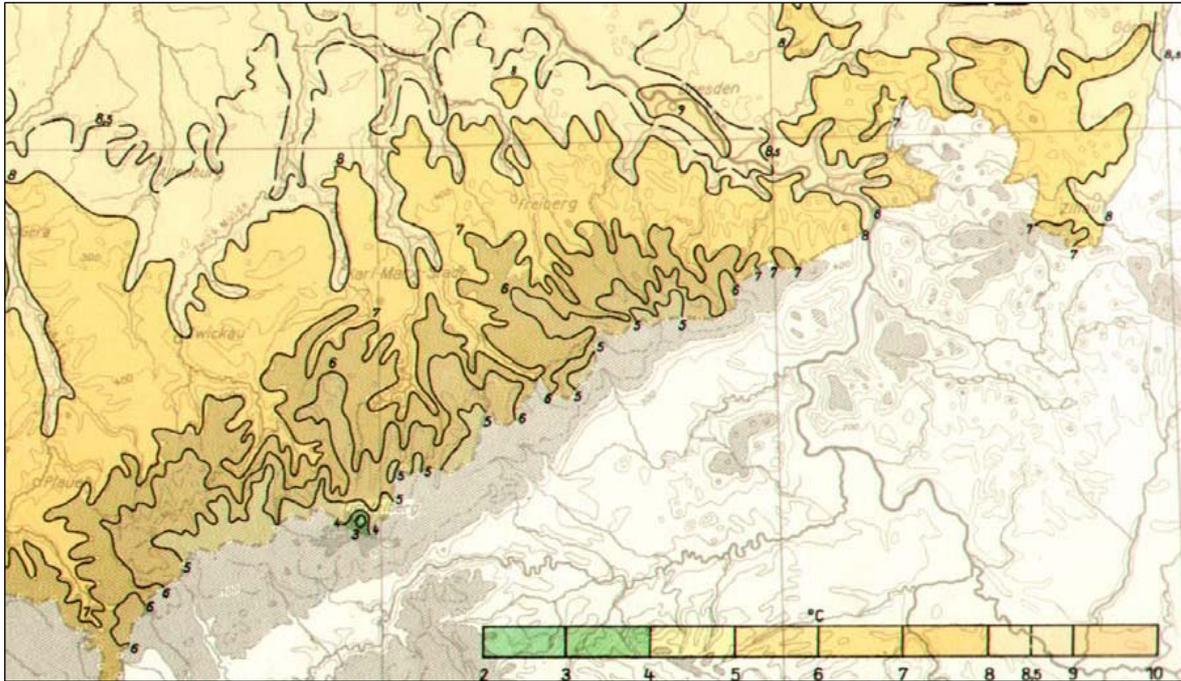
### **2.3 Klima**

Sachsen liegt am Rand atlantisch geprägter Wetterlagen im Übergang zu kontinentalem Wettereinfluss. Durch die relative Lage des Erzgebirges zu den umgebenden Gebirgen – im NW sind Harz und Thüringer Wald vorgelagert, im SW befinden sich Oberpfälzer-, Bayerischer- und Böhmerwald – herrscht besonders bei westlichen und nordwestlichen Strömungen ein deutlicher Lee-Einfluss vor. Die relative Häufigkeit der Windrichtungen, die aus SW, W und NW stammen, beträgt am Fichtelberg 59 % (HAAKE & KÖRBER 1973). „Auf Grund dessen erreichen die mittleren Niederschlagssummen des Erzgebirges in allen Höhenlagen nicht die Größen wie in anderen deutschen Mittelgebirgen.“ (BÜTTNER et al. 2001: 103). Neben Luv- und Leeeffekten ist für die klimatischen Verhältnisse im Erzgebirge der Einfluss des Reliefs ausschlaggebend. Die langgestreckte Nordabdachung mit ihrer prägnanten Höhengliederung bedingt eine klare Stufung von Temperatur und Niederschlag (KOWALKE 2000). Diese äußert sich in einer gebirgswärtsigen Abnahme der Lufttemperaturen (vgl. Abb. 8) sowie der Zunahme der Niederschlagssummen (vgl. Abb. 7), der Schneedeckendauer und -höhe (HENDL 2002; AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR 1977).



**Abb. 7:** Jahresniederschlagssumme (mm) im Erzgebirge (1901–1950)  
(METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966)

Die geschilderten klimatischen Bedingungen gelten auch für das Untersuchungsgebiet. Mit einer Höhendifferenz von 383 m vom Pegel Rothenthal (538 m über NN) bis zu den Kammlagen (921 m über NN) tritt eine differenzierte klimatische Situation auf. Die unteren Gebirgslagen zwischen 500-550 m über NN erreichen für die Zeitreihe von 1951-1987 durchschnittliche jährliche Niederschlagssummen von 720 bis 850 mm. Die Jahresmitteltemperatur liegt bei 7,6 - 7,0° C. Die gebirgswärts bis auf 750 m über NN reichenden mittleren Lagen weisen Niederschlagssummen zwischen 850 und 1000 mm bei einer deutlich geringeren Jahresmitteltemperatur von 7,0-5,5 °C auf. Beispielhaft kann die Station Marienberg (639 m über NN) nordwestlich der Einzugsgebietgrenze gelten, die bei einer Jahresmitteltemperatur von 6,2° C durchschnittliche Niederschlagssummen von 905 mm aufweist (KOWALKE 2000: 74). Die oberen Gebirgslagen, die bis 950 m über NN reichen, erzielen mittlere Jahresniederschläge von 1000 mm bei einer Jahresmitteltemperatur von nur 5,5 bis 4,3° C (ebd.).



**Abb. 8:** Jahresdurchschnittstemperatur (°C) im Erzgebirge (1901-1950)  
(METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1966)

Der Jahresgang der Niederschläge im Erzgebirge weist ein kontinental geprägtes Niederschlagsregime mit sommerlichem Maximum aus. Die monatlichen Niederschlagsmaxima liegen im Juli und erreichen eine Höhe von 100 - 110 mm (FOJT 1968b). Bedingt sind diese hohen Werte durch sommerliche Starkregen, die an kräftige konvektive Luftbewegungen gebunden sind und daher häufig in Verbindung mit Gewittern auftreten. Diese kontinentale Prägung des Klimas wird ebenfalls durch den Jahresgang der Temperatur belegt (METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST 1953). Der wärmste Monat ist in der Regel der Juli. In Marienberg herrschen durchschnittlich 14,5 °C, auf den Kämmen beträgt die mittlere Temperatur nur 11,2 °C. Mit einer mittleren Temperatur unter 0 °C im gesamten Erzgebirge (Marienberg: - 2 °C) ist der Januar der kälteste Monat (KOWALKE 2000, HENDL 2002).

Entsprechend der Höhenabhängigkeit des jährlichen Temperaturverlaufs bilden sich in den Kammlagen mächtigere Schneedecken aus als in den mittleren Lagen. Die Schneedeckenbildung beginnt im Allgemeinen im Monat November, wobei die größte Mächtigkeit in der Regel in der zweiten Monatshälfte des Februar erreicht wird. In den mittleren Lagen des Untersuchungsgebietes treten durchschnittlich 80 Tage mit Schneedecke auf, in den Kammlagen sind es maximal 100 (FOJT 1968c). Ab März schmilzt die Schneedecke ab, so dass in den Lagen über 500 m spätestens Ende April die Schneebedeckung verschwunden ist (HAAKE & KÖRBER 1973).

Von besonderer Bedeutung für die Abflusswirksamkeit der Schneedecke kann die Wetterlage des Föhn sein. Dabei strömt warme Luft, die durch eine Inversion getrennt die Kaltluft überlagert, aus südlicher Richtung über den Gebirgskamm. Die Folge ist eine Erwärmung und Wolkenauflösung auf der Nordabdachung, die zu plötzlicher Schneeschmelze führen kann (KOWALKE 2000). Hohe Abflüsse sind die Folge.

#### 2.4 Oberflächengewässer und Hydrogeologie

Das gesamte Erzgebirge gehört zum Einzugsgebiet der Elbe (HAAKE & KÖRBER 1973). Entsprechend entwässert die 16,5 km lange Natzschung über das Flusssystem der Flöha in die Mulde, die wiederum in die Elbe mündet. Die Natzschung verläuft in Kammlage aus Südwest kommend zunächst in Richtung Nordost. Nach passieren der Ortschaft *Načetín* nimmt sie eine Ausrichtung nach Osten an. Nachdem sie Kalek nordöstlich verlassen hat, macht sie einen scharfen Knick nach Norden, um in dieser Ausrichtung entlang des Rübenaauer Hügels in Richtung Olbernhau weiterzufließen. Nordöstlich von Rübenaau ändert sie ihren Verlauf erneut nach Nordost, um in dieser Orientierung leicht mäandrierend den Pegel Rothenthal zu passieren. Das Quellgebiet der Natzschung befindet sich auf 825 m über NN in der weitgehend vermoorten Seeheide (ZÜHLKE 1985). Den Pegel Rothenthal passiert sie auf einer Höhe von 538 m über NN. Damit beträgt das mittlere Gefälle über die Fließstrecke von 11,4 km (LFUG 2002a) bis zum Pegel Rothenthal 2,5 %. Auf dieser Strecke münden Tributäre von vier Teileinzugsgebieten in das Flusssystem der Natzschung. Der Oberlauf der Natzschung entwässert den südwestlichen Einzugsgebietsteil. Auf Höhe von Kalek mündet der Flusslauf des *Bilý potok* aus Süden kommend in die Natzschung. Der nordwestliche Teil des Einzugsgebiets wird durch den Rübenaauer Bach entwässert. Flussabwärts mündet der Steinbach in die Natzschung. Der *Telcský potok* aus Südosten kommend erreicht die Natzschung etwa 3,5 km südlich des Pegels. Er entwässert großflächig weite Teile der tschechischen Kammhochfläche zwischen *Kalek* und *Rudolice v Horách* (ZÜHLKE 1985).

Der mittlere jährliche Abfluss (MQ) der Natzschung auf Höhe Pegel Rothenthal beträgt 1,39 m<sup>3</sup>/s. Dieser Abfluss bezieht sich auf ein Einzugsgebiet von 75 km<sup>2</sup>. Die Abflussganglinie der Natzschung weist im Jahresverlauf ein Maximum in den Monaten April - Mai auf. Die Größenordnung liegt in der Jahresreihe von 1929 bis 2000 bei 2,04-2,67 m<sup>3</sup>/s. Die Variabilität des Abflusses ist hoch. Das Minimum des Abflusses (NNQ) in der Periode 1929 - 2000 lag im Dezember 1943 bei 0,06 m<sup>3</sup>/s, das Maximum (HHQ) im Juni 1975 bei 44 m<sup>3</sup>/s (LFUG 2002b). Die mittlere Abflusspende liegt bei 18,5 l/s\*km<sup>2</sup>. Für die Abflussdynamik der Natzschung im Frühjahr ist der Temperaturverlauf in Verbindung mit den Niederschlagsdaten ausschlaggebend. Plötzliche Warmlufteinbrüche, die zum schnellen Abschmelzen der Schneedecke führen, sind für die hohen Abflusswerte im Frühjahr verant-

wortlich. Sie können sogar gefährliche Winterhochwasser auslösen, da der gefrorene Boden nicht in der Lage ist das Wasser aufzunehmen, und es somit konzentriert zum Abfluss gelangt.

Die geologische Ausstattung des Erzgebirges aus kristallinen Festgesteinen, insbesondere Metamorphiten, deren Erscheinung auf flachen Hängen und Taleinschnitten von Verwitterungs- und Hangschuttdecken überlagert wird, bestimmt die hydrogeologische Einordnung des Gebietes als Kluffgrundwasserleiter-System<sup>4</sup> (JORDAN & WEDER 1995). Die vorhandenen Phyllite werden als wenig klüftungsfreundlich, die Gneise und Glimmerschiefer als klüftungsfreundlich mit mittlerer Grundwasserführung beschrieben.

Die Grundwasserdynamik im Erzgebirge ist exemplarisch für Festgesteinskomplexe und ist charakterisiert durch die fehlende Ausbildung großräumig zusammenhängender Grundwasserleiter. Die Fließvorgänge sind vor allem reliefabhängig und finden bis zum nächsten Vorfluter innerhalb der geringmächtigen Verwitterungs- und Auflockerungszone statt (hypodermischer Abfluss). Auf Grund der Abhängigkeit vom Relief sind oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet in der Regel identisch. Ein erwähnenswerter Grundwasserabfluss ist nur auf Kluff- und Zerrüttungszonen möglich, soweit die Klüfte nicht durch lehmige Verwitterungsbildungen verschlossen sind. Die Verwitterungs- und Auflockerungszone weist ein geringes Retentionsvermögen auf, so dass sie als Speisungszone wirkend zu großen Abflussschwankungen der von ihr genährten Quellen und Fassungen führt (ebd.).

## 2.5 Böden

### 2.5.1 Bodentypen und Bodenarten

Die großflächig ausgebildeten Böden des Erzgebirges sind Braunerdegesellschaften, die sich auf den kristallinen und metamorphen Gesteinen des Grundgebirges gebildet haben. Ihre weitere Differenzierung in Bodentypen und Subtypen wird bedingt durch das Ausgangsgestein, Art und Intensität der periglaziären Verwitterung, den Lösseinfluss und durch die orographisch-klimatischen Verhältnisse (LIEDTKE & MARCINEK 2002).

Letztgenannte Gegebenheiten begründen die Verbreitung von basenarmen Braunerden mit hydromorphen Böden (Pseudogleye) vor allem in den unteren Lagen der Gebirge. In Plateausituationen in den Gebirgshochlagen wurden ebenfalls Pseudogleye angetroffen (EIGENE BEOBACHTUNG). In den mittleren Lagen zwischen 500-700 m ist die Braunerde-Podsol-Gesellschaft charakteristisch. Für das Natzschungtal (490-740 m) werden als vorherrschende Bodentypen Braunerden und Braunerde-Podsole angegeben (ZÜHLKE 1985). Das Ausgangssubstrat bilden grobschuttreiche Decken. In den Hochlagen

---

<sup>4</sup> Dieses Bewertungsschema nimmt eine Untergliederung der Festgesteinskomplexe nach der Klüftungsfreundlichkeit des Gesteins und dem tektonischem Zerrüttungsgrad vor (JORDAN & WEDER 1995).

oberhalb 800 m über NN verlagert sich der bodentypologische Schwerpunkt in Richtung Podsol. Dies gilt für die Rübenauser Hochfläche (740-840m), die überwiegend Braunpodsole bzw. Podsole aufweist (ebd.). Das ganzjährig kühlfeuchte Klima bedingt die Bildung von Rohhumusdecken (KOWALKE 2000). Die dominanten Bodenbildungsprozesse sind Podsolierungsvorgänge (LIEDTKE & MARCINEK 2002). Förderlich für diesen Prozess ist die mineralische Zusammensetzung der Gneise, Phyllite und Glimmerschiefer, die naturbedingt eine nur mäßige Nährstoffausgangssituation darstellt. Jahrzehnte langer, teils extremer Eintrag von Stickstoff- und Schwefelmissionen über die Luft verschärfen die Nährstoffversorgungssituation und führen zu beschleunigten Versauerungsprozessen (SMUL 2004, LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHAU 2005). Für die tschechische Seite liegen Bodenkarten im Maßstab 1:50.000 vor, deren Bodentypenverteilung nur sehr eingeschränkt mit den Geländeergebnissen übereinstimmt. Die eigenen Grabungen erbrachten Bodentypen-Gesellschaften, die mit den Ergebnissen in Deutschland vergleichbar sind. Neben Braunerdebildungen finden sich in den Toplagen des Einzugsgebietes vielfach Braunerde-Podsole, vereinzelt Podsole (RAMELOW 2006). Die Mächtigkeiten der Böden des Einzugsgebietes schwanken um einen Mittelwert von ca. 55 cm. Häufig liegt eine Verzahnung von B- und C-Horizont vor, so dass eine saubere Trennung der Horizonte und damit die genaue Bodenmächtigkeit nicht ermittelt werden konnte. In den Tallagen entlang der Tributäre sind laut Bodenkarte 1:50.000 (BLATT OLBERNHAU) vor allem Gleye dominant. Vergesellschaftet sind sie häufig mit der Gley-Vega. Entlang nicht perennierender Gewässer tritt als Begleitböden des Gleyes der Pseudogley auf, der sich auch die Hänge hinaufziehen kann.

In den Hochlagen auf deutscher und vor allem tschechischer Seite treten ergänzend Moorböden hinzu. Es handelt sich hierbei um Hochmoorkomplexe, die seit Beginn des 19. Jahrhunderts mittels Gräben drainiert wurden (BLANCKMEISTER & HENGST 1971, KARTENINTERPRETATION & EIGENE BEOBACHTUNG). Ausgewählte Moorkomplexe auf deutscher und tschechischer Seite sind unter Naturschutz gestellt und werden aktuell renaturiert<sup>5</sup>. Im tschechischen Teil des Einzugsgebietes wurde in dem Moorkomplex Moosbeerheide eine klassische Hochmoor-Torfabfolge ergraben (EIGENE GRABUNG OKTOBER 2004). Die Größenangaben über die tschechischen Moorflächen variieren in der Literatur. Die rezente Flächenausdehnung der tschechischen Moorgebiete wird in der Diplomarbeit von J. LINDENKREUZ (in Vorb.) benannt.

Die dominanten Bodenarten im Einzugsgebiet sind sandig-grusige Lehme. Im Bereich des Natzschungtals treten überwiegend stark sandige Lehme mit steinigen bis stark steinigen Beimengungen auf. Die Böden der Rübenauser Hochfläche weisen geringfügig weniger

---

<sup>5</sup> Auf deutscher Seite sind die Moorgebiete Lehmheide, Achterheide und Hühnerheide seit 1999 als Naturschutzgebiet in Renaturierung (MÜNDL. MITTEILUNG VON HERRN DR. DITTRICH, FORSTAMTSLEITER OLBERNHAU & J. LINDENKREUZ).

Grobmaterial auf. Es dominiert sandiger bis stark sandiger Lehm, dessen Bodenskelett als schwach steinig bis steinig einzustufen ist (ZÜHLKE 1985). Kleinflächig sind Block- und Moorböden zu finden (INFORMATIONSMATERIAL LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHAU 2005). Bei Böden aus periglazialen Deckschichten entstammt der hohe Anteil grusigen Bodensubstrats vielfach nicht einer Verwitterung an Ort und Stelle, sondern ist das Ergebnis pleistozäner Aufbereitungs- und Ablagerungsprozesse (VÖLKELE et al. 2002). Diese Umlagerungsdecken (bilden rezent vielfach das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung und prägen entscheidend die Art und Intensität der bodenbildenden Prozesse seit dem Spätglazial (ebd.) (vgl. Kap. 2.2.2). Die häufig enthaltenen Lössbeimengungen in den Hauptlagen der Deckschichten besitzen Relevanz für die bodenbildenden Prozesse und stellen Einwehungen aus dem Spätglazial dar (VEIT et al. 2002).

### **2.5.2 Bodenwasserhaushalt**

Die einzige Informationsquelle zum Bodenwasserhaushalt im Untersuchungsgebiet stellt die mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (1980) im Maßstab 1:100.000 dar. Blatt Annaberg-Buchholz weist für die Rübenauer Hochfläche fast flächendeckend (stau-)nässebeeinflusste Böden aus. In den höheren Lagen finden sich Staugleye mit Stauwasser, das 6-10 dm unter Flur ansteht. In Richtung der Flussläufe befindet sich das Stauwasser zwischen 4-10 dm unter Flur. Südlich des Rübenauer Bachs auf der ackerbaulich genutzten Hochfläche, finden sich teils Berglehm-Gleye wieder, die jedoch neben der Grundwasserbeeinflussung auch staunässe- bzw. hangwasserbeeinflusst sein können. Die Böden im Bereich der Flussläufe der Natzsung und ihrer Tributäre werden als halb- und vollhydromorphe Auenlehmsande charakterisiert.

Ergänzend darf angenommen werden, dass die hydrologischen Eigenschaften der Böden des Untersuchungsgebietes deutlich durch die periglazialen Deckschichten (vgl. Kap. 2.2.2) bestimmt wird. An den Schichtgrenzen der einzelnen Deckschichten-Lagen ändern sich klassischerweise bodenstrukturelle Eigenschaften im Vertikalprofil. Dazu zählen die Parameter Dichte, Korngrößenzusammensetzung, Skelettgehalt und Durchlässigkeit. Die locker gelagerten Hauptlagen der Deckschichten weisen hervorragende Drainageeigenschaften und eine ausgeprägte Wasserdurchlässigkeit auf. Nach unten anschließend folgt jedoch regelmäßig eine Schicht höherer Lagerungsdichte und geringerer Wasserleitfähigkeit (VÖLKELE et al. 2002). Das bedeutet, dass Sickerwasser aus der Vertikalen abgelenkt und weitgehend als hangparalleler Interflow zum Abfluss gelangen kann. Zeugen für diese Leiterfunktion der Schichtlage, die in süddeutschen Mittelgebirgen als Basislage identifiziert wurde, sind Schluffkappen auf der Oberseite der Skelettkomponenten, die jedoch blanke Unterseiten aufweisen. Werden solche leitenden Schichtlagen angeschnitten, tritt zumeist Wasser aus ihnen hervor (VÖLKELE 1995, VÖLKELE et al. 2002). In den Hauptlagen der Umlagerungsdecken können hohe Schluffanteile verdichtend und

damit förderlich auf die Stauwasserbildung wirken, wie von KOWALKE (2000) für die Böden des Vogtlands beschrieben wird.

## **2.6 Vegetation und Landnutzung**

Die Landnutzungsform ist ein zentraler Aspekt hinsichtlich der Ausprägung bodenphysikalischer Parameter wie Lagerungsdichte, Porenvolumen und Gefügestabilität. Diese wiederum beeinflussen die hydrologischen Eigenschaften des Bodens (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Bei land- und forstwirtschaftlichen Nutzflächen werden die bodenphysikalischen Parameter neben den gegebenen primären Eigenschaften (Körnung und Skelettanteil) vor allem durch die Bewirtschaftungsform bedingt (SCHNUG & HANEKLAUS 2002, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

### **2.6.1 Potenzielle natürliche Vegetation**

Unter potenzieller natürlicher Vegetation ist eine Vegetationsgesellschaft zu verstehen, die bei anthropogen unbeeinflusster Vegetationsentwicklung an einem Standort anzutreffen wäre (BASTIAN 2003). Mit dem nacheiszeitlich einsetzenden gemäßigttem Klima entwickelte sich im Erzgebirge großräumig der herzynische Bergmischwald mit Buche, Fichte und Tanne als Klimaxstadium (KADEN 2001a). Die Karte der potenziellen natürlichen Vegetation des Freistaates Sachsen (LFUG 2002c) weist für das südliche Sachsen buchendominierte (v.a. Rotbuche *Fagus sylvatica*) Wälder aus. Es lassen sich drei große Vegetationskomplexe ausmachen:

In den tieferen Lagen stockt der submontane Eichen-Buchenwald, der bis auf eine Höhe von maximal 550 m über NN das nördliche Erzgebirge besiedelt. Ergänzend können Baumarten wie Weiß-Tanne und Berg-Ahorn hinzutreten.

In den mittleren Lagen zwischen 550 – 750 m über NN bestimmen Hainsimsen-(Fichten-Tannen-)Buchenwälder das Erscheinungsbild der natürlichen Vegetation. Südlich anschließend in den Lagen ab 750 bis 850 m über NN besiedelt der Wollreitgras-Fichten-Buchenwald die kammnahen Lagen. Für sämtliche Standorte der drei Vegetationskomplexe ist die natürliche Nährstoffsituation als gering bis mäßig einzustufen, die Wasserversorgung verbessert sich leicht mit zunehmender Höhenlage. Grund- und Stauwasser-einfluss sind nicht zu erkennen (LFUG 2002c).

Fichten- und Spirkenmoorwälder sowie Moorkieferngewächse gehören in den höheren Berg- und in den Kammlagen ebenfalls zur natürlichen Vegetation. Sie stocken auf sumpfigen und nassen Standorten (LANDESFORSTPRÄSIDIUM SACHSEN 2005).

### 2.6.2 Tatsächliche Vegetation

Die rezente Vegetation im Erzgebirge weicht auf Grund erheblicher anthropogener Eingriffe stark von der natürlichen Vegetation ab. Heute liegt der Anteil der sächsischen Waldfläche, die als natürliche Waldgesellschaft bezeichnet werden kann bei nur 4,6 % (LFUG 2002c). Mit dem Aufblühen des Bergbaus im 12. Jahrhundert begann im Erzgebirge der massive menschliche Eingriff. Die Errichtung von Bergwerken, Schmelzhütten und Hammerwerken hatte massive Rodungsaktivitäten zur Folge. Die Baumbestände wurden schnell über die Leistungsfähigkeit des Waldes hinaus dezimiert (KADEN 2001a, BLANCKMEISTER & HENGST 1971). Im 16. Jahrhundert unterschied sich das Waldbild bereits grundlegend vom ursprünglichen, insbesondere durch den anteiligen Rückgang von Buche und Tanne (BLANCKMEISTER & HENGST 1971). Auch der Rückgang des Bergbaus um 1700 ermöglichte auf Grund der angesiedelten Holzbe- und Holzverarbeitenden Industrie keine Erholung. Planmäßige Maßnahmen zur großflächigen Wiederbewaldung wurden von H. COTTA zu Beginn des 19. Jahrhunderts ergriffen (ebd.). Wiederbewaldet wurde mit schnellwachsenden Fichtenmonokulturen, die als Übergangslösung auf dem Weg zur Etablierung eines Mischwaldes gedacht waren. Monetäre Vorteile der Fichtenreinbestände waren für die ausbleibende Überführung in einen Mischwald ausschlaggebend. Lokal begrenzt gab es in den 20er und 50er Jahren des 20. Jahrhunderts Perioden naturnaher Waldwirtschaft, die forstwirtschaftlich jedoch zu kurz waren, um nachhaltig zu wirken (SMUL 1999, INFORMATIONSMATERIAL LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHOU 2005). Neue Belastungen für den Waldbestand kamen im Zuge der Industrialisierung mit der intensiven Nutzung der Braunkohle auf. Die ausgelösten Rauchgasschäden äußerten sich zunächst im Absterben der Tannen, führten aber ab den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts vor allem im Fichtenbestand zu einem massenhaften Baumsterben (KADEN 2001a, INFORMATIONSMATERIAL LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHOU 2005). Seit Beginn der Immissionschäden bis ins Jahr 1989 wurde versucht, mit Hilfe des Anbaus rauchresistenter Baumarten (Blaufichte, Serbische Fichte, Japanische Lärche) den Bestandesschluss zu gewährleisten (KADEN 2001b). Nach der Wende konnten Verbesserungen der Immissionswerte erreicht werden. Seit Beginn eines Messprogramms zur Stoffbelastung 1993/94, kann im ehemaligen Schadensgebiet des Erzgebirges eine Abnahme der Depositionen auf einen Bruchteil der früheren Raten konstatiert werden (SMUL 2004).

Die Bestockungsverhältnisse im Forstrevier Olbernhau, das den deutschen Teil des Untersuchungsgebietes weitgehend abdeckt, setzten sich im unbeeinflussten Waldzustand zu Beginn des 12. Jahrhunderts in etwa folgendermaßen zusammen: 40 % Buche, 35 % Fichte, 20 % Tanne und weitere 5 % Hart- und Weichbaumarten (INFORMATIONSMATERIAL SÄCHSISCHES FORSTAMT OLBERNHOU 2005). Seit dem Jahr 1990 wird ein ökologischer Umbau der Waldgesellschaften betrieben, der den Laubbaumanteil in den Mischwäldern steigern soll. Geplant ist die Fichte als Hauptbaumart des Forstbetriebes zu erhalten,

ergänzt durch einen erhöhten Anteil der Buche. Die aktuellen Forstbestände setzen sich aus 71 % Fichten, 13 % Buchen, 5 % Lärchen, 3 % Kiefern, 3 % Birke und 5 % sonstiger Nadel- und Laubholzarten zusammen (FALTBLATT FORSTAMT OLBERNHAU 2004).

Der Waldzustandsbericht 2004 konstatiert für die erzgebirgischen Wälder eine deutliche Verbesserung des Zustandes in den letzten Jahren. Das hohe Ausgangsniveau des deutlich geschädigten Waldflächenanteils von 36 % im Jahr 1991 verringerte sich bis zum Jahr 2004 auf 18 %. Damit entspricht es in etwa dem Landesdurchschnitt (SMUL 2004).

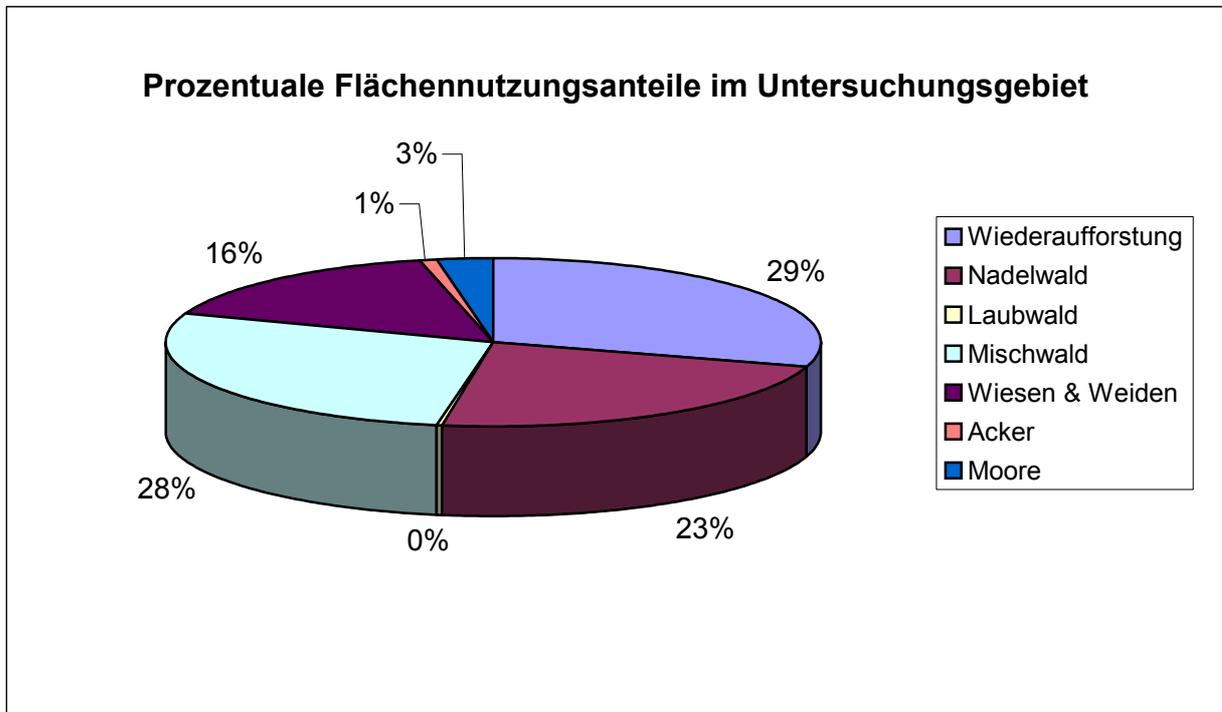
### 2.6.3 Landnutzung

Die rezente Landnutzung im Erzgebirge begründet sich wesentlich in der bergbaulichen Besiedlungsgeschichte der Region, die entsprechende weiterverarbeitende Industrien und bäuerliche Nachbesiedlung um 1500 bedingten (LÖSCHER 1967). Die Blütezeit des Berg- und Hüttenwesens um 1600 war an eine leistungsfähige Landwirtschaft im Gebirge gekoppelt (WAGENBRETH & WÄCHTLER 1990). So zeichnet das Offenlandverhältnis heute einerseits naturräumliche Faktoren wie Reliefgunst, Bodengüte und Klima gut nach, die eine entscheidende Rolle für die bäuerliche Landnahme spielten. Andererseits wird der Einfluss des mittelalterlichen Erzbergbaus wiedergegeben (BASTIAN 2003).

Der sächsische Waldanteil von 29,7 % liegt im Landkreis Mittleres Erzgebirge bei stattlichen 41,2 %. Übertroffen wird dieser Flächenanteil ausschließlich durch die landwirtschaftliche Nutzung, die 46,3 % der Bodenfläche auf sich vereint (Stand 31.12.2000). Die vernachlässigbar kleine Restfläche dient dem Dauerkulturanbau (Stand 2003). Der Anteil an Siedlungs- und Verkehrsfläche im Landkreis beträgt landesweit unterdurchschnittliche 8,9 %. Den Wasserflächen (1 %), dem Abbauland (0,2 %) und den Flächen anderer Nutzung (2,4 %) kommt in ihrer Größenordnung nur eine marginale Bedeutung zu (STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN 2005).

Bei einer Landnutzungsbetrachtung des untersuchten Einzugsgebiets (vgl. Abb. 9), steigen die Anteile der Waldflächen deutlich an und summieren sich auf insgesamt 79,6 %. Mit 27,4 % entfällt der größte Anteil auf Mischwälder, gefolgt von Wiederaufforstungsflächen mit 29,3 %. Auf dem Gebiet der tschechischen Republik machen die Wiederaufforstungsflächen mit 38,4 % den größten Flächenanteil sämtlicher Nutzungsformen auf (vgl. Abb. 10). Die Reinbestandsanteile belaufen sich beim Nadelwald auf 22,3 %, beim Laubwald auf 0,4 %. Neben dem flächenhaft verbreiteten Forst, nehmen Wiesen und Weiden, die vor allem auf der Rübenaauer Hochfläche in Vergesellschaftung mit Ackerflächen auftreten, 15,3 % des Untersuchungsgebietes ein (vgl. Abb. 10). Der Acker trägt mit 0,9 % zur Gesamtnutzungsfläche bei. Auf Grund ihrer speziellen, wenn auch wissenschaftlich noch ungeklärten hydrologischen Abflusswirkung bleiben die Moore zu nennen, die eine Fläche

von 2,8 % einnehmen und fast ausschließlich auf tschechischer Seite anzutreffen sind. Die verbleibenden 1,5 % Fläche des Untersuchungsgebietes teilen sich in vernachlässigbarer Größenordnung auf Still- und Fließgewässer, Wohn- und Gewerbegebiet sowie Verkehrsflächen auf.



**Abb. 9:** Flächennutzungsanteile im Untersuchungsgebiet

Mit der Zielsetzung Aussagen über die bodenhydrologischen Eigenschaften dieses Gebietes machen zu wollen, wird bei Betrachtung der Landnutzung deutlich, dass diesbezüglich eine intensivere Untersuchung der Waldböden nötig ist.

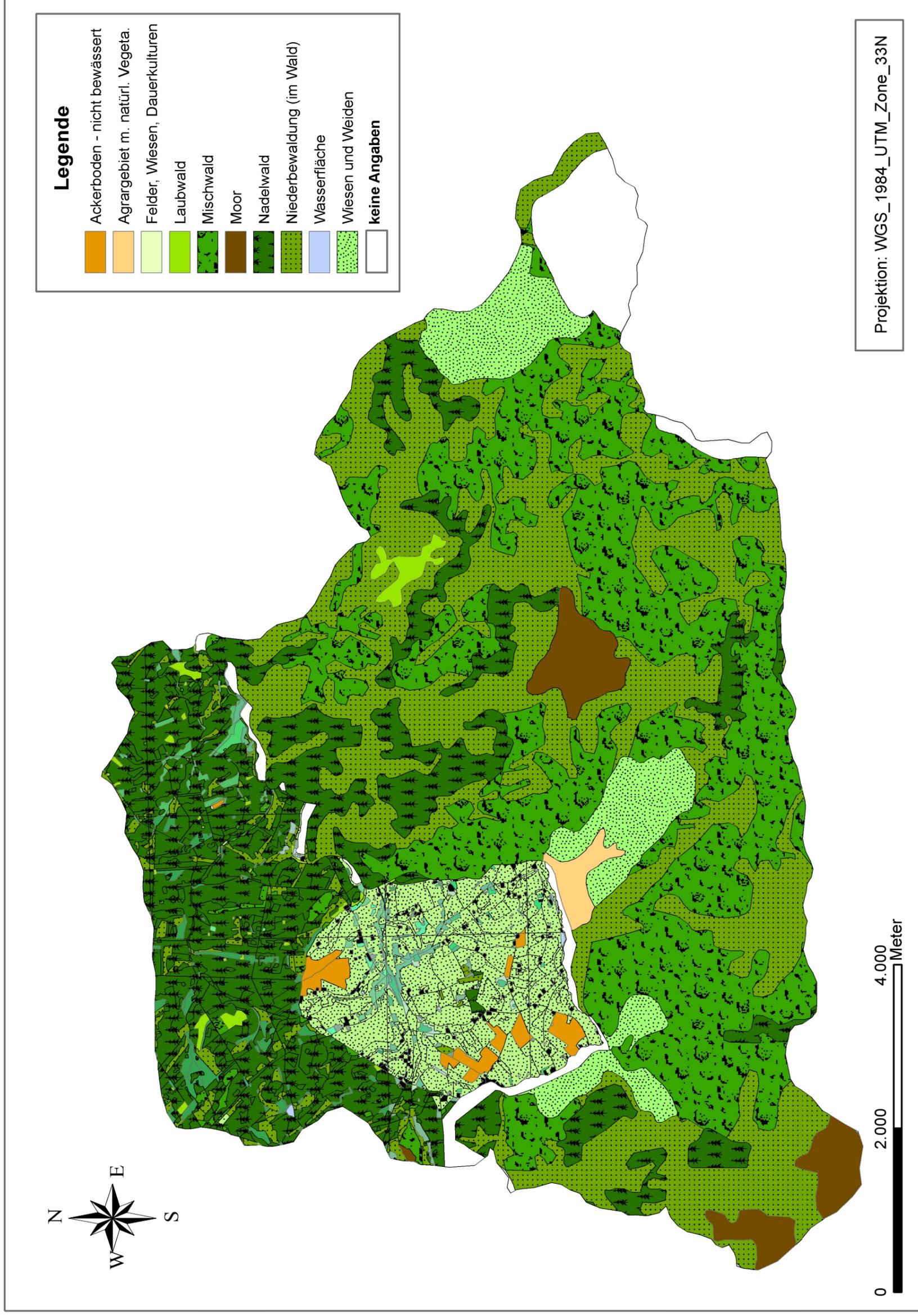


Abb. 10: Landnutzungsverteilung im Jahr 1992/ 2000 im Untersuchungsgebiet, verändert nach:  
TSCHECHISCHES UMWELTMINISTERIUM (1992) und SLUG (2000)

### 3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Für die Bearbeitung der Fragestellung war einerseits die Durchführung von Feldmethoden notwendig, andererseits wurden laboranalytische Arbeiten vorgenommen. Das entsprechende methodische Vorgehen wird in diesem Kapitel erläutert.

#### 3.1 Geländearbeit

Zu den Feldarbeiten im Untersuchungsgebiet zählen das Anlegen von Bodengruben, die Entnahme von Misch- und Volumenproben aus den einzelnen Horizonten sowie die Durchführung von Infiltrationsmessungen. Diese Arbeiten wurden in vier Etappen durchgeführt. Die Geländeaufenthalte fanden jeweils wochenweise im August 2004, im Oktober 2004, im Mai 2005 sowie im Juli 2005 statt. Zusätzlich wurden Daten verwendet, die im Rahmen eines Geländepraktikums von Herrn Prof. Schulte im Mai 2004 im Einzugsgebiet gewonnen wurden. Die Bodenansprache und -beprobung der Untersuchungsstandorte fand zusammen mit Herrn Dipl. Geograph J. BÖLSCHER und Herrn M. RAMELOW statt. Letzgenannter fertigt im Rahmen seiner Diplomarbeit eine digitale Bodenkarte an, deren Datengrundlage bei diesen Geländeaufenthalten ebenfalls erhoben wurde und somit auch Eingang in die vorliegende Arbeit findet.

##### 3.1.1 Standortwahl

Die Festlegung der Profilstandorte im Untersuchungsgebiet orientierte sich an mehreren systematischen Kriterien:

- Die Gewinnung von Bodeninformationen sollte gleichmäßig in allen Teileinzugsgebieten der Natzschung stattfinden. Grund dafür ist unter anderem die Generierung von Grundlagendaten für die im Rahmen der Dissertation von Herrn Bölscher durchzuführende Modellierung der Niederschlags-Abfluss-Verhältnisse im Einzugsgebiet.
- Es wurde auf eine ausgewogene Anzahl der Standorte bezüglich Exposition, Lage im Relief und Geologie geachtet.
- Die Abdeckung mehrerer Standorte eines Landnutzungstyps als Vergleichsbasis wurde angestrebt. Auf Grund des hohen Waldanteils des Einzugsgebietes kam diesem aber eine vergleichsweise hohe Bedeutung zu, die sich in einer Schwerpunktlegung bei den Waldstandorten widerspiegelt.
- Die leichte Erreichbarkeit des Standortes mit gefüllten Wasserkanistern für die Infiltrationsmessungen musste gewährleistet sein.

### 3.1.2 Bodenkundliche Profilaufnahme

An jeder ergrabenen Profilgrube fand eine vollständige Bodenansprache nach der Systematik der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994: 46ff) statt. Im Anschluss daran wurden jeweils aus der Horizontmitte Mischproben entnommen, die per Laboranalyse der Ermittlung der Bodenarten dienen.

### 3.1.3 Stechzylinderbeprobung

Die Entnahme von Volumenproben mit der Stechzylindermethode erfolgte nach DIN 19681. Bei dieser Beprobung ist besonders auf die Erhaltung des natürlichen Bodengefüges zu achten. Entsprechend wurde die für die Probennahme gewählte Profilwand der Bodengrube vor Beginn der Grabung festgelegt, und vor gefügeverändernden Einflüssen geschützt. Die Profilbeprobung fand nach Horizonten statt. Grundsätzlich wurden für die Bestimmung der gefügeabhängigen Parameter jeweils drei Stechzylinder mit einem Innenvolumen von  $870 \text{ cm}^3$  genutzt. Angestrebt wurde eine Beprobung jeweils in der Horizontmitte. Bei geringmächtig ausgebildeten Bodenhorizonten wurde die Beprobung mit kleinen Stechzylindern (Innenvolumen von  $98,5 \text{ cm}^3$ ) durchgeführt. Alternativ wurde bei zwei oder drei aufeinanderfolgenden geringmächtigen Horizonten eine gemeinsame Beprobung mit großen Stechzylindern gewählt. Auf Grund der verhältnismäßig größeren Ungenauigkeit der kleinen gegenüber den großen Stechzylindern wurden im ersten Fall jeweils fünf Proben entnommen. Mit der Analyse von drei respektive fünf Proben pro Bodenhorizont wurde die Repräsentativität weitestgehend gewährleistet.



**Abb. 11:** Einschlagvorrichtung für Stechzylinder mit Einschlaghammer

Auf Grund des Skelettreichtums der Böden im Untersuchungsgebiet traten standortspezifisch Schwierigkeiten bei der Beprobung mit Stechzylindern auf. Bei hohen Gemengeanteilen von Steinen und Blöcken im Profil konnten teilweise nur unzureichend große Stechzylinder entnommen werden, die in diesem Fall jedoch durch die Entnahme zusätzlicher kleiner Stechzylinder ergänzt wurde.

#### **3.1.4 Infiltrationsmessung**

Die Ermittlung der Infiltrationsrate erfolgte nach DIN 19682-7 mit dem Doppelring-Infiltrometer. Gemessen wird mit diesem Verfahren die Wassermenge, die bezogen auf eine gegebene Fläche und eine gegebene Zeit, senkrecht in den Boden eindringt. Die Messung der Infiltrationsrate erfolgt im Gelände am ungestörten Profil, und wird in Wasserhöhe (mm) pro Zeiteinheit (min) angegeben. Zur Anwendung kam bei dieser Messung das instationäre Messverfahren, bei dem der absinkende Wasserspiegel im Innenzylinder mit Hilfe einer Messbrücke gemessen wird. Nach Erreichen einer mehr oder wenigen konstanten Versickerungsintensität, die durch eine nahezu vollständige Wassersättigung des Bodens erreicht wird (SCHWARZ 1982), wird die Messung beendet. Die Messwerte der letzten 3 Minuten geben dann die minimale Infiltrationsrate<sup>6</sup> an, indem der mittlere Minutenwert gebildet wird. Es bedarf keiner weiteren Umrechnung (DIN 19682-7). Die minimale Infiltrationsrate gilt als Maß für die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens (EIJKELKAMP 1999, SCHAMS 1967). Bei wassergesättigtem Boden ist sie gleichzusetzen mit der Absickerungsrate in den Untergrund (SCHWARZ 1982). Bei EIJKELKAMP (1999: 2) wird zusätzlich der Begriff der Infiltrationskapazität genutzt, der „[...] die maximale Infiltrationsrate in einem bestimmten Moment“ der Messung wiedergibt. Dieser Wert entspricht nicht der minimalen Infiltrationsrate, da die Anfangs-Infiltrationskapazität bei ungesättigtem Boden höher ist.

---

<sup>6</sup> In der DIN 19682-7 wird für die wassergesättigte Infiltrationsrate schlicht der Begriff „Infiltrationsrate“ genutzt. SCHWARZ (1982) nutzt jedoch den Begriff der „minimalen Infiltrationsrate“ um eine Abgrenzung zur Infiltrationsrate im Messverlauf (bei ungesättigtem Boden) zu gewährleisten.



**Abb. 12:** Eingetriebenes Doppelring-Infiltrometer mit Messbrücke

Die Infiltrationsrate wird stark von der Bodenfeuchte zum Messzeitpunkt gesteuert, weshalb eine Bestimmung dieses Parameters an nahezu allen Infiltrationsstandorten stattfand. Dazu wurden zwei kleine Stechzylinder aus dem obersten Horizont entnommen, die nach luftdicht verschlossenem Transport ins Labor auf ihren Wassergehalt bestimmt wurden (nach DIN ISO 11461: 2000). Der so ermittelte Wassergehalt als Volumenanteil wurde anschließend auf das Porenvolumen der Probe umgerechnet, um die Wassersättigung in Volumenprozent zu erhalten (vgl. Kap. 3.2.5). Um die Repräsentativität der Infiltrationsergebnisse zu gewährleisten wurden an jedem Standort mindestens drei Parallelmessungen durchgeführt.

Als Hindernis für eine ordnungsgemäße Durchführung der Messung stellte sich der hohe Skelettgehalt des Bodens und die in Waldstandorten starke Durchwurzelung des Oberbodens heraus. Dadurch konnten die Doppelringe zur Infiltrationsmessung teilweise nicht ausreichend tief in den Boden getrieben werden, weshalb die Messstandorte im Forst in einem Radius größer 10 m um die Profilgrube herum angeordnet wurden. Letztlich sichert diese Ausweichmaßnahme aber die Mindestanzahl von drei durchgeführten Messungen pro Standort. Folge dieser Problematik ist ein erheblicher Zeitaufwand für die Durchführung der Messungen im Gelände. Leider stellte es sich trotz der Ausweichmaßnahme als notwendig heraus einige Messergebnisse der Forststandorte zu verwerfen, da während der Messung im Innenring eine schnellere Abnahme des Wasserspiegels als im Außenring stattfand. Nach Aufgraben des Infiltrometerstandortes wurde festgestellt, dass eine Wurzel, die mit dem Einsetzen des inneren Rings nach außen gedrückt wurde während des Messvorgangs als Wasserleitbahn diente.

Neben den standortspezifischen Schwierigkeiten bei der Messung sollte auch eine systematische Fehlerbetrachtung stattfinden. Bei Untersuchungen von WAHL et al. (2002) wurden Messungen zur Ermittlung der Infiltrationskapazität nach zwei verschiedenen methodischen Ansätzen durchgeführt. Festgestellt wurde dabei, dass die mit dem Doppelring-Infiltrometer ermittelten Werte in der Größenordnung einer Zehnerpotenz höher ausfallen als die mit dem Haubeninfiltrometer ermittelten Werte. Begründet wird dies mit der Tatsache, dass die Wassersäule im Infiltrometer einen Überdruck bedingt, der im Unterschied zur zweiten Methode (die im Bereich negativer Wasserspannungen arbeitet), die Gesamtheit der Poren aller Größenordnungen zum Transport aktiviert.

### **3.2 Laborarbeit**

Die analytische Bearbeitung der Bodenproben fand entsprechend den Vorgaben der Deutschen Industrie Norm (DIN) oder mittels daran angelehnter Verfahren statt. Hiervon abweichende Verfahren kamen nach Rücksprache mit Dipl. Geograph J. BÖLSCHER sowie dem Laborleiter Herrn Dr. H.-P. RÖPER zur Anwendung.

Bestimmt wurden durch Laboranalysen die Korngrößenverteilung der Bodenproben, der Feuchtegehalt der entnommenen Stechzylinderproben sowie die Rohdichte und die Dichte der festen Bodensubstanz der Volumenproben. Zusätzlich fand die Bestimmung des Gehalts an organischer Bodensubstanz statt.

#### **3.2.1 Probenvorbereitung**

Die gewonnenen Mischproben wurden vor Analysebeginn bei 60° C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, im Exsikkator abgekühlt, und anschließend mit Hilfe eines Probenteilers auf ein Einwaagegewicht von ca. 60 – 80 g reduziert. Mit dieser Einwaage wurde die der Pipettanalyse vorausgehende Nasssiegung zur Trennung der Feinerde vom Bodenskelett durchgeführt. Die Nasssiegung der Proben auf 2 mm erfolgte mit einem Maschengewebe-Sieb der Firma RETSCH. Eine Vorbehandlung der Bodenaggregate in einem Becherglas mit entmineralisiertem Wasser im Ultraschallbad diente der Trennung des Feinmaterials von den größeren Bodenpartikeln.

Der Feinbodenanteil wurde anschließend einer Behandlung mit 30%-igem Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) unterzogen, um die Oxidation der organischen Bodensubstanz zu erreichen. Dazu wurde das nasse Feinbodenmaterial im Becherglas auf einem Sandbad auf maximal 60° C erwärmt und schrittweise  $H_2O_2$ -Lösung zugegeben. Die Zugabe erfolgt solange bis kein Aufschäumen der Probe mehr erkennbar war. Anschließend wurde das überschüssige Wasserstoffperoxid durch Filtrieren der Probe über einen Membranfilter (Nitrat-Zellulose-Filter) abgeschöpft. Das nach dieser Behandlung verbliebene Bodenmaterial entspricht

dem Eingangsmaterial für die weitere Trennung in die Sand-, Schluff- und Tonfraktionen mittels Siebung und Pipettanalyse.

Auf eine Vorbehandlung der Proben zur Lösung des Carbonats konnte verzichtet werden, da im Gelände mittels 10%-iger Salzsäure festgestellt werden konnte, dass die Böden kein Carbonat enthalten.

Sowohl die Bestimmung des Gehalts an Organischer Substanz des Bodens als auch die Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz (Kornrohddichte) erfordern eine vorausgehende Trennung des Bodens in Skelett- und Feinbodenanteil. Diese Trennung wurde mittels einer Trockensiebung des bei 105° C getrockneten Bodenmaterials aus den Stechzylinderproben gewonnen. Die Siebung auf < 2 mm fand mit einem Maschensieb der Firma RETSCH statt.

### **3.2.2 Bestimmung der Korngrößenverteilung**

Das im Folgenden beschriebene analytische Vorgehen entspricht den Vorgaben der DIN ISO 11277 zum Verfahren der Sieb- und Pipettanalyse.

#### **Siebung**

Die Fraktionierung des Bodenmaterials fand mit Prüfsieben in den Maschenweiten 0,125 mm und 0,063 mm unter Verwendung von demineralisiertem Wasser statt. Die jeweiligen Siebrückstände wurden bei 105° C im Trockenschrank getrocknet und nach Abkühlen im Exsikkator ausgewogen. Die differenzierte Bestimmung der Grob-, Mittel- und Feinsandfraktionen wurde mittels zusätzlicher Nasssiebungen des Materials > 0,125 mm durchgeführt. Dazu wurden die fraktionstrennenden Siebgrößen 0,63 mm und 0,2 mm genutzt. Hilfreich für die saubere Trennung der Sandanteile erwies sich die Nutzung des Ultraschallbades. Dazu wurde das Prüfsieb inklusive Probenmaterial in ein großes Becherglas gestellt, das mit demineralisiertem Wasser auf etwa 10 mm Höhe über Maschendrahtniveau befüllt wurde. Nach einer 6-minütigen Ultraschallbehandlung des Probenmaterials im Becherglas ist an Hand des Auftretens eines Korndurchsatzes, der sich am Boden des Becherglases abgesetzt hat, zu erkennen ob die Probe vollständig getrennt wurde.

Das Feinkorn < 0,063 mm, das der Schluff- und Tonfraktion entspricht, wurde im Becherglas aufgefangen und musste anschließend zur Volumenreduktion filtriert werden. Dies geschah unter Verwendung eines Nitrat-Zellulose-Filters der Firma SARTORIUS mit dem Nennporendurchmesser 0,8 µm. Nach der Filtration fand die Überführung des Feinmaterials in einen KÖHN-Standzylinder statt. Die Standzylinder wurden geschüttelt, anschließend innen im Halsbereich und an den Wänden saubergespült und zu dreiviertel

mit demineralisiertem Wasser aufgefüllt. Das gewonnene Material entspricht dem Eingangsmaterial der Pipettanalyse.

### **Sedimentation**

Mittels der Sedimentation wird die Korngrößenverteilung der Kornanteile  $< 0,063$  mm bestimmt. Hierbei werden die Grob-, Mittel- und Feinschlufffraktionen sowie der Gesamttonanteil festgestellt. Die Bestimmungsgrenze der Verteilung liegt bei Teilchen mit einer Korngröße kleiner als  $0,001$  mm. Zur Anwendung kam das Pipettverfahren nach KÖHN. Dieses Verfahren beruht methodisch auf einer in mehreren Zeitintervallen stattfindenden Probennahme mittels einer Pipette aus einer ursprünglich homogenen Aufschlämmung. Bestimmt wird die Veränderung der Feststoffkonzentration während des Prozesses der Sedimentation. Diese über den Trockenrückstand ermittelte Änderung gibt Auskunft über die Mengenverteilung der einzelnen Kornfraktionen (MÜLLER 1964).

Zur Vermeidung der Koagulation des Materials wurde die Probe im Standzylinder vor Beginn der Sedimentationsanalyse mit 10 ml Ammoniaklösung als Dispergierungsmittel versetzt. Der verschlossene Zylinder wurde geschüttelt und es wurde nach ca. 1 h überprüft, ob die Partikel koagulieren. War dies der Fall wurde die Probenmenge auf zwei Standzylinder verteilt und es wurde erneut Dispergierungsmittel zugesetzt. Liegen die Proben in allen Standzylindern in vollständig dispergiertem Zustand vor, so werden die Zylinder mit raumtemperiertem entmineralisiertem Wasser auf die 1000 ml Marke aufgefüllt. Die Sedimentationsanalyse nach KÖHN wurde entsprechend der DIN ISO 11277 ausgeführt. Zur Anwendung kam eine Probenahmepipette mit einem Volumen von 10 ml.

Als Dispergierungsmittel wurde auf Empfehlung von Herrn Dr. H.-P. RÖPER 1-molare wässrige Ammoniaklösung eingesetzt, da diese gegenüber dem in der DIN empfohlenen gepufferten Natriumpyrophosphat keine Ausfällungen (Calcium-Phosphat-Verbindungen) bilden kann. Diese schwer löslichen Verbindungen sind zu vermeiden, da sie später in der Präzisionswägung auf die fünfte Nachkommastelle durch ihr Eigengewicht das Ergebnis verzerren. Bei Nutzung der Ammoniaklösung hingegen entweicht während des Prozesses der Einengung  $\text{NH}_3$  als Gas, so dass kein Rückstand in der Probe verbleibt.

### **3.2.3 Bestimmung der Trockenrohddichte**

Die Bestimmung der Trockenrohddichte fand mittels des Stechzylinderverfahrens statt. Dieses entspricht der DIN ISO 11272 zur Bestimmung der Trockenrohddichte. Ermittelt wird die Trockenrohddichte als Quotient aus Masse und Volumen des Bodens.

Durch die Maße des genutzten Stechzylinders ist das Volumen der Bodenprobe definiert. Die Masse wird aus der Trocknung und Wägung der Bodenprobe auf einer Analysenwaage der Firma SATORIUS mit zwei Nachkommastellen bestimmt. Getrocknet wird die Probe bei

105° C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz. Nach dem Abkühlen der Probe im Exsikkator wird sie auf der Analysenwaage gewogen.

Ist das Trockengewicht der Probe nach oben beschriebener Methode ermittelt, kann über Anwendung der folgenden Formeln das Stechzylindervolumen in  $\text{cm}^3$ , und die Trockenrohddichte in  $\text{g}/\text{cm}^3$  berechnet werden:

**Stechzylindervolumen:** 
$$V = \pi r^2 \cdot h \quad (\text{Gl. 1})$$

Hierin bedeuten:

- $V$       Volumen des Stechzylinders, in  $\text{cm}^3$
- $\pi$       Konstante mit dem Wert 3,1416
- $r^2$      Radius der Grundfläche des Zylinders, in  $\text{cm}$
- $h$       Höhe des Zylinders, in  $\text{cm}$

**Trockenrohddichte:** 
$$\rho_t = m_d / V, \quad \text{und} \quad m_d = m_t - m_s \quad (\text{Gl. 2})$$

Hierin bedeuten:

- $\rho_t$      Trockenrohddichte, in  $\text{g}/\text{cm}^3$
- $m_d$      Masse der bei 105 °C getrockneten Kernprobe abzüglich der Masse des Stechzylinders, in  $\text{g}$
- $V$       Volumen des Stechzylinders, in  $\text{cm}^3$
- $m_s$      Masse des leeren Stechzylinders, in  $\text{g}$
- $m_t$      Masse des Stechzylinders einschließlich der bei 105 °C getrockneten Probe, in  $\text{g}$

Die Bestimmung der Trockenrohddichte wurde an insgesamt 178 Stechzylindern (90 große und 88 kleine Stechzylinder) aus 38 verschiedenen Horizonten von 14 Standorten durchgeführt. Für alle mit Stechzylindern erfassten mineralischen Horizonte wurde auch die Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz durchgeführt.

### 3.2.4 Bestimmung der Dichte der festen Bodensubstanz

Dieser Parameter beschreibt das Verhältnis der Gesamtmasse ofentrockener partikulärer Feststoffe zum Volumen dieser Partikel. Er wird in  $\text{g}/\text{cm}^3$  bzw. in  $\text{kg}/\text{m}^3$  angegeben. In der DIN ISO 11508 wird für diesen Parameter der Begriff „Kornrohddichte“ genutzt. Er unterscheidet sich von der Rohddichte dadurch, dass letztere das Volumen des Porenraumes mit einschließt. Bei Betrachtung der Kornrohddichte wird ausschließlich das Volumen der festen Bodenbestandteile (Minerale, organische Substanz) berücksichtigt.

Das hier zur Anwendung gelangte methodische Vorgehen weicht wegen des Probenumfangs und der mindestens notwendigen Doppelbestimmung von den Vorgaben der DIN ISO 11508 ab.

Das angewandte Ersatzverfahren zur Bestimmung der Kornrohichte beruht auf der Volumenbestimmung einer bekannten Menge an trockener, fester Bodensubstanz mit Hilfe von Xylol. Nach dem Einwiegen der Bodenprobe in einen geeichten Maßkolben bekannten Volumens (50 ml), wird die Probe mit einer leicht benetzenden Flüssigkeit (Xylol) aus einer Bürette versetzt. Nachdem der Maßkolben auf die Eichmarke aufgefüllt wurde, wird die verbrauchte Xylolmenge an der Bürette abgelesen. Das Volumen der Bodenprobe ergibt sich aus der Differenz zum Volumen des Maßzylinders. Dieses Verfahren wird von mehreren Autoren in Fachbüchern der Bodenkunde sowie für physisch-geographische Arbeitsmethoden erläutert (FIEDLER 1988: 55f; BARSCH & BILLWITZ 1990: 109f).

Die Dichte der festen Bodensubstanz errechnet sich folgendermaßen:

$$\partial B = m_B / V_B \text{ [g / cm}^3\text{]} = b - a / 50 - c \quad (\text{Gl. 3})$$

*Hierin bedeuten:*

$\partial B$  Dichte der festen Bodensubstanz

$m_B$  Masse der bei 105 °C getrockneten Bodenprobe, in g

$V_B$  Volumen der trockenen Bodenprobe, in g

$b$  Masse des mit trockenem Boden gefüllten Maßkolben, in g

$a$  Masse des leeren Maßkolbens, in g

$c$  die an der Bürette abgelesene verbrauchte Xylolmenge, in ml

Bei der Anwendung als wichtig erwiesen, hat sich die Kontrolle der Eichmarkierung der benötigten Maßkolben. Es wurden an einigen Maßkolben trotz entsprechend temperierter Eichflüssigkeit Abweichungen bis 0,15 ml festgestellt. Ebenfalls von Bedeutung zur Erzielung möglichst genauer Werte ist die Befüllung des Maßkolbens mit Bodenmaterial zu mindestens einem Drittel seines Volumens. Bei geringerer Befüllung weisen die Messwerte eine höhere Streuung auf.

Auf Grund der Notwendigkeit einer Gütebeurteilung der angewandten Ersatzmethode, wurde ein Testdurchlauf mit Material bekannter Dichte durchgeführt. Dafür wurde vorgeglühter Quarz der Firma MERK genutzt, der eine Kornrohichte von 2,65 g/cm<sup>3</sup> besitzt. Der Test wurde dreimal durchgeführt, wobei das Ergebnis sehr zufriedenstellend ausfiel:

Material	a	b	m <sub>B</sub>	c	V <sub>B</sub>	∂ B	Mittel ∂ B
Quarz	36,80	58,16	21,36	41,87	8,06	2,65	2,64
Quarz	38,18	54,85	16,67	43,63	6,30	2,65	
Quarz	39,47	69,36	29,90	38,54	11,39	2,62	

**Tab. 2:** Ergebnisse des Testdurchlaufs zur Dichtebestimmung an Quarz

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, streuen die Ergebnisse dieser Testdurchführung nur geringfügig. Der gebildete Mittelwert von 2,64 g/cm<sup>3</sup> weicht nur um 0,01 g/cm<sup>3</sup> von dem Originalwert ab. Dieses Ergebnis kann als Beweis für die Eignung dieser Methode als Ersatzverfahren zu der in der DIN ISO 11508 aufgeführten Methodik gelten.

### 3.2.5 Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens als Volumenanteil

Da die Infiltrationsmessungen zu verschiedenen Terminen im Untersuchungsgebiet stattfanden, wurde jeweils die Bodenvorfeuchte an den Untersuchungsstandorten zu Messbeginn bestimmt. Die Bestimmung erfolgte in Anlehnung an die DIN ISO 11461 (2000) mit Hilfe von Stechzylinderproben. Die dem Oberboden entnommenen luftdicht verschlossenen Stechzylinder wurden nach erfolgter Auswaage im Trockenschrank bei 105° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Nach Abkühlen der Probe im Exsikkator, wurde ihr Trockengewicht bestimmt. Aus der feuchten und trockenen Bodenmasse wird an Hand der Division durch das Zylindervolumen die feuchte und trockene Rohdichte ermittelt. Der Wassergehalt als Volumenanteil kann anschließend aus der Differenz dieser beiden Werte ermittelt werden (vgl. Gl.4). Die Dichte des Wassers wurde für die Berechnung mit 1 g/cm<sup>3</sup> angenommen.

$$\theta = \rho_f - \rho_t / \rho_w \quad (\text{Gl. 4})$$

*Hierin bedeuten:*

$\theta$       *der Wassergehalt als Volumenanteil*

$\rho_f$      *Feuchtrohdichte, in g/cm<sup>3</sup>*

$\rho_t$      *Trockenrohdichte, in g/cm<sup>3</sup> (vgl. Kap. 3.2.3)*

$\rho_w$      *die Dichte des Wassers bei Bodentemperatur, in g/cm<sup>3</sup>*

Anschließend konnte der volumetrische Wassergehalt ( $\theta$ ) auf das Porenvolumen (PV) der Probe (vgl. Kap. 3.3.1) bezogen werden, so dass man die Wassersättigung der Bodenprobe in Prozent des Porenvolumens erhält. Die Berechnung erfolgte an Hand folgender Gleichung:

$$WS = \theta * 100 / PV \quad (Gl. 5)$$

Hierin bedeuten:

$WS$  = Wassersättigung des Porenvolumens, in %

$\theta$  = der Wassergehalt als Volumenanteil

$PV$  = Porenvolumen, als Dezimalwert

### 3.2.6 Bestimmung des organischen Gehalts des Bodens

Das Glühverfahren entsprechend der DIN 19684-3 ermöglicht die direkte Bestimmung der organischen Bodensubstanz. Dabei entspricht der Masseverlust dem Glühverlust bei 550°C, der den Anteil der organischen Bodensubstanz widerspiegelt.

Einschränkend bezüglich der Genauigkeit dieser Messung ist festzuhalten, dass methodische Fehler auftreten können. Diese sind dadurch bedingt, dass neben den Humusabbauprodukten beim Glühen ebenfalls Anteile vom Kristallwasser einiger Minerale gasförmig entweichen. Zusätzlich zum Kristallwasserverlust wird beim Glühvorgang Kohlenstoffdioxid freigesetzt, was zu einer Überhöhung der Werte führen kann (DIN 19684-3: 2, 2000). Auf Grund der ausschließlich mit erheblichem Mehraufwand verbundenen Quantifizierbarkeit dieses Fehlers, findet diese einfache Methode hier Anwendung. Vor diesem Hintergrund sind die erhaltenen Werte als gute Näherungswerte zu betrachten.

Aus den gewonnenen Daten kann über eine Formel sowohl der Masseverlust ( $\Delta m_c$ ) in Gramm als auch der Glühverlust ( $w_v$ ), angegeben als Massenanteil in Prozent, berechnet werden.

$$\Delta m_c = (m_b + m_a) - (m_c + m_a) = m_b - m_c \quad (Gl. 6)$$

$$w_v = \Delta m_c / m_b * 100 \quad (Gl. 7)$$

Hierin bedeuten:

$\Delta m_c$  = der Masseverlust, in g

$w_v$  = der Glühverlust, als Massenanteil in %

$m_b$  = Masse der ungeglühten Probe, in g

$m_a$  = Masse des bei 550 °C vorgeglühten Porzellantiegels, in g

$m_c$  = Masse der bei 550 °C geglühten Probe, in g

### 3.3 Datenberechnung und Datenableitung

Die nach oben beschriebener Methodik gewonnenen physikalischen Bodenkennwerte dienen vor allem als Ermittlungsgrundlage. Mit Hilfe der Anwendung einfacher Formeln sowie von Pedotransfer-Funktionen<sup>7</sup> können aussagekräftigere Parameter wie das Porenvolumen, die effektive Lagerungsdichte und die Porengrößenverteilung des Bodens generiert werden.

#### 3.3.1 Berechnung des Porenvolumens

Der bodenphysikalische Parameter des Porenvolumens (PV) wird aus der ermittelten Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) und der Kornrohdichte ( $\rho_B$ ) über die Anwendung untenstehender Formel errechnet:

$$PV = (1 - \rho_t / \rho_B) * 100 \text{ (\% vol)} \quad (\text{Gl. 8})$$

#### 3.3.2 Berechnung der effektiven Lagerungsdichte

Eine Umrechnung der Trockenrohdichte des Bodens in die effektive Lagerungsdichte (Ld) nach Bodenkundlicher Kartieranleitung 1994 (KA 4) erfolgt über die Einbeziehung des Tongehaltes in Masseprozent nach folgender Formel:

$$Ld = \rho_t + 0,009 * T \text{ (\%)} \quad (\text{Gl. 9})$$

#### 3.3.3 Ableitung der Porengrößenverteilung

Kennwerte des Bodenwasserhaushalts wie die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Feldkapazität (FK) und die Luftkapazität (LK), die für bestimmte Porengrößenklassen stehen, können über die Anwendung sogenannter Pedotransfer-Funktionen generiert werden. Dabei handelt es sich meist um Beziehungen, die statistisch abgesichert sind (BUNDE-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE FORSTLICHES UMWELTMONITORING 2003). Die auf Regressionsgleichungen basierende Ableitung der Porengrößenverteilung nach RENGER (1971) benötigt die Lagerungsdichte sowie den Ton- und Schluffgehalt (Körnung) in Masseprozent als Eingangsparameter. An Hand dieser Daten kann in einer Tabelle die Ableitung der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen (FK, nFK und LK) erfolgen. Die so gewonnenen Werte gelten für Bodenhorizonte mit Organikgehalten < 2 % (bei Böden mit < 17 % Ton) bzw. < 3 % (bei Böden mit > 17 % Ton). Bei höheren Gehalten an organischer Substanz muss diese bei der Berechnung der einzelnen Porengrößenbereiche durch Zuschläge bzw.

<sup>7</sup> Unter Transfer-Funktionen (TF) sind Modelle zu verstehen, mit Hilfe derer vorhandene Daten in benötigte Daten überführt werden können. Handelt es sich bei diesen Datensätzen um Werte für das Umweltmedium Boden, so werden die TF auch Pedotransfer-Funktionen (PTF) genannt.

Abschläge berücksichtigt werden. Die Höhe der Zu- oder Abschläge ist zusätzlich vom Tongehalt abhängig. Nach Berechnungen RENGER'S (1971) beträgt die mittlere Abweichung<sup>8</sup> zwischen der gemessenen und berechneten Porengrößenverteilung ca. 3 Vol. %.

RENGER (1971) bietet für die Ableitung der Werte der Feldkapazität, der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität zwei Möglichkeiten der Porengrößenklassifikation an. Zum einen den Grenzwert von 10  $\mu\text{m}$  ( $pF \approx 2,5$ ) zwischen FK und LK, und zum anderen den Grenzwert von 50  $\mu\text{m}$  ( $pF \approx 1,8$ ). Letzterer rechnet zusätzlich das langsame bewegliche Sickerwasser in die Klasse der Feldkapazität. Beide Werte sind nach SCHERZER (2004: 8) in Deutschland gebräuchlich. Da die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1994: 291) die Porengrößenklasse bei einem  $pF$ -Wert von 1,8 als konventionell bezeichnet, wird dieser bei der Ableitung der Porengrößenklassen genutzt. Zusätzlich bietet dieser Grenzwert den Vorteil, dass eine Einstufung der ermittelten Werte für die einzelnen Wasserhaushaltsgrößen nach AG BODEN (1994: 301ff) erfolgen kann.

Neben der Ableitungsmethodik von RENGER (1971) bietet auch die Bodenkundliche Kartieranleitung (AG BODEN 1994: 297) ein Tabellenwerk zur Ableitung dieser Größen an. Nach einem Vergleich der beiden Ableitungsmethodiken wurde die ältere Methode herangezogen, da diese ein differenzierteres Vorgehen zur Ermittlung der Zu- und Abschläge in Abhängigkeit von Ton- und Organikgehalt des Bodens vorsieht. So wird bei der Ermittlung der Zu- und Abschläge bei AG BODEN (1994: 300) der Tongehalt nicht weiter berücksichtigt. Auf Grund der stärkeren Differenzierung bei der RENGER-Methode wurde diese gewählt.

### **3.3.4 Ableitung der gesättigten Wasserleitfähigkeit**

Die Wasserleitfähigkeit der Böden ( $k_f$  - Werte) wurde auf Grundlage der Bodenart und der effektiven Lagerungsdichte dem Tabellenwerk aus der NASIM-Dokumentation (HYDROTEC 2003: 3-71) entnommen. Gewählt wurde jeweils der Mittelwert der angegebenen Spannweite.

---

<sup>8</sup> Dieser Wert bezieht sich auf einen Datensatz von 450 Bodenhorizonten, der zur Ableitung der Regressionsfunktionen der Porengrößenverteilung diente (RENGER 1971).

## 4 ERGEBNISSE

Nach der sich anschließenden Vorstellung der Untersuchungsstandorte folgt in Kapitel 4.2 bis 4.4 die Darstellung der Untersuchungsergebnisse. Es wurde eine Gliederung in folgende Teilabschnitte vorgenommen:

- Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen (Bodenarten, Trockenrohdichte, Lagerungsdichte, organische Substanz, Porenvolumen)
- Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsgrößen (Porengrößenverteilung und  $k_f$ -Werte)
- Ergebnisse der Infiltrationsmessungen

Als Grundlage für die Darlegung der Ergebnisse erfolgt an dieser Stelle eine Kurzvorstellung aller untersuchten Standorte<sup>9</sup>. Die Vorstellung soll der Charakterisierung der Standorteigenschaften sowie der Nutzungsverhältnisse dienen.

### 4.1 Beschreibung der Untersuchungsstandorte

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen an fünfzehn Standorten durchgeführt. Da die Untersuchungen überwiegend gemeinsam mit Herrn RAMELOW stattfanden, fand eine durchlaufende Nummerierung der Standorte statt. Aus Zeitgründen war es leider nicht möglich alle 19 Standorte bodenphysikalisch zu beproben und Infiltrationsmessungen durchzuführen. Aus diesem Grund finden die Untersuchungsstandorte mit den Nummern 7 und 8 (Moorstandorte) sowie die Standorte 17 und 18 keinen Eingang in diese Arbeit. Vier der untersuchten Standorten (Standort 13, 14, 15 und 16) wurden im Mai 2004 – vor Beginn dieser Diplomarbeit - im Rahmen eines projektbezogenen Geländepraktikums bearbeitet. Eine bodenkundliche Aufnahme sowie Infiltrationsmessungen fanden an allen Standorten statt. Am Wiesenstandort 15 war aus technischen Gründen nur eine Infiltrationsmessung möglich, genauso wenig konnte eine Beprobung mit Stechzylindern durchgeführt werden.

Zur Lokalisation der Standorte dient Abbildung 13 auf der folgenden Seite.

---

<sup>9</sup> Ergänzend zu der an dieser Stelle erfolgenden stichwortartigen Vorstellung der Untersuchungsstandorte befinden sich im Anhang Datenblätter mit detaillierten Angaben zu den einzelnen Standorten.

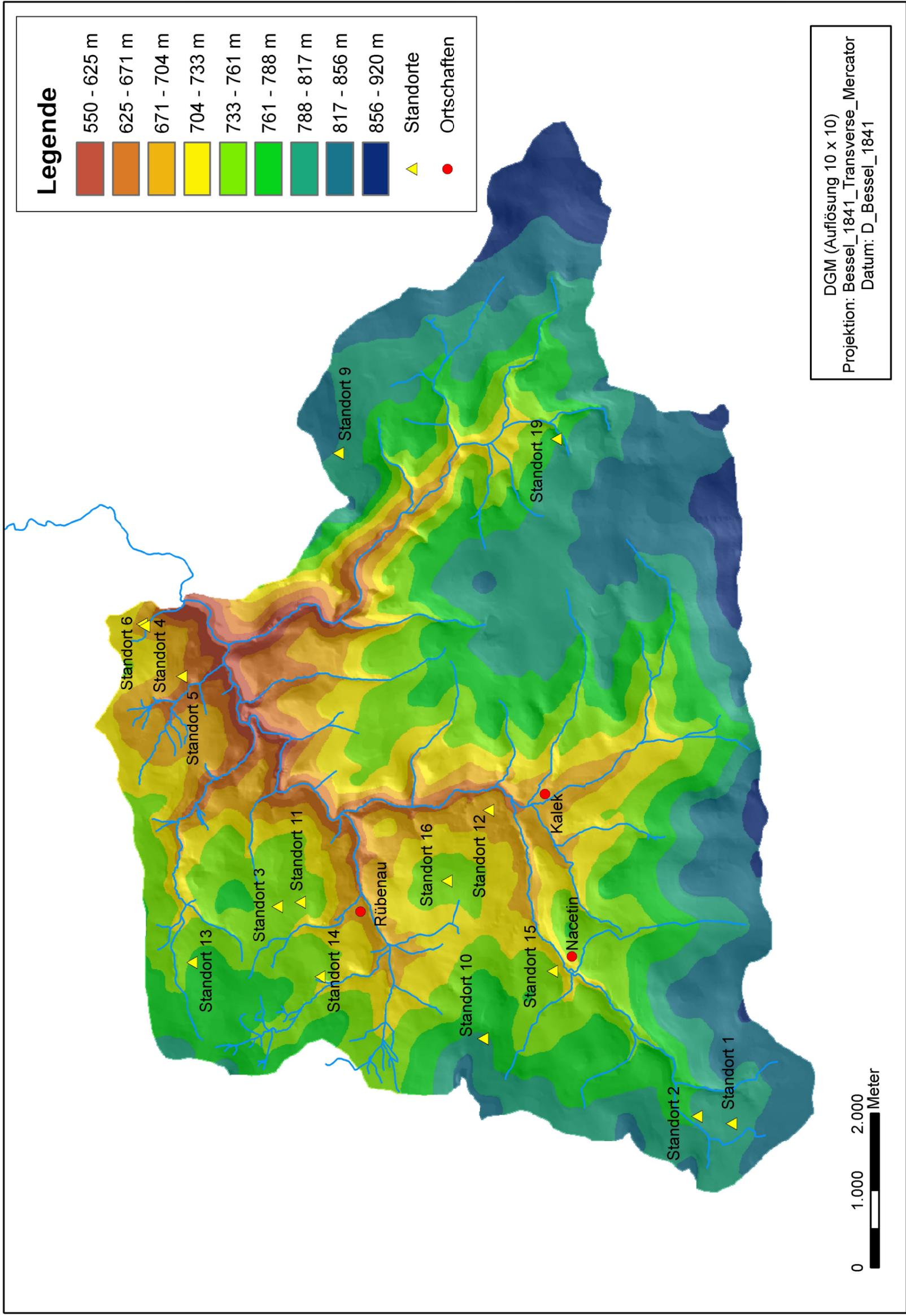


Abb. 13: Lage der Untersuchungsstandorte im Einzugsgebiet der Natzschung (Datengrundlage J. BÖLSCHER)

**Kurzbeschreibung Standort 1:**

- Der Standort 1 liegt im SW des Einzugsgebietes in Tschechien auf ca. 812 m über NN.
- Die Exposition beträgt 30° NO und die Hangneigung 2°.
- Der Standort befindet sich auf einer Wiesenfläche neben einem Hochwaldforst mit Fichtenbestockung. Eine lichte Aufforstung mit Jungbäumen wurde vorgenommen. Eine dichte Grasvegetation ist ausgebildet.
- Der Bodentyp ist eine Braunerde mit einem Solum von 44 cm Mächtigkeit.
- Die Bodenart entspricht einem stark sandigen Lehm, der in einen schluffig-lehmigen Sand überwechselt.

**Kurzbeschreibung Standort 2:**

- Dieser Standort befindet sich im SW des Einzugsgebietes in der Tschechischen Republik auf ca. 788 m über NN.
- Die Exposition beträgt 346° NW und die Hangneigung 3°.
- Der Standort zählt zum Forstgebiet, entspricht aktuell einer Aufforstungsfläche: licht stehende junge Fichten, Lärchen, Tannen und Birken. Grasschicht ausgeprägt, teilweise Moose vorhanden.
- Der Boden stellt eine Braunerde mit einer Mächtigkeit<sup>10</sup> von mehr als 52 cm dar.
- Die Bodenart entspricht einem schluffig-lehmigen Sandboden.

**Kurzbeschreibung Standort 3:**

- Der Standort 3 befindet sich im N des deutschen Einzugsgebietes auf ca. 762 m über NN.
- Die Exposition beträgt 168° S und die Hangneigung 0°.
- Der Standort ist ein Fichtenforst mit Hochwaldbewuchs. Eine Grasschicht ist vorhanden.
- Der Bodentyp ist eine Braunerde von mindestens 64 cm Mächtigkeit.
- Die Bodenart entspricht einem sandig-lehmigen Schluffboden.

**Kurzbeschreibung Standort 4:**

- Der Standort 4 ist der nördlichste Untersuchungsstandort (NO des Stößerfelsens) im Einzugsgebiet. Er liegt auf ca. 682 m über NN auf deutscher Seite des Gebietes.
- Die Exposition orientiert sich nach SW. Die Hangneigung beträgt 10°.

---

<sup>10</sup>Bei verzahnten B- und C-Horizonten wurde der Horizont dem Solum zugerechnet. Bei Cv-Horizonten, die lediglich Merkmale des Bv-Horizontes aufweisen bzw. bei Übergangshorizonten erfolgte dies nicht.

- Der Untersuchungsstandort liegt im Forstgebiet. Die Fläche entspricht einer abholzungsbedingten Verjüngungsfläche. Die angepflanzten Jungbäume sind Erlen, Fichten und Birken. Eine mächtige Krautschicht ist ausgebildet.
- Der vorgefundene Bodentyp entspricht einem Hang-Oxigley mit einer Mächtigkeit von mindestens 65 cm.
- Die Körnung des Oberbodens bildet ein schluffig-lehmiger Sand, der im Unterboden in einen schluffigen Sand übergeht.

**Kurzbeschreibung Standort 5:**

- Dieser Standort liegt SW des Standortes 4 (Deutschland) auf ca. 678 m über NN.
- Die Exposition ist S/SO, die Hangneigung beträgt 8°.
- Der Standort liegt im Fichtenforst. Die Fläche entspricht einer Lichtung mit dichter Grasvegetation (Sukzessionsvegetation).
- Eine Braunerde mit mehr als 81 cm Mächtigkeit stellt den Bodentyp dar.
- Die Bodenart entspricht einem stark lehmigen Sandboden, der im Unterboden in einen schluffigen Sand übergeht.

**Kurzbeschreibung Standort 6:**

- Der Standort 6 liegt im N des Einzugsgebietes (Deutschland) neben Standort 4 auf ca. 682 m über NN.
- Die Exposition orientiert sich nach SW, die Hangneigung beträgt 6,5°.
- Der Standort stellte eine Verjüngungsfläche im Forst mit Erlen, Fichten und Birken dar. Eine mächtige Krautschicht ist ausgebildet.
- Der Bodentyp ist ein Hangpseudogley mit mehr als 36 cm Mächtigkeit.
- Die Oberbodenart ist ein schluffiger Lehm, der Sw-Horizont entspricht einem schluffig-lehmigen Sand, um dann im Sd-Horizont in einen sandig-lehmigen Schluff überzugehen.

**Kurzbeschreibung Standort 9:**

- Der Standort 9 liegt im NO des Untersuchungsgebietes in der Tschechischen Republik auf ca. 816 m über NN.
- Die Exposition beträgt 185° S und die Hangneigung 4°.
- Der Standort wird forstlich genutzt und weist einen Hochwaldbewuchs mit Fichten auf. Eine Grasschicht ist nur lückenhaft vorhanden.
- Der Bodentyp ist eine Braunerde von mindestens 58 cm Mächtigkeit.
- Die Bodenart entspricht einem sandig-lehmigen Schluffboden.

**Kurzbeschreibung Standort 10:**

- Dieser Standort befindet sich im W des Einzugsgebietes in der Tschechischen Republik auf ca. 795 m über NN.
- Die Exposition beträgt 105° O und die Hangneigung 5° (Oberhangbereich).
- Der Standort befindet sich auf einer Forstfläche. Es handelt sich um einen Mischwald, der teilweise durch Jungpflanzen (Buche, Fichte, Birke) aufgelichtet ist. Eine dichte Grasschicht ist ausgebildet.
- Der Bodentyp ist ein Kolluvisol über reliktschem Braunerde-Podsol, dessen Einschwemmhorizont 12 cm beträgt. Die Mächtigkeit des Solums beträgt 57 cm.
- Die Bodenarten verändern sich mit der Tiefe von einem lehmigen Sand, über einen tonigen bzw. sandigen Lehm hin zu einem schluffigen Sand.

**Kurzbeschreibung Standort 11:**

- Der Standort befindet sich auf ca. 755 m über NN im N des Untersuchungsgebietes. Er liegt ca. 200 m südlich von Standort 3 in Deutschland.
- Die Exposition ist 195° nach S/SW orientiert und die Hangneigung beträgt 3° (Kulminationsbereich).
- Der Standort wird als Acker genutzt. Der Zustand der Bodenoberfläche alterniert je nach Vegetationszeit: bei ersten Infiltrationsmessungen (Oktober 2004) war er vegetationsfrei, bei zweitem Messdurchlauf (Juli 2005) war er mit schossendem Getreide bestanden.
- Der Bodentyp ist eine Pseudogley-Braunerde von 92 cm Mächtigkeit.
- Die Bodenart entspricht im Pflughorizont einem stark lehmigen Sandboden, im Unterboden einem schluffigen Sand, darunter einem Schluff.

**Kurzbeschreibung Standort 12:**

- Die Lokalität befindet sich auf 701 m über NN, relativ zentral im Einzugsgebiet auf deutscher Seite, nahe der tschechischen Grenze.
- Die Exposition ist 152° nach SO orientiert. Die Hangneigung beträgt 7°.
- Die untersuchte Fläche ist eine Rasenfläche auf einem Privatgrundstück, das ehemals als Ackerfläche diente. Die Aufgabe der Ackernutzung erfolgte vor ca. 60 Jahren (frdl. mündl. Mitteilung der Besitzer).
- Der Bodentyp entspricht einer Braunerde mit einer Mächtigkeit größer 75 cm.
- Der ehemalige Pflughorizont entspricht einem sandigen Lehm, der Unterbodenhorizont einem lehmigen Sand.

**Kurzbeschreibung Standort 13:**

- Der Standort befindet sich in einem Wasserschutzgebiet im nordwestlichen Teil der deutschen Einzugsgebietsseite. Die Höhenlage liegt bei 749 m über NN.
- Die Ausrichtung des Standortes ist nach N orientiert, die Neigung beträgt 5°.
- Die Fläche unterliegt einer forstlichen Nutzung. Ein Hochwald mit Fichtenbestockung ist ausgebildet. In der Grasschicht sind Moosflechten zu finden.
- Der Bodentyp ist eine Braunerde mit einer Mächtigkeit von mindestens 92 cm.
- Die Körnungsanalyse ergab für die Bodenart einen sandigen Lehm bzw. einen sandig-lehmigen Schluff im Unterboden.

**Kurzbeschreibung Standort 14:**

- Der Standort befindet sich im NW des Einzugsgebietes (Deutschland) auf ca. 750 m über NN.
- Die Exposition ist nach SW ausgerichtet und die Hangneigung 5°.
- Der Standort wird forstlich genutzt. Es handelt sich um einen lichten Hochwaldbestand aus Fichten, in dessen unterem Stockwerk Jungbäume aufkommen (Esche, Birke, Buche & Fichte). Der Boden ist mit einer Grasschicht bedeckt.
- Der Bodentyp an diesem Standort ist eine podsolierte Braunerde mit einer Mächtigkeit von 39 cm.
- Stark lehmiger Sand bzw. schluffiger Sand im Unterboden bilden die Bodenarten.

**Kurzbeschreibung Standort 15:**

- Dieser Wiesenstandort befindet sich im Südosten der Rübenaauer Hochfläche in zentraler Lage des deutschen Einzugsgebiet-Teils auf 735 m über NN.
- Die Exposition beträgt 180° mit südlicher Ausrichtung. Der Neigungswinkel im oberen Hangdrittel entspricht 6,5°.
- Diese Fläche dient als Wirtschaftsgrünland.
- Der Bodentyp ist eine Braunerde mit 83 cm Mächtigkeit.
- Die dominierende Kornfraktion in allen Horizonten ist Sand, im Oberboden ins lehmige tendierend, im Unterboden schluffig ausgebildet.

**Kurzbeschreibung Standort 16:**

- Der Standort befindet sich in höchster Lage auf der Rübenaauer Hochfläche bei 758 m über NN.
- Eine Exposition sowie ein Neigungswinkel entfallen wegen der Toplage.
- Auch diese Fläche dient als Wirtschaftsgrünland und ist aktuell grasbestanden.
- Es handelt sich um eine Pseudogley-Braunerde mit einer Mächtigkeit von mehr als 50 cm, die zeitweise Stauwasser aufweist.
- Der im Oberboden stark lehmige Sand, geht im Unterboden in einen schluffigen Sand über.

**Kurzbeschreibung Standort 19:**

- Die Lokalität befindet sich im NO des Einzugsgebietes in der Tschechischen Republik auf einer Höhe von 775 m über NN.
- Die Exposition der Fläche weist mit 320° nach SO, die Neigung beträgt 9°.
- Es liegt eine forstliche Nutzung mit einem alten Fichtenbestand vor. Eine Grasschicht ist unregelmäßig ausgebildet.
- Der an einer Abbruchkante aufgeschlossene Bodentyp entspricht einem Braunerde-Podsol, dessen Solum bis in 52 cm Tiefe reicht.
- Die Bodenart dieses Aufschlusses wurde per Feldansprache nach KA 4 bestimmt. Die Klassen alternieren im Tiefenverlauf: beginnend mit einem tonigen Schluff dominiert im Unterbodenhorizont ein schluffdurchsetzter Sand, um dann in einen sandigen Lehm überzugehen.

**4.2 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen**

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse der Laborarbeit dargelegt. Nachdem unter Punkt 4.2.1 die Ergebnisse der Bodenartenanalyse zusammenfassend geschildert werden, erfolgt in Kapitel 4.2.2 bis 4.2.3 eine Ergebnisdarstellung der Dichtebestimmungen sowie der Bestimmung der organischen Substanz. Die Ergebnisse werden nach Nutzungsgruppen getrennt in tabellarischer Form wiedergegeben. Eine zusammenfassende Betrachtung dieser Ergebnisse erfolgt in Kapitel 4.2.4.

**4.2.1 Ergebnisse der Bodenartenanalyse**

Die Bodenartenanalyse weist 55,8 % aller Horizonte als sandige Böden und 16,3 % als Schluffböden aus. Eine Klassifikation als Lehmböden erfahren 27,9 % aller Horizonte. Bezüglich der vertikalen Verteilung der Bodenarten in den Profilen ist festzustellen, dass die sandigen und schluffigen Horizonte zumeist im Unterboden anzutreffen sind. Die Lehmböden treten überwiegend in Oberbodenhorizonten auf (vgl. Tab. 3 und Tab. 4).

Der Grobbodengehalt der Standorte schwankt stark und erreicht in zwei Unterbodenhorizonten die Klasse sehr starker Beimengungen (60 - 85 Masse-%) nach AG BODEN (1994). Bei den meisten Standorten nimmt er mit der Tiefe zu. Ausgedrückt in Masseprozent lag der Gehalt zwischen 2,7 % im humosen Oberbodenhorizont an Standort 9 und 63,6 % im Sw-Horizont an Standort 6. Das arithmetische Mittel aller Horizonte liegt in der Klasse mittlerer Grobbodenanteile und beträgt 25,2 %.

#### **4.2.2 Laborergebnisse der forstwirtschaftlich genutzten Standorte**

Die Laborwerte für die Untersuchungsstandorte sind in der Tabelle horizontweise präsentiert. Die ersten Spalten der Tabelle ordnen dem jeweiligen Standort seine Nutzungsform<sup>11</sup>, seine Horizontabfolge, dessen Mächtigkeiten sowie die zugehörige Bodenartengruppe zu. Anschließend erfolgen Masseprozentangaben zu den Substrateigenschaften sowie dem Anteil organischer Substanz. Die letzten drei Spalten geben die Lagerungsdichte (Ld) nach AG BODEN (1994), die Trockenrohddichte ( $\rho_t$ ) sowie die Kornrohddichte ( $\rho_B$ ) wieder. Aus letzteren zwei Angaben leitet sich das Porenvolumen (PV) in Volumenprozent ab. Die Werte der Trockenrohddichte sowie der Kornrohddichte stellen den Median respektive den Mittelwert der Einzelwerte dar.

---

<sup>11</sup>Die Kürzel zur Landnutzung sind am Ende der Tabelle erklärt.

Der Tabellenaufbau folgt einer numerischen Sortierung der Standorte, wobei gleiche Nutzungsformen farblich übereinstimmend gekennzeichnet sind.

Standort & Nutzung	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart (KA 4)	Skelett (%)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Organik (%)	Ld (KA 4)	$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	PV (%)
<b>1</b> FP	Ah	0-14	ll	25,2	42,4	36,3	21,2	10,1	1,0	0,8	2,3	66,4
	Bv	14-44	sl	23,8	44,8	40,8	14,4	7,1	1,1	1,0	2,5	59,6
	Cv	44-61	sl	12,5	43,8	43,2	12,9	3,3	1,7	1,6	2,6	39,4
<b>2</b> FP	Ah	0-8	ll	22,4	40,4	40,8	18,8	11,9	1,1	0,9	2,5	61,8
	Bv+Cv	8-52	sl	26,5	41,7	42,5	15,9	5,7	1,5	1,4	2,6	47,5
<b>3</b> FH	Oh+Ah	0-6	ll	19,1	35,9	43,9	20,2	31,3	0,7	0,5	2,0	74,2
	Bv+Cv	6-64	lu	22,9	40,6	50,6	8,7	11,9	0,9	0,8	2,4	66,5
<b>4</b> FP	Aa	0-10	sl	35,3	46,4	40,5	13,1	17,9	0,7	0,6	1,5	62,9
	sGo	10-65	us	35,7	58,4	37,0	4,5	1,4	1,7	1,6	2,6	36,3
<b>5</b> FB	Ah	0-6	sl	18,6	46,8	36,5	16,7	11,7	1,1	1,0	2,4	58,5
	Bv	6-30	ls	17,5	49,2	39,0	11,8	5,7	1,4	1,3	2,5	48,5
	Bv+Cv	30-81	ls	39,4	81,1	15,7	3,2	2,7	1,6	1,5	2,6	39,8
<b>6</b> FP	Oh+Aa	0-10	tu	23,3	29,3	51,5	19,3	42,6	0,4	0,2	-	-
	Sw	10-19	sl	63,6	49,5	42,3	8,3	6,0	1,5	1,5	2,5	41,1
	Sd	19-36	lu	20,4	31,7	57,5	10,9	-	-	-	-	-
<b>9</b> FH	Oh+Ah	0-9	tu	2,7	14,9	57,1	28,0	31,3	0,5	0,3	1,6	82,4
	Bv	9-58	lu	13,2	32,4	52,7	14,8	13,0	1,0	0,9	2,3	60,1
<b>10</b> FP/ FH	M	0-12	ls	30,2	55,0	33,5	11,5	7,2	1,3	1,2	2,5	51,2
	rAh	12-15	ll	3,2	21,4	47,4	30,8	9,8	1,0	0,7	2,2	66,4
	Ae	15-17	ll	19	43,5	39,2	17,2	9,8	0,9	0,7	2,2	66,4
	Bsh	17-26	ll	28,3	48,5	33,5	18,0	9,8	0,9	0,7	2,2	66,4
	Bhs	26-57	us	29,7	57,0	35,2	7,8	6,2	1,0	0,9	2,5	64,6
	Bv+Cv	57-91	ls	60,9	79,4	16,0	1,6	3,9	1,6	1,6	2,6	39,8
<b>13</b> FH	Aa	0-8	ll	9	32,1	47,3	20,5	16,6	0,4	0,2	2,2	90,4
	Bv1	8-86	lu	15,7	27,1	63,9	9,0	11,0	1,1	1,0	2,4	60,1
	Bv2	86-92	lu	24,1	33,6	56,5	10,0	-	-	-	-	-
<b>14</b> FH	Aa	0-8	sl	18	47,4	37,6	14,9	16,3	0,6	0,4	2,3	81,1
	Bs/Bv	8-39	us	13,8	52,9	39,9	7,1	6,8	1,1	1,1	2,5	58,1
	(Bv)Cv	39-93	us	19,2	54,1	40,0	6,0	4,1	1,4	1,4	2,5	45,8
<b>19</b> FH	Ae	0-10	lu	<i>mGr2</i>	11,5	78,5	10,0	8,7	0,9	0,8	2,5	68,3
	B(s)h	10-15	us	<i>mGr2</i>	51,0	45,0	4,0	5,7	1,3	1,3	2,6	50,4
	B(h)s	15-25	ll	<i>mGr3</i>	56,5	22,5	21,0	5,7	1,3	1,3	2,6	50,4
	Bv 1	25-40	ll	<i>gGr4</i>	56,5	22,5	21,0	4,0	1,7	1,5	2,6	40,8

**Tab. 3:** Darstellung der Laborwerte aller forstlich genutzten Untersuchungsstandorte  
(*Kursiv:* nach KA 4 im Gelände bestimmte Skelett- und Feinbodenanteile)  
(FP = Pflanzung/Aufforstung, FH = Hochwald, FB = Blöße/Kahlschlag)

Die Analyse bezüglich des Organikgehaltes dieser Standorte ergab Prozentwerte zwischen 1,4 % (sGo-Horizont, Standort 4) und 42,6 % (Oh+Ah-Horizont, Standort 6). Dieser Schwankungsbreite entsprechen die Bezeichnungen schwach humos bis organisch. An einigen Untersuchungsflächen treten Organikanteile von über 30 % (äußerst humos) auf, die auf Grund einer Verzahnung des Oh- mit dem Ah-Horizont auftreten. Die geringmächtige Ausbildung des mineralischen Oberbodens erlaubte keine getrennte Beprobung mit kleinen Stechzylindern, so dass Anteile der Auflage in diesen Proben enthalten sind. Derart hohe Werte wurden an den Standorten 3, 6 und 9 im Oberboden festgestellt. Ebenfalls hohe organische Anteile, aber mit 15-30 % im äußerst humosen Bereich einzuordnen, weisen die Oberbodenhorizonte der Standorte 4, 13 und 14 auf. Im Bereich des Unterbodens nehmen die Werte für den organischen Gehalt auf durchschnittlich 6,3 % (stark humos) auf, wobei sie bei den Standorten 3, 9 und 13 im zweistelligen Bereich (sehr stark humos) liegen.

Wie in Tabelle 3 zu erkennen ist, gehen mit den hohen Anteilen an organischer Substanz geringe Rohdichten einher, die ebenfalls niedrige effektive Lagerungsdichten ( $L_d$ ) bedingen. So fällt auf, dass die Lagerungsdichten der Oberbodenhorizonte generell sehr geringe Werte, die zumeist unter 1 liegen, aufweisen. Der mit Abstand höchste Wert 1,3 tritt an Standort 10 im M-Horizont auf. Im Tiefenverlauf des Profils (A-Horizonte) verringert sich die Lagerungsdichte wieder auf Werte um 1,0. Der durchschnittliche Wert für den obersten Horizont beträgt 0,8. Über alle Horizonte betrachtet weisen die Werte eine hohe Spannweite von 1,3 zwischen dem Minimalwert 0,4 und dem Maximalwert 1,7 auf. Der kleinste Wert tritt im Oh-Horizont des Standortes 6 bzw. dem Aa-Horizont des Standortes 13 auf. Das Maximum wird im sGo-Horizont an Standort 4 und im Bv 1-Horizont des Standortes 19 erreicht. Das arithmetische Mittel aller Horizonte dieser Nutzungsgruppe beträgt 1,1 und fällt demnach in die Klasse  $< 1,4$ , die eine sehr geringe Lagerungsdichte anzeigt (nach AG BODEN 1994).

Invers zur tiefenbedingten Zunahme der Lagerungsdichte verhalten sich die Werte des Porenvolumens. Diese streuen zwischen einem Minimalwert von 36,3 % und einem Maximum von 90,4 %. Die Spannweite beträgt entsprechend 54,1 %. Im Oberboden sind Porenvolumina von über 60 % die Regel. Zwei Ausnahmen treten diesbezüglich auf: der M-Horizont des Standortes 10 mit 51,2 % und der Ah-Horizont an Standort 5 (Kahlschlagfläche) mit 58,5 %. Der M-Horizont stellt einen verdichteten Einschwemmhorizont dar. Das arithmetische Mittel aller Horizonte beträgt 58,2 % und liegt damit sehr hoch. Durchschnittlich beträgt das Porenvolumen im Oberboden 69,7 % (inklusive der Oh+Ah - Verzahnungshorizonte).

### 4.2.3 Laborergebnisse der landwirtschaftlich genutzten Standorte

Analog zum vorangegangenen Kapitel werden die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen für die landwirtschaftlich genutzten Standorte in Tabelle 4 vorgestellt.

Standort & Nutzung	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart (KA 4)	Skelett (%)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Organik (%)	Ld (KA 4)	$\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	PV (%)
11 A	Ap	0-26	sl	29,6	47,4	38,0	14,6	10,5	1,3	1,2	2,4	51,4
	Bv	26-63	us	36,9	46,4	46,0	7,7	4,9	1,3	1,3	2,5	49,9
	Bv/Sw	63-90	su	53,1	39,6	54,5	5,9	5,7	1,3	1,3	2,6	50,2
12 GI (A, 1945)	rAp	0-20	ll	3,8	49,3	33,0	17,7	8,5	1,2	1,0	2,5	57,7
	Bv+Cv	20-75	ls	34,7	68,7	24,9	6,3	4,1	1,4	1,4	2,6	46,8
15 GW <sup>12</sup>	Ap	0-26	sl	28,3	53,2	32,6	14,0	8,2	< 1,4	-	-	-
	Bv	26-67	us	30,8	50,2	43,0	6,8	4,9	1,4-1,6	-	-	-
	II BvCv	67-83	us	41,3	70,5	26,1	3,3	-	1,4-1,6	-	-	-
16 GW	Ap	0-26	sl	14,1	54,4	30,9	14,7	8,1	1,4	1,3	2,5	49,6
	Bv/Sw	26-50	us	19,2	58,0	35,9	6,0	4,6	1,3	1,2	2,5	52,0

**Tab. 4:** Darstellung der Laborwerte aller landwirtschaftlich genutzten Untersuchungsstandorte (*Kursiv:* nach AG BODEN (1994) im Gelände bestimmte Lagerungsdichteklassen), (A = Acker, GI = Wiese, GW = Grünland/Wechselwirtschaft, (A, 1945) = bis 1945 Ackernutz.)

Betrachtet man bei den Standorten landwirtschaftlicher Nutzung die Werte für den Anteil an organischer Substanz, so fallen die Werte geringer aus als bei der Forst-Gruppe. Das Minimum beträgt 4,1 % (stark humos) im Unterboden des Standorts 12 und das Maximum liegt bei 10,5 % (sehr stark humos) auf der Ackerfläche 11. Das arithmetische Mittel für alle Horizonte liegt bei 6,6 % (stark humos). Betrachtet man nur die Unterbodenhorizonte beträgt der Mittelwert 4,8 %. Insgesamt weist der Organikgehalt im Tiefenverlauf eine geringere Variabilität auf als bei der Gruppe forstwirtschaftlicher Nutzung.

Gleichfalls eine geringere Variabilität zeigt der Tiefenverlauf der Werte der effektiven Lagerungsdichte (Ld) auf. Der Minimalwert beträgt 1,2 und das gemessene Maximum 1,4. An Standort 15 wird auf Grund der Angaben aus dem bodenkundlichen Aufnahmebogen im Oberboden die Lagerungsdichteklasse 1 (sehr gering) und im Unterboden die Klasse 2 (gering) angenommen. Auffällig ist, dass an Standort 16 der Oberboden mit 1,4 eine höhere Lagerungsdichte aufweist als der Unterboden mit 1,3. Das arithmetische Mittel aller

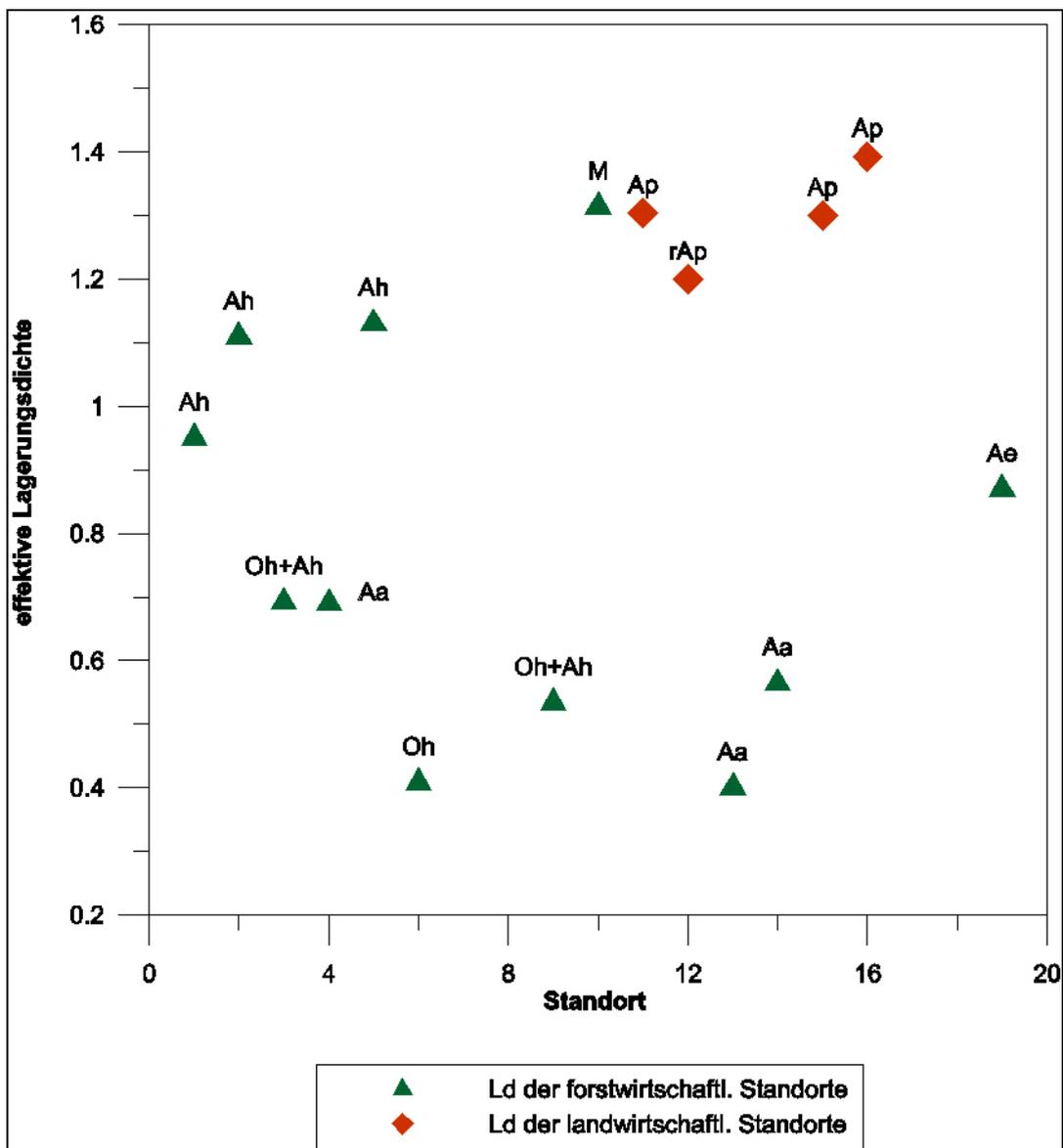
<sup>12</sup>Der Standort 15 wurde vor Beginn dieser Diplomarbeit im Rahmen eines Geländepraktikums im Mai 2004 bodenkundlich aufgenommen. Eine Infiltrationsmessung wurde durchgeführt, jedoch fand keine Beprobung mit Stechzylindern statt.

Horizonte dieser Nutzungsklasse beträgt 1,3 und entspricht damit nach AG BODEN (1994) ebenfalls der Klasse sehr geringe Lagerungsdichte.

Die Werte der Porenvolumina weisen ebenfalls eine geringere Spannbreite auf als diejenige der Forst-Gruppe. Minimal wurde ein Porenvolumen von 46,8 % im Unterboden des Standortes 12 ermittelt, maximal treten 57,7 % im Oberboden desselben Standorts auf. Damit beträgt die Spannbreite 10,9 %. Als untypisch für die bisherigen Ergebnisse erscheint eine leichte Zunahme des Porenvolumens im Profil 11 von 49,9 % im Bv - Horizont auf 50,2 % im Bv/Sw - Horizont. Im Tiefenverlauf des Profils 16 findet ebenfalls eine Zunahme des Porenvolumens von 49,6 % auf 52 % statt. Über alle Horizonte gemittelt beläuft sich das Porenvolumen in dieser Gruppe auf 51,1 %.

#### **4.2.4 Gemeinsame Betrachtung aller Untersuchungsstandorte**

Bei nutzungsunabhängiger Betrachtung sämtlicher untersuchter Einzugsgebietsstandorte ist festzustellen, dass die Werte der effektiven Lagerungsdichte ( $L_d$ ) gering ausfallen. Der Mittelwert für alle untersuchten mineralischen Horizonte (inkl. der Verzahnungshorizonte) liegt bei 1,2. Dies entspricht nach Einstufung der AG BODEN (1994) einer sehr geringen Lagerungsdichte. Dennoch treten charakteristische Unterschiede in der Ausprägung der effektiven Lagerungsdichte auf. Besonders prägnant werden diese bei Betrachtung der effektiven Lagerungsdichte der oberen Bodenhorizonte (vgl. Abb. 14).



**Abb. 14:** Standortbezogene Darstellung der effektiven Lagerungsdichte (nach AG BODEN 1994) des obersten Horizontes aus beiden Nutzungsgruppen

Die Abbildung 14 erlaubt drei Lagerungsdichteklassen auszugliedern, die gleichzeitig Nutzungsunterschiede aufweisen. Die erste Gruppe bilden die Oberbodenhorizonte der landwirtschaftlich genutzten Flächen (rote Signatur: Ap-/rAp-Horizonte), deren Lagerungsdichte zwischen 1,2 und 1,4 schwanken. Ebenfalls in diese Gruppe fällt der als Kolluvialhorizont angesprochene M-Horizont des Forststandortes 10 (grüne Signatur). Eine zweite Gruppe, die sich aus den Oberbodenhorizonten der Standorte 1, 2, 5 und 19 zusammensetzt weist Lagerungsdichtewerte zwischen 1,1 und 0,9 auf. Allen Forststandorten ist gemein, dass sie sich entweder im Randbereich des Forsts befinden bzw. eine lichte Aufforstungsfläche mit Jungbestand darstellen. Der in dieser Gruppe höchste Lagerungsdichtewert wurde an Standort 5 auf einer Kahlschlagfläche mit Sukzessionsvegetation aus Gräsern ermittelt.

Alle Profilstandorte dieser Gruppe weisen eine halboffene bis offene Kronendachsituation innerhalb eines forstlich genutzten Gebietes auf. Die geringen bis sehr geringen Lagerungsdichtewerte der dritten Gruppe schwanken zwischen 0,7 und 0,4. Vier dieser sechs Standorte (3, 9, 13 und 14) befinden sich in einem geschlossenen Forst hohen Bestandesalters. Die Standorte 4 und 6 liegen beide im Bereich einer Aufforstungsfläche, die eine sehr dichte Strauch- und Krautschicht aufweist (vgl. Abb. 31).

#### 4.2.5 Zusammenfassende Betrachtung

Deutliche Unterschiede sind zwischen den bodenphysikalischen Werten der beiden Nutzungsgruppen dahingehend festzuhalten, dass

- die Ausprägung aller untersuchten Parameter bei der Gruppe der Forststandorte wesentlich variabler als bei der Landwirtschaftsgruppe ist und
- in der Gruppe der Forststandorte:
  - die Organikgehalte im Oberboden wesentlich höher,
  - die Lagerungsdichten deutlich geringer, und
  - die Porenvolumina höher als bei der Landwirtschafts-Gruppe sind.

Die ausführliche graphische Darstellung der Tiefenfunktion von Lagerungsdichte und Porenvolumen aller untersuchten Standorte ist im Anhang zu finden.

#### 4.3 Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltsgrößen

Unter Zuhilfenahme der Pedotransfer-Funktionen von RINGER (1971) (vgl. Kap. 3.2.3) wurde aus den Labordaten die Porengrößenverteilung für die Bodenhorizonte abgeleitet. Die Porengrößeneinteilung erfolgt als Feldkapazität (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK) nach den Porengrößenklassen der AG BODEN (1994: 291). Diese Klassifikation steht synonym für eine Einteilung des Bodenwassers in Haft- bzw. unterschiedlich schnell bewegliches Sickerwasser (vgl. Tab.1, Kap.1.3.1). Angegeben werden die Speicherkapazitätsklassen nFK, FK und LK nach AG BODEN (1994: 291) in Volumenprozent bzw. in mm/dm.

Der Aufbau der Tabelle 5 ermöglicht eine horizontbezogene Betrachtung aller Kennwerte der Untersuchungsstandorte. Zunächst wird unter „PV“ das aus den Labordaten gewonnene Gesamtporenvolumen in Volumenprozent angegeben. Nachfolgend werden die aus Tabellenwerken abgeleiteten Bodenwasserhaushaltsgrößen zum einen in Volumenprozent und zum anderen in metrischen (mm) Angaben für die spezifischen Horizontmächtigkeiten wiedergegeben. Die Werte der letzten Spalte (kf), die die gesättigte Wasserleitfähigkeit darstellen, sind mit Hilfe der Tabelle aus der NASIM–Dokumentation (HYDROTEC 2003: 3-71) abgeleitet worden. Dabei wurde für jeden Horizont der Mittelwert, der von Körnung und Lagerungsdichte abhängigen, angegebenen Spannbreite möglicher kf-Werte gewählt.

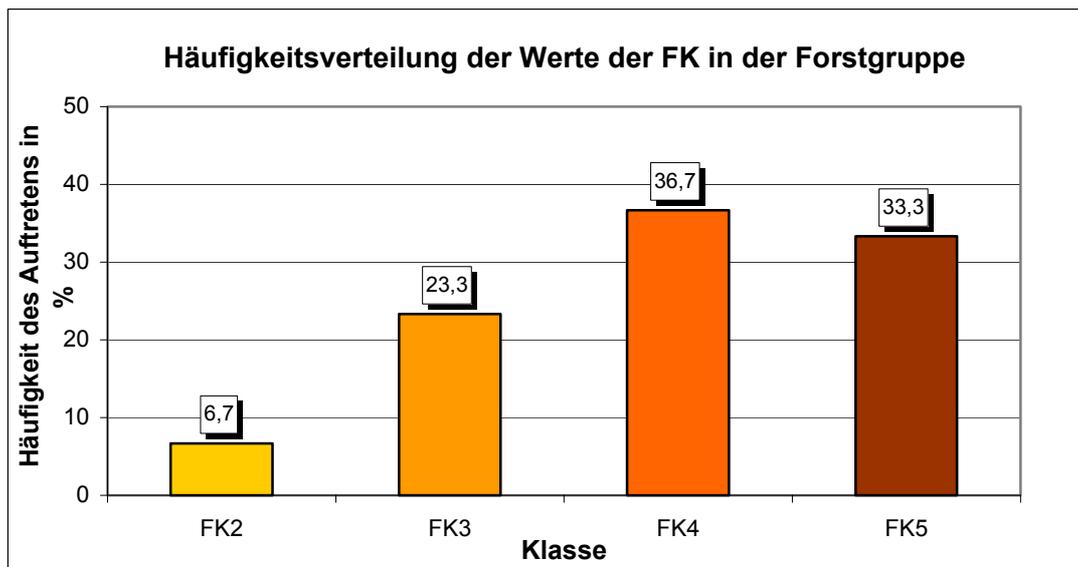
### 4.3.1 Bodenwasserhaushaltsgrößen der forstwirtschaftlich genutzten Standorte

Die Systematik des Tabellenaufbaus folgt der Standortnummerierung. Eine farbliche Übereinstimmung kennzeichnet Standorte gleicher Nutzung.

Standort & Nutzung	Hori- zont	Tiefe (cm)	PV (Vol.%)	FK (Vol%)*	FK (mm)*	nFK (Vol.%)*	nFK (mm)*	LK (Vol.%)*	LK (mm)*	kf (mm/h)**
1 FP	Ah	0-14	66,4	48	67,2	31	43,4	16	22,4	84
	Bv	14-44	59,6	42	126,0	39	117,0	17	51,0	30
	Cv	44-61	39,4	30	51,0	18	30,6	14	23,8	11
2 FP	Ah	0-8	61,8	52	41,6	34	27,2	15	12,0	84
	Bv+Cv	8-52	47,5	41	180,4	24	105,6	9	39,6	30
3 FH	Oh+Ah	0-6	74,2	55	33,0	36	21,6	15	9,0	84
	Bv+Cv	6-64	66,5	55	319,0	39	226,2	12	69,6	30
4 FP	Aa	0-10	62,9	56	56,0	49	49,0	13	13,0	30
	sGo	10-65	36,3	23	126,5	16	88,0	18	99,0	11
5 FB	Ah	0-6	58,5	54	32,4	35	21,0	14	8,4	84
	Bv	6-30	48,5	41	98,4	22	52,8	13	31,2	84
	Bv+Cv	30-81	39,8	23	117,3	21	107,1	18	91,8	11
6 FP	Oh+Aa	0-10	-	59	59,0	33	33,0	13	13,0	71
	Sw	10-19	41,1	35	31,5	22	19,8	13	11,7	30
	Sd	19-36	-	-	-	-	-	-	-	-
9 FH	Oh+Ah	0-9	82,4	59	53,1	33	29,7	13	11,7	71
	Bv	9-58	60,1	56	274,4	40	196,0	12	58,8	30
10 FP/ FH	M	0-12	51,2	43	51,6	40	48,0	17	20,4	84
	rAh	12-15	66,4	53	15,9	29	8,7	13	3,9	71
	Ae	15-17	66,4	48	9,6	31	6,2	16	3,2	84
	Bsh	17-26	66,4	48	43,2	31	27,9	16	14,4	84
	Bhs	26-57	64,6	37	114,7	29	89,9	19	58,9	30
Bv+Cv	57-91	39,8	26	88,4	19	64,6	17	57,8	11	
13 FH	Aa	0-8	90,4	56	44,8	37	29,6	15	12,0	84
	Bv1	8-86	60,1	53	413,4	38	296,4	12	93,6	30
	Bv2	86-92	-	-	-	-	-	-	-	-
14 FH	Aa	0-8	81,1	56	44,8	49	39,2	13	10,4	84
	Bs/Bv	8-39	58,1	39	120,9	30	93,0	19	58,9	30
	(Bv)Cv	39-93	45,8	26	140,4	19	102,6	17	91,8	30
19 FH	Ae	0-10	68,3	49	49,0	35	35,0	14	14,0	30
	Bsh	10-15	50,4	38	19,0	30	15,0	19	9,5	30
	Bhs	15-25	50,4	43	43,0	27	27,0	16	16,0	84
	Bv 1	25-40	40,8	34	51,0	18	27,0	11	16,5	23

**Tab. 5:** Darstellung der aus Labor- und Geländeuntersuchungen gewonnenen bodenphysikalischen Kennwerte der Forststandorte sowie der nach HYDROTEC (2003: 3-71) abgeleiteten kf-Werte\*\* (\* mittels Pedotransfer-Funktionen nach RENGER abgeleitete Werte)

Die Feldkapazität gibt den Anteil der Fein-, Mittel- und engen Grobporen ( $< 0,2-50 \mu\text{m}$ ) des Bodens wieder. Gleichzeitig steht die Feldkapazität für die Speicherfähigkeit des Bodens. Die ermittelten Werte können nach AG BODEN (1994) in eine fünfstufige Skala eingeordnet werden. Die Verteilung ergibt eine Einordnung sämtlicher Werte auf vier Klassen: geringe, mittlere, hohe und sehr hohe FK. Die prozentualen Anteile jeder Klasse sind der Abbildung 15 zu entnehmen.



**Abb. 15:** Prozentuale Klassenverteilung der FK-Werte der Forstgruppe nach AG BODEN (1994)

Die Verteilung der Werte auf die Klassen weist mit 36,7 % einen Schwerpunkt im Bereich hoher Speicherfähigkeit (39-52 Vol.%, FK4) des Bodens auf. Ein noch größeres Speichervolumen ( $> 52 \text{ Vol.}\%$ , FK5) besitzen 33,3 % der untersuchten Bodenhorizonte. Die Horizonte mit mittlerer Speicherfähigkeit (26-39 Vol.%, FK3) summieren sich zu 23,3 %. Die kleinste Klassengröße bilden mit 6,7 % die Horizonte, die nur geringe Werte der Feldkapazität (13-26 Vol.%, FK2) aufweisen. Zu diesen zählen der sGo - Horizont an Standort 4 sowie der Bv+Cv - Horizont an Standort 5. Mit Ausnahme von zwei Standorten ist bei allen Bodenprofilen eine Abnahme der FK mit der Tiefe zu erkennen. Ausnahmen bilden die Untersuchungsstellen 10 und 19.

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) als ein Teil der FK interessiert insofern, als dass sie eine zusätzliche PorengröÙeneinteilung zwischen Mittel- und Feinporen ( $0,2-50 \mu\text{m}$ ) vornimmt. Die nFK gibt an, wie hoch der Volumenanteil des Bodens an Mittelporen und engen Grobporen ist. Damit kann das pflanzenverfügbare Haftwasser bestimmt werden. Eine Klassifikation kann laut AG BODEN (1994: 302) nur mit Kenntnis über die Mächtigkeit des effektiven Wurzelraumes erfolgen. Da dieser nicht bekannt ist, werden die quantitativen Angaben zusammengefasst. Die Absolutwerte variieren zwischen einem Minimum von

16 Vol.% und einem Maximum von 49 Vol.%. Der Mittelwert für alle Horizonte beträgt 30,8 Vol.%.

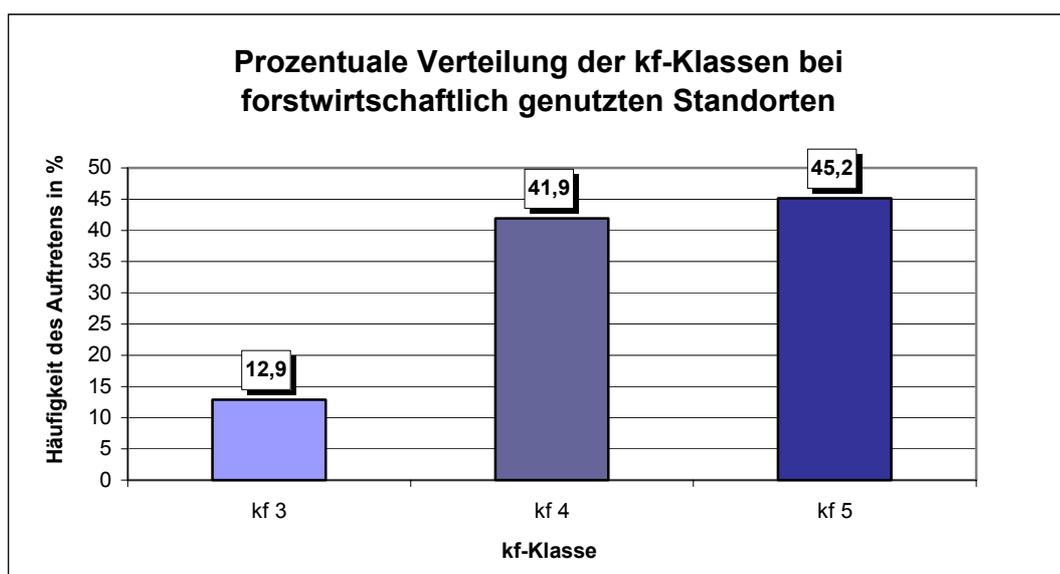
Die Werte für die Luftkapazität (LK), also den Grobporenanteil mit einem Durchmesser größer 50 µm, ordnen sich in einer fünfstufigen Skala in die Klassen 3 und 4 ein. Die Angaben in Tabelle 6 sind für die Erklärung der gesättigten Infiltrationsrate von Interesse.

Kurzzeichen	Anzahl	%	Bezeichnung
LK3	2	6,7	mittel
LK4	28	93,3	hoch

**Tab. 6:** Prozentuale Verteilung der LK-Klassen in der Forst-Gruppe

Von den 30 Horizonten innerhalb der Forstgruppe fallen nur der Bv+Cv-Horizont des Standortes 2 und der Oh+Ah-Horizont des Standortes 9 in die Kategorie mittlerer Werte (4-12 Vol.%). Damit ist die Luftkapazität von 93,3 % der Horizonte als hoch (12-20 Vol.%) zu beschreiben. Das arithmetische Mittel der LK für alle Horizonte liegt bei 14,9 Vol.%. Entsprechend sind die Horizonte im Mittel durch einen hohen Anteil an Grobporen gekennzeichnet.

Abschließend werden die Werte für die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Werte) klassifiziert. Die kf-Werte geben die Permeabilität der Horizonte bei wassergesättigtem Boden wieder. Im Oberboden müssten diese Werte der gesättigten Infiltrationsrate entsprechen. Nach den Vorgaben der AG BODEN (1994) verteilen sich alle Werte auf die Klassen mittlere bis sehr hohe Durchlässigkeit.



**Abb. 16:** Prozentuale Verteilung der kf-Klassen in der Gruppe der Forststandorte

Die Abbildung 15 zeigt, dass 12,9 % der Werte in die Klasse der mittleren Wasserdurchlässigkeit (10-40 cm/d) fallen, und 41,9 % sich in die Klasse der hohen Wasserdurchlässigkeit (40-100 cm/d) einordnen. Der Großteil der Horizonte mit 45,2 % weist eine sehr hohe Wasserleitfähigkeit auf. Mit Ausnahme von Standort 19 ist festzustellen, dass die maximale Wasserleitfähigkeit immer im oberen Horizont liegt.

#### 4.3.2 Bodenwasserhaushaltsgrößen der landwirtschaftlich genutzten Standorte

Analog zur Präsentation der Bodenwasserkennwerte der Forstgruppe erfolgt die Darstellung der Ergebnisse für die landwirtschaftlich genutzten Standorte in Tabelle 7.

Standort & Nutzung	Hori-zont	Tiefe (cm)	PV (%)	FK (%)*	FK (mm)*	nFK (%)*	nFK (mm)*	LK (%)*	LK (mm)*	kf (mm/h)**
11 A	Ap	0-26	51,4	47	122,2	43	111,8	17	44,2	84
	Bv	26-63	49,9	40	148,0	37	136,9	17	62,9	30
	Bv/Sw	63-90	50,2	39	105,3	30	81,0	17	45,9	30
12 Gl (A,1945)	rAp	0-20	57,7	47	94,0	30	60,0	16	32,0	84
	Bv+Cv	20-75	46,8	26	143,0	19	104,5	17	93,5	84
15 GW <sup>13</sup>	Ap	0-26	-	44	114,4	41	106,6	17	44,2	84
	Bv	26-67	-	35	143,5	28	114,8	20	82,0	30
	Bv/Cv	67-83	-	-	-	-	-	-	-	-
16 GW	Ap	0-26	49,6	38	98,8	25	65,0	13	33,8	84
	Bv/Sw	26-50	52,0	35	84,0	28	67,2	20	48,0	30

**Tab. 7:** Darstellung der aus Labor- und Geländeuntersuchungen gewonnenen bodenphysikalischen Kennwerte der Landwirtschaftsstandorte sowie der nach HYDROTEC (2003:3-71) abgeleiteten kf-Werte\*\* (\* mittels Pedotransfer-Funktionen nach RENGER abgeleitete Werte)

Die Ergebnisse der Feldkapazität weisen im Vergleich zu den forstwirtschaftlichen Standorten eine geringere Variabilität auf. Möglicherweise ist dies durch den geringeren Datenumfang dieser Nutzungsgruppe bedingt. Es entsteht eine Tendenz zu geringeren Feldkapazitäten. Zwar stellt die Klasse der hohen FK mit knapp 56 % den größten Anteil, doch fehlt die Klasse der sehr hohen FK. Die Horizonte mit mittlerer Feldkapazität sind mit 44,4 % vertreten. Das arithmetische Mittel der FK für alle Horizonte beläuft sich auf 39 Vol%. Damit liegt es unter demjenigen der Forststandorte (44,5 Vol.%).

<sup>13</sup>Die Datenlücken in der Spalte PV tritt auf, da keine Beprobung mit Stechzylindern erfolgen konnte. Aus dem Bv/Cv-Horizont wurde auch keine Mischprobe zur Körnungsanalyse entnommen.

Auch in dieser Gruppe ist eine tiefenbedingte Abnahme der FK-Werte im Profilaufbau zu erkennen.

Kurzzeichen	Anzahl	%	Bezeichnung
FK3	4	44,4	mittel
FK4	5	55,6	hoch

**Tab.8:** Prozentuale Verteilung der FK-Klassen in der Gruppe der Landwirtschaftsstandorte

Die Daten zur nutzbaren Feldkapazität (nFK) sind mit denjenigen der forstwirtschaftlichen Standorte vergleichbar. Beträgt das arithmetische Mittel bei letzteren 30,8 %, so liegt es bei den landwirtschaftlich genutzten Standorten bei 31,2 %. Das Minimum aller Werte beträgt 19 %, der Maximalwert liegt bei 43 %. Bei gemeinsamer Betrachtung der FK- und nFK-Werte beider Nutzungsgruppen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Der Anteil an engen Grobporen, Mittel- und Feinporen (FK) liegt bei den Forststandorten höher,
- gleichzeitig ist jedoch mit 13,7 Vol.% auch der Anteil an Feinporen ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) gegenüber dem Anteil der Landwirtschaftsflächen (7,8 Vol.%) größer.

Die Klassifikation der Horizonte hinsichtlich ihrer Luftkapazitätswerte (weite Grobporen) lässt für die landwirtschaftlichen Standorte, verglichen mit den Ergebnissen der anderen Nutzungsgruppe, eine Tendenz in Richtung höherer Werte erkennen. Lagen bei den forstwirtschaftlichen Standorten 93,3 % aller Horizonte in der Klasse der hohen LK, so sind es in der zweiten Gruppe 100 %. Diese Abweichung von 6,7 % spiegelt sich im arithmetischen Mittelwert der beiden Nutzungsgruppen wieder. So liegt dieser Wert bei den landwirtschaftlichen Standorten bei 17,1 Vol.%, bei den Forststandorten aber nur bei 14,9 %. Das bedeutet für die Porengrößenverteilung, dass die landwirtschaftlich genutzten Standorte mehr weite Grobporen  $> 50 \mu\text{m}$  aufweisen als die durchschnittlich weniger dicht gelagerten Forstböden.

Bezüglich der Daten für die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Bodenhorizonte ergibt sich für die Landwirtschaftsstandorte eine Verteilung auf drei Klassen (vgl. Abb. 17). Eine mittlere Leitfähigkeit weisen 10 % aller Horizonte auf, eine hohe Wasserleitfähigkeit 40 %. Die größte Klasse bildet mit 50 % der Anteil der Horizonte mit sehr hoher Durchlässigkeit. Insgesamt ist damit in dieser Nutzungsgruppe keine Veränderung der gesättigten Permeabilität gegenüber derjenigen der Forststandorte festzustellen.

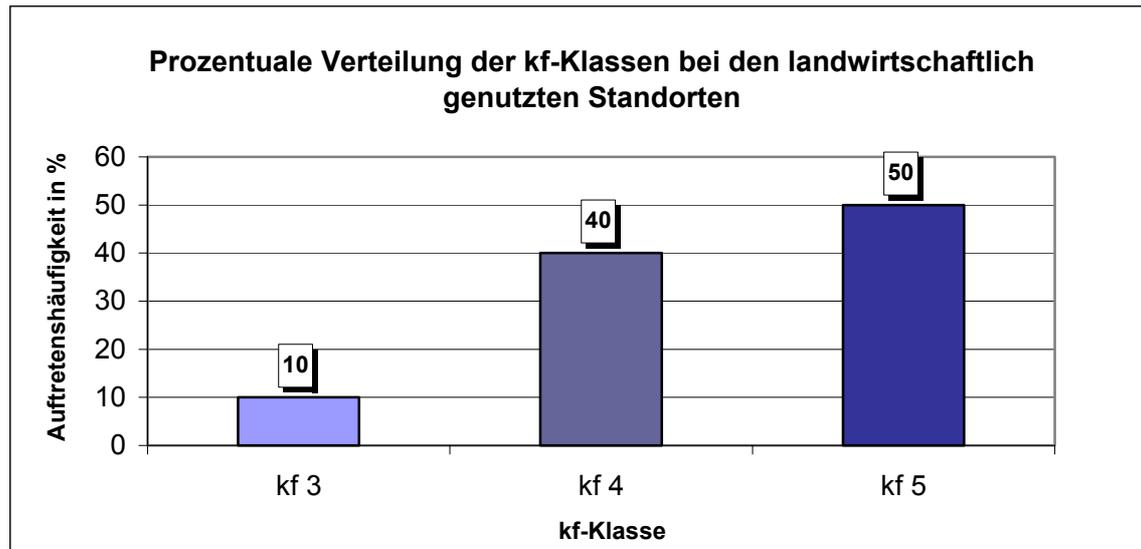


Abb. 17: Prozentuale Verteilung der kf-Klassen bei den landwirtschaftlich genutzten Standorten

#### 4.3.3 Zusammenfassende Betrachtung aller Standorte

Nach Betrachtung der Bodenwasserhaushaltsgrößen aller Untersuchungsstandorte lässt sich folgern, dass sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede zwischen den zwei Nutzungsgruppen feststellbar sind. Gemeinsamkeiten sind festzustellen bei:

- den Werten der gesättigten Leitfähigkeit (kf-Werte)
- den Werten für die nutzbare Feldkapazität (Mittelporen und enge Grobporen)

Geringfügige bis mäßige Unterschiede machen sich zwischen den beiden Nutzungsgruppen bei folgenden Wasserhaushaltsgrößen bemerkbar:

- Die FK weist bei den Landwirtschaftsstandorten mit 39 % geringere Volumenprozentanteile als bei den Forststandorten mit 44,5 % auf
- Die Luftkapazität fällt bei den Landwirtschaftsstandorten mit 17,1 Vol.% gegenüber 14,7 Vol.% höher aus als bei den forstlich genutzten Untersuchungsstandorten.
- Die Summe aus Mittelporen, engen und weiten Grobporen (nFK + LK) liegt bei den Standorten landwirtschaftlicher Nutzung im Mittel mit 48,3 Vol.% um 2,7 Vol.% höher als bei den Forststandorten mit 45,6 %

Der letzte Punkt sagt aus, dass die landwirtschaftlichen Standorte im Mittel ein größeres Volumen im Bereich des für die Infiltration relevanten Bodenspeicherraums aufweisen. Dieser Speicherraum entspricht dem Wasserhaushaltsbereich zwischen dem Welkepunkt (WP) und dem Gesamtporenvolumen (GPV) (HYDROTEC 2003: 3-68).

#### 4.4 Ergebnisse der Infiltrationsmessungen

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Betrachtung der Messergebnisse für die minimale Infiltrationsrate (Infiltrationsrate bei vollständiger Wassersättigung des Bodens). Im Folgekapitel 4.4.2 wird die Streuung der Infiltrationsergebnisse dargestellt. Anschließend erfolgt in Kapitel 4.4.3 eine Gegenüberstellung der minimalen Infiltrationsrate mit den Werten für die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Oberbodens (kf-Werte) der jeweiligen Standorte. Abschließend werden in Kapitel 4.4.4 die wichtigsten Ergebnisse dieser Darstellungen zusammengefasst.

##### 4.4.1 Minimale Infiltrationsrate

Zur Ermittlung eines für die jeweiligen Profilstandorte repräsentativen Ergebnisses aus den Einzelmessungen wurden zunächst sämtliche Messwerte für alle Standorte in die Tabelle 9 übertragen. Aus diesen Messwerten wurden für jeden Standort die beiden geringsten Infiltrationswerte selektiert (vgl. Tab. 10). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die Messmethodik auf Grund des im Innenzylinder erzeugten hydraulischen Drucks generell eine gegenüber natürlichen Niederschlägen erhöhte Infiltrationsrate bedingen kann (vgl. Kap. 3.1.4). Zusätzlich besteht bei den sehr hohen Messwerten die Gefahr, dass das infiltrierende Wasser im Untergrund durch eine Wurzel aus dem Innenring abgeleitet wurde, so dass der Messwert nicht die Infiltrationsrate bei wassergesättigtem Boden wiedergibt. Auf Grund der bekanntermaßen hohen Variabilität der Messergebnisse (SCHWARZ 1982) erscheint die Bildung eines Mittelwertes aus den geringsten Messwerten als geeignetes Vorgehen zur Gewinnung eines repräsentativen Werts. Durch die Wahl der beiden geringsten Werte wird versucht den Einfluss o.g. Fehlerquelle zu reduzieren. Damit die höheren Messwerte trotzdem in die Beurteilung der Gefügeausbildung eingehen, werden sie in Form von Streuungswerten (vgl. Abb. 17) angegeben und später diskutiert. An Standort 3 wurde auf Grund der sehr viel geringeren Sättigung des Bodens zu Messbeginn der geringere Wert als repräsentativer Wert gewählt.

Das beschriebene Vorgehen zur Auswahl des Infiltrationswerts wurde angewandt, da die Fachliteratur zum Problem des Umgangs mit stark streuenden Infiltrationsergebnissen keine Hilfestellung bietet. In Tabelle 9 sind sämtliche Messergebnisse der jeweiligen Standorte wiedergegeben.

Standorte															
Messung	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	19
1. Mess.	210	465	1134	312	0	300	1200	195	10	165	990	1200	120	20	210
2. Mess.	10	54	642	312	10	-	660	60	7	110	615	1200	-	15	675
3. Mess.	15	36	186	465	0	-	840	360	60	-	195	246	-	53	90
4. Mess.	10	10	440	-	0	-	540	198	45	-	-	-	-	-	-

Tab. 9: Überblick über alle gemessenen minimalen Infiltrationsraten (mm/h)

Die derart gewonnenen Repräsentativwerte der minimalen Infiltrationsrate für alle Standorte sind in Tabelle 10 in der letzten Zeile dargestellt. Die in der Tabelle verwendeten Kürzel für die Landnutzung entsprechen den Vorgaben der AG BODEN (1994: 72ff). Sie geben die aktuelle Bodennutzung zum Zeitpunkt der Messung wieder. Die Vorgefeuchte des Bodens zu Messbeginn wird in Volumenprozent Wassersättigung <sup>14</sup> angegeben.

Standort	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	19
Nutzung (AG BOD.)	FP	FP	FH	FP	FB	FP	FH	FP/ FH	A	GI	FH	FH	GW	GW	FH
min. IR (mm/h)	10	10	186	312	0	300	540	60	7	110	195	246	120	15	90
Datum	Jul 05	Jul 05	Jul 05	Mai 05	Okt 04	Mai 05	Okt 04	Jul 05	Mai 05	Okt 04	Jul 05	Jul 05	Mai 04	Mai 04	Jul 05
WS (Vol.%)	78	79	69	72	68	75	33	78	78	62	85	73	-	85	60
min. IR (mm/h)	10	36	440	312	0	-	660	195	10	165	615	1200	-	20	210
Datum	Jul 05	Jul 05	Aug 04	Jul 05	Jul 05	-	Jul 05	Okt 04	Mai 05	Mai 05	Jul 05	Mai 05	-	Mai 05	Jul 05
WS (Vol.%)	78	79	39	77	87	-	44	66	78	83	85	74	-	83	60
repr. IR (mm/h)	10	23	186	312	0	300	600	128	9	138	405	723	120	18	150

**Tab. 10:** Darstellung der beiden geringsten minimalen Infiltrationsraten (min. IR) und der repräsentativen Infiltrationsrate (repr. IR) für jeden Standort. Zusätzlich sind die Nutzungsart und die Wassersättigung (WS) des Bodens zu Messbeginn angegeben. (FP = Pflanzung, Aufforstung, FH = Hochwald, FB = Kahlschlag, A = Ackerland, GI = Wiese, GW = Grünland-Wechselwirtschaft)

Auch nach der Einschränkung der Daten auf den Mittelwert der beiden geringsten Infiltrationsraten ist sowohl die absolute Höhe der minimalen Infiltrationsrate als auch die Differenz der Infiltrationsraten zwischen den verschiedenen Standorten erheblich. Der Maximalwert aller Messungen der minimalen Infiltrationsrate liegt bei 723 mm/h in einem Nadelforst-Hochwald (Standort 14). Es folgen der Hochwald-Standort 9 (600 mm/h) sowie der Hochwald-Standort 13 (405 mm/h). Ebenfalls beachtlich hohe Infiltrationsraten mit 312 bzw. 300 mm/h weisen die Aufforstungsflächen 4 und 6 auf. Die Werte für die minimale Infiltrationsrate der Standorte 3, 10, 12, 15 und 19 schwanken zwischen 120 und 186 mm/h. Der Minimalwert aller durchgeführten Messungen entspricht 0 mm/h und wurde auf der Kahlschlagfläche an Standort 5 gemessen. Ebenfalls geringe minimale Infiltrations-

<sup>14</sup>Die Bestimmung des Wassergehalts als Volumenanteil erfolgte in Anlehnung an die DIN ISO 11461: 2002-05 (vgl. Kap. 3.2.5).

werte weisen der Ackerstandort 11, die Aufforstungsstandorte 1 und 2 sowie der Wechselwirtschaftsstandort 16 auf. Das arithmetische Mittel der minimalen Infiltrationsrate beträgt 208 mm/h. Auffällig ist, dass mit Ausnahme der Aufforstungsstandorte 1 und 2 sowie der Kahlschlagfläche 5 alle Messergebnisse der Forststandorte über denjenigen der Landwirtschaftsstandorte liegen. Eine weitere Ausnahme stellt der Wiesenstandort 12 dar, dessen Infiltrationsrate von 138 mm/h diejenige des Forststandortes 10 übertrifft. Der Mittelwert der minimalen Infiltrationsrate der Forststandorte beträgt 161 mm/h gegenüber einem Mittelwert von 71 mm/h bei den Landwirtschaftsstandorten.

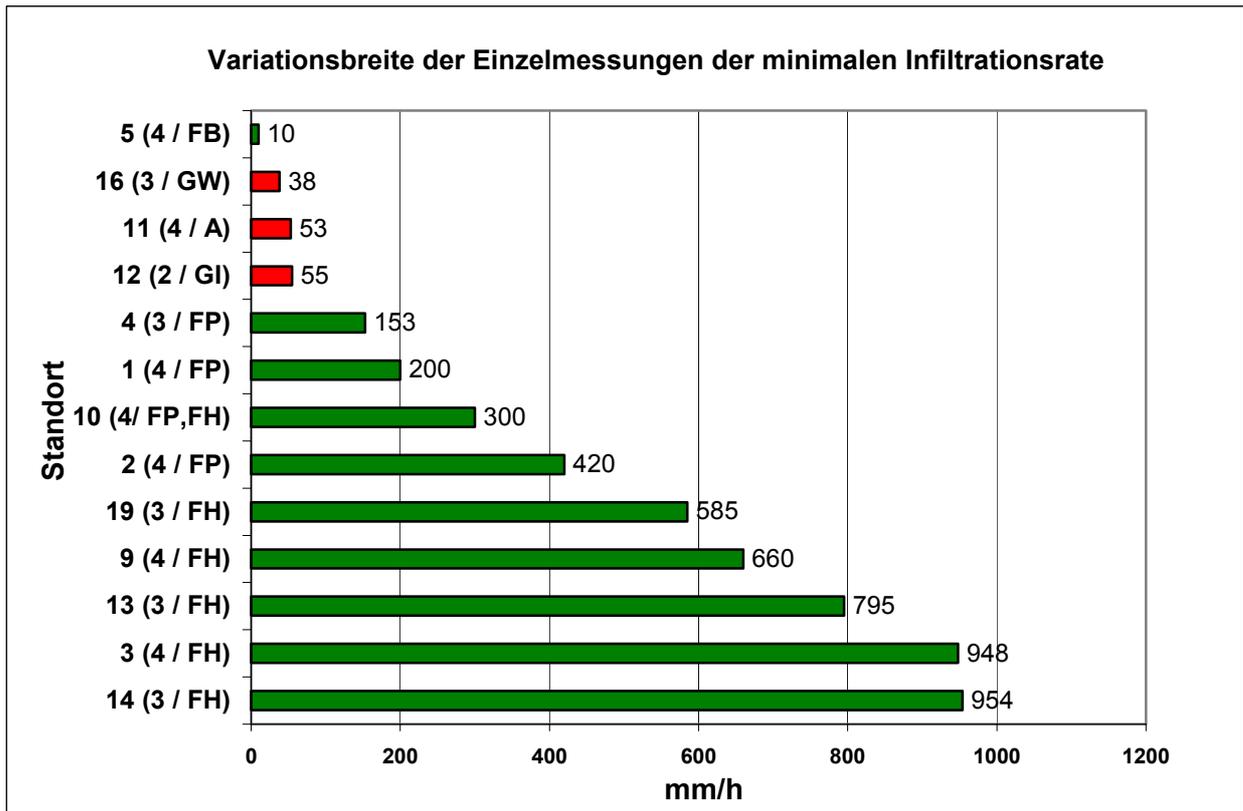
Eine Betrachtung der Bodenfeuchteverhältnisse zu den Messterminen zeigt, dass die Wassersättigung der Standorte zwischen 33 und 87 Vol.% lag. Der Hochwald-Standort 9 weist mit 33 % Wassersättigung bei der Oktobermessung die geringste Vorfeuchte auf. Die höchsten Sättigungswerte weisen die Standorte 5 und 13 mit 87 bzw. 85 Vol.% auf. An Standort 15 kann wegen fehlender Stechzylinderentnahme leider kein Sättigungswert zu Messbeginn wiedergegeben werden.

#### 4.4.2 Streuung der gemessenen minimalen Infiltrationsraten

Zur besseren Beurteilung der vorliegenden Infiltrationswerte wird die Streuung der Einzelmessungen des jeweiligen Standortes betrachtet. Da auf Grund des geringen und uneinheitlichen Stichprobenumfangs eine Auswertung der Daten hinsichtlich der Varianz<sup>15</sup> nicht sinnvoll erscheint, wurde das einfache Maß der Variationsbreite (bzw. Spannweite) der Ergebnisse gewählt (vgl. Abb. 18). Die Variationsbreite misst die höchste Differenz zwischen den zugrundeliegenden Messwerten, indem der Minimalwert vom Maximalwert subtrahiert wird. Da sowohl an Standort 15 als auch an Standort 6 jeweils nur eine Infiltrationsmessung durchgeführt werden konnte, fehlen diese Standorte in der Abbildung 18.

---

<sup>15</sup>Die Varianz ist die mittlere quadratische Abweichung der einzelnen Datenwerte vom arithmetischen Mittelwert (BAHRENBURG et al. 1990: 51).



**Abb. 18:** Darstellung der Variationsbreite der minimalen Infiltrationsraten, sortiert nach der Größe der Werte (grüne Säulen: Forststandorte, rote Säulen: Landwirtschaftsstandorte)  
(Angabe in Klammern: Anzahl der zugrundeliegenden Messungen/Nutzungsart)

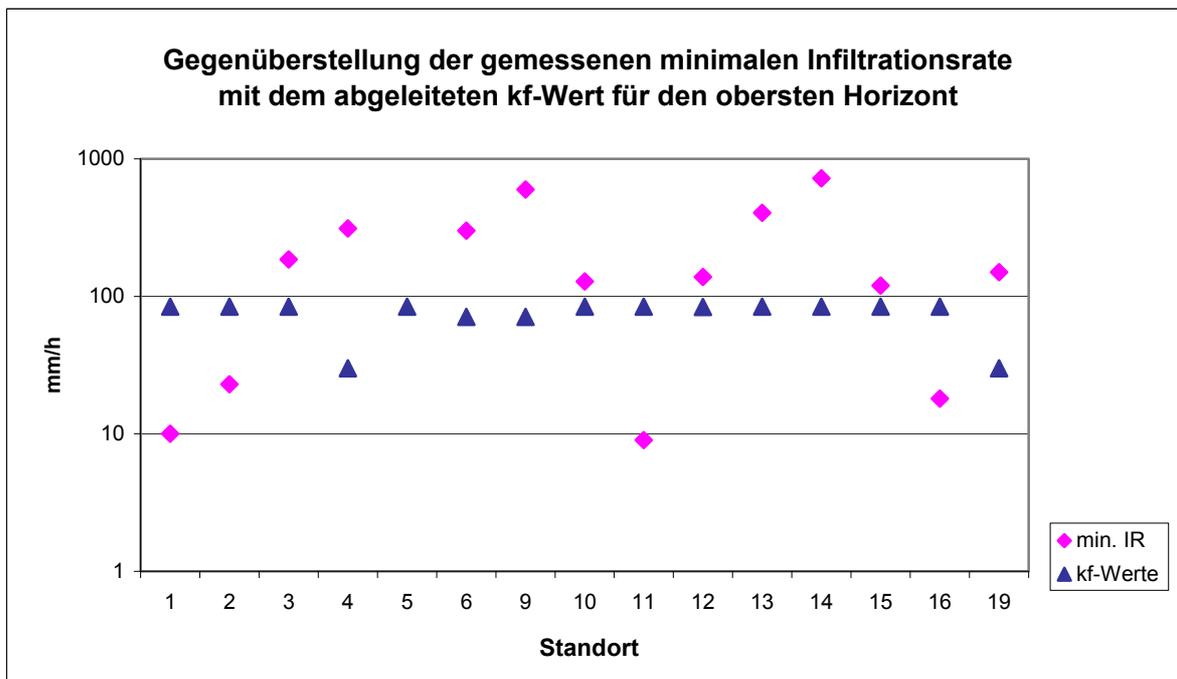
Die größte Variabilität der Ergebnisse weisen die Standorte 3, 9, 13, 14 und 19 auf. Die Spannweite der Ergebnisse variiert um Beträge von 558 bis 954 mm/h (Standort 14). Alle fünf Standorte mit der stärksten Variabilität sind Hochwaldstandorte und besitzen hohe Werte der minimalen Infiltrationsrate von mindestens 150 mm/h (vgl. Tab. 10). Ebenfalls hohe Streuungswerte von 135 bis 420 mm/h weisen die Aufforstungsstandorte 1, 2, 4 und 10 auf. Standort 10 ist ein Mischwald, der neben jungen Bäumen auch mit Altbestand durchsetzt ist. Die geringsten Streuungswerte (10–55 mm/h) treten bei den Wiesenstandorten 12 und 16, der Ackerfläche 11 und der Kahlschlagfläche 5 auf.

Damit sind alle baumbestandenen Untersuchungsstandorte mit Werten der Variationsbreite von mindestens 153 mm/h vertreten, wobei die Hochwaldstandorte die größte Streuung aufweisen.

#### 4.4.3 Gegenüberstellung von minimaler Infiltrationsrate und kf-Wert

Um Abweichungen zwischen den abgeleiteten kf-Werten und den Geländedaten der minimalen Infiltrationsrate zu verdeutlichen, findet in diesem Kapitel eine Gegenüberstellung dieser Datensätze statt. Ein Vergleich der gesättigten Wasserleitfähigkeitsgrößen der Oberbodenhorizonte mit den Werten für die wassergesättigte Infiltra-

tionsrate ist sinnvoll, da letztere laut SCHAMS (1967) als Maß für die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens angesehen werden. Die BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE FORSTLICHES UMWELTMONITORING (2003: 9) stellt fest, dass die Infiltrationsmessung eine geeignete Methode ist, die gesättigte Wasserleitfähigkeit im Gelände zu ermitteln. Die standortbezogenen Ergebnisse der Datensätze für die minimale Infiltrationsrate und die abgeleiteten kf-Werte für die gesättigte Wasserleitfähigkeit werden in Abbildung 19 dargestellt.



**Abb. 19:** Logarithmische Darstellung der minimalen Infiltrationsraten (min. IR) im Vergleich zu den aus Lagerungsdichte und Bodenart abgeleiteten kf-Werten

Die Feldmessungen haben minimale Infiltrationsraten ergeben, die zwischen 0 und 723 mm/h liegen, wobei  $\frac{2}{3}$  aller Werte über 100 mm/h liegen. Infolge dessen übertreffen die Infiltrationsraten nahezu aller Standorte – mit Ausnahme von Standort 1, 2, 5, 11 und 16 – die abgeleiteten kf-Werte. Die maximale Abweichung liegt mit 84 mm/h unter dem kf-Wert (Standort 5) (vgl. Tab. 11). Die positiven Abweichungen der gemessenen Werte gegenüber den abgeleiteten Werten sind deutlich. So weist der Verjüngungsstandort 4 sogar Messwerte auf die mehr als eine Zehnerpotenz über dem substratspezifischen kf-Wert liegen (312 mm/h ggü. 30 mm/h). Alle weiteren Forstandorte liegen ebenfalls mit Abweichungen zwischen 102 und 639 mm/h über dem abgeleiteten kf-Wert.

Standort	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	19
Nutzung (AG Bod.)	FP	FP	FH	FP	FH	FP	FH	FP/FH	A	GI	FH	FH	GW	GW	FH
min. IR (mm/h)	10	23	186	312	0	300	600	128	9	138	405	723	120	18	150
kf-Wert (mm/h)	84	84	84	30	84	71	71	84	84	84	84	84	84	84	30
Differenz (mm/h)	74	61	102	282	84	229	529	44	75	54	321	639	36	66	120

**Tab. 11:** Differenzen zwischen der gemessenen minimalen Infiltrationsrate und dem aus Körnung und Lagerungsdichte abgeleiteten kf-Wert

Wie Tabelle 11 zeigt, findet die beste Übereinstimmung der Werte mit einer Abweichung von 36 mm/h an Standort 15 und mit 44 mm/h Abweichung an Standort 10 statt. Ebenfalls bessere Übereinstimmungen finden sich bei den Wiesenstandorten 12 und 16, die Abweichungen zwischen 54 und 66 mm/h zeigen. Die Infiltrationsrate am Ackerstandort 11 weicht mit 75 mm/h nach unten ab.

Der Vergleich der minimalen Infiltrationsrate mit den kf-Werten zeigt, dass die Übereinstimmung der beiden Datensätze für die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Oberbodens sehr gering ist.

#### 4.4.4 Zusammenfassende Betrachtung

Als Abschluss dieses Kapitels sollen die zentralen Ergebnisse festgehalten werden:

- Die Messergebnisse der minimalen Infiltrationsrate fallen bei  $\frac{2}{3}$  aller Standorte sehr hoch aus.
- Es lassen sich im Mittel geringere Infiltrationsraten bei den landwirtschaftlich genutzten Standorten gegenüber den Forststandorten feststellen.
- Es ist eine starke Streuung der Ergebnisse sowohl zwischen den verschiedenen Untersuchungsstandorten als auch zwischen den Einzelmessungen an einem Untersuchungsstandort feststellbar.
- Dabei weisen die Standorte mit Hochwaldbewuchs die größte Variationsbreite der Einzelmessungen (bis 954 mm/h) auf, wohingegen die Kahlschlagfläche bzw. die landwirtschaftlich genutzten Standorte die geringsten Streuungswerte (bis 55 mm/h) wiedergeben.
- Der Vergleich zwischen den Daten der minimalen Infiltrationsrate mit den kf-Werten ergibt bei den meisten Standorten eine positive Abweichung der Infiltrationswerte.
- Die geringsten Abweichungen weisen der landwirtschaftlich genutzte Standort 15 und der Mischwaldstandort 10 auf.
- Insgesamt ist die Übereinstimmung der kf-Werte mit den Messwerten der Infiltrationsraten sehr gering.

## 5 DISKUSSION

In diesem Kapitel erfolgt eine kritische Bewertung der erzielten Ergebnisse vor dem Hintergrund der Fragestellung und Zielsetzung dieser Arbeit. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den nutzungsspezifischen Wasserleitfähigkeitseigenschaften der Böden zu, da sie die bestimmenden Einflussgrößen für den Oberflächenabfluss darstellen.

Zunächst werden die gewonnenen Laborwerte in Kapitel 5.1 auf ihre Plausibilität geprüft, da sie die Grundlage zur Ableitung der Bodenwasserhaushaltsgrößen (Porengrößenverteilung und gesättigte Wasserleitfähigkeit) bilden. In Kapitel 5.2 wird die abgeleitete Porengrößenverteilung auf ihre Qualität und ihre Aussagekraft hinsichtlich der Erklärung der Infiltrationsmesswerte geprüft. In Kapitel 5.3 erfolgt die Diskussion der gemessenen Infiltrationsraten. Es wird zum einen auf die Bedeutung der Landnutzung hinsichtlich der Infiltrationseigenschaften der Böden eingegangen, zum anderen wird der Zusammenhang zwischen den bodenphysikalischen Parametern und der Infiltrationsrate geprüft. In Kapitel 5.4 wird die Bedeutung dieser Ergebnisse für die Oberflächenabflussbildung im Sinne HORTONS diskutiert. Die auf Grundlage der Messungen erzielten Infiltrationsergebnisse werden schließlich in Kapitel 5.5 mit den von der Fa. HYDROTEC (2003: 3-71) für das NASIM-Modell empfohlenen Daten verglichen, um Empfehlungen zur Dateneingabe abzuleiten.

### 5.1 Bewertung der bodenphysikalischen Laborwerte

Die bodenphysikalischen Kennwerte der Laboranalysen zeigen, dass

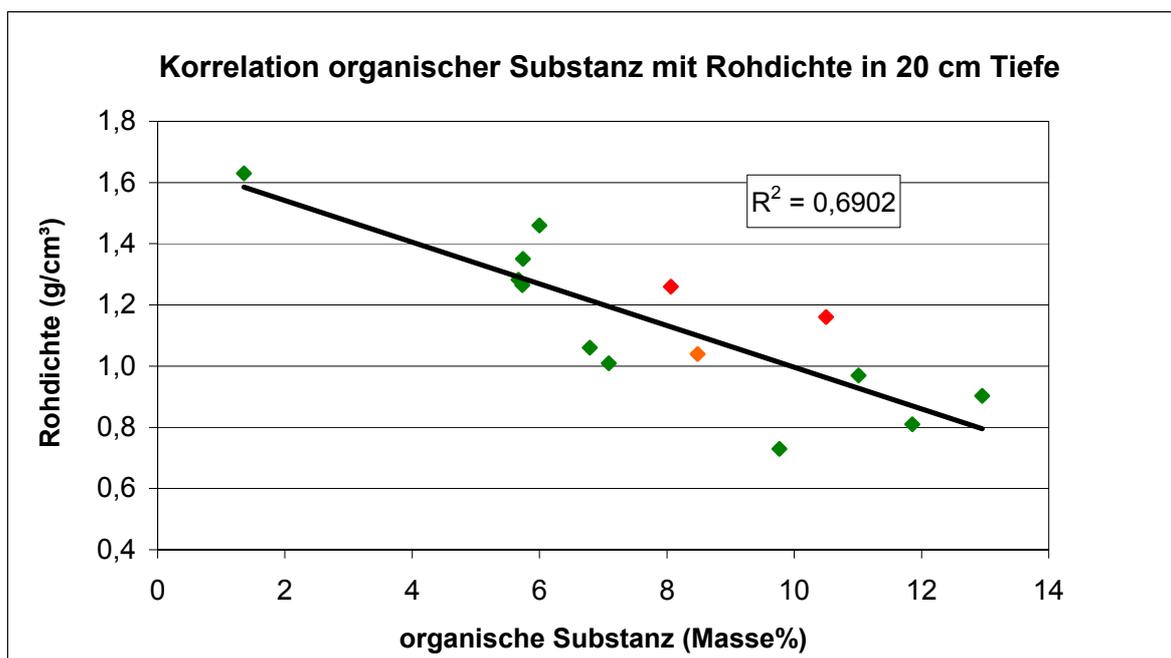
- 84,2 % aller untersuchten Bodenhorizonte sehr geringe bis geringe Trockenrohdichten aufweisen,
- bei 82,5 % aller Horizonte der Gehalt an organischer Substanz die Klassifikation der Böden als stark bis äußerst humos bedingt und
- die Porenvolumina aller Untersuchungshorizonte mit einem Mittelwert von 56,8 % sehr hohe Werte aufweisen.

Beim Vergleich der ermittelten Rohdichtewerte (Mittelwert:  $1,0 \text{ g/cm}^3$ ) (vgl. Tab. 3 und 4) mit Werten aus der bodenkundlichen Literatur wird deutlich, dass sich diese im unteren Spektrum der üblichen Werte von  $1,0 - 2,0 \text{ g/cm}^3$  (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 164) bewegen. Diese Werte gelten jedoch nur für Mineralböden mit einem C-Gehalt<sup>16</sup> von 2 %. Begründet ist dies durch die Abhängigkeit der Rohdichte vom Organikgehalt (ebd.).

---

<sup>16</sup>Ein C-Gehalt von 2 % entspricht bei Annahme eines mittleren C-Gehalts der organischen Substanz von 58 % einem Humusgehalt von 3,4 % (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 75).

So führen höhere Anteile an organischer Substanz auf Grund ihrer begünstigenden Wirkung auf die Bildung eines stabilen Aggregatgefüges tendenziell zu geringeren Trockenrohdichten. Der Anteil organischer Substanz liegt bei 82,5 % aller untersuchten Horizonte bei mindestens 4 %, so dass die unterdurchschnittlichen Werte für die Rohdichte der Böden erklärt werden können. Wie KIRCHMANN & GERZABEK (1999: 494) bei Studien herausfanden, ist mit einer Zunahme an organischer Substanz auch eine deutliche Zunahme der Porosität festzustellen. So bewirkt eine Steigerung der C-Konzentration des Bodens von 1 auf 2 % (ca. 1,7 bzw. 3,4 % organische Substanz) eine Zunahme des Porenvolumens von 52 auf 56%. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) konkretisieren diese Aussage, indem sie das steigende Porenvolumen insbesondere auf eine Erhöhung des Anteils an Mittel- und Feinporen zurückführen. Dieser Zusammenhang erklärt die überdurchschnittlich hohen Laborwerte des Porenvolumens (vgl. Kap. 4.2.2). Die Beziehung zwischen stark humosen Horizonten und geringen Rohdichten wird in der Korrelation der beiden Parameter deutlich. So weist die Trockenrohdichte der Horizonte in 20 cm Tiefe eine Abhängigkeit vom Organikgehalt auf. Der Korrelationskoeffizient in Abbildung 20 weist einen Wert von 0,69 auf.



**Abb. 20:** Zusammenhang zwischen organischer Substanz und Trockenrohdichte

Es ist eine eindeutige Abhängigkeit der Rohdichte vom Anteil an organischer Substanz zu erkennen. Die roten Serienwerte stellen die landwirtschaftlich genutzten Standorte dar<sup>17</sup>. Die beiden roten Werte oberhalb der Trendlinie von links nach rechts entsprechen dem

<sup>17</sup>Der Wert für Standort 15 fehlt, da dort keine Stechzylinder entnommen wurden.

Wechselwirtschaftsstandort 16 sowie dem rezent genutzten Ackerstandort 11. Der unterhalb der Trendlinie befindliche Wert steht für den ehemaligen Ackerstandort 12, der heute als Gartengrundstück dient. Dies kann als Hinweis auf eine nutzungsbedingte Beeinflussung der Rohdichtewerte gesehen werden. Die hohe Rohdichte an Standort 6 mit  $1,5 \text{ g/cm}^3$  und nur 6 % organischer Substanz kann durch den hohen Skelettgehalt von 63,6 % verursacht sein, der den Wert für die Rohdichte erhöht, und so die Lage über der Trendlinie bedingt.

Als Gütemerkmal für eine korrekte Bestimmung der Rohdichte kann das relative Werteverhältnis innerhalb der vertikalen Profilverläufe dienen. So nimmt bei allen Standorten, mit Ausnahme von Standort 10 und 16 (vgl. Kap. 4.2.2 bzw. 4.2.3) die Rohdichte erwartungsgemäß mit der Tiefe zu. Zusätzlich erscheint das relative Werteverhältnis zwischen den Standorten verschiedener Nutzung zueinander plausibel. So werden Effekte der Landnutzung bzw. der Bewirtschaftungsform erkennbar. Wie die Abbildung 14 in Kapitel 4.2.4 deutlich macht, weisen drei der vier Standorte mit den höchsten Trockenrohddichten ( $1,2$ - $1,4 \text{ g/cm}^3$ ) eine Bearbeitung mit schwerem landwirtschaftlichem Gerät auf, wodurch es zu einer Verdichtung kommt. Der vierte Standort besitzt einen Kolluvialhorizont, der durch die Umlagerung verdichtet ist. Die Standorte mit mittleren Rohddichten ( $1,1$  -  $0,9 \text{ g/cm}^3$ ) weisen eine mäßige bis intensive forstliche Nutzung mit lichtem Baumbestand auf. Im Gegensatz dazu sind Standorte sehr geringer Dichtewerte ( $< 0,7 \text{ g/cm}^3$ ) durch eine geringe bzw. nicht vorhandene Bewirtschaftungsintensität gekennzeichnet. Es handelt sich um geschlossene Hochwaldstandorte bzw. Standorte mit einer dichten Kraut- und Strauchschicht.

Diese Ergebnisse belegen den Einfluss der Landnutzung bzw. der Bewirtschaftungsform (Befahrung, Bestandesdichte und Bestandesalter der Vegetation) auf die Ausprägung der Lagerungsdichte (vgl. Kap. 1.3.1).

Trotz der Plausibilität der Lagerungsdichtewerte vor dem Hintergrund des Organikgehaltes und der Bewirtschaftungsform kann eine systematische Unterschätzung dieser Werte nicht ausgeschlossen werden. SCHERZER (2000, 2002) stellte an Hand eines Vergleichs von zwei Studien unterschiedlicher Methodik zur Bestimmung der Lagerungsdichte fest, dass die Stechzylinderbeprobung geringere Werte der Lagerungsdichte ergab als das Verfahren der sogenannten PU-Schaum-Methode nach DEUTSCHMANN et al. (1994). Durchgeführt wurden diese beiden Studien im Auftrag des LANDESFORSTPRÄSIDIUMS SACHSEN an zwei Bodenprofilen einer Wald-Beobachtungsstation (Level II-Station) im Forst Olbernhau, nördlich der Einzugsgebiets-Grenze der Natzschung. Als Begründung für die geringeren Lagerungsdichtewerte der Stechzylinderbeprobung wird der hohe Skelettgehalt angeführt, der in den Stechzylinderproben unterrepräsentiert ist und somit geringere Werte bedingt. Zusätzliche Gründe sind nicht auszuschließen, konnten aber nicht eindeutig identifiziert werden (ebd. 2002: 25). Da der Grobbodenanteil an den Untersuchungsstandorten dieser

Arbeit überwiegend in die Klasse mittleren bis starken Skelettgehalts fällt und damit vergleichbar mit den zwei Standorten der SCHERZER-Studie ist, erscheint eine Unterschätzung der eigenen Werte nicht unrealistisch.

## 5.2 Bewertung der Daten zur Porengrößenverteilung

Nach der erfolgten Diskussion der Primärdaten, findet in diesem Kapitel eine Auseinandersetzung mit den über Pedotransfer-Funktionen gewonnenen Daten zur Porengrößenverteilung statt, mit deren Hilfe das Bodenwasser in Sickerwasser und Haftwasser unterteilt werden kann. Von besonderer Bedeutung für die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist der Anteil der schnell dränenden Grobporen (LK). Die Betrachtung dieser Daten erfolgt nutzungsbezogen auf der Grundlage der mittleren Volumenprozentwerte der Horizonte. Die Prozentwertbetrachtung wird vorgezogen, da bei Nutzung der mm-Werte die unterschiedlichen Tiefen der Bodenhorizonte bzw. -profile eingehen würden, und so keine Vergleichbarkeit der Standorte gegeben wäre.

Zur Sichtung der Einzelwerte jedes Untersuchungsstandortes sei auf die Standortblätter im Anhang verwiesen.

Um die Plausibilität der nach RENGER (1971) abgeleiteten Porengrößenanteile und deren Aussagekraft für die Infiltrationsrate bei Wassersättigung zu diskutieren, müssen die zentralen Ergebnisse aus Kapitel 4.3.3 aufgegriffen werden:

- Die forstwirtschaftlich genutzten Standorte weisen im Vergleich zu den Landwirtschaftsstandorten ein um 5,5 % größeres Porenvolumen im Bereich der Feinporen, Mittelporen und engen Grobporen (FK) auf.
- Die landwirtschaftlich genutzten Standorte weisen gegenüber den forstwirtschaftlichen Standorten ein um 2,4 % größeres Volumen bei den weiten Grobporen (schnell bewegliches Sickerwasser) auf.

Diese nutzungsspezifischen Ergebnisse überraschen insofern, als dass bei forstlicher Nutzung in der Regel von einem vergleichsweise höheren Anteil an Grobporen ausgegangen wird (SEEGERT et al. 2003: 419). Vor dem Hintergrund der Ableitungssystematik der Pedotransfer-Funktionen nach RENGER (1971) lassen sich die Ergebnisse folgendermaßen erklären:

Bei der zunächst auf Körnung und Lagerungsdichte basierenden Ableitung der Porengrößenanteile werden in einem zweiten Schritt, Ab- und Zuschläge bei den einzelnen Porengrößenklassen in Abhängigkeit vom Organik- bzw. Tonanteil des Bodens vorge-

nommen (RENGER 1971). Bei diesem Vorgehen ergeben hohe Anteile organischer Substanz Zuschläge im Bereich der Fein-, Mittel- und engen Grobporen (FK). Auch hohe Tonanteile wirken sich in Zuschlägen bei den Feinporen und Abschlägen im Grobporenbereich (LK) aus (ebd.). Diesen kausalen Zusammenhang beschreiben auch SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002: 166). Auf Grund des größeren Anteils toniger Horizonte bei den Forststandorten sowie einem deutlich größeren Organikgehalt dieser Standorte, führt die Porengrößenableitung mit Hilfe der Pedotransfer-Funktionen bei diesen Standorten zu einem größeren Volumenanteil an Poren kleineren Durchmessers (FK).

Pedogenetische Effekte auf die Porengrößenverteilung im Boden können von den RENGER-Werten nicht wiedergegeben werden, so dass insbesondere der Anteil der Grobporen, der auch die Sekundärporen beinhaltet, nicht verlässlich erscheint. Dies liegt daran, dass die Beziehung zwischen Grobporen und Körnung nicht sehr eng ist, da der Sekundärporenanteil kaum körnungsbedingt abzuleiten ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 166). Für die Ausbildung eines Sekundärporensystems (Grobporen) ist vielmehr der Gefügebau des Bodens entscheidend. Da dieser pedogenetisch bedingt ist, und keine Berücksichtigung bei der Ableitung findet, scheint das anteilige Grobporenvolumen nicht ausreichend genau zu sein.

Unschärfen bei der Porengrößenableitung entstehen auch durch Verdichtungseffekte des Bodens. Eine Bodenverdichtung äußert sich in einer Verkleinerung des Porendurchschnitts, die sich insbesondere in einer Verringerung der groben Poren wieder spiegelt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 425ff). Da diese Effekte bei RENGER (1971) erst in einer Überschreitung des Grenzwertes von einer zur nächsten Lagerungsdichteklasse wiedergegeben werden, scheint auch hier eine Ungenauigkeit vorzuliegen. Bei einem Vergleich der nutzungsbedingten Lagerungsdichtewerte der obersten Bodenhorizonte mit den abgeleiteten Werten der LK (weite Grobporen) fällt auf, dass die unterschiedliche Lagerungsdichte sich nicht im Grobporenvolumen widerspiegelt (vgl. Tab. 5 und 7). Eine kritische Beurteilung der Ableitung der Porengrößenverteilung für Waldböden findet in einem Methodenleitfaden der BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE FORSTLICHES UMWELTMONITORING (2003) statt. So zeigen vergleichende Untersuchungen von TEEPE et al. (2000), dass die Werte für die Porengrößenverteilung gemessener Bodenwasserretentionsfunktionen gegenüber denen nach AG BODEN (1994) abgeleiteten Werten Abweichungen aufweisen. Festgestellt wurde bei den abgeleiteten Werten eine Unterschätzung der Luftkapazität (Grobporen) sowie der nutzbaren Wasserspeicherkapazität (Mittelporen) (BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE 2003: 14). Dies gilt

insbesondere für geringe Lagerungsdichten (ebd.), wie sie auch im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit festgestellt wurden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die abgeleitete Porengrößenverteilung nach RENGER (1971) für Waldböden nur bedingt verlässliche Werte bietet. Somit können die gewonnenen Porengrößenanteile keine Erklärung für die höheren Sättigungs-Infiltrationsraten bei den Forststandorten bieten. Die fehlende Berücksichtigung von Sekundärporen scheint ein wesentlicher Grund hierfür zu sein.

Eine standortbezogene Bewertung der Porengrößenanteile vor dem Hintergrund der minimalen Infiltrationsraten erfolgt in den Kapiteln 5.3.4 und 5.3.5.

### **5.3 Bewertung der gemessenen Infiltrationsraten**

In diesem Kapitel wird eingangs die Infiltrationsmessung auf Fehlerquellen hin betrachtet. Anschließend erfolgt in Kapitel 5.3.2 eine Diskussion der Infiltrationswerte vor dem Hintergrund des Porensystems. In Kapitel 5.3.3 erfolgt eine Einteilung der Untersuchungsflächen in Standorte mit und ohne Makroporensystem. Eine einzelne Betrachtung der Standorte landwirtschaftlicher Nutzung wird in Kapitel 5.3.4 vorgenommen. Dabei wird die Wirkung der Nutzung auf die Infiltrationsrate geprüft. Dasselbe erfolgt in Kapitel 5.3.5 für die forstwirtschaftlichen Standorte. In den abschließenden Kapiteln werden die Diskussionsergebnisse zusammengefasst, indem die Bedeutung von Lagerungsdichte und Porenvolumen für die Infiltrationsrate (Kap. 5.3.6) bzw. die Bedeutung der  $k_f$ -Werte für die Infiltrationsrate (Kap. 5.3.7) aufgezeigt werden.

#### **5.3.1 Fehlerbetrachtung**

Eine mögliche Fehlerquelle bei der Ermittlung der minimalen Infiltrationswerte kann die unvollständige Wassersättigung des Bodens zu Ende der Messung sein. Dies würde bedeuten, dass anstatt der gesättigten Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) die ungesättigte Durchlässigkeit ( $k_u$ -Wert) gemessen wurde. Diese Fehlerquelle wurde jedoch durch folgende Aspekte minimiert:

- Bei der Messung wurde darauf geachtet, dass die Infiltrationsrate zu Messende einen nahezu konstanten Verlauf aufwies.
- Die Böden zeigten größtenteils hohe Vorfeuchten mit einer mittleren Sättigung von 71,4 Vol.%. Da fast alle Messungen im Frühjahr und Sommer durchgeführt wurden, waren die Böden durch die regionalen Witterungsbedingungen meist gut durchfeuchtet.
- Die Geländeaufenthalte fanden häufig nach bzw. während regenreicher Witterungsperioden statt.

Als methodische Fehlerquelle bei der Infiltrationsmessung ist die Wirkung des hydraulischen Drucks der Wassersäule im Innenring zu nennen, welche die Eindringgeschwindigkeit des Wassers gegenüber natürlichen Niederschlägen erhöht (SCHAMS 1976: 81f, WAHL et al. 2002). Eine systematische Überschätzung der tatsächlichen Infiltrationsrate ist nicht auszuschließen (vgl. Kap. 3.1.4). Auf Grund der Mittelwertbildung aus den beiden geringsten Infiltrationsmesswerten zur Gewinnung eines Repräsentativwertes wurde versucht die methodisch bedingte Überhöhung der Messwerte zu reduzieren.

### 5.3.2 Bewertung der Infiltrationsraten hinsichtlich des Porensystems

In diesem Kapitel erfolgt die Diskussion der ermittelten Infiltrationswerte hinsichtlich ihrer Aussage für das Porensystem der Untersuchungsstandorte. Als Beurteilungsgrundlage dient ein Vergleich der minimalen Infiltrationsrate mit den kf-Werten (vgl. Kap. 4.4.3).

Die von HYDROTEC (2003: 3-70) angenommenen kf-Werte für die Bodenarten des Untersuchungsgebietes erreichen Maximalwerte von 125 mm/h. Bodenkundliche Lehrbücher geben in Abhängigkeit von Bodenart und Lagerungsdichte mittlere Wasserdurchlässigkeiten für Sand-, Lehm- und Schluffböden an, die sich zwischen den kf-Stufen 3 und 5 (mittlere bis hohe Durchlässigkeit) bewegen (KUNTZE et al. 1994:178). Diese Permeabilitätsklassen für wassergesättigte Böden entsprechen einer Wasserbewegung mit einer Geschwindigkeit von 4-125 mm/h (ebd.) und entsprechen somit der Größenordnung, die von HYDROTEC angenommen wird. Bei diesen Angaben handelt es sich um Durchlässigkeitswerte für Böden ohne ein Sekundärporensystem.

SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002: 221) hingegen geben für die gleichen Bodenarten kf-Werte an, die das Sekundärporensystem von Böden berücksichtigen und damit einen präferenziellen Fluss (Makroporenfluss) des Wassers annehmen. Die entsprechenden kf-Werte können bei Sand-, Lehm- und Schluffböden Maximalwerte von 12.500 mm/h erreichen.

Auf Grundlage dieser Unterscheidung kann die Gegenüberstellung der abgeleiteten kf-Werte mit den gesättigten Infiltrationsraten in Abbildung 19 (vgl. Kap. 4.4.3) erklärt werden. Sie zeigt, dass nur sehr geringe Übereinstimmungen der Infiltrationsmesswerte mit den mittleren kf-Werten nach HYDROTEC auftreten. So liegen an neun Standorten die gemessenen minimalen Infiltrationsraten über den kf-Werten für sekundärporenfreie Böden. Folgerichtig muss bei diesen neun Standorten angenommen werden, dass ein Sekundärporensystem ausgeprägt ist, das die hohen Infiltrationswerte bedingt. Hohe Überschreitungen des kf-Wertes treten bei sieben Forststandorten auf. Sie weisen

Differenzen von mindestens 102 mm/h auf, die an Standort 4 sogar eine Zehnerpotenz erreicht.

Zur Erklärung dieser Ergebnisse dienen die theoretischen Grundlagen der Mikro- und Makroporeninfiltration. Wie in Kapitel 1.3.1 ausgeführt wurde, sind grundsätzlich zwei Infiltrationsvorgänge denkbar. Zum einen die langsame Mikroporeninfiltration, die auf dem Korngrößenbedingten Primärporensystem beruht und zumeist eine recht gleichmäßige gesättigte Wasserleitfähigkeit ergibt. Diese ist durch die substratspezifische Verteilung von Fein-, Mittel- und Grobporen bestimmt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 220). Zum anderen existiert die schnelle Makroporeninfiltration, die in den Poren  $> 50 \mu\text{m}$  stattfindet und bis zu 400mal schneller erfolgen kann (GERMANN 1981, BRONSTERT 1994). Der Infiltrationsvorgang in den Sekundärporen setzt ein, sobald sich eine stauende Wasserschicht auf der Bodenoberfläche ausgebildet hat (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Da durch die Versuchsanordnung bei der Doppelring-Infiltrationsmessung exakt diese Überstauung stattfindet, kann davon ausgegangen werden, dass ein vorhandenes Makroporensystem sofort aktiviert wird. Für die Untersuchungsstandorte bedeutet dies, dass sie anhand der gemessenen Infiltrationsraten unterteilt werden können. Zum einen können Standorte mit Mikroporeninfiltration (matrixbedingte Infiltration), und zum anderen Standorte mit einer geschwindigkeitswirksamen Makroporeninfiltration ausgewiesen werden. Als Kriterium zur Einteilung der Untersuchungsstandorte dient der Vergleich der gemessenen minimalen Infiltrationsraten mit den  $k_f$ -Werten des Oberbodens nach HYDROTEC (2003). Dieses Vorgehen erscheint geeignet, da die  $k_f$ -Werte weitgehend auf der Bodenart und damit der Korngrößenbedingten Ausbildung der Primärporen beruhen. Zusätzlich wird bei der Ableitung der  $k_f$ -Werte die spezifische Lagerungsdichte des Bodens berücksichtigt. Somit können die  $k_f$ -Werte als Infiltrationsgeschwindigkeit für eine Matrixinfiltration (ohne Sekundärporen) betrachtet werden und die höheren gemessenen Infiltrationsraten als Hinweis auf eine makroporenbeflussende Infiltration gelten.

Es wurde überprüft, ob der Skelettgehalt der Standorte eine Begründung für die hohen Infiltrationsraten liefern kann. Eine Vergleichsbetrachtung der Skelettanteile mit den Infiltrationsraten blieb aber ohne klärendes Ergebnis, da exakt die Standorte mit den größten Infiltrationsraten eher einen unterdurchschnittlichen Anteil an Grobbodenmaterial (ca. 20 Masse %) aufwiesen. Die Annahme, dass der Grobboden als Wasserleitbahn für das infiltrierende Wasser fungiert hat, kann also nicht bestätigt werden.

### 5.3.3 Standorteinteilung hinsichtlich des Infiltrationsmechanismus

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, kann eine Einteilung der Untersuchungsstandorte durch den Vergleich der minimalen Infiltrationsrate mit dem kf-Wert des obersten Horizontes erfolgen. Bei dieser Einteilung wird die von HYDROTEC angenommene Spannweite der wassergesättigten Durchlässigkeit des Horizontes betrachtet.

Standort	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14	15	16	19
min. IR	10	23	186	312	0	300	600	128	9	138	405	723	120	18	150
kf-Wert-klasse	125 - 42	125 - 42	125 - 42	42 - 17	125 - 42	125 - 17	125 - 17	125 - 42	125 - 42	125 - 42	125 - 42	125 - 42	125 - 42	125 - 42	42 - 17

**Tab. 12:** Gegenüberstellung von minimaler Infiltrationsrate (min. IR) in mm/h und substratspezifischer kf-Wertklasse nach HYDROTEC (2003)

Durch dieses Vorgehen lassen sich drei Gruppen unterscheiden:

- Standorte, bei denen die minimale Infiltrationsrate unter der kf-Wertklasse liegt. Dazu gehören die Standorte 1, 2, 5, 11 und 16.
- Standorte, bei denen die minimale Infiltrationsrate innerhalb der kf-Wertklasse liegt. Dazu zählt nur Standort 15.
- Standorte, die eine minimale Infiltrationsrate aufweisen, die über der substratspezifischen kf-Klasse liegt. Dazu zählen die Standorte 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13, 14 und 19.

Bei den Standorten der ersten und zweiten Gruppe ist auf Grund des Infiltrationswertes zunächst nicht von einem makroporenbestimmten Bodengefüge auszugehen. Bei den Standorten der Gruppe 3, die überwiegend aus Forststandorten besteht, kann die Ausprägung eines Makroporensystems angenommen werden. Standort 5, bei dem eine minimale Infiltrationsrate von Null erreicht wurde, stellt einen Sonderfall dar, der in Kapitel 5.3.5 diskutiert wird.

Die Streuungswerte der Infiltrationsraten (vgl. Abb. 18 in Kap. 4.4.2) werden herangezogen, um die Einteilung in Standorte mit und ohne Makroporensystem zu unterstützen. Der Grundgedanke dabei ist, dass bei fehlenden Makroporen von einer geringeren Streuung der Messergebnisse ausgegangen werden kann als bei einem Standort mit Makroporen. Dies ist darin begründet, dass die Differenz zwischen den verschiedenen Messwerten nicht so groß sein kann, sofern eine matrixbestimmte Infiltrationsrate vorliegt. Die Untersuchungsstandorte mit der geringsten Streuung bei den Einzelmessungen sind die Standorte 5, 11, 12 und 16. Damit können die Standorte 5, 11 und 16 unterstützt durch die oben vorgenommene Unterteilung als Standorte ohne Makroporensystem gelten.

Standort 12 wird im Folgekapitel, das sich intensiver mit den Einzelstandorten auseinandersetzt diskutiert.

Die Berücksichtigung der Streuungswerte für die Beurteilung des dominanten Porensystems lässt auch die Klassifikation der Standorte 1 und 2 hinterfragen. Bei der Aufforstungsfläche 1 beträgt der Streuungswert 200 mm/h. Auf Grund dieser Variabilität der Messwerte muss trotz überwiegend geringer Infiltrationswerte ein Bodengefüge mit stellenweise vorhandenen Makroporen angenommen werden. Standort 2 weist zwar geringe Infiltrationswerte auf, jedoch ist eine deutlich größere Variationsbreite der Messergebnisse (420 mm/h) festzustellen. Es wird für beide Standorte angenommen, dass punktuell ein Makroporensystem ausgebildet ist.

Die bisherige Diskussion, die einen Zusammenhang zwischen hohen Infiltrationsraten bzw. großen Variationsbreiten und Makroporen feststellt, wirft die Frage nach den Bedingungen auf, unter denen ein Makroporensystem vorhanden ist. In diesem Zusammenhang muss die Nutzungs- und Bewirtschaftungsart der einzelnen Untersuchungsstandorte betrachtet werden, indem die Aspekte der Vegetation, der Bestandesdichte und des -alters aufgegriffen werden (vgl. Kap. 5.1.1). Dies erfolgt im anschließenden Kapitel.

#### **5.3.4 Wirkungen der landwirtschaftlichen Nutzung auf die Infiltrationsrate**

Zwei der vier Standorte, bei denen die minimale Infiltrationsrate bis zu 75 mm/h unter dem Mittelwert der substratspezifischen kf-Klasse liegt, unterliegen landwirtschaftlicher Nutzung (vgl. Tab. 11, Kap. 4.4.3). Es handelt sich um den Ackerstandort 11 und den Wiesenstandort 16 mit Grünland-Wechselwirtschaftsnutzung. Bei der Acker- und Grünlandfläche mit einer minimalen Infiltrationsrate von 9 bzw. 18 mm/h, kann auf Grund der Bearbeitung mit schwerem landwirtschaftlichen Gerät (Hinweis durch Pflughorizont) eine Verdichtung des Bodens angenommen werden. Diese wirkt sich typischerweise auf die Verringerung des Grobporenanteils aus (HORN & HARTGE 2001). Selbst bei möglicherweise noch vorhandenem Grobporensystem kann eine Befahrung und Bearbeitung eine Unterbrechung der Poren bewirken. Dies wirkt sich vermindern auf die Infiltrationsfähigkeit des Bodens aus (HORN & HARTGE 2001, MORENO et al. 1974, BRONSTERT et al. 1993). Das Messergebnis widerlegt die abgeleiteten Werte für das Grobporenvolumen des Oberbodens von 17 Vol.%.

Für eine vergleichsweise verdichtete Bodenstruktur sprechen auch die effektiven Lagerungsdichten, die mit Werten von 1,3 und 1,4 die höchsten im Oberboden gemessenen Dichten darstellen. Ungünstig für das Entstehen eines ausgeprägten Makroporensystems wirkt sich die Grasvegetation bzw. der saisonale Ackerbewuchs mit vergleichsweise geringen Wurzeldurchmessern aus. Diese Vegetationsform bietet schlechtere

Ausgangsbedingungen für die Entwicklung von Makroporen im Sinne von Wurzelleitbahnen bzw. Bioporen (ZUIDEMA 1985). Ein tiefreichendes und verzweigtes Wurzelsystem mit größerem Wurzelradius hingegen begünstigt hohe Infiltrationswerte, da die Wurzeln als Leitbahnen für den Niederschlag dienen können.



**Abb. 21:** Standort Ackerfläche 11, Blick nach Osten  
Minimale Infiltrationsrate: 9 mm/h

Ungeklärt bleibt, warum die minimalen Infiltrationsraten der beiden Grünland-Standorte 15 und 16 sich um eine Rate von 102 mm/h unterscheiden. Standort 15 erreicht eine minimale Infiltrationsrate von 120 mm/h gegenüber Standort 16 mit 18 mm/h. Denkbare Gründe dafür sind, dass größere Gesamtporenvolumen des Standortes 15 (61 Vol.%)<sup>18</sup> gegenüber Standort 16 (50 Vol.%) bzw. der größere Anteil an weiten Grobporen (LK) an Standort 15 (17 Vol.% ggü. 13 Vol.%). Dagegen spricht, dass an diesen Standorten eine nutzungsbedingte Verschiebung der Porengrößenverteilung in Richtung geringerer Porendurchmesser anzunehmen ist. Es ist anzunehmen, dass beide Flächen, da sie dem gleichen Landwirt gehören, der gleichen Nutzungsform unterliegen. Dies würde für ähnlichere Infiltrationsraten sprechen, zumal beide Standorte die gleichen Bodenarten aufweisen. Der Grund für die Differenz der Messergebnisse kann darin begründet sein, dass Standort 16 eine stauwasserbeeinflusste Pseudogley-Braunerde in Toplage ist. Da zwei Messungen vergleichbarer Größenordnung (20 mm/h bzw. 15 mm/h) aus dem Monat Mai des Jahres 2004 und 2005 vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass die hydrologischen Bodenbedingungen zu beiden Terminen ähnlich waren. Im Mai 2004 als die Profilansprache stattfand war Stauwasser bis 50 cm unter GOK ausgebildet (vgl. Abb. 23). Auf Grund dieser Tatsache wird angenommen, dass der Bodenwasserspeicher des

<sup>18</sup>Das ist der abgeleitete Wert nach RENGER (1971), da kein Laborwert existiert (vgl. Standortblätter im Anhang).

Oberbodens bei beiden Messterminen nahezu komplett gefüllt war. Die geringe Infiltrationsrate kann durch die Stauwirkung im Untergrund bedingt sein, so dass weder eine Tiefenversickerung des Wassers noch ein lateraler Abfluss des Wassers (als Interflow) erfolgen konnte. Letzteres ist durch die fehlende Hangneigung bedingt. An Standort 15 wäre auf Grund der Hangneigung von  $6,5^\circ$  das schnelle Abfließen des Infiltrationswassers per Interflow denkbar. Nicht gänzlich auszuschließen ist die Möglichkeit, dass die einzige Messung an Standort 15 nicht repräsentativ war, da der Boden zu Messende nicht gesättigt war. Dagegen spricht jedoch die konstante Infiltrationsrate am Ende des Messvorgangs.



**Abb. 22:** Standort 15 mit Wiesenbewuchs, Blick nach Süden  
Minimale Infiltrationsrate: 120 mm/h, (Foto: A. SCHULTE)



**Abb. 23:** Standort 16 mit Wiesenvegetation, Blick nach Westen  
Stauwasser in 50 cm unter GOK (Mai 2004)  
Minimale Infiltrationsrate: 18 mm/h, (Foto: J. KROIS)

Eine Infiltrationsrate ähnlicher Größenordnung wie beim Wiesenstandort 15 weist Standort 12 mit 138 mm/h auf. Die Infiltrationsmessungen wurden im Gartengrundstück eines Privatgeländes durchgeführt, dessen Fläche bis vor 60 Jahren als Acker diente (vgl. Abb. 24). Folgerichtig stellt der Oberboden einen reliktschen Ap-Horizont, mit einer Lagerungsdichte von 1,2, dar. Die leicht geringere Lagerungsdichte von 0,1 im Vergleich zu den rezent landwirtschaftlich genutzten Flächen könnte man als Rückgang der Lagerungsdichte auf Grund der Nutzungsaufgabe als Acker interpretieren. Möglicherweise erklärt die Umnutzung der Fläche als privates Grundstück die um 18 mm/h höhere Infiltrationsrate gegenüber dem Wiesenstandort 15. So ist bei einem Privatgarten beispielsweise keine Neusaat des Rasens zu erwarten, so dass das Bodengefüge durch eine dauerhafte Bodenbedeckung geschützt ist. Das Porenvolumen des Oberbodens weist mit 58 Vol.% eine vergleichbare Höhe zu Standort 15 (61 Vol.%)<sup>19</sup> auf (vgl. Tab. 7 und Standortblätter im Anhang), und bietet daher keine Erklärung. Auch die Hangneigungen der beiden Standorte mit 7° bzw. 6,5° sind vergleichbar. Ebenso liegen die Werte für das Grobporenvolumen bei beiden Standorten vergleichbar hoch (16 bzw. 17 Vol.%). Nicht erklärt werden kann die Tatsache, dass an Standort 12 trotz höherer Wassersättigung des Bodens zum Messtermin im Mai 2005 die Infiltrationsrate 55 mm/h über derjenigen im Oktober 2004 lag (vgl. Tab. 10). Eindeutig ist aber, dass die Infiltrationsrate von 110 mm/h (Oktober 2004) unter dem Grenzwert der kf-Klasse von 125 mm/h liegt. Der zweite Messwert von 165 mm/h bei höherer Wassersättigung (83 Vol.%) erscheint damit zu hoch. Da die Abweichung von 40 mm/h zur Obergrenze der kf-Klasse nicht allzu hoch liegt, und die Streuung der Einzelmessungen gering ist, wird Standort 12 ein matrixbestimmtes Infiltrationsverhalten zugeschrieben.



**Abb. 24:** Standort 12 mit Grasvegetation, Blick nach Südwest  
Minimale Infiltrationsrate: 110 mm/h

<sup>19</sup>An dieser Stelle wird auf Grund mangelnder Laborwerte wieder das abgeleitete PV nach RENGER benutzt (vgl. Standortblätter im Anhang).

Es kann zusammengefasst werden, dass die landwirtschaftlich genutzten Standorte 11, 15 und 16 minimale Infiltrationsraten aufweisen, die Abweichungen zwischen (+) 36 und (-) 75 mm/h zum ermittelten kf-Mittelwert aus der NASIM-Dokumentation aufzeigen. Für diese Gruppe kann ausgesagt werden, dass kein Messergebnis die Spannbreite der angegebenen kf-Wertklasse der NASIM-Dokumentation (42-125 mm/h) überschreitet, einige Messergebnisse aber unter dem Minimalwert liegen. Auch Standort 12 wird trotz der Überschreitung von 125 mm/h an einem Messtermin der Standortgruppe mit dominierender Mikroporeninfiltration zugeordnet. Die Unterschreitungen der kf-Klasse von 42 mm/h kann in den entsprechenden Fällen mit einer maschinell bedingten Verdichtung der Oberböden bzw. mit der Ausbildung von Stauwasser im Unterboden zusammenhängen. Vom Vorhandensein eines geschwindigkeitswirksamen Makroporensystems kann an den untersuchten Standorten nicht ausgegangen werden. Hinsichtlich der Frage nach der Eignung der kf-Werte aus der NASIM-Dokumentation für die Parametrisierung des Modells lässt sich folgern, dass sie mit größeren Genauigkeitseinschränkungen für die Oberbodenhorizonte der landwirtschaftlichen Standorte genutzt werden können. Allerdings muss die ganze Spannbreite der substratbedingten kf-Wertklasse ausgenutzt werden. Teilweise müssen sogar geringere Werte angenommen werden.

### **5.3.5 Wirkungen der forstwirtschaftlichen Nutzung auf die Infiltrationsrate**

Auf Grund oben geführter Argumentation, die eine Verdichtung durch landwirtschaftliche Nutzung annimmt, sind an den Aufforstungsstandorten 1 und 2 höhere Infiltrationsraten zu erwarten. Die Infiltrationswerte (10 und 23 mm/h) bestätigen diese Annahme nicht. Erstaunlicherweise liegen sie an beiden Standorten noch unter den Infiltrationsraten der Wiesenstandorte 12 und 15. Zu erklären sind die Unterschreitungen der kf-Werte für beide Standorte dadurch, dass die Untersuchungsflächen, an denen die Infiltrationsmessungen durchgeführt wurden vegetationsbedingt denen eines Wiesenstandortes ähneln (vgl. Abb. 24 und 25). Sie befinden sich in beiden Fällen auch nicht in direkter Nähe des Altbestandes, so dass keine direkte Beeinflussung des Bodens durch verzweigte Wurzelsysteme der Bäume auftreten. Ein mit den Hochwald-Standorten vergleichbar ausgeprägtes Makroporensystem ist nicht anzunehmen. An Standort 1 ist von einer intensiveren forstlichen Nutzung, möglicherweise auch Befahrung mit forstwirtschaftlichen Geräten, auszugehen, da anthropogen angelegte Totholz-Ansammlungen zu erkennen waren. Standort 2 wies keine aktuellen Nutzungsspuren auf, es ist aber anzunehmen, dass die Fläche während der Aufforstungsmaßnahmen befahren wurde, was zur Verdichtung des Bodensubstrats geführt haben kann.



**Abb. 25:** Standort 1 mit Grasvegetation und lichtem Jungbaumbestand  
Minimale Infiltrationsrate: 10 mm/h



**Abb. 26:** Standort 2 mit Grasvegetation und lichtem (Jung-)Baumbestand  
Minimale Infiltrationsrate: 23 mm/h

Die Variabilität der Messergebnisse liegt bei Standort 1 mit 200 mm/h deutlich geringer als bei den Hochwald-Standorten. An Standort 2 liegt sowohl die minimale Infiltrationsrate, als auch die Streuung mit 420 mm/h höher. Der dichtere Pflanzenbewuchs an Standort 2 kann eine Begründung für dieses Ergebnis sein. Die Lagerungsdichten dieser beiden Standorte geben mit 1,0 für Standort 1 und 1,1 für Standort 2 keine Erklärung für die unterschiedlichen Infiltrationsraten. Eher wäre anzunehmen, dass auf Grund des Lagerungsdichtensprungs von 1,1 auf 1,5 an Standort 2 geringere Infiltrationsraten zu erwarten seien. Aus diesem Grund muss die Bedeutung der Bestandesdichte an Bäumen bzw. Sträuchern für die Infiltrationsrate nochmals hervorgehoben werden. Die Tendenz zu erhöhten Abflussbeiwerten bei abnehmender Bestandesdichte bestätigt auch das LWF (2004, nach ROSEMAN 1988). Für die Klassifikation des Standortes hinsichtlich des dominierenden

Infiltrationsmechanismus ist der Streuungswert von 200 mm/h hilfreich. Drei Messungen ergaben Infiltrationswerte zwischen 10 und 15 mm/h, die vierte eine Rate von 210 mm/h. Dies sagt aus, dass es sich um einen Standort mit flächenhaft unregelmäßig ausgebildeten Makroporen handelt. Stellenweise ist jedoch ausschließlich eine Matrixporeninfiltration festgestellt worden. Der Aufforstungsstandort 2 belegt ebenfalls eine Zwischenstellung hinsichtlich des Infiltrationsvorgangs. Seine Infiltrationsleistung liegt zwar unter der kf-Wertklasse (125-42 mm/h), aber seine größere Streuung mit 446 mm/h weist auf ein variables Bodengefüge hin, dass teilweise Makroporen erkennen lässt.

Ebenfalls in einem Forstgebiet gelegen, befindet sich die Kahlschlagfläche 5, die eine minimale Infiltrationsrate von Null und eine Streuung von 10 mm/h aufweist. Die Vegetation entspricht einer für das Erzgebirge typischen Sukzessionsvegetation im Sinne SEEGERTS et al. (2003), die sich durch dichten Gräserbewuchs auszeichnet. Der untere Bereich dieser Untersuchungsfläche dient als Lagerplatz für gefällte Baumstämme. Die effektive Lagerungsdichte des Bv-Horizontes (Bv: 6-30 cm) von 1,4 kann nach HILDEBRAND & WIEBEL (1982) eine Schadverdichtung durch Forstfahrzeuge darstellen. Die Lagerungsdichte von Flächen mit Schadverdichtung bis 30 cm Tiefe, beginnt laut dieser Studie bei 1,3 g/cm<sup>3</sup>. Infolge dieser bodenphysikalischen Werte und der vierfach wiederholten Infiltrationsmessung mit minimaler Streuung (vgl. Abb. 18), muss davon ausgegangen werden, dass diese Fläche schadverdichtet ist und kein Grobporensystem aufweist. Diese Annahme wird bestätigt durch die Aussage, dass „[...] tendenziell erhöhte Abflussbeiwerte bei abnehmender Bestandesdichte bis hin zur Kahlfläche [...] festgestellt wurden“ (LWF 2004: 18 nach ROSEMAN 1988).



**Abb. 27:** Standort 5 mit Sukzessionsvegetation  
Minimale Infiltrationsrate: 0 mm/h

Die geschilderten Standortsituationen stehen denjenigen im Hochwaldforst gegenüber. Zu den Böden mit Makroporeninfiltration zählen nach o.g. Kriterien die Standorte 3, 9, 13 und 14. Allen Flächen gemeinsam ist eine dichte alte Hochwaldvegetation, die zumeist aus Fichten besteht. Das bedeutet, dass bei allen Flächen von einer tiefreichenden und dichten Durchwurzelung des Bodens mit entsprechend großem Wurzeldurchmesser ausgegangen werden kann. Auch weisen die genannten Standorte keine aktuelle forstliche Nutzung in Form von Befahrungsspuren oder Altholzablagerungen auf. Für das Vorhandensein eines dichten Makroporensystems sprechen auch die geringen effektiven Lagerungsdichten des Oberbodens, die einen Maximalwert von 0,7 erreichen. Zusätzlich weisen die hohen Streuwerte auf eine sehr heterogene Bodenstruktur hin, die aber flächenhaft von Makroporen geprägt zu sein scheint. Dafür sprechen die hohen Minimalwerte der einzelnen Messungen, die bei 186 mm/h liegen, und damit deutlich über der ermittelten kf-Klasse, die maximal einen Wert von 125 mm/h zulassen würde.

Standort 19, der sich im Waldrandbereich eines Hochwalds befindet, zählt zu den makroporenenreichen Standorten. Dafür spricht die hohe Variationsbreite der drei durchgeführten Infiltrationsmessungen (585 mm/h). Von den anderen Hochwaldstandorten unterscheidet ihn, dass er einen Messwert aus dem Juli 2005 aufweist, der eine Infiltrationsrate von nur 90 mm/h zeigt. Denkbar wäre, dass dies auf die Standortlage am Forstrand zurückzuführen ist. Dort ist die Durchwurzelung nicht mehr ganz so intensiv wie im zentralen Waldbereich. Auf Grund der beiden anderen hohen Werte wird er aber zu den Standorten mit dominanter Makroporeninfiltration gezählt.



**Abb. 28:** Standort 3 mit Hochwaldbewuchs, Blick nach Norden  
Minimale Infiltrationsrate: 186 mm/h



**Abb. 29:** Standort 13 mit Hochwaldbewuchs und dichter Grasvegetation  
Minimale Infiltrationsrate: 195 mm/h



**Abb. 30:** Standort 14 mit Hochwaldbewuchs und Strauchschicht  
Minimale Infiltrationsrate: 246 mm/h

Einer besonderen Erläuterung bedarf der Mischwaldstandort 10, der ebenfalls eine hohe Infiltrationsrate von 128 mm/h aufweist. Drei der vier Messdurchläufe ergaben Messwerte zwischen 195 und 360 mm/h. Bei der vierten Messung wurde eine Infiltrationsrate von 60 mm/h ermittelt. Daraus kann geschlossen, dass auch dieser verhältnismäßig lichtere mit Jungbäumen durchsetzte Waldstandort überwiegend ein makroporenbestimmtes Infiltrationsverhalten besitzt. Dies wäre bei Betrachtung des verdichteten Kolluvialhorizontes, der eine Lagerungsdichte von 1,3 aufweist, nicht anzunehmen. Auch bei diesem Standort wird deutlich, dass die Bestandesdichte und das Vegetationsalter eine zentrale Rolle für die Infiltrationsleistung spielen.



**Abb. 31:** Standort 10 mit Baumbestand mittleren Alters und Jungbäumen  
Minimale Infiltrationsrate: 128 mm/h

Als besondere Kategorie innerhalb der Standorte mit Makroporeninfiltration sind die Standorte 4 und 6 zu nennen. Es handelt sich um einen Hang-Oxigley sowie einen Hang-pseudogley, die sich auf einer Fläche mit einer Hangneigung von  $6,5^\circ - 10^\circ$  befinden. Wie der Bodentypenbezeichnung zu entnehmen ist, weisen beide Böden stauwasserbeeinflusste Horizonte auf. Der Beprobungsstandort ist durch eine hohe Bestandesdichte an Sträuchern bzw. Jungbäumen gekennzeichnet (vgl. Abb. 32). Diese Merkmale in Kombination mit den hohen minimalen Infiltrationsraten von 312 bzw. 300 mm/h und relativ großen Streuungswerten der Einzelmessungen (153 mm/h) lassen auf ein ausgeprägtes Makroporensystem schließen. Alle vier Messungen auf dieser Aufforstungsfläche (Standort 4 und 6 liegen nebeneinander) weisen eine Infiltrationsrate von mindestens 300 mm/h auf. Auf Grund der hohen Sättigungswerte (72 bzw. 77 Vol.%) zu Messbeginn muss angenommen werden, dass das infiltrierte Wasser im Unterboden gestaut und der Hangneigung folgend als (schneller) Interflow abgeflossen ist. Am Standort 6 wurde in 19 cm Tiefe ein Sd-Horizont angesprochen, der so kompakt war, dass er nicht beprobt werden konnte. Entsprechend muss seine Lagerungsdichte größer derjenigen des Sw-Horizonts von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  sein, so dass die bodenphysikalischen Werte für eine Ablenkung des Sickerwasserstroms aus der Vertikalen sprechen.



**Abb. 32:** Standort 4 mit Gras- und dichter Jungbaumvegetation  
Minimale Infiltrationsrate: 312 mm/h

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die Ausbildung eines Makroporensystems auf Grund der dargestellten Ergebnisse eng an einen langjährig entwickelten Forstbestand bzw. eine dichte Vegetationsentwicklung von Jungbäumen bzw. Sträuchern gebunden ist. Entsprechend erfordern Forstflächen eine genauere Standortanalyse um Rückschlüsse auf die Ausprägung eines Makroporensystems und damit auf die Höhe der Infiltrationsrate zulassen zu können.

So weisen die Waldrandbereich mit lichter Bewaldung und möglicherweise Befahrung durch Forstfahrzeuge gegenüber den dicht bewachsenen alten Forststandorten nur eine reduzierte Infiltrationsrate auf, die teilweise sogar unter derjenigen der Grünlandstandorte liegt. BORK (1988) bestätigt die Annahme, dass eine forstliche Nutzung zu lokalen Verdichtungen des Bodens führen kann (durch Befahrung bzw. Rücken von Baumstämmen), die Abfluss auf Waldbodenoberflächen erzeugen. Möglicherweise spielt hier auch Vertritt durch (Rot-)Wild eine Rolle, das im tschechischen Einzugsgebiet bei den relevanten Untersuchungsstandorten in großer Zahl vorhanden ist. Vor dem Hintergrund der großen Variabilität der Infiltrationsleistungen innerhalb einer spezifischen Nutzungsform bzw. auf einer Untersuchungsfläche müssen auch die streuenden Infiltrationsergebnisse beurteilt werden. Hierin äußert sich eine besonders kleinräumige Heterogenität der Standorte, auf die auch bei BRONSTERT et al. (2001: 20) hingewiesen wird. BRONSTERT erläutert, dass die Betrachtung der Parameter Wasserleitfähigkeit (kf-Wert), Wasserhaltevermögen (FK) sowie der Infiltrationseigenschaft auf der Maßstabebene eines Boden-

monoliths erfolgen muss. Die grundsätzliche Bedeutung der Vegetation für das hydrologische Verhalten, insbesondere die verbessernde Wirkung von Wurzelgängen hinsichtlich der Infiltrationsbedingungen von Böden, wird hervorgehoben. KUNTZE et al. (1994) weisen auf die Wirkung abgestorbener Pflanzenwurzeln hin, die eine wichtige Bedeutung für den Wassertransport haben. Für naturnahen Wald kann deswegen geschlossen werden, dass Grobporen als durchgehende Versickerungsbahnen regelhaft vorkommen (MORENO et al. 1974). Diese Aussagen stützen die besondere Bedeutung der Vegetationsform für die Infiltrationsraten.

Diese Erkenntnisse bedeuten, dass eine langfristige Nutzung der Böden als Forststandorte mit geringer Abholzungsintensität der Vermeidung von HORTONSchem Oberflächenabfluss dienen kann. Dieser Effekt kann im Sinne eines dezentralen Hochwasserschutzkonzeptes mittelfristig angestrebt werden.

### 5.3.6 Bedeutung von Lagerungsdichte und Porenvolumen für die Infiltrationsrate

Die Tatsache, dass Infiltrationsergebnisse zwei verschiedener Infiltrationsmechanismen vorliegen, die sich teilweise in ihrer Rate um eine Zehnerpotenz unterscheiden, begründet, dass keine eindeutige Korrelation dieser Werte zu Lagerungsdichte und Porenvolumen hergestellt werden kann. Tendenziell zeigt sich jedoch, dass

- alle Oberbodenhorizonte der Standorte mit Makroporeninfiltration eine maximale Lagerungsdichte von  $1 \text{ g/cm}^3$  aufweisen (Ausnahme: M-Horizont an Standort 10).

Daraus kann das Vorhandensein eines Makroporensystems zwar nicht abgeleitet werden, eine Voraussetzung für ihr Auftreten scheint jedoch erfüllt zu sein. Von dominanter Bedeutung für die Infiltrationsrate scheint vielmehr die Vegetationsform, ihre Bestandesdichte, und eine möglicherweise vorhandene Schadverdichtung zu sein. Letztere kann zu starker Verminderung bzw. zum Verschwinden der Grobporen führen.

Auch die ausnahmslos hohen Werte für das gesamte Porenvolumen (zumeist um 60 Vol.%) im Oberboden der Forststandorte lassen keinen eindeutigen Schluss auf die Höhe der Infiltrationsrate zu. Wäre das Porenvolumen bzw. die Porengrößenverteilung (des Primärporensystems) ausschlaggebend für die Höhe der Infiltrationsrate müssten die Infiltrationswerte an den Standorten 2 (61,8 Vol.%) und 4 (62,9 Vol.%) vergleichbar hoch sein. Zusätzlich weist Standort 2 mit 15 Vol.% auch einen höheren Anteil an Grobporen auf als Standort 4 mit 13 Vol.%. Die auf Grund dieser Angaben in etwa gleich hoch zu erwartende minimale Infiltrationsrate fällt jedoch an Standort 2 um 312 mm/h geringer aus. Ein ähnliches Beispiel bietet ein Vergleich des Wiesenstandortes 12 mit der Kahlschlagfläche 5. Diese Beispiele belegen, dass der Vegetationsform und Bestandes-

dichte sowie der Nutzungsintensität eine größere Bedeutung für die Infiltration zukommt als dem aus bodenphysikalischen Werten ableitbaren Primärporensystem. Die Fragestellung, ob aus den erhobenen bodenphysikalischen Parametern Rückschlüsse auf die Infiltrationsleistung gezogen werden können, muss damit verneint werden.

### **5.3.7 Bedeutung der kf-Werte für die Infiltrationsrate**

Die Aussagekraft des ableitbaren Wertes der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Oberbodens für die tatsächliche Infiltrationsrate ist stark eingeschränkt. Dabei muss eine Differenzierung hinsichtlich der Nutzungsart erfolgen. Während die kf-Werte für die Forststandorte keine Schlussfolgerung auf die tatsächliche Höhe der Infiltrationsrate zulassen, besitzen sie hingegen für die Landwirtschaftsstandorte eine höhere Aussagekraft (vgl. Kap. 5.3.4). Dabei entstehen jedoch deutliche Ungenauigkeiten von bis zu 75 mm/h (Standort 11). Erklärt werden kann dies durch die Ableitungsmethodik des kf-Wertes. Als zentraler Eingangsparameter dient die Bodenart, welche die substratspezifische Spannbreite an möglichen Wasserdurchlässigkeitswerten angibt. Ergänzend wird die Lagerungsdichteklasse zur Bestimmung des kf-Wertes herangezogen. Das methodische Vorgehen zur Ermittlung der gesättigten Permeabilität beruht somit weitgehend auf der Korngrößenzusammensetzung eines Bodenhorizontes, die einen statistischen Wert für die Permeabilität wiedergibt. Bei den o.g. Abweichungen der gemessenen Infiltrationsraten von den kf-Werten werden Faktoren wie die fehlende Bodenbedeckung bzw. Durchwurzelung und die Ausbildung von Stauwasser im Unterboden wirksam, indem sie die Infiltrationsrate begrenzen. Diese Faktoren werden von den kf-Werten nicht erfasst. Das hat zur Folge, dass die Sättigungs-Infiltrationsraten der untersuchten Landwirtschaftsstandorte von der Grenze der kf-Wertklasse sowohl nach oben als auch nach unten abweichen. Demgemäß stimmt bei den Landwirtschaftsstandorten die kf-Wertspanne mit den zu erwartenden minimalen Infiltrationsraten nur bedingt überein.

Das Vorgehen zur Ermittlung der kf-Werte lässt keine Unterscheidung für verschiedene Nutzungsarten zu. Wie in dieser Arbeit jedoch festgestellt wurde bedingt eine forstliche Nutzung wesentlich höhere Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit als eine landwirtschaftliche Nutzung. Auf Grund dessen eignen sich die ableitbaren kf-Werte für Forststandorte nicht. Dies belegt die Gegenüberstellung von minimalen Infiltrationsraten und kf-Werten bei den Forststandorten (vgl. Tab. 11 in Kap. 4.4.3). Die vegetations- und nutzungsbedingte Prägung der gesättigten Wasserleitfähigkeit des obersten Horizontes überlagert die substratspezifischen Werte deutlich. Für diese Standorte kann infolgedessen keine Aussage über die minimale Infiltrationsrate mit Hilfe des kf-Wertes getroffen werden.

## 5.4 Schlussfolgerungen zur Oberflächenabflusswirksamkeit

In diesem Kapitel werden zunächst Abflussbeiwerte<sup>20</sup> für die Untersuchungsstandorte bei Starkniederschlagsereignissen verschiedener Jährlichkeit abgeleitet. Im zweiten Teil dieses Kapitels findet eine Einschätzung der Oberflächenabflusswirksamkeit der Nutzungsf lächen des Einzugsgebietes statt.

### 5.4.1 Identifizierung oberflächenabflusswirksamer Standorte

Die Angabe von Abflussbeiwerten für die Untersuchungsstandorte kann nur unter bekannten Vorfeuchtebedingungen erfolgen. Die folgenden Aussagen werden unter der Annahme eines gesättigten Bodenspeichers getroffen. Für die Berechnung der Abflussbeiwerte werden die minimalen Infiltrationswerte der Untersuchungsstandorte zugrunde gelegt, die mit den regionalen Starkniederschlagsintensitäten abgeglichen werden. Dabei wird der Abflussanteil als Prozentwert des fallenden Niederschlags angegeben.

Als Datengrundlage für die Starkniederschlagsereignisse werden die Jährlichkeitswerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD 1997: KOSTRA) für das Gebiet um Rübenua genutzt. Betrachtet werden die Stundenwerte (Niederschlagsdauer) folgender Wiederkehrzeiten: 1 Jahr, 10 Jahre und 100 Jahre.

Da erfahrungsgemäß die Inhomogenität einer Fläche bereits Oberflächenabfluss erzeugt bevor die minimale Infiltrationsrate aller Flächenteile erreicht ist (SCHÄFER 1981, zitiert in MENDEL 2000), handelt es sich bei den ermittelten Abflussbeiwerten um generalisierte Ergebnisse. Gleichwohl können sie der Eichung des NASIM-Modells insofern dienen, als dass gebietsspezifische Eigenschaften abgebildet werden können.

### **Abflussbeiwerte für ein einjährliches Starkniederschlagsereignis**

Die stündliche Starkniederschlagshöhe für eine Jährlichkeit von einem Jahr beträgt regional 17-18 mm. Diese Niederschlagsintensität würde für die im Folgenden genannten Untersuchungsstandorte Abflussbeiwerte in der angegebenen Höhe auslösen. Für alle nicht genannten Standorte kann auf Grund der Untersuchungsergebnisse davon ausgegangen werden, dass kein Infiltrationsüberschuss und damit kein HORTONScher Oberflächenabfluss auftritt.

Aufforstungsstandort 1:	41 – 44 %
Kahlschlagfläche 5:	100 %
Ackerstandort 11:	47 – 50 %

<sup>20</sup>Der Abflussbeiwert gibt das Verhältnis zwischen dem abflusswirksamen Niederschlag und dem tatsächlich gefallenen Gebietsniederschlag an (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996).

**Abflussbeiwerte für ein zehnjährliches Starkniederschlagsereignis**

Die Niederschlagsintensität eines zehnjährlichen Starkregenereignisses für den Zeitraum einer Stunde beträgt in der Region des Untersuchungsgebietes eine Höhe von 38-42 mm. Dies führt bei den unten aufgeführten Untersuchungsstandorten zu Abflussbeiwerten in der genannten Höhe. Bei allen weiteren Untersuchungsstandorten muss nicht mit der Bildung von Oberflächenabfluss gerechnet werden.

Aufforstungsstandort 1:	74 – 76 %
Aufforstungsstandort 2:	39 – 45 %
Kahlschlagfläche 5:	100 %
Ackerstandort 11:	76 – 79 %
Grünlandstandort 16:	53 – 57 %

**Abflussbeiwerte für ein hundertjährliches Starkniederschlagsereignis**

Die stündliche Niederschlagshöhe für ein hundertjährliches Starkregenereignis im Untersuchungsgebiet beträgt 54-62 mm. Sie verursacht hohe prozentuale Abflussbeiwerte bei den im Folgenden genannten Standorten. Bei den übrigen Standorten tritt auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse kein Infiltrationsüberschuss auf.

Aufforstungsstandort 1:	81 – 84 %
Aufforstungsstandort 2:	57 – 63 %
Kahlschlagfläche 5:	100 %
Ackerstandort 11:	83 – 85 %
Grünlandstandort 16:	67 – 71 %

Die ermittelten Abflussbeiwerte können unter nutzungsspezifischer Betrachtung wie folgt zusammengefasst werden:

Der stärkste Oberflächenabfluss ist auf der forstlichen Kahlschlagfläche 5 zu erwarten, da bei wassergesättigtem Boden auf Grund der fehlenden Grobporen (vgl. Kap. 5.3.5) keine Infiltration möglich ist. Infolgedessen führt jedes Niederschlagsereignis bei gesättigtem Bodenspeicher zu Infiltrationsüberschuss in Höhe der fallenden Niederschlagsmenge.

Die zweithöchsten Abflussbeiwerte sind bei den betrachteten Niederschlagsintensitäten auf dem Ackerstandort 11 zu erwarten. Sie betragen für die zugrunde gelegten Niederschlagswerte zwischen 47 und 85 %. Allerdings sind für Ackerstandorte saisonale Variabilitäten möglich, da die aktuelle Infiltrationsrate stark von der jeweiligen Vegetationsbedeckung des Ackers abhängt (MOLLENHAUER et al. 1985).

Für die lichten Aufforstungsstandorte kann ebenfalls eine deutliche Abflusswirksamkeit bei gesättigtem Bodenspeicher festgestellt werden. Die Abflussbeiwerte für die betrachteten Niederschlagsintensitäten betragen beim Standort 1 zwischen 41 und 84 %. Beim Aufforstungsstandort 2 setzt Infiltrationsüberschuss erst bei einer Niederschlagsintensität ein, die höher als 23 mm/h liegt. Aufgrund dessen ist bei einem einjährlichen Starkniederschlagsereignis kein Abfluss zu erwarten. Steigt die stündliche Niederschlagsintensität auf Werte zwischen 38 und 62 mm, ist mit Abflussbeiwerten zwischen 53 und 71 % zu rechnen.

Für alle weiteren Untersuchungsstandorte konnte kein Infiltrationsüberschuss für die betrachteten Niederschlagsereignisse festgestellt werden. Dazu zählen die Wiesenstandorte 12 und 15, für die auf Basis der ermittelten Infiltrationsraten keine Oberflächenabflussbildung anzunehmen ist. Für die naturnahen Forststandorte erscheint dieses Ergebnis plausibel, da ein ausgeprägtes Makroporensystem hohe Sättigungs-Infiltrationsraten bedingt.

#### **5.4.2 Schlussfolgerungen zum Oberflächenabfluss im Untersuchungsgebiet**

Im Folgenden werden die nutzungsspezifischen Aussagen zur Oberflächenabflussbildung auf das Einzugsgebiet der Natzschung übertragen. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass diese Aussagen nur Tendenzen aufweisen. Zur Validierung dieser Untersuchungsergebnisse wären weitere Infiltrationsmessungen für die jeweiligen Nutzungstypen wünschenswert, um eine Generalisierung der Einzelstandortergebnisse auf die Flächen des Einzugsgebietes abzusichern. Als Grundlage für die Übertragung der Ergebnisse auf das Untersuchungsgebiet dient die Karte der Landnutzungsverteilung. Die Aussagen werden unter der Annahme getroffen, dass die Böden im wassergesättigten Zustand vorliegen. Die angegebenen Schwellenwerte für den einsetzenden Oberflächenabfluss sind als Orientierungswerte zu verstehen.

Wie in Kapitel 5.3.2 abgeleitet wurde, kann insbesondere bei Kahlschlagflächen (mit verdichtetem Boden) mit hohen Abflussbeiwerten gerechnet werden. Über die Bedeutung dieser Flächen für das Untersuchungsgebiet kann keine Aussage getroffen werden, da die Landnutzungskarte diese Flächen nicht ausweist. Die Abflussbeiwerte, die für die Ackerflächen ermittelt wurden, haben für das Untersuchungsgebiet nur im Bereich des Rübenauer Hügels Bedeutung. Oberflächenabflussbildung ist bei Niederschlagsintensitäten, die 9 mm/h übersteigen anzunehmen. Allerdings muss hier auf die spezielle Bodenbedeckungssituation des Ackers hingewiesen werden. Auf Grundlage der Studienergebnisse von MOLLENHAUER et al. (1985) kann davon ausgegangen werden, dass zunehmende Bestandeshöhen der Ackervegetation die Abflusshöhen reduzieren. Bei

Verschlämmung der Bodenoberfläche ist hingegen mit gesteigerten Abflussbeiwerten zu rechnen. Der Anteil der Ackerflächen im Untersuchungsgebiet ist mit 0,9 % gering. Ebenfalls im Bereich des Rübenaauer Hügels befinden sich stauwasserbeeinflusste Grünlandflächen (vgl. Bodentypenkarte RAMELOW 2006). Für diese Flächen muss auf Grund der Untersuchungsergebnisse mit Infiltrationsüberschuss gerechnet werden. Der Schwellenwert der Niederschlagsintensität liegt bei etwa 18 mm/h. Ob die Grünlandflächen auf der tschechischen Seite des Einzugsgebietes ebenfalls stauwasserbeeinflusst sind, und deswegen ein vergleichbares Abflussverhalten zeigen, kann nicht beurteilt werden. Die Bodentypenkarte (RAMELOW 2006) weist Acker-Braunerde-Podsole an diesen Standorten aus, so dass keine Stauwasserbeeinflussung angenommen wird (ebd.).

Für den tschechischen Teil des Einzugsgebietes darf angenommen werden, dass die Wiederaufforstungsflächen für die Oberflächenabflussbildung von größerer Bedeutung sind. Ihr Flächenanteil am gesamten Untersuchungsgebiet beträgt 29 % und ist fast ausschließlich in der Tschechischen Republik gelegen. Folglich beeinflussen die Wiederaufforstungsflächen das Abflussgeschehen in diesem Gebiet in hohem Maße. Je nach Dichte des Vegetationsbestandes und des Bestandesalters ist mit unterschiedlich starker Abflussintensität zu rechnen. Der Schwellenwert der Niederschlagsintensität, die zu Infiltrationsüberschuss führt, liegt in etwa bei 10-23 mm/h. Auf Grund dieser Werte kann für ein zehnjährliches Starkregenereignis ein Abflussbeiwert von etwa 39-76 % angenommen werden. Fördernd auf hohe Abflusswerte wirkt sich die Lage der Aufforstungsflächen in den südlichen Kambereichen aus, da dort die stärksten Niederschläge fallen.

Die geschlossenen Hochwaldbestände des Untersuchungsgebietes lassen bei hundertjährlichen Niederschlagsereignissen keinen Infiltrationsüberschuss erwarten. Sie sind überwiegend auf der deutschen Seite des Einzugsgebietes vertreten. In diesen Forstbeständen kann trotz hoher Infiltrationskapazitäten auf der ungestörten Waldfläche die Bildung von Oberflächenabfluss stattfinden. Der Abfluss kann einerseits auf versiegelten Wegflächen entstehen und andererseits als (oberflächennaher) Interflow auftreten. Dabei führen hangseitige Wegeinschnitte zu linienhaftem Gerinneabfluss auf den Wegflächen. Wird das Wasser ohne erneute Versickerungsmöglichkeit auf der Fläche linear zum Vorfluter geführt, kann diese Abflussform einen erheblichen Beitrag zur Abflusswirksamkeit von Waldflächen darstellen (LWF 2004: 18).

Die Schlussfolgerung, dass sowohl die alten Forstbestände als auch die Grünlandstandorte ohne Stauwassereinfluss keinen Infiltrationsüberschuss erwarten lassen, reihen sich in die Ergebnisse anderer Studien zur Abflussbildung ein. FLÜGEL & BARSCH (1988) beispielsweise kamen bei ihren Untersuchungen zum Oberflächenabfluss und Interflow mittels Beregnungsversuchen im Kleinen Odenwald zu dem Ergebnis, dass auf keiner Testfläche durch die Beregnung Oberflächenabfluss ausgelöst wurde. Eine Testfläche war eine gras-

bestandene ehemalige Schafweide, die zweite befand sich in einem Fichten-Altbestand. Beide am Hang gelegenen Flächen weisen im Untergrund Verwitterungsschuttdecken auf. Es wurde mit maximalen Niederschlagsintensitäten von 102 mm/h und einer maximalen Menge von 260 mm beregnet. Statt der Ausbildung von Oberflächenabfluss wurden Interflowaustritte beobachtet. Der Zeitpunkt des einsetzenden Interflows wies dabei eine große Abhängigkeit von der Bodenvorfeuchte auf.

Eine Zusammenfassung von Studien zur Oberflächenabflusswirksamkeit von KARL et al. (1985) ergab ebenfalls, dass in belastungsfreien Fichte-Tanne-Buchereinbeständen der montanen Stufe bei Niederschlagsintensitäten um 100 mm/h nur in Ausnahmefällen mit Oberflächenabfluss zu rechnen ist. Keine Oberflächenabflüsse wurden vor allem auf Braunerden, Parabraunerden und Rendzinen auf Schuttkörpern festgestellt. Abflussbeiwerte zwischen 2,2 und 69 % wurden bei Niederschlagsintensitäten um die 100 mm/h vor allem in jüngeren Fichtenreinbeständen auf undurchlässigem Untergrund und vernässten Hanggleyen ermittelt. In unbelasteten Wäldern des Mittelgebirges wurden trotz Hangneigungen bis zu 30 % keine Oberflächenabflüsse erzielt. Die einzige Ausnahme stellte ein befahrener Buchenforst dar, der bei einer Niederschlagsintensität von 105 mm/h einen Abflussbeiwert von 18,4 % aufwies. Als generelles Fazit aus den zusammengetragenen Ergebnissen schließen KARL et al. (1985: 41): „[...]“, dass zwar die geologische Unterlage und die Böden eine gewichtige Rolle spielen, dass aber die Hangneigung und teilweise auch die Hanglänge gegenüber der Vegetation und ihrer Bewirtschaftung stark in den Hintergrund treten“.

## 5.5 Ableitungen für die Parametrisierung des NASIM- Modells

Um an Hand der erhobenen Bodendaten Empfehlungen zur angepassten Parameter-eingabe für die Abflusssimulation abzuleiten, erfolgt zunächst eine Betrachtung der Funktion des Teilsystems Boden nach NASIM. Anschließend werden Möglichkeiten für eine angepasste Parametereingabe erörtert.

### 5.5.1 Das Teilsystem Boden in NASIM

Für die Niederschlags-Abfluss-Simulation mit Hilfe der Software NASIM spielt der Boden als kurz- und langfristige Speichergroße eine bedeutende Rolle. Das Teilsystem Boden ist für die Belastungsaufteilung des Niederschlags wichtig. Mit Hilfe dessen wird die Verteilung des gefallen Niederschlags in Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss beschrieben, die neben den meteorologischen Aspekten im wesentlichen von der Infiltrationsrate des Bodens abhängt. Die modellhafte Prozessvorstellung in NASIM für das Teilsystem Boden zeigt Abbildung 33.

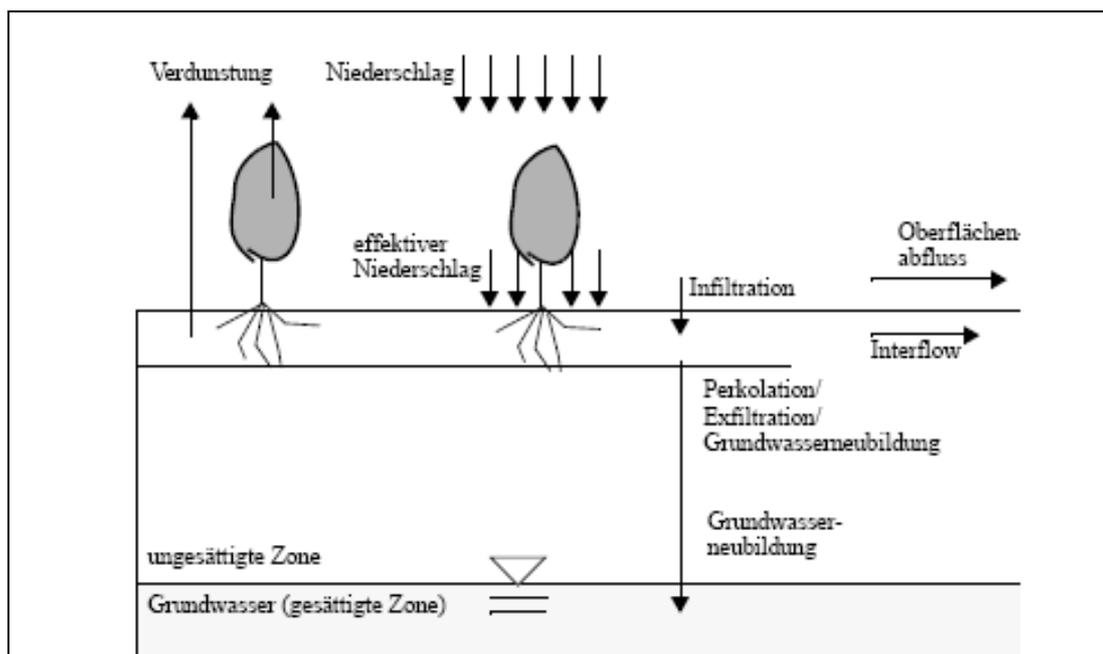


Abb. 33: Das Teilsystem Boden in NASIM (HYDROTEC 2003: 2-31)

Da NASIM ein sogenanntes „grey-box“ Modell ist, arbeitet es sowohl mit formalisierten physikalischen Vorgängen als auch mit empirisch festgestellten Größen. An dieser Stelle ist die Möglichkeit gegeben, die vorliegenden Untersuchungsergebnisse in Parameter zu überführen. In NASIM werden verschiedene Gleichungssysteme verwendet, die für die Modellierung der einzelnen Bodenprozesse zuständig sind.

Diese Gleichungen müssen mit Daten folgender Bodenkennwerte gespeist werden:

- Gesamtporenvolumen (GPV)
- Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität
- kf-Wert
- Maximale Infiltrationsrate

Die kleinste hydrologische Einheit, auf deren Grundlage NASIM mit diesen Daten arbeitet, stellt die Elementarfläche dar, die eine Fläche gleicher Bodenart und Landnutzung darstellt. Entsprechend müssen o.g. Parameter für alle Elementarflächen des Einzugsgebietes vorliegen.

### 5.5.2 Empfehlungen für die Bodenkennwerte

#### ***Gesamtporenvolumen, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität***

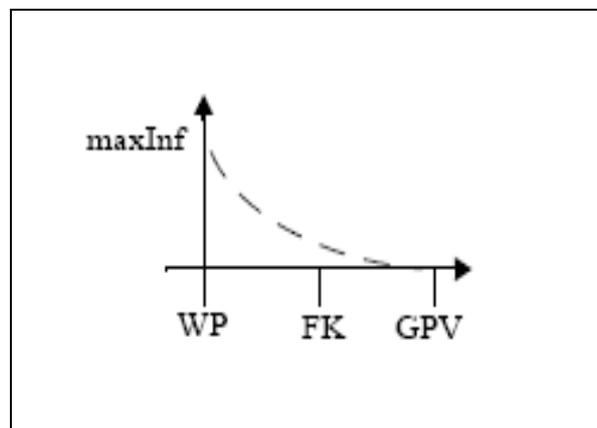
Das aus den Labordaten gewonnene Gesamtporenvolumen kann unter Berücksichtigung der speziellen Nutzungsform als Grundlage zur Dateneingabe dienen. Dadurch werden für die Dateneingabe bei Forststandorten verhältnismäßig höhere Porenvolumina empfohlen als bei landwirtschaftlich genutzten Standorten.

Für die Parameter der Feldkapazität und der nutzbaren Feldkapazität wird zunächst die Bildung eines nutzungsspezifischen Mittelwertes auf Grundlage der in dieser Arbeit ermittelten RENGER-Daten empfohlen. Die Vergleichsstandorte sollten insbesondere auf ihre spezielle Nutzungs- und Bewirtschaftungsform hin ausgewählt werden. Bei den Grünlandstandorten ist zwischen stauwasserbeeinflussten und nicht stauwasserbeeinflussten Böden zu unterscheiden. Es sollte bei der Dateneingabe berücksichtigt werden, dass pseudovergleyte Böden geringere Feldkapazitäten (Bodenspeicherraum) aufweisen als stauwasserfreie Böden.

Die in Kapitel 5.2 kritisch beurteilte Qualität der ermittelten Porengrößenverteilung für Forststandorte, führt zu der Schlussfolgerung, dass die Werte für die nutzbare Feldkapazität nachträglich erhöht werden müssen. Dies gilt insbesondere für diejenigen Forststandorte mit geringen Lagerungsdichten (vgl. Kap. 5.2). Die Erhöhung der nFK-Werte sollte bis zur Grenze der Durchwurzelungsschicht erfolgen. Für die dichter gelagerten Unterbodenhorizonte wird die Nutzung der abgeleiteten Werte für die Feldkapazität und die nutzbare Feldkapazität empfohlen.

### Maximale Infiltration

Von besonderer Bedeutung für die Belastungsaufteilung des Niederschlags ist die Bodenfeuchte. Sie wird über die Prozesssimulation der Infiltration, der aktuellen Evapotranspiration und der Perkolation bzw. Exfiltration gewonnen (HYDROTEC 2003:2-8). Im Rahmen der prozesshaften Modellierung der Infiltration dient die maximale Infiltration als zentraler Parameter. Aus ihr wird die potentielle Infiltration gewonnen, die als Grundlage zur Ableitung der aktuellen Infiltration dient (HYDROTEC 2003:2-33f). Folgerichtig muss für die Elementarflächen als zentraler Parameter die maximale Infiltration bestimmt werden. Als maximale Infiltrationsrate (mm/h) gilt die Infiltrationsgeschwindigkeit, die sich bei leerem Bodenspeicher einstellt. In Abbildung 33 stellt die maximale Infiltrationsrate den Schnittpunkt der Kurve mit der y-Achse bei einer Bodenfeuchte in Höhe des Welkepunkts (WP) dar.



**Abb. 34:** Nicht-linearer Infiltrationsverlauf nach HOLTON  
(HYDROTEC 2003: 2-34)

Da diese Infiltrationsrate im Gelände auf Grund ständig vorhandener Bodenfeuchte nicht gemessen werden kann, wird auf die von HYDROTEC (2003: 2-102) entwickelte Ableitung der maximalen Infiltrationsrate aus dem  $k_f$ -Wert zurückgegriffen. Die Tabellenwerte der maximalen Infiltrationswerte nach DVWK-Materialien (HYDROTEC 2003: 3-70) eignen sich nicht zur Ermittlung der maximalen Infiltration, da sie die Messwerte bei wassergesättigtem Boden übertreffen müssten. Dies ist nicht der Fall. Genauso wenig eignen sich als Eingangsparameter für die Ableitung der maximalen Infiltration die nach HYDROTEC gewonnenen  $k_f$ -Werte. Da jene, wie in Kapitel 5.3.7 dargelegt wurde, für die Oberbodenhorizonte keine bzw. nur eine sehr beschränkte Gültigkeit besitzen. Demzufolge werden sie durch die ermittelten minimalen Infiltrationsraten ersetzt. Auf dieser Grundlage können nach Tabelle 13 aus der NASIM-Dokumentation die maximalen Infiltrationsraten für die einzelnen Standorte berechnet werden, die damit auf empirischen Werten basieren.

kf-Wertklasse Bodenkarte	kf-Wert Bodenkarte		Proportionalitäts- faktor	Maximale Infiltration
	cm/d	mm/h		
< 6	3	1,25	5,2	6,5
6-16	11	4,6	3,7	17
16-40	28	11,7	3,16	37
40-100	70	29,2	2,57	75
> 100	130	61,23	1,88	115

**Tab. 13:** Maximale Infiltrationsraten für kf-Wert-Bereiche  
(nach HYDROTEC 2003: 2-103, gekürzt)

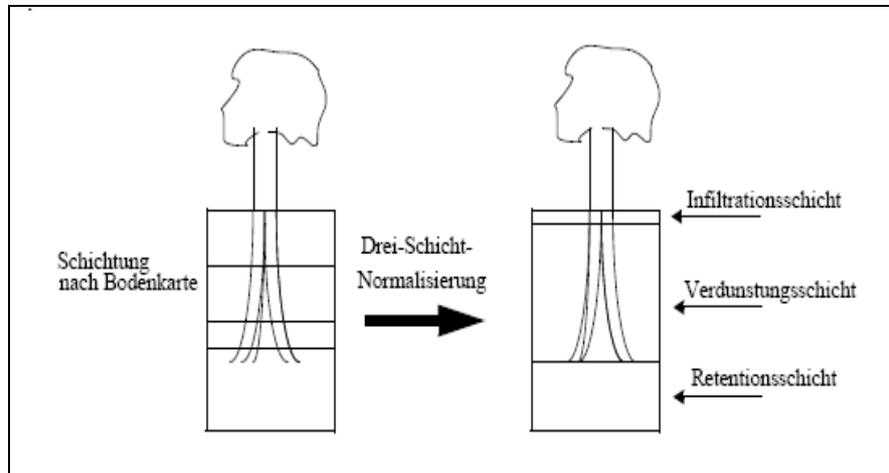
Zur Ermittlung der angepassten maximalen Infiltrationsraten wird folgendes Vorgehen empfohlen: Zunächst muss auf Basis der speziellen Landnutzung ein Vergleichsstandort aus den Untersuchungsstandorten ausgewählt werden. Als Vergleichsgrundlage können die Standortblätter im Anhang dienen. Die entsprechende minimale Infiltrationsrate kann in die Spalte *kf-Wert Bodenkarte - mm/h* eingesetzt werden, um anschließend in die Einheit cm/d transferiert zu werden. Eine Klassifikation der gesättigten Leitfähigkeit mit Hilfe der Wertklassen (erste Tabellenspalte) ermöglicht die Bestimmung des Proportionalitätsfaktors. Dieser dient der Umrechnung des kf-Wertes in die maximale Infiltrationsrate.

*Beispiel:*

Für den Aufforstungsstandort 2 wurde eine minimale Infiltrationsrate von 23 mm/h ermittelt. Nach Umrechnung in die Einheit cm/d ergibt sich ein Wert von 55. Damit fällt er in die Kategorie 40 - 100 cm/d, und wird mit dem Faktor 2,57 in die maximale Infiltration überführt: der Wert für die maximale Infiltration bei leerem Bodenspeicher beträgt damit 142 mm/h.

**kf-Wert**

Das bodenhydrologische Modell in NASIM entspricht der vertikalen Bodengliederung in Abbildung 35.



**Abb. 35:** Normalisierung der Bodenschichtung in NASIM

(HYDROTEC 2003: 3-111)

Damit sind dem kf-Wert im Modell zwei Funktionen zugeordnet:

- Mit Hilfe des kf-Wertes werden die maximalen Infiltrationsraten der Infiltrationsschicht abgeleitet (vgl. Tab.13).
- Der kf-Wert gibt die Perkolationsrate in der Verdunstungsschicht sowie in der Retentionsschicht wieder.

Die Verdunstungsschicht, die dem Bodenbereich unterhalb der Infiltrationsschicht bis zur maximalen Wurzeltiefe entspricht, unterliegt den Prozessen der Evapotranspiration. Dies unterscheidet sie von der Retentionsschicht. Die Geschwindigkeit der gesättigten Wasserbewegung innerhalb der Verdunstungsschicht wird durch den kf-Wert bestimmt. Für die Parameteranpassung ist eine Unterteilung nach Landnutzungsart sinnvoll, da bei naturnahen Forstflächen von einer stark durchwurzelt Verdunstungsschicht mit Sekundärporen auszugehen ist. Diese Sekundärporen begründen einen präferenziellen Fluss in dieser Bodenschicht, der den kf-Wert bei weitem übertreffen kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002: 221). Das bedeutet, dass die kf-Wertangabe für sekundärporenreiche Standorte höher liegen sollte als der Wert der substratspezifischen kf-Klasse. Bei der Annäherung an die entsprechende Größenordnung kann eine Orientierung an den Werten für sekundärporenreiche Böden von SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002: 221) erfolgen. Üblicherweise reicht die Bodenschicht mit präferenziellem Fluss bis ca. 50 cm

Bodentiefe. Danach dominiert das engere Porensystem und bestimmt die Permeabilität (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Für Landnutzungsarten, bei denen keine Makroporen zu erwarten sind und deswegen die primärporengeprägte Bodenmatrix die Wasserleitfähigkeit dominiert, wird eine Orientierung an den körnungs- und lagerungsbedingt ableitbaren kf-Werten empfohlen. Berücksichtigt werden sollte, dass eine Stauwasserbeeinflussung der Böden eine reduzierte Wasserleitfähigkeit bedingt und deswegen geringere Werte für die Dateneingabe erfordert.

Die Orientierung an den kf-Werten aus HYDROTEC (2003: 3-71) wird auch für die Retentionsschicht der Elementarflächen empfohlen. In tiefen, undurchwurzelter Bodenschichten kann das Auftreten gefügebedingter Makroporen ausgeschlossen werden.

Von Relevanz für eine realitätsnahe Modellierung des Einzugsgebietes der Natzschung könnte eine intensive Auseinandersetzung mit möglichen Interflowprozessen sowie deren modellhafter Abbildung in NASIM sein.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Den Hintergrund der vorliegenden Diplomarbeit bildet eine Dissertation zur Modellierung von Niederschlags-Abfluss Ereignissen im Einzugsgebiet der Natzschung im Mittleren Erzgebirge. Für diese Modellierung, die mit Hilfe des flächendetaillierten deterministischen Modells NASIM erstellt wird, sind sowohl bodenphysikalische Kennwerte als auch Angaben über die Infiltrationsleistung der Böden notwendig. Da die Landnutzung sich erfahrungsgemäß auf diese Aspekte auswirkt, fand im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Untersuchung der bodenphysikalischen Gegebenheiten sowie der Infiltrationsleistung vor dem Hintergrund der Landnutzungsstruktur des Untersuchungsgebietes statt. Die Untersuchungsstandorte sind zum einen (ehemalige) landwirtschaftliche Nutzflächen, die sowohl Grünland- als auch Ackerflächen umfassen, und zum anderen Forststandorte unterschiedlicher Bestockung und Nutzungsintensität. Zur Erhebung der benötigten Daten sind Gelände- und Laborarbeiten durchgeführt worden. Aus den Untersuchungsergebnissen wurden Aussagen zur Oberflächenabflusswirksamkeit der Standorte abgeleitet. Ferner konnte durch einen Abgleich der Untersuchungsergebnisse mit den zur Eichung empfohlenen Werten aus dem NASIM-Handbuch Empfehlungen für eine gebiets-spezifisch angepasste Parametereingabe des Modells gewonnen werden.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse, die gleichzeitig Antworten auf die eingangs gestellten Fragen liefert, erfolgt im Anschluss. Die detaillierten Ergebnisse sind in Kapitel 5 ausführlich diskutiert worden.

- I. Die Untersuchung der bodenphysikalischen Kennwerte sowie der Bodenwasserhaushaltsgrößen führte zu folgendem Ergebnis:

Die Labordaten ergaben, dass alle fünfzehn Untersuchungsstandorte durchschnittlich sehr geringe bis geringe Lagerungsdichten sowie hohe Porenvolumina aufweisen. Hohe Anteile an organischer Substanz begründen diese Werte. Im Tiefenverlauf der Bodenprofile nimmt die Lagerungsdichte invers zum abnehmenden Porenvolumen zu, erreicht aber insgesamt nur sehr geringe bis geringe Werte (<1,4 bis 1,6). In Ausnahmefällen sind im Unterboden Werte mittlerer Lagerungsdichte festgestellt worden. Eine durch die Stechzylindermethode bedingte Unterschätzung der Lagerungsdichten ist nicht auszuschließen.

Zwischen den bodenphysikalischen Werten der beiden Nutzungsgruppen konnten eindeutige Unterschiede identifiziert werden. Während in der Gruppe der Forststandorte die Lagerungsdichten durchschnittlich um 0,2 (Ld nach AG BODEN 1994) geringer ausfielen als bei den landwirtschaftlichen Standorten, wiesen hingegen die Porenvolumina einen um durchschnittlich 3,5 % höheren Wert auf. Die geringeren Anteile organischer Substanz der Landwirtschaftsstandort begründen diese Unterschiede.

Die mittels Pedotransfer-Funktionen abgeleitete Porengrößenverteilung ergab für die forstwirtschaftlichen Standorte höhere Volumenanteile in der Klasse der Feinporen bis engen Grobporen (FK). Die Landwirtschaftsstandorte wiesen höhere Werte im Bereich der weiten Grobporen (LK) auf. Diese Ergebnisse können entsprechend der Ableitungssystematik durch die geringeren Organikgehalte der Landwirtschaftsböden sowie der höheren Tongehalte der Forststandorte erklärt werden. Vor dem Hintergrund der nutzungsbedingten Verdichtung der landwirtschaftlichen Böden sowie der teilweise geringen minimalen Infiltrationsraten sind die Grobporenvolumina an einigen Standorten als zu hoch einzustufen. Bei den Forststandorten hingegen ist, auf Grund der mangelnden Berücksichtigung von Sekundärporen bei der Wertableitung nach RENGER (1971), eine Unterschätzung des Anteils an weiten Grobporen bzw. Makroporen festzustellen.

Die nach HYDROTEC (2003) abgeleiteten kf-Werte sind angesichts der geringen Bodenartenvariation und insgesamt niedrigen Lagerungsdichten für fast alle Standorte vergleichbar und liegen im Bereich hoher bis sehr hoher gesättigter Wasserleitfähigkeit. Bis auf eine Ausnahme sind im Oberboden generell die höchsten kf-Werte anzutreffen. Auch bei dieser Ableitungsmethodik wird die Wirkung der gefügebundenen Sekundärporen nicht ausreichend berücksichtigt, so dass die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit für den durchwurzelten Bodenbereich der Forststandorte unterschätzt werden.

## II. Können aus den bodenphysikalischen Werten und den Bodenwasserhaushaltsgrößen Rückschlüsse auf die Infiltrationsleistung gezogen werden?

Das Gesamtporenvolumen sowie die Porengrößenverteilung lassen keinen Rückschluss auf die zu erwartende Infiltrationsrate zu. Einzig die Lagerungsdichte kann einen Hinweis auf die Höhe der minimalen Infiltrationsrate geben. Es wurde festgestellt, dass alle Standorte mit einer sehr hohen minimalen Infiltrationsrate, und damit einem makroporenbestimmten Infiltrationsvorgang, Lagerungsdichten von maximal 1 im obersten Horizont aufweisen.

Die Aussagekraft der substratspezifischen kf-Werte für die gemessenen Infiltrationswerte wurde für die landwirtschaftlichen Standorte als mäßig gut befunden. Für die Forststandorte können die kf-Werte nicht als Hinweis auf die Infiltrationshöhe dienen.

## III. Die stark streuenden - und mit Ausnahmen - durchschnittlich hohen Messwerte der minimalen Infiltrationsrate konnten folgendermaßen erklärt werden:

Mittels des Vergleichs der gesättigten Wasserleitfähigkeitswerte (kf-Werte aus HYDROTEC 2003) mit den gemessenen minimalen Infiltrationsraten bei wassergesättigtem Boden wurde festgestellt, dass zwei verschiedene Infiltrationsmechanismen vorliegen. Zum einen wurde ein langsamer matrixbestimmter Infiltrationsvorgang identifiziert, der ausschließlich auf den Primärporen des Bodens beruht und dadurch die substratspezifische kf-Klasse des

Oberbodens nicht übertrifft. Zum anderen konnte an Hand der hohen Messwerte in Kombination mit hohen Streuwerten ein schneller makroporenbestimmter Infiltrationsmechanismus erkannt werden. Dieser weist deutlich höhere Infiltrationsraten auf, die durch das Auftreten von gefügebedingten Sekundärporen ( $> 50 \mu\text{m}$ ) bedingt sind. Mittels des Vergleichs der Standortbedingungen beider Kategorien konnte abgeleitet werden, dass die Landnutzung, die Vegetationsart und -dichte sowie die bewirtschaftungsbedingte Verdichtung des Oberbodens für den Infiltrationsmechanismus ausschlaggebend sind.

Gemäß diesen Einflussfaktoren wurde die langsamere Mikroporeninfiltration auf den landwirtschaftlichen Untersuchungsflächen sowie auf einer abgeholzten Forstfläche intensiver Nutzung identifiziert. Dabei lagen die minimalen Infiltrationsraten zwischen 0 und 135 mm/h. Eine Übergangssituation hinsichtlich des dominierenden Infiltrationsmechanismus konnte bei den lichten Forststandorten mit einer gemischten Bestockung aus Alt- und Jungbestand erkannt werden. Die durch ein ausgeprägtes Sekundärporensystem begründete Makroporeninfiltration wurde für alle untersuchten Hochwald-Standorten sowie für die dicht bestandenen, naturnahen Aufforstungsflächen festgestellt. Die Raten der minimalen Infiltration lagen dabei zwischen 186 und 723 mm/h.

IV. Die Antwort auf die Frage nach nutzungsbedingten Unterschieden hinsichtlich der bodenphysikalischen und -hydrologischen Kennwerte der untersuchten Böden wurde weitgehend in den Punkten I.-III. gegeben.

An dieser Stelle sei betont, dass die Nutzungs- und Bewirtschaftungsart der Böden die Bedeutung der bodenphysikalischen und (ableitbaren) bodenhydrologischen Kennwerte in ihrer Wirkung auf die minimale Infiltrationsrate überlagert. Der Grund dafür ist die spezielle Nutzungsform und Nutzungsintensität in Verbindung mit der Vegetationsform und -dichte. Diese Aspekte geben die Bedingungen für die Ausbildung eines Sekundärporensystems vor, das die Geschwindigkeit der (minimale) Infiltration deutlich beeinflusst. Damit nimmt die Bedeutung der Lagerungsdichte und des Porenvolumens sowie der ableitbaren Porengrößenverteilung für die Infiltrationskapazität bei den Untersuchungsstandorten ab.

An Hand der gemessenen Infiltrationsraten konnten für die Untersuchungsstandorte Abflussbeiwerte abgeleitet werden. Dies erfolgte unter der Annahme wassergesättigter Böden für Starkniederschlagsereignisse drei verschiedener Jährlichkeiten. Die Abflussbeiwerte sind als Orientierungswerte zu verstehen. Das zentrale Ergebnis besagt, dass die lichten Aufforstungsstandorte auf tschechischer Seite sowie die stauwasserbeeinflussten Grünlandstandorte und die Ackerstandorte auf deutscher Seite Infiltrationsüberschüsse in teils erheblichem Ausmaß liefern. Dabei ist auf den verdichteten Forststandorten mit lichtem Jungbaumbewuchs mit einem höheren Oberflächenabfluss zu rechnen als auf den Grünlandstandorten ohne Stauwasserbeeinflussung.

Die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Daten zur Parametrisierung des NASIM-Modells weisen deutliche Abweichungen zu den von der Fa. HYDROTEC (2003) empfohlenen Daten auf.

Die Abweichungen betreffen v.a. die kf-Werteingabe auf dessen Grundlage NASIM die maximalen Infiltrationsraten für die oberste Bodenschicht (Infiltrationsschicht) errechnet. Demzufolge sollte für die Standorte, an denen die Ausbildung eines Makroporensystems anzunehmen ist, ein kf-Wert in Höhe der ermittelten minimalen Infiltrationsrate als Eingangsparameter dienen. Anderenfalls ist mit einer generellen Unterschätzung der bodenfeuchteabhängigen Infiltrationsraten zu rechnen. Ferner müssen bei anzunehmender Bodenverdichtung der Standorte die kf-Werte des Oberbodens soweit reduziert werden, dass sie unterhalb der substratspezifischen kf-Wertklasse liegen. Dies gilt insbesondere für stauwasserbeeinflusste Böden. Für die Verdunstungsschicht (Durchwurzelungsschicht) der Standorte mit Makroporensystem sollte eine Erhöhung des kf-Wertes vorgenommen werden. Begründet wird dies mit dem in dieser Bodentiefe zu erwartendem präferenziellen Fluss (Makroporenfluss), der entlang von Wurzeleitbahnen und Bioporen stattfindet. Für die Retentionsschicht des Bodenmodells nach NASIM kann eine Orientierung an den kf-Werten für die jeweilige Bodenart empfohlen werden.

**LITERATURVERZEICHNIS**

- AG BODEN (Hrsg.) (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage, Hannover.
- AHNERT, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR, Geographisches Institut, Arbeitsgruppe Heimatforschung (Hrsg.) (1977): Das mittlere Zschopaugebiet. Ergebnisse der heimatkundlichen Bestandsaufnahme in den Gebieten Flöha – Augustusburg und Zschopau. Bd. 28, Akademie Verlag, Berlin.
- ASSMANN, A. (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen. In: Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, H. 11, Kornwestheim.
- ASSMANN, A. / GÜNDRA, H. / SCHUKRAFT, G. / SCHULTE, A. (1998): Konzeption und Standortauswahl bei der dezentralen, integrierten Hochwasserschutzplanung für die Obere Elsenz (Kraichgau). In: Wasser & Boden. H. 8, Berlin, S. 15-19.
- BAHRENBERG, G. / GIESE, E. / NIPPER, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie. Univariate und bivariate Statistik. Bd.1, Teubner, Stuttgart.
- BARSCHE, D. / FLÜGEL, W.A. (Hrsg.) (1988): Niederschlag, Grundwasser, Abfluss. Ergebnisse aus dem hydrologisch-geomorphologischen Versuchsgebiet „Hollmuth“. Heidelberger Geographische Arbeiten. Selbstverlag der Universität Heidelberg.
- BARSCHE, H. / BILLWITZ, K. (Hrsg.) (1990): Physisch-geographische Arbeitsmethoden. Haack, Gotha.
- BARTHEL, H. / MANNSFELD, K. / SANDNER, E. (1973): Flächen gleicher Abflussbereitschaft bei sommerlichen Starkregen (dargestellt am Beispiel der Flöha im Erzgebirge). In: Petermanns Geographische Mitteilungen 117, H. 2, Gotha, S. 107-116.
- BASTIAN, O. (2003): Naturraumbedingungen in Sachsen. In: Klausnitzer, B. / Reinhardt, B. (Hrsg.): Beiträge zur Insektenfauna Sachsens. Mitteilungen Sächsischer Entomologen, Suppl.1, S. 16-23.
- BAUMGARTNER, A. / LIEBSCHER, H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie. Bd.1, 2. Auflage. Gebrüder Borntraeger, Berlin / Stuttgart.
- BERNHARDT, A. (1995): Mittelerzgebirge. In: Mannsfeld, K. & Richter, H. (Hrsg.): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 238, Trier, S. 184-188.

- BEUTH / WILEY-VCH (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Bd. 6: Physikalische Untersuchungsverfahren. Berlin / Wien / Zürich.
- BEVEN, K.J. / GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. In: Water Resources Research, 18, S. 1311-1325.
- BLANCKMEISTER, J. / HENGST, E. (1971): Die Fichte im Mittelgebirge. Neumann Verlag, Radebeul.
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. Landschaftsgenese und Landschaftsökologie 13, TU Braunschweig.
- BRONSTERT, A. (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. In: Mitteilungen des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft der TU Karlsruhe. H. 46, Universität Karlsruhe.
- BRONSTERT, A. / FRITSCH, U. / KATZENMAIER, D. (2001): Quantifizierung des Einflusses der Landnutzung und -bedeckung auf den Hochwasserabfluss in Flussgebieten. UBA – Projektbericht, Förderkennzeichen: 29724508, Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam.
- BRONSTERT, A. / SEIERT, S. / OBERHOLZER, G. (1993): Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkungen auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg.
- BÜDEL, J. (1981): Klima-Geomorphologie. Gebrüder Bornträger, Berlin / Stuttgart.
- BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE FORSTLICHES UMWELTMONITORING, Level II Ad hoc AG „Wasserhaushalt“ (2003): Wasserhaushalt von Waldökosystemen: Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen. Hrsg.: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL), Referat 533.
- BURGER, H. (1937): Entwässerung und Aufforstungen. Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. 5. Mitteilung der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen. Bd. 20, H.1, S. 5-100.
- BÜTTNER, U. / FÜGNER, D. / WINKLER, U. (2001): Das Hochwasser am 5./6. Juli 1999 im Raum Marienberg im Erzgebirge. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Jg. 45, H.3, S. 102-112.
- CLAUSS, H. 1996: Das Erzgebirge. Weltbild Verlag, Augsburg.

- DEUTSCHMANN, G. / MALESSA, V. / RUMMENHOHL, V. (1994): Bestimmung der Lagerungsdichte in stark skeletthaltigen Böden. Zeitschrift f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, H.157, S. 77-79.
- DIERCKE WELTATLAS (1996). Westermann Schulbuchverlag GmbH, Braunschweig.
- DIN 19681 (1999): Entnahme von Bodenproben. In: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. In: Beuth (Hrsg.): DIN-Taschenbuch 187. Boden 1. Bodenkundliche Standortbeurteilung, Bewässerung, Entwässerung, Deponietechnik. 4. Auflage, Berlin.
- DIN 19682-7 (1997): Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrometer. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen. In: Beuth (Hrsg.): DIN-Taschenbuch 187. Boden 1. Bodenkundliche Standortbeurteilung, Bewässerung, Entwässerung, Deponietechnik. 4. Auflage, Berlin.
- DIN 19684-3: Bestimmung des Glühverlustes und des Glührückstandes. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen. In: Beuth (Hrsg.): DIN-Taschenbuch 187. Boden 1. Bodenkundliche Standortbeurteilung, Bewässerung, Entwässerung, Deponietechnik. 4. Auflage, Berlin.
- DIN ISO 11272 (Entwurf 1994): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte. In: Beuth / Wiley-VCH (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Bd. 6: Physikalische Untersuchungsverfahren. Berlin / Wien / Zürich.
- DIN ISO 11277 (Entwurf 1994): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden – Verfahren durch Sieben und Sedimentation nach Entfernen der löslichen Salze, der organischen Substanz und der Carbonate. In: Beuth / Wiley-VCH (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Bd. 6: Physikalische Untersuchungsverfahren. Berlin / Wien / Zürich.
- DIN ISO 11461: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wassergehalts des Bodens als Volumenanteil mittels Stechzylinder; Gravimetrisches Verfahren. In: Beuth / Wiley-VCH (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Bd. 6: Physikalische Untersuchungsverfahren. Berlin / Wien / Zürich.

- DIN ISO 11508: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Kornrohdichte. In: Beuth/ Wiley-VCH (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen. Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter. Physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren. Gesetzliche Regelwerke. Bd. 6: Physikalische Untersuchungsverfahren. Berlin / Wien / Zürich.
- DWD = DEUTSCHER WETTERDIENST (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland: KOSTRA. Offenbach a. Main.
- EIJKELKAMP - AGRISEARCH EQUIPMENT (Hersteller) (1999): Gebrauchsanweisung zum Doppelring-Infiltrimeter Set.
- EISMANN, L. (1995): Sachsen. In: Benda, I.: Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Borntraeger, Berlin / Stuttgart.
- ENDLICHER, W. (2000): Mitteleuropa und Alpen. In: Endlicher, W. & Weischet, W. (2000): Regionale Klimatologie. Teil 2: Die alte Welt. Europa, Afrika, Asien. B.G. Teubner, Stuttgart / Leipzig.
- ENGLER, A. (1919): Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen, 12.
- FALTBLATT FORSTAMT OLBERNHAU (2004): Forstamt Olbernhau - Ein sächsisches Forstamt stellt sich vor. (Hrsg.): Landesforstpräsidium des Freistaates Sachsen.
- FELDWISCH, N. / KUNTZ, S. / MAYER, S. (2001): Methodenvergleich zur Datengewinnung und -nutzung im Bereich des Bodenschutzes. In: UBA (Hrsg.): Texte 38/01, Forschungsbericht 29971236.
- FENNER, S. (1997): Langjährige Verdichtungswirkung durch unterschiedliche Achslasten auf einem Löß-Ackerstandort. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 160, S. 157-164.
- FIEDLER, H.-J. (1988): Bodenkundliches Praktikum. In: TU Dresden/ Sektion Forstwirtschaft, Wissenschaftsbereich Bodenkunde & Standortslehre (Hrsg.). Dresden / Tharandt.
- FOJT, W. (1968a): Karte 1: 500.000 „Normalwerte der Niederschlagssumme - Jahr“. Kartografické nakladatelství, Praha. In: Haake, R. / Körber, H. (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. Akademie Verlag, Berlin.
- FOJT, W. (1968b): Karte 1: 500.000 „Normalwerte der Niederschlagssumme - Juli“. Kartografické nakladatelství, Praha. In: Haake, R. / Körber, H. (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. Akademie Verlag, Berlin.

- FOJT, W. (1968c): Karte 1: 500.000 „Mittlere Zahl der Tage mit Schneedecke – November bis April“. Kartografické nakladatelství, Praha. In: Haake, R. / Körber, H. (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. Akademie Verlag, Berlin.
- GERMANN, P. (1981): Untersuchungen über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgebiet Rietholzbach. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Bd. 51, Zürich.
- HAAKE, R. / KÖRBER, H. (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. Akademie Verlag, Berlin.
- HARTGE, K.H. / HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke, Stuttgart.
- HENDL, M. (2002): Das Klima. In: Liedtke (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes Verlag, Gotha, S. 17-126.
- HERRMANN, A. / KOLL, J. / LEIBUNDGUT, P. / MALOSZEWSKI, R. / RAU, R. / RAUERT, W. / SCHÖNIGER, M. / STICHLER, W. (1989): Wasserumsatz in einem kleinen Einzugsgebiet im paläozoischen Mittelgebirge. In: Landschaftsökologie und Umweltforschung 17, Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig.
- HILDEBRAND, E.E. / WIEBEL, M.: (1982): Der Einfluss der Befahrung auf die Qualität von Forststandorten, dargestellt an bodenphysikalischen Kenngrößen. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 153. Jg., H.1/2.
- HORN, R. / HARTGE, K.H. (2001): Das Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. In: Wasser & Boden, H.53, S. 13-20.
- HORTON, R.E. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. In: Transactions – America Geophysical Union, 14, S. 446-460.
- HUSAIN, J. (2002) : Wasserinfiltration in tonigen und strukturierten Böden auf unterschiedlichen Skalen und bei Nutzungsänderung. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, 18, BTU, XIV, Cottbus.
- HYDROTEC GmbH (2003): Handbuch NASIM Version 3.2.0, Stand 10/ 2003. Aachen.
- INFORMATIONSMATERIAL LANDESFORSTPRÄSIDIUM OLBERNHOU / ABT. WALDÖKOLOGIE UND FORSTEINRICHTUNG / REFERAT WALDBAU/ HERING, S. (2005) (unveröffentl.): Einführung zur Exkursion „Erzgebirge“ am 23.05.2005 der Freien Universität Berlin.
- INFORMATIONSMATERIAL SÄCHSISCHES FORSTAMT OLBERNHOU (2005) (unveröffentl.): Ausgewählte Informationen zur Physisch-Geographischen Exkursion der freien Universität Berlin und der Karls-Universität Prag am 23. Mai 2005.

- JORDAN, H. / WEDER, H.-J. (HG.) (1995): Hydrogeologie - Grundlagen und Methoden. Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen Anhalt, Sachsen, Thüringen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- KADEN, A. (2001a): Rauchschäden im Erzgebirge – Teil 1. In: Sächsische Heimatblätter. Zeitschrift für Sächsische Geschichte, Denkmalpflege, Natur und Umwelt. H. 1. Sächsisches Druck- und Verlagshaus, Dresden, S. 2-15.
- KADEN, A. (2001b): Rauchschäden im Erzgebirge – Teil 2. In: Sächsische Heimatblätter. Zeitschrift für Sächsische Geschichte, Denkmalpflege, Natur und Umwelt. H. 2. Sächsisches Druck- und Verlagshaus, Dresden, S. 77-92.
- KARL, J. / PORZELT, M. / BUNZA, G. (1985): Oberflächenabfluss und Bodenerosion bei künstlichen Starkniederschlägen. In: DVWK-Schriften (1985): Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen. H. 71, Hamburg/ Berlin, S. 37-102.
- KIRCHMANN, H. / GERZABEK, M.H. (1999): Relationship between soil organic matter and micropores in a long term experiment at Ultuna, Sweden. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 162, S. 493-498.
- KOWALKE, H. (2000): Sachsen. Perthes Länderprofile. Justus Perthes Verlag, Gotha/ Stuttgart.
- KUNTZE, H. / ROESCHMANN, G. / SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- LAWA = LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz: Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen. Stuttgart.
- LEHNHARDT, F. (1985): Einfluss der morpho-pedologischen Eigenschaften auf Infiltration und Abflussverhalten von Waldstandorten. In: DVWK-Schriften 71, S. 231-260.
- LFUG = SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2002a): Hydrologisches Handbuch. Teil 1: Pegelverzeichnis. Dresden.
- LFUG = SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2002b): Hydrologisches Handbuch. Teil 3: Gewässerkundliche Hauptwerte. Dresden.
- LFUG = SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2002c): Schmidt, P.A. et al.: Potenzielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200 000. Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege. Dresden.
- LIEDTKE, H. (2002): Oberflächenformen. In: Liedtke (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes Verlag, Gotha, S. 127-150.

- LIEDTKE, H. / MARCINEK, J. (Hrsg.) (2002): *Physische Geographie Deutschlands*. Klett-Perthes, Gotha.
- LINDENKREUZ, J. (in Vorb.): *Charakterisierung der Moore im Einzugsgebiet der Natzschung (Mittleres Erzgebirge) im Hinblick auf ihren Beitrag zur Hochwassergenerierung*.
- LÖSCHER, H. (1967): *Die Besiedlung des Erzgebirges*. In: Clauß (Hrsg.): *Das Erzgebirge – Land und Leute*. Verlag Weidlich, Frankfurt, S. 26-68.
- LWF = BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD- UND FORSTWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2004): *Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wald und Forstwirtschaft in Bayern. Ergebnisse eines Demonstrationsvorhabens*. In: LWF Wissen, H. 44, Freising.
- MENDEL, H.G. (2000): *Elemente des Wasserkreislaufs – Eine kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung*. BfG = Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.). Analytica, Berlin.
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (Hrsg.) (1966): *Hydrographisches Kartenwerk*. Berlin.
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST (Hrsg.) (1953): *Klimaatlas für das Gebiet der DDR*. Akademie Verlag, Berlin.
- MOLLENHAUER, K. / MÜLLER, S. / WOHLRAB, B. (1985): *Oberflächenabfluss und Stoffabtrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen – Untersuchungsergebnisse aus dem Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre*. In: DVWK-Schriften: *Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen*, H. 71, Hamburg / Berlin, S. 103–184.
- MOLTSCHANOW, A.A. (1957): *Die hydrologische Rolle des Kiefernwaldes auf Sandböden*. Deutscher Bauernverlag, Berlin (DDR).
- MORENO, F. / SOMMER, K. / CZERATZKI, W. (1974): *Einige physikalische Untersuchungen an der Schleppersohle einer degradierten Schwarzerde*. In: FAL-Landbauforschung Völkenrode 24/2, S. 123-132.
- MÜLLER, G. (1964): *Methoden der Sediment-Untersuchung*. Sediment-Petrologie, Teil 1. Schweizerbart, Stuttgart.
- NIEHOFF, D.(2001): *Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala*. Dissertation, Universität Potsdam.
- PESCHKE, G. (2001): *Bodenwasserhaushalt und Abflussbildung*. In: *Geographische Rundschau*. Westermann Verlag, Braunschweig, H. 5, S. 18-23.

- PIETZSCH, K. (1962): Geologie von Sachsen. VEB, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- PLATE, E.J. / BRONSTERT, A. (1994): Wasserhaushalt und Wassertransport in tonigen Böden. DFG-Rundgespräch: Ingenieurgeologie, Physikochemie und Gefüge von Tonen und kolloidalen Systemen, 10/11. März 1994, Bonn, S. 10-16.
- RAMELOW, M. (2006) (unveröffentl.): Erstellung einer digitalen Bodenkarte für das Einzugsgebiet der Natzschung im Mittleren Erzgebirge.
- RAWLS, W.J. / AHUJA, L.R. / BRAKENSIEK, D.L. / SHIRMOHAMMADI, A. (1992): Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D.R. (Hrsg.): Handbook of hydrology. McGraw Hill, New York, Kap. 5.1- 5.51.
- RENGER, M. (1971): Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 130, H.1, S. 53-67.
- RICHTER, H. (2002): Die Mittelgebirge zwischen Weißer Elster und Görlitzer Neiße. In: Liedtke (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes Verlag, Gotha, S. 520-538.
- ROSEMAN, H.-J. (1988): Die Auswirkungen des Waldsterbens auf den Hochwasserabfluss kleiner Einzugsgebiete am nördlichen Alpenrand – Versuch einer Abschätzung. INTERPREVENT, Bd. 1, S. 87-97.
- SCHÄFER, R. (1981): Möglichkeiten der Bilanzierung und Minderung der Bodenerosion und der Oberflächenabflüsse von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft 6, München.
- SCHAFFER, G. / COLLINS, H.J. (1966): Eine Methode zur Messung der Infiltrationsrate im Felde. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 7. Jg.
- SCHAMS, H. (1967): Die Problematik der Wasserdurchlässigkeitsmessung in Labor- und Felduntersuchungen auf Mineralböden. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- SCHAEFFER, F. / SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin / Heidelberg.
- SCHERZER, J. (2000): Bestimmung von pF-Kurven für die Level II-Standorte Bautzen, Colditz, Cunnersdorf, Klingenthal und Olbernhau. Arbeitsberichte an die Sächsische Landesanstalt für Forsten, Dres. Raben, Andreae.

- SCHERZER, J. / HEINKELE, T. / MARTIN, N. (2002): Bestimmung der Lagerungsdichte und der Porosität mit der PU-Schaum-Methode an den Sächsischen Level II – Standorten Klingenthal, Olbernhau und Cunnersdorf.
- SCHNEIDER, H. (1967): Die erzgebirgische Landschaft. In: Clauß (Hrsg.): Das Erzgebirge – Land und Leute. Verlag Weidlich, Frankfurt, S. 7-17.
- SCHNUG, E. / HANEKLAUS, S. (2002): Landwirtschaftliche Produktionstechnik und Infiltration von Böden – Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. In: FAL Agricultural Research (Hrsg.): Landbauforschung Völkenrode. Heft 4, S. 197-203.
- SCHWARZ, O. / FLÜGEL, W.A. (1988): Beregnungsversuche zur Erzeugung von Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwassererneuerung. In: Heidelberger Geographische Arbeiten, H.66, S. 169-200.
- SCHWARZ, O. (1982): Ein Vorschlag zur Ermittlung der minimalen Infiltrationsrate von Waldböden. In: Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 153. Jg., H.1/2, S. 208-212.
- SCHWARZ, O. (1985): Direktabfluss, Versickerung und Bodenabtrag in Waldbeständen – Messungen mit einer transportablen Beregnungsanlage in Baden-Württemberg. In: DVWK-Schriften: Beiträge zu Oberflächenabfluss und Stoffabtrag bei künstlichen Starkniederschlägen, H. 71, Hamburg / Berlin, S. 185-231.
- SCHWARZ, O. (1986): Zum Abflussverhalten von Waldböden bei künstlicher Beregnung. In: Einsele (Hrsg.): Das landschaftsökologische Forschungsprojekt Naturpark Schönbusch. DFG-Forschungsbericht, S. 161-179.
- SEEGERT, J. / ARMBRUSTER, M. / FEGER, K.H. / BERNHOFER, C. (2003): Einfluss unterschiedlicher Bestockung auf die Dynamik des Gebietsabflusses. In: AFZ – Der Wald, H.8, S. 419-423.
- SMUL = STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT DES FREISTAATES SACHSEN (HRSG.) (1999): Verwaltungsvorschrift des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über die Waldbaugrundsätze für den Staatswald des Freistaates Sachsen (Landeswald). Dresden.
- SMUL = STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT DES FREISTAATES SACHSEN (Hrsg.) (2003): Forstbericht. Dresden.
- SMUL = STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT DES FREISTAATES SACHSEN (Hrsg.) (2004): Waldzustandsbericht 2004. Dresden.

- SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung: ein Konzept zur Lösung agrar-relevanter Bodenschutzprobleme. In: FAL – Landbauforschung Völkenrode, VIII, Braunschweig.
- STRÄßER, M. (1993): Klimadiagramme und Klimadaten. Temperatur und Niederschlag im Zeitraum 1951-1980. Duisburger Geographische Arbeiten, Bd.10, Dortmund.
- TEEPE, R. / BEESE, F./ DILLING, H. (2000): Abschätzung der Luft- und Wasserspeicherkapazität in Waldböden. Freiburger Forstliche Forschung: Berichte.
- UHLENBROOK, S. / LEIBUNDGUT, C. (1997): Abflussbildung bei Hochwasser. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz. o.O.
- VEIT, H. / MAILÄNDER, R. / VONLANTHEN, C. (2002): Periglaziale Deckschichten im Alpenraum: bodenkundliche und landschaftsgeschichtliche Bedeutung. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, 146, H.4, S. 6-14. Justus Perthes Verlag, Gotha.
- VÖLKEL, J. (1995): Periglaziale Deckschichten und Böden im Bayerischen Wald und seinen Randgebieten als geogene Grundlagen landschaftsökologischer Forschung im Bereich naturnaher Waldstandorte. In: ZfG, Berlin / Stuttgart. Bd. 96, S. 97-106.
- VÖLKEL, J. / ZEPP, H. / KLEBER, A. (2002): Periglaziale Deckschichten in Mittelgebirgen – ein offenes Forschungsfeld. In: Berichte zur deutschen Landeskunde. Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde, Flensburg. Bd. 76, H.2/3, S. 101-114.
- WAGENBRETH, O. / STEINER, W. (1990): Geologische Streifzüge, Landschaft und Erdgeschichte zwischen Kap Arkona und Fichtelberg. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- WAGENBRETH, O. / WÄCHTLER, E. (Hrsg.) (1990): Bergbau im Erzgebirge – Technische Denkmale und Geschichte. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- WAHL, N.A. / BENS, O. / SCHÄFER, B. / HÜTTL, R.F. (2002): Veränderung pedo-hydrologischer Eigenschaften als Folge differenzierter Bewirtschaftung von Waldböden. In: Bens, O. & Hüttl, R.F. (Hrsg): Bodengeographische Studien stark veränderter Standorte – Monitoring, Modellierung und Bewertung. BTU Cottbus, Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Eigenverlag, S. 48-58.
- WILHELM, F. (1997): Hydrogeographie. Das Geographische Seminar. Westermann Verlag, Braunschweig.
- ZEPP, H. / HERGET, J. (2001): Bodenwasser – Grundlagen, Einflussfaktoren und geökologische Bezüge. In: Geographische Rundschau. Jahrgang 53, H.5, S. 10-17.

ZÜHLKE, D. (Hrsg.) (1985): Um Olbernhau und Seiffen – Ergebnisse der heimatkundlichen Bestandsaufnahme in den Gebieten von Zöblitz, Olbernhau, Neuwernsdorf und Rübenau. In: Werte unserer Heimat. Bd. 43. Akademie-Verlag, Berlin.

ZUIDEMA, P.K. (1985): Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich. H.79, Zürich.

### **Internetquellen**

LANDESFORSTPRÄSIDIUM SACHSEN (Hrsg.) (2005): Standortverhältnisse in Sachsen  
[http://www.forsten.sachsen.de/de/wu/organisation/obere\\_behoerden/landesforstpraesidium/graupa/waldundumwelt/](http://www.forsten.sachsen.de/de/wu/organisation/obere_behoerden/landesforstpraesidium/graupa/waldundumwelt/)  
(Zugriff 06.09.2005)

STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN (Hrsg.) (2005): Kreisstatistik Sachsen. <http://www.statistik.sachsen.de/Index/22kreis/unterseite22.htm>.  
(Zugriff 10.10.2005)

## Kartenverzeichnis

- BODENKARTE DES FREISTAATES SACHSEN (1998). Blatt L 5346 Olbernhau. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Maßstab 1:50.000.
- BODENKARTE (1991). Blatt 01-44, Vejprty. Hrsg.: Tschechisches Katasteramt, Prag. Maßstab: 1:50.000.
- BODENKARTE (1991). Blatt 02-31, Litvinov. Hrsg.: Tschechisches Katasteramt, Prag. Maßstab: 1:50.000.
- GEOLOGISCHE KARTE VOGTLAND/ ERZGEBIRGE (1995). Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Maßstab 1:100.000.
- GEOLOGISCHE KARTE VON SACHSEN (1922/ 1926). Blatt 129, Zöblitz. Hrsg.: Finanzministerium. II. Auflage, Maßstab 1:25.000.
- GEOLOGISCHE SPEZIALKARTE DES KÖNIGREICHS SACHSEN (1886). Section Kühnhaide-Sebastiansberg. Hrsg.: Königliches Finanzministerium. No. 140, Maßstab 1:25.000.
- GEOLOGISCHE SPEZIALKARTE DES KÖNIGREICHS SACHSEN (1888). Section Olbernhau-Purschenstein. Hrsg.: Königliches Finanzministerium. No.130 &. No.131, Maßstab 1:25.000.
- MITTELMAßSTÄBIGE LANDWIRTSCHAFTLICHE STANDORTKARTIERUNG (1980). Blatt 58, Annaberg-Buchholz. Hrsg.: Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Maßstab 1:100.000.
- SLUG = SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.) (2000): CIR – Biotoptypen und Landnutzungskartierung, Dresden.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-a-2, Olbernhau. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-a-3, Rübenu. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-a-4, Einsiedel Sensehammer. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-b-1, Olbernhau-Oberneuschönberg. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-b-3, Oberlochmühle. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.

- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-c-1, Jindřichova Ves. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1986). Blatt M-33-51-B-c-2, Kalek. Hrsg.: Ministerium für Nationale Verteidigung. Maßstab 1:10.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (2002). Blatt 5345, Zöblitz. Hrsg.: Landesvermessungsamt Sachsen. 3. Auflage, Dresden, Maßstab 1: 25.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (2002). Blatt 5346, Olbernhau. Hrsg.: Landesvermessungsamt Sachsen. 3. Auflage, Dresden, Maßstab 1: 25.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (2002). Blatt 5445, Hirtstein. Hrsg.: Landesvermessungsamt Sachsen. 3. Auflage, Dresden, Maßstab 1: 25.000.
- TOPOGRAPHISCHE KARTE (1982). Blatt 02-313, Nova Ves v Horach 25. Hrsg.: Tschechisches Katasteramt, Maßstab 1:25.000.
- TSCHECHISCHE BODENKARTE 50 (1991). Blatt Litvinov 2-31. (Hrsg.): Tschechisches Katasteramt, Maßstab 1:50 000.
- TSCHECHISCHES UMWELTMINISTERIUM (1992): Tschechische digitale Daten der Landnutzung des Einzugsgebiets der Flöha, keine weiteren Angaben vorhanden.

### Standort 1: Wiederaufforstungsfläche im Randbereich eines Hochwaldes (CZ)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
1	Braunerde	13° 15' 44,6" 50° 33' 22,1"	810	Tschechien
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
2°	30° NO	Oberhang	Aufforstung FP	junge Fichten, Gräser
Labordaten				
Horizonte	Ah	Bv	Cv	
Grenzen (cm)	0-14	14-44	44-61	
Bodenart (AG Boden 1994)	Ls3	Slu	Slu	
Sand (%)	42,4	44,8	43,8	
Schluff (%)	36,3	40,8	43,2	
Ton (%)	21,2	14,4	12,9	
Skelettgehalt (Masse%)	25,2	23,8	12,5	
Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	0,8	1,0	1,6	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,0	1,1	1,7	
Organik (%)	10,1	7,1	3,3	
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,3	2,5	2,6	
Porenvolumen (%)	66,4	59,6	39,4	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	48	42	30	
Feldkapazität (mm)	67,2	126,0	51,0	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	31	39	18	
nutzbare Feldkapazität (mm)	43,4	117,0	30,6	
Luftkapazität (Vol.%)	16	17	14	
Luftkapazität (mm)	22,4	51,0	23,8	
Gesamtporenvolumen (%)	64	59	44	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	32	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17	17-4	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30	11	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	210	15	10	10
Messtermin	August 04	Juli 05	Juli 05	Juli 05
Wassersättigung (Vol.%)	72	78	78	78
Variationsbreite (mm/h)	200			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	10			

Tab. 14: Standort 1 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 36: Standort 1 – lichte Aufforstungsfläche im Randbereich eines Hochwaldes

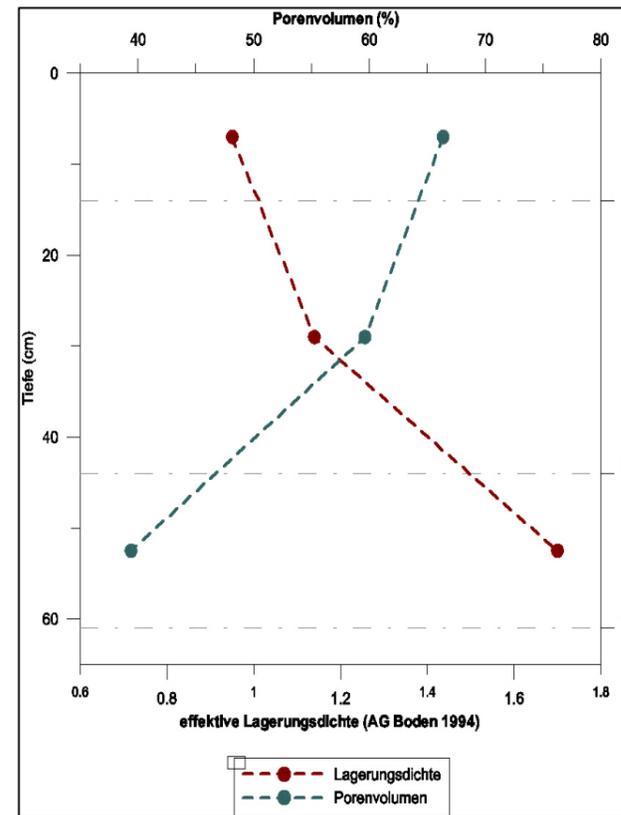


Abb. 37: Standort 1 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

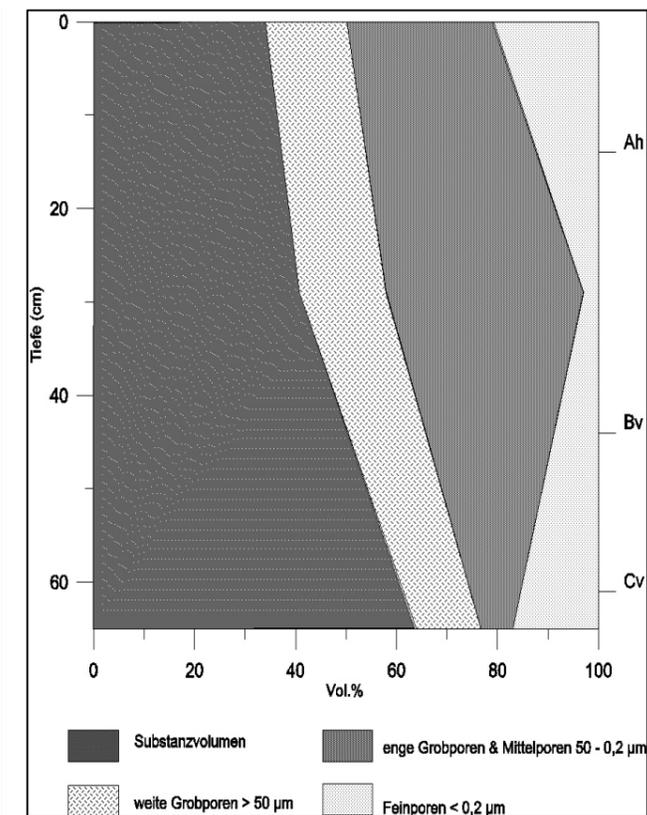


Abb. 38: Standort 1 – Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 2: lichte Wiederaufforstungsfläche (CZ)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
2	Braunerde	13° 15' 56,4" 50° 33' 40,6"	788 m	Tschechien
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
3°	346° NW	Unterhang	Aufforstung FP	Birken, junge Fichten, Lärchen, Tannen, Gras
Labordaten				
Horizont	Ah	Bv+Cv		
Grenzen (cm)	0-8	8-52		
Bodenart (AG Boden 1994)	Lu2	Slu		
Sand (%)	40,4	41,7		
Schluff (%)	40,8	42,5		
Ton (%)	18,8	15,9		
Skelettgehalt (Masse%)	22,4	26,5		
Rohdichte (g/cm³)	0,9	1,4		
Lagerungsdichte (AG Bod. 1994)	1,1	1,5		
Organik (%)	11,9	5,7		
Kornrohdichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,5	2,6		
Porenvolumen (%)	61,8	47,5		
Bodenwasserkennwerte (nach RENGNER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	52	41		
Feldkapazität (mm)	41,6	180,4		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	34	24		
nutzbare Feldkapazität (mm)	27,2	105,6		
Luftkapazität (Vol.%)	15	9		
Luftkapazität (mm)	12,0	39,6		
Gesamtporenvolumen (%)	67	50		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	59	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17		
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	465	54	36	10
Messtermin	Aug 04	Jul 05	Jul 05	Jul 05
Wassersättigung (Vol.%)	61	79	79	79
Variationsbreite (mm/h)	455	-	-	-
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	23	-	-	-

Tab. 15: Standort 2 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGNER (1971)



Abb. 39: Standort 2 - lichte Wiederaufforstungsfläche

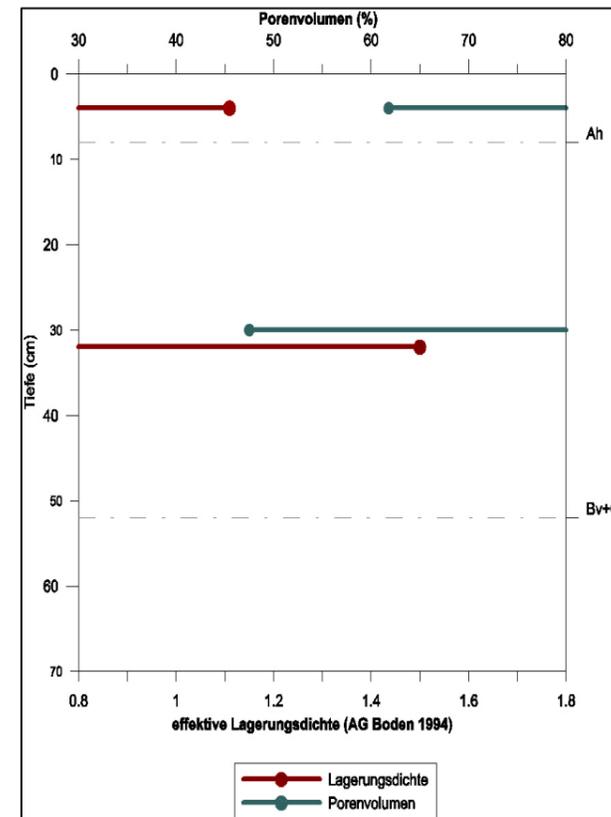


Abb. 40: Standort 2 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

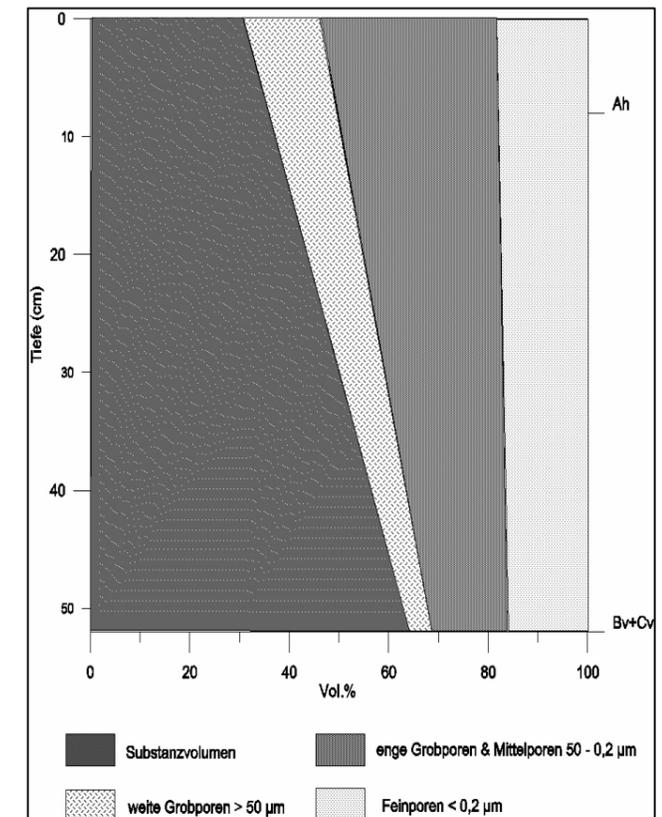


Abb. 41: Standort 2 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 3 - Hochwald nördlich Rügenau (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
3	Braunerde	13° 18' 14,3" 50° 36' 34,7"	762 m	Deutschland
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
0°	168° S	Kulminationsbereich	Hochwald FH	Fichten, Gräser
Labordaten				
Horizonte	Oh+Ah	Bv+Cv		
Grenzen (cm)	0-6	6-64		
Bodenart (AG Boden 1994)	Ls2	Uls		
Sand (%)	35,9	40,6		
Schluff (%)	43,9	50,6		
Ton (%)	20,2	8,7		
Skelettgehalt (Masse%)	19,1	22,9		
Rohdichte (g/cm³)	0,5	0,8		
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,7	0,9		
Organik (%)	31,3	11,9		
Kornrohdichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,0	2,4		
Porenvolumen (%)	74,2	66,5		
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	55	55		
Feldkapazität (mm)	33,0	319,0		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	36	39		
nutzbare Feldkapazität (mm)	21,6	226,2		
Luftkapazität (Vol.%)	15	12		
Luftkapazität (mm)	9,0	69,6		
Gesamtporenvolumen (%)	70	67		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	350	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125 - 42	42-17		
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	1134	440	642	186
Messtermin	Aug 04	Aug 04	Jul 05	Jul 05
Wassersättigung (Vol.%)	39	39	69	69
Variationsbreite (mm/h)	948	-	-	-
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	186	-	-	-



Abb. 42: Standort 3 - Hochwaldfläche

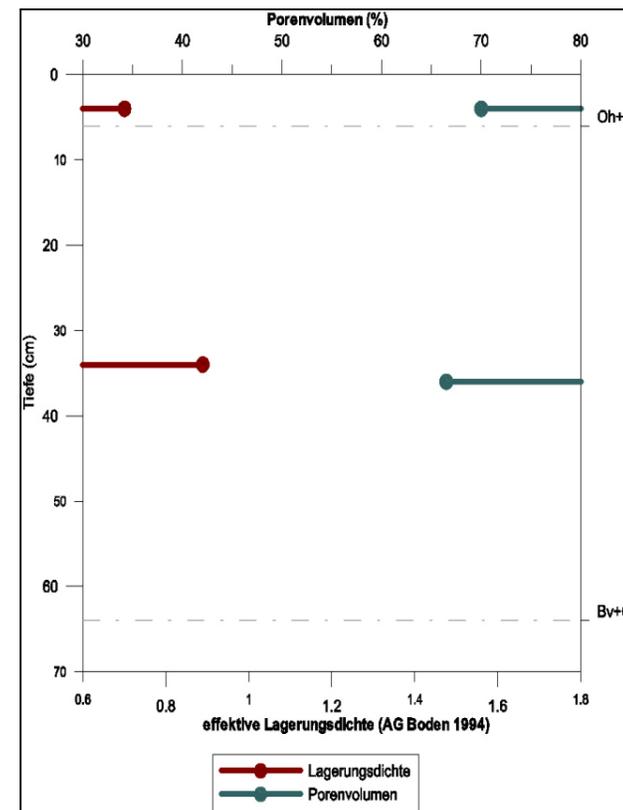


Abb. 43: Standort 3 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

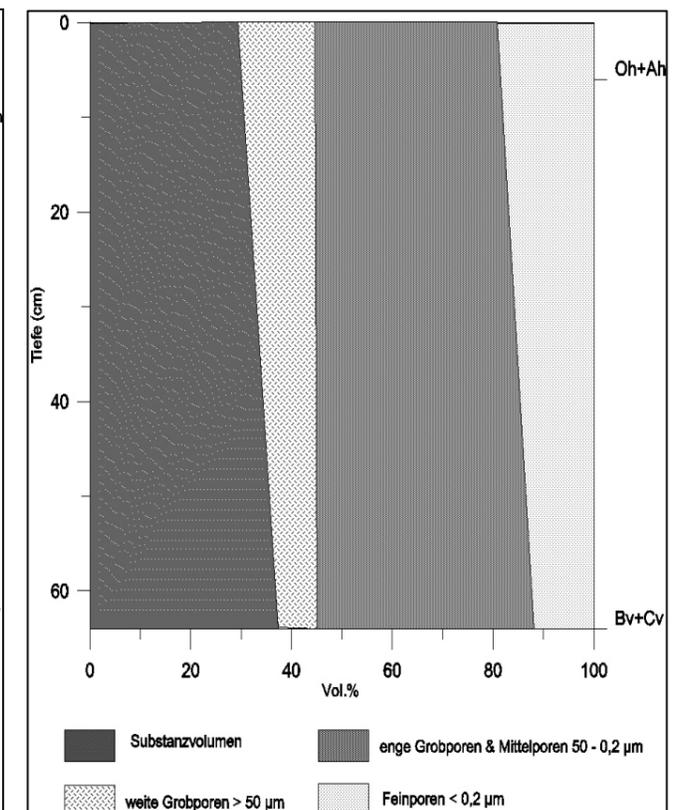


Abb. 44: Standort 3 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

Tab. 16: Standort 3 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)

### Standort 4: dicht bestandene Wiederaufforstungsfläche (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
4	Hang-Oxigley	13° 21' 25"	682 m	Deutschland
		50° 37' 23,8"		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
10°	SW	Mittelhang	Aufforstung FP	Erlen, Fichten, Birken
Labordaten				
Horizonte	Aa	sGo		
Grenzen (cm)	0-10	10-65		
Bodenart (AG Boden 1994)	Slu	Su3		
Sand (%)	46,4	58,4		
Schluff (%)	40,5	37,0		
Ton (%)	13,1	4,5		
Skelettgehalt (Masse%)	35,3	35,7		
Rohdichte (g/cm³)	0,6	1,6		
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,7	1,7		
Organik (%)	17,9	1,4		
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm³)	1,5	1,6		
Porenvolumen (%)	62,9	36,3		
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	56	23		
Feldkapazität (mm)	56,0	126,5		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	49	16		
nutzbare Feldkapazität (mm)	49,0	88,0		
Luftkapazität (Vol.%)	13	18		
Luftkapazität (mm)	13,0	99,0		
Gesamtporenvolumen (%)	69	41		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	587	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	42-17	17-4		
mittlere kf-Wert (mm/h)	30	11		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	312	312	465	
Messtermin	Mai 05	Jul 05	Jul 05	
Wassersättigung (Vol.%)	72	77	77	
Variationsbreite (mm/h)	153	-	-	
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	312	-	-	

Tab. 17: Standort 4 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 45: Standort 4 - dicht bewachsene Aufforstungsfläche

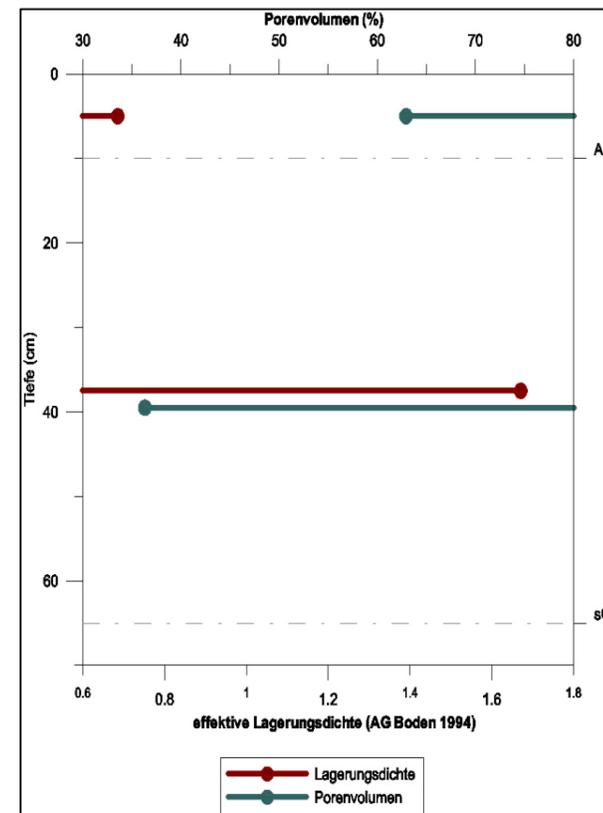


Abb. 46: Standort 4 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

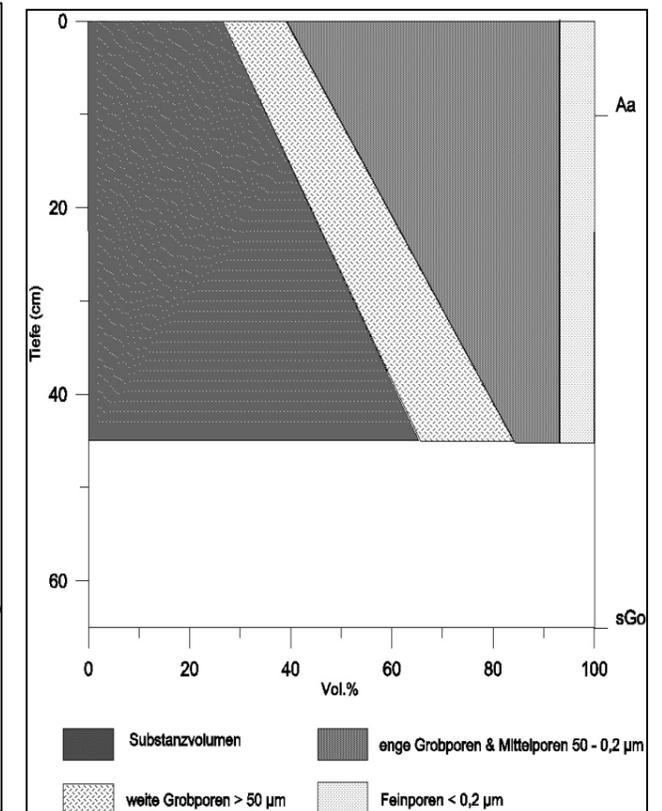


Abb. 47: Standort 4 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

## Standort 5: Kahlschlagfläche (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
5	Braunerde	13° 20' 53" 50° 37' 0,89"	678 m	Deutschland
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
8°	S/ SO	Oberhang	Kahlschlagfläche FB	Sukzessionsvegetation (Gräser)
Labordaten				
Horizonte	Ah	Bv	Bv+Cv	
Grenzen (cm)	0-6	6-30	30-81	
Bodenart (AG Boden 1994)	Si4	Si3	Su2	
Sand (%)	46,4	49,2	81,1	
Schluff (%)	40,5	39,0	15,7	
Ton (%)	13,1	11,8	3,2	
Skelettgehalt (Masse%)	18,6	17,5	39,4	
Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	1,0	1,3	1,5	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,1	1,4	1,6	
Organik (%)	11,7	5,7	2,7	
Kornrohdichte $\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,4	2,5	2,6	
Porenvolumen (%)	58,5	48,5	39,8	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	54	41	23	
Feldkapazität (mm)	32,4	98,4	117,3	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	35	22	21	
nutzbare Feldkapazität (mm)	21	52,8	107,1	
Luftkapazität (Vol.%)	14	13	18	
Luftkapazität (mm)	8,4	31,2	91,8	
Gesamtporenvolumen (%)	68	54	41	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	?	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125 - 42	125 - 42	17 - 4	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	84	11	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	0	10	0	0
Messtermin	Okt 04	Okt 04	Jul 05	Jul 05
Wassersättigung (Vol.%)	68	68	87	87
Variationsbreite (mm/h)	10	-	-	-
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	0	-	-	-

Tab. 18: Standort 5 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 48: Standort 5 - Kahlschlagfläche mit Sukzessionsvegetation

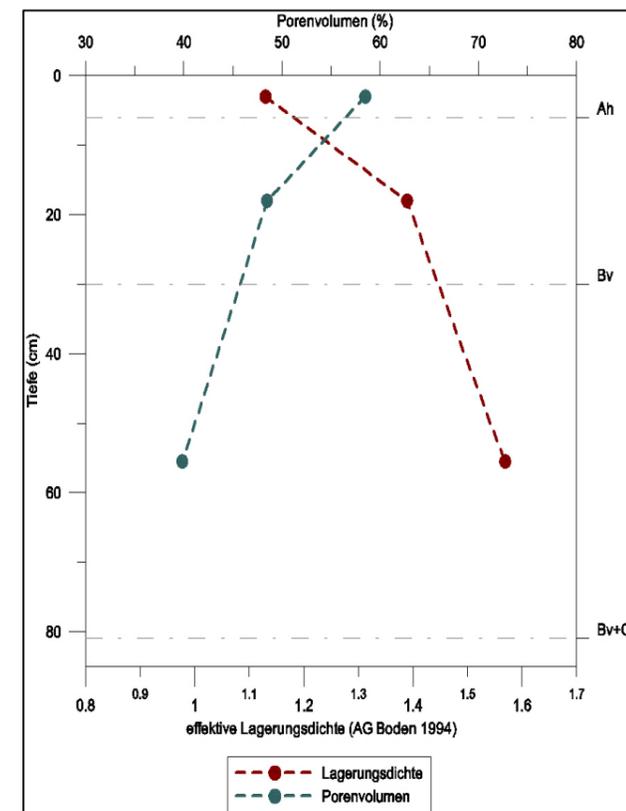


Abb. 49: Standort 5 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

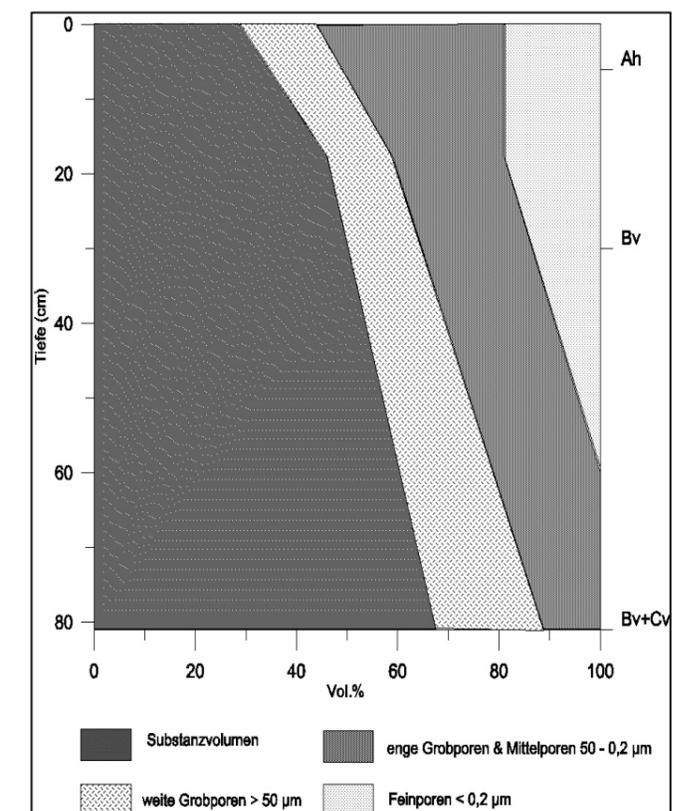


Abb. 50: Standort 5 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 6: dichte Wiederaufforstungsfläche (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
6	Hangpseudogley	13° 21' 26,3" 50° 37' 24,3"	682 m	Deutschland
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
6,5°	SW	Mittelhang	Aufforstung FP	Erlen, Fichten, Birken alles Jungpflanzen
Labordaten				
Horizonte	Oh+Aa	Sw	Sd	
Grenzen (cm)	0-10	10-19	19-36	
Bodenart (AG Boden 1994)	Lu	Slu	Uls	
Sand (%)	29,2	49,5	31,7	
Schluff (%)	51,5	42,3	57,5	
Ton (%)	19,3	8,3	10,9	
Skelettgehalt (Masse%)	23,3	63,6	20,4	
Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	0,2	1,5	-	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,4	1,5	-	
Organik (%)	42,6	6,0	-	
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,5	-	
Porenvolumen (%)	-	41,4	-	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	59	35	-	
Feldkapazität (mm)	59,0	31,5	-	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	33	22	-	
nutzbare Feldkapazität (mm)	33,0	19,8	-	
Luftkapazität (Vol.%)	13	13	-	
Luftkapazität (mm)	13,0	11,7	-	
Gesamtporenvolumen (%)	72	48	-	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	564	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125-17	42-17		
mittlere kf-Wert (mm/h)	71	30		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung			
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	300			
Messtermin	Mai 05			
Wassersättigung (Vol.%)	75			
Variationsbreite (mm/h)	-			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	300			

Tab. 19: Standort 6 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 51: Standort 6 - dichte Aufforstungsfläche mit Strüchern und Jungbäumen

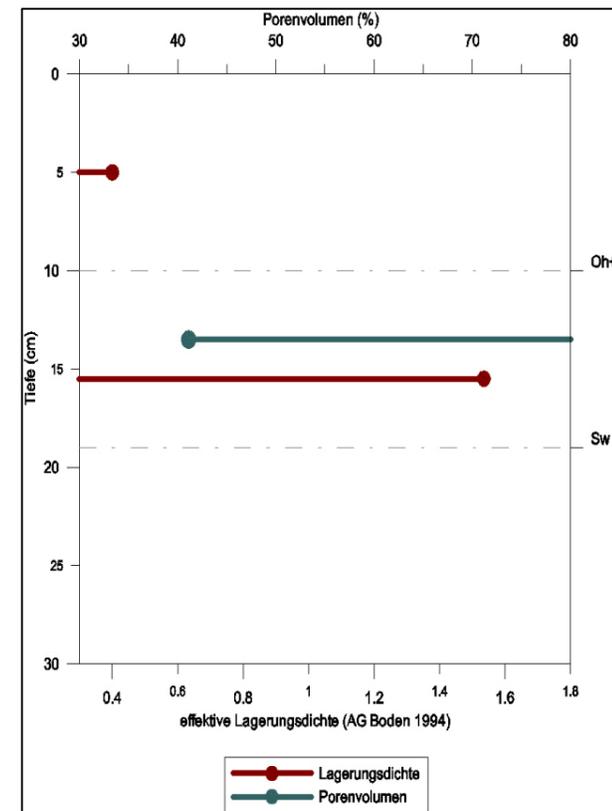


Abb. 52: Standort 6 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

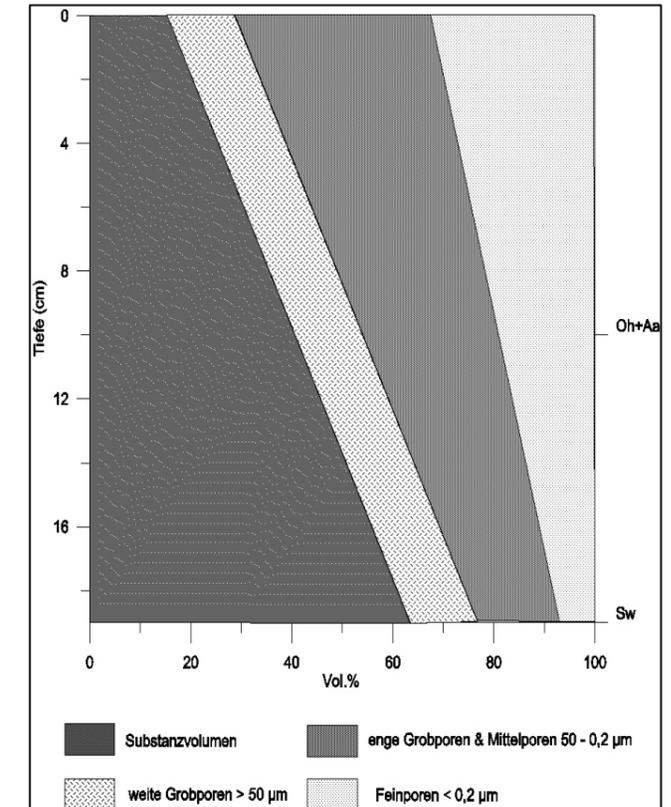


Abb. 53: Standort 6 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 9: Fichten - Hochwald (CZ)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
9	Braunerde	13° 23' 12,8'' 50° 36' 0,8''	816 m	Tschechien
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
4°	185° S	Mittelhang	Hochwald-Forst FH	Fichten, Gräser
Labordaten				
Horizonte	Oh+Ah	Bv		
Grenzen (cm)	0-9	9-58		
Bodenart (AG Boden 1994)	Lu	Uls		
Sand (%)	14,9	32,4		
Schluff (%)	57,1	52,7		
Ton (%)	28,0	14,8		
Skelettgehalt (Masse%)	2,7	13,2		
Rohdichte (g/cm³)	0,3	0,9		
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,5	1,0		
Organik (%)	31,3	13,0		
Kornrohddichte $\rho_B$ (g/cm³)	1,6	2,3		
Porenvolumen (%)	82,4	60,1		
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	59	56		
Feldkapazität (mm)	53,1	274,4		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	33	40		
nutzbare Feldkapazität (mm)	29,7	196,0		
Luftkapazität (Vol.%)	13	12		
Luftkapazität (mm)	11,7	58,8		
Gesamtporenvolumen (%)	72	68		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	1128	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125 - 17	42-17		
mittlere kf-Wert (mm/h)	71	30		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	1200	540	840	660
Messtermin	Okt 04	Okt 04	Jul 05	Jul 05
Wassersättigung (Vol.%)	33	33	44	44
Variationsbreite (mm/h)	660	-	-	-
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	600	-	-	-

Tab. 20: Standort 9 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 54: Standort 9 - Fichten-Hochwald

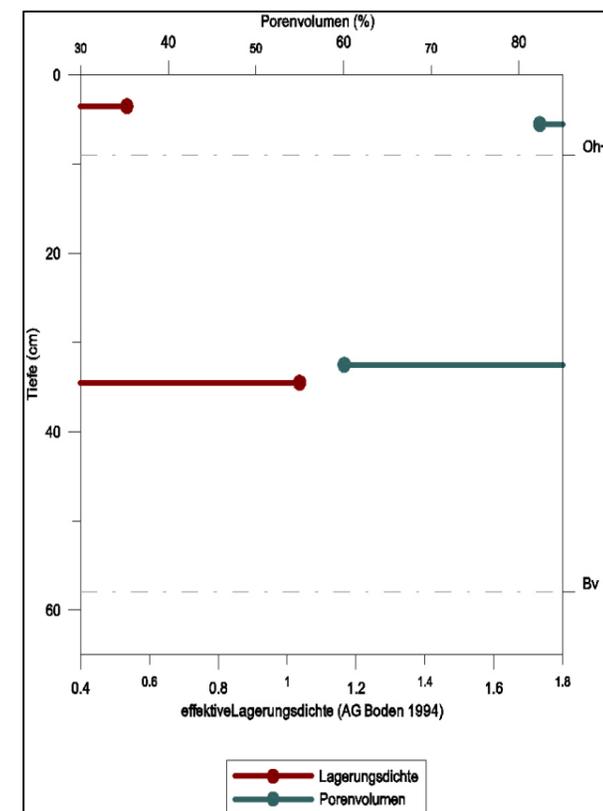


Abb. 55: Standort 9 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

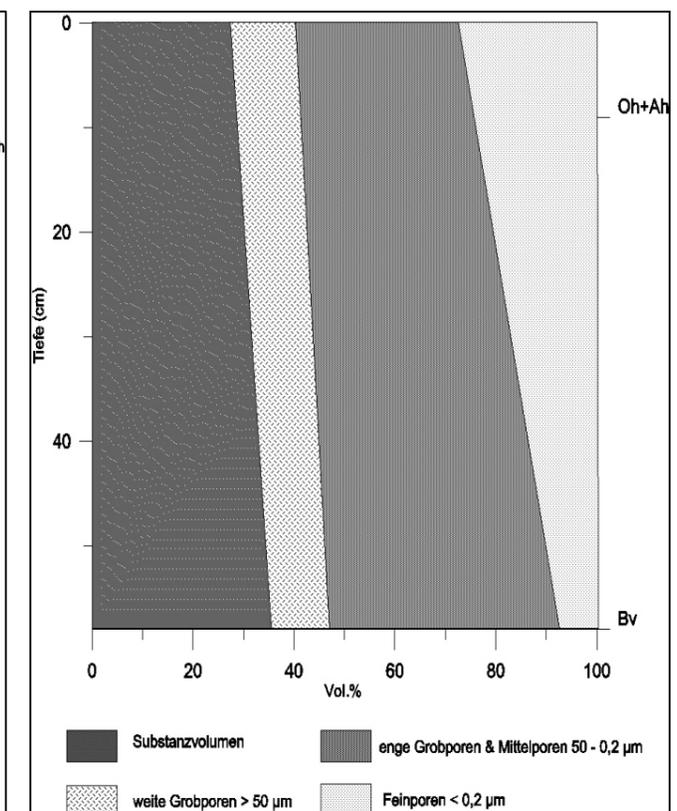


Abb. 56: Standort 9 – Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 10: lichter Hochwaldforst mit Jungbäumen (CZ)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietsteil		
10	Kolluvisol über	13° 16' 40,2"	795 m	Tschechien		
	Braunerde-Podsol	50° 35' 10,9"				
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation		
5°	105° O	Oberhang nahe	Aufforstung & Altbestand	Buche, Fichte, Birke		
		Kulminationspunkt	FP/ FH (AG Boden 1994)			
Labordaten						
Horizonte	M	rAh	Ae	Bsh	Bhs	Bv+Cv
Grenzen (cm)	0-12	12-15	15-17	17-26	26-57	57-91
Bodenart (AG Boden 1994)	Si3	Lt2	Ls3	Ls3	Su3	Su2
Sand (%)	55,0	21,4	43,5	48,5	57	79,4
Schluff (%)	33,5	47,4	39,2	33,5	35,2	16
Ton (%)	11,5	30,8	17,2	18	7,8	1,6
Skelettgehalt (Masse%)	30,2	3,2	19,0	28,3	29,7	60,9
Trockenrohddichte (g/cm³)	1,2	0,7	0,7	0,7	0,9	1,6
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,3	1,0	0,9	0,9	1	1,6
Organik (%)	7,2	9,8	9,8	9,8	6,2	3,9
Kornrohddichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,5	2,2	2,2	2,2	2,5	2,6
Porenvolumen (%)	51,2	66,4	66,4	66,4	64,6	39,8
Bodenwasserkennwerte (nach Renger 1971)						
Feldkapazität (Vol.%)	43	53	48,0	48	37	26
Feldkapazität (mm)	51,6	15,9	9,6	43,2	114,7	88,4
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	40	29	31,0	31	29	19
nutzbare Feldkapazität (mm)	48,0	8,7	6,2	27,9	89,9	64,6
Luftkapazität (Vol.%)	17	13	16,0	16	19	17
Luftkapazität (mm)	20,4	3,9	3,2	14,4	58,9	57,8
Gesamtporenvolumen (%)	60	66	64,0	64	56	43
Kf-Werte (nach HYDROTEC 2003)						
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	241	-	-	-	-	-
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	125-17	125-42	125-42	42-17	17-4
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	71	84	84	30	11
Infiltrationsergebnisse						
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung		
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	360	198	195	60		
Messtermin	Okt 04	Jul 05	Jul 05	Jul 05		
Wassersättigung (Vol.%)	66	76	76	76		
Variationsbreite (mm/h)	300	-	-	-		
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	128	-	-	-		

Tab. 21: Standort 10 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGIER (1971)



Abb. 57: Standort 10 - Mischwald mit Alt- und Jungbestand

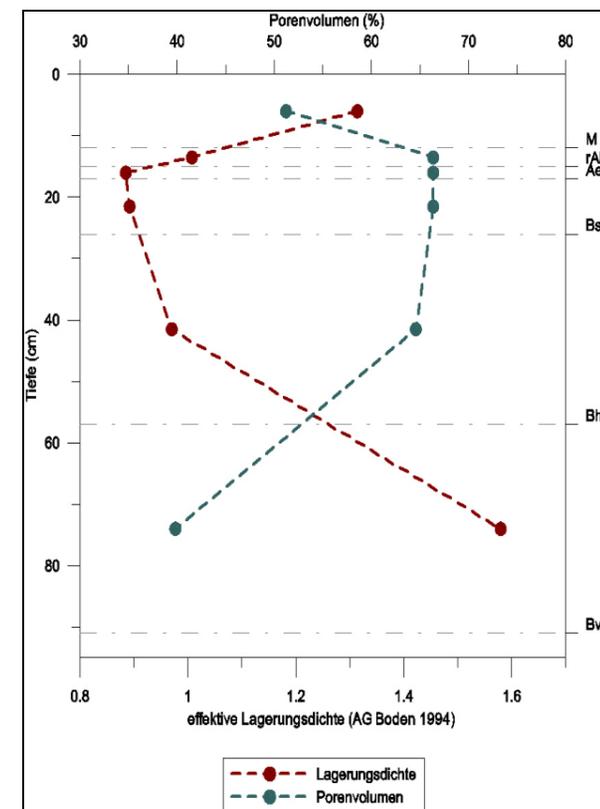


Abb. 58: Standort 10 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

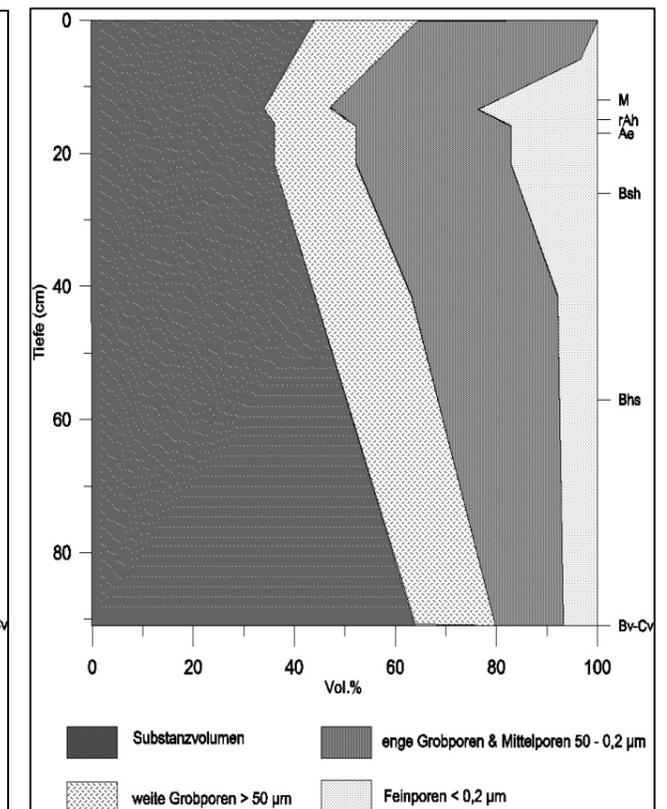


Abb. 59: Standort 10 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 11: Ackerfläche (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
11	Pseudogley-	13° 18' 13"	755 m	Deutschland
	Braunerde	50° 36' 38"		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
3°	195° S/ SW	Kulminationsbereich	Acker	Mai 05: vegetationslos
			A	Jul 05: Getreide (1m)
Labordaten				
Horizonte	Ap	Bv	Bv/Sw	
Grenzen (cm)	0-26	26-63	63-90	
Bodenart (AG Boden 1994)	SI4	Su4	Us	
Sand (%)	47,4	46,4	39,6	
Schluff (%)	38,0	46,0	54,5	
Ton (%)	14,6	7,7	5,9	
Skelettgehalt (Masse%)	29,6	36,9	53,1	
Rohdichte (g/cm³)	1,2	1,3	1,3	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,3	1,3	1,3	
Organik (%)	10,5	4,9	5,7	
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,4	2,5	2,5	
Porenvolumen (%)	51,4	49,9	50,2	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	47	40	39	
Feldkapazität (mm)	122,2	148,0	105,3	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	43	37	30	
nutzbare Feldkapazität (mm)	111,8	136,9	81,0	
Luftkapazität (Vol.%)	17	17	17	
Luftkapazität (mm)	44,2	62,9	45,9	
Gesamtporenvolumen (%)	64	57	56	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	28	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17	42-17	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30	30	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	7	10	45	60
Messtermin	Mai 05	Mai 05	Jul 05	Jul 05
Wassersättigung (Vol.%)	78	78	70	70
Variationsbreite (mm/h)	53	-	-	-
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	9	-	-	-

Tab. 22: Standort 11 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 60: Standort 11 - unbewachsene Ackerfläche (Okt. 05)

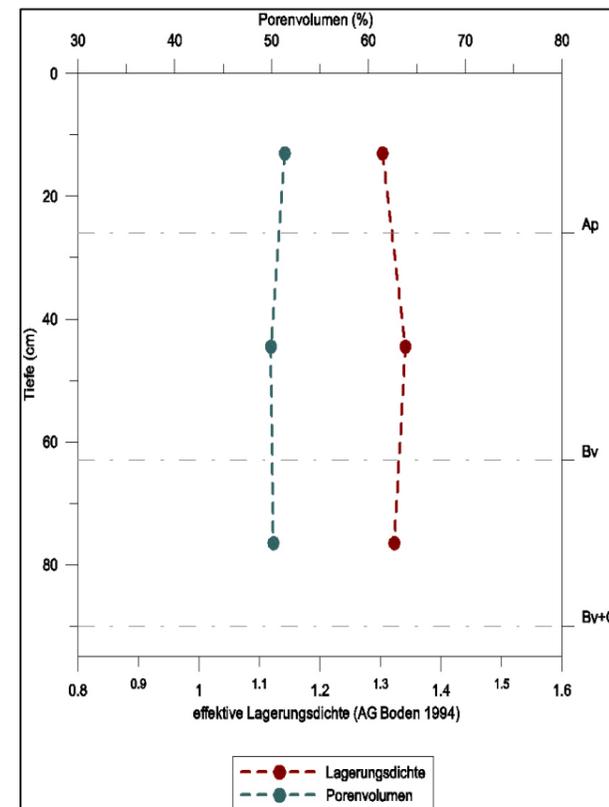


Abb. 61: Standort 11 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

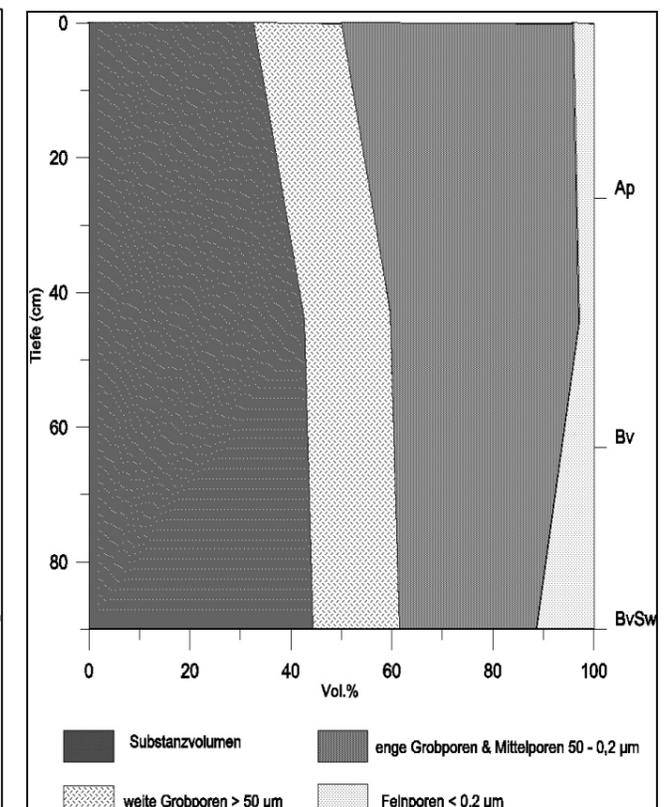


Abb. 62: Standort 11 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 12 - Rasenstandort auf Privatgrundstück (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
12	Braunerde	13° 19' 08,8" 50° 35' 04,4"	701 m	Deutschland
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
7°	152° SO	Oberhang	Garten GI (A, 1945)	Rasen
Labordaten				
Horizonte	rAp	Bv+Cv		
Grenzen (cm)	0-20	20-75		
Bodenart (AG Boden 1994)	Ls3	Sl2		
Sand (%)	49,3	68,7		
Schluff (%)	33,0	24,9		
Ton (%)	17,7	6,3		
Skelettgehalt (Masse%)	3,8	34,7		
Rohdichte (g/cm³)	1,0	1,4		
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,2	1,4		
Organik (%)	8,5	4,1		
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,5	2,6		
Porenvolumen (%)	57,7	46,8		
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	47	26		
Feldkapazität (mm)	94,0	143,0		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	30	19		
nutzbare Feldkapazität (mm)	60,0	104,5		
Luftkapazität (Vol.%)	16	17		
Luftkapazität (mm)	32,0	93,5		
Gesamtporenvolumen (%)	63	43		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	259	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	125-42		
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	84		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung		
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	110	165		
Messtermin	Okt 04	Mai 05		
Wassersättigung (Vol.%)	62	83		
Variationsbreite (mm/h)	55	-		
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	138	-		

Tab. 23: Standort 12 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 63: Standort 12 - Rasenfläche (Okt. 2004)

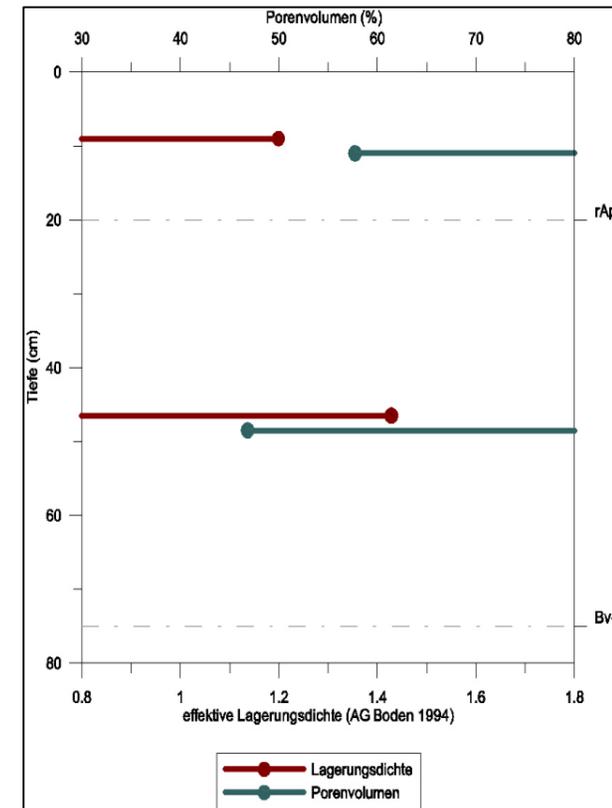


Abb. 64: Standort 12 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

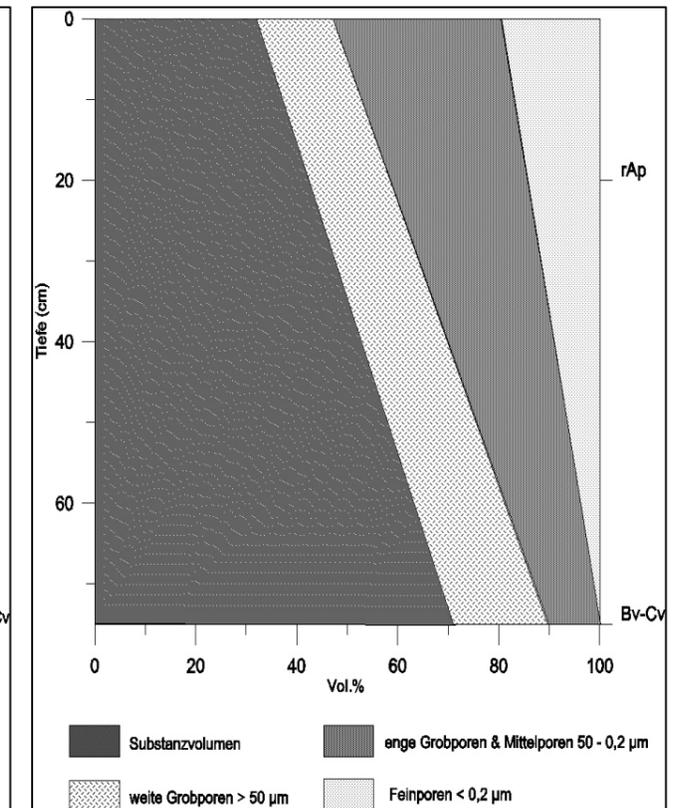


Abb. 65: Standort 12 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 13: Fichten-Hochwaldforst (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
13	Braunerde	13° 17,699´	749	Deutschland
		50° 37,198´		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
5°	N	Mittelhang	Hochwald	Fichten, Gräser
			<b>FH</b>	
Labordaten				
Horizonte	<b>Aa</b>	<b>Bv 1</b>	<b>Bv 2</b>	
Grenzen (cm)	0-8	8-86	86-92	
Bodenart (AG Boden 1994)	Ls2	Uls	Uls	
Sand (%)	32,1	27,1	33,6	
Schluff (%)	47,3	63,9	56,5	
Ton (%)	20,6	9,0	10,0	
Skelettgehalt (Masse%)	9,0	15,7	24,1	
Rohdichte (g/cm³)	0,2	1,0	-	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,4	1,1	-	
Organik (%)	19,2	11,0	-	
Kornrohddichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,2	2,4	-	
Porenvolumen (%)	90,4	60,1	-	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	56	53	-	
Feldkapazität (mm)	44,8	413,4	-	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	37	38	-	
nutzbare Feldkapazität (mm)	29,6	296,4	-	
Luftkapazität (Vol.%)	15	12	-	
Luftkapazität (mm)	12,0	93,6	-	
Gesamtporenvolumen (%)	71	65	-	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	761	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17	-	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30	-	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	990	195	615	
Messtermin	Jul 05	Jul 05	Jul 05	
Wassersättigung (Vol.%)	85	85	85	
Variationsbreite (mm/h)	795			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	<b>405</b>			

Tab. 24: Standort 13 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 66: Standort 13 – Hochwaldforst

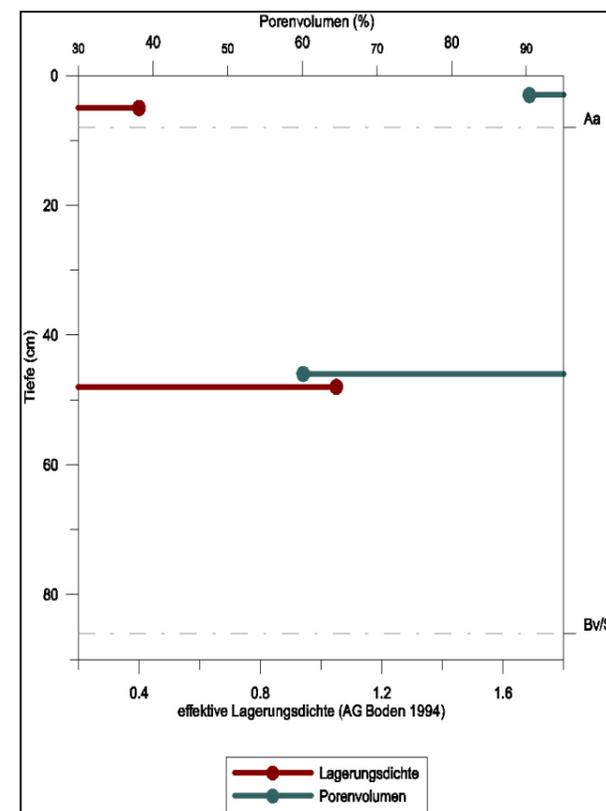


Abb. 67: Standort 13 - Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

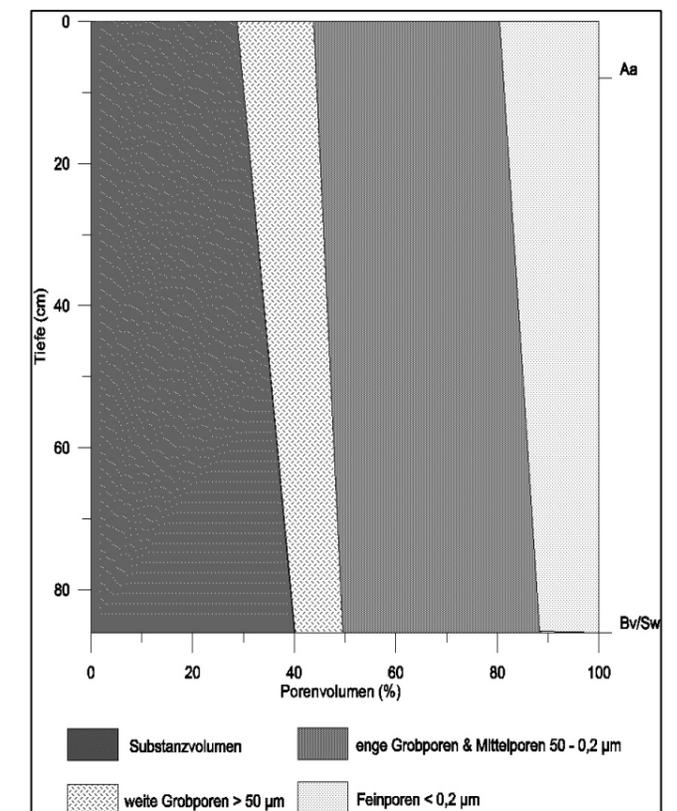


Abb. 68: Standort 13 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 14: Hochwaldforst (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
14	Braunerde	13° 17' 25,8 "	750	Deutschland
		50° 36' 13"		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
7 °	SW	Oberhang	Hochwald	Fichten, Gräser
			<b>FH</b>	
Labordaten				
Horizonte	Aa	Bs/Bv	(Bv) Cv	
Grenzen (cm)	0-8	8-39	39-93	
Bodenart (AG Boden 1994)	SI4	Su3	Su3	
Sand (%)	47,4	52,9	54,1	
Schluff (%)	37,6	40,0	40,0	
Ton (%)	14,9	7,1	6,0	
Skelettgehalt (Masse%)	18,0	13,8	19,2	
Rohdichte (g/cm³)	0,4	1,1	1,4	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,6	1,1	1,4	
Organik (%)	16,3	6,8	4,1	
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,3	2,5	2,5	
Porenvolumen (%)	81,1	58,1	45,8	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	56	39	26	
Feldkapazität (mm)	45	121	140	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	49	30	19	
nutzbare Feldkapazität (mm)	39	93	103	
Luftkapazität (Vol.%)	13	19	17	
Luftkapazität (mm)	10	59	92	
Gesamtporenvolumen (%)	69	58	43	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	1359	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17	42-17	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30	30	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	1200	246	1200	
Messtermin	Mai 05	Jul 05	Mai 05	
Wassersättigung (Vol.%)	74	73	74	
Variationsbreite (mm/h)	954			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	723			

Tab. 25: Standort 14 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGGER (1971)



Abb. 69: Standort 14 - Hochwaldforst

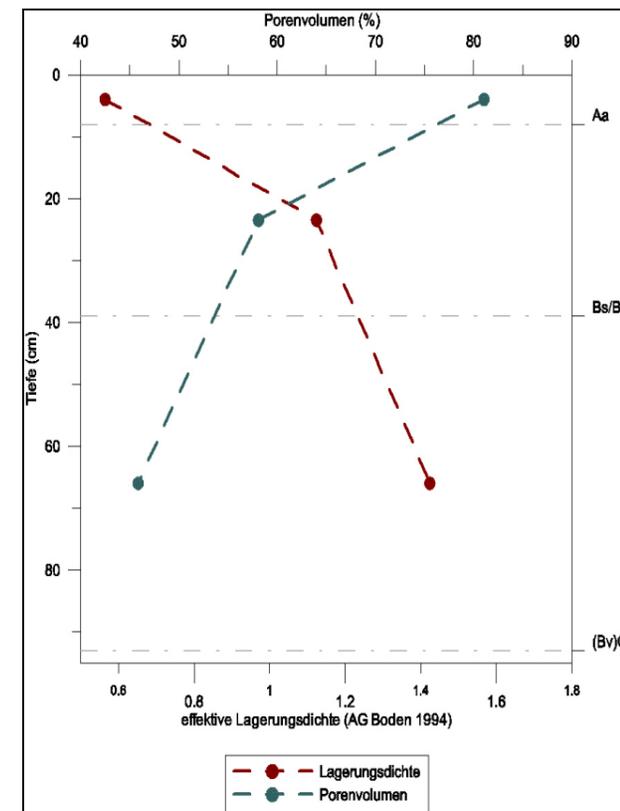


Abb. 70: Standort 14 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

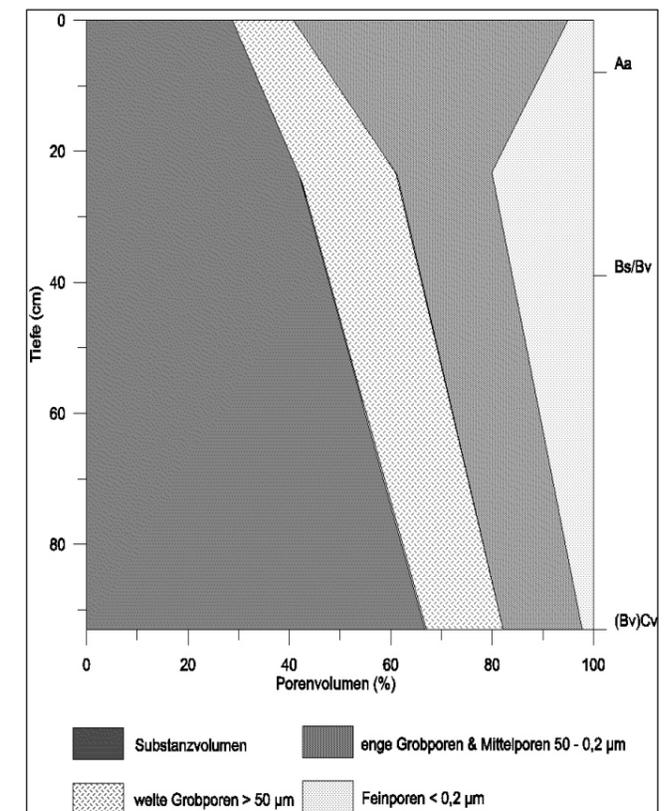


Abb. 71: Standort 14 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößerverteilung

## Standort 15: Grünland-Wechselwirtschaftsstandort (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
15	Braunerde	13° 17' 28,7"	735	Deutschland
		50° 34' 35"		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
6,5 °	180° S	Mittelhang	Wechselwirtschaft	Wiese
			<b>GW</b>	
Labordaten				
Horizonte	Ap	Bv	II Bv-Cv	
Grenzen (cm)	0-26	26-67	67-83	
Bodenart (AG Boden 1994)	SI4	Su4	Su3	
Sand (%)	53,2	50,2	70,5	
Schluff (%)	32,7	43,0	26,1	
Ton (%)	14,1	6,8	3,3	
Skelettgehalt (Masse%)	28,3	30,8	41,3	
Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	-	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	< 1,4	1,4 - 1,6	1,4 - 1,6	
Organik (%)	8,2	4,9	-	
Kornrohdichte $\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	-	-	-	
Porenvolumen (%)	-	-	-	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	44	35		
Feldkapazität (mm)	114,4	143,5		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	41	28		
nutzbare Feldkapazität (mm)	106,6	114,8		
Luftkapazität (Vol.%)	17	20		
Luftkapazität (mm)	44,2	82,0		
Gesamtporenvolumen (%)	61	55		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	226	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17		
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30		
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung			
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	120			
Messtermin	Mai 04			
Wassersättigung (Vol.%)	85			
Variationsbreite (mm/h)	-			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	120			

Tab. 26: Standort 15 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 72 Standort 15 - Grünlandstandort

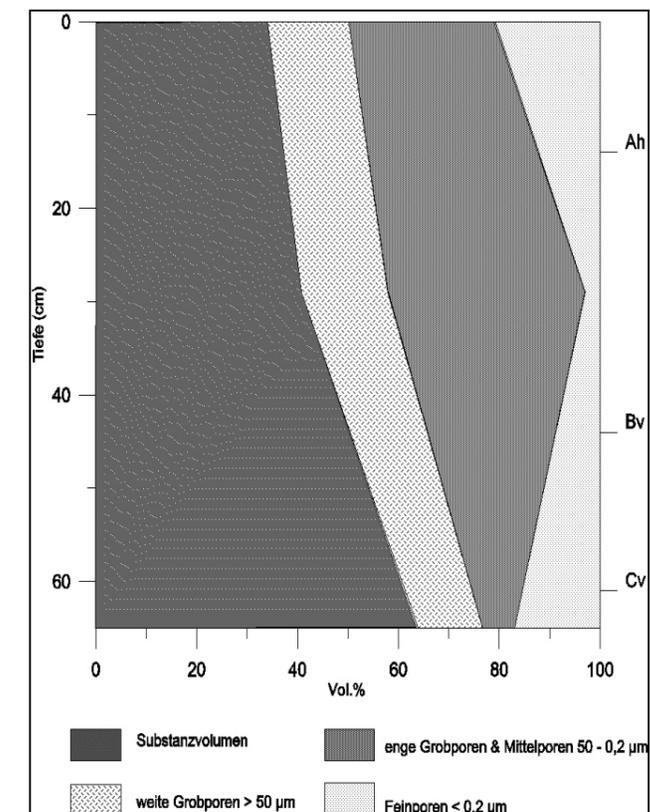


Abb. 73: Standort 15 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 16: Grünland-Wechselwirtschaftsstandort (D)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil
16	Pseudogley-	13° 18' 29,5"	758	Deutschland
	Braunerde	50° 35' 24,8"		
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation
0°	Toplage	Kulminationsbereich	Wechselwirtschaft	Wiese
			<b>GW</b>	
Labordaten				
Horizonte	Ap	Bv	BvSw	
Grenzen (cm)	0-26	26-50	50-140	
Bodenart (AG Boden 1994)	SI4	Su3	-	
Sand (%)	54,4	58,0	-	
Schluff (%)	30,9	35,9	-	
Ton (%)	14,7	6,0	-	
Skelettgehalt (Masse%)	14,1	19,2	-	
Rohdichte (g/cm³)	1,3	1,2	-	
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	1,4	1,3	-	
Organik (%)	8,1	4,6	-	
Kornrohddichte $\rho_B$ (g/cm³)	2,5	2,5	-	
Porenvolumen (%)	49,6	52,0	-	
Bodenwasserkennwerte (nach RENGIER 1971)				
Feldkapazität (Vol.%)	38	35	-	
Feldkapazität (mm)	98,9	84,0	-	
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	25	28	-	
nutzbare Feldkapazität (mm)	65,0	67,2	-	
Luftkapazität (Vol.%)	13	20	-	
Luftkapazität (mm)	33,8	48,0	-	
Gesamtporenvolumen (%)	51	55	-	
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)				
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	46	-	-	
kf-Wertklasse (mm/h)	125-42	42-17	-	
mittlere kf-Wert (mm/h)	84	30	-	
Infiltrationsergebnisse				
	1. Messung	2. Messung	3. Messung	
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	15	53	20	
Messtermin	Mai 04	Mai 04	Mai 05	
Wassersättigung (Vol.%)	85	85	83	
Variationsbreite (mm/h)	38			
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	18			

Tab. 27: Standort 16 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGIER (1971)



Abb. 74 Standort 16 - Grünlandstandort mit Stauwasserhorizont

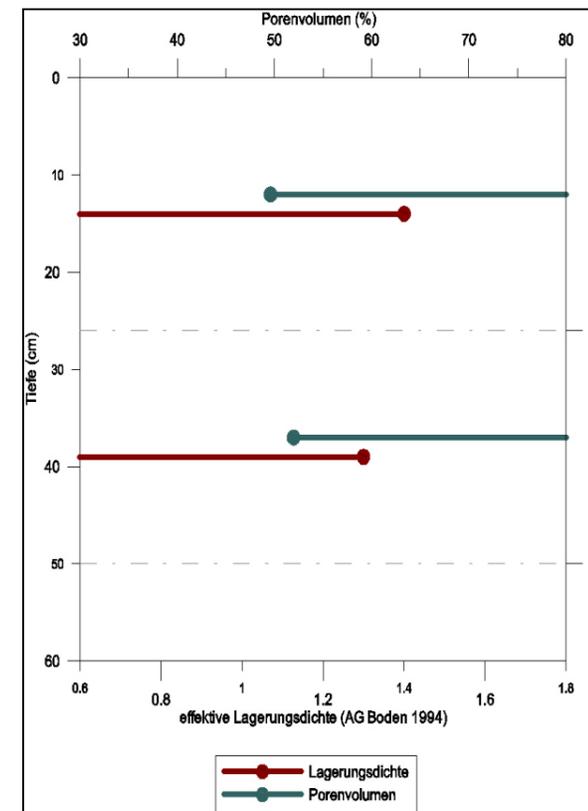


Abb. 75: Standort 16 – Tiefenbezogene Werte der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

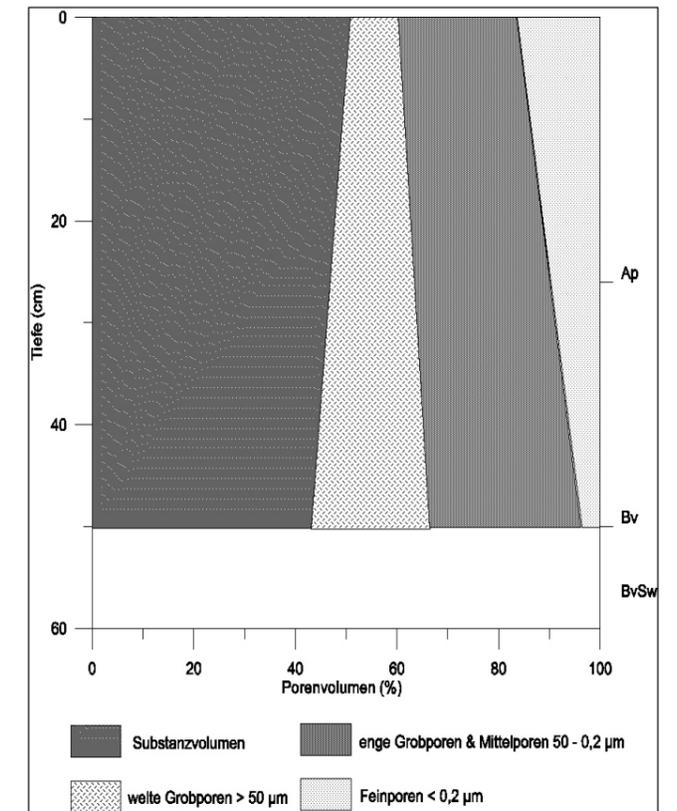


Abb. 76: Standort 16 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

### Standort 19: Fichten - Hochwaldforst (CZ)

Standort	Bodentyp	Koordinaten	Höhe (m)	Einzugsgebietteil		
19	Braunerde-	13° 23' 22,7"	775 m	Tschechien		
	Podsol	50° 34' 31,7"				
Neigung	Exposition	Lage im Relief	Nutzung	Vegetation		
9°	320° SO	Oberhang	Hochwald	Fichten, Gras		
<b>FH</b>						
Labordaten						
Horizonte	Ae	Bsh	Bhs	Bv 1	Bv 2	Cv
Grenzen (cm)	0-10	10-15	15-25	25-40	40-52	52-163
Bodenart (AG Boden 1994)	Ut3	Su4	Ls4	Ls4	Su2	Su3
Sand (%)	11,5	51,0	56,5	56,5	-	-
Schluff (%)	78,5	45,0	22,5	22,5	-	-
Ton (%)	10,0	4,0	21,0	21,0	-	-
Skelettgehalt (%)	mGr2	mGr2	mGr3	gGr4	gGr4	gGr6
Rohdichte (g/cm³)	0,8	1,3	1,3	1,5	-	-
Lagerungsdichte (AG B. 1994)	0,9	1,3	1,3	1,5	-	-
Organik (%)	8,7	5,7	5,7	4,0	-	-
Kornrohichte $\rho_B$ (g/cm³)	-	-	-	-	-	-
Porenvolumen (%)	68,3	50,4	50,4	40,8	-	-
Bodenwasserkennwerte (nach RENGER 1971)						
Feldkapazität (Vol.%)	49	38	43	34		
Feldkapazität (mm)	49,0	19,0	43,0	51,0		
nutzbare Feldkapazität (Vol.%)	35	30	27	18		
nutzbare Feldkapazität (mm)	35,0	15,0	27,0	27,0		
Luftkapazität (Vol.%)	14	19	16	11		
Luftkapazität (mm)	14	9,5	16,0	16,5		
Gesamtporenvolumen (%)	63	57	59	45		
kf-Werte & max. Infiltration (nach HYDROTEC 2003)						
maximale Infiltrationsrate (mm/h)	282	-	-	-		
kf-Wertklasse (mm/h)	42-17	42-17	125 - 42	-		
mittlere kf-Wert (mm/h)	30	30	84	23		
Infiltrationsergebnisse						
	1. Messung	2. Messung	3. Messung			
minimale Infiltrationsrate (mm/h)	675	90	210			
Messtermin	Jul 05	Jul 05	Jul 05			
Wassersättigung (Vol.%)	80	62	59			
Variationsbreite (mm/h)	585					
Repräsentativwert min. IR (mm/h)	150					

Tab. 28: Standort 19 - Untersuchungsergebnisse der Labor- und Feldmessungen sowie der abgeleiteten Bodenkennwerte nach HYDROTEC (2003) und RENGER (1971)



Abb. 77: Standort 19 - Hochwaldforst

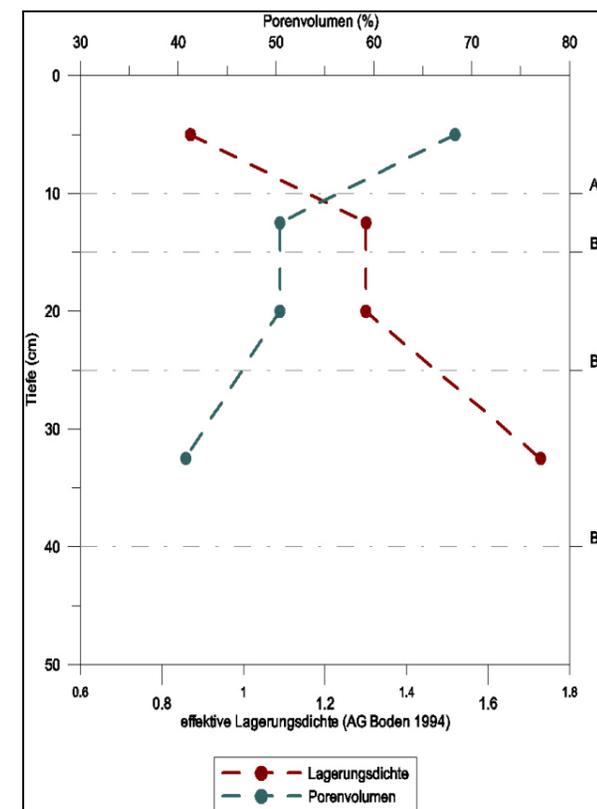


Abb. 78: Standort 19 - Tiefenfunktion der Lagerungsdichte und des Porenvolumens

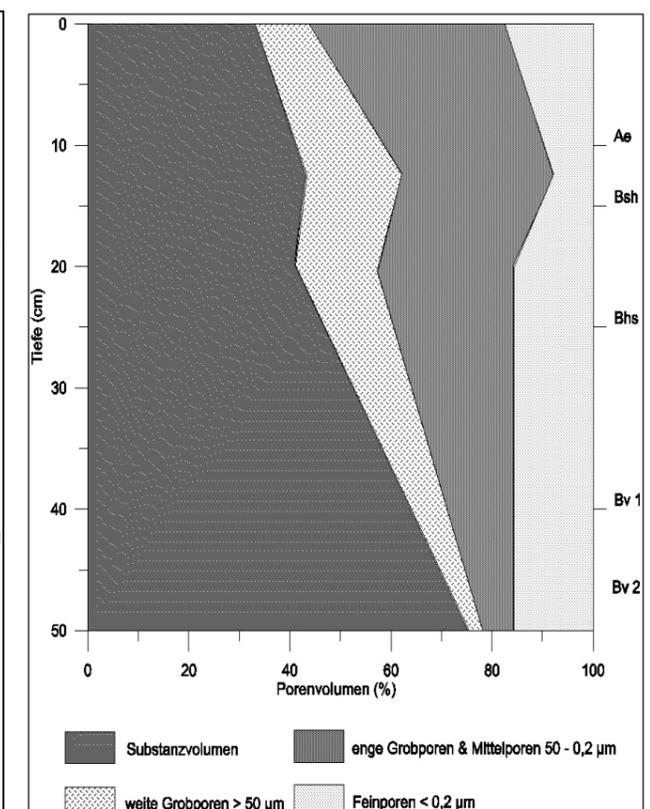


Abb. 79: Standort 19 - Tiefenfunktion der kumulierten Porengrößenverteilung

*Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel „Die bodenphysikalische Charakterisierung von Flächen unterschiedlicher Nutzung hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Natzschung – eine Untersuchung im Mittleren Erzgebirge – “ in der gesetzten Frist selbständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen verwendet habe. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Die Zeichnungen, bildlichen Darstellungen und Statistiken sind von mir verfasst, soweit nicht als Entlehnung gekennzeichnet.*