

**Auswirkungen des Klimawandels auf charakteristische
Böden in Unterfranken unter Berücksichtigung
bodenhydrologischer Monitoringdaten (2018 bis 2022)**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der
Philosophischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von

Julian Krause

aus

Giebelstadt

Würzburg

2024



This document is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>

This CC license does not apply to third party material (attributed to another source) in this publication.

Erstgutachterin: Professor Dr. Birgit Terhorst

Zweitgutachter: Professor Dr. Roland Baumhauer

Tag des Kolloquiums: 23.10.2023

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Prof. Dr. Birgit Terhorst, die es mir ermöglichte, meine Dissertation in ihrer Arbeitsgruppe „Physische Geographie und Bodenkunde“ zu verfassen. Dies gilt insbesondere für ihre Ermutigung und ihre Geduld und die wissenschaftlichen Diskussionen. Ebenso danke ich herzlich Prof. Dr. Roland Baumhauer für sein Mentorat und seine Ratschläge. Auch meinem dritten Mentor Prof. Dr. Heiko Paeth danke ich herzlich.

Ein weiterer Dank gebührt Dr. Martin Krech für seine Unterstützung bei den Laborarbeiten, die gemeinsame Geländearbeit und seine Ratschläge. Ebenso gilt mein Dank der gesamten Arbeitsgruppe „Physische Geographie und Bodenkunde“, namentlich Dr. Simon Meyer-Heintze, Dr. Thomas Kreuzer und Dr. Martina Wilde für die hilfreichen Diskussionen, die technische Unterstützung sowie die gute Zusammenarbeit. Des Weiteren möchte ich Christian Schäfer M.Sc. für die gute Zusammenarbeit und den Austausch im Projekt „BigData@Geo“ sowie für seine Unterstützung bei der Geländearbeit danken. Mein besonderer Dank gilt Tom Wolf B.Sc. für seine herausragende Unterstützung bei der Gelände- und Laborarbeit. Ebenso danke ich Vera Maria Kaatsch M.Sc., Sandy Deuster M.Sc. und Arne Thomas B.Sc. für ihre Hilfe bei der Geländearbeit.

Für die Nutzung ihrer Fläche und ihre Unterstützung danke ich den Projektpartnern von „BigData@Geo“, namentlich:

- Uwe Reisenweber und Jochen Schenk von der Fürstl. Castell'schen Forstverwaltung,
- Paul Fürst vom Weingut Rudolf Fürst
- Ernst Rauh
- Manuel Neubauer vom Forstbetrieb Paul Freiherr von Franckenstein,
- Petra Sandjohann und Bernhard Schreyer vom Schloss Gut Obbach,
- Hans Stark vom Universitäts-Forstamt Sailershausen

Ein spezieller Dank geht an Stefan Klein für das Lektorat dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern für ihre Geduld und ihre fortwährende Unterstützung bedanken. Bei meiner Freundin Laura Treutlein möchte ich mich herzlich für ihre emotionale Unterstützung, ihre Motivation und ihr großes Verständnis in der Schlussphase dieser Arbeit bedanken.

Zusammenfassung

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Umweltveränderungen, wie steigende Temperaturen, Abnahme der Sommer- und Zunahme der Winterniederschläge, häufigere und längere Trockenperioden, zunehmende Starkniederschläge, Stürme und Hitzewellen betreffen besonders den Bodenwasserhaushalt in seiner zentralen Regelungsfunktion für den Landschaftswasserhaushalt. Von der Wasserverfügbarkeit im Boden hängen zu einem sehr hohen Grad auch die Erträge der Land- und Forstwirtschaft ab. Eine besonders große Bedeutung kommt dabei der Wasserspeicherkapazität der Böden zu, da während einer Trockenphase die effektiven Niederschläge den Wasserbedarf der Pflanzen nicht decken können und das bereits gespeicherte Bodenwasser das Überleben der Pflanzen sicherstellen kann. Für die land- und forstwirtschaftlichen Akteure sind in diesem Kontext quantitative und qualitative Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden essenziell, um die notwendigen Anpassungsmaßnahmen für ihre Betriebe treffen zu können.

Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit bestehen darin, die Dynamik der Bodenfeuchte in unterfränkischen Böden besser zu verstehen, die Datenlage zum Verlauf der Bodenfeuchte zu verbessern und die Auswirkungen von prognostizierten klimatischen Parametern abschätzen zu können. Hierzu wurden an sechs für ihre jeweiligen Naturräume und hinsichtlich ihrer anthropogenen Nutzung charakteristischen Standorten meteorologisch-bodenhydrologische Messstationen installiert. Die Messstationen befinden sich in einem Rigosol auf Buntsandstein in einem Weinberg bei Bürgstadt sowie auf einer Parabraunerde im Lössgebiet bei Herchsheim unter Ackernutzung. Am Übergang von Muschelkalk in Keuper befinden sich die Stationen in Obbach, wo eine Braunerde unter Ackernutzung vorliegt und im Forst des Universitätswalds Sailershausen werden die Untersuchungen in einer Braunerde-Terra fusca durchgeführt. Im Forst befinden sich auch die Stationen in Oberrimbach mit Braunerden aus Sandsteinkeuper und in Willmars mit Braunerden aus Buntsandstein. Der Beobachtungszeitraum dieser Arbeit reicht von Juli 2018 bis November 2022. In diesen Zeitraum fiel die dreijährige Dürre von 2018 bis 2020, das Jahr 2021 mit einem durchschnittlichen Witterungsverlauf und das Dürrejahr 2022.

Das Langzeitmonitoring wurde von umfangreichen Gelände- und Laboranalysen der grundlegenden bodenkundlichen Parameter der Bodenprofile und der Standorte begleitet. Die bodengeographischen-geomorphologischen Standortanalysen bilden zusammen mit den qualitativen Auswertungen der Bodenfeuchtezeitreihen die Grundlage für Einschätzungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt. Verlässliche Aussagen zum Bodenwasserhaushalt können nur auf Grundlage von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Daten getroffen werden.

Bodenfeuchtezeitreihen zusammen mit den bodenphysikalischen Daten lagen in dieser Datenqualität für Unterfranken bisher nur sehr vereinzelt vor.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Böden entsprechend den jeweiligen naturräumlichen Gegebenheiten sehr unterschiedliche bodenhydrologische Eigenschaften aufweisen. Während langer Trockenphasen können beispielsweise die Parabraunerden am Standort Herchsheim wegen ihrer höheren Wasserspeicherkapazität die Pflanzen länger mit Wasser versorgen als die sandigen Braunerden am Standort Oberrimbach. Die Bodenfeuchtereime im Beobachtungszeitraum waren sehr stark vom Witterungsverlauf einzelner Jahre abhängig. Das Bodenfeuchtereime bei einem durchschnittlichen Witterungsverlauf wie in 2021 zeichnet sich durch eine langsame Abnahme der Bodenfeuchte ab Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr aus. Regelmäßige Niederschläge im Frühjahr füllen den oberflächennahen Bodenwasserspeicher immer wieder auf und sichern den Bodenwasservorrat in der Tiefe bis in den Hochsommer. Im Hochsommer können Pflanzen dann während der Trockenphasen ihren Wasserbedarf aus den tieferen Horizonten decken. Im Gegensatz dazu nimmt die Bodenfeuchte in Dürre Jahren wie 2018 bis 2020 oder 2022 bereits im Frühjahr bis in die untersten Horizonte stark ab. Die nutzbare Feldkapazität ist zum Teil schon im Juni weitgehend ausgeschöpft, womit für spätere Trockenphasen kein Bodenwasser mehr zur Verfügung steht. Die Herbst- und Winterniederschläge sättigen den Bodenwasservorrat wieder bis zur Feldkapazität auf. Bei tiefreichender Erschöpfung des Bodenwassers wurde die Feldkapazität erst im Januar oder Februar erreicht.

Im Zuge der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung ist eine gute Datenlage zu den bodenkundlichen und standörtlichen Gegebenheiten für klimaadaptierte Anpassungsstrategien essentiell. Wichtige Zielsetzungen bestehen grundsätzlich in der Erhaltung der Bodenfunktionen, in der Verbesserung der Infiltrationskapazität und Wasserspeicherkapazität. Hier kommt dem Boden als interaktive Austauschfläche zwischen den Sphären und damit dem Bodenschutz eine zentrale Bedeutung zu. Die in Zukunft erwarteten klimatischen Bedingungen stellen an jeden Boden andere Herausforderungen, welchen mit standörtlich abgestimmten Bodenschutzmaßnahmen begegnet werden kann.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
ZUSAMMENFASSUNG.....	III
INHALTSVERZEICHNIS.....	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IX
TABELLENVERZEICHNIS	XII
ABBILDUNGSBEILAGE	XIV
BODENTYPENVERZEICHNIS	XV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XVI
1. EINLEITUNG	1
1.1. DIE ROLLE DER BÖDEN IM NATUR- UND KULTURRAUM	1
1.2. ZIELSETZUNG UND AUFGABENSTELLUNG	4
2. DER BODENWASSERHAUSHALT IN DER FORSCHUNG.....	6
2.1. GRUNDLAGEN DER BODENHYDROLOGIE: PARAMETER UND DEFINITIONEN.....	6
2.2. MONITORING DES BODENWASSERS.....	12
2.3. MODELLIERUNG DES BODENWASSERHAUSHALTS	13
2.4. BODENHYDROLOGISCHE DATENSÄTZE UND MONITORINGDATEN.....	14
3. UNTERSUCHUNGSREGION UNTERFRANKEN.....	16
3.1. NATURRÄUMLICHE GLIEDERUNG UND GEOMORPHOLOGISCHE SITUATION	16
3.2. GEOLOGIE.....	17
3.3. KLIMA	20
3.4. BÖDEN.....	23
4. METHODEN	24
4.1. AUSWAHL DER MONITORINGSTANDORTE.....	24
4.2. GELÄNDEMETHODEN	25
4.3. MONITORING	26
4.3.1. STATIONEN	26
4.3.2. BODENFEUCHTESENSOREN	28
4.3.2.1. Bürgstadt	28
4.3.2.2. Herchsheim	29
4.3.2.3. Obbach	30

4.3.2.4. Uniwald.....	31
4.3.2.5. Oberrimbach	32
4.3.2.6. Willmars.....	33
4.4. LABORMETHODEN.....	34
4.5. DATENAUFBEREITUNG UND -AUSWERTUNG.....	37
5. MONITORINGSTANDORTE.....	38
5.1. BÜRGSTADT	38
5.1.1. STANDORTÜBERBLICK	38
5.1.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	38
5.1.1.2. Geologie	40
5.1.1.3. Klima.....	43
5.1.2. BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN BÜRGSTADT	44
5.1.2.1. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil B 1	44
5.1.2.2. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil B 2	49
5.1.3. PROFIL- UND STANDORTANALYSE BÜRGSTADT	54
5.2. HERCHSHEIM.....	58
5.2.1. STANDORTÜBERBLICK	58
5.2.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	58
5.2.1.2. Geologie	60
5.2.1.3. Klima.....	62
5.2.2. BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN HERCHSHEIM.....	64
5.2.2.1 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil H 1	64
5.2.2.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil H 2	67
5.2.4 PROFIL- UND STANDORTANALYSE HERCHSHEIM	71
5.3. OBBACH	75
5.3.1. STANDORTÜBERBLICK	75
5.3.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	75
5.3.1.2. Geologie	77
5.3.1.3. Klima.....	79
5.3.2. BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN OBBACH	81
5.3.2.1. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 1	81
5.3.2.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 2.....	85
5.3.2.3 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 3	90
5.3.3. PROFIL- UND STANDORTANALYSE OBBACH.....	95

5.4	UNIWALD SAILERSHAUSEN.....	100
5.4.1	STANDORTÜBERBLICK	100
5.4.1.1	Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	100
5.4.1.2	Geologie	103
5.4.1.3	Klima.....	105
5.4.2	BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN UNIWALD	107
5.4.3.1	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 1.....	107
5.4.3.2	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 2.....	111
5.4.3.3	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 3.....	116
5.4.3	PROFIL- UND STANDORTANALYSE	121
5.5	OBERRIMBACH	125
5.5.1	STANDORTÜBERBLICK	125
5.5.1.1	Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	125
5.5.1.2	Geologie	128
5.5.1.3	Klima.....	132
5.5.2	BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN OBERRIMBACH	134
5.5.2.1	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 1.....	134
5.5.2.2	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 2.....	137
5.5.2.3	Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 3.....	141
5.5.3	PROFIL- UND STANDORTANALYSE	145
5.6	WILLMARS.....	149
5.6.1	STANDORT	149
5.6.1.1	Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation	149
5.6.1.2	Geologie	151
5.6.1.3	Klima.....	153
5.6.2	BODENGEOGRAPHISCHE ANALYSEN WILLMARS.....	155
5.6.2.1	Gelände- und Labordaten Profil W 1.....	155
5.6.2.2	Gelände- und Labordaten Profil W 2.....	160
5.6.2.3	Gelände- und Labordaten Profil W 3.....	164
5.6.3	PROFIL- UND STANDORTANALYSE	169
6	ANALYSE DER MONITORINGDATEN	173
6.1	CHARAKTERISIERUNG DER MONITORINGSTANDORTE.....	173
6.1.1	BÜRGSTADT	173
6.1.2	HERCHSHEIM.....	175

6.1.3	OBBACH	177
6.1.4	UNIWALD	180
6.1.5	OBERRIMBACH	183
6.1.6	WILLMARS.....	187
6.2	VERGLEICH DER MONITORINGDATEN.....	191
7	DISKUSSION DES MONITORINGS.....	193
7.1	GEMEINSAMKEITEN ALLER STANDORTE	193
7.2	DISKUSSION DER EINZELNEN STANDORTE	195
7.3	KRITISCHE BETRACHTUNG DES BODENFEUCHTEMONITORING	200
8	AUSWIRKUNGEN VON KLIMATISCHEN PHASEN AUF DIE BODENHYDROLOGIE	203
9	AUSBLICK UND ANPASSUNGSMÖGLICHKEITEN.....	206
	LITERATURVERZEICHNIS.....	209
	ANHANG	227

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Boden als zentraler Puffer der Landschaft im Klimawandel.....	2
Abbildung 2: Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung für verschiedene Bodenarten (pF-Kurve).....	8
Abbildung 3: Erklärung der Hysterese anhand des "ink-bottle-effect".....	9
Abbildung 4: Reliefkarte Unterfrankens mit den Naturraum-Haupteinheiten und den Monitoringstandorten.	16
Abbildung 5: Geologische Karte von Unterfranken im Maßstab 1:500.000.....	18
Abbildung 6: Klimaregionen im Regierungsbezirk Unterfranken: Mainregion und Spessart-Rhön.	20
Abbildung 7: Vorherrschende Topographie (a, zeitlich invariant) sowie klimatologisches Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur (b) und mittlerer Jahresniederschlag (c) in Unterfranken während der Referenzperiode 1970-1999.....	21
Abbildung 8: Warming Stripes 1881-2021 für Unterfranken.	22
Abbildung 9: Aufbauskitze einer Monitoringstation.	26
Abbildung 10: Verstopfter Niederschlagssensor der Monitoringstation Willmars.	27
Abbildung 11: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Bürgstadt.	39
Abbildung 12: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Bürgstadt.	41
Abbildung 13: Klimadiagramm Bürgstadt 1990-2020.....	43
Abbildung 14: Profilzeichnung Profil B 1.	46
Abbildung 15: Korngrößendiagramm Profil B 1.....	47
Abbildung 16: Profilzeichnung Profil B 2.	51
Abbildung 17: Korngrößendiagramm Profil B 2.....	52
Abbildung 18: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Herchsheim..	59
Abbildung 19: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Herchsheim.....	61
Abbildung 20: Klimadiagramm Euerhausen 1990-2020.	63
Abbildung 21: Profilzeichnung Profil H 1.	65
Abbildung 22: Korngrößendiagramm Profil H 1.....	66
Abbildung 23: Profilzeichnung Profil H 2.	69
Abbildung 24: Korngrößendiagramm Profil H 2.....	70
Abbildung 25: Erosion und Verschlämmung nach Starkregen im Ochsenfurter Gau bei Allersheim...	74
Abbildung 26: Winderosion im Ochsenfurter Gau südlich Wolkshausen bei Westwind.	74
Abbildung 27: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Obbach.	76
Abbildung 28: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Obbach.....	78
Abbildung 29: Klimadiagramm Euerbach-Sömmersdorf 1991-2020.....	79

Abbildung 30: Klimadiagramm Ettleben 1990-2021.....	80
Abbildung 31: Profilzeichnung Profil O 1.	82
Abbildung 32: Korngrößendiagramm Profil O 1.	83
Abbildung 33: Profilzeichnung Profil O 2.	87
Abbildung 34: Korngrößendiagramm Profil O 2.	88
Abbildung 35: Profilzeichnung Profil O 3.	92
Abbildung 36: Korngrößendiagramm Profil O 3.	93
Abbildung 37: Stauwasser im Bereich des Profils O 1.	95
Abbildung 38: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Uniwald.	102
Abbildung 39: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiet Uniwald.	104
Abbildung 40: Klimadiagramm Haßfurt-Sailershausen 1971-2000.	106
Abbildung 41: Klimadiagramm Ebertshausen 2002-2022.	107
Abbildung 42: Profilzeichnung Profil UW 1.....	109
Abbildung 43: Korngrößendiagramm Profil UW 1.....	110
Abbildung 44: Profilzeichnung Profil UW 2.....	113
Abbildung 45: Korngrößendiagramm Profil UW 2.	114
Abbildung 46: Profilzeichnung Profil UW 3.....	118
Abbildung 47: Korngrößendiagramm Profil UW 3.....	119
Abbildung 48: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Oberrimbach.	127
Abbildung 49: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Oberrimbach.....	130
Abbildung 50: Blasensandstein mit schwarzen Mangantupfen.	131
Abbildung 51: Blasensandstein mit charakteristischen zentimetergroßen grün-weißlichen Toneinschlüssen.....	131
Abbildung 52: Klimadiagramm Oberscheinfeld-Appenfelden 1991-2020.....	132
Abbildung 53: Profilzeichnung Profil CO 1.....	135
Abbildung 54: Korngrößendiagramm Profil CO 1.	136
Abbildung 55: Profilzeichnung Profil CO 2.....	139
Abbildung 56: Korngrößendiagramm Profil CO 2.	140
Abbildung 57: Profilzeichnung Profil CO 3.....	143
Abbildung 58: Korngrößendiagramm Profil CO 3.	144
Abbildung 59: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Willmars.	150
Abbildung 60: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Willmars.....	152
Abbildung 61: Klimadiagramm Ostheim v.d. Rhön 1991-2020.	153
Abbildung 62: Klimadiagramm Fladungen-Heufurt 1991-2020.....	154

Abbildung 63: Profilzeichnung Profil W 1.	157
Abbildung 64: Korngrößendiagramm Profil W 1.	158
Abbildung 65: Profilzeichnung Profil W 2.	162
Abbildung 66: Korngrößendiagramm Profil W 2.	163
Abbildung 67: Profilzeichnung Profil W 3.	166
Abbildung 68: Korngrößendiagramm Profil W 3.	167
Abbildung 69: Monitoringzeitreihen der Profile B 1 und B 2 (Rigosole; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 16.03.2020 bis 02.09.2022.	173
Abbildung 70: Monitoringzeitreihen der Profile H 1 und H 2 (Parabraunerden; Ebene) für den Beobachtungszeitraum 02.08.2018 bis 25.11.2019.	176
Abbildung 71: Monitoringzeitreihen für die Profile O 1 (Ranker; Hangverflachung), O 2 (Braunerde; Kuppe) und O 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 10.04.2019 bis 30.11.2022.	178
Abbildung 72: Monitoringzeitreihen der Profile UW 1 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang), UW 2 (Braunerde-Terra fusca; Talboden) und UW 3 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 09.07.2019 bis 30.11.2022.	181
Abbildung 73: Monitoringzeitreihen der Profile CO 1 (Braunerde; Plateau), CO 2 (Braunerde; Hangschulter) und CO 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 29.06.2018 bis 31.10.2022.	184
Abbildung 74: Monitoringzeitreihe für die Profile W 1 (podsolierte Braunerde; Oberhang), W 2 (pseudovergleyte Braunerde; Mittelhang), W 3 (podsolierte Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 12.12.2019 bis 30.11.2022.	187

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typen und Sensorausstattungen der Monitoringstationen.....	27
Tabelle 2: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Bürgstadt.....	29
Tabelle 3: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Herchsheim.....	29
Tabelle 4: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Obbach.....	30
Tabelle 5: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Uniwald.....	31
Tabelle 6: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Oberrimbach.....	32
Tabelle 7: Bodenfeuchtesensoren der Messstation Willmars.....	33
Tabelle 8: Geländedaten Profil B 1.....	44
Tabelle 9: Laborwerte Profil B 1.....	48
Tabelle 10: Bodenphysikalische Kennwerte Profil B 1.....	48
Tabelle 11: Geländedaten Profil B 2.....	49
Tabelle 12: Laborwerte Profil B 2.....	53
Tabelle 13: Bodenphysikalische Kennwerte Profil B 2.....	53
Tabelle 14: Geländedaten Profil H 1.....	64
Tabelle 15: Laborwerte Profil H 1.....	66
Tabelle 16: Bodenphysikalische Kennwerte Profil H 1.....	67
Tabelle 17: Geländedaten Profil H 2.....	68
Tabelle 18: Laborwerte Profil H 2.....	70
Tabelle 19: Bodenphysikalische Kennwerte Profil H 2.....	71
Tabelle 20: Geländedaten Profil O 1.....	81
Tabelle 21: Laborwerte Profil O 1.....	83
Tabelle 22: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 1.....	84
Tabelle 23: Geländedaten Profil O 2.....	85
Tabelle 24: Laborwerte Profil O 2.....	88
Tabelle 25: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 2.....	89
Tabelle 26: Geländedaten Profil O 3.....	90
Tabelle 27: Laborwerte Profil O 3.....	93
Tabelle 28: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 3.....	94
Tabelle 29: Geländedaten Profil UW 1.....	108
Tabelle 30: Laborwerte Profil UW 1.....	110
Tabelle 31: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 1.....	111
Tabelle 32: Geländedaten Profil UW 2.....	112
Tabelle 33: Laborwerte Profil UW 2.....	114

Tabelle 34: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 2.....	115
Tabelle 35: Geländedaten Profil UW 3.....	116
Tabelle 36: Laborwerte Profil UW 3.....	119
Tabelle 37: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 3.....	120
Tabelle 38: Geländedaten Profil CO 1.....	134
Tabelle 39: Labordaten Profil CO 1.....	136
Tabelle 40: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 1.....	137
Tabelle 41: Geländedaten Profil CO 2.....	138
Tabelle 42: Laborwerte Profil CO 2.....	140
Tabelle 43: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 2.....	141
Tabelle 44: Geländedaten Profil CO 3.....	142
Tabelle 45: Laborwerte Profil CO 3.....	144
Tabelle 46: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 3.....	145
Tabelle 47: Geländedaten Profil W 1.....	155
Tabelle 48: Laborwerte Profil W 1.....	158
Tabelle 49: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 1.....	159
Tabelle 50: Geländedaten Profil W 2.....	160
Tabelle 51: Laborwerte Profil W 2.....	163
Tabelle 52: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 2.....	164
Tabelle 53: Geländedaten Profil W 3.....	165
Tabelle 54: Laborwerte Profil W 3.....	167
Tabelle 55: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 3.....	168
Tabelle 56: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Bürgstadt von 2020 bis 2022.....	175
Tabelle 57: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Euerhausen für die Jahre 2019 bis 2022.	177
Tabelle 58: Monatliche Niederschläge der DWD-Station Sömmersdorf (Stations-ID: 1322) und der Monitoringstation Obbach für die Jahre 2018 bis 2022.....	180
Tabelle 59: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Gädheim-Greßhausen für die Jahre 2019 bis 2022.....	183
Tabelle 60: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Kleingressingen für die Jahre 2018 bis 2022.	186
Tabelle 61: Monatliche Niederschlagswerte der Klimastation Fladungen-Heufurt für die Jahre 2019 bis 2022.....	190
Tabelle 62: Vergleichende Gegenüberstellung aller Standorte.....	199
Tabelle 63: Bodenfeuchtemonitoringstationen in Unterfranken mit öffentlich verfügbaren Daten.	202

Abbildungsbeilage

Die folgenden Abbildungen stehen zusätzlich noch im Großformat als herausnehmbare Beilage zur Verfügung:

Abbildung 69: Monitoringzeitreihen der Profile B 1 und B 2 (Rigosole; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 16.03.2022 bis 02.09.2022.

Abbildung 70: Monitoringzeitreihen der Profile H 1 und H 2 (Parabraunerden; Ebene) für den Beobachtungszeitraum 02.08.2018 bis 25.11.2019.

Abbildung 71: Monitoringzeitreihen der Profile O 1 (Ranker; Hangverflachung), O 2 (Braunerde; Kuppe) und O 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 10.04.2019 bis 30.11.2022.

Abbildung 72: Monitoringzeitreihen der Profile UW 1 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang), UW 2 (Braunerde-Terra fusca; Talboden) und UW 3 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 09.07.2019 bis 30.11.2022.

Abbildung 73: Monitoringzeitreihen der Profile CO 1 (Braunerde; Plateau), CO 2 (Braunerde; Hangschulter) und CO 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 29.06.2018 bis 31.10.2022.

Abbildung 74: Monitoringzeitreihen der Profile W 1 (podsolierte Braunerde; Oberhang), W 2 (pseudovergleyte Braunerde; Mittelhang) und W 3 (podsolierte Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 12.12.2019 bis 30.11.2022.

Bodentypenverzeichnis

Profil B 1	Rigosol auf Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial im R-Ap-Horizont
Profil B 2	Rigosol auf Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial im R-Ap-Horizont
Profil H 1	ackerbaulich überprägte Parabraunerde auf Löss
Profil H 2	ackerbaulich überprägte Parabraunerde auf Löss
Profil O 1	pseudovergleyter Ranker auf Tonsiltstein
Profil O 2	Braunerde mit Terra fusca-Rest auf Muschelkalk
Profil O 3	Braunerde mit Terra fusca-Rest auf Muschelkalk
Profil UW 1	Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk
Profil UW 2	Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk
Profil UW 3	Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk
Profil CO 1	Braunerde auf Blasensandstein
Profil CO 2	Braunerde auf Blasensandstein
Profil CO 3	Braunerde in Hangablagerungen
Profil W 1	schwach podsolierte Braunerde auf Mittlerem Buntsandstein
Profil W 2	pseudovergleyte Braunerde in Hangablagerungen über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandstein
Profil W 3	schwach podsolierte Braunerde über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandstein

Abkürzungsverzeichnis

cmWS	Zentimeter Wassersäule (1 cmWS = 1 hPa)
FÄ	Feuchtigkeitsäquivalent
FK	Feldkapazität
GPV	Gesamtporenvolumen
kf-Wert	gesättigte Wasserleitfähigkeit, Wasserdurchlässigkeit
ku-Wert	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
KMU	kleine und mittelständische Unternehmen
Ld	effektive Lagerungsdichte
LK	Luftkapazität
nFK	nutzbare Feldkapazität
nFKWe	nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums [l/m^2]
pF-Wert	dekadischer Logarithmus des Betrags der Bodenwasserspannung in hPa
PTF	Pedotransferfunktion
PWP	permanenter Welkepunkt
TDR	time domain reflectometry
TRD	Trockenrohdichte
TW	Totwasser
Vol.-%	Volumenprozent
VWC	Volumetric Water Content [%] = volumetrischer Wassergehalt

1. Einleitung

1.1. Die Rolle der Böden im Natur- und Kulturräum

Die Pedosphäre stellt die Schnittstelle zwischen Atmosphäre, Lithosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre dar und kann damit als Grundlage des menschlichen Lebens angesehen werden (AMELUNG et al., 2018; STAHR et al., 2020). Für den Menschen haben die Böden verschiedene Funktionen: Lebensraumfunktion, Regelungsfunktion, Kreislauffunktion, Archiv- und Nutzungsfunktion (AMELUNG et al., 2018). Das verbindende Element für Austauschprozesse zwischen den Sphären ist Wasser, welches – flüssig oder in gasform – viele Bodenfunktionen erst ermöglicht. Die Bodeneigenschaften steuern in essentieller Weise die Interaktionen zwischen den Sphären und in diesem Kontext übernimmt und beeinflusst der Boden innerhalb des Wasserkreislaufs alle Filter-, Puffer- und Speicherprozesse, welche für die Standortbedingungen in Bezug auf Schad- und Nährstoffe sowie Wasserspeicherkapazität wichtig sind (STAHR et al., 2020). Diese engen Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanzen und Atmosphäre verdeutlicht auch der Begriff „Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC)“ (NOVÁK & HLAVÁČIKOVÁ, 2019).

Die Böden sind als zweitgrößter Treibhausgasspeicher direkt am Klimageschehen beteiligt und hinzu kommt, dass in den Böden ein Austausch von klimarelevanten Gasen, v.a. von CO₂ und CH₄, erfolgt (MATHEWS & GEOMATIK, 2011). Die Rolle der Böden im Kontext des Klimawandels bleiben häufig unbemerkt, da sie zumeist indirekt wirken und Veränderungen eher langsam ablaufen und nicht immer sichtbar sind. Die Ausnahme bildet hier der Einfluss der Klima- und Wetterverhältnisse auf das Bodenwasser: Dürren und Hochwasserereignisse sind direkt sichtbar und erlebbar wie beispielsweise die europaweite Dürre von 2018 bis 2020 oder lokale Überschwemmungen im Landkreis Würzburg als Folge von Starkregenereignissen wie 2016 und 2021 (FRITZ, 2016, 2021; RAKOVEC et al., 2022).

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Umweltveränderungen, wie steigende Temperaturen, Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter, mehr und längere Trockenperioden, häufigere und stärkere Starkniederschläge, Stürme und Hitzewellen betreffen besonders den Bodenwasserhaushalt in seiner zentralen Regelungsfunktion für den Landschaftswasserhaushalt (s. Abbildung 1) (MATHEWS & GEOMATIK, 2011). Der Bodenwasserhaushalt wird neben dem Klima bzw. der Witterung aber noch von anderen Faktoren beeinflusst: Die Geologie bestimmt die Grundwasserstockwerke und über das als periglaziale Lagen aufgearbeitete Ausgangsmaterial der Bodenbildung die Wasserspeicherkapazität der Böden. Die Pflanzen decken ihren Wasserbedarf aus dem Boden und schließen den lokalen Wasserkreislauf zur Atmosphäre über die Transpiration. Damit der Boden all seine Funktionen im Landschaftswasserhaushalt erfüllen kann, muss er in einem guten Zustand sein (EXPERTENKOMMISSION WASSERVERSORGUNG IN BAYERN, 2021).

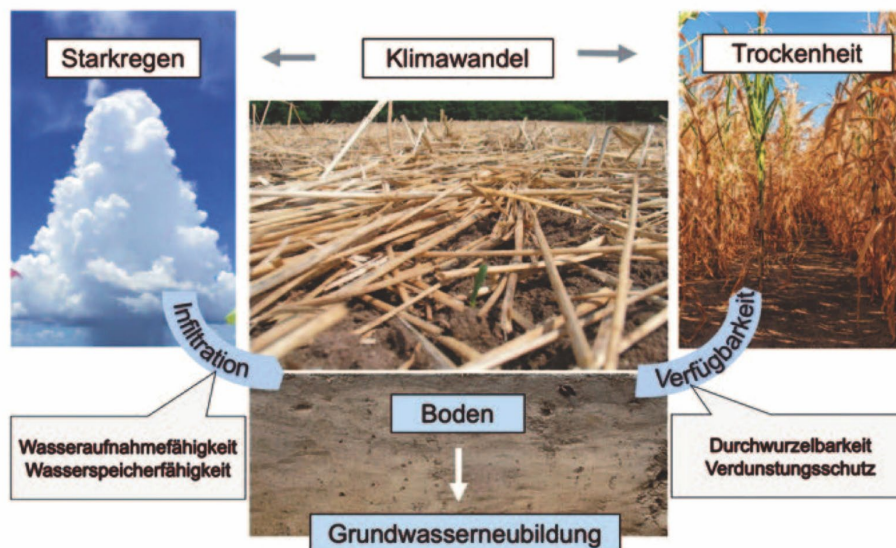


Abbildung 1: Der Boden als zentraler Puffer der Landschaft im Klimawandel.

Als zentraler Puffer kann der Boden den Ausgleich zwischen Winterniederschlägen, Starkregen und sommerlicher Trockenheit schaffen. Voraussetzung ist aber ein gesunder und nachhaltig genutzter Boden.

Quelle: EXPERTENKOMMISSION WASSERVERSORGUNG IN BAYERN (2021).

Im Schutz des Bodens und der Verbesserung des Bodenwasserhaushalts wurde vor dem Hintergrund des Klimawandels von der Politik Handlungsbedarf erkannt. Auf allen politischen Ebenen ist der Bodenschutz Bestandteil von klimabezogenen Anpassungsstrategien. Global gesehen gehört der Bodenschutz zu den ‚Sustainable Development Goals‘ der Vereinten Nationen und ermöglicht direkt oder indirekt die nachhaltige Entwicklung aller Länder (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019; UNITED NATIONS, 2023). Auf europäischer Ebene vertritt die EU-Bodenstrategie für 2030 (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021) bodenbezogene Anpassungsmaßnahmen (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021; VEERMAN et al., 2020). Auf nationaler Ebene besteht seit 1998 das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und im Rahmen der „Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“ findet der Boden dezidierte Berücksichtigung (BUNDESREGIERUNG, 2008, 2021). Zudem ist er ein wichtiger Bestandteil der „Nationalen Wasserstrategie“ (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV), 2023). Auch auf der Länderebene nimmt der Bodenschutz einen zentralen Platz ein, z.B. in der „Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie“ (BAYERISCHE STAATSREGIERUNG, 2016). Der Bodenwasserhaushalt wird in allen bayerischen Strategien und Papieren rund um Klimaschutz und Klimaanpassung als kritisches Handlungsfeld erkannt und in seiner Bedeutung für klimaresiliente Landschaften herausgestellt (BAYERISCHE STAATSREGIERUNG, 2015; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2021; EXPERTENKOMMISSION WASSERVERSORGUNG IN BAYERN, 2021).

Die Relevanz des Bodenwasserhaushalts für ein funktionierendes Ökosystem sowie für alle Arten von Landnutzung sind also bekannt und erhalten im Angesicht des Klimawandels eine immense

Bedeutung. Auch existieren bereits zahlreiche Angebote für den Wissenstransfer und Handlungsempfehlungen unterschiedlicher Stellen wie z.B. das Deutsche Klimavorsorgeportal KLiVO (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV), 2022) oder Modellierungen des Bodenwasserhaushalts (z.B. Dürremonitor Deutschland des HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ (2023)). Land- und forstwirtschaftliche Nutzung erfordert jedoch den Zugriff auf präzise regionale und besser noch lokale Daten, um gezielt Betriebe erfolgreich, nachhaltig und klimaadaptiert ausrichten und bewirtschaften zu können. Die kleinmaßstäbigen Modellierungen kommen hier an ihre Grenzen, da die Datengrundlage zur Bodenfeuchte unterhalb eines bestimmten Maßstabs nicht mehr für verlässliche praxisrelevante, betriebsbezogene Aussagen ausreicht. Die kleinräumige Varianz der Böden kann von den bestehenden Modellen bisher nicht in der zeitlichen und räumlichen notwendigen Auflösung abgebildet werden (KORRES et al., 2015).

Verlässliche Aussagen von Bodenfeuchtemodellierungen, welche eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung bieten, erfordern eine hohe räumliche Auflösung und Datenqualität ihrer Eingangsparameter (KARL et al., 2012). Dies betrifft einerseits die bodenphysikalischen Parameter wie Korngröße, Lagerungsdichte und Humusgehalt, andererseits aber auch lange Zeitreihen in situ gemessener Bodenfeuchte, damit eine Kalibrierung und Validierung der Modelle erfolgen kann (DORIGO et al., 2011; OCHSNER et al., 2013). Trotz des Bedarfs für in situ-Messzeitreihen gab und gibt es in Deutschland und für Unterfranken nur wenige Monitoringstandorte für Bodenfeuchte und -temperatur (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2023; INTERNATIONAL CENTRE FOR WATER RESOURCES AND GLOBAL CHANGE & BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, 2023; WEINBAURING FRANKEN E.V., 2023). Im Vergleich dazu ist die Dichte der Wetterstationen um ein Vielfaches größer (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2022a; BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2023; DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023b).

1.2. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Das Untersuchungsgebiet Unterfranken zählt zu den Regionen Deutschlands, welche durch ihre Trockenheit vom Klimawandel besonders stark beeinflusst werden (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2012, 2022e; RAUH & PAETH, 2011; SCHÖNBEIN et al., 2020). Regionale Klimamodellierungen prognostizieren, dass sich Trockenperioden häufen, die Durchschnittstemperaturen steigen, Extremniederschläge häufiger auftreten und sich die Niederschläge vom Sommer in den Winter verschieben (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2021; BRASSEUR et al., 2017; REGIONALE KLIMABÜROS DER HELMHOLTZ-GESELLSCHAFT, 2023; SCHÖNBEIN et al., 2020). Unklar ist bisher allerdings noch, wie sich die veränderten Klimabedingungen, insbesondere Trockenphasen und Extremniederschläge, auf die Böden in Unterfranken auswirken und damit auch die Ertragsgrundlage in Land- und Forstwirtschaft beeinflussen. Insgesamt betrachtet, hängen deren Erträge zu einem sehr hohen Grad von der Wasserverfügbarkeit im Boden ab (EITZINGER et al., 2009). Der Wasserspeicherkapazität der Böden kommt dabei eine besonders große Bedeutung zu, da während einer Trockenphase die effektiven Niederschläge den Wasserbedarf der Pflanzen nicht decken können (STELLMACH, 2006) und bereits gespeichertes Bodenwasser das Überleben der Pflanzen sicherstellen kann. Für die land- und forstwirtschaftlichen Akteure sind in diesem Kontext qualitative und quantitative Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden essentiell, um die notwendigen Anpassungsmaßnahmen, z.B. bei der Bearbeitung einer Parzelle, treffen zu können (SCHALLER & WEIGEL, 2007). Insbesondere vor der Neuanpflanzung mehrjähriger Pflanzen, wie Weinreben und (Obst-) Bäume müssen die bodenkundlichen Standortbedingungen und deren mögliche Veränderungen berücksichtigt werden.

Die unterschiedlichen geologischen, geomorphologischen und klimatischen Verhältnisse Unterfrankens spiegeln sich auch in den Böden wider. Während im Spessart und in der Rhön vor allem Braunerden über Buntsandstein bzw. Basalt vorherrschen, finden sich auf den ackerbaulich intensiv genutzten Mainfränkischen Platten vor allem Braunerden und Rendzinen auf Muschelkalk und mit den Parabraunerden auf Löss auch die ertragreichsten Böden Unterfrankens. Das Steigerwaldvorland ist durch Braunerden, Regosole und Pelosole auf Unterem Keuper und Flugsand geprägt. Im Steigerwald und in den Haßbergen finden sich vor allem Braunerden und Pelosole auf Unterem und Mittlerem Keuper (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2010; MÜLLER, 1996). Sowohl die Böden im Odenwald und Spessart, als auch im Steigerwald und in den Haßbergen sind weniger ertragreich und werden vor allem forstwirtschaftlich genutzt. In der Rhön herrscht vor allem Forst- und Grünlandwirtschaft vor (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 2023a).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Dynamiken der Bodenfeuchte in charakteristischen Böden Unterfrankens besser zu verstehen, die Datenlage zum Verlauf der Bodenfeuchte zu verbessern und die Auswirkungen von zukünftig gehäuft auftretenden klimatischen Phasen abschätzen zu können. Hierzu wurden sechs meteorologisch-bodenhydrologische Monitoringstationen installiert. Die für ihre jeweiligen Naturräume und auch hinsichtlich ihrer anthropogenen Nutzung charakteristischen Monitoringstandorte befinden sich in Bürgstadt einem Weinberg des Weinguts Rudolf Fürst, in Herchsheim auf einem Acker des Landwirts Ernst Rauh, in Obbach auf einem Acker des Schloss Gut Obbach, im Forst des Universitäts-Forstamt Sailershausen (nachfolgend Uniwald genannt), in Oberrimbach im Forst der Fürstl. Castell'schen Forstabteilung und in Willmars im Forst des Forstbetriebs Paul Freiherr von Franckenstein (s. Abbildung 4 u. Kapitel 5). Begleitet wurden die Langzeitmessungen der Bodenfeuchte und –temperatur von Gelände- und Laboranalysen zur Erhebung der grundlegenden bodenkundlichen Parameter der Bodenprofile und der Standorte. Für die Auswertung der Bodenfeuchtedaten mussten auch Daten zu Niederschlag, Lufttemperatur und weiteren meteorologischen Parametern erhoben werden. Die qualitative Auswertung der Bodenfeuchtezeitreihen bildet die Grundlage für Einschätzungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenfeuchte der charakteristischen Böden Unterfrankens.

Das folgende Kapitel 2 gibt einen aktuellen Überblick über die Bodenhydrologie als zentralen Forschungsgegenstand dieser Arbeit. Nach einer Einführung zur Untersuchungsregion Unterfranken (Kapitel 3) und den verwendeten Methoden (Kapitel 4), werden dazu zunächst die Gelände- und Laborergebnisse der Untersuchungsgebiete (Kapitel 5) dargestellt. Die Auswertung (Kapitel 6) und Diskussion (Kapitel 7) der Bodenfeuchtemonitoringdaten ermöglichen eine Einschätzung welche Auswirkungen die zukünftig zu erwartenden klimatischen Phasen auf die Bodenfeuchte haben werden (Kapitel 8). Den Abschluss bildet ein Überblick der möglichen Anpassungsmaßnahmen an die zukünftigen Klimabedingungen (Kapitel 9).

2. Der Bodenwasserhaushalt in der Forschung

Boden besteht nicht nur aus festem, mineralischem und organischem Material, sondern insgesamt aus drei Phasen: der festen, der flüssigen und der gasförmigen Phase (NOVÁK & HLAVÁČIKOVÁ, 2019). Alle drei Phasen besitzen eine entscheidende Bedeutung für das Funktionieren des Lebensraums Boden.

Der Bodenwasserhaushalt als physikalische Größe ist maßgeblich durch das Gesamtporenvolumen, die Porengrößenverteilung und die Kontinuität der Poren bestimmt (WESSOLEK, 2016). Die Beziehungen zwischen den einzelnen Einflussfaktoren werden durch zahlreiche Begriffe und Kennzahlen beschrieben und bewertet. In der Literatur bezeichnen oft verschiedene Begriffe den gleichen Parameter und diese werden zum Teil unterschiedlich definiert. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein kurzer Überblick über alle relevanten Begriffe und Definitionen gegeben.

2.1. Grundlagen der Bodenhydrologie: Parameter und Definitionen

Hydraulisches Potential ψ_h

Das hydraulische Potential ψ_h gibt die Energie an, welche aufgewendet werden muss, um Bodenwasser von einem Referenzzustand an einen bestimmten Punkt im Boden zu bringen und wird als Druck [Pa] oder als Wassersäule [cmWS] angegeben. Es setzt sich aus den Teilpotentialen des Gravitationspotentials ψ_g und dem Matrixpotential ψ_m zusammen (STAHR et al., 2020; WESSOLEK, 2016).

$$\psi_h = \psi_g + \psi_m$$

Das *Gravitationspotential* ψ_g bezeichnet die potentielle Energie des Bodenwassers in einer bestimmten Tiefe in Bezug auf eine frei gewählte Referenzfläche [cmWS] (BECHER, 2004). Das *Matrixpotential* ψ_m entspricht dem Energieverlust des Bodenwassers durch die physikalische Bindung an die feste Bodenmatrix. Generell ist das Matrixpotential ψ_m negativ und sein Betrag wird als Wasserspannung [cmWS oder hPa, wobei 1 cmWS = 1 hPa] angegeben (STAHR et al., 2020). Je weniger Wasser im Boden ist, desto höher ist das Matrixpotential und umgekehrt (WESSOLEK, 2016). Das *osmotische Potential* ψ_o trifft ausschließlich für salzhaltige Böden zu und kann für mitteleuropäische Böden vernachlässigt werden (BECHER, 2004; STAHR et al., 2020; WESSOLEK, 2016)

Trockenrohdichte ρ_T

Die Trockenrohdichte ρ_T ist der Quotient aus der Trockenmasse einer Bodenprobe in natürlicher Lagerung und ihrem Volumen (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Synonym zum Begriff „Trockenrohdichte“ wird auch der Begriff „Lagerungsdichte“ verwendet (AMELUNG et al., 2018).

$$\rho_T = m/V$$

mit ρ_T = Trockenrohdichte [g/cm³]

m = Masse [g]

V = Volumen [cm³]

Effektive Lagerungsdichte L_d

Die effektive Lagerungsdichte L_d [g/cm³] beschreibt den kombinierten Einfluss der Textur und der Trockenrohdichte auf den Bodenverdichtungsgrad (RENGER et al., 2014a). Die effektive Lagerungsdichte kann mit Hilfe von halbquantitativen Gefügemerkmalen an Bodenprofilen geschätzt oder anhand der im Labor gemessenen Trockenrohdichte ρ_T unter Berücksichtigung der Textur berechnet werden (AD-HOC-AG BODEN, 2005; RENGHER et al., 2014a). Die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte erfolgt nach RENGHER et al. (2014a):

$$L_d = \rho_T + 0,005 \cdot \text{Ton} + 0,001 \cdot \text{Schluff}$$

mit L_d = Lagerungsdichte [g/cm³]

ρ_T = Trockenrohdichte [g/cm³]

Ton = Tongehalt [%]

Schluff = Schluffgehalt [%]

0,005 = Tongehaltfaktor [g/(cm³ · % Ton)]

0,001 = Schluffgehaltfaktor [g/(cm³ · % Ton)]

Wasserretentionskurve, Wasserspannungskurve oder pF-Kurve

Die Wasserretentionskurve bzw. pF-Kurve (s. Abbildung 2) beschreibt die Beziehung zwischen der Wasserspannung [hPa] und dem Wassergehalt [Vol.-%] als dekadischen Logarithmus der Wasserspannung [loghPa] (BECHER, 2004; WESSOLEK, 2016). Der logarithmierte Wert entspricht einer pF-Stufe (STAHR et al., 2020). Die Kennwerte der pF-Kurve (wie FK, nFK, LK, TW, PWP) werden auch als „Hydrolimits“ bezeichnet (NOVÁK & HLAVÁČIKOVÁ, 2019).

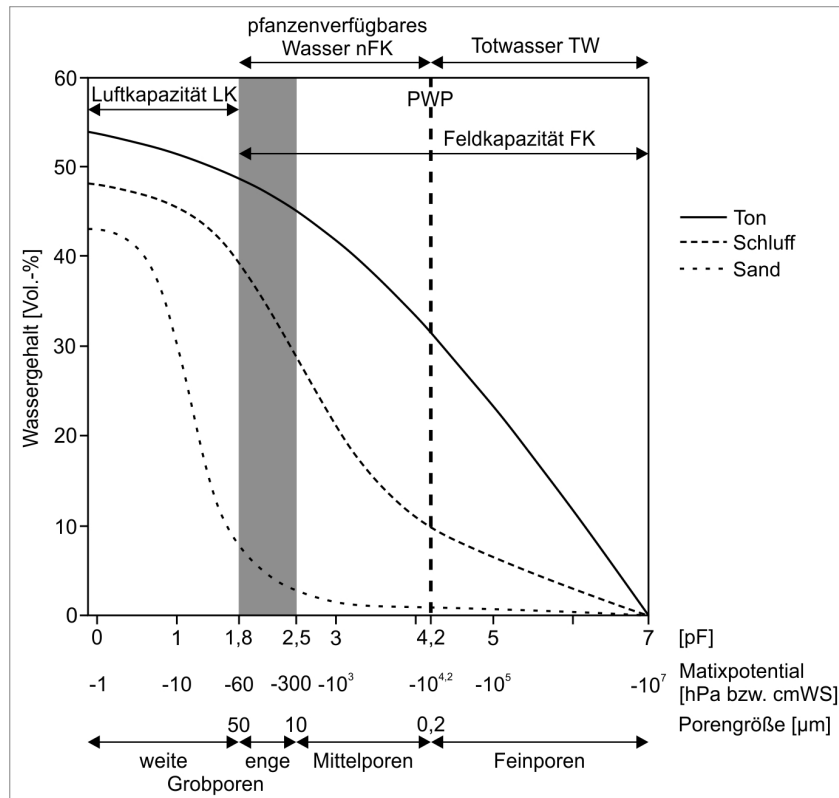


Abbildung 2: Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung für verschiedene Bodenarten (pF-Kurve).

Die Hydrolimits (LK, FK, nFK, TW) entsprechen bestimmten Porengrößen.

Quelle: verändert nach AMELUNG et al. (2018) und WESSOLEK (2016).

Hysterese

Die Hysterese (auch Hysteresis genannt) beschreibt den Effekt, dass ein Boden bei gleicher pF-Stufe während eines Entwässerungsvorgangs einen höheren volumetrischen Wassergehalt hat, als während eines Bewässerungsvorgangs (AMELUNG et al., 2018; BECHER, 2004; WESSOLEK, 2016). Die Hysterese ist auf die irreguläre Porengeometrie zurückzuführen. Poren mit einem geringeren Radius benötigen einen geringeren Wasserdruck um sich zu füllen als das für Poren mit einem größeren Radius der Fall ist. Bei der Entwässerung ist hingegen der kleinste Porenradius entscheidend, weil der Kapillardruck höher ist. Das unterschiedliche wassergefüllte Volumen bei gleichen Druckverhältnissen wird auch „ink-bottle-effect“ genannt (s. Abbildung 3) (BOHNE, 2004, 2005; RADCLIFFE & SIMUNEK, 2010; SELKER & OR, 2019; STAHR et al., 2020). Da die Entwässerung nie bei völlig wassergesättigtem Boden beginnt, ebenso wie die Bewässerung nicht bei völlig trockenem Boden, ergeben sich immer verschiedene Funktionsverläufe. Be- und Entwässerung bewegen sich fast immer auf sog. „scanning curves“ zwischen der Hauptbewässerungs- und Hauptentwässerungskurve (BOHNE, 2004, 2005).

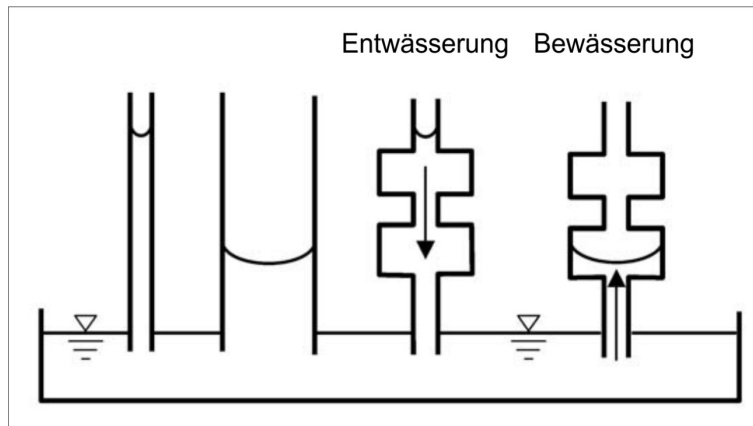


Abbildung 3: Erklärung der Hysterese anhand des "ink-bottle-effect".

Bei kleinem Porenradius ist der Kapillardruck höher, als bei großem Porenradius. Folglich steigt bei gleicher pF -Stufe die Wassersäule im kleineren Zylinder höher als im größeren (links).

Bei Entwässerung ist somit der kleinste Porenradius für den benötigten Druck verantwortlich, bei der Bewässerung der größte Porenradius (rechts).

Quelle: verändert nach BOHNE (2005).

Gesamtporenvolumen GPV

Das Gesamtporenvolumen umfasst alle luft- und wassergefüllten Hohlräume eines Bodens und ist somit die Summe aus Totwasser, nutzbarer Feldkapazität und Luftkapazität. Das Gesamtporenvolumen entspricht dem Wassergehalt bei vollständiger Sättigung des Bodens (AD-HOC-AG BODEN, 2005; WESSOLEK, 2016).

$$V_g = V_f + V_p$$

mit V_g = Gesamtvolumen des Bodens [Vol.-%]

V_f = Volumen der Festphase [Vol.-%]

V_p = Volumen des Porenraums [Vol.-%]

$$V_p = V_w + V_l$$

mit V_w = wassergefüllter Porenraum [Vol.-%]

V_l = luftgefüllter Porenraum [Vol.-%]

Die Größe Volumen-Prozent [Vol.-%] entspricht den Angaben mm Wassersäule pro dm^3 Boden [mm/dm^3] oder Liter pro m^2 [l/m^2] Bodenfläche (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Feldkapazität FK

Die Feldkapazität entspricht dem Wassergehalt, den ein Boden im statischen Gleichgewicht gegen die Schwerkraft zu halten vermag (STAHR et al., 2020). Böden erreichen im Frühjahr einige Tage nach Niederschlägen oder nach der Schneeschmelze ihre Feldkapazität (Stahr et al. 2020, Wessolek 2016). Der Wert schwankt bei Böden unterschiedlicher Bodenart zwischen $pF = 1,8$ und $pF = 2,5$ (NOVÁK & HLAVÁČIKOVÁ, 2019). Die Feldkapazität kann als Wassergehalt [Vol.-%] angegeben werden den ein

Boden 2 bis 3 Tage nach voller Wassersättigung bei freier Drainage und ohne Evaporation erreicht, oder als Menge des Bodenwassers, die bei einer Saugspannung von größer pF 1,8 gebunden ist (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Wichtig ist die Feldkapazität für die näherungsweise Ermittlung des pflanzenverfügbaren Bodenwasservorrats und der Luftkapazität, sowie um das auffüllbare Porenvolumen für die Hochwasserprognose abschätzen zu können (RENGER et al., 2009).

Nutzbare Feldkapazität nFK

Die nutzbare Feldkapazität entspricht der Menge des Bodenwassers, die in Poren mit einem Durchmesser zwischen 50 µm und 0,2 µm bzw. bei einer Saugspannung zwischen pF 1,8 und pF 4,2 gebunden ist (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die nutzbare Feldkapazität ist die Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt und stellt den Anteil des Bodenwassers dar, welcher für die Pflanzen nutzbar ist (WESSOLEK, 2016).

$$nFK = FK - PWP$$

Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum nFKWe

Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ist die horizontweise berechnete und aufsummierte nFK des für die Pflanzen ausschöpfbaren Bodenwassers in l/m² (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die Berechnung der nFKWe nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) wird in Kapitel 4.4 beschrieben.

Luftkapazität LK

Die Luftkapazität bezeichnet den Porenanteil zwischen Gesamtporenvolumen und Feldkapazität (WESSOLEK, 2016). Mit einem pF-Wert von maximal 1,8 können die Grobporen von > 50 µm nur kurzzeitig Wasser gegen die Schwerkraft halten, wenn es zu einem Wasserüberschuss oder Bodensättigung kommt. Die Luftkapazität ist ein Maß für die Versorgung der Pflanzenwurzeln mit Sauerstoff und sollte mindestens 7-8 Vol.-% betragen (AD-HOC-AG BODEN, 2005; WESSOLEK, 2016).

$$LK = GPV - FK$$

Permanenter Welkepunkt PWP

Der permanente Welkepunkt bei $pF = 4,2$ ($15000 \text{ hPa} = 15000 \text{ cmWS}$) beschreibt den Grenzwert bei dem Pflanzen irreversibel zu welken beginnen. In diesem Fall sind die Grob- und Feinporen entwässert und das restliche Wasser ist mit einem $pF > 4,2$ gebunden (AD-HOC-AG BODEN, 2005; STAHR et al., 2020; WESSOLEK, 2016). Der PWP kann bei dürrebeständigen Pflanzen bis auf $pF = 4,7$ ansteigen und somit die nFK für diese Pflanzen erhöhen (BLUME et al., 2010).

Totwasser $pF = < 4,2$

Das für Pflanzen nicht mehr nutzbare Bodenwasser über dem pF -Wert 4,2 wird als Totwasser bezeichnet. Das als Totwasser beschriebene nicht pflanzenverfügbare Haftwasser liegt in Feinporen mit einem Äquivalentdurchmesser von $< 0,2 \mu\text{m}$ vor (AD-HOC-AG BODEN, 2005; WESSOLEK, 2016).

Wasserleitfähigkeit, Wasserdurchlässigkeit k_f -Wert

Die Wasserleitfähigkeit [m/s oder cm/d] ist der Quotient aus hydraulischer Leitfähigkeit und Druckgefälle und hängt von der Art und Anzahl der Bodenporen ab (AD-HOC-AG BODEN, 2005; BLUME et al., 2011). Es wird zwischen der gesättigten (k_f) und ungesättigten Wasserleitfähigkeit (k_u) unterschieden. Bei der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f -Wert) sind vor allem die Grobporen beteiligt und die Wasserleitfähigkeit ist am höchsten (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Da die Wasserleitfähigkeit in hohem Maße von den Poren und der Form der Fließwege (Aggregation, Durchwurzelung) abhängig ist, stellt der k_f -Wert die am meisten streuende physikalische Bodeneigenschaft (Tortuosität) dar (AD-HOC-AG BODEN, 2005; AMELUNG et al., 2018; STAHR et al., 2020; WESSOLEK, 2016). Gemessene k_f -Werte können sich deshalb über mehrere Zehnerpotenzen erstrecken (BLUME et al., 2011; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2003).

Feuchtigkeitsäquivalent $F\ddot{A}$

Das Feuchtigkeitsäquivalent ($F\ddot{A}$) nach VETTERLEIN (1983) wird aus den im Frühjahr gemessenen Bodenwassergehalten abgeleitet. Im Gegensatz zur Feldkapazität FK orientiert sich das $F\ddot{A}$ an den in-situ-gemessenen Bodenfeuchtwerten. Nach RENGER et al. (2009) liegen die Vorteile der $F\ddot{A}$ gegenüber der FK in der Berücksichtigung von (1) Hystereseeffekten und Lufteinschlüssen, (2) den Eigenschaften des untersuchten Bodenprofils und (3) den klimatischen Standortbedingungen.

Das Feuchtigkeitsäquivalent gibt den Bodenwassergehalt zu Beginn der Vegetationszeit etwa 2 bis 3 Tage nach Niederschlagsperioden an. Gegenüber den im Labor ermittelten FK-Werten sind die $F\ddot{A}$ -Werte auf Grund von Hystereseeffekten und Lufteinschlüssen deutlich niedriger (RENGER et al., 2009). Die Bestimmung des Feuchtigkeitsäquivalent aus der Saugspannungskurve ist in der TGL 31222/04 beschrieben (AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER DDR, 1985).

2.2. Monitoring des Bodenwassers

Die Methoden für ein Monitoring der Bodenfeuchte unterscheiden sich in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung deutlich. Generell nimmt die zeitliche Auflösung mit der räumlichen Auflösung ab, d.h. die höchste zeitliche Auflösung erreicht man mit der höchsten räumlichen Auflösung bei direkten Punktmessungen. BABAEIAN et al. (2019) geben einen umfassenden Überblick über alle gängigen Monitoringmethoden und Sensoren von Punktmessungen bis hin zu satellitengestützter Fernerkundung. Die Entwicklung des satellitengestützten Bodenfeuchtemonitorings stellen OCHSNER et al. (2013) und MOHANTY et al. (2017) dar. VERECKEN et al. (2014) beschreiben den Versuchsaufbau eines hochaufgelösten Monitorings auf der kleinräumigen Feldskala.

Auf der Punktskala kann die Bodenfeuchte direkt und indirekt gemessen werden. Eine direkte Messung der Bodenfeuchte kann nur über Gewichtsänderungen des Wassergehalts gemessen werden. Für ein Langzeitmonitoring scheidet die Wassergehaltsmessung im Labor aus, da sie destruktiv ist (SENEVIRATNE et al., 2010). Lysimeter erlauben hingegen die Messung der gravimetrischen Wassergehaltsänderung der gesamten Profilsäule (GROH et al., 2020; HAFERKORN, 2000; LYSIMETER RESEARCH GROUP, 2022). Der Nachteil von Lysimetern ist aber der hohe finanzielle und technische Aufwand zur Installation, weshalb sie für diese Arbeit nicht in Frage kamen.

Indirekt kann die Bodenfeuchte durch „neutron scattering“, Elektromagnetismus, „heat pulse probe“ (HPP) und andere Methoden wie Gammastrahlung gemessen werden (BABAEIAN et al., 2019; OCHSNER et al., 2013; VERECKEN et al., 2015; VERECKEN et al., 2014). Mit Einführung der elektromagnetischen TDR (time domain reflectometry)-Sensoren hat sich diese Methode in der punktuellen Bodenfeuchtemessung auf Grund der einfachen Anwendung und geringen Kosten durchgesetzt und wurde auch für die vorliegende Arbeit verwendet (BABAEIAN et al., 2019).

Neben TDR-Sensoren können für das kleinräumige Monitoring, allerdings meist mit geringerer zeitlicher Auflösung, auch Methoden wie ground penetrating radar (GPR), electromagnetic induction (EMI) und nuclear magnetic resonance imaging (NMRI) eingesetzt werden (BABAEIAN et al., 2019). Diese Methoden werden meist mit längeren zeitlichen Abständen (wöchentlich bis monatlich) zwischen den einzelnen Messungen eingesetzt und müssen mit Punktmessungen (z.B. durch TDR-Sensoren) validiert werden (FÄTH et al., 2022). Wegen der deutlich geringeren zeitlichen Auflösung und des höheren Arbeitsaufwandes fanden diese Methoden hier keine Anwendung.

2.3. Modellierung des Bodenwasserhaushalts

Um die Datenlücken der verschiedenen Bodenfeuchtemonitoringmethoden zu schließen oder von Punktmessungen auf die Fläche schließen zu können, wird auf Bodenfeuchte Modelle zurückgegriffen. Die Bandbreite reicht von eindimensionalen Modellen, wie z.B. Hydrus1D (SIMUNEK et al., 2008), bis zu dreidimensionalen Landschaftsmodellen wie z.B. WaSiM-ETH (SCHULLA, 2017). Die meisten Modelle beruhen auf der numerischen Lösung der Richards-Gleichung (RICHARDS, 1931).

Zur Lösung der Richards-Gleichung werden Daten zur hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens bzw. des jeweiligen Horizonts benötigt, welche stark variieren. Die Wasserretentions- oder auch Wasserspannungskurve gibt die hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt wieder (s. Kapitel 2.1). Die Wasserspannungskurve kann entweder für jeden Horizont gemessen werden oder mit Hilfe von Pedotransferfunktionen bzw. Programmen wie z.B. RETC berechnet werden (VAN GENUCHTEN et al., 1991; VAN GENUCHTEN et al., 2009). Für die Berechnung der Wasserretentionskurve werden wiederum die van Genuchten-Parameter der Wasserretention benötigt, welche mittels einer weiteren Pedotransferfunktion wie z.B. Rosetta3 aus Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte und dem Wassergehalt bei einem Matrixpotential von 330 cmWS (= pF-Wert 2,5) und von 15000 cmWS (= pF-Wert 4,2) berechnet werden (SCHAAP et al., 2001; ZHANG & SCHAAP, 2017). Bei der Anwendung von Rosetta3 wird mindestens die Korngrößenverteilung benötigt, mit zusätzlichen Daten wird die Ableitung der van Genuchten-Parameter aber genauer.

Unter Verwendung weiterer Pedotransferfunktionen können auch bodenhydrologische Effekte wie Hysterese, Infiltration, Evaporation und Transpiration berücksichtigt werden. Je besser und vollständiger die Eingangsdaten sind, desto zuverlässiger bilden die Modelle die gemessenen Bodenwasserwerte ab (RASSAM et al., 2018). Um hierbei ein gutes Ergebnis zu erzielen, müssen z.B. bei Hydrus1D die Einstellungen in mehreren Iterationen immer wieder angepasst und verfeinert werden (NASCIMENTO et al., 2018; SIMUNEK et al., 2012).

Die Entwicklung und Verbesserung der Pedotransferfunktionen auf Basis mathematischer und statistischer Methoden wird unter dem Begriff „Pedometrics“ zusammengefasst (MCBRATNEY et al., 2018). Auch die Bodenwasserhaushaltsmodelle werden dem Gebiet der Pedometrics zugerechnet (MINASNY et al., 2013). Pedotransferfunktionen (PTF) werden an bestehenden Datensätzen trainiert und teilweise auf bestimmte Regionen angepasst (TOTH et al., 2015). Wie WEIHERMÜLLER et al. (2021) zeigen, hat die Auswahl der verwendeten PTF großen Einfluss auf die Ergebnisqualität der Bodenwasserhaushaltsmodelle. Um diese weiter verbessern zu können, müssen auch die zugrundeliegenden PTF weiterentwickelt werden. So sollten verschiedene Pedotransferfunktionen in den Modellen berücksichtigt werden, um die Schwächen einzelner PTFs auszugleichen. Weiter müssen die Einflüsse von Steinen und Kiesen im Boden, ebenso wie die zeitlichen und räumlichen

Veränderungen einzelner Eigenschaften, wie z.B. der Porosität, in den PTFs und Modellen Berücksichtigung finden (VERECKEN et al., 2022).

Für Unterfranken wird der Bodenwasserhaushalt mit WaSiM-ETH (KRAUSE & SCHÄFER, 2019; SCHÄFER et al., 2020) und LWF-Brook90 (WEIS et al., 2015) modelliert. SCHÄFER (laufende Dissertation) verwendet für die Modellierung mit WaSiM-ETH auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobene Monitoringdaten.

2.4. Bodenhydrologische Datensätze und Monitoringdaten

Für Deutschland und Bayern können bodenhydrologische Eigenschaften und tagesaktuelle Modellierungen der Bodenfeuchte öffentlich von verschiedenen Anbietern abgerufen werden. Tagesaktuelle Messdaten der Bodenfeuchte sind dagegen nur vereinzelt vorhanden bzw. öffentlich zugänglich.

Kennwerte der Wasserbindung wie Tiefe, FK und nFKWe liegen deutschlandweit im „Hydrologischen Atlas von Deutschland“ im Maßstab 1:2.000.000 (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, 2020) vor und sind online über das Geoportal der BfG oder Geoportal.de (BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE, 2023) abrufbar. Für Bayern sind diese Kennwerte im Maßstab 1:25.000 über den UmweltAtlas Bayern abrufbar (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2023). Die Wasserspannung für Werte von 100 cmWS, 330 cmWS und 15000 cmWS sind für sechs Tiefenstufen in einer Auflösung von 250 m global verfügbar (TUREK et al., 2023).

Tagesaktuelle Karten zur modellierten Bodenfeuchte werden deutschlandweit vom Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, vom Deutschen Wetterdienst und vom Forschungszentrum Jülich bereitgestellt. Der UFZ-Dürremonitor Deutschland basiert auf dem mesoskaligen hydrologischen Modell mHM, hat eine räumliche Auflösung von 4 km x 4 km und reicht bis in eine Tiefe von 1,8 m (HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ, 2023). Der Bodenfeuchteviewer des DWD basiert auf dem Modell AMBAV 2.0 (Agrarmeteorologische Berechnung der aktuellen Verdunstung) und berechnet die Bodenfeuchte bis in 2 m Tiefe in einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km. Neben einer interaktiven Bodenfeuchtekarte können für die DWD-Klimastationen auch berechnete Bodenfeuchteprofile abgerufen werden (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023a). Der Wasser-Monitor des Forschungszentrums Jülich basiert wiederum auf dem Modell ParFlow. Die räumliche Auflösung ist mit 600 m zwar am höchsten und es gibt eine Zukunftsprognose für 9 Tage, allerdings werden nur die obersten 30 cm des Bodens betrachtet (FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH, 2023). Für Bayern wird die Bodenfeuchte in vier Klassen mit dem Modell SIMPEL berechnet und kann im GeoBox-Viewer abgerufen werden. Als Eingangsdaten werden nur Niederschlag und Verdunstung, sowie

Flächendaten der Bodenschätzung verwendet. Diese Modellierung soll vor allem zum Vergleich einzelner Flächen dienen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023d).

Ein Monitoring der Bodenfeuchte wird in Deutschland von vielen unterschiedlichen Akteuren durchgeführt. In der Regel werden diese Untersuchungen über Forschungsprojekte finanziert, allerdings sind die gemessenen Daten auch nach Beendigung der Projekte nicht immer öffentlich zugänglich (DISSE et al., 2022). Mit dem International Soil Moisture Network (INTERNATIONAL CENTRE FOR WATER RESOURCES AND GLOBAL CHANGE & BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, 2023) existiert zwar eine Datenbank, um Bodenfeuchtedaten tagesaktuell zugänglich zu machen und auch nach Projektende dauerhaft zu sichern, allerdings wird dies in Deutschland bisher nur sehr wenig genutzt. Tagesaktuelle Bodenfeuchtedaten sind in Deutschland bestenfalls über die entsprechenden Projektwebseiten einsehbar.

Das größte Bodenfeuchtemonitoringnetzwerk in Deutschland wird vom TERENO (Terrestrial Environmental Observatories)-Netzwerk betrieben. In den vier TERENO-Observatorien kommen TDR-Sensoren, Lysimeter und Cosmic-Ray Neutron-Sensoren zum Einsatz und die Daten sind über die Projektwebseite abrufbar (BOGENA et al., 2010; TERENO, 2022). Die LYSIMETER RESEARCH GROUP (2022) gibt einen Überblick über die in Deutschland betriebenen Lysimeter. In Hamburg wurde ein Bodenfeuchtemonitoring im Rahmen des Projekts HUSCO (Hamburg Urban Soil Climate Observatory) durchgeführt (UNIVERSITÄT HAMBURG, 2021; WIESNER et al., 2014; WIESNER et al., 2016). Die Universität Göttingen betreibt ein öffentlich zugängliches Bodenfeuchtemonitoring bei dem alle Wasserflüsse in einem Wald erfasst werden (BECKER et al., 2019; SAUER & DROLLINGER, 2023). Im Rahmen des Kroof-Dürre-Experiments wurde auch die Bodenfeuchte intensiv beobachtet, um den Einfluss einer Dürre auf einen Waldstandort beurteilen zu können (GRAMS et al., 2021).

Für Unterfranken stehen tagesaktuelle Beobachtungsdaten der Bodenfeuchte von der Waldklimastation Würzburg der BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2023) und den vier Stationen des WEINBAURING FRANKEN E.V. (2023) zur Verfügung (s. Tabelle 63). Die Daten der Waldklimastation können über das Web-GIS der LWF, die Daten des Weinbaurings sowohl über dessen Webseite als auch über den GeoBox-Viewer der BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023d) abgerufen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden seit 2018 meteorologisch-bodenhydrologische Daten der fünf Messstationen über den Klimaatlas Unterfranken zur Verfügung gestellt (www.bigdata-at-geo.eu/klimaatlas JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG, 2023a). Die Monitoringdaten der Bayerischen Landesanstalt für Wein und Gartenbau (LWG), von FÄTH et al. (2022) und von DISSE et al. (2022) sind nicht tagesaktuell verfügbar. Die Daten der LWG wurden im Rahmen einer unveröffentlichten Masterarbeit von ZHUANG (2020) qualitativ und quantitativ ausgewertet.

Die drei Großräume (s. Abbildung 4) untergliedern sich überwiegend anhand ihrer Geomorphologie in 23 verschiedene Naturräume des Untersuchungsgebiets und sind Teil der Naturraum-Haupteinheiten D47 „Osthessisches Bergland, Vogelsberg und Rhön“, D53 „Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Tiefland“, D55 „Odenwald, Spessart und Südrhön“, D56 „Mainfränkische Platten“, D57 „Neckar- und Tauberland, Gäuplatten“ und D59 „Fränkisches Keuper-Lias-Land“ (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, o.J.).

Das Rhein-Main-Tiefland im westlichen Vorland des Spessart ist durch eine flächige und ebene Morphologie mit Höhen zwischen 50 m und 100 m NHN geprägt. Odenwald, Spessart und Südrhön sind intensiv zertalte Mittelgebirge mit Höhen zwischen 50 m bzw. 100 m und 600 m NHN. Dagegen sind Vorder- und Kuppenrhön sowie die Lange Rhön morphologisch durch die hohe Reliefenergie zwischen Kuppen und Hochflächen mit bis zu 930 m NHN und den tief eingeschnittenen Tälern um 250 m NHN geprägt. Die Mainfränkischen Platten sind im Westen auf Muschelkalk als hügelig zu bezeichnen, während der östliche Teil auf Keuper durch weitflächige Verebnungen mit Dellen gekennzeichnet ist. Das Relief liegt in einem Höhenband von ca. 150 m NHN im Maintal und 400 m NHN, wobei die mittlere Höhenlage um 300 m NHN liegt (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1993). Steigerwald und Haßberge treten morphologisch durch ihre markante Schichtstufe hervor (REH & BLUM, 2011e). Während der Steigerwald durch nach Osten entwässernde Hochflächen und Täler geprägt ist, stellen die Haßberge eine zerriedelte Hochfläche mit bis zu 510 m NHN dar (HABBE, 2003; REH & BLUM, 2011d, 2011e).

3.2. Geologie

Unterfranken ist als Teil des Süddeutschen Schichtstufenlandes überwiegend durch die triassischen Sedimentgesteine des Buntsandsteins, Muschelkalks und Keupers geprägt. Tektonische Hebungsvorgänge im Tertiär bewirkten die Heraushebung von Odenwald, Spessart und Rhön, wodurch das gesamte mesozoische Gesteinspaket schräg gestellt wurde und um ca. 2° nach Südosten einfällt. Durch die nachfolgende Erosion wurden ca. 1000 m bis 1200 m an auflagernden Gesteinen abgetragen (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1996a; MÜLLER, 1996). Unterfranken ist dadurch von West nach Ost in „Streifen“ jünger werdender Geologie gegliedert (GEYER, 2002).

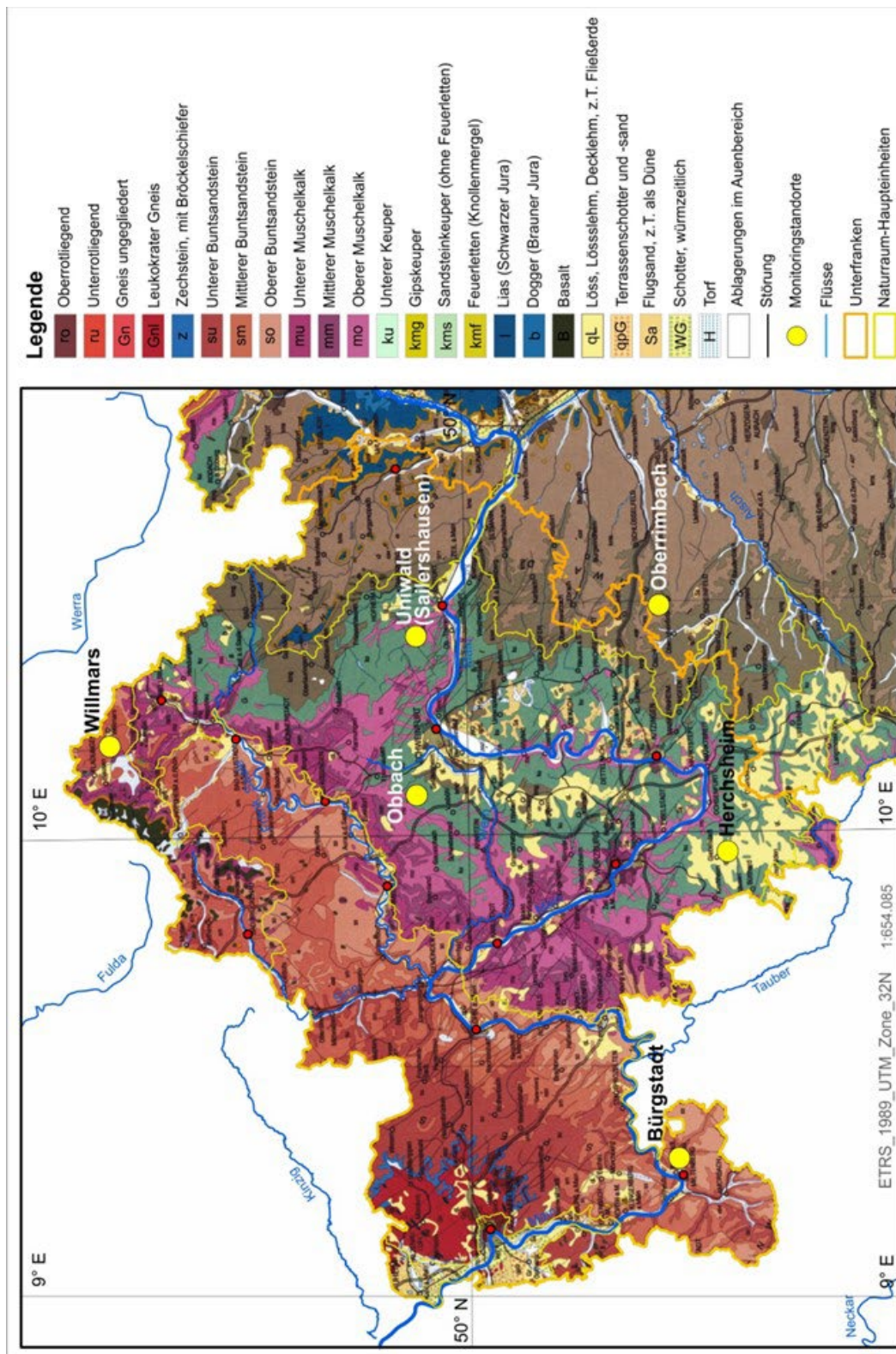


Abbildung 5: Geologische Karte von Unterfranken im Maßstab 1:500.000.
 Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2018); BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996b, verändert); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2018b); BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2017); eigene Darstellung.

Im Vorspessart stehen mit dem paläozoischen Grundgebirge die ältesten Gesteine Unterfrankens an (s. Abbildung 5). Entlang der Spessartkante wird das Grundgebirge von Rotliegendem und Zechstein überlagert. Odenwald, Spessart und Südrhön bestehen aus Buntsandstein. Der Übergang von Spessart und Rhön in die Mainfränkischen Platten markiert den geologischen Wechsel von

Buntsandstein zu Muschelkalk. Die Mainfränkischen Platten sind durch einen geologischen Wechsel zweigeteilt. Der westliche Teil der Mainfränkischen Platte befindet sich auf Muschelkalk, der östliche Teil bereits auf Unterem Keuper. Der Untere Keuper der Mainfränkischen Platten ist großflächig durch alttertiären bis quartären Löss überlagert (GEYER, 2002; MÜLLER, 1996). Die Schichtstufe von Steigerwald und Haßbergen im Osten Unterfrankens markiert den Wechsel von Unterem Keuper zu Mittlerem Keuper. Der unterfränkische Steigerwald-Anteil besteht gänzlich aus Mittlerem Keuper. In den Haßbergen ist dagegen die gesamte Abfolge des Keupers und im Nordosten sowie östlich der Baunach bereits der Untere Jura aufgeschlossen. Tertiärer Vulkanismus bildete die Lange Rhön im Norden Unterfrankens, wodurch diese von Basalt dominiert ist. Sehr kleinräumig steht dieser Basalt auch in der Südrhön sowie als Teil der Heldburger Gangschar im Grabfeld und den Haßbergen an (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1996a). Das Maintalsystem mit den Tälern von Main und dessen Tributären Saale, Sinn und Tauber ist durch Pleistozäne und Holozäne Flussterrassen geprägt (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1996a; GEYER, 2002; MÜLLER, 1996).

Hydrogeologisch ist Unterfranken Teil des Großraums 6 „West- und süddeutsches Schichtstufen- und Bruchschollenland“ und mit kleinem Anteil im Westen Teil des Großraums 10 „Südwestdeutsches Grundgebirge“. Der Großteil von Unterfranken umfasst den Raum 62 „Süddeutscher Buntsandstein und Muschelkalk“, Steigerwald und Haßberge sind Teil des Raums 63 „Süddeutscher Keuper und Albvorland“ (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, o.J.; BÜTTNER et al., 2003). Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung liegt zwischen 25 mm/a östlich von Würzburg und 148 mm/a im gesamten Maingebiet. In Spessart und Rhön kann die Grundwasserneubildung lokal auch 400 bis 600 mm/a betragen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2018a). Im Jahrzehnt 2011 bis 2020 ist die Grundwasserneubildung gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 deutlich zurückgegangen. Das Defizit der Grundwasserneubildung beträgt -22 % für Unterfranken (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2021a).

3.3. Klima

Unterfranken lässt sich in zwei Klimaregionen unterteilen: Mainregion und Spessart-Rhön (s. Abbildung 6). Die Unterteilung der insgesamt sieben bayerischen Klimaregionen erfolgt anhand von ähnlicher Temperatur und Niederschlag (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022a, 2022b; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2021). Durch die vorherrschenden Westwinde liegt Unterfranken unter einem maritimen Einfluss und ist ganzjährig humid (SCHÖNBEIN et al., 2020).



Abbildung 6: Klimaregionen im Regierungsbezirk Unterfranken: Mainregion und Spessart-Rhön. Quelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021b), verändert.

Die starke räumliche Variabilität des unterfränkischen Klimas ist in erster Linie auf die Topographie zurückzuführen. Die höher gelegenen Gebiete Odenwald, Spessart und Rhön im Westen und Steigerwald und Haßberge im Osten weisen kühlere Temperaturen auf als die tief gelegenen Gebiete entlang des Mains (vgl. Abbildung 7a und Abbildung 7b). Die räumliche Differenz der Temperatur beträgt bis zu 5 °C (SCHÖNBEIN et al., 2020). Während der Sommermonate zeigen die Temperaturen

einen kontinentalen Charakter, dagegen tritt in den Wintermonaten der ozeanische Charakter hervor (MÜLLER, 1996).

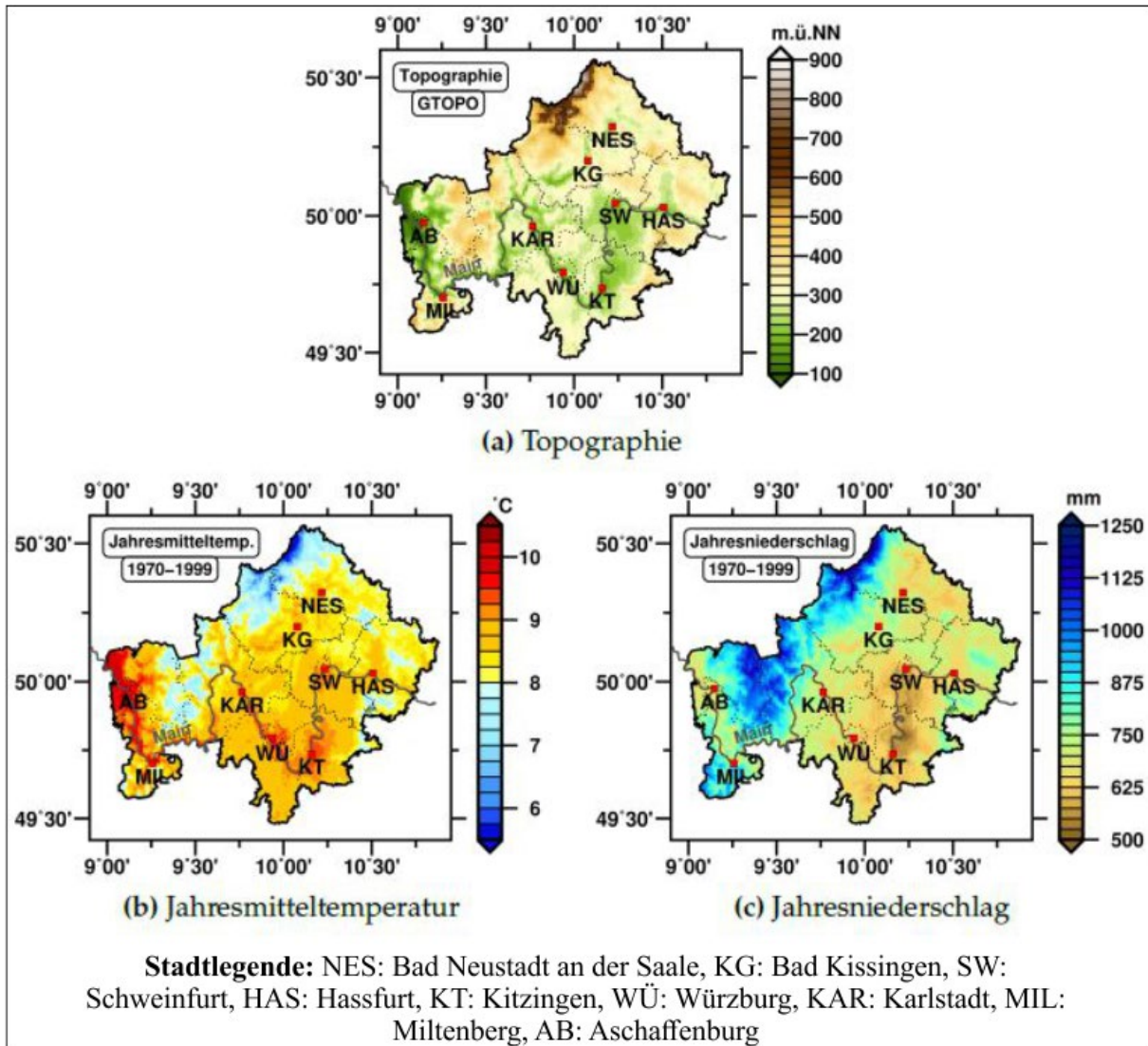


Abbildung 7: Vorherrschende Topographie (a, zeitlich invariant) sowie klimatologisches Jahresmittel der bodennahen Lufttemperatur (b) und mittlerer Jahresniederschlag (c) in Unterfranken während der Referenzperiode 1970-1999.

Quelle: SCHÖNBEIN et al. (2020), verändert.

Die Niederschlagsverteilung ist auf die Topographie und die vorherrschenden Westwinde zurückzuführen (vgl. Abbildung 7a und 7c). Odenwald, Spessart und Rhön sind durch den Luv-Effekt deutlich niederschlagsreicher als die Mainfränkischen Platten. Die Mainfränkischen Platten und das Steigerwaldvorland sind durch ihre Lage im Lee von Odenwald, Spessart und Rhön die niederschlagsärmsten Gebiete Unterfrankens. An der Schichtstufe von Steigerwald und Haßbergen steigen die Niederschläge durch den Luv-Effekt wieder leicht an, nehmen aber durch den Lee-Effekt nach Osten wieder ab (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022b; MÜLLER, 1996; SCHÖNBEIN et al., 2020). Die Differenz zwischen den niederschlagsreichsten Gebieten in Spessart und Rhön und den

niederschlagsärmsten Gebieten zwischen Schweinfurt und Kitzingen betragen mehr als 500 mm (SCHÖNBEIN et al., 2020).

Unterfranken 1881-2021

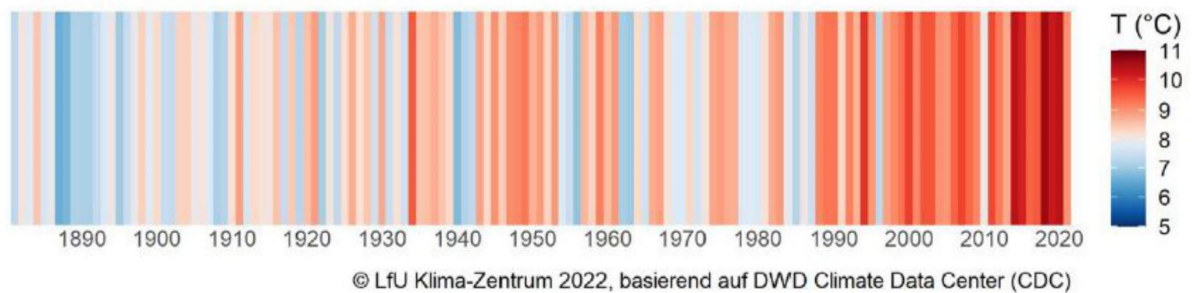


Abbildung 8: Warming Stripes 1881-2021 für Unterfranken.

Ein Jahr ist je nach mittlerer Temperatur mit einem farbigen Strich - von dunkelblau (kalt) über hellblau und hellrot bis dunkelrot (warm) – abgebildet.

Quelle: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022e).

Die Auswirkungen des Klimawandels lassen sich an den Warming Stripes für Unterfranken (s. Abbildung 8) an den seit Ende der 1980er Jahre zunehmenden Jahresmitteltemperaturen am deutlichsten erkennen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022e). Seit 1990 und insbesondere seit 2010 nimmt die mittlere Temperatur immer mehr zu.

3.4. Böden

Unterfranken kann, analog zur geologischen Situation, in vier Bodengroßlandschaften mit ähnlichen vorherrschenden Bodentypen gegliedert werden (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2005, 2008a). Die Bodengroßlandschaften leiten sich aus Geologie, Geomorphologie und Klima ab und sollen einen besseren Vergleich der Bodenbildungsbedingungen bieten (HARTWICH et al., 2005). Die unterfränkischen Bodengroßlandschaften sind in etwa deckungsgleich mit dem kristallinen Vorspessart und Hochrhön, mit Odenwald, Spessart und Rhön, den Mainfränkischen Platten und mit Steigerwald und Haßbergen (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2008a, 2008b).

Jede Bodengroßlandschaft ist durch vorherrschende Bodentypen charakterisiert, die sich lokal deutlich ausdifferenzieren. MÜLLER (1996) bezeichnet diese vorherrschenden Bodentypen als „Charakterböden“ der Landschaften. Der kristalline Vorspessart sowie die vulkanischen Bereiche der Rhön sind durch Braunerden dominiert. Das saure und sandige Ausgangsgesteins des Buntsandsteins in Odenwald, Spessart und Rhön ist großflächig durch podsolige Braunerden geprägt. Untergeordnet treten auch Ranker an Erosionsstandorten und Pelosole auf den Tonsteinlagen des Buntsandsteins auf. Die Talböden und Auen sind – wie in ganz Unterfranken – von Gleyen und Vegen dominiert (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2010). Durch die zahlreichen geologischen Wechsel sind die Böden der Mainfränkischen Platten deutlich kleinräumiger gegliedert als in den westlichen Mittelgebirgen. Die Lössgebiete werden durch Parabraunerden und Pararendzinen dominiert. Im Westen der Mainfränkischen Platten über Muschelkalk sind Braunerden, Pararendzinen und Rendzinen charakteristisch, während im Osten über Unterem Keuper zusätzlich noch Pelosole auftreten. Im Steigerwaldvorland treten auf den Flugsanden großflächig podsolige Braunerden auf. Auch in Steigerwald und Haßbergen zeichnet sich das Ausgangsgestein deutlich in den Bodentypen ab. Auf den Tonsteinen des Unteren und Mittleren Keupers bildeten sich Pelosole und Regosole. Auf den Sandsteinen des Mittleren Keupers entwickelten sich dagegen Braunerden und podsolige Braunerden. Abhängig von der Topographie bildeten sich auch Pelosol-Pseudogleye und Braunerde-Pseudogleye (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2010; MÜLLER, 1996).

4. Methoden

4.1. Auswahl der Monitoringstandorte

Die Auswahl der Monitoringstandorte erfolgte im Rahmen des EU-EFRE-Projekts „BigData@Geo: Big Data in der Geographie - Fortschrittliche Umwelttechnologien mittels AI im Web“ (Laufzeit 10/2017-09/2022). Das BigData@Geo-Projekt hatte 15 kooperierende kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wein- und Gartenbau aus der Region Unterfranken. Die Monitoringstationen sollten auf den Flächen der kooperierenden KMU installiert werden. Durch die verstärkte Partizipation der Kooperationspartner im BigData@Geo-Projekt war die Bereitschaft der Kooperationspartner die Monitoringstationen auf ihren Flächen aufzustellen sehr hoch.

Ziel war es mit den Messstationen möglichst alle für Unterfranken charakteristischen Naturräume abzudecken. Auf Grund der zur Verfügung stehenden Monitoringstationen und der projektbedingten Bindung an die Flächen der KMU, waren die in Frage kommenden Standorte bereits deutlich eingeschränkt. Die Kooperationspartner stellten ihre Flächendaten als Shape-Datei für eine GIS-basierte Naturraumanalyse zur Verfügung. Die Flächendaten entnahmen die Kooperationspartner dem iBALIS-Serviceportal (integrierte Bayerische Landwirtschaftliches Informations-System, www.ibalis.bayern.de) des BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2023b), über welches auch die Anträge für Förderungen und Ausgleichszahlungen gestellt werden müssen.

In der Naturraumanalyse wurden naturräumliche Gliederung, Geologie, Böden, Klima und die unterschiedlichen Nutzungs- bzw. Bewirtschaftungsformen (Ackerbau, Forstwirtschaft, Wein- und Obstbau) berücksichtigt. In einem zweiten Schritt wurde dies dann mit den Flächen der KMU abgeglichen und eine Vorauswahl getroffen. Die endgültigen Standortentscheidungen wurden nach Absprache mit den betroffenen KMUs und einer Geländebegehung getroffen.

Die genaue Position der Messstation und der Bodenprofile wurde erst nach einer Bodenkartierung festgelegt, sofern dies nicht durch die Bewirtschaftungsform vorgegeben war. Im Weinberg und auf Äckern war beides an einen Bearbeitungsstreifen (Weinbergzeile bzw. Arbeitsbreite auf dem Acker) gebunden. Im Forst konnten die Positionen freier gewählt werden, da hier nur auf die Rückegassen geachtet werden musste.

4.2. Geländemethoden

Kartierung

Die Bodenkartierungen wurden im Vorfeld der Profilanlage an allen Monitoringstandorten durchgeführt. Ziel war ein möglichst vollständiges Bild der Bodensituation vor Ort zu gewinnen. Die Auswahl der Kartierpunkte wurde nach der Geländesituation vor Ort getroffen. Für die Kartierung wurde ein 1 m Pürckhauer-Bohrstock mit Schlag-Hebe-Kombination verwendet. Die verkürzte bodenkundliche Ansprache der Bohrstöcke erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Neben den bodenkundlichen Charakteristika wurde die geographische Position und eine Fotografie aufgenommen und eine Skizze angefertigt.

Profilaufnahme

Die Anlage der Bodenprofile erfolgte per Hand. Abweichend hiervon wurden die Profile in Bürgstadt maschinell mit einem Bagger ausgehoben. Die bodenkundliche-sedimentologische Aufnahme der Profile erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Verschiedene bodenkundliche Charakteristika wie Horizontgrenzen, Bodenfarbe nach MUNSELL (1994), Bodenart, Horizontbezeichnung und Bodentyp wurden aufgenommen. Zusätzlich wurden Carbonat-, Humus- und Grobbodengehalt, Durchwurzelung und Oxidations- und Reduktionsmerkmale vermerkt. Im Anschluss der Profilaufnahme fand die horizontweise Beprobung für die verschiedenen Labormethoden statt. Eine gestörte Probenentnahme erfolgte in jedem Horizont. Zusätzlich wurde versucht ungestörte Stechzylinderproben für die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Trockenrohdichte zu gewinnen. Sofern der Grobbodenanteil dies zuließ, wurden mehrere Stechzylinder (Durchmesser 53 mm) pro Horizont entnommen.

Im Anschluss an die Profilaufnahme wurden die Bodenfeuchtesensoren horizontweise installiert. Um das Austrocknen der Profilwand zu verhindern, wurde die Profilgrube anschließend wieder mit dem Aushubmaterial verfüllt.

Infiltrationsrate

Die Infiltrationsrate wurde an ausgewählten Profilen bestimmt. Im Umkreis von ca. 10 m um ein Profil wurden mehrere Messungen mit einem Doppelring-Infiltrimeter (28 cm und 53 cm Durchmesser, Fa. Eijkelkamp Soil & Water) nach DIN 19682-7:2007-07 durchgeführt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2007; EIJKELKAMP SOIL & WATER, 2018). Die Messungen nach dem instationären Verfahren wurden nach Erreichen einer annähernd konstanten Infiltrationsrate beendet. Die Mehrfachmessungen wurden für ein Profil gemittelt und die Infiltrationsrate in mm/min angegeben.

4.3. Monitoring

4.3.1. Stationen

Für das Monitoring wurden iMetos-Stationen verschiedener Versionen der Fa. Pessl Instruments verwendet. Die Messstationen bestanden aus einer Basisstation mit der Steuer- und Kommunikationseinheit und verschiedenen meteorologischen Sensoren. Die Bodenfeuchtesensoren eines Bodenprofils waren über je ein Interface per Kabel mit der Basisstation verbunden. Die bis zu drei Interfaces waren in Reihe geschaltet (s. Abbildung 9). An den Interfaces waren je drei Bodenfeuchtesensoren angeschlossen.

Das Aufzeichnungsintervall der Stationen betrug 15 Minuten. Die erfassten Daten wurden einmal täglich über eine Mobilfunkverbindung an einen Server der Fa. PESSL INSTRUMENTS (2023) übertragen und über das Internetportal www.ng.fieldclimate.com abgerufen werden.

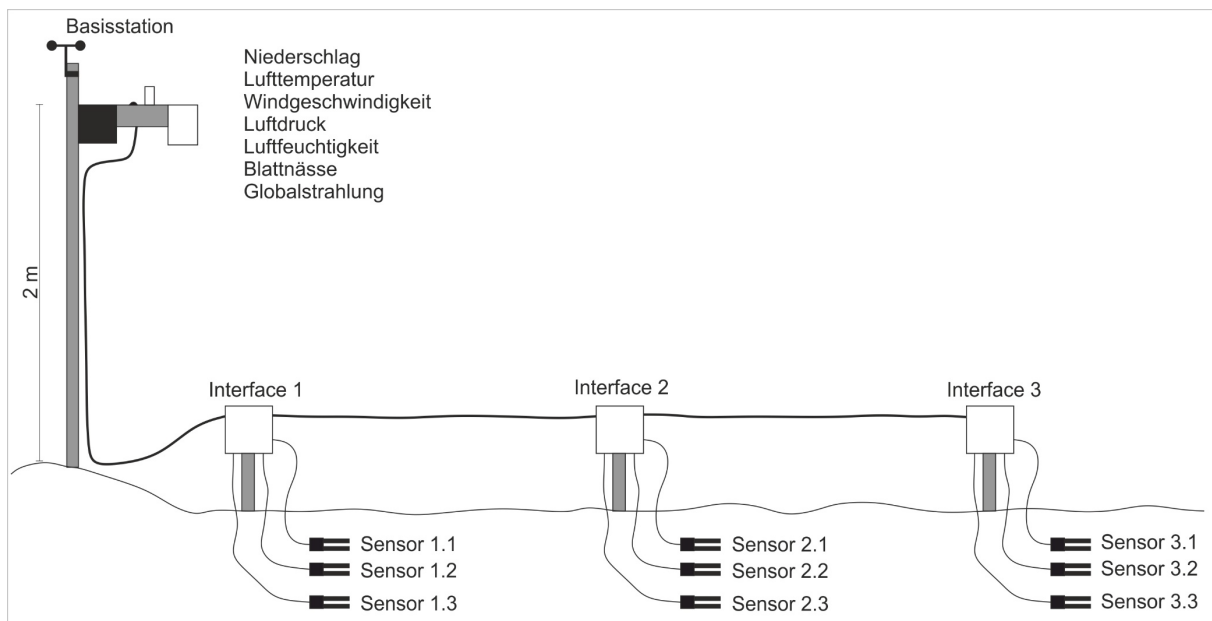


Abbildung 9: Aufbauskitze einer Monitoringstation.

Quelle: eigene Darstellung.

Auf Grund finanzieller Ressourcen waren die Basisstationen nicht einheitlich mit meteorologischen Sensoren ausgestattet. Da sich in Bürgstadt und Herchsheim eine Wetterstation der BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022a) in der Nähe befand, wurden deshalb Stationen mit der angepassten Ausstattung verwendet. Die Ausstattung der Messstationen kann Tabelle 1 entnommen werden. Die Stromversorgung wurde über eine Batterie und ein Solarpanel sichergestellt.

Standort	Typ	Anzahl Interfaces	Niederschlag	Temperatur	Windgeschwindigkeit	Luftfeuchtigkeit	Taupunkt	Pyranometer	Blattnässe
Bürgstadt	iMetos 3.3	2	X						
Herchsheim	iMetos 2	2	X						
Obbach	iMetos 3.3	3	X	X	X	X	X	X	
Uniwald	iMetos 3.3	3	X	X	X	X	X	X	X
Oberrimbach	iMetos 3.3	3	X	X	X	X	X	X	X
Willmars	iMetos 3.3	3	X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 1: Typen und Sensorausstattungen der Monitoringstationen.

Ausfälle der Messstationen waren häufig auf eine nicht mehr ausreichende Stromversorgung (Batterie zu schwach, zu wenig Sonne im Winter) oder auf Softwarefehler der Basisstation zurückzuführen. Ausfälle einzelner Interfaces waren meist auf Beschädigungen der oberflächlich verlegten Kabel durch Tiere oder Bearbeitungsmaßnahmen zurückzuführen. Auch die Kabelverbindungen einzelner Sensoren wurden so beschädigt. War ein Sensorausfall nicht auf eine Kabelbeschädigung zurückzuführen, wurde dieser ausgetauscht.

Die Niederschlagssensoren erwiesen sich an bestimmten Standorten auf Grund starker Verschmutzung als nicht zuverlässig. In den Trichtern der Niederschlagssensoren sammelten sich Blätter, Staub und tierische Ausscheidungen was zu einer Verstopfung des Sensors führte (s. Abbildung 10). Die Niederschlagsdaten der Monitoringstationen mussten deshalb mit anderen Wetterstationen verglichen und auf Plausibilität geprüft werden.



Abbildung 10: Verstopfter Niederschlagssensor der Monitoringstation Willmars.

Der Trichter des Niederschlagssensors war mit tierischen Überresten verstopft. Vermutlich durch den Verwesungsgeruch wurden Gemeine Totengräber (*Nicrophorus vespillo*) angelockt, welche dann im aufgestauten Niederschlagswasser ertranken. Nach Reinigung des Trichters funktionierte der Niederschlagssensor wieder.

Quelle: eigene Aufnahme am 13.09.2021.

4.3.2. Bodenfeuchtesensoren

Es wurden mit Meter 5TM und Meter 10HS zwei unterschiedliche TDR-Bodenfeuchtesensoren verwendet, um den volumetrischen Wassergehalt zu erfassen (METER GROUP, 2018a, 2019). Der Kombisensor Meter 5TM maß Bodenfeuchte und Bodentemperatur und wurde als oberster Sensor verwendet. Die Meter 10HS-Sensoren erfassten hingegen nur die Bodenfeuchte.

Der Einbau aller Sensoren in den ungestörten Boden erfolgte horizontal. Hierbei musste auf einen möglichst vollständigen Kontakt der Sensorgabeln geachtet und Lufteinschlüsse vermieden werden. Die Mindesteinbautiefe beider Sensoren betrug 5 cm unter der Geländeoberfläche. Um Interferenzen zwischen zwei Sensoren zu vermeiden wurde ein Abstand von 10 cm bis 20 cm eingehalten.

Beide Sensortypen hatten eine Auflösung von 0,08 % bei einer werksseitigen Genauigkeit von ± 3 %. Die Messbereiche des Meter 5TM und der des Meter 10HS reichten von 0 % bis 50 %. Auf eine bodenartspezifische Kalibrierung der Sensoren wurde verzichtet und die Bodenfeuchte stattdessen mit einem Handmessgerät verifiziert (METER GROUP, 2018a, 2018b, 2019).

4.3.2.1. Bürgstadt

Profil B 1

Im Profil B 1 wurden alle Sensoren an der linken Profilgrenze eingebaut, um die Beschädigungsgefahr der Sensoren oder der Kabel während der Bearbeitung zu reduzieren. Die Sensoren befinden sich ungefähr in der Mitte von zwei Rebstöcken. Der oberste Sensor 1.1 befindet sich in einer Tiefe von 15 cm im R-Ap-Horizont (s. Tabelle 2). Mittig des IlfR-Ap-Horizonts in 40 cm Tiefe sitzt der Sensor 1.2. Der untere Sensor 1.3 befindet sich in 63 cm Tiefe, im IIR₁-Horizont unterhalb der Horizontgrenze zum IlfR-Ap-Horizont.

Profil B 2

Auch im Profil B 2 wurden alle Sensoren an der linken Profilgrenze verortet. Die Sensoren befinden sich etwa 25 cm hangaufwärts eines Rebstocks. Der obere Sensor 2.1 ist in 18 cm Tiefe im R(IIR)-Horizont verbaut (s. Tabelle 2). Der mittlere Sensor 2.2 befindet sich in 45 cm Tiefe im R(R-Ap)-Horizont, etwa 15 cm zur Profilmittte versetzt. Sensor 2.2 sitzt im IIR-Horizont in einer Tiefe von 78 cm.

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
B 1	Sensor 1.1	15	R-Ap	Meter 5TM
	Sensor 1.2	40	IIfR-Ap	Meter 10HS
	Sensor 1.3	63	IIR ₁	Meter 10HS
B 2	Sensor 2.1	18	R (IIR)	Meter 5TM
	Sensor 2.2	45	R (R-Ap)	Meter 10HS
	Sensor 2.3	78	IIR	Meter 10HS

Tabelle 2:
*Bodenfeuchtesensoren der
Messstation Bürgstadt.
Tiefenlage der Sensoren,
Horizontbezeichnung und
Sensortyp.*

4.3.2.2. Herchsheim

Profil H 1

Alle Sensoren wurden in der Mitte des Profils H 1 direkt untereinander verbaut. Der erste Sensor 1.1 befindet sich in einer Tiefe von 20 cm in der Mitte des Ap-Horizonts (s. Tabelle 3). Der mittlere Sensor 1.2 sitzt in 62 cm Tiefe im unteren Bereich des Bt-Horizonts. Der unterste Sensor 1.3 befindet sich in 101 cm Tiefe, am unteren Ende des Profils im ICv-Horizont.

Profil H 2

Die Sensoren wurden mittig im Profil H 2 direkt untereinander eingesetzt. Der oberste Sensor 2.1 befindet sich im Ap₂-Horizont in einer Tiefe von 10 cm (s. Tabelle 3). Der mittlere Sensor 2.2 sitzt im oberen Bereich des Bt-Horizonts in einer Tiefe von 35 cm. Im Btv-Horizont ist in 62 cm Tiefe der unterste Sensor 2.3 installiert.

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
H 1	Sensor 1.1	20	Ap	Meter 10HS
	Sensor 1.2	62	Bt	Meter 10HS
	Sensor 1.3	101	ICv	Meter 10HS
H 2	Sensor 2.1	10	Ap ₂	Meter 10HS
	Sensor 2.2	35	Bt	Meter 10HS
	Sensor 2.3	62	Btv	Meter 10HS

Tabelle 3:
*Bodenfeuchtesensoren der
Messstation Herchsheim.
Tiefenlage der Sensoren,
Horizontbezeichnung und
Sensortyp.*

4.3.2.3. Obbach

Profil O 1

Alle Sensoren wurden in der linken Profilhälfte verbaut (s. Tabelle 4). Der erste Sensor 1.1 befindet sich in 10 cm Tiefe im Sw-Ap-Horizont, der zweite Sensor 1.2 am linken Profilrand an der Untergrenze des Sw-Ap-Horizonts und der unterste Sensor 1.3 im oberen Bereich des Cv-Sd-Horizonts in 27 cm Tiefe.

Profil O 2

Alle Sensoren wurden im Profil O 2 in der Mitte der Profilwand untereinander verbaut (s. Tabelle 4). Sensor 2.1 befindet sich in 15 cm Tiefe im Ap-Horizont, der mittlere Sensor 2.2 sitzt mittig im Bv-Tv-Horizont in 39 cm Tiefe und der unterste Sensor 2.3 im BvCv₁-Horizont in 60,5 cm Tiefe.

Profil O 3

Im Profil O 3 wurden die Sensoren am rechten Profilrand direkt untereinander eingebaut, wobei der oberste Sensor 3.1 in 11 cm Tiefe im Ap-Horizont, der mittlere Sensor 3.2 im Bv-Tv₁-Horizont in 30 cm Tiefe und der basale Sensor 3.3 im BvCv₁-Horizont in 59 cm Tiefe sitzt (s. Tabelle 4).

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
O 1	Sensor 1.1	10	Sw-Ap	Meter 5TM
	Sensor 1.2	25	Sw-Ap	Meter 10HS
	Sensor 1.3	27	Cv-Sd	Meter 10HS
O 2	Sensor 2.1	15	Ap	Meter 5TM
	Sensor 2.2	39	Bv-Tv	Meter 10HS
	Sensor 2.3	60,5	BvCv ₁	Meter 10HS
O 3	Sensor 3.1	11	Ap	Meter 5TM
	Sensor 3.2	30	Bv-Tv ₂	Meter 10HS
	Sensor 3.3	59	BvCv ₁	Meter 10HS

Tabelle 4:
*Bodenfeuchtesensoren der
Messstation Obbach.
Tiefenlage der Sensoren,
Horizontbezeichnung und
Sensortyp.*

4.3.2.4. Uniwald

Profil UW 1

Im Profil UW 1 sind die Sensoren des Interface 2 verbaut (s. Tabelle 5). Der Sensor 2.1 ist an der Profiluntergrenze des Ah-Bv-Horizonts in 10 cm Tiefe verortet. Der zweite Sensor 2.2 befindet sich am linken Profilrand in 23 cm Tiefe im Bv-Tv-Horizont. Der unterste Sensor 2.3 befindet sich ebenfalls am linken Profilrand in einer Tiefe von 49 cm (IITv-Cv₁-Horizont) etwa 5 cm neben einem Kalksteinblock.

Profil UW 2

Im Profil UW 2 sind die Sensoren des Interface 1 verbaut (s. Tabelle 5). Alle Sensoren liegen direkt untereinander in der Mitte des Profils. Der Sensor 1.1 befindet sich im oberen Bereich des Bv-Tv-Horizonts in 16 cm Tiefe, der Sensor 1.2 im IIBv-Tv-Horizont in 35 cm und der Sensor 1.3 in 71 cm Tiefe im IIITv-Cv-Horizont.

Profil UW 3

Das Profil UW 3 entspricht dem Interface 3 und die Sensoren 3.1 und 3.3 wurden etwa in der Mitte, der Sensor 3.2 im rechten Drittel der Profilwand eingebaut (s. Tabelle 5). Sensor 3.1 befindet sich in 10 cm Tiefe im Ah-Horizont, Sensor 3.2 in 23 cm Tiefe im IIBv-Tv-Horizont und Sensor 3.3 in 69 cm Tiefe im IITv-Cv₂-Horizont.

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
UW 2	Sensor 1.1	16	Bv-Tv	Meter 5TM
	Sensor 1.2	35	IIBv-Tv	Meter 10HS
	Sensor 1.3	71	IIITv-Cv	Meter 10HS
UW 1	Sensor 2.1	10	Ah-Bv	Meter 5TM
	Sensor 2.2	23	Bv-Tv	Meter 10HS
	Sensor 2.3	49	IITv-Cv ₁	Meter 10HS
UW 3	Sensor 3.1	10	Ah	Meter 5TM
	Sensor 3.2	23	IIBv-Tv	Meter 10HS
	Sensor 3.3	69	IITv-Cv ₂	Meter 10HS

Tabelle 5:
*Bodenfeuchtesensoren der
Messstation Uniwald.
Tiefenlage der Sensoren,
Horizontbezeichnung und
Sensortyp.*

4.3.2.5. Oberrimbach

Profil CO 1

Alle Sensoren wurden in der Mitte des Profils direkt untereinander verbaut. Der erste Sensor 1.1 befindet sich in 10 cm Tiefe an der Grenze von Ah- zu Bv₁-Horizont (s. Tabelle 6). Der zweite Sensor 1.2 ist in 30 cm Tiefe am unteren Rand des Bv₁-Horizonts eingebaut. Im gräulichen oberen Bereich des IICv-P-Horizonts ist in 56 cm Tiefe der unterste Sensor 1.3 verbaut.

Profil CO 2

Die Sensoren sind in der nach Norden ausgerichteten Profilwand auf der äußersten linken Seite eingebaut (s. Tabelle 6). Der oberste Sensor 2.1 befindet sich in einer Tiefe von 10 cm im Bv₁-Horizont, direkt unterhalb des Ah-Horizonts. Der Sensor 2.2 ist in einer Tiefe von 25 cm in den Bv₁-Horizont eingebaut und befindet sich neben einem Sandstein. Der unterste Sensor 2.3 sitzt in einer Tiefe von 41 cm im Bv₂-Horizont. In den basalen IICv-P-Horizont konnte kein Sensor eingebaut werden, da dieser Horizont zu dicht und zu trocken war.

Profil CO 3

Alle Sensoren sind direkt untereinander in der Mitte des Profils eingebaut (s. Tabelle 6). Sensor 3.1 ist an der Untergrenze des Ah-Horizonts in einer Tiefe von 10 cm eingebaut. Der mittlere Sensor 3.2 befindet sich in 41 cm Tiefe am Übergang von Bv₁- zu IIBv₂-Horizont. Der unterste Sensor 3.3 ist am Übergang vom IIBv₂- und IIBv₃-Horizont in einer Tiefe von 64 cm eingebaut.

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
CO 1	Sensor 1.1	10	Ah/Bv ₁	Meter 5TM
	Sensor 1.2	30	Bv ₁	Meter 10HS
	Sensor 1.3	56	IICv-P	Meter 10HS
CO 2	Sensor 2.1	10	Bv ₁	Meter 5TM
	Sensor 2.2	25	Bv ₁	Meter 10HS
	Sensor 2.3	41	Bv ₂	Meter 10HS
CO 3	Sensor 3.1	10	Ah	Meter 5TM
	Sensor 3.2	41	Bv ₁ /IIBv ₂	Meter 10HS
	Sensor 3.3	64	IIBv ₂ /IIBv ₃	Meter 10HS

Tabelle 6:
Bodenfeuchtesensoren der Messstation Oberrimbach. Tiefenlage der Sensoren, Horizontbezeichnung und Sensortyp.

4.3.2.6. Willmars

Profil W 1

Der Sensor 1.1 ist mittig im Aeh-Horizont in einer Tiefe von 20 cm unterhalb eines Sandsteinblocks eingebaut (s. Tabelle 7). Der mittlere Sensor 1.2 befindet sich im Bv-Horizont am linken Profilrand in einer Tiefe von 44 cm. Der Sensor 1.3 sitzt im ICv₁-Horizont am rechten Profilrand in 95 cm Tiefe. Links neben dem Sensor 1.3 und darunter befinden sich große Sandsteinblöcke (s. Abbildung 63).

Profil W 2

Im Profil W 2 wurden alle Sensoren am rechten Profilrand direkt untereinander verbaut (s. Tabelle 7). Sensor 2.1 sitzt im Bv₁-Horizont in 15 cm Tiefe. Sensor 2.2 wurde in einer Tiefe von 38 cm an der Horizontgrenze von Bv₂- zu Bv₃-Horizont eingebaut. Der unterste Sensor 2.3 befindet sich in 87 cm Tiefe im IICv-P₂ (Sd)-Horizont. Etwa 1 cm links des Sensors 2.3 befinden sich alte Wurzelbahnen, welche auf präferentielle Fließwege hindeuten können.

Profil W 3

Alle Sensoren wurden mittig im Profil eingesetzt. Sensor 3.1 befindet sich in einer Tiefe von 11 cm im Bv-Aeh-Horizont, etwa 5 cm links des Sandsteinblocks (s. Tabelle 7 u. Abbildung 67). Sensor 3.2 wurde in einer Tiefe von 30 cm im Bv-Horizont oberhalb eines Sandsteinblocks eingebaut. Der unterste Sensor 3.3 sitzt in einer Tiefe von 69 cm im IICv-P-Horizont.

Profil	Sensor	Tiefe [cm]	Horizont	Typ
W 1	Sensor 1.1	20	Aeh	Meter 5TM
	Sensor 1.2	44	Bv	Meter 10HS
	Sensor 1.3	95	ICv ₁	Meter 10HS
W 2	Sensor 2.1	15	Bv ₁	Meter 5TM
	Sensor 2.2	38	Bv ₂ /Bv ₃	Meter 10HS
	Sensor 2.3	87	IICv-P ₂ (Sd)	Meter 10HS
W 3	Sensor 3.1	11	Bv-Aeh	Meter 5TM
	Sensor 3.2	30	Bv	Meter 10HS
	Sensor 3.3	69	IICv-P	Meter 10HS

Tabelle 7:
*Bodenfeuchtesensoren der
Messstation Willmars.
Tiefenlage der Sensoren,
Horizontbezeichnung und
Sensortyp.*

4.4. Labormethoden

Probenvorbereitung

Die entnommenen Mischproben wurden im Labor luftgetrocknet und für einen Teil der folgenden Analysen zu Feinboden (Korngröße < 2 mm) aufbereitet. Die Bodenaggregate wurden dazu mit Mörser und Pistill zerstoßen und auf 2 mm abgesiebt.

Die Stechzylinderproben wurden nach der Entnahme im Gelände mit Abdeckkappen verschlossen und bis zur Laboranalyse im Kühlschrank gelagert. So wurde sichergestellt, dass die Proben nicht austrocknen.

Wassergehalt

Der Wassergehalt musste für die Bestimmung der Korngrößenverteilung und des Carbonatgehalts ermittelt werden, da sich diese Analysen auf die Trockenmasse der Bodenproben beziehen. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte nach DIN ISO 11465 durch die Trocknung der luftgetrockneten Proben bis zur Gewichtskonstanz. Der Wassergehalt wurde auf Grundlage des ofentrockenen Bodens als Masseanteil in % berechnet (BLUME et al., 2011; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1996).

Korngrößen

Die Korngrößenverteilung wurde in Anlehnung an DIN ISO 11277 mit einer kombinierten Sieb- und Sedimentationsanalyse ermittelt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2002). Die Anteile von Grob-, Mittel- und Feinsand wurden über die Siebung ermittelt. Über die Pipettierung wurden die Anteile von Grob-, Mittel- und Feinschluff und Ton bestimmt. Für die Siebung wurden Siebe mit den Maschenweiten 2 mm, 630 µm, 200 µm und 63 µm verwendet. Die Pipettierung erfolgte nach dem Zeitschema von BLUME et al. (2011) mit einer Pipette der Fa. Eijkelkamp mit einem Volumen von 20 ml.

Carbonatgehalt

Der Carbonatgehalt der Bodenproben wurde nach DIN ISO 10693 volumetrisch mit der Scheibler-Apparatur bestimmt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1997). Nach einem Orientierungsversuch wurde die Einwaage des luftgetrockneten Bodens, entsprechend dem Carbonatgehalt angepasst. Unter Berücksichtigung von Luftdruck und Lufttemperatur wurde anhand des entstehenden Kohlenstoffdioxids (CO₂) der Calciumcarbonatgehalt (CaCO₃) berechnet. Das CO₂ wurde volumetrisch in Milliliter bestimmt (BLUME et al., 2011). Der Carbonatgehalt wird als Äquivalentkonzentration von CaCO₃ angegeben.

Glühverlust

Der Glühverlust wurde nach DIN 19684 durch Verglühen der Bodenproben bestimmt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2000). Mittels des Glühverlusts kann der Gehalt an organischer Substanz im Boden abgeschätzt werden (BLUME et al., 2011). Dazu wurden die ofentrockenen Bodenproben der Wassergehaltsbestimmung verwendet. Durch das Glühen bei 550 °C entweichen alle organischen Substanzen aus der Bodenprobe und der sich ergebende Masseverlust wurde in Prozent als Glühverlust angegeben. Bedingt durch die hohen Temperaturen geben zahlreiche Minerale wie Gips, Tonminerale und Sesquioxide Kristallwasser ab, wodurch der Masseverlust verfälscht wurde. Durch die Subtraktion von 0,1 Masseprozent je Prozent Ton bzw. 0,26 Masseprozent je Prozent CaSO_4 kann dieser Fehler näherungsweise korrigiert werden. Allerdings ist diese Korrekturmöglichkeit für tonreiche aber humusarme Bodenproben zu grob (BLUME et al., 2011; DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2000). Die organische Substanz entspricht dem Humusgehalt im Boden (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

pH-Wert

Der pH-Wert wurde in Anlehnung an die DIN ISO 10390 bestimmt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2005). Die elektrometrische Messung erfolgte in einer Bodenlösung mit 25 ml 0,01 M CaCl_2 mittels pH-Meter (inoLab pH Level 1, Fa. WTW) und Glaselektrode (Sentix 81, Fa. WTW).

Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte wurde als Eingangsgröße für die effektive Lagerungsdichte sowie die Berechnung bodenhydrologischer Parameter benötigt und nach DIN ISO 11272 bestimmt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2001). Die ungestörte Bodenprobe wurde mit einem Stechzylinder mit einem Volumen von 100 cm^3 entnommen und bis zur Gewichtskonstanz im Ofen getrocknet. Auf Basis der ofentrockenen Probe und des Stechzylindervolumens wurde die Trockenrohdichte in g/cm^3 berechnet.

Hydraulische Leitfähigkeit (kf-Wert)

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde nach DIN 19683-9 ermittelt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2003). Verwendet wurden Stechzylinder mit einem Durchmesser von 53 mm und ein Permeameter (Fa. Eijkelkamp Soil & Water). Die Stechzylinder wurden im Permeameter langsam wassergesättigt. Erfolgte die Wassersättigung des Stechzylinders nicht innerhalb von drei Tagen, wurde die Wasserdurchlässigkeit gleich Null angenommen (EIJKELKAMP SOIL & WATER, 2017). Bei gut durchlässigen Proben (z.B. hoher Sandanteil) wurde das Verfahren mit konstantem, bei wenig

durchlässigen Proben (z.B. hoher Tonanteil) wurde das Verfahren mit abnehmendem Druckhöhenunterschied angewendet. Die Stechzylinder waren dabei „kopfüber“ im Permeameter eingesetzt und wurden von unten nach oben vom Wasser durchströmt.

Methodische Fehlerquellen für zu hohe Wasserdurchlässigkeiten sind vertikale Poren, Wurzeln oder Steine, welche bei der Probennahme nicht sichtbar waren. Verschmierte Schnittflächen der Stechzylinderprobe reduzieren dagegen die Wasserdurchlässigkeit. Durch Mehrfachmessungen wurde ein Mittelwert gebildet und Ausreißer eliminiert (BLUME et al., 2011; EIJKELKAMP SOIL & WATER, 2017; RENGER et al., 2014b).

Berechnete und abgeleitete Werte

Die *effektive Lagerungsdichte* L_d wurde nach RENGER et al. (2014a), *Feldkapazität* (FK), *nutzbare Feldkapazität* (nFK) und *Luftkapazität* (LK) wurden nach RENGER et al. (2009) berechnet und abgeleitet. RENGER et al. (2009) haben die Berechnungen und Tabellen zur Wasserbindung der AD-HOC-AG BODEN (2005) verbessert. Als Eingangsgröße für die Berechnung der effektiven Lagerungsdichte diente die Trockenrohddichte sowie die Masseanteile von Ton und Schluff in Prozent. FK, nFK und LK wurden auf Basis der Trockenrohddichte, der Bodenart und des Humusgehalts aus Tabellen abgeleitet (RENGER et al., 2009).

Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum nFKWe

Die nFKWe stellt durch die Berechnung in mm/m² bzw. l/m² einen Raumbezug zwischen dem effektiven Wurzelraum und der horizontweise summierten nFK in diesem dar. Dadurch ist ein direkter Vergleich z.B. mit Niederschlag und Evapotranspiration möglich. Die Berechnung der nFKWe erfolgte nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016):

$$nFKWe [l/m^2] = nFK_{\text{Horizont 1}} + \dots + nFK_{\text{Horizont n}}$$

$$nFK_{\text{Horizont 1}} = (nFK + \text{Humus}) \cdot HM \cdot \text{Sk-Abschlag}$$

mit $nFK = nFK\text{-Tabellenwert des Horizonts [Vol.\-%]}$

$\text{Humus} = \text{Zu-/Abschlag nach Tabelle}$

$HM = \text{Horizontmächtigkeit [dm]}$

$\text{Sk-Abschlag} = (1 - (\text{Skelettgehalt [\%]} / 100))$

Die effektive Durchwurzelungstiefe wurde auf Basis des Durchwurzelungsbildes bei der Geländeaufnahme der Profile abgeschätzt (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 2016).

4.5. Datenaufbereitung und -auswertung

Für die Datenauswertung wurden keine Rohdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten, sondern Tageswerte verwendet. Die Tagesdaten wurden auf Basis der Rohdaten vom System www.ng.fieldclimate.com automatisch aggregiert (PESSL INSTRUMENTS, 2023).

In der Datenaufbereitung wurden zunächst Datenlücken identifiziert und die Daten aller Stationen auf der Zeitachse synchronisiert. Die Bodenfeuchtedaten wurden anschließend auf Plausibilität geprüft. Bei einigen Sensoren traten sehr plötzliche Werteänderungen auf, welche außerhalb des Messbereichs der Sensoren lagen. Dabei wurden sowohl positive wie negative Werte aufgezeichnet, wobei bei einigen Sensoren auch ein Wechsel von positiven wie negativen Werten auftrat. Alle negativen Werte wurden gelöscht, ebenso positive Werte, die außerhalb des Messbereichs lagen. Waren die Werte vor und nach den gelöschten Werten im Vergleich mit den anderen Sensoren der Station plausibel, wurden diese beibehalten. Wurden mehrfach in kurzer Zeit nicht plausible Werte gemessen, wurde der gesamte Zeitabschnitt des betroffenen Sensors gelöscht, da von einer Fehlfunktion ausgegangen wurde. Die qualitative Datenauswertung erfolgte mit Hilfe von Microsoft Excel und Origin 2020.

5. Monitoringstandorte

5.1. Bürgstadt

5.1.1. Standortüberblick

5.1.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort liegt im nordöstlichen Teil des Naturraums „Sandsteinodenwald“. Nördlich des Standorts schließt, nur durch den Main getrennt, der Naturraum „Sandsteinspessart“ an (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, o.J.). Der Monitoringstandort liegt in der Weinbergslage „Centgrafenberg/Hundsrück“ an der Südflanke des Bürgstadter Bergs zwischen den Ortschaften Bürgstadt (Westen) und Eichenbühl (Osten) (s. Abbildung 11) (www.weinlagen-info.de GIERLING, 2023).

Die Weinlage „Centgrafenberg/Hundsrück“ liegt am Unterlauf des Flusses Erf, wird aber bereits zum Naturraum „141.01 Wertheim-Miltenberger Maintal“ gerechnet (KLAUSING, 1967). Bis zum Ort Eichenbühl fließt die Erf in einem engen, ca. 320 m tiefem Kerbtal. Westlich von Eichenbühl weitet sich das Erf-Tal trichterförmig auf. Die Erf fließt hier in einer breiten Aue. Der Bürgstadter Berg im Norden und der Sommerberg/Steinerner Berg im Süden bilden den Unterlauf des Erf-Tals. Mit Beginn des Stadtgebiets von Bürgstadt erreicht die Erf das Maintal und mündet auf einer Höhe von 125 m NHN in den Main (KLAUSING, 1967; LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2017; MENSCHING & WAGNER, 1963).

Der Bürgstadter Berg befindet sich in einer Spornlage der Sandsteinhochfläche des Hinteren Odenwalds. Er wird im Norden und Westen vom Maintal und im Süden vom Erftal begrenzt (KLAUSING, 1967). Den Gipfel des Bürgstadter Bergs bildet ein Plateau ab einer Höhe von ca. 420 m NHN welches nach Osten auf 463 m NHN ansteigt. Über einen Sattel ist der Bürgstadter Berg mit dem 481 m NHN hohen Wannenberg im ENE verbunden. Über einen weiteren Sattel ist der Wannenberg im ENE mit der Wannenhöhe und weiter nordöstlich mit der Sandsteinhochfläche verbunden. Vom Plateau aus fällt die südliche Flanke relativ steil bis auf eine Höhe von ca. 270 m NHN ab. Die deutliche Änderung der Hangneigungswerte um 270 m NHN fällt mit dem geologischen Wechsel von Mittlerem (hangend) zu Unterem Buntsandstein (liegend) zusammen.

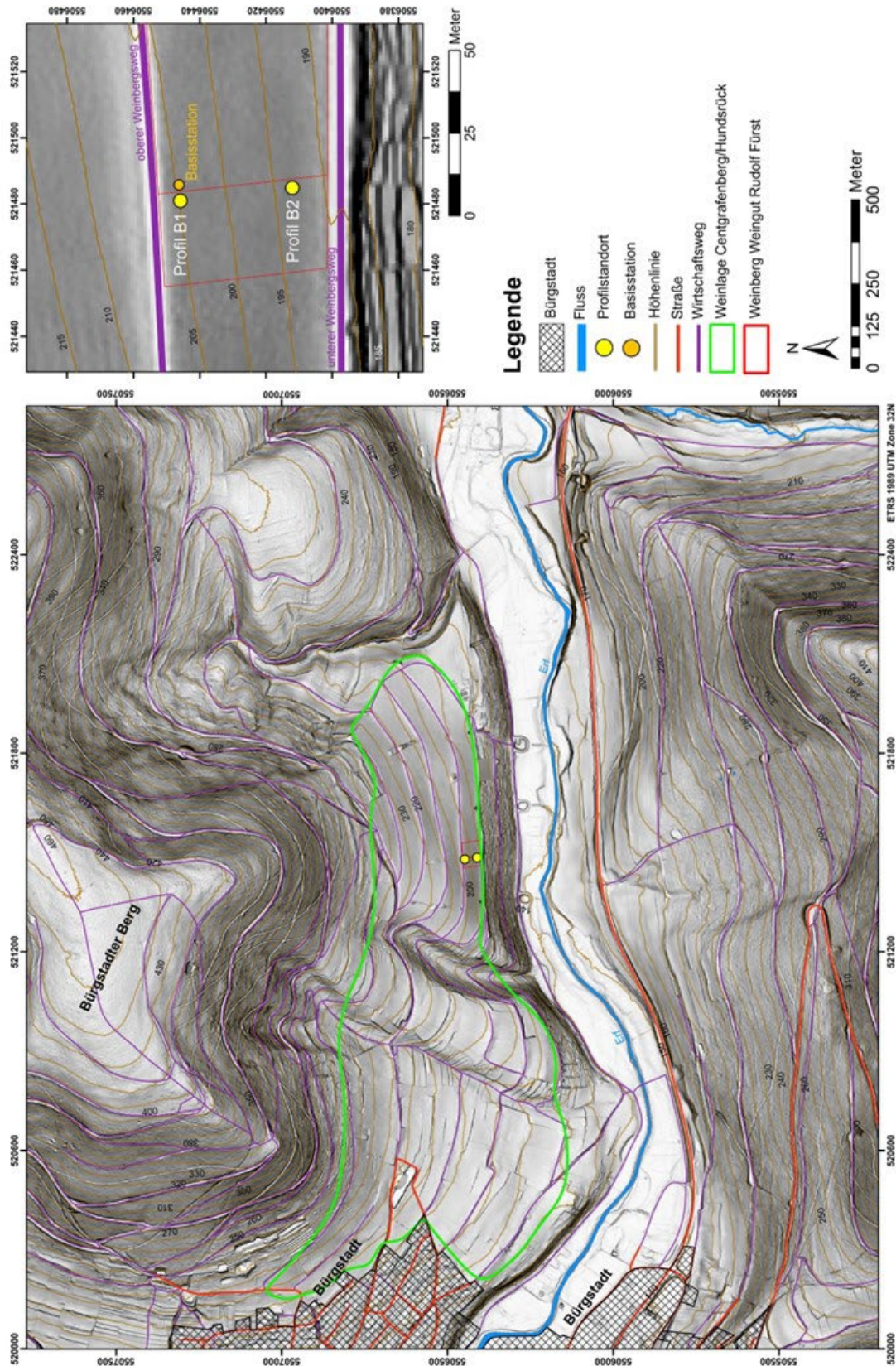


Abbildung 11: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Burgstadt. Maßstab 1:10.000; Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

Die Weinlage Centgrafenberg/Hundsrück liegt in einem etwas flacheren Höhenband von ca. 270 m bis 180 m NHN im Osten und 160 m NHN im Westen. Im Osten ist der steile Hangfuß zwischen etwa 180 m und 140 m NHN mit Trockenmauern terrassiert. Der Hangfuß geht hier schließlich abrupt in

die Aue der Erf über. Im Westen läuft der Hangfuß flach bis zur Erf aus. Die Südflanke des Bürgstadter Bergs ist durch zwei Klingen geprägt, welche auch die Weinlage Centgrafenberg/Hundsrück durchschneiden. Die westliche Klinge ist flach in den Hang eingeschnitten und reicht bis in eine Höhe von ca. 320 m NHN. Die östliche Klinge ist deutlich stärker in den Hang eingeschnitten, reicht aber nur bis in eine Höhe von ca. 260 m NHN (vgl. <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023). Beide Klingen beschränken sich vor allem auf den Unteren Miltenberg-Sandstein (suMSu), beginnen jedoch bereits in den hangenden Oberen Miltenberg-Sandstein (suMSo) und der Miltenberg-Wechselfolge (suMW).

5.1.1.2. Geologie

Das Untersuchungsgebiet Bürgstadt befindet sich an der Grenze von Sandsteinodenwald und Sandsteinspessart. Nördlich und südlich des Main finden sich die gleichen geologischen Schichten. Der Buntsandstein besitzt im Untersuchungsgebiet eine Mächtigkeit von 450 m. Der Untere Buntsandstein (su) steht in einer Mächtigkeit von 195 m an, der Mittlere Buntsandstein (sm) von 165 m und der Obere Buntsandstein (so) von 90 m (SCHWARZMEIER, 2021).

Der Bürgstadter Berg besteht aus den Sedimentgesteinen des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandsteins (s. Abbildung 12). Im Erftal stehen am Fuß des Bürgstadter Bergs zunächst quartäre Bach- und Flussablagerungen an. Die Basis des Bürgstadter Bergs bildet eine ca. 100 m mächtige Abfolge des Unteren Buntsandsteins. Den Hangfuß bilden die oberen 40 m bis 60 m des Dickbank-Sandsteins (suCD, Unterer Miltenberg-Sandstein) mit einer Mächtigkeit von 80 m bis 95 m (SCHWARZMEIER, 2021). Bei dem Dickbank-Sandstein handelt es sich um einen fein- bis mittelkörnigen rotbraunen bis blassroten Sandstein, welcher gebankt bis dickbankig auftritt. Im Dickbank-Sandstein sind auch wenige Ton- und Schluffsteinlagen enthalten. Darüber folgt mit ca. 10 m Mächtigkeit der feinkörnige, hellgrau bis rotgraue Basis-Sandstein (suBB, Obere Miltenberg-Sandstein). Der maximal 15 m bis 20 m mächtige Basis-Sandstein macht sich durch eine Hangversteilung oberhalb des Dickbank-Sandstein bemerkbar (SCHWARZMEIER, 2021). Den hangenden Abschluss des Unteren Buntsandsteins bildet der Tonlagen-Sandstein (suBT, Miltenberg-Wechselfolge). Bei diesem Sandstein handelt es sich um einen fein- bis grobkörnigen, hellgrau bis rotgrauen Sandstein, welcher zum Teil verkieselt ist und in dem teils massenhaft Tongallen- und schmitzen mit Durchmesser von bis zu 10 cm auftreten. Die Tongallen weisen eine rotbraune Farbe auf. Die Weinlage Centgrafenberg/Hundsrück befindet sich überwiegend auf den Schichten des Dickbank- und Basis-Sandstein. Nur kleine Bereiche befinden sich auf dem Tonlagen-Sandstein. Die Bodenprofile liegen vollständig auf Dickbank-Sandstein (SCHWARZMEIER, 2021, 2022).

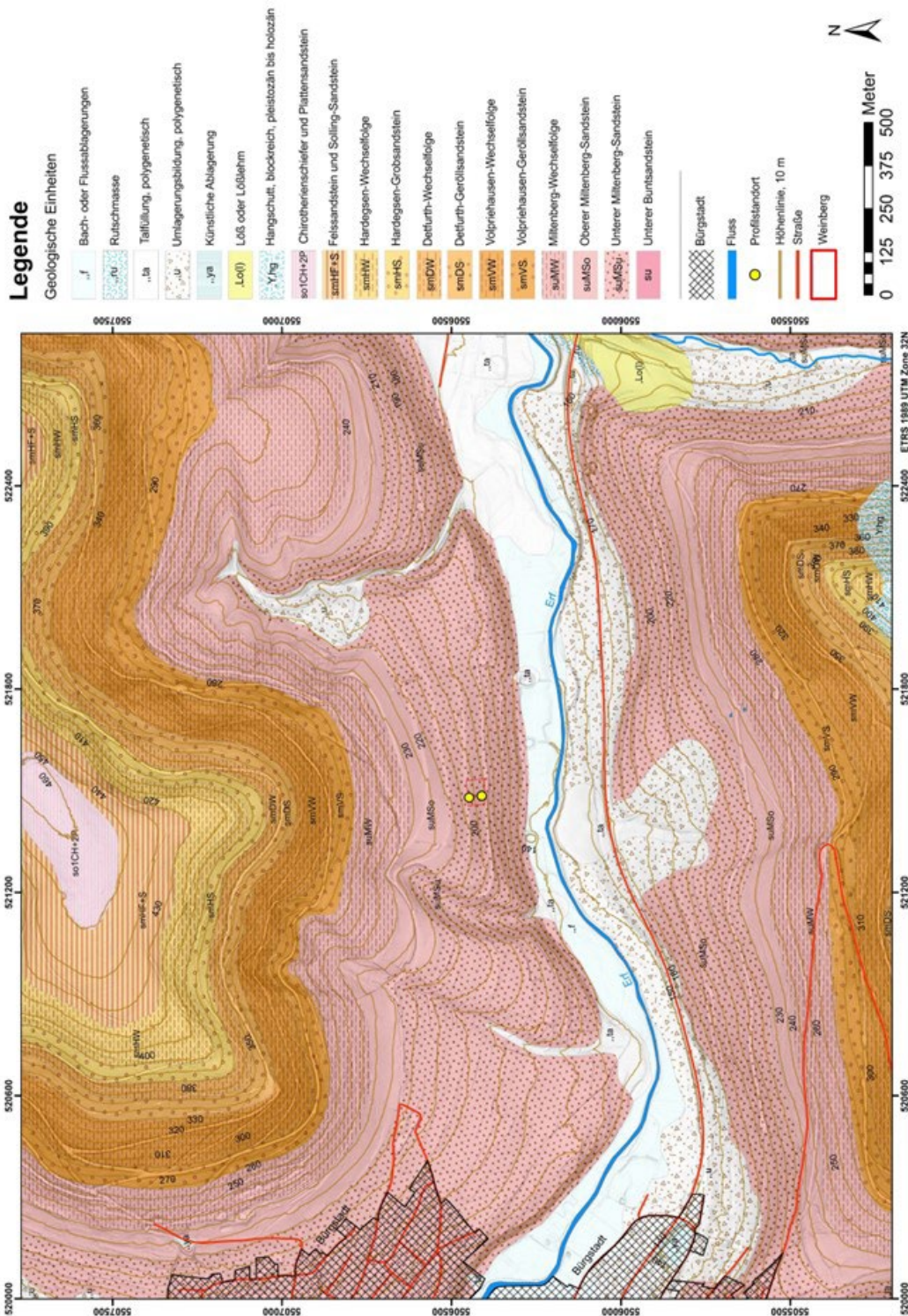


Abbildung 12: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Bürgstadt.
Maßstab: 1:10.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).

Darüber beginnt mit dem Volpriehausen-Geröllsandstein (smVS) die Gesteinsabfolge des Mittleren Buntsandstein. Der rotbraune bis violettrote, fein- bis mittelkörnige Sandstein des Volpriehausen-Geröllsandsteins steht in einer Mächtigkeit von ca. 20 m an. Der Volpriehausen-Geröllsandstein ist allgemein durch eine Hangversteilung mit gut ausgebildeter Oberkante zu erkennen (SCHWARZMEIER,

2021). Die hangende Volpriehausen-Wechselfolge (smVW) hat eine Mächtigkeit von ca. 30 m bis 40 m. Bei der Volpriehausen-Wechselfolge handelt es sich um einen fein- bis mittelkörnigen, rotbraunen bis violettroten Sandstein. In die Volpriehausen-Wechselfolge sind einige bis max. 1 m mächtige Tonsteinlagen eingeschaltet, welche stellenweise zu Vernässungen und Quellaustritten führen können (SCHWARZMEIER, 2021) . Darüber folgt der rotbraune oder violette Detfurth-Geröllsandstein (smDS) in einer Mächtigkeit von ca. 10 m bis 20 m. Der Dethfurth-Geröllsandstein bildet eine Hangversteilung mit markanter Kante und kann Blockschutt bilden (SCHWARZMEIER, 2021). Den hangenden Abschluss der Detfurth-Formation bildet die ca. 20 m mächtige Detfurth-Wechselfolge (smDW) mit blassrotbraunen bis violettrotbraunen Sandsteinen und Tonschluffeinlagen (SCHWARZMEIER, 2022). Auf die Detfurth-Formation folgt im Hangenden die Hardeggen-Formation beginnend mit dem violettbraunen bis weißgrauen Hardeggen-Grobsandstein (smHS) in einer Mächtigkeit von ca. 10 m bis 20 m. Der Hardeggen-Grobsandstein kann sich wieder durch schwache Hangversteilungen bemerkbar machen (SCHWARZMEIER, 2021). Oberhalb stehen die violettbraunen bis weißgrauen, fein- bis mittelkörnigen Sandsteine der Hardeggen-Wechselfolge (smHW) an, welche von rotbraunen, Glimmer führenden Tonschluffsteinlagen durchzogen sind (SCHWARZMEIER, 2022). Die ca. 30 m bis 40 m mächtige Hardeggen-Wechselfolge bildet den Übergang vom Hang zum Plateau des Bürgstadter Bergs. Den oberen Abschluss der Hardeggen-Formation und den Großteil des Plateaus bildet als Plateaubildner der Felssandstein und Solling-Sandstein (smHF+S) der Hardeggen- und Solling-Formation. Auf dem Plateau und dem Sattel zwischen Bürgstadter Berg und Wannenberg steht der Felssandstein in isolierten und verwitterten Blöcken an. Auch bei den Heunesäulen auf dem Bürgstadter Berg handelt es sich um Felssandsteinblöcke, welche im Mittelalter vor Ort bearbeitet wurden (SCHWARZMEIER, 2021). Der Felssandstein und Solling-Sandstein bilden den oberen Abschluss des Mittleren Buntsandsteins. Den höchsten Punkt des Bürgstadter Bergs bildet der Chirotherienschiefer und Plattensandstein (so1Ch+2P) der Röt-Formation. Dabei handelt es sich um blauviolett oder grüngraue Ton- und Tonschluffsteine mit dünnen Sandsteinlagen und Gipsresiduallagen (SCHWARZMEIER, 2022). Chirotherienschiefer und Plattensandstein stehen mit einer Mächtigkeit von bis zu 30 m auf dem Bürgstadter Berg an. Auf dem Wannenberg machen sich die Chirotherienschiefer durch Vernässungen bemerkbar (SCHWARZMEIER, 2021).

5.1.1.3. Klima

Etwa einen Kilometer westlich der Monitoringstation, ebenfalls in der Weinlage Centgrafenberg, befindet sich die Wetterstation Bürgstadt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Die Wetterstation Bürgstadt ist seit Februar 1990 in Betrieb (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023a). Weitere Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes befinden sich in Röllbach (Stations-ID: 3319) und in Freudenberg/Main-Boxtal (Stations-ID: 7187) (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d).

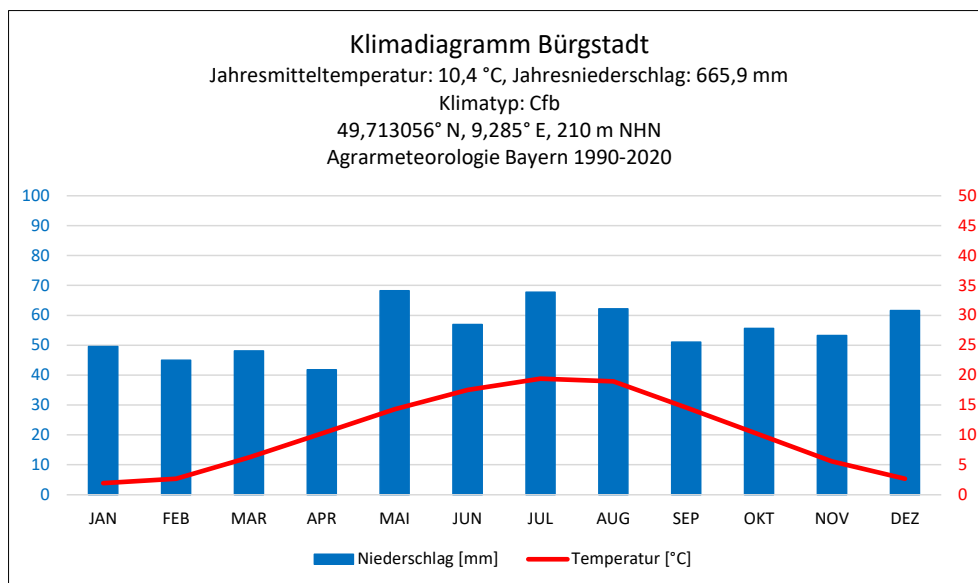


Abbildung 13: Klimadiagramm Bürgstadt 1990-2020.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023a), eigene Darstellung.

Die Wetterstation Bürgstadt weist im Beobachtungszeitraum Februar 1990 bis Dezember 2020 eine Jahresmitteltemperatur von 10,4 °C und einen Jahresniederschlag von 665,9 mm auf (s. Abbildung 13). Die niedrigsten Temperaturen treten in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar auf. Der Januar ist mit 1,91 °C der kälteste Monat. Die höchsten Temperaturen werden in den Sommermonaten Juni, Juli und August gemessen. Mit 19,4 °C ist Juli der wärmste Monat. Die mittlere Temperaturamplitude im Jahresgang beträgt etwa 17,5 °C. Das Klima in Bürgstadt ist ganzjährig humid. Die meisten Niederschläge fallen in den Monaten Mai bis August mit zwei Maxima in Mai und Juli. In den Monaten September bis November liegen die Niederschläge etwas niedriger als im Sommer. Im Dezember steigen die Niederschläge wieder deutlich an. Die trockensten Monate liegen zwischen Januar und April, wobei April mit 41,83 mm Niederschlag der trockenste Monat ist. Der Klimatyp von Bürgstadt nach der Klimaklassifikation von Köppen und Geiger ist „Cfb“ (PEEL et al., 2007).

Als Vergleich zur Wetterstation Bürgstadt können die DWD-Stationen Röllbach (ca. 6,2 km NNW) und Freudenberg/Main-Boxtal (ca. 10,5 km ENE) dienen (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d). Beide

Stationen zeigen einen ähnlichen Jahrgang von Temperatur und Niederschlag, sind aber kälter und niederschlagsreicher als Bürgstadt. Röllbach hat eine Jahresmitteltemperatur von 9,9 °C und einen Jahresniederschlag von 696,2 mm. Freudenberg/Main-Boxtal weist eine Jahresmitteltemperatur von 10,1 °C und einen Jahresniederschlag von 738 mm auf. Die Temperaturunterschiede lassen sich mit den unterschiedlichen geographischen Standorten erklären. Während die Wetterstation Bürgstadt an einem südexponierten Hang und nahe an einer größeren Ortschaft liegt, befindet sich die in Röllbach in einem kleinen Hochtal des Spessarts. Die umgebenden Berge sind etwas höher als der Bürgstadter Berg und bilden einen Nord-Süd-verlaufenden Höhenrücken mit dem Geiersberg (512 m NHN) als höchstem Punkt. Dadurch ist die Luv-Wirkung höher als in Bürgstadt. Durch die östlichere Lage ist auch die Luv-Wirkung in Freudenberg/Main-Boxtal höher als in Bürgstadt und erklärt die höheren Niederschläge. Die niedrigeren Temperaturen lassen sich durch ihre Exposition nach Westen bzw. Nordwesten erklären.

5.1.2. Bodengeographische Analysen Bürgstadt

5.1.2.1. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil B 1

Geländedaten

Das Profil B 1 ist ein locker gelagerter Rigosol aus Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial und das nördlichere und höher gelegene der beiden Profile (s. Abbildung 11). Es liegt auf einer Höhe von 197 m NHN und ca. 10 m vom oberen Ende der Weinbergszeile entfernt. Die Profilgrube wurde in den Hang hinein gegraben, so dass die Profilwand nach Norden ausgerichtet ist. Die Profilwand ist ca. 50 cm breit und 107 cm tief. Das Profil befindet sich am westlichen Rand einer Weinbergszeile.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
B 1-1	R-Ap (M)	22 - 24	e (w), sc, h	7,5YR 4/6 10YR 5/4	Uls	G: sub F: sub	Kalksteine bis 3 cm, allochthones Auftragsmaterial	n. b.
B 1-2	Ilfr-Ap	48 - 62	e, de, h/g	7,5YR 3/4	Sl2	ein - rol	Sandsteine	n. b.
B 1-3	IIR ₁	48 - 80	e (w), de, g	2,5YR 4/4, Flecken 7,5YR 3/4	Ls3	G: sub F: ein-rol/sub	Sandsteine	n. b.
B 1-4	IIR ₂	101 - 107	-	2,5YR 4/4 5YR 3/3	Ls3	G: sub F: ein-rol	Sandsteine	n. b.

Tabelle 8: Geländedaten Profil B 1.

Rigosol aus Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial aus dem Muschelkalkgebiet. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994). Die periglazialen Lagen konnten nicht bestimmt werden.

Das Profil B 1 konnte in vier Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 14 u. Tabelle 8). Die rezente Bodenoberfläche bildet der R-Ap-Horizont, welcher aus einem sandig-lehmigen Schluff mit einem Subpolyedergefüge als Grob- und Feingefüge besteht. Hierbei handelt es sich um allochthones anthropogenes Auftragsmaterial aus dem Muschelkalkgebiet, welches im Zuge der Flurbereinigung aufgebracht wurde (mündliche Mitteilung Winzer Paul Fürst, März 2020). In der oberen Hälfte tritt eine kräftig braune Farbe auf, im unteren Abschnitt wird die Farbe gelblich braun. Insgesamt ist ein hoher Anteil an Kalksteinen mit einem Durchmesser bis 3 cm vorhanden. Der R-Ap-Horizont besitzt einen starken Anteil von Fein- und Grobwurzeln, der unregelmäßig bis nestartig verteilt ist. Die ebene bis leicht wellige Horizontuntergrenze verläuft in einer Tiefe von 22 cm bis 24 cm in horizontaler Lage und ist scharf erkennbar. Zum darunterliegenden IIfR-Ap-Horizont erfolgt ein geologischer Wechsel und er besteht aus einem dunkelbraunen schwach lehmigem Sand mit einem Einzelkorn- bis Rollaggregatgefüge. Der Anteil an Grob- und Feinwurzeln ist sehr schwach und hauptsächlich auf die obere Hälfte des Horizonts beschränkt. In der unteren Horizonthälfte finden sich wenige rote Sandsteine bis 3 cm Größe. Die ebenförmige Horizontuntergrenze ist deutlich erkennbar und verläuft in einer Tiefe von 48 cm von der rechten Profilseite bis etwa zur Mitte geneigt. Ab der Mitte bis zum linken Profilrand verläuft die Horizontuntergrenze horizontal auf einer Tiefe von 62 cm. Der darunterliegende IIR₁-Horizont besteht aus einem mittel sandigen Lehm mit einem Subpolyedergefüge als Grobgefüge und einem Einzelkorn- bis Subpolyedergefüge als Feingefüge. Die Bodenfarbe ist rötlich braun mit dunkel rötlich braunen Flecken, welche sich vor allem in der oberen Horizonthälfte befinden. Der Anteil an Grob- und Feinwurzeln ist sehr schwach. In der linken Profilhälfte finden sich vor allem entlang der Horizontuntergrenze rote Sandsteine mit bis zu 15 cm Durchmesser. Die ebenförmige, stellenweise leicht wellige Horizontuntergrenze ist deutlich erkennbar und verläuft geneigt in einer Tiefe von 48 cm bis 80 cm. Etwa in der Mitte des Profils befindet sich eine Stufe in der Horizontuntergrenze des IIR₁ von etwa 30 cm. Den unteren Abschluss des Profils bildet der IIR₂-Horizont, welcher einem mittel sandigen Lehm mit einem Subpolyedergefüge als Grobgefüge und einem Einzelkorn- bis Rollgefüge als Feingefüge entspricht. Er besitzt eine dunkel rötlichbraune Bodenfarbe mit einem hohen Flächenanteil an rötlichbraunen Flecken, welche sich vor allem in der linken Profilhälfte und entlang der oberen Horizontgrenze befinden. Grob- und Feinwurzeln haben einen sehr schwachen unregelmäßigen Anteil und es finden sich rote Sandsteine mit bis zu 10 cm Durchmesser in unregelmäßiger Verteilung. Der IIR₂-Horizont reicht bis in eine Tiefe von 107 cm.

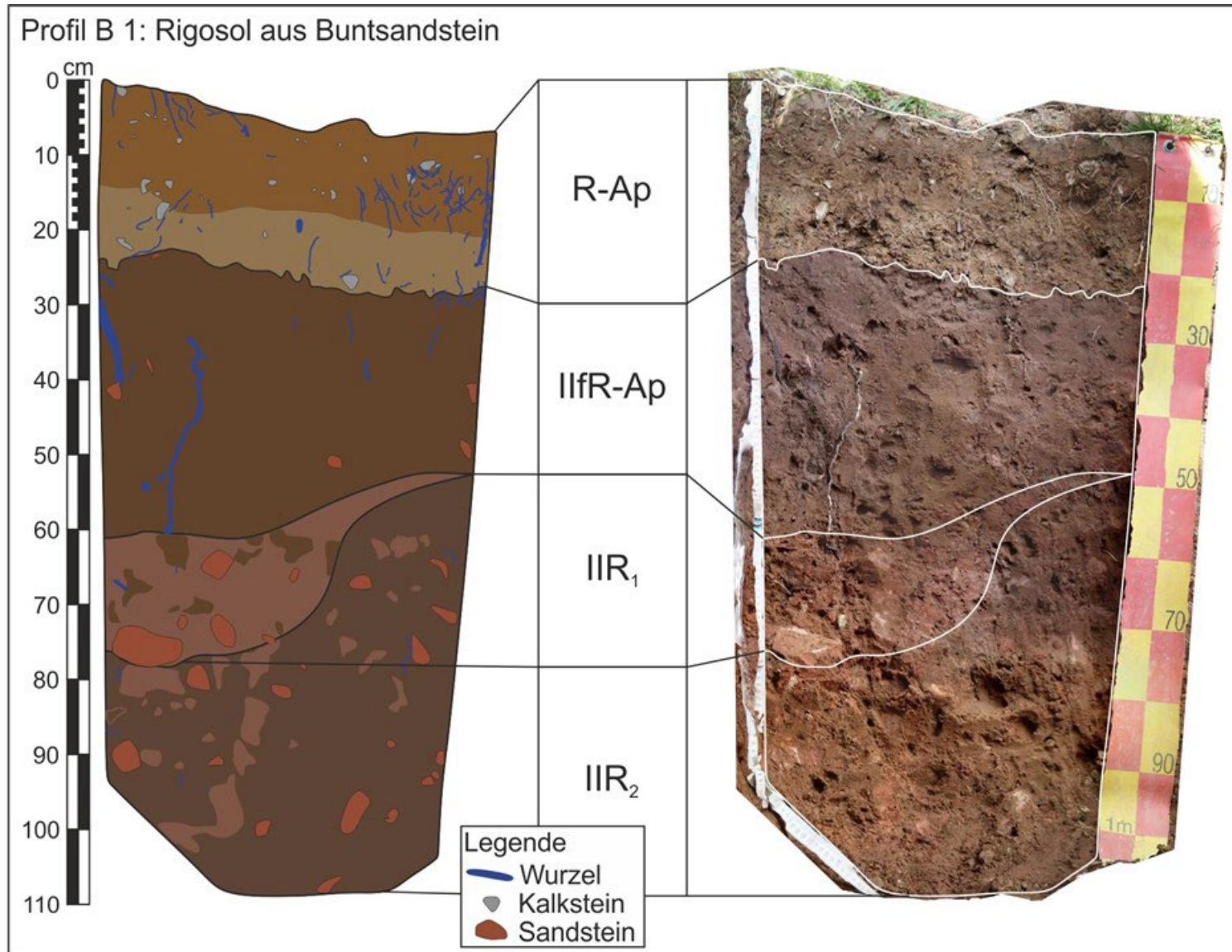


Abbildung 14:
 Profilzeichnung Profil B 1.
 Rigosol auf Buntsandstein
 mit allochthonem
 Auftragsmaterial im R-Ap-
 Horizont. Das Profil
 befindet sich auf 197 m
 NHN am oberen Ende der
 Weinbergszeile.
 Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

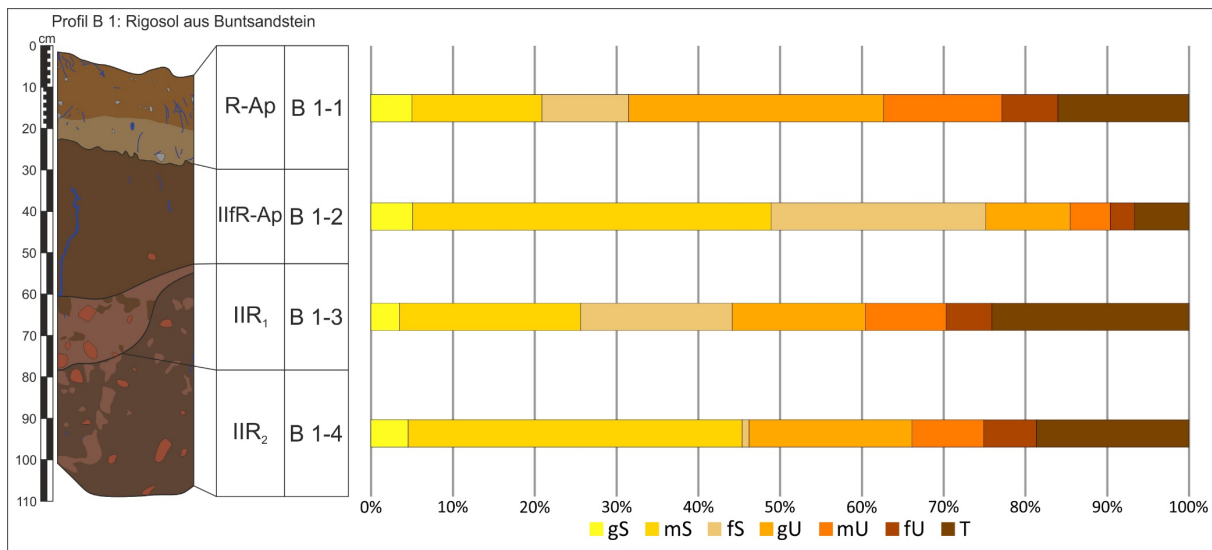


Abbildung 15: Korngrößendiagramm Profil B 1.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Korngrößenverteilung im Profil B 1 unterscheidet sich deutlich zwischen dem allochthonen Auftragsmaterial des R-Ap und dem autochthonen Bodenmaterial der darunterliegenden Horizonte (s. Abbildung 15 u. Tabelle 9).

Der R-Ap-Horizont besteht aus 31,49 % Sand, 52,49 % Schluff und 16,01 % Ton. Der Sandanteil ist der niedrigste und der Schluffanteil der höchste im Profil B 1. Die Sandfraktion besteht vor allem aus Mittelsand (15,90 %) und Feinsand (10,58 %). Der Grobsandanteil ist mit 5,01 % wie im gesamten Profil B 1 sehr gering. Der Schluffanteil besteht überwiegend aus den Fraktionen Grobschluff (31,18 %), aber auch die Mittelschlufffraktion ist mit 14,47 % vertreten.

In den autochthonen Horizonten des Profil B 1 dominieren die Sandanteile mit einem Maximum von 75,15 % (IfR-Ap-Horizont). Der Sandanteil besteht in den drei untersten Horizonten überwiegend aus den Mittel- und Feinsandfraktionen, lediglich im IIR₂-Horizont ist fast gar kein Feinsand vorhanden. Die Schluffgehalte der autochthonen Horizonte schwanken zwischen 35,14 % im IIR₂- und 18,19 % im IfR-Ap-Horizont und werden von der Grobschlufffraktion dominiert. Die Anteile der Mittelschlufffraktion sind jeweils höher als die der Feinschlufffraktion. Die IIR₁- und IIR₂-Horizonte weisen eine sehr ähnliche Korngrößenverteilung auf, welche sich nur in der Zusammensetzung der Sandfraktion deutlich unterscheidet, wobei die Sandfraktion des oberen Horizontes aus Mittel- und Feinsand (mS: 22,21 %, fS: 18,51 %), der IIR₂-Horizont jedoch fast ausschließlich aus Mittelsand (40,86 %) besteht.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung in %									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	kf-Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
B 1-1	20/1	R-Ap	5,01	15,90	10,58	31,18	14,47	6,84	16,01	31,49	52,49	16,01	7,21	12,17	0,96	4,433 · 10 ⁻⁵
B 1-2	20/2	IlfR-Ap	5,06	43,83	26,25	10,35	4,86	2,97	6,67	75,15	18,19	6,67	7,03	0,38	0,31	2,728 · 10 ⁻⁵
B 1-3	20/3	IIR ₁	3,41	22,21	18,51	16,27	9,88	5,60	24,11	44,14	31,75	24,11	6,98	0,43	0,00	n. b.
B 1-4	20/4	IIR ₂	4,52	40,86	0,83	19,93	8,74	6,46	18,65	46,21	35,14	18,65	6,93	0,41	0,00	n. b.

Tabelle 9: Laborwerte Profil B 1.

Den höchsten pH-Wert mit 7,21 (sehr schwach alkalisch) weist der R-Ap-Horizont auf (s. Tabelle 9). Darunter nehmen die pH-Werte geringfügig ab und sind „neutral“. Ein signifikanter Carbonatgehalt tritt mit 12,17 % (carbonatreich) nur im R-Ap-Horizont auf. Die darunterliegenden Horizonte sind mit Carbonatgehalten zwischen 0,38 % und 0,43 % „sehr carbonatarm“.

Der Humusgehalt im R-Ap-Horizont beträgt 0,96 % und darunter nur noch 0,31 % (sehr schwach humos). Die vertikal folgenden Horizonte enthalten keinen organischen Kohlenstoff und sind „humusfrei“.

Der kf-Wert konnte nur für die R-Ap- und IlfR-Ap-Horizonte ermittelt werden, da auf Grund des hohen Steingehalts aus den darunterliegenden Horizonten keine Stechzylinder entnommen werden konnten. Die Wasserleitfähigkeit beider Horizonte wird als „hoch“ eingestuft, die des R-Ap-Horizont ist aber deutlich höher als die des IlfR-Ap-Horizonts.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
B 1-1	R-Ap	21/126	1,27	1,33	1,46	Ld 2	29,85	18,85	19,95	140,2 (hoch)
		21/127	1,25							
		21/128	1,45							
B 1-2	IlfR-Ap	21/129	1,37	1,45	1,50	Ld 2	21,6	13,6	23,8	
		21/130	1,49							
		21/131	1,49							
B 1-3	IIR ₁	-	1,35	1,50 (B 1-2)	Ld 2	29,5	13,5	19,5		
B 1-4	IIR ₂	-	1,37	1,50 (B 1-2)	Ld 2	29,3	13,3	18,9		

Tabelle 10: Bodenphysikalische Kennwerte Profil B 1.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Für die Horizonte IIR₁ und IIR₂ wurde die TRD auf Grundlage der Ld des IlfR-Ap-Horizonts berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t liegt zwischen 1,33 g/cm³ (gering) im R-Ap-Horizont und 1,45 g/cm³ (mittel) im IlfR-Ap-Horizont (s. Tabelle 10). Die basalen Horizonte IIR₁ und IIR₂ weisen auch eine „geringe“ TRD auf. Alle Horizonte weisen eine geringe effektive Lagerungsdichte Ld auf, sie nimmt mit der Tiefe aber geringfügig zu.

Die FK im Profil B 1 ist „gering“, nimmt mit der Tiefe zunächst ab und in den basalen IIR-Horizonte wieder zu. Der R-Ap-Horizont hat eine „mittlere“ nFK, die darunterliegenden Horizonte haben fast identische „geringe“ nFK. Die LK ist in allen Horizonten „hoch“. Die nFKWe ist mit 140,2 l/m² als „hoch“ eingestuft.

5.1.2.2. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil B 2

Geländedaten

Das Profil B 2 ist ein locker gelagerter Rigosol aus Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial und das südliche und tiefer gelegene der beiden Profile (s. Abbildung 11). Es liegt auf einer Höhe von 185 m NHN und ist ca. 15 m vom unteren Ende der Weinbergszeile entfernt. Die Profilgrube wurde in den Hang hineingegraben, sodass die Profilwand nach Norden ausgerichtet ist. Die Profilwand ist 123 cm tief und misst an der Geländeoberfläche eine Breite von ca. 60 cm, die aber mit der Tiefe abnimmt.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
B 2-1	R-Ap (M)	12, 16, 13	w, di, g	10YR 3/6	Lu	G: pol-sub F: sub (pol)	Kalksteine, Ziegelsplitter f2, allochthones Auftragsmaterial	n. b.
B 2-2	R (R-Ap+IIR)	58, 53, 48	w, sc, h	10YR 3/6 2,5YR 3/4	LS2	G: sub F: sub	Ziegel, allochthones Auftragsmaterial	n. b.
B 2-3		58, 53, 48		2,5YR 3/4	SL2	G: sub F: ein/kru	autochthones Bodenmaterial	n. b.
B 2-4	IIR	104, 100, 94	e, sc, h	2,5YR 3/4	SL2	G: sub F: ein/kru	-	n. b.
B 2-5	IIIR-Cv	122, 123, 120	-	10R 4/6	Lt2	G: sub F: ein/kru	Regenwurm-/ Wurzelgänge mit Tonauskleidung	n. b.

Tabelle 11: Geländedaten Profil B 2

Rigosol aus Buntsandstein mit allochthonem Auftragsmaterial aus dem Muschelkalkgebiet. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994). Die periglazialen Lagen konnten nicht bestimmt werden.

Im Profil B 2 konnten vier Horizonte angesprochen werden (s. Abbildung 16 u. Tabelle 11). Der oberste R-Ap-Horizont besteht aus einem dunkel gelblichbraunem schluffigem Lehm. Hierbei handelt es sich um allochthones anthropogenes Auftragsmaterial aus dem Muschelkalkgebiet, welches im Zuge der Flurbereinigung aufgebracht wurde (mündliche Mitteilung Paul Fürst, März 2020). Als Grobgefüge tritt ein Polyeder- bis Subpolyedergefüge und als Feingefüge ein Subpolyedergefüge, teilweise auch ein Polyedergefüge auf. Der R-Ap hat einen mittleren Anteil von Grobwurzeln sowie einen starken Anteil von Feinwurzeln. Neben Kalksteinen mit 3 cm Durchmesser, finden sich auch Ziegelsplitter in einem geringen Flächenanteil. Die wellige Horizontuntergrenze verläuft in geneigter Lage in einer Tiefe von 12 cm bis 16 cm und ist diffus erkennbar. Der darunter folgende R(R-Ap+IIR)-Horizont besteht aus zwei unterschiedlichen Bodenarten mit jeweils unterschiedlicher Bodenfarbe,

welche den Horizont vertikal in vier Streifen teilen. Der dunkel gelblichbraune schwach sandige Lehm (B 2-2) besitzt ein Subpolyedergefüge als Grob- und Feingefüge und gleicht dem allochthonen Bodenmaterial des R-Ap. Der dunkel rötlichbraune schwach lehmige Sand (B 2-3) gleicht dem autochthonen Bodenmaterial des IIR-Horizont und besitzt als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge und als Feingefüge ein Einzelkorn-, stellenweise auch ein Krümelgefüge. Der rötlichbraune Teil des R(R-Ap+IIR)-Horizont verläuft entlang der linken Profilgrenze und schräg von der unteren Mitte des Horizonts nach rechts oben. Im oberen Drittel ist ein mittlerer Anteil an Grob- und Feinwurzeln vorhanden, in den unteren zwei Dritteln ein schwacher. Entlang der linken Profelseite finden sich vier große rote Sandsteine mit bis zu 10 cm Kantenlänge und in der unteren Profilhälfte Kalksteine mit 3 cm bis 4 cm Durchmesser (Grobgrus). Die wellige Horizontuntergrenze ist scharf erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 48 cm bis 58 cm. Darunter folgt der autochthone dunkel rötlichbraune IIR-Horizont. Der schwach lehmige Sand besitzt als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge und als Feingefüge ein Einzelkorn-, stellenweise ein Krümelgefüge. Der IIR hat einen hohen Flächenanteil von Grobgrus sowie kantige Steine (bis 20 cm) aus Sandstein. Er ist mittel bis stark grusig und steinig. In Tiefen von ca. 75 cm und 95 cm findet sich vereinzelt Kalkstein-Mittelgrus. Der mittlere Flächenanteil von Feinwurzeln ist inhomogen und vor allem in der oberen Profilhälfte zu finden. Grobwurzeln haben einen schwachen Flächenanteil. Die scharf erkennbare, ebene Horizontuntergrenze des IIR verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 94 cm bis 104 cm. Den unteren Abschluss des Profils B 2 bildet der autochthone IIIR-Cv-Horizont. Der rote schwach tonige Lehm besitzt ein Subpolyedergefüge als Grobgefüge und ein Einzelkorn- bis Krümelgefüge als Feingefüge. Der Flächenanteil an kantigen Steinen (faustgroß) ist hoch, der Anteil an Grob- und Feinwurzeln ist sehr gering. Auffällig ist das Auftreten von alten Regenwurm- und Wurzelgänge mit Tonauskleidung. Der IIIR-Cv reicht bis in eine Tiefe von 120 cm bis 123 cm.

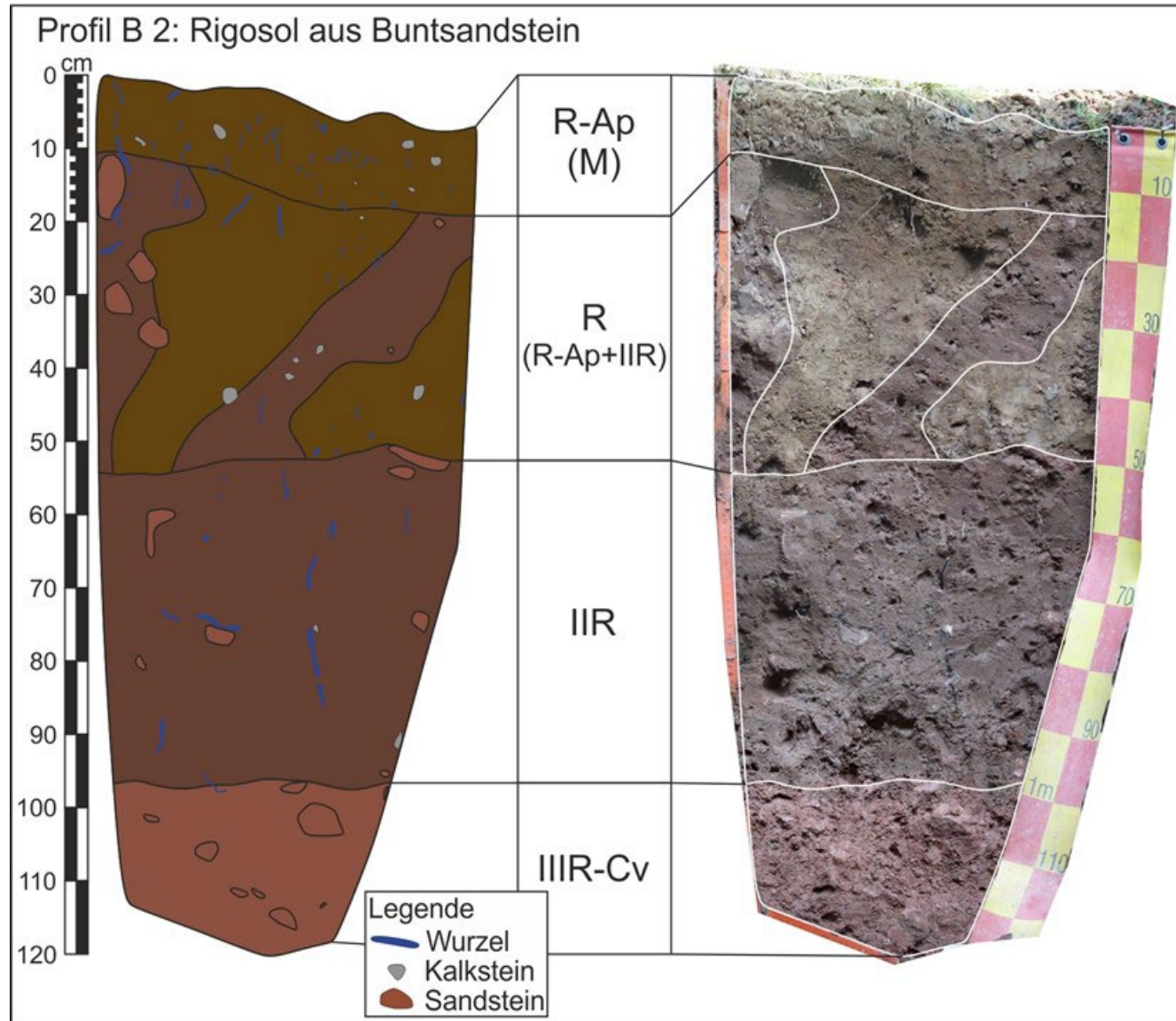


Abbildung 16:
 Profilzeichnung Profil B 2.
 Rigosol auf Buntsandstein mit
 allochthonem
 Auftragsmaterial im R-Ap-
 und R-Horizont.
 Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

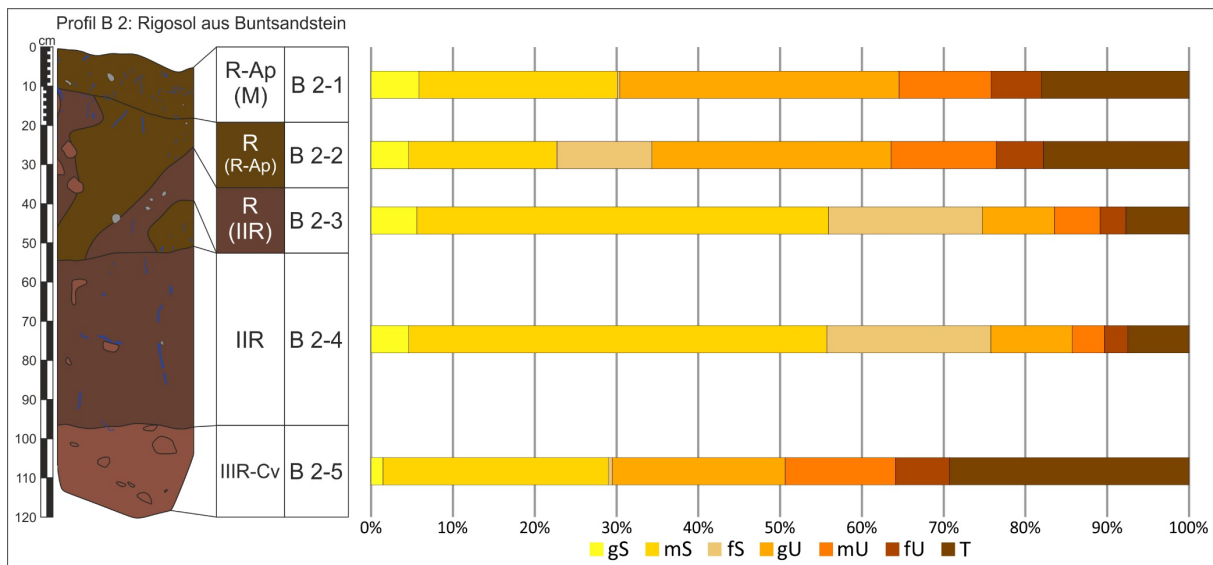


Abbildung 17: Korngrößendiagramm Profil B 2.

Um die zwei Bodenproben aus dem R-Horizont besser zuordnen zu können, wurden in der Tabelle die Horizonte Tabelle in der jeweiligen Bodenfarbe hinterlegt.

Quelle: eigene Darstellung.

Generell ähnelt sich die Korngrößenzusammensetzung im allochthonem und autochthonem Bodenmaterial in Profil B 2 (s. Abbildung 17 u. Tabelle 12). Das allochthone Bodenmaterial (R-Ap- und R(R-Ap)-Horizont) unterscheidet sich um maximal 4 % in der Sand -und Schlufffraktion. Signifikante Unterschiede konzentrieren sich auf die Mittelsand- bis Grobschlufffraktionen, wobei die Feinsandfraktion im R-Ap-Horizont fast nicht vorhanden ist. Der Schluffanteil in beiden Horizonten besteht überwiegend aus Grobschluff, aber auch die Mittelschlufffraktion ist deutlich vertreten. Das autochtone Bodenmaterial der Horizonte R(IIR) und IIR ist nahezu identisch und differiert in den einzelnen Fraktionen um maximal 1,63 %. Beide Horizonte divergieren in fast allen Kornfraktionen sehr deutlich von den allochthonen Horizonten R-Ap und R(R-Ap) und vom autochthonen IIIR-Cv-Horizont. Die Sandanteile (ca. 75 %) im R(IIR)- und IIR-Horizont bestehen zu über 50 % aus Mittelsand und ca. 19 % aus Feinsand. Der IIIR-Cv-Horizont weist mit je ca. 29 % die niedrigsten Sand- bzw. höchsten Tonanteile auf, wobei der Sandanteil fast ausschließlich auf die Mittelsandfraktion entfällt. Der Schluffanteil setzt sich überwiegend aus Grobschluff und Mittelschluff zusammen.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung in %										pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	kf-Wert [m/s]
			gS	mS	fs	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU	ΣT				
B 2-1	20/11	R-Ap	5,81	24,29	0,27	34,17	11,29	6,14	18,03	30,37	51,60	18,03	7,21	6,56	0,88	0,000152707
B 2-2	20/12	R (R-Ap)	4,57	18,14	11,61	29,25	12,86	5,76	17,80	34,32	47,88	17,80	7,40	11,89	0,45	0,000201129
B 2-3	20/13	R (IIR)	5,62	50,31	18,80	8,83	5,59	3,15	7,70	74,73	17,57	7,70	7,32	0,84	0,32	n. b.
B 2-4	20/14	IIR	4,62	51,13	20,04	9,93	3,96	2,87	7,46	75,79	16,75	7,46	7,22	0,29	0,29	n. b.
B 2-5	20/15	IIIR-Cv	1,46	27,58	0,45	21,14	13,49	6,63	29,25	29,49	41,26	29,25	7,23	0,47	0,00	n. b.

Tabelle 12: Laborwerte Profil B 2.

Um die zwei Bodenproben aus dem R-Horizont besser zuordnen zu können, wurden in der Tabelle die Horizonte Tabelle in der jeweiligen Bodenfarbe hinterlegt.

Die pH-Werte im Profil B 2 verlaufen ähnlich und befinden sich im sehr schwach alkalischen Bereich (s. Tabelle 12). Der Carbonatgehalt unterscheidet sich im allochthonen Auftragsmaterial und dem autochthonen Bodenmaterial deutlich. Der Carbonatgehalt im R-Ap-Horizont beträgt 6,56 % (mittel carbonathaltig). Der R(R-Ap)-Horizont (B 2-2) weist mit 11,89 % den höchsten Carbonatgehalt des Profils auf (carbonatreich). Der R(IIR)-Horizont hingegen (B 2-3) ist mit 0,84 % CaCO₃ „carbonatarm“. Der IIR-Horizont besitzt mit 0,29 % den niedrigsten Carbonatgehalt (sehr carbonatarm).

Im gesamten Profil ist der Humusgehalt sehr gering (sehr schwach humos) und nimmt mit der Tiefe ab. Der IIIR-Cv-Horizont ist „humusfrei“.

Der kf-Wert konnte nur für die Horizonte R-Ap und den gelblichbraunen Teil des R(R-Ap) ermittelt werden. Aus dem übrigen Profil konnten auf Grund des hohen Sandsteinanteils keine Stechzylinder gewonnen werden. Beide Horizonte weisen eine extrem hohe hydraulische Leitfähigkeit auf, wobei die des R-Ap-Horizonts etwas niedriger ist als diejenige des R(R-Ap)-Horizonts.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ _t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
B 2-1	R-Ap	-	1,32	1,46 (B 1-1)	Ld 2	33,8	14,8	17,3	148,3 (hoch)
B 2-2	R (R-Ap)	-	1,32	1,46 (B 1-1)	Ld 2	30,9	14,9	19,3	
B 2-3	R (IIR)	-	1,44	1,50 (B 1-2)	Ld 2	21,6	13,6	23,8	
B 2-4	IIR	-	1,32	1,37	Ld 2	22,8	14,8	27,4	
B 2-5	IIIR-Cv	-	1,27	1,46	Ld 2	23,45	12,45	19,6	

Tabelle 13: Bodenphysikalische Kennwerte Profil B 2.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die TRD wurde auf Basis der Ld aus Profil B 1 bzw. RENGGER et al. (2014a) und den Ton- und Schluffgehalten der jeweiligen Horizonte berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ist mit 1,44 g/cm³ (mittel) im R(IIR)-Horizont am höchsten, in den anderen Horizonten liegt sie deutlich darunter und wird als „gering“ eingestuft (s. Tabelle 13). Die effektive Lagerungsdichte Ld aller Horizonte ist „gering“. Die FK nimmt mit der Tiefe ab und liegt zwischen

33,8 Vol.-% (mittel) im R-Ap- und 22,8 Vol.-% (gering) im IIR-Horizont. Die nFK schwankt nur wenig und liegt zwischen 14,9 Vol.-% (mittel) im R(R-Ap)- und 12,45 Vol.-% (gering) im IIR-Cv-Horizont. Die LK nimmt von 17,3 Vol.-% (mittel) im R-Ap-Horizont auf 27,4 Vol.-% (hoch) im IIR-Horizont zu und nimmt im IIR-Cv-Horizont wieder ab. Die nFKWe ist mit 148,3 l/m² „hoch“.

5.1.3. Profil- und Standortanalyse Bürgstadt

Profilanalyse B 1

Beim Profil B 1 handelt es sich um einen Rigosol mit der Horizontfolge R-Ap/IIfR-Ap/IIR₁/IIR₂. Der R-Ap-Horizont besteht aus allochthonem Auftragsmaterial aus dem Muschelkalkbereich, weshalb es einen Schichtwechsel gibt (mündliche Mitteilung Paul Fürst, März 2020). Die Horizonte IIfR-Ap, IIR₁ und IIR₂ bestehen aus autochthonem Bodenmaterial des Unteren Buntsandseins.

Das Bodenmaterial des R-Ap-Horizonts unterscheidet sich deutlich von den darunterliegenden Profilabschnitten, ist aber nahezu identisch mit den Horizonten R-Ap und R(R-Ap) des Profil B 2. Der Auftrag von carbonathaltigem Bodenmaterial diente ursprünglich der Bodenverbesserung der carbonatfreien und sauren bis sehr schwach sauren Rigosole aus Buntsandsteinmaterial (WITTMANN, 1966, 2004). Die Wirksamkeit dieser Maßnahme lässt sich an den neutralen bis sehr schwach alkalischen Horizonten IIfR-Ap, IIR₁ und IIR₂ erkennen. Das vom Bodenwasser aus dem Auftragsmaterial des R-Ap-Horizont gelöste Carbonat hat bei der Versickerung die unteren Horizonte aufgepuffert und die pH-Werte in der Folge angehoben (WITTMANN, 1966). Durch die hohe hydraulische Leitfähigkeit des R-Ap-Horizont aber auch der darunterliegenden Horizonte kann eine schnelle Verlagerung von gelöstem Carbonat begünstigt werden. Für den IIR₁- sowie den IIR₂-Horizont kann auf Grund der Bodenart und der lockeren Lagerung auch von einer hohen hydraulischen Leitfähigkeit ausgegangen werden.

Der fossile Pflughorizont IIfR-Ap unterscheidet sich in seiner Korngrößenzusammensetzung deutlich von den basalen IIR₁- und IIR₂-Horizonten, ist gleichzeitig aber den Horizonten R(IIR) und IIR des Profils B 2 sehr ähnlich. Der sehr geringe Anteil großer Sandsteine im IIfR-Ap-Horizont sprechen für eine lange Bearbeitungsphase, in der die größeren Sandsteine entfernt wurden. Der IIfR-Ap-Horizont ist gegenüber den basalen Horizonten deutlich verbraunt und weist noch einen geringen Humusgehalt auf. Grundsätzlich sind die Humusgehalte in Rigosolen sehr gering, da es in Folge der besseren Durchlüftung und eines geringen Humuseintrags zu einem stärkeren Humusabbau kommt (GEIGER, 1985; WITTMANN, 1966, 2004).

Die Horizonte IIR₁ und IIR₂ sind durch Rigolen an ihre heutige Position im Profil gekommen. Der IIR₁-Horizont ähnelt in seiner hellrötlichen Farbe dem Ausgangsmaterial. Im Gegensatz dazu ist der IIR₂-Horizont deutlich verbraunt und ähnelt in der Bodenfarbe dem IIR-Ap-Horizont. Dies spricht dafür, dass der IIR₂-Horizont ursprünglich näher an der Geländeoberfläche lag und dort einer stärkeren Bodenbildung ausgesetzt war. Durch die Arbeitsweise beim Rigolen kann auch Bodenmaterial aus größeren Tiefen auf ursprünglich darüberliegendem Bodenmaterial zu liegen kommen (MOLLENHAUER, 2004). Die Flecken in den IIR₁- und IIR₂-Horizonten können während des Rigolens eingearbeitet worden sein.

Profilanalyse B 2

Bei dem Profil B 2 handelt es sich um einen Rigosol mit der Horizontabfolge R-Ap/R(R-Ap+IIR)/IIR/IIIR-Cv. Wie auch das Profil B 1, besteht das Profil B 2 zum Teil aus allochthonem anthropogenem Auftragsmaterial. Das Auftragsmaterial im Profil B 2 (R-Ap- und R(R-Ap)-Horizont) ist in der Korngrößenzusammensetzung identisch zu dem im Profil B 1 (R-Ap-Horizont) und auch hier für die Aufpufferung und die folgende Anhebung der pH-Werte verantwortlich. Die unterschiedlichen Carbonatgehalte zwischen R-Ap- und R(R-Ap)-Horizont können durch die Probennahme oder eine stärkere Entkalkung des R-Ap-Horizonts hervorgerufen worden sein.

Der R(R-Ap+IIR)-Horizont zeichnet sich durch vier vertikale, deutlich abgegrenzte Abschnitte aus. Die zwei gelblichbraunen Abschnitte können als R(R-Ap)-Horizont (B 2-2) dem allochthonen Auftragsmaterial und die zwei rötlichbraunen Abschnitte als R(IIR)-Horizont (B 2-3) dem autochthonen Bodenmaterial zugeordnet werden und sind jeweils mit diesem identisch.

Aus der scharfen Horizontuntergrenze des R(R-Ap+IIR) kann direkt auf die Bearbeitungstiefe des letzten Rigolvorgangs von 50 bis 55 cm geschlossen werden. Nach diesem Rigolvorgang wurde noch einmal Bodenmaterial in Form des R-Ap-Horizonts aufgebracht, da in diesen kein Bodenmaterial des IIR-Horizonts eingearbeitet wurde. Daraus ergibt sich folgender Arbeitsablauf: (1) Aufbringen von Auftragsmaterial, (2) Einarbeitung des Auftragsmaterials durch Rigolen, (3) Nochmaliges Aufbringen von Auftragsmaterial.

Der autochthone IIR-Horizont ist in seiner Korngrößenzusammensetzung dem IIR-Ap-Horizont des Profils B 1 sehr ähnlich. Gegenüber dem basalen IIIR-Cv-Horizont ist der IIR-Horizont deutlich verbraunt und war in der Vergangenheit einer starken Bodenbildung ausgesetzt.

Der rote IIIR-Cv-Horizont hingegen entspricht in seiner Bodenfarbe dem unverwitterten Unteren Buntsandstein. In Verbindung mit dem sehr hohen Anteil an großen Sandsteinen deutet dies auf eine

Basislage hin, eine Einregelung der Sandsteine war aber nicht erkennbar und der Horizont ist relativ locker gelagert. Auf eine Basislage deuten weiter das Fehlen von Humus und Wurzeln hin. Allgemein nimmt die Durchwurzelungsintensität an der Untergrenze des nichtverbrauchten Bodenmaterials deutlich ab (WITTMANN, 1966). Die scharfe Horizontegrenze zum IIR-Horizont und das Fehlen von eingearbeitetem Bodenmaterial lässt darauf schließen, dass der IIR-Cv-Horizont nur wenig bis gar nicht rigolt wurde (MOLLENHAUER, 2004).

Standortanalyse Bürgstadt

Der Monitoringstandort Bürgstadt ist auf Grund seiner klimatischen und geologischen Standorteigenschaften repräsentativ für die Weinberge am Untermain auf Unterem und Mittlerem Buntsandstein. Durch die weinbauliche Nutzung wurden sowohl die Böden als auch das Relief so stark überprägt, dass die Weinberge nicht mit dem übrigen Naturraum verglichen werden können.

Als ursprüngliche Böden wären am Standort auf dem Unteren und Mittleren Buntsandstein Braunerden, podsolierte Braunerden und Podsol-Braunerden sowie pseudovergleyte Braunerden zu erwarten und sind außerhalb der Weinberge auch anzutreffen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022f). Durch die tiefgreifenden Bodenveränderungen in Form des Rigolens und des Aufbringens und Einarbeitens von allochthonem Bodenmaterial wurde der ursprüngliche Boden in seinem Profilaufbau zerstört und die Bodeneigenschaften nachhaltig verändert. Folglich wird der Rigosol nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 der Bodenklasse der „Terrestrischen anthropogenen Böden“ zugeordnet (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Die WORLD REFERENCE BASE FOR SOIL RESOURCES WRB bezeichnet diesen Bodentyp als Anthrosol (IUSS WORKING GROUP WRB, 2022).

Als Weinbaustandort sind die untersuchten Rigosole in der Weinlage Centgrafenberg/Hundsrück nicht die beste Wahl. Das saure bis sehr saure Ausgangsmaterial wurde durch das Auftragen von carbonatreichem Bodenmaterial aus dem Muschelkalk aufgepuffert und so das Bodenmilieu auf neutrale bis sehr schwach alkalische pH-Werte angehoben. Ausgehend von dem sehr sandigen und damit wasserdurchlässigem Bodenmaterial weist bereits eine natürliche Braunerde auf dem Unteren Buntsandstein keine optimalen bodenhydrologischen Eigenschaften auf. Die nFK hangaufwärts des Untersuchungsstandorts ist mit 134,3 mm als „gering“ angegeben (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022f). Durch das Rigolen wurden die Rigosole weiter aufgelockert, was zwar zu einer besseren Durchlüftung des Bodens und einem höheren Porenvolumen führt und somit vorteilhaft für die Reben ist. Für Reben optimale Luftkapazitäten liegen zwischen 12 % und 20 %, was eine gute Drainage des Bodens bedingt (WITTMANN, 2004). Dies wird auch beim Vergleich der ermittelten nutzbaren Feldkapazität für die Horizonte von Profil B 1 deutlich. Die nFK aber liegt deutlich unter den Werten von natürlichen Böden und gilt als stark trockenstressgefährdet (WITTMANN, 2004). Im

Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Rigosole Niederschläge schnell und in großer Menge sehr gut aufnehmen, diese aber kaum speichern können. Eine gute Wasserversorgung ist an diesem Standort von regelmäßigen Niederschlägen abhängig (WITTMANN, 1966). Dies kann in Zukunft zu Problemen führen, da die Sommerniederschläge verstärkt in Form von unregelmäßigen Starkniederschlägen fallen werden (SCHÖNBEIN et al., 2020). Neben verstärkten Problemen mit der Wasserversorgung, können die Starkniederschläge auch zu einer erhöhten Bodenerosion führen, sofern die Rigosole nicht von einer Dauerbegrünung geschützt sind.

Die nachteiligen Eigenschaften der Rigosole werden aber zum Teil durch die anderen Standorteigenschaften der Weinlage ausgeglichen. Die Exposition der Weinlage Centgrafenberg/Hundsrück nach Süden bietet eine optimale Ausbeute der Sonnenscheindauer. Gleichzeitig erwärmen sich die sandigen Rigosole auf Grund ihrer dunklen Bodenfarbe schnell, was sich positiv auf das Wachstum der Reben auswirkt. Das Zusammenspiel aller Standorteigenschaften – positiver wie negativer – spiegelt sich im sogenannten „Terroir“ des Weines wieder. Das Terroir ist zwar nicht quantifizierbar, kann als Qualitätsmerkmal aber auch negative Standorteigenschaften ausgleichen (WITTMANN, 2004).

5.2. Herchsheim

5.2.1. Standortüberblick

5.2.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort Herchsheim liegt im nordwestlichen Teil des Naturraum 130 „Ochsenfurter und Gollachgau“, welcher Teil der Naturraum-Haupteinheit D56 „Mainfränkische Platten“ ist (MENSCHING & WAGNER, 1963). Kulturlandschaftlich wird er dem Raum „Gäulandschaften zwischen Ochsenfurt und Bad Windsheim“ zugeordnet (REH & BLUM, 2011c). Der Naturraum erstreckt sich zwischen Main im Norden, Tauber im Westen und Süden und der Steigerwaldschichtstufe im Osten. Die Gäuhochfläche hat den größten Flächenanteil an der mainfränkischen Landschaft. Die wellige Hochfläche des „Ochsenfurter und Gollachgau“ liegt zwischen 300 m und 340 m NHN und bildet die Wasserscheide zwischen Main und Tauber. Die nach Osten und Süden zur Tauber entwässernden Bäche schneiden sich nur langsam in die Hochfläche ein, während die zum Main entwässernden Bäche sich auf Grund der geringeren Distanz schnell tief einschneiden.

Der Monitoringstandort befindet sich auf einem Acker ca. 1,3 km SSE von Giebelstadt und ca. 1 km NNE von Herchsheim in der Flur „Grainberg“ (s. Abbildung 18). Der Grainberg bildet ein Plateau mit Höhen zwischen 300 m und 301 m NHN, über welchem die Wasserscheide zwischen Main und Tauber verläuft. Im NE des Grainbergs beginnt der Klingengraben sich einzuschneiden und mündet nach ca. 3 km auf einer Höhe von ca. 240 m NHN in den Thierbach. Im ESE des Grainberg beginnt sich der Immentalgraben zunächst langsam, ab einer Höhe von ca. 285 m NHN dann deutlich einzuschneiden und mündet auf einer Höhe von ca. 245 m NHN, etwa 610 m flussaufwärts des Klingengraben, ebenfalls in den Thierbach. Das Thierbachtal ist ein kurzläufiges, tief in die Gäuhochfläche eingeschnittenes Seitentalsystem des Mains. Nach einer Fließlänge von insgesamt 20,11 km mündet der Thierbach auf einer Höhe von ca. 175 m NHN in Ochsenfurt in den Main (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2016). Nach Süden und Osten entwässert der Grainberg über den Seebach zur Tauber. Der Seebach entspringt ca. 280 m westlich Wolkshausen und fließt in einem breiten, wenig eingetieftem Muldental nach Westen und mündet auf ca. 245 m NHN in den Wittigbach. Nach Osten entwässert der Grainberg zunächst über ein flaches Muldental bis zur Ortschaft Herchsheim und von dort über den Esbach bis zum Seebach (LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023). Östlich der Bundesstraße 19 umgeben den Seebach Weiher und Feuchtplächen (Biotophauptnummer 6325-0017 und 6325-0018, LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023).

Die nördliche Hälfte des Ackers ist als Teil des Bodendenkmals D-6-6325-0290 (Siedlung vorgeschichtlicher Zeitstellung) ausgewiesen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE, 2022c).

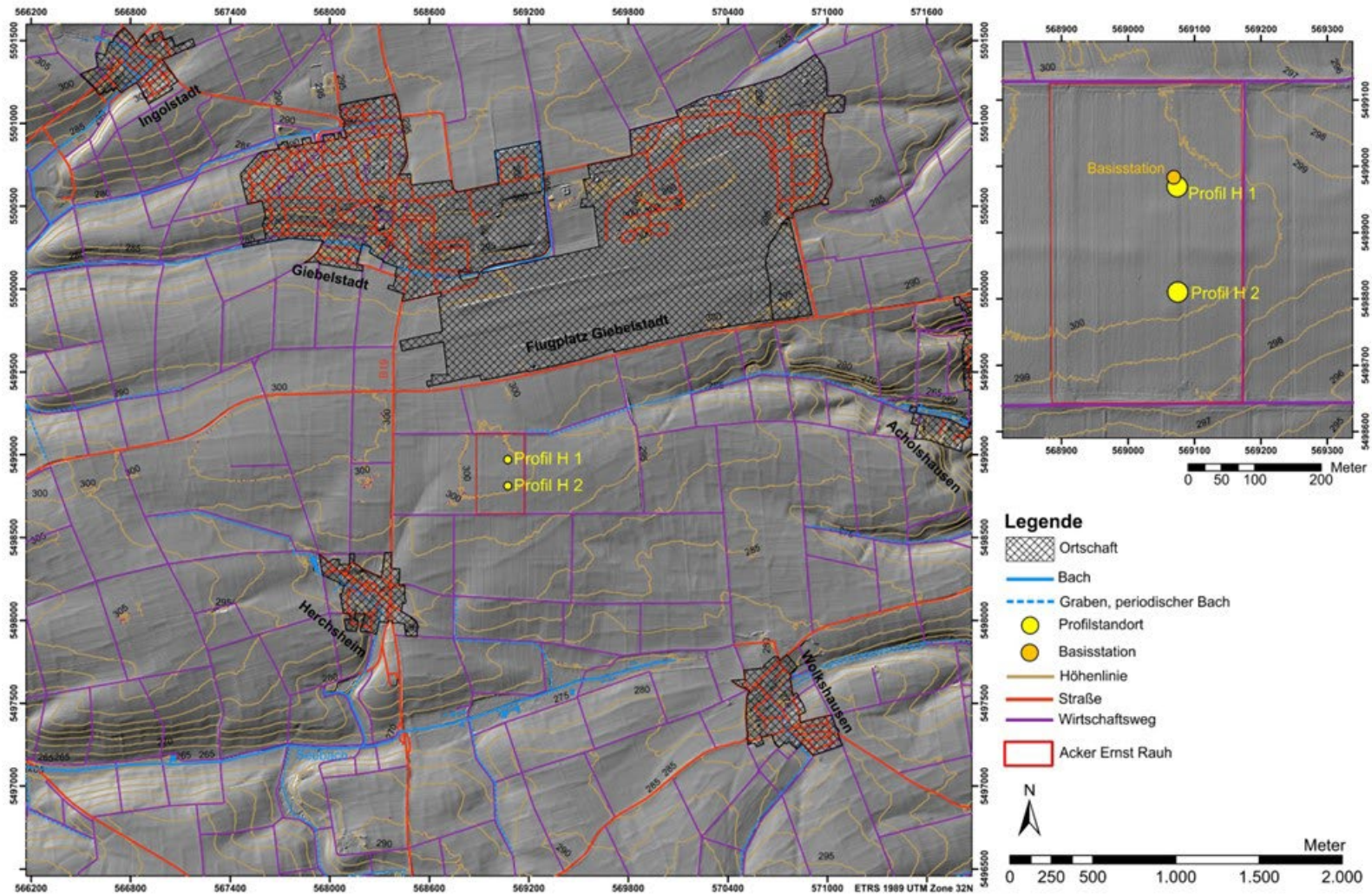


Abbildung 18: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Herchheim. Maßstab: 1:20.000; Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

5.2.1.2. Geologie

Das Untersuchungsgebiet Herchsheim befindet sich geologisch auf Unterem Keuper (ku) (s. Abbildung 19), welcher im „Ochsenfurter und Gollachgau“ allerdings großflächig mit mehreren Metern pleistozänem Löss überdeckt ist (FREUDENBERGER, 1997; HAUNSCHILD, 1997; MÜLLER, 1996). Der Übergangsbereich von Oberem Muschelkalk (mo) zu Unterem Keuper (ku) befindet sich ca. 6 km westlich bei Gaubüttelbrunn und Kirchheim. Hier wird der Quaderkalk des Oberen Muschelkalk (mo3) abgebaut (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2019, 2022d). Der Untere Keuper ist nur inselhaft auf der Lösshochfläche und an den Hängen der Täler und Dellen anstehend. Die Talböden bestehen aus einer etwa 2 m bis 3 m mächtigen quartären polygenetischen Talfüllung (HAUNSCHILD, 1986, 1997). Die Talfüllungen bestehen überwiegend aus Schluff, schluffigem Sand bis sandigem Lehm und seltener auch aus Kiesgeröllen (FREUDENBERGER, 1997).

Die würmzeitliche Lössauflage im Ochsenfurter und Gollachgau wurde durch die vorherrschenden Westwinde aus den Flussterrassen im Muschelkalkbereich des Maintalsystems (Main, Tauber) ausgeweht. Der äolische Transport erfolgte nur über kurze Distanzen, was zu eindeutigen sedimentpetrographischen Unterschieden in den Lössen Unterfrankens führte: Löss aus Muschelkalk weist einen Carbonatgehalt von 15 % bis 20 % auf. Die Korngrößenzusammensetzung verschiebt sich mit zunehmender Entfernung zu den Ursprungsgebieten zu kleineren Kornfraktionen. Im Untersuchungsgebiet ist mit 70 % bis 80 % Schluff die dominierende Kornfraktion, wobei der Großteil auf die Grob- und Mittelschlufffraktionen entfällt. Der Tonanteil liegt zwischen 16 % und 21 % (GEYER, 2002; HAUNSCHILD, 1986; MÜLLER, 1996; RÖSNER, 1990). Die Lössablagerung führte zu einer Nivellierung des Reliefs, so dass im Ochsenfurter und Gollachgau flache Oberflächenformen mit sanften Übergängen vorherrschen (GEYER, 2002; MÜLLER, 1996; RÖSNER, 1990; SOMMER et al., 2004). Die Lössmächtigkeiten liegen bei durchschnittlich 1 m bis 3 m, sind aber stark von der Reliefposition abhängig (HAUNSCHILD, 1997). Zwei Lössprofile bei Bütthard (ca. 7 km südwestlich) zeigen Mächtigkeiten von 2 m und 3,5 m. Im Rippachtal nördlich Röttingen (ca. 13 km südlich) wurde ein Lössprofil mit 2 m bis 8 m Mächtigkeit aufgenommen (FREUDENBERGER, 1997). Im mit ca. 10 m mächtigsten Lössprofil bei Kirchheim konnten 7 Paläobodensequenzen nachgewiesen werden (RÖSNER, 1990).

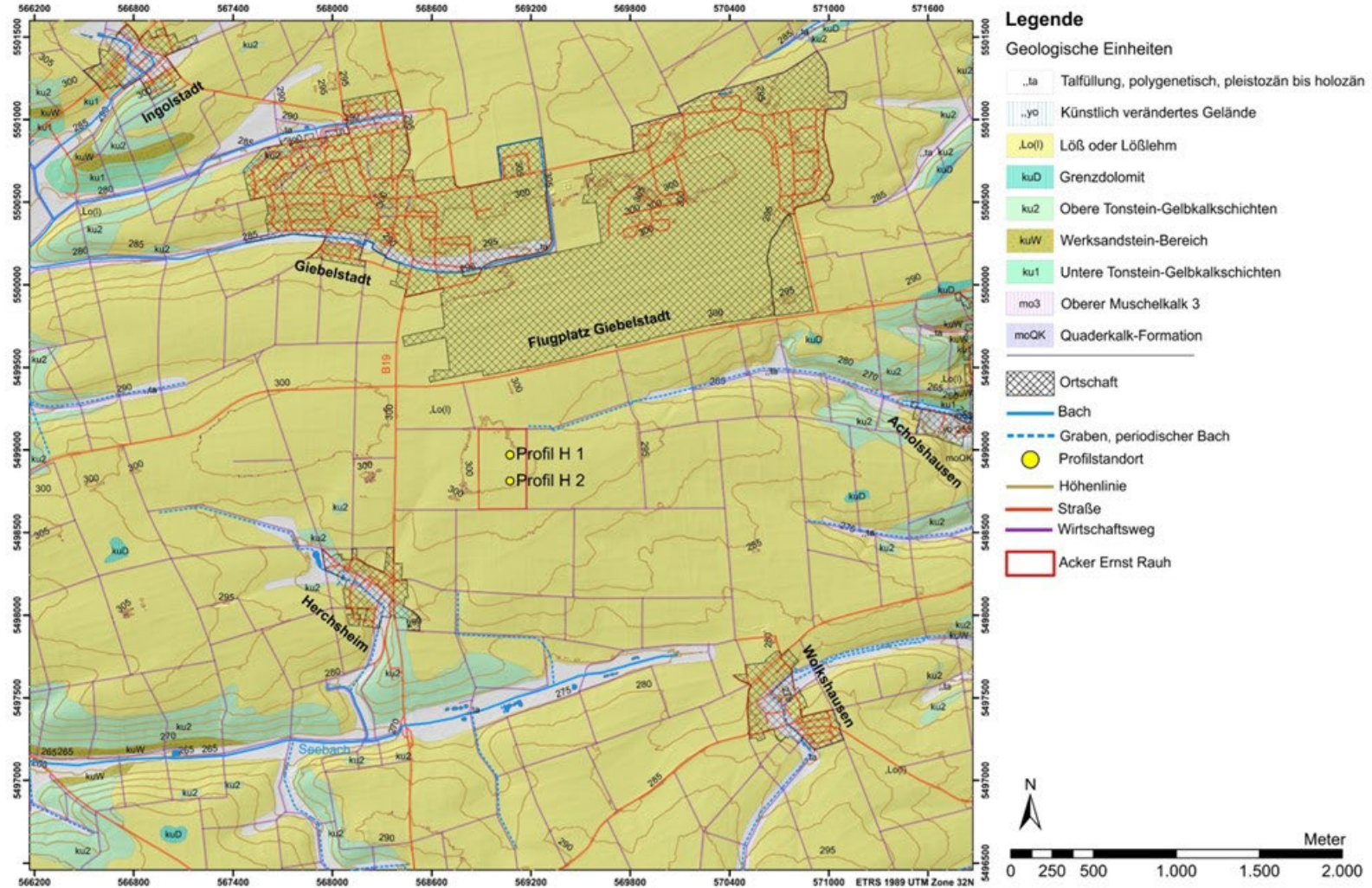


Abbildung 19: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Herchsheim.

Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).

Unter der Lössauflage steht im Klingengraben und im Thierbachtal zunächst der Grenzdolomit (kuD, Erfurt-Formation) mit einer geschätzten Mächtigkeit von 6 m an. Im Liegenden folgen mit etwa 25 m Mächtigkeit die Oberen Tonstein-Gelbkalkschichten (ku2, Erfurt-Formation). Darunter liegt der etwa 6 m mächtige Werksandstein-Bereich (kuW, Erfurt-Formation). Den liegenden Abschluss der Erfurt-Formation bilden die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) mit einer Mächtigkeit von ca. 15 m. An der Mündung des Klingengrabens in das Thierbachtal steht im Liegenden der Obere Muschelkalk 3 (mo3, Meißner-Formation) mit einer Mächtigkeit von ca. 4 m an. Die Quaderkalk-Formation (moQK) bildet den Hangfuß von Klingengraben und Thierbachtal. Die aufgeschlossene Mächtigkeit der Quaderkalk-Formation im Thierbachtal liegt bei etwa 10 m. Die Talböden des Klingengrabens und des Thierbachtals bestehen aus einer quartären Talfüllung (HAUNSCHILD & VOSSMERBÄUMER, 2021).

Westlich bei Kirchheim ist die Quaderkalk-Formation (moQK) dem Oberen Muschelkalk 3 (mo3) zwischengeschaltet. Den Hangfuß des Rimbachs und auch im Ortsbereich von Kleinrinderfeld bildet der Obere Muschelkalk 2 (mo2, Meißner-Formation) (HAUNSCHILD & VOSSMERBÄUMER, 2021).

Direkt südlich vom Untersuchungsgebiet am Seebach sind die Oberen Tonstein-Gelbkalkschichten (ku2) oberflächennah anstehend. Bereits in einer Tiefe von 98 cm wurden die grüngrauen Tonsteine in einem Bohrstock vorgefunden (Kartierpunkt Hofacker 2; R 568732,49 H 5497991,89; Datum: 19.07.2018). Entlang des Seebachs beträgt die Mächtigkeit der Oberen Tonstein-Gelbkalkschichten ca. 13 m. Westlich von Herchsheim ist am Seebach auch der Werksandstein-Bereich (kuW) anstehend (HAUNSCHILD & VOSSMERBÄUMER, 2021).

Nordwestlich des Untersuchungsgebiets im Ortsbereich von Giebelstadt zeigt sich das gleiche Bild: mit zunehmender Entfernung nach Westen wird entlang des Dreibrunnenbachs und des Sulzdorfer Bachs die gesamte Erfurt-Formation aufgeschlossen (HAUNSCHILD & VOSSMERBÄUMER, 2021).

5.2.1.3. Klima

Die Klimadaten für den südliche Ochsenfurter Gau stammen von der Wetterstation Euerhausen. Diese befindet sich ca. 3,25 km SSW der Monitoringstation Herchsheim, am Ortsrand von Euerhausen. Die Wetterstation Euerhausen wird von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) seit September 1989 betrieben. Die Referenzstation des Deutschen Wetterdienstes befindet sich 18,2 km ESE in Gollhofen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023b).

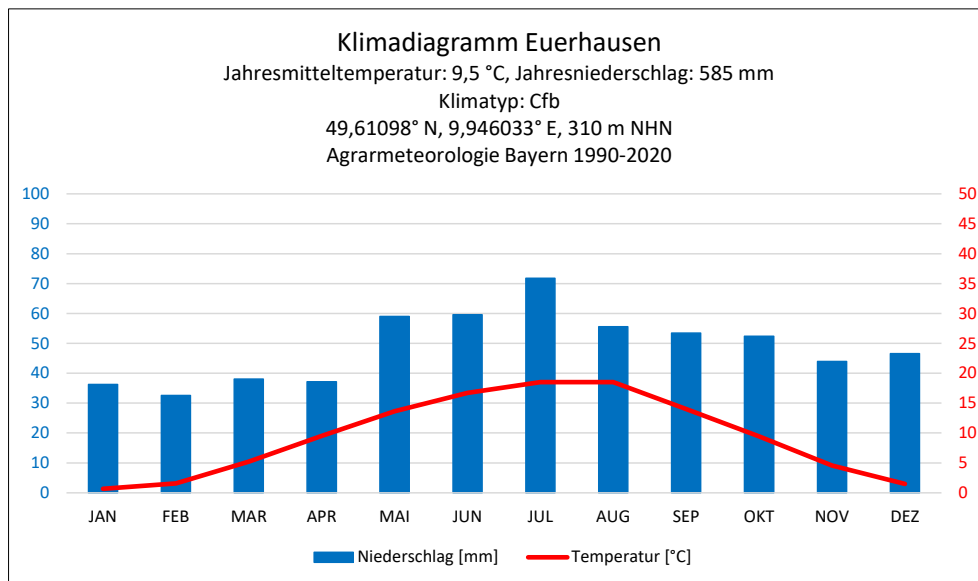


Abbildung 20: Klimadiagramm Euerhausen 1990-2020.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023b), eigene Darstellung.

Die Wetterstation Euerhausen weist im Beobachtungszeitraum 1990 bis 2020 eine Jahresmitteltemperatur von 9,5 °C und einen Jahresniederschlag von 585 mm auf (s. Abbildung 20). Die niedrigsten Temperaturen treten erwartungsgemäß in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar auf, wobei Januar mit 0,65 °C der kälteste Monat ist. Die wärmsten Monate im Jahresverlauf sind die Sommermonate Juni, Juli und August, wobei Juli und August fast identisch sind (Juli: 18,53 °C, August: 18,51 °C). Im Frühjahr und Herbst nimmt die Temperatur moderat und stetig zu bzw. ab.

Das Klima in Euerhausen ist humid und die jahreszeitlichen Schwankungen der Niederschläge sind deutlich ausgeprägt. Die trockensten Monate im Jahresverlauf sind Januar bis April. Das Niederschlagsminimum liegt mit 32,5 mm im Februar. Im Mai steigen die Niederschläge deutlich an und erreichen im Juli das Niederschlagsmaximum mit 72 mm. Von August bis Oktober treten etwas niedrigere Niederschläge auf als im Frühsommer und sinken nach einem Zwischenmaximum im Dezember konstant bis Februar ab. Euerhausen besitzt nach der Klimaklassifikation von Köppen und Geiger ein Cfb-Klimat (PEEL et al., 2007).

Auf Grund der geringen Distanz, der gleichen Höhenlage und des gleichen Naturraums lassen sich die klimatischen Bedingungen direkt auf den Monitoringstandort Herchsheim übertragen.

In Giebelstadt existierte bis Ende 2005 eine Niederschlagsmessstation des DWD (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022b). Für den Klimareferenzzeitraum 1991 bis 2020 wurden die fehlenden Daten durch Rasterdaten ergänzt. Der Jahresniederschlag für Giebelstadt wird mit 635,3 mm und damit 50 mm mehr als in Euerhausen angegeben. Vor allem in den Monaten November bis März fielen deutlich mehr Niederschläge, von Dezember bis Februar mehr als 10 mm (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d).

5.2.2. Bodengeographische Analysen Herchsheim

5.2.2.1 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil H 1

Geländedaten

Die Parabraunerde des Profil H 1 ist das nördliche der beiden Profile (s. Abbildung 18). Die Profilwand ist nach Osten orientiert und weist auf der linken Seite eine Höhe von 109 cm und auf der rechten Seite 103 cm auf. Zum Zeitpunkt der Profilaufnahme lag der Acker mit einer Zwischenfrucht brach.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale
H 1-1	Ap	30	e, di, h	10YR 6/4	Ut4	kru, sub	Wf2,ur
H 1-2	Al	37-38	e/w, sc, h	10YR 6/4	Ut4	sub	Wf1,ur
H 1-3	Bt	62	z/w, de, h	10YR 3/2	Tu3	sub, pol	Wf2,ur
H 1-4	Bvt	85-91	t/w, di/de, h	10YR 3/2, 10YR 5/8	Tu4	sub, pol	Wf1,ur
H 1-5	ICv	103-109	-	10YR 5/8	Ut4	pol	Wf1

Tabelle 14: *Geländedaten Profil H 1.*

Parabraunerde auf Löss. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das untersuchte Bodenprofil H 1 konnte in fünf Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 21 u. Tabelle 14). Der Ap-Horizont bildet die rezente Bodenoberfläche und ist mit Klee als Zwischenfrucht bewachsen. Er besteht aus einem leicht gelblichbraunen stark tonigem Schluff mit einem Krümel- bis Subpolyedergefüge und weist einen unregelmäßigen, schwachen Anteil an Feinwurzeln auf. Die ebene Horizontuntergrenze des Ap-Horizonts ist diffus erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 30 cm. Der darunterliegende Al-Horizont unterscheidet sich nur durch sein Subpolyedergefüge und die geringere Lagerungsdichte vom Ap-Horizont. Feinwurzeln finden sich hier nur unregelmäßig mit einem sehr schwachen Anteil. Die Untergrenze des Al-Horizonts verläuft in horizontaler Lage eben bis wellig in 37 cm bis 38 cm Tiefe und ist scharf ausgebildet. Der Bt-Horizont weist einen sehr dunkel gräulichbraunen mittel schluffigen Ton mit hoher Lagerungsdichte auf. Dessen mittel schluffiger Ton besitzt ein deutlich ausgeprägtes Polyedergefüge mit einem untergeordneten Subpolyedergefüge. Feinwurzeln treten hier unregelmäßig bis nestartig mit einem schwachen Anteil auf. Die deutlich erkennbare Horizontuntergrenze verläuft in einer Tiefe von 58 cm bis 62 cm wellig in horizontaler Lage. Zungen und Flecken des Bt-Horizonts reichen bis in eine Tiefe von 81 cm und sind vollständig vom Bvt-Horizont umgeben. Der Bvt-Horizont besitzt einen stark schluffigen Ton mit einer gelblichbraunen Farbe. Die Flecken des Bt-Horizonts sowie die Wurzelgänge haben eine sehr dunkel gräulichbraune Farbe. Feinwurzeln finden sich hier nur unregelmäßig mit

einem sehr schwachen Anteil. Das Gefüge des Bvt-Horizonts entspricht einem Polyedergefüge mit untergeordnetem Subpolyedergefüge. Die wellige Horizontuntergrenze des Bvt-Horizonts befindet sich in einer Tiefe von 85 cm bis 91 cm, ist deutlich bis diffus erkennbar und verläuft nach links geringfügig geneigt. Den basalen Abschluss des Profils bildet der ICv-Horizont in einer Tiefe von 103 cm bis 109 cm. Der gelblichbraune stark tonige Schluff besitzt ein Polyedergefüge und weist eine mittlere Lagerungsdichte auf. Einzelne Feinwurzeln finden sich hier in den alten, dunkel gräulichbraunen Wurzelgängen.

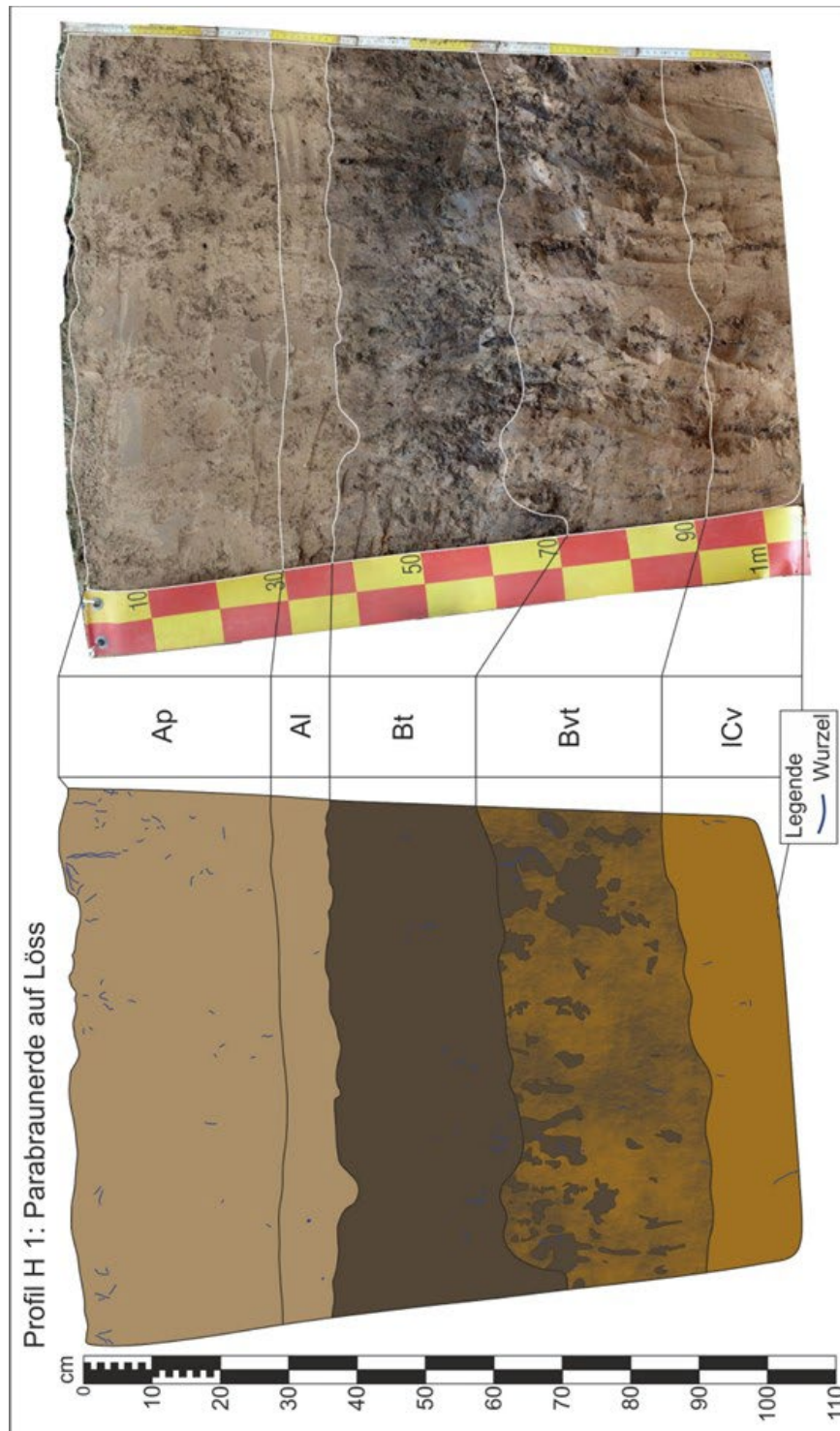


Abbildung 21: Profilzeichnung Profil H 1. Ackerbaulich genutzte und überprägte Parabraunerde auf Löss. Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

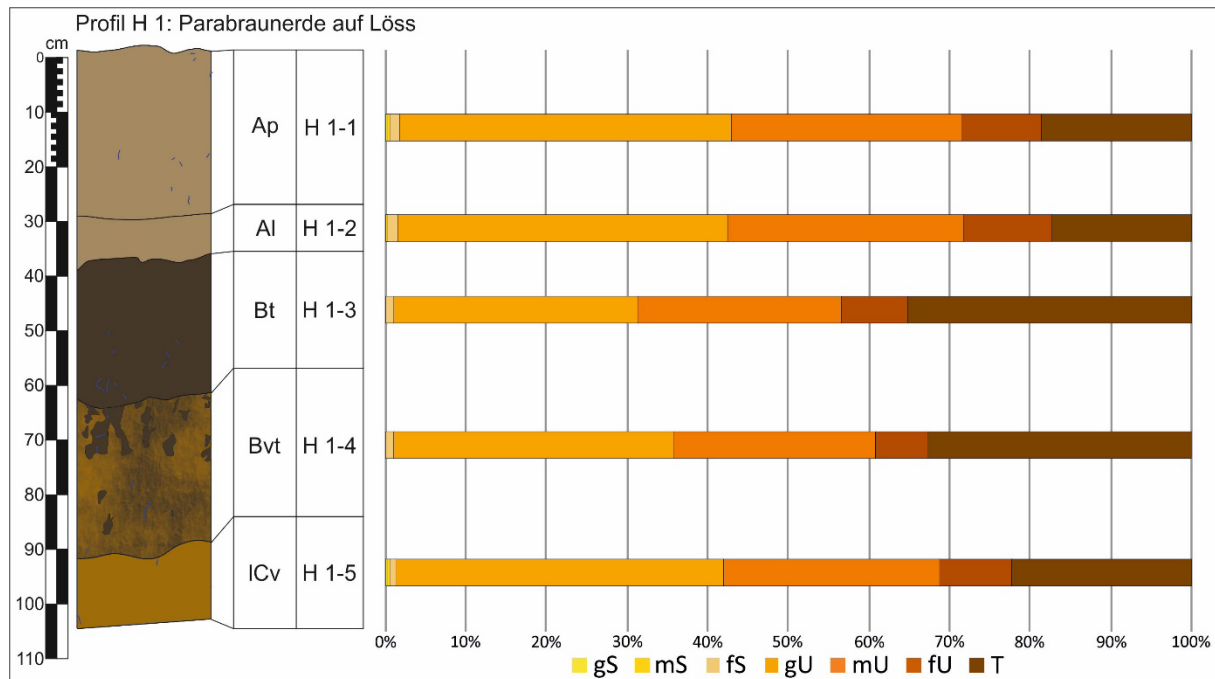


Abbildung 22: Korngrößendiagramm Profil H 1.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil H 1 bestehen fast vollständig aus Feinsand und liegen zwischen 1,65 % und 0,94 %, mit dem Maximum im Ap-Horizont (s. Abbildung 22 u. Tabelle 15). Die Schluffanteile liegen zwischen 80,94 % im Al- und 63,79 % im Bt-Horizont. Die einzelnen Schluffanteile der Horizonte bestehen überwiegend aus Grob- und Mittelschluff, während der Feinschluffanteil nur zwischen 6,56 % und 10,9 % liegt. Der Tonanteil liegt zwischen 17,56 % und 35,27 %, mit dem Maximum im Bt-Horizont. Die Korngrößenfraktionen des Ap-, Al- und ICv-Horizonts ähneln sich sehr stark, was ebenso für die Horizonte Bt und Bvt zutrifft.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]							pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]			
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T						
H 1-1	18/191	Ap	0,19	0,24	1,23	41,11	28,51	9,99	18,73	1,65	79,62	18,73	7,14	0,70	1,72
H 1-2	18/192	Al	0,08	0,21	1,20	40,95	29,10	10,90	17,56	1,50	80,94	17,56	7,12	1,60	1,88
H 1-3	18/193	Bt	0,01	0,02	0,90	30,40	25,17	8,22	35,27	0,94	63,79	35,27	6,95	0,60	0,74
H 1-4	18/194	Bvt	0,02	0,05	0,87	34,73	25,01	6,56	32,75	0,95	66,31	32,75	6,98	0,64	0,03
H 1-5	18/195	ICv	0,16	0,25	0,85	40,52	26,77	9,03	22,42	1,26	76,32	22,42	7,24	20,31	0,23

Tabelle 15: Laborwerte Profil H 1.

Die pH-Werte im Profil H 1 nehmen zunächst mit der Tiefe von 7,14 im Ap-Horizont auf 6,95 im Bt-Horizont geringfügig ab (neutral, s. Tabelle 15). Darunter steigen die pH-Werte wieder auf 7,24 (sehr schwach alkalisch) im basalen ICv-Horizont an.

Bis auf den ICv-Horizont mit 20,31 % Carbonatgehalt (carbonatreich) sind die übrigen Horizonte carbonatarm.

Signifikante Humusgehalte treten mit 1,72 % nur im Ap- und 1,88 % im Al-Horizont auf (schwach humos).

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
H 1-1	Ap	18/196	1,38	1,55	Ld 3	35,6	17,6	16	165,5 hoch
H 1-2	Al	18/197	1,34	1,50	Ld 2	35,8	17,8	17	
H 1-3	Bt	18/198	1,50	1,74	Ld 3	36,0	12,0	7	
H 1-4	Bvt	18/199	1,38	1,61	Ld 3	35,4	14,2	11,4	
H 1-5	ICv	18/200	1,52	1,71	Ld 3	32,8	15,8	12,8	

Tabelle 16: Bodenphysikalische Kennwerte Profil H 1.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach Renger et al. (2009) und Renger et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t liegt zwischen 1,34 g/cm³ im Al-Horizont und 1,52 g/cm³ im basalen ICv-Horizont und im Bt-Horizont mit 1,50 g/cm³ nur geringfügig unter der des ICv-Horizonts (s. Tabelle 16).

Parallel zur TRD ρ_t ist die effektive Lagerungsdichte Ld im Al-Horizont geringfügig niedriger als im Ap-Horizont. Die höchste Ld mit 1,74 g/cm³ weist der Bt-Horizont auf. Im Bvt-Horizont nimmt die Ld zunächst ab und steigt im ICv-Horizont wieder an.

Die FK ist in allen Horizonten „hoch“ und schwankt nur wenig. Die nFK nimmt mit der Tiefe ab, ist im mit 12 Vol.-% (gering) im Bt-Horizont am niedrigsten und steigt darunter wieder an. Die anderen Horizonte weisen eine „mittlere“ nFK auf. Die LK hat einen Tiefenverlauf analog zur nFK. Bt- und Bvt-Horizont haben eine „mittlere“ LK, die übrigen Horizonte eine „hohe“ LK. Die nFKWe ist mit 165,5 l/m² als „hoch“ zu beurteilen.

5.2.2.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil H 2

Geländedaten

Das Profil H 2 entspricht einer Parabraunerde (s. Abbildung 18) und befindet sich südlich der Wasserscheide, ca. 160 m vom Profil H 1 entfernt. Die nach Osten ausgerichtete Profilwand weist eine Mächtigkeit von 110 cm auf. Zum Zeitpunkt der Profilaufnahme lag der Acker mit einer Zwischenfrucht brach.

Horizont-nummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale
H 2-1	Ap ₁	4 bis 9	w, d, h	10YR 5/4	Ut4	kru	Wg2,ur
H 2-2	Ap ₂	25 - 32	w/k, de, h	10YR 4/4	Ut4	sub	Wf4,nst Wg2
H 2-3	Bt	56 - 62	w/k,sc, h	10YR 3/6	Tu3	sub, pol	Wf3, Wg1
H 2-4	Btv	67 - 74	w/k, sc, h	10YR 5/6	Ut4	sub	Tiergang bei 69 cm (10YR 3/6)
H 2-5	ICkc	107	-	10YR 6/6	Ut4	sub	Lösskindel bei 80 cm

Tabelle 17: Geländedaten Profil H 2.

Parabraunerde auf Löss. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Bodenprofil H 2 konnte in fünf Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 23 u. Tabelle 17). Die rezente Bodenoberfläche bildet der Horizont Ap₁. Der gelblichbraune stark tonige Schluff besitzt ein Krümelgefüge und einen schwachen Anteil unregelmäßiger Grobwurzeln. Die wellige Horizontuntergrenze verläuft in einer Tiefe zwischen 4 cm und 9 cm in horizontaler Lage und ist deutlich erkennbar. Der darunterliegenden Ap₂-Horizont entspricht einem dunkel gelblichbraunen stark tonigen Schluff mit Subpolyedergefüge. Die Lagerungsdichte ist höher als im Ap₁-Horizont. Im Ap₂-Horizont findet sich ein starker Anteil von Feinwurzeln in Form von Nestern sowie ein schwacher Anteil von Grobwurzeln. Die Untergrenze des Ap₂-Horizonts verläuft in horizontaler Lage zwischen 25 cm und 32 cm. Sie ist deutlich erkennbar und wellig, wobei zwei Zapfen bis max. 55 cm Tiefe in den darunterliegenden Bt-Horizont reichen. Der Bt-Horizont besteht aus einem mittel schluffigen Ton mit einer dunkel gelblichbraunen Bodenfarbe. Der Bt-Horizont weist ein Subpolyeder- bis Polyedergefüge und eine deutlich höhere Lagerungsdichte als der Ap₂-Horizont auf. Im Bt-Horizont findet sich ein mittlerer Anteil von Feinwurzeln, vor allem in alten Wurzelgängen, welche sich durch ihre dunklere Farbe vom Bt-Horizont abheben. Daneben findet sich an der Oberkante des Bt-Horizonts ein sehr schwacher Anteil Grobwurzeln. Die stark wellige und scharf erkennbare Untergrenze mit leichter Ausprägung von Zapfen des Bt-Horizonts verläuft in einer Tiefe zwischen 56 cm und 62 cm in horizontaler Lage. Der Bt-Horizont zeigt eine gelblichbraune Farbe und als Bodenart einen stark tonigen Schluff. Dieser weist ein Subpolyedergefüge auf und ist von einer mittleren Anzahl alter Wurzelröhren durchzogen. In einer Tiefe von 69 cm findet sich zudem ein verfüllter Tiergang. Die Verfüllungen der alten Wurzelröhren und des Tiergangs haben eine dunkel gelblichbraune Farbe. In einer Tiefe von 67 cm bis 74 cm verläuft die wellige Horizontuntergrenze des Btv-Horizonts, welche stellenweise auch taschenförmig ist. Der Übergang zum ICkc-Horizont ist scharf ausgebildet und verläuft in horizontaler Lage. Beim basalen ICkc-Horizont handelt es sich um einen bräunlichgelben stark tonigen Schluff mit einem Subpolyedergefüge. In einer Tiefe von ca. 70 cm bis 85 cm finden sich Lösskindel mit bis zu 2 cm Durchmesser. Die verfüllten Wurzelgänge aus

dem Btv-Horizont setzen sich im ICkc-Horizont fort, wobei der Flächenanteil mit der Tiefe von mittel auf gering abnimmt (s. Abbildung 23).

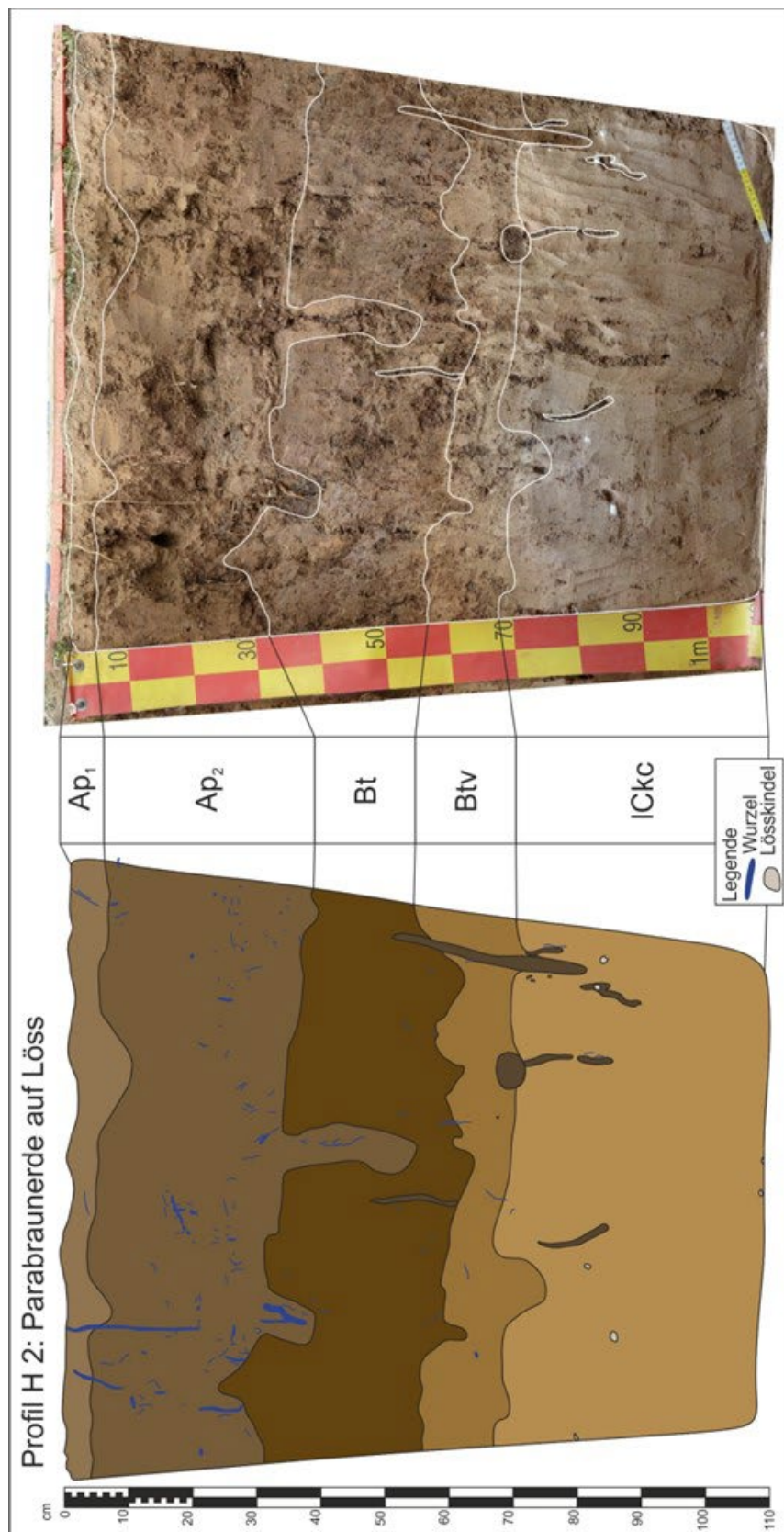


Abbildung 23: Profilzeichnung Profil H 2.
 Ackerbaulich genutzte und überprägte Parabraunerde auf Löss.
 Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

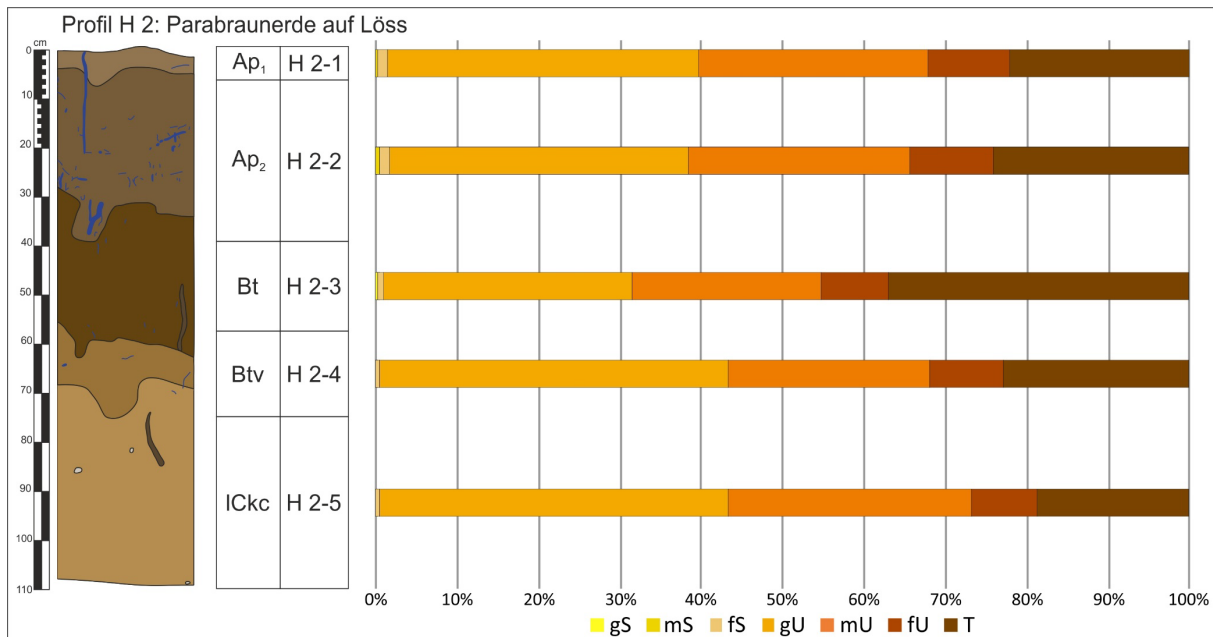


Abbildung 24: Korngrößendiagramm Profil H 2.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil H 2 bestehen fast vollständig aus Feinsand (s. Abbildung 24 u. Tabelle 18). Bis auf sehr geringe Anteile in den Horizonten Ap₁ und Ap₂ ist das Profil frei von Grob- und Mittelsand. Die Schluffanteile liegen zwischen 62,30 % im Bt-Horizont und 80,82 % im basalen ICkc-Horizont. Die Schlufffraktion besteht überwiegend aus Grob- und Mittelschluff. Der Tonanteil liegt zwischen 18,62 % und 36,89 %, mit dem Maximum im Bt-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]							ΣS	ΣU	ΣT	pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T						
H 2-1	18/201	Ap ₁	0,09	0,33	1,05	38,28	28,24	10,08	21,94	1,46	76,60	21,94	7,18	0,75	2,28
H 2-2	18/202	Ap ₂	0,13	0,39	1,27	36,75	27,28	10,10	24,08	1,79	74,13	24,08	7,20	0,77	1,85
H 2-3	18/203	Bt	0,00	0,05	0,77	30,59	23,33	8,37	36,89	0,81	62,30	36,89	7,09	0,63	0,36
H 2-4	18/204	Btv	0,00	0,03	0,59	42,86	24,82	8,98	22,72	0,62	76,67	22,72	7,27	20,42	0,55
H 2-5	18/205	ICkc	0,02	0,01	0,53	42,83	29,92	8,08	18,62	0,56	80,82	18,62	7,28	23,34	0,52

Tabelle 18: Laborwerte Profil H 2.

Die pH-Werte im Profil H 2 liegen zwischen 7,09 (neutral) und 7,28 (sehr schwach alkalisch, s. Tabelle 18). Im Ap₁- und Ap₂-Horizont sind die pH-Werte fast identisch. Den niedrigsten pH-Wert weist der Bt-Horizont auf. In den darunterliegenden Horizonten Btv und ICkc steigen die pH-Werte deutlich an und sind ebenfalls fast identisch.

Parallel zum pH-Wert nimmt auch der Carbonatgehalt bis zum Bt-Horizont zunächst mit der Tiefe ab und ist „carbonatarm“ (s. Tabelle 18). Darunter steigen die Carbonatgehalte im Btv- und ICkc-Horizont deutlich an und werden als „carbonatreich“ eingestuft.

Signifikante Humusgehalte finden sich nur mit 2,28 % nur im Ap₁-Horizont (mittel humos) und mit 1,85 % im Ap₂-Horizont (schwach humos). Die darunterliegenden Horizonte sind „sehr schwach humos“.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
H 2-1	Ap ₁	18/206	1,29	1,48	Ld 2	39,05	20,05	19,3	184,5 hoch
H 2-2	Ap ₂	18/207	1,37	1,56	Ld 3	35,65	17,65	16,25	
H 2-3	Bt	18/208	1,36	1,60	Ld 3	38,1	13,4	9,8	
H 2-4	Btv	18/209	1,23	1,42	Ld 2	34,35	17,35	19,1	
H 2-5	ICkc	18/210	1,46	1,63	Ld 3	33,2	16,2	13	

Tabelle 19: Bodenphysikalische Kennwerte Profil H 2.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohddichte ρ_t nimmt mit der Tiefe zunächst zu, weist im Btv-Horizont aber mit 1,23 g/cm³ den geringsten Wert auf (s. Tabelle 19). Im darunterliegenden ICkc-Horizont ist die TRD ρ_t mit 1,46 g/cm³ am höchsten.

Die effektive Lagerungsdichte Ld nimmt parallel zur TRD ρ_t mit der Tiefe bis zum Bt-Horizont zu (s. Tabelle 19). Der darunterliegende Btv-Horizont weist mit 1,42 g/cm³ (gering) die geringste und der basale ICkc-Horizont mit 1,63 g/cm³ (mittel) die höchste Ld auf.

Die FK nimmt mit der Tiefe leicht ab. Im Ap₁- und Bt-Horizont wird sie als „hoch“, in den übrigen Horizonten als „mittel“ eingestuft. Die „mittlere“ nFK nimmt mit der Tiefe leicht ab, davon abweichend weist der Bt-Horizont mit 13,4 Vol.-% die geringste nFK auf. Die LK schwankt zwischen 19,3 Vol.-% im Ap₁-Horizont (hoch) und 9,8 Vol.-% (mittel) im Bt-Horizont. Die nFKWe ist mit 184,5 l/m² „hoch“.

5.2.4 Profil- und Standortanalyse Herchsheim

Profilanalyse H 1

Beim Profil H 1 handelt es sich um eine ackerbaulich überprägte Parabraunerde mit der Horizontabfolge Ap/Al/Bt/Bvt/ICv. Ap- und Al-Horizont sind hinsichtlich Bodenart und Bodenart fast identisch und konnten im Gelände nur anhand von Unterschieden im Gefüge und in der Lagerungsdichte unterschieden werden. Auffällig sind die schwachen Humusgehalte im Ap- und Al-Horizont, welche einerseits durch die Fruchtfolge und andererseits durch die hohen Temperaturen im Jahr 2018 erklärt werden können. 2018 wurden auf dem Acker Luzerne als Zwischenfrucht am

Ende der Fruchtfolge angebaut. Anhand des Tongehaltsunterschied von 17,71 % zwischen Al- und Bt-Horizont könnte der Al- als Ael-Horizont angesprochen werden, allerdings ist der pH-Wert viel zu hoch und die übrigen diagnostischen Merkmale für eine Ael-Horizont fehlen. Der Bt-Horizont ist mit seiner Korngrößenzusammensetzung mit dem Bt-Horizont von Profil H 2 (H 2-3) sowie vergleichbaren Profilen fast identisch (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2019a; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2021d). Der darunterliegende Bvt-Horizont stellt den Übergang zum basalen ICv-Horizont dar. In fast allen Laborwerten ähnelt der Bvt-Horizont dem Bt-Horizont sehr stark. Anhand des Tiefenverlaufs der Bodenfarbe kann die Tonverlagerung im Bvt-Horizont nachvollzogen werden (s. Abbildung 21). Entlang von Wurzelbahnen ist die Tonverlagerung bereits weiter fortgeschritten als zwischen den Wurzelbahnen, worauf die sehr dunkel gräulichbraune Farbe (10YR 3/2) der Tonflecken ähnlich wie im Bt-Horizont hinweist. Zwischen den Wurzelgängen ist die Bodenfarbe allerdings eine Mischung aus sehr dunkel gräulichbraun (10YR 3/2) und gelblichbraun (10YR 5/8), mit zunehmender Tiefe dominiert aber das gelblichbraun (10YR 5/8) des ICv-Horizont.

Der ICv-Horizont stellt das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung dar. In geringem Maße wurde hier entlang von tiefreichenden Wurzelbahnen bereits punktuell Ton hineinverlagert.

Profilanalyse H 2

Das Profil H 2 ist eine ackerbaulich überprägte Parabraunerde auf Löss mit der Horizontabfolge Ap₁/Ap₂/Bt/Btv/ICk, bei der der ehemalige Al-Horizont überprägt wurde. Beide Ap-Horizonte unterscheiden sich nur sehr geringfügig in Bodenart und Gefüge. Auffällig ist die sehr geringe Mächtigkeit des Ap₁-Horizonts von maximal 9 cm. Sehr wahrscheinlich spiegelt der Ap₁-Horizont lediglich die letzte Bearbeitungstiefe vor der Profilaufnahme in Form von Saatbettbereitung und Einsaat der Zwischenfrucht wider. Als Folge der Bearbeitung ergibt sich auch ein Gefügeunterschied von Krümelgefüge im Ap₁- zu Subpolyederggefüge im Ap₂- Horizont. Der Farbunterschied der Ap-Horizonte kann durch das sehr trockene Bodenmaterial zum Zeitpunkt der Profilaufnahme erklärt werden. Der Bt-Horizont ähnelt in seiner Korngrößenzusammensetzung dem Bt- und Bvt-Horizont von Profil H 1 (H 1-3 und H 1-4) und anderen Profilen in der Umgebung (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2019a; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2021d). Den Übergang vom Bt- zum basalen ICk-Horizont stellt der Btv-Horizont dar. Tonverlagerung vom Bt- in den Btv-Horizont fand bereits statt. Gegenüber dem ICk-Horizont zeigt sich der Tonanteil leicht erhöht. Entlang von Wurzelbahnen wurde Ton zwar auch schon bis in den ICk-Horizont verlagert, im Btv-Horizont findet zusätzlich eine geringe flächige Tonverlagerung statt. Da er aber im Gegensatz zum Übergangshorizont des Profils H 1 (Bvt-Horizont, H 1-4) nicht entkalkt ist, ist die flächige Tonverlagerung noch nicht so weit fortgeschritten (AMELUNG et al., 2018).

Der basale ICkc-Horizont besteht überwiegend aus Löss. Dieser ist deutlich mit Sekundärkarbonat (hier Lösskindel mit ca. 2 cm Durchmesser) angereichert. Entlang von Wurzelbahnen wurde punktuell auch schon Ton in den ICkc-Horizont verlagert.

Standortanalyse Herchsheim

Der Monitoringstandort Herchsheim ist typisch für den Naturraum „Ochsenfurter und Gollachgau“. Dieser ist von gut entwickelten Parabraunerden auf mächtigen Lössen geprägt, die zusammen mit dem flachwelligen Relief diesen zu einem der fruchtbarsten Naturräume Bayerns machen (REH & BLUM, 2011c). Dies zeigt sich auch durch den Fund eines Tschernosems nur 1,3 km östlich des Monitoringstandorts. Mit einer Bodenwertzahl von 96 (von max. 100) handelt es sich um den am besten bewerteten Boden Bayerns (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2021d, 2021e; MEIßNER, 2021).

Die beiden untersuchten Parabraunerden zeugen von einer intensiven Bodenentwicklung im Holozän, gleichzeitig aber auch von einer langen und intensiven anthropogenen Nutzung. Der Ochsenfurter Gau war bereits in der Urnenfelderzeit dicht besiedelt, wovon Bodendenkmäler am Monitoringstandort und in der näheren Umgebung zeugen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE, 2022b, 2022c).

Insgesamt sorgt der hohe Humusgehalt für eine hohe Kationenaustauschkapazität und eine sehr gute Nährstoffverfügbarkeit (s. Tabelle 15 u. Tabelle 18), was den Standort sehr attraktiv für die landwirtschaftliche Nutzung macht. Die Wasserversorgung erfolgt ausschließlich durch Niederschläge, da der Grundwasserflurabstand bedingt durch die Lössauflage und den karstigen Untergrund zu groß ist (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022g). Bis zum Jahr 2100 wird eine zunehmende Trockenheit erwartet, was eine Pseudovergleyung der Parabraunerden bis dahin unwahrscheinlich erscheinen lässt (SCHÖNBEIN et al., 2020). In den Mulden und entlang der Bäche sind auf Grund des geringeren Grundwasserflurabstands vergleyte und pseudovergleyte Kolluvisole zu finden (HAGER, 1978). Die Wasserspeicherfähigkeit der Böden insgesamt ist „mittel“, schwankt allerdings zwischen den einzelnen Horizonten (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022g). Die Parabraunerden können langanhaltende Niederschläge gut aufnehmen und lange speichern (s. Kapitel 6.1.2). Bei Starkniederschlägen sind sie allerdings verschlammungs- (Ver2) und stark erosionsgefährdet (Eb5). Insbesondere bei einer ungeschützten Bodenoberfläche, wie sie bei Zuckerrüben und Mais typisch sind, sind Verschlämmung und Erosion sehr intensiv (s. Abbildung 25). Gleichzeitig ist auch die Gefahr für Winderosion sehr hoch (s. Abbildung 26). Zur Senkung der Winderosionsgefahr können Hecken und Baumreihen quer zur Hauptwindrichtung beitragen.

Verdichtungsgefährdet durch Befahren sind die Parabraunerden nur in sehr feuchtem Zustand (AD-HOC-AG BODEN, 2005: Tab. 90; BEISECKER et al., 2020).



Abbildung 25: Erosion und Verschlammung nach Starkregen im Ochsenfurter Gau bei Allersheim. In der unteren Bildhälfte sind die oberflächlichen Abflussbahnen deutlich zu erkennen. Die Niederschläge sammelten sich oberhalb der Straße in einem Tümpel (helle, runde Struktur).
Quelle: eigene Aufnahme am 03.07.2021.



Abbildung 26: Winderosion im Ochsenfurter Gau südlich Wolkshausen bei Westwind. Die Staubfahne breitete sich über mehrere Kilometer nach Osten aus. Als Ursprung der Staubfahne konnte deutlich ein brachliegender Acker ausgemacht werden. Von den umliegenden begrünten Äckern gingen keine Staubfahnen aus. Der Boden war hier vor Winderosion geschützt.
Quelle: eigene Aufnahme am 19.05.2013.

5.3. Obbach

5.3.1. Standortüberblick

5.3.1.1. Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort Obbach liegt an der östlichen Grenze des Naturraums 135 „Wern-Lauer-Platte“. Am östlichen Ortsrand von Obbach beginnt der Naturraum 136 „Schweinfurter Becken“. Beide sind Teil der Naturraum-Haupteinheit D56 „Mainfränkische Platten“. Der Naturraum 135 wird nochmals untergliedert und der Monitoringstandort ist Teil der Untereinheit 135.5 „Eschenbacher Hochflächen“. Diese erstreckt sich über die Muschelkalk-Schichtstufe südlich des Tals der Fränkischen Saale, die in Höhen von 340 m bis 386 m NHN reicht (SCHWENZER, 1968). Die Eschenbacher Hochfläche zeichnet sich durch stärkere Reliefunterschiede und eine Hügellandschaft aus. Die Gäufläche des Schweinfurter Beckens hingegen ist eine durch Bäche gegliederte flachwellige Landschaft (HEGENBERGER, 1969a). Kulturlandschaftlich wird er dem Raum „Mainfränkische Gäulandschaften“ zugeordnet (REH & BLUM, 2011b). Die Bäche im Naturraum entwässern nach Süden zur Wern (BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG, 2023b).

Der Monitoringstandort befindet sich ca. 320 m westlich von Obbach auf der Flur „Sauberg“ (s. Abbildung 27). Der Sauberg reicht bis auf 342 m NHN. Nach Westen geht der Sauberg in einen Sattel auf ca. 337 m NHN über, bevor das Gelände wieder auf 350 m NHN ansteigt. Die Höhenzüge sind von Laubwald bedeckt. Nach Norden fällt das Gelände zur Staatsstraße SW 9 (Greßthaler Straße) ab, nördlich der Straße steigt das Gelände zum Rainberg an. Nach Nordosten und Osten fällt das Gelände zur Ortschaft Obbach wieder ab. Zwischen der im Süden liegenden Heimbachhöhe und dem Sauberg entspringt auf ca. 329 m NHN der Heimbachgraben. Über den Heimbachgraben wird die südliche Hälfte des Sauberg entwässert. Der Heimbachgraben mündet ca. 920 m östlich von Obbach in den Obbacher Mühlbach, welcher wiederum über Euerbach und Biegenbach in die Wern mündet (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2016).

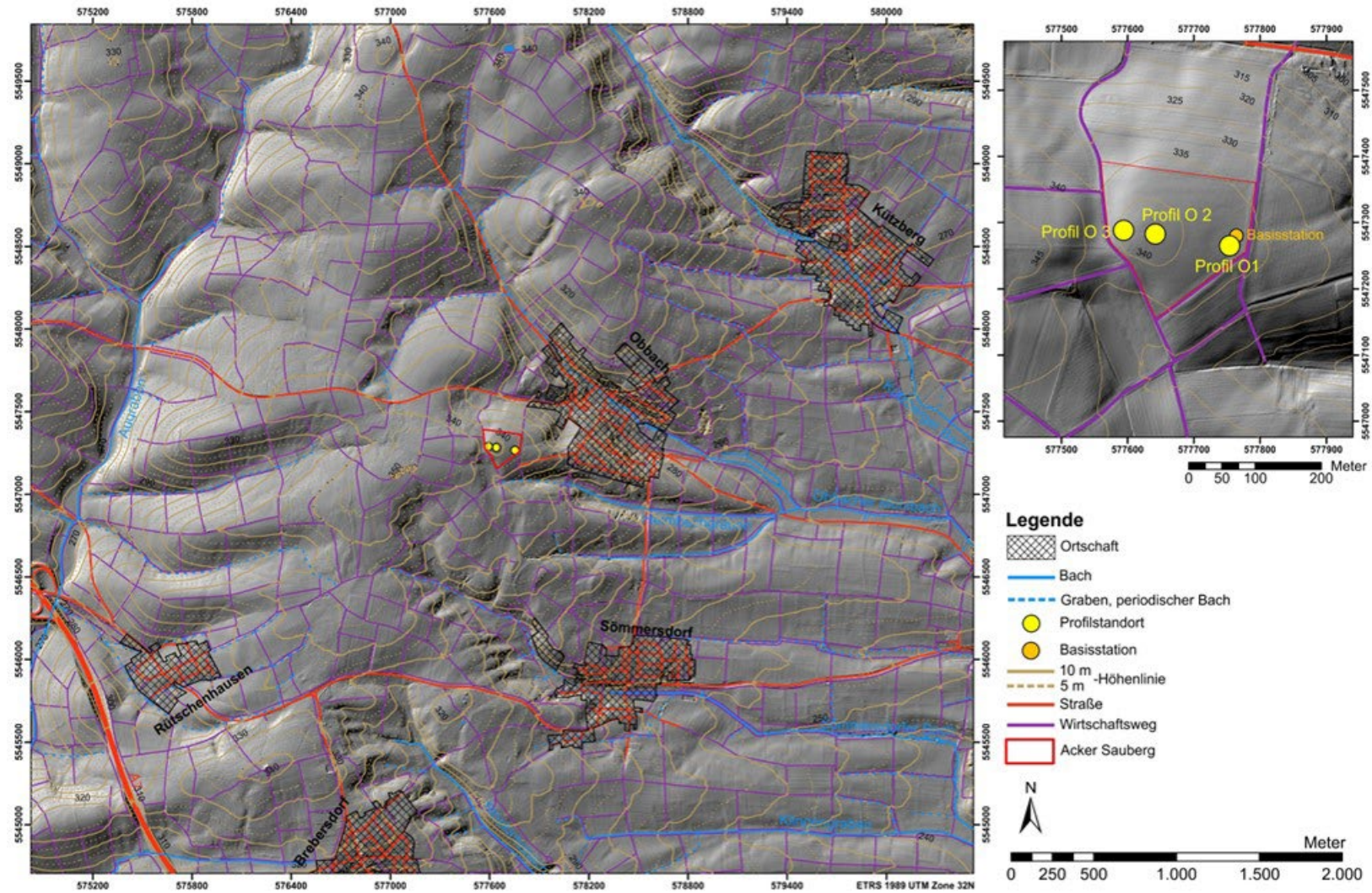


Abbildung 27: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Obbach.
 Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

5.3.1.2. Geologie

Das Untersuchungsgebiet Obbach befindet sich geologisch im Übergangsbereich von Oberem Muschelkalk (mo) und Unterem Keuper (ku; s. Abbildung 28)). Die geologische Situation wird durch den SW-NNO verlaufenden Rütschenhauser Sattel mit dem Nebensattel Wartturmbergsattel geprägt. Dieser wird im W von der Burghauser Mulde begleitet und im SO erstreckt sich die Schweinfurter Mulde. Der Rütschenhauser Sattel stellt das Nordende des Thüingersheimer Sattels dar und läuft mit den anderen Strukturen im Norden im herzynisch streichenden Kissingen-Haßfurter-Sattel aus. Der Rütschenhauser Sattel stellt landschaftlich einen Höhenzug dar, dessen Hänge sich nach SO zum Schweinfurter Becken absenken. Im Norden geht der Höhenzug in das Muschelkalkgebiet der Eschenbacher Hochfläche über. Etwa 2 km NE Obbach verläuft eine über ca. 2,5 km lange und 100 m bis 125 m breite Grabenzone Richtung NNE. In der Grabenzone sind die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1, Erfurt-Formation) zu finden (HEGENBERGER, 1969a).

Westlich von Obbach steht entlang des von NNO nach SSW verlaufenden Teueregrabens der Obere Muschelkalk 1+2 (Trochitenkalk- und Meißner-Formation, mo1+2) und der Obere Muschelkalk 3 (mo3, Meißner-Formation) an. Auf den Höhenzügen des Rütschenhauser Sattels zwischen Teueregrabens und Obbach folgen auf den Oberen Muschelkalk 3 (mo3) die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1, Erfurt-Formation). Diese sind wiederum durch quartären Löss überdeckt, der bis zum Sattel westlich des Saubergs reicht. Der Gipfel des Saubergs und große Teile des Ackerstandorts werden durch den Oberen Muschelkalk 3 (mo3) gebildet (HEGENBERGER, 2022). Der Obere Muschelkalk 3 reicht bis zum nördlich gelegenen Rainberg und im Nordosten des Sauberg bis in den Ortsbereich von Obbach. An der Ostflanke des Saubergs, etwa ab der Verflachung im Bereich des Profils O 1, stehen die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) an. Im Bereich der östlich gelegenen Siedlung folgt auf die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten der Werksandstein-Bereich (kuW, Erfurt-Formation), welcher schließlich wieder von Löss überdeckt wird. Entlang der Staatsstraße St 2290 Obbach-Reichthals Hof bildet der Obere Muschelkalk 1+2 (mo1+2) den Hangfuß des Saubergs und Rainbergs. Den Talboden des Obbacher Mühlbachs bildet eine holozäne polygenetische Talfüllung.

Auf der alten Geologischen Karte 1:25.000 von 1969 wird der Gipfel des Saubergs im Bereich des Profils O 2 durch den Oberen Muschelkalk 1+2 gebildet. Im Liegenden ist hier die Grenzglaukonitbank (g) kartiert (HEGENBERGER, 1969b). In der aktuellen digitalen Geologischen Karte 1:25.000 wird dieser Bereich, wie oben beschrieben, dem Oberen Muschelkalk 3 zugeordnet (HEGENBERGER, 2022).

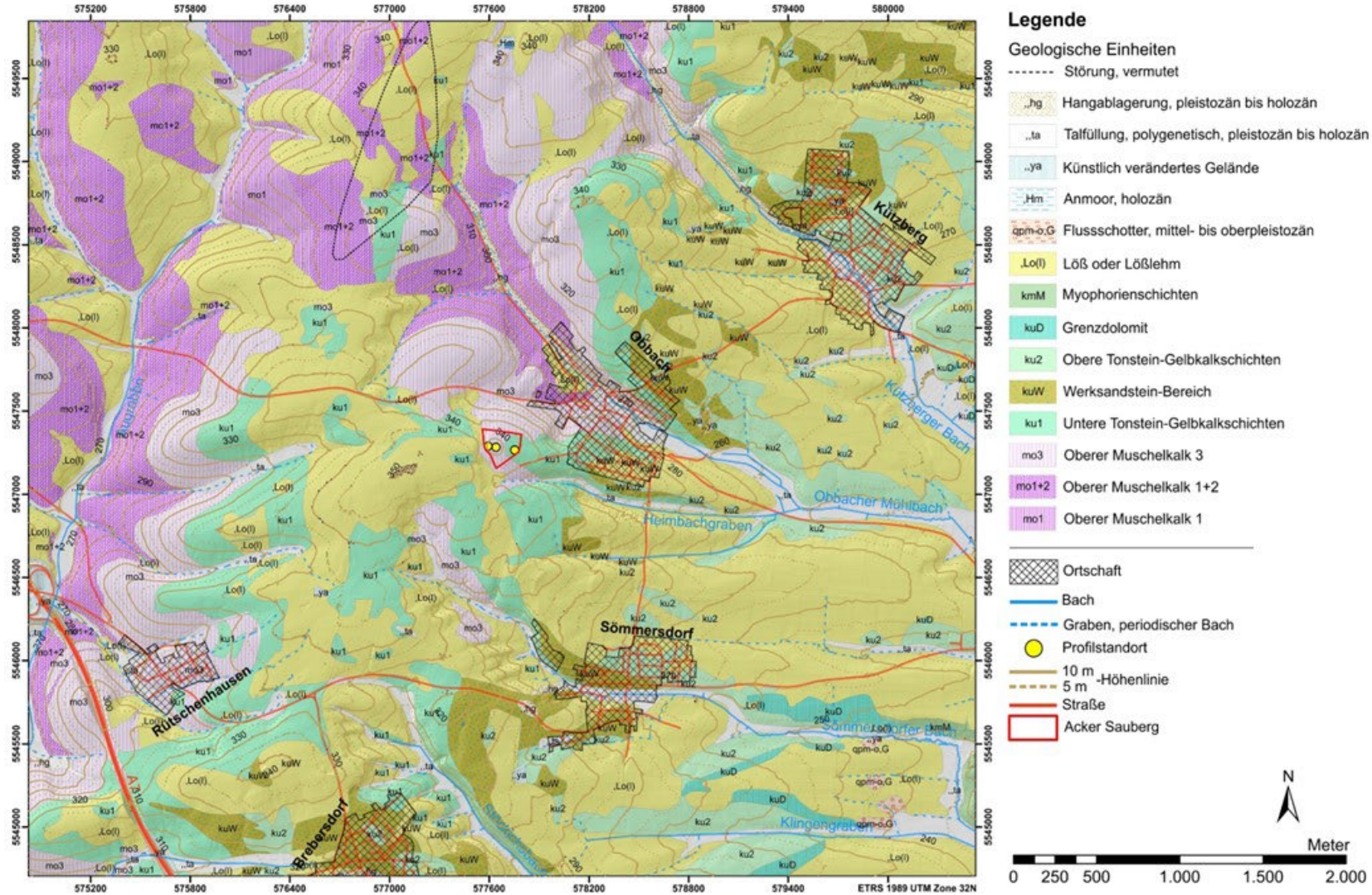


Abbildung 28: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Obbach.

Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).

5.3.1.3. Klima

Bis zum Jahr 2010 liegen Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes für das ca. 2 km südlich von Obbach gelegene Sömmersdorf vor (Stations-ID: 1322). Die fehlenden Daten wurden für die Klimareferenzperiode 1991 bis 2020 durch Rasterdaten ergänzt (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d). Die nächstgelegene Wetterstation befindet sich ca. 10 km südlich von Obbach in Ettleben (Agrarmeteorologie Bayern Nr. 31).

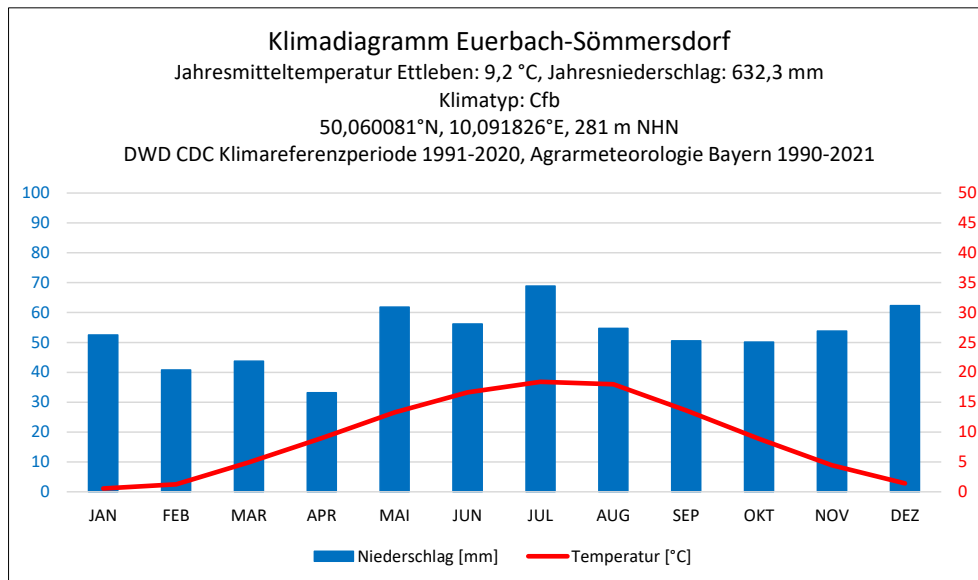


Abbildung 29: Klimadiagramm Euerbach-Sömmersdorf 1991-2020.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022c); DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d), eigene Darstellung.

Für den Klimareferenzzeitraum 1991 bis 2020 liegen nur Niederschlagsdaten für Sömmersdorf vor. Im Klimadiagramm Euerbach-Sömmersdorf (s. Abbildung 29) wurden zusätzlich die Temperaturdaten von Ettleben für den Zeitraum 1990 bis 2021 verwendet, welche auf Grund der geringen Distanz übertragbar sind.

Die Wetterstation Ettleben wies im Zeitraum 1990 bis 2021 eine Jahresmitteltemperatur von 9,2 °C auf. Die kältesten Monate waren Dezember bis Februar, mit dem Temperaturminimum von 0,58 °C im Januar. Die höchsten Temperaturen wurden in den Monaten Juni bis August, mit dem Temperaturmaximum von 18,42 °C im Juli, gemessen.

Das Klima in Sömmersdorf ist ganzjährig humid. Im Zeitraum 1990 bis 2020 lag der Jahresniederschlag bei 632,3 mm. Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis Juli, mit dem Maximum von 68,9 mm im Juli. Ab August gehen die Niederschläge zurück und steigen ab November zu einem zweiten Maximum im Dezember an (62,3 mm). Die Monate Februar bis April sind die trockenste Phase, mit einem Niederschlagsminimum von 33,2 mm im April. Die Niederschläge im

Februar liegen über denen im April. Der März hingegen weist eine kleine Niederschlagspitze im Frühjahr auf.

Gegenüber dem Referenzzeitraum 1981 bis 2010 hat der Jahresniederschlag in Sömmersdorf von 668 mm um 35,7 mm abgenommen. Die stärksten Niederschlagsrückgänge von etwa 8 mm sind in März und April sowie im September (- 7,5 mm) zu verzeichnen. Eine Zunahme der Niederschläge war nur im Mai (+ 4,8 mm) und Juli (+ 3,9 mm) zu beobachten (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022c).

Der Klimatyp von Sömmersdorf ist ein Cfb-Klimat (PEEL et al., 2007).

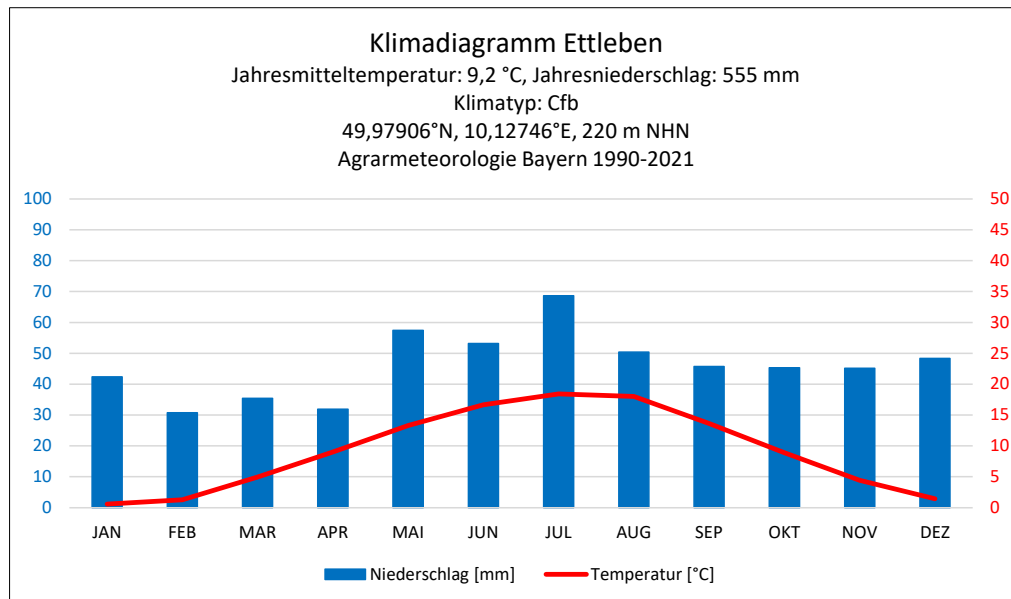


Abbildung 30: Klimadiagramm Ettleben 1990-2021.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022c), eigene Darstellung.

Das Klima in Ettleben ist ebenfalls ganzjährig humid (s. Abbildung 30). Im Beobachtungszeitraum 1990 bis 2021 ist der Jahresniederschlag mit 555 mm allerdings deutlich geringer als in Sömmersdorf, was auf die südlichere Lage im Naturraum 134 „Gäufächen im Maindreieck“ zurückzuführen ist (MENSCHING & WAGNER, 1963). Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis Juli, mit dem Niederschlagsmaximum im Juli. Im August gehen die Niederschläge deutlich zurück und sind von September bis November konstant. Im Dezember steigen die Niederschläge geringfügig an. Die trockensten Monate sind Februar bis April, mit einem Niederschlagsminimum im Februar. Auch in Ettleben ist der März etwas feuchter.

5.3.2. Bodengeographische Analysen Obbach

5.3.2.1. Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 1

Geländedaten

Das Profil O 1 ist ein pseudovergleyter Ranker aus Tonstein und befindet sich auf einer Verflachung des Saubergs auf einer Höhe von 337 m NHN (s. Abbildung 27). Die Profilwand nach ist Westen ausgerichtet und ist 40 cm hoch. Nach längeren Regenfällen bilden sich im flachen Teil des Ackers große Stauwasserbereiche (s. Abbildung 37).

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale
O 1-1 O 1-2	Sw-Ap	24 - 28	w, sc, h	2,5Y 4/2	Tu3 - Lt2	sub (pol)	Rostflecken f2-f3, Ziegel
O 1-3	Cv-Sd	37 - 41	-	5Y 6/2 Gley1 4/5GY	Tu3	pol (sub)	Rostflecken f6 (7,5YR 5/8)

Tabelle 20: *Geländedaten Profil O 1.*

Pseudovergleyter Ranker aus Tonstein. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das untersuchte Bodenprofil O 1 konnte in zwei Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 31 u. Tabelle 20). Der Sw-Ap-Horizont bildet die rezente Bodenoberfläche und war zum Zeitpunkt der Profilaufnahme mit Winterweizen und Luzernen bewachsen. Er besteht aus einem dunkel gräulichbraunen mittel schluffigen Ton bis schwach tonigen Lehm mit einem Subpolyedergefüge, stellenweise auch einem Polyedergefüge. Der Sw-Ap-Horizont weist einen geringen bis mittleren Flächenanteil Rostflecken auf. Die scharf erkennbare Horizontuntergrenze ist wellig und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 24 cm bis 28 cm. Der basale Cv-Sd-Horizont ist ein mittel schluffiger Ton mit einer inhomogenen Färbung aus leicht olivgrauen und dunkel grünlichgrauen Flecken. Der gesamte Horizont ist von plattigem Tonstein durchzogen, der mit der Tiefe zunimmt. Der plattige Tonstein liegt in einer Wechsellagerung von festem Tonstein und weichem Ton vor und besteht ebenfalls aus mittel schluffigen Ton. Der Cv-Sd-Horizont weist kräftig braune Rostflecken in unterschiedlichen Größen auf einem äußerst hohen Flächenanteil auf. Der basale Abschluss des Profils O 1 verläuft in einer Tiefe von 37 cm bis 41 cm im anstehenden Tonstein.

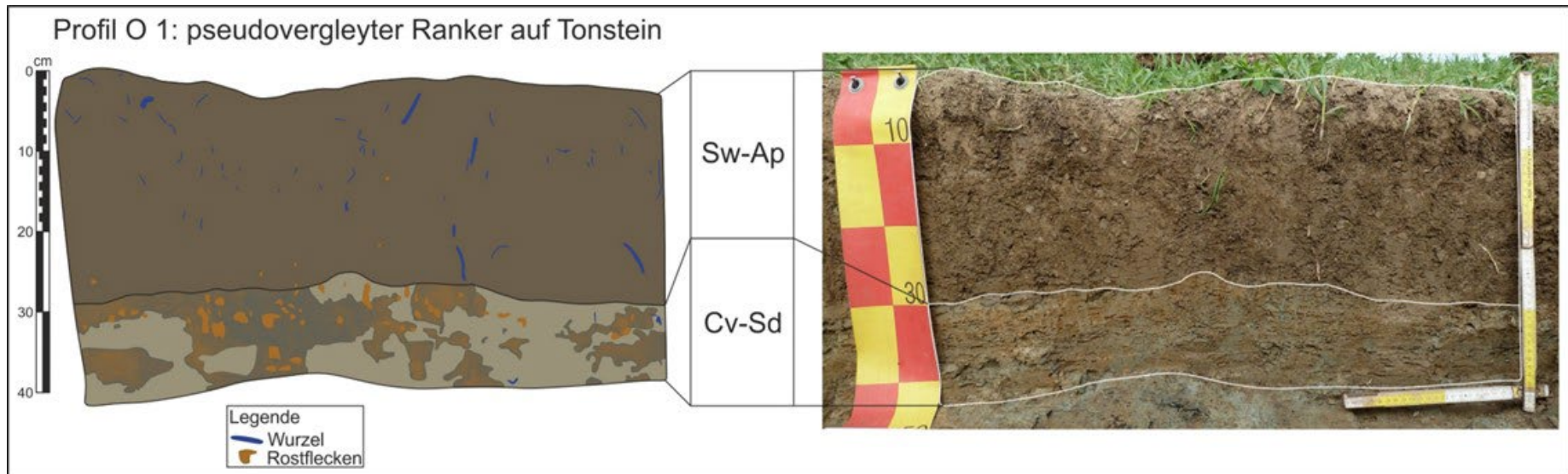


Abbildung 31: Profilzeichnung Profil O 1.
Pseudovergleyter Ranker auf Tonstein in ebener Lage.
Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

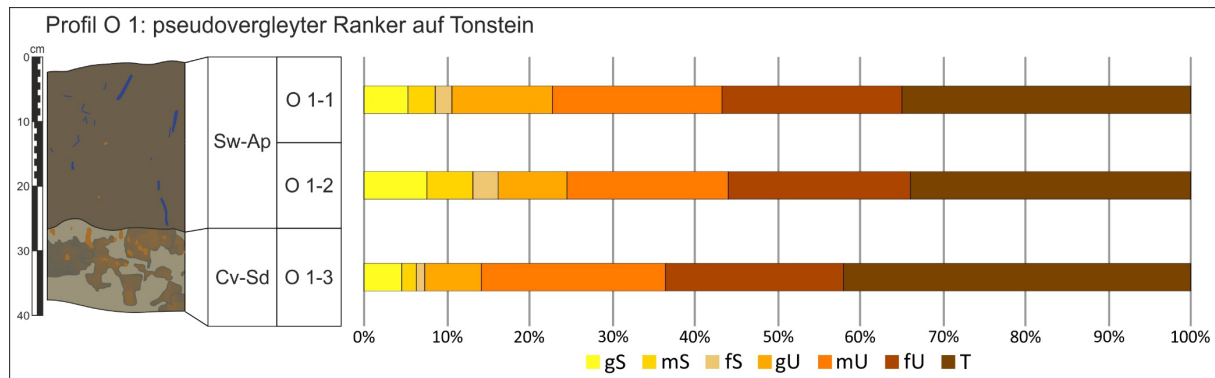


Abbildung 32: Korngrößendiagramm Profil O 1.

Aus dem Sw-Ap-Horizont wurden zwei Proben entnommen. Probe O 1-1 wurde aus einer Tiefe von 0 cm bis 12 cm und Probe O 1-2 aus 15 cm bis 25 cm Tiefe entnommen.

Quelle: eigene Darstellung.

Der Sandanteil im Profil O 1 liegt zwischen 16,38 % und 7,45 %, mit dem Maximum im Sw-Ap-Horizont (O 1-2; s. Abbildung 32 u. Tabelle 21). Die Sandfraktion besteht im Sw-Ap-Horizont vor allem aus Grob- und Mittelsand. Der Schluffanteil liegt im Sw-Ap-Horizont zwischen 54,54 % und 49,9 %, während er im Cv-Sd-Horizont 50,71 % ausmacht. Die Fraktionen Mittel- und Feinschluff machen jeweils etwa 20 % aus. Der Tonanteil liegt zwischen 33,72 % und 41,84 %, mit dem Maximum im Cv-Sd-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
O 1-1	19/18	Sw-Ap	5,45	3,19	2,05	12,19	20,51	21,84	34,77	10,69	54,54	34,77	6,09	0,54	3,53	1,73 · 10 ⁻⁵
O 1-2	19/19		7,67	5,63	3,07	8,39	19,42	22,09	33,72	16,38	49,90	33,72	5,30	0,44	2,52	2,72 · 10 ⁻⁶
O 1-3	19/20	Cv-Sd	4,69	1,66	1,11	6,93	22,21	21,56	41,84	7,45	50,71	41,84	4,47	0,38	0,17	-

Tabelle 21: Laborwerte Profil O 1.

Die pH-Werte im Profil O 1 nehmen mit der Tiefe von „schwach sauer“ zu „stark sauer“ ab (s. Tabelle 21). Parallel zum pH-Wert nimmt auch der Carboantgehalt mit der Tiefe ab und liegt zwischen 0,54 % und 0,38 %. Signifikante Humusgehalte treten nur im Sw-Ap-Horizont (mittel humos) auf. Der kf-Wert nimmt im Profil O 1 mit der Tiefe ab. Im Sw-Ap-Horizont liegt die hydraulische Leitfähigkeit zwischen „sehr hoch“ und „mittel“. Der Cv-Sd-Horizont ist nicht durchlässig.

Horizont- nummer	Horizont	Labor- nummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
O 1-1	Sw-Ap	21/122	1,23	1,25	1,47	Ld 2	43	16,75	14	42,5 sehr gering
		21/123	1,26							
O 1-2		21/124	1,47	1,44	1,66	Ld 3	34,6	13,6	15,8	
		21/125	1,42							
O 1-3	Cv-Sd	-	1,50		1,76	Ld 5	36	12	7	

Tabelle 22: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 1.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Aus dem Cv-Sd-Horizont konnten keine Stechzylinder entnommen werden. Die Ld wurde aus RENGGER et al. (2009) abgeleitet und damit die TRD berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Mit der Tiefe nimmt die Trockenrohdichte und somit auch die effektive Lagerungsdichte von „gering“ auf „mittel“ zu. Im Cv-Sd-Horizont ist die TRD mit 1,50 g/cm³ (mittel) am höchsten (s. Tabelle 22).

Die FK im Sw-Ap-Horizont ist als „hoch“ zu bewerten, nimmt aber mit der Tiefe ab. Die nFK ist mit 16,75 Vol.-% nahe der Geländeoberfläche noch „mittel“, in der Tiefe mit 12 Vol.-% als „gering“ einzustufen. Der Sw-Ap-Horizont weist insgesamt eine „mittlere“ LK auf, der Cv-Sd-Horizont mit 7 Vol.-% auch. Die nFKWe von 42,5 l/m² ist „sehr gering“.

5.3.2.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 2

Geländedaten

Die Braunerde des Profil O 2 ist das mittlere und höchstgelegene der drei Profile (s. Abbildung 27). Es befindet sich auf der Kuppe des Saubergs in einer Höhe von 341 m NHN. Die Profilwand ist nach Norden ausgerichtet und weist an der linken Seite eine Tiefe von 96 cm, an der rechten Seite von 91 cm auf.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale
O 2-1	Ap	26 - 30	w, sc, h	10YR 3/3	Tu2	pol (sub)	-
O 2-2	Bv-Tv	44 - 52	w, di, h	10YR 5/6 10YR 3/1 (Streifen)	Tu2	pol (sub)	feine dunkle Streifen, f4 Schluff
O 2-3	BvCv ₁	54 - 67	w(z), de, h/g	10YR 5/6 oder 4/6 10YR 6/8 (Löss)	Tu3	pol (tonig), sub (Löss)	f5-f6 Schluff
O 2-4	BvCv ₂	78 - 82	e(w), sc, g	10YR 4/4 2,5Y 5/2	Tu3	pol (tonig), sub (Löss)	dunkle Streifen, f5 Schluff
O 2-5	IICn ₁	82 - 87	-	-	-	-	Steinlage
O 2-6	IICn ₂	86 - 88	e(w), sc, g	2,5Y 4/3 10YR 3/1 (Streifen)	Tu3	pol + pla	inhomogene Farbe, streifig, Tonbeläge
O 2-7	IICn ₃	89 - 90	e(w), sc, g	5YR 3/4	-	-	Steinlage
O 2-8	IICn ₄	91 - 96	-	2,5Y 4/3 10YR 3/1 (Streifen)	Tu3	pol	inhomogene Farbe, streifig
O 2-9	IICn ₅	-	-	-	-	-	Steinlage, nicht grabbar

Tabelle 23: Geländedaten Profil O 2.

Braunerde mit Rest einer Braunerde-Terra fusca auf Muschelkalk. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil O 2 konnte in neun Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 33 u. Tabelle 23). Der Ap-Horizont bildet die rezente Oberfläche und besteht aus einem dunkel braunen schwach schluffigen Ton. Als Grobgefüge weist er ein Polyedergefüge auf, als Feingefüge ein Subpolyedergefüge. Im Ap-Horizont finden sich wenige Kalksteine bis zu einer Größe von 5 cm. Einen geringen Flächenanteil nehmen außerdem bräunlichgelbe Schluffflecken von bis zu 5 cm Durchmesser ein. Die scharf erkennbare Horizontuntergrenze verläuft wellig in horizontaler Lage in einer Tiefe von 26 cm bis 30 cm. Der darunterliegende Bv-Tv-Horizont besteht aus einem schwach schluffigen Ton. Er hat eine gelblich braune Grundmasse mit sehr dunkelgrauen Streifen. Die unregelmäßig verteilten Schluffflecken nehmen einen mittleren bis punktuell hohen Flächenanteil ein. Im Gegensatz zum Ap-Horizont sind im Bv-Tv-Horizont nur einzelne Kalksteine zu finden. Das Grobgefüge wird als Polyedergefüge bezeichnet, das Feingefüge als Subpolyedergefüge. Die wellige Horizontuntergrenze ist diffus erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 44 cm bis 52 cm. Der BvCv₁-Horizont unterscheidet sich durch seinen mittel schluffigen Ton und die gelblichbraune bis dunkel

gelblichbraune Bodenfarbe. Der mittel schluffige Ton besitzt ein Polyedergefüge. Der Schluff nimmt im BvCv₁-Horizont einen sehr hohen Flächenanteil ein und besitzt ein Subpolyedergefüge. Außerdem findet sich hier, neben einigen kleineren Kalksteinen, ein plattiger Kalkstein mit ca. 15 cm mal 20 cm. Die Untergrenze des BvCv₁-Horizonts verläuft wellig bis taschenförmig in horizontaler bis leicht geneigter Lage in einer Tiefe von 54 cm bis 67 cm und ist deutlich erkennbar. Der BvCv₂-Horizont weist einen dunkel gelblichbraunen mittel schluffigen Ton mit einem Polyedergefüge auf. Wie im Bv-Tv-Horizont finden sich auch hier dunkle Streifen in der Grundmasse. Schluffeinlagerungen von mehreren Zentimetern Durchmesser finden sich vor allem entlang der unteren Horizontgrenze. Der Schluff besitzt ein Subpolyedergefüge. Neben den Schluffeinlagerungen finden sich im BvCv₂-Horizont auch fünf sehr markante, gräulichbraune Flecken von bis zu 10 cm Durchmesser. Diese finden sich vor allem in der oberen Horizonthälfte oberhalb der Schluffeinlagerungen. Kleinere Kalksteine nehmen im BvCv₂-Horizont nur einen geringen Flächenanteil ein. Die untere Horizontgrenze verläuft eben bis leicht wellig in einer Tiefe von 78 cm bis 82 cm, ist scharf erkennbar und in geneigter Lage. Unter dem BvCv₂-Horizont folgt mit dem IICn₁-Horizont eine Steinlage aus Kalkstein, welche mehrere vertikale Risse aufweist. Der IICn₁-Horizont reicht bis in eine Tiefe von 82 cm bis 87 cm und hat eine ebene bis leicht wellige, geneigte, scharf erkennbare Untergrenze. Der IICn₂-Horizont weist einen mittel schluffigen Ton mit einem polyedrischen und plattigen Gefüge auf. Die olivbraune Grundfarbe des IICn₂-Horizonts wird von sehr dunkelgrauen Streifen durchzogen. Die geneigte Untergrenze ist eben bis leicht wellig und in einer Tiefe von 86 cm bis 88 cm scharf erkennbar. Darunter folgt mit dem IICn₃-Horizont eine weitere Steinlage mit einer dunkel rötlich braunen Farbe. Diese reicht bis in eine Tiefe von 89 cm bis 90 cm und wird durch eine ebene bis leicht wellige, scharf erkennbare Untergrenze in geneigter Lage geprägt. Den basalen Abschluss des Profils bildet der Horizont IICn₄, der einem mittel schluffigen Ton mit einem Polyedergefüge entspricht. Der IICn₄ zeigt, wie der IICn₂-Horizont, eine oliv-braune Bodenfarbe mit sehr dunklen grauen Streifen und reicht bis in eine Tiefe von 91 cm bis 96 cm. Darunter beginnt wieder eine Steinlage, welche nicht grabbar ist und als IICn₅-Horizont angesprochen wurde (s. Abbildung 33, Profildfoto unten). Bis in den BvCv₂-Horizont finden sich im Profil zahlreiche Grobwurzeln, einzelne Grobwurzeln finden sich auch in den Rissen des IICn₁-Horizonts, während der darunter liegende Profilschnitt keine Wurzeln enthält. Feinwurzeln waren nur bis zum BvCv₂-Horizont zu beobachten.

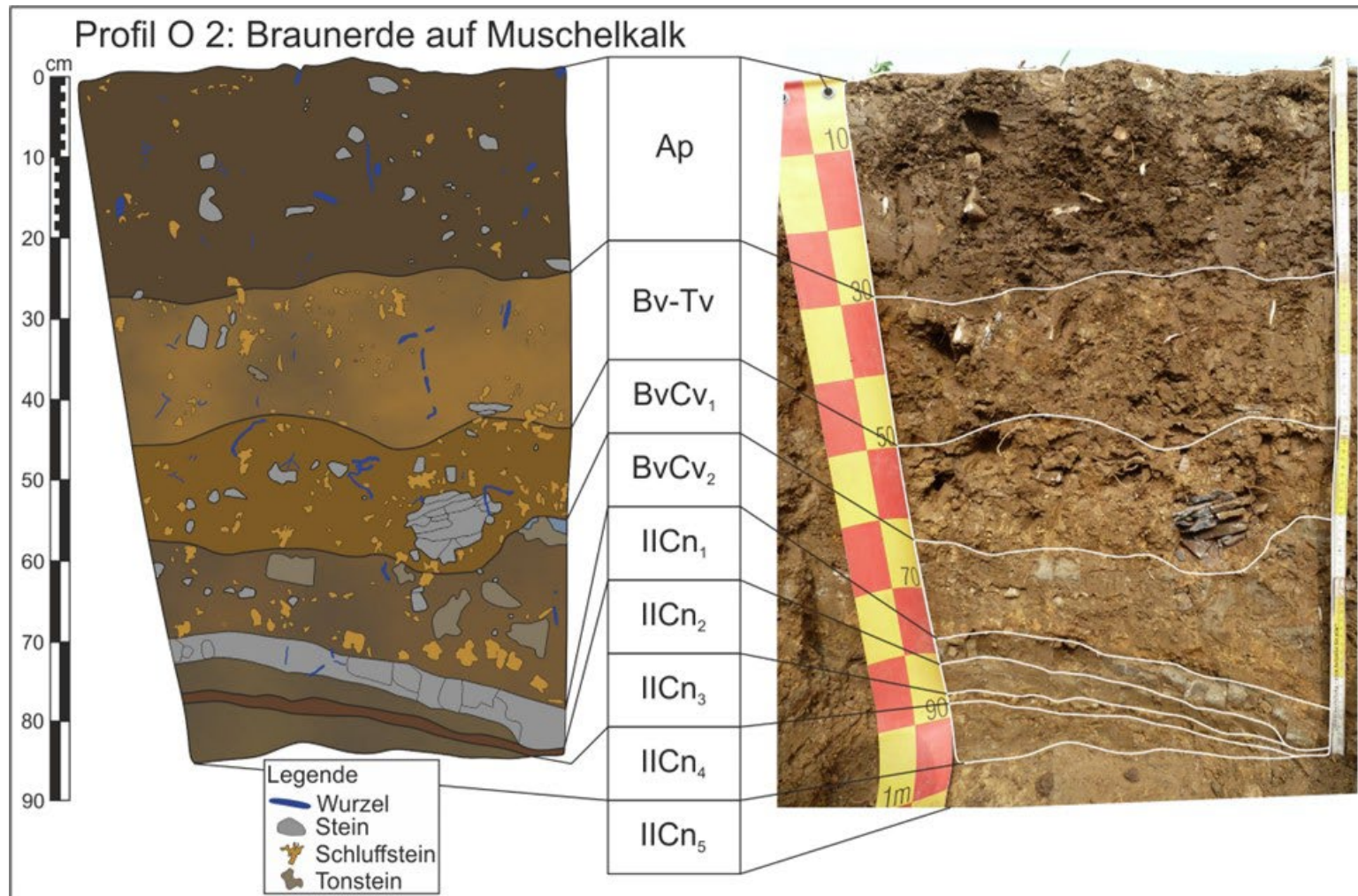


Abbildung 33: Profilzeichnung Profil O 2.

Braunerde mit Terra-fusca-Rest auf Muschelkalk. Das Profil O 2 befindet sich auf dem Gipfel des Saubergs. Von der Kalksteinbank des IICn₅-Horizonts ist nur die Oberfläche aufgeschlossen, da sie nicht mehr grabbar war.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

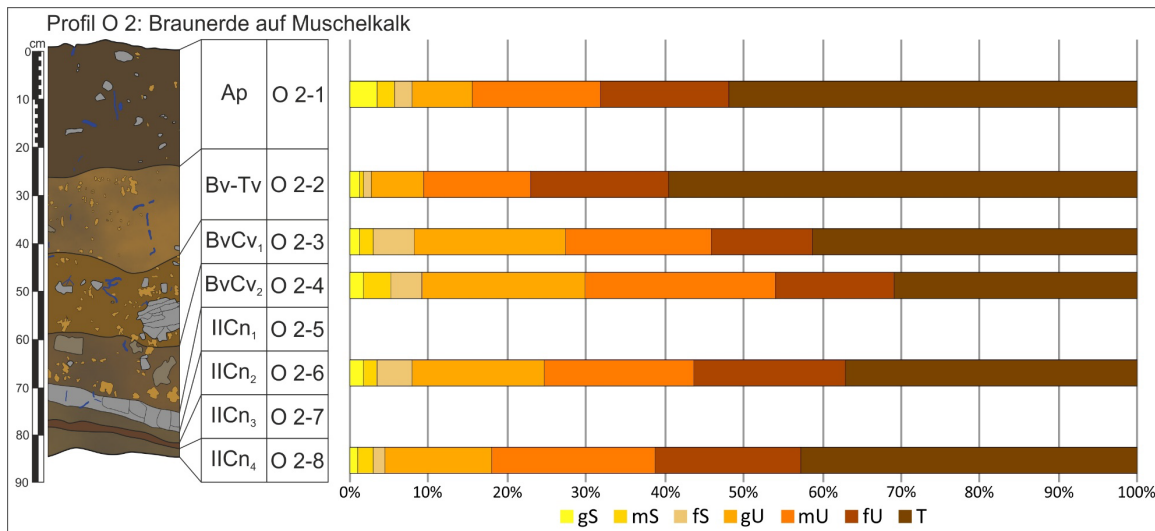


Abbildung 34: Korngrößendiagramm Profil O 2.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil O 2 liegen zwischen 2,58 % im Bv-Tv-Horizont und 9,12 % im BvCv₂-Horizont. Abgesehen von der Ausnahme des Bv-Tv-Horizonts nimmt der Sandanteil mit der Tiefe zu (s. Abbildung 34 u. Tabelle 24). Parallel dazu nehmen die Schluffanteile mit der Tiefe zu und liegen zwischen 37,75 % (Bv-Tv-Horizont) und 59,98 % (BvCv₂-Horizont). Im Ap- und Bv-Tv-Horizont dominieren Mittel- und Feinschluff. Dagegen dominieren im BvCv₁- und BvCv₂-Horizont Grob- und Mittelschluff. Der Tonanteil im Profil O 2 liegt zwischen 59,67 % und 30,90 %, mit dem Maximum im Bv-Tv-Horizont, und nimmt mit der Tiefe ab. Die anstehenden Horizonte IICn₂ und IICn₄ ähneln in ihrer Korngrößenzusammensetzung dem BvCv₁- und BvCv₂-Horizont.

Horizont-nummer	Labor-nummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humus-gehalt [%]	k _r -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
O 2-1	19/31	Ap	3,47	2,06	2,39	7,50	16,41	16,31	51,87	7,92	40,22	51,87	7,09	10,51	2,44	5,54 · 10 ⁻⁶
O 2-2	19/32	Bv-Tv	1,24	0,40	0,94	6,75	13,58	17,42	59,67	2,58	37,75	59,67	7,05	11,80	0,80	0,00
O 2-3	19/33	BvCv ₁	1,19	1,68	5,16	19,43	18,40	12,94	41,21	8,03	50,76	41,21	7,24	39,56	0,00	2,995 · 10 ⁻⁶
O 2-4	19/34	BvCv ₂	1,66	3,42	4,04	20,68	24,35	14,95	30,90	9,12	59,98	30,90	7,23	38,38	0,17	2,25 · 10 ⁻⁸
O 2-5	-	IICn ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O 2-6	19/36	IICn ₂	1,73	1,72	4,30	16,75	19,06	19,33	37,11	7,76	55,14	37,11	7,13	22,04	0,00	-
O 2-7	-	IICn ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O 2-8	19/38	IICn ₄	0,96	1,89	1,55	13,51	20,77	18,68	42,64	4,40	52,96	42,64	7,13	18,30	0,00	-

Tabelle 24: Laborwerte Profil O 2.

Grau hinterlegte Felder wurden nicht bestimmt.

Die pH-Werte im Profil O 2 liegen zwischen 7,05 (neutral) und 7,24 (sehr schwach alkalisch) und nehmen mit der Tiefe leicht zu (s. Tabelle 24). Die anstehenden Horizonte IICn₂ und IICn₄ sind mit 7,13 neutral. Parallel zum pH-Wert nimmt auch der Carbonatgehalt mit der Tiefe zu. Er liegt zwischen

10,51 % im Ap-Horizont und 39,56 % im BvCv₁-Horizont. Ein signifikanter Humusgehalt tritt mit 2,44 % (mittel humos) nur im Ap-Horizont auf.

Der kf-Wert wurde nur für die oberen vier Horizonte bestimmt. Die hydraulische Leitfähigkeit nimmt mit der Tiefe von „hoch“ auf „sehr gering“ ab. Die aus dem Bv-Tv-Horizont entnommenen Stechzylinder lieferten keine validen Messwerte.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
O 2-1	Ap	21/164	1,34	1,34	1,64	Ld 3	44,2	14,2	10,2	93,6 mittel
		21/165	1,34							
O 2-2	Bv-Tv	21/166	1,48	1,50	1,84	Ld 4	39	9	4	
		21/167	1,54							
		21/168	1,49							
O 2-3	BvCv ₁	21/169	1,61	1,64	1,89	Ld 4	33,9	10,6	4,2	
		21/170	1,65							
		21/171	1,65							
O 2-4	BvCv ₂	-	1,68		1,89 (O 2-3)	Ld 4	33,3	10,2	3,4	
O 2-5	II Cn ₁	-	Steinlage			n.b.	n.b.	n.b.		
O 2-6	II Cn ₂	-	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.		
O 2-7	II Cn ₃	-	Steinlage			n.b.	n.b.	n.b.		
O 2-8	II Cn ₄	-	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.		

Tabelle 25: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 2.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach Renger et al. (2009) und Renger et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Nur für die oberen drei Horizonte konnte die TRD mit Stechzylindern gemessen werden. Für den BvCv₂-Horizont wurde die TRD auf Basis der Ld des BvCv₁-Horizonts berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t nimmt mit der Tiefe deutlich zu und liegt zwischen 1,34 g/cm³ (gering) im Ap- und 1,68 g/cm³ (hoch) im BvCv₂-Horizont (s. Tabelle 25). Parallel zur TRD nimmt auch die effektive Lagerungsdichte mit der Tiefe zu. Die Ld liegt zwischen 1,64 g/cm³ (mittel) im Ap- und 1,89 g/cm³ (hoch) im BvCv₁- und BvCv₂-Horizont. Die FK liegt zwischen 44,2 Vol.-% (hoch) im Ap- und 33,3 Vol.-% (mittel) im BvCv₂-Horizont. Die nFK liegt zwischen 14,2 Vol.-% (mittel) im Ap- und 9 Vol.-% (gering) im Bv-Tv-Horizont, liegt in den beiden BvCv-Horizonten aber nur geringfügig über dem Bv-Tv-Horizont. Die LK nimmt ebenfalls mit der Tiefe von „mittel“ auf „gering“ ab. Die nFKWe ist mit 93,6 l/m² an der unteren Grenze des mittleren Bereichs.

5.3.2.3 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil O 3

Geländedaten

Die Braunerde des Profil O 3 befindet sich auf 339 m NHN an einem nach Westen geneigten Hang, welcher in einen Sattel auf ca. 337 m NHN übergeht (s. Abbildung 27). Vom Sattel steigt das Gelände nach Westen auf 350 m NHN an. Die Profilwand ist nach Osten ausgerichtet und misst an der linken Seite eine Tiefe von 110 cm und an der rechten Seite von 93 cm.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale
O 3-1	Ap	21 - 27	w(z), de, h	10YR 4/3	Tu2	sub (pol)	-
O 3-2	Bv-Tv ₁	48	z, di, g	10YR 5/4 7,5YR 4/6	Tu2	sub/pol	Rost, inhomogene Farbe, verschmiert, streifig
O 3-3	Bv-Tv ₂	57	z, de/di, g/h	7,5YR 3/3 10YR 4/4	Tu2	pol	-
O 3-4	BvCv ₁	77	z/w, di, g	10YR 4/3 10YR 5/8 (Löss)	Tu2	pol/sub	f3-f4 Schluff
O 3-6	BvCv ₂	93	z, di, g	10YR 4/3 10YR 5/8 (Löss)	Tu2	pol	f2 Schluff, Tonhäutchen, Mn-Konkretionen
O 3-5	BvCv ₃	116	-	10YR 4/3	Tu2	pol	Steinlage in toniger Matrix

Tabelle 26: Geländedaten Profil O 3.

Braunerde mit Rest einer Braunerde-Terra fusca auf Muschelkalk in Erosionslage. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil O 3 konnte in sechs Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 35 u. Tabelle 26). Der Ap-Horizont bildet die rezente . Der Ap-Horizont besteht aus einem braunen schwach schluffigen Ton, welcher ein subpolyedrisches, stellenweise auch ein polyedrisches Gefüge aufweist. Die wellige Horizontuntergrenze verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 21 cm bis 27 cm und ist deutlich erkennbar. Der darunterliegende Bv-Tv₁-Horizont besteht aus einem schwach schluffigen Ton mit einem überwiegend subpolyedrisch, stellenweise auch polyedrischen Gefüge. Die Bodenfarbe des Bv-Tv₁-Horizonts ist inhomogen und zeigt eine gelblichbraune Grundmasse mit kräftig braunen Streifen, welche teilweise verschmiert sind. Außerdem finden sich hier Rostflecken und der Horizont weist sehr wenige Steine auf. Die Untergrenze des Bv-Tv₁-Horizont ist taschenförmig und diffus erkennbar. Sie verläuft geneigt von 28 cm auf der linken bis hinunter auf 48 cm an der rechten Profilstelle. Der Bv-Tv₂-Horizont besteht aus einem dunkel gelblichbraunen schwach schluffigen Ton, der ein Polyedergefüge besitzt. Im Horizont finden sich dunkel gelblichbraune Flecken sowie eine geringe Anzahl von Gesteinsfragmenten. Die taschenförmige Untergrenze des Bv-Tv₂-Horizonts ist deutlich bis diffus erkennbar und verläuft abschnittsweise in horizontaler und geneigter Lage in einer Tiefe von 57 cm bis 46 cm. Auf der rechten Profilstelle folgt auf den Bv-Tv₂-Horizont der BvCv₁-Horizont. Dieser besteht aus einem braunen schwach schluffigen Ton, welcher ein polyedrisches,

stellenweise auch subpolyedrisches, Gefüge besitzt. Der BvCv₁-Horizont weist einen hohen Flächenanteil von Schluffflecken auf, welche eine gelblichbraune Bodenfarbe aufweisen. Kalksteine finden sich hier nur vereinzelt. Die taschenförmige Horizontuntergrenze ist diffus erkennbar und verläuft in geneigter Lage von 57 cm bis 77 cm. Auf der rechten Seite liegt der Horizont BvCv₂-Horizont unterhalb des BvCv₁-Horizonts. Der BvCv₂-Horizont besteht ebenfalls aus einem braunen schwach schluffigen Ton, der ein polyedrisches Gefüge zeigt. Die Schluffflecken nehmen im hier nur einen geringen Flächenanteil ein. Im BvCv₂-Horizont konnten Tonhäutchen und Mn-Konkretionen beobachtet werden. Die diffus erkennbare Horizontuntergrenze ist taschenförmig und verläuft in geneigter Lage in einer Tiefe von 93 cm. Auf der linken Profilseite folgt unterhalb des Bv-Tv₂-Horizonts der BvCv₃-Horizont. Dieser unterlagert in der Profilmitte den BvCv₁-Horizont und an der rechten Profilseite auch den BvCv₂-Horizont. Beim BvCv₃-Horizont handelt es sich um eine Steinlage in toniger Bodenmatrix. Der Flächenanteil der Kalksteine ist äußerst hoch, auf Grund derer aus dem BvCv₃-Horizont keine Bodenprobe entnommen werden konnte. Die Fingerprobe im Gelände ergab als Bodenart ebenfalls einen schwach schluffigen Ton mit brauner Bodenfarbe und einem polyedrischen Gefüge. Die Kalksteine sind im BvCv₃-Horizont nicht eingeregelt und liegen in unterschiedlichen Größen von wenigen Zentimetern bis zu 20 cm vor.

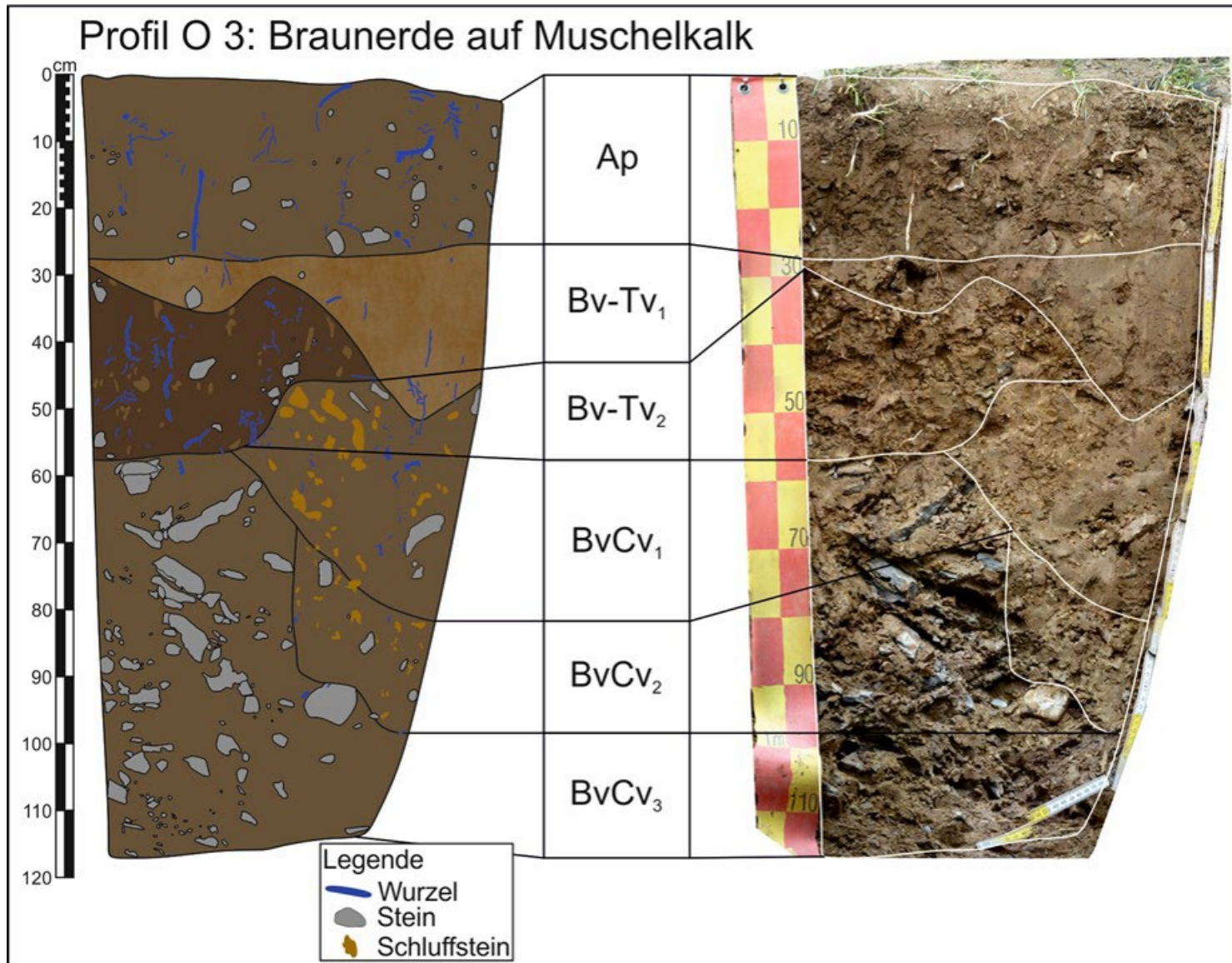


Abbildung 35:
 Profilzeichnung Profil O 3.
 Braunerde mit Terra
 fusca-Rest auf
 Muschelkalk.
 Quelle: eigene
 Darstellung.

Labordaten

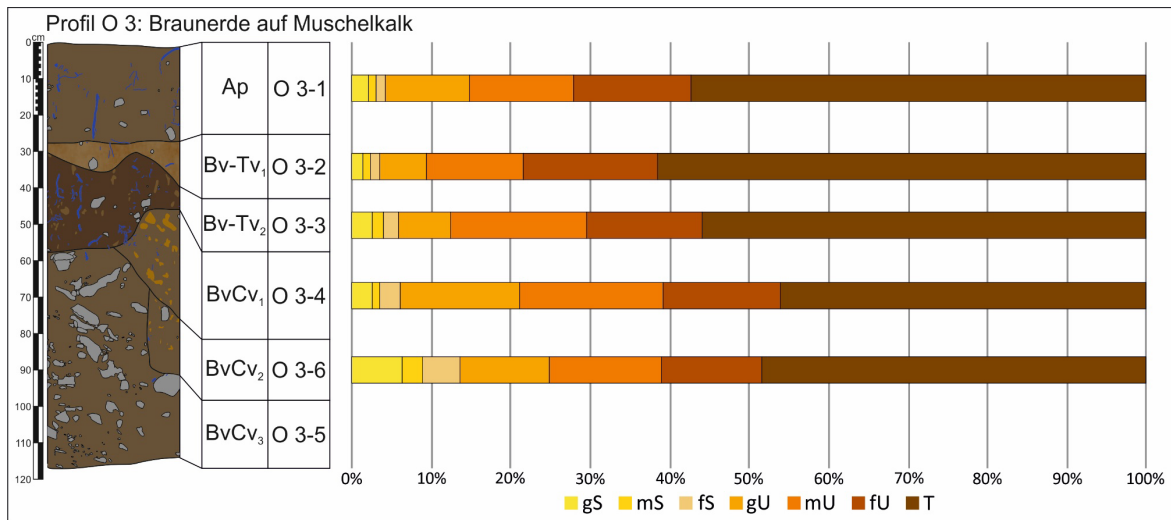


Abbildung 36: Korngrößendiagramm Profil O 3.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil O 3 nehmen mit der Tiefe zu und liegen zwischen 3,48 % und 13,58 %, mit dem Maximum im BvCv₂-Horizont (s. Abbildung 36 u. Tabelle 27). Die Grobsandfraktion hat jeweils den größten Anteil, überwiegt die Mittel- und Feinsandfraktion allerdings nur im BvCv₂-Horizont deutlich. Der Schluffanteil liegt bei ca. 38 % und weicht nur mit 35,16 % im Bv-Tv₁-Horizont und 48,01 % im Cv₁-Horizont davon ab. Die Tonfraktion nimmt mit der Tiefe tendenziell ab und liegt zwischen 45,91 % im BvCv₁-Horizont und 61,36 % im Bv₁-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
O 3-1	19/51	Ap	2,28	0,79	1,27	10,45	13,17	14,70	57,33	4,34	38,32	57,33	7,06	16,65	1,00	9,76 · 10 ⁻⁶
O 3-2	19/52	Bv-Tv ₁	1,48	0,92	1,08	6,06	12,16	16,94	61,36	3,48	35,16	61,36	7,04	7,31	0,41	1,73 · 10 ⁻⁷
O 3-3	19/53	Bv-Tv ₂	2,66	1,40	1,82	6,54	17,17	14,58	55,82	5,88	38,30	55,82	7,17	21,75	0,00	3,21 · 10 ⁻⁸
O 3-4	19/54	BvCv ₁	2,56	1,02	2,50	15,07	18,18	14,77	45,91	6,08	48,01	45,91	7,18	30,55	0,00	-
O 3-6	19/55	BvCv ₂	6,31	2,73	4,55	11,42	13,98	12,76	48,26	13,58	38,15	48,26	7,16	32,85	0,00	-
O 3-5	-	BvCv ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 27: Laborwerte Profil O 3.

Die pH-Werte im Profil O 3 sind „neutral“, liegen zwischen 7,04 und 7,18 und nehmen mit der Tiefe geringfügig zu (s. Tabelle 27). Die Carbonatgehalte nehmen mit der Tiefe deutlich von 16,65 % im Ap-Horizont auf 32,85 % im BvCv₂-Horizont zu. Davon abweichend weist der Bv-Tv₁-Horizont mit 7,31 % den geringsten Carbonatgehalt auf. Die Horizonte Ap und Bv-Tv₁ sind schwach humos, die darunterliegenden Horizonte sind humusfrei.

Die k_f-Werte konnte auf Grund des hohen Grobbodenanteils nur für die oberen drei Horizonte bestimmt werden. Die hydraulische Leitfähigkeit des Ap-Horizonts ist „hoch“, nimmt in den darunterliegenden Horizonten jedoch auf „gering“ bzw. „sehr gering“ ab.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
O 3-1	Ap	21/160	1,16	1,28	1,60	Ld 3	44,3	14,2	10,4	119,8 mittel
		21/161	1,40							
O 3-2	Bv-Tv ₁	21/162	1,50	1,50	1,84	Ld 4	39	9	4	
		21/163	1,50							
O 3-3	Bv-Tv ₂	-	1,52		1,84 (O 3-2)	Ld 4	38,6	8,7	3,8	
O 3-4	BvCv ₁	-	1,56		1,84 (O 3-2)	Ld 4	37,8	8,1	3,4	
O 3-6	BvCv ₂	-	1,56		1,84 (O 3-2)	Ld 4	37,8	8,1	3,4	
O 3-5	BvCv ₃	-	n.b.		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

Tabelle 28: Bodenphysikalische Kennwerte Profil O 3.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die TRD konnte nur für die beiden oberen Horizonte mit Stechzylindern gemessen werden. Für die darunterliegenden Horizonte wurde die TRD auf Basis der Ld berechnet. Für den BvCv₃-Horizont konnte die TRD auf Grund der fehlenden Korngrößenverteilung nicht berechnet werden. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t nimmt mit der Tiefe von „gering“ auf „mittel“ zu (s. Tabelle 28). Die effektive Lagerungsdichte ist im Ap-Horizont mit 1,60 g/cm³ „mittel“, alle darunterliegenden Horizonte haben eine „hohe“ Ld. FK, nFK und LK nehmen mit der Tiefe deutlich ab. Die FK liegt zwischen 44,3 Vol.-% (hoch) im Ap- und 37,8 Vol.-% (mittel) im BvCv₁- und BvCv₂-Horizont. Die nFK im Ap-Horizont ist „mittel“, in den darunterliegenden Horizonten „gering“. Die LK liegt zwischen 10,4 Vol.-% (mittel) im Ap-Horizont und 3,4 Vol.-% (sehr gering) im BvCv₁- und BvCv₂-Horizont. Die nFKWe ist mit 119,8 l/m² „mittel“.

5.3.3. Profil- und Standortanalyse Obbach

Profilanalyse O 1

Das Profil O 1 wurde als pseudovergleyter Ranker auf Tonsiltstein mit der Horizontabfolge Sw-Ap/Cv-Sd eingestuft. Der Sw-Ap-Horizont spiegelt die maximale Bearbeitungstiefe von 28 cm wider. Der Cv-Sd-Horizont besteht aus dem anstehenden Tonstein der Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1). Auf Grund der Staunässe, welche durch den Tonstein verursacht wird, ist der östliche Teil des Ackers durch den Wasserstau ein schlechterer Standort (mündl. Mitteilung Bernhard Schreyer, April 2019). Diese Probleme treten besonders im Frühjahr oder nach intensiven und/oder langandauernden Niederschlägen auf und der Bereich ist dann häufig nicht befahrbar (s. Abbildung 37). Bei langanhaltender Trockenheit hingegen bilden sich hier schnell Trockenrisse.



Abbildung 37: Stauwasser im Bereich des Profils O 1.

Das Profil O 1 befindet sich in der Bildmitte, Blickrichtung ist Westen zum höchsten Punkt des Saubergs. Nach einer langen Niederschlagsphase zwischen Dezember 2019 und Januar 2020 war der Bereich um das Profil O 1 vollständig wassergesättigt. Der grün eingefasste Streifen mit Bewuchs entspricht einer Arbeitsbreite und wurde für den Betrieb der Messstation brach gelassen.

Quelle: eigene Aufnahme am 16.01.2020.

Die leicht unterschiedlichen Bodenarten (Tu3 und Lt2) mit erhöhtem Sandanteil in der tieferen der beiden Bodenproben des Sw-Ap (O 1-1 und O 1-2) kann durch Peloturbation oder durch die Bearbeitung erklärt werden. Über Trockenrisse gelangte Sand in die Tiefe und wurde bei darauffolgenden Quell- und Schrumpfpprozessen in das Bodenmaterial eingearbeitet. Zum anderen kann der Sand auch durch die Bodenbearbeitung in die Tiefe eingebracht worden sein.

Der anstehende Tonstein im Cv-Sd-Horizont ist durch zahlreiche horizontale und vertikale Risse durchzogen, entlang derer das eindringende Wasser den Tonstein in eine weiche, kohärente Masse aufweicht (STAHR et al., 2020). Mit zunehmender Tiefe nimmt der Fortschritt der Aufweichung ab. Der plattige Tonstein überwiegt, allerdings ist der unverwitterte und trockene Tonstein im Profil O 1 noch nicht aufgeschlossen.

Die großen gleyfarbenen Flecken im Cv-Sd-Horizont zeugen von einem langanhaltenden Luftmangel infolge von Staunässe. Nur die obere Hälfte des Horizonts trocknet regelmäßig aus, da sich die Rostflecken überwiegend auf diesen Teil beschränken.

Das Profil O 1 ist ein extrem stark verkürztes Profil, bei dem der ursprüngliche Boden erodiert wurde. Möglicherweise war der Tonstein am Profilstandort O 1 ursprünglich durch Löss überdeckt, wie dies auch westlich des Sattels der Fall ist (vgl. Abbildung 28). Erst mit der Erosion des Lösses setzte die Verwitterung des Tonsteins und folglich die rezente Bodenbildung ein (STAHR et al., 2020). Die Bodenerosion ist ausschlaggebend für die schlechten Bodeneigenschaften des Profils O 1.

Profilanalyse O 2

Das Profil O 2 entspricht einer Braunerde mit der Horizontabfolge Ap/Bv-Tv/BvCv₁/BvCv₂/IICn₁/IICn₂/IICn₃/IICn₄/IICn₅. Der Ap-Horizont spiegelt die maximale Bearbeitungstiefe wider. Sowohl der Ap- als auch der Bv-Tv-Horizont stechen durch ihren hohen Tongehalt von 51,87 % bzw. 59,67 % hervor. Der Bv-Tv-Horizont als Übergangshorizont ist der Erosionsrest einer Terra fusca. Ein vollentwickelter holozäner Boden (hier eine Terra fusca) wäre vollständig entkalkt (AMELUNG et al., 2018; STAHR et al., 2020). Auf Grund des anstehenden Oberen Muschelkalk 3 (mo3) und der zahlreichen, mit der Tiefe zunehmenden Kalksteinbruchstücken können die hohen Tongehalte auf die Kalksteinverwitterung zurückgeführt werden. Sehr markant im Profil O 2 sind die bräunlichgelben Flecken aus Schluff, deren Flächenanteil und Größe mit der Tiefe zunimmt. Obwohl die Farbe und der Schluff der Flecken an Löss erinnert, kann auf Grund der punktuellen Verteilung im Profil und deren Maximum in den Horizonten BvCv₁ und BvCv₂, deren äolischer Ursprung ausgeschlossen werden. Es handelt sich hierbei um schluffige Residuen der Kalksteinverwitterung (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE ROHSTOFFE UND BERGBAU, 2022).

BvCv₁- und BvCv₂-Horizont bilden den Übergang zum anstehenden Oberen Muschelkalk 3. Beide Horizonte sind erkennbar verbraunt und weisen einen hohen Anteil an großen Kalksteinbruchstücken und den schluffigen Verwitterungsresiduen auf. Die dunklere Bodenfarbe des BvCv₂-Horizonts könnte auf die verwitterten Tonsteine im Horizont zurückgeführt werden, die farblich den anstehenden Tonsteinhorizonten (IICn₂, IICn₄) ähneln. Vermutlich hat sich der BvCv₁-Horizont aus einer Kalksteinbank und der BvCv₂-Horizont aus einer Tonsteinbank entwickelt.

Obwohl die Braunerde insgesamt durch eine hohe Lagerungsdichte und einen hohen Tongehalt gekennzeichnet ist, lässt das ausgeprägte Polyedergefüge eine gute Durchwurzelung zu. Grobwurzeln finden sich sogar noch in den Klüften des IICn₁-Horizonts. Das Fehlen von redoximorphen Merkmalen spricht trotz der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Stechzylinderproben aus BvCv₁- und BvCv₂-Horizont für eine insgesamt gute Drainierung und Belüftung des Profils O 2 entlang von präferentiellen Fließwegen.

Profilanalyse O 3

Die erodierte Braunerde im Profil O 3 umfasst die Horizontabfolge Ap/Bv-Tv₁/Bv-Tv₂/BvCv₁/BvCv₂/BvCv₃. Insgesamt zeichnet sich das Profil durch einen sehr hohen Kalksteinanteil aus, was sich bereits durch das massive Auftreten von Lesesteinen an der Bodenoberfläche ankündigt. Der Ap-Horizont stellt die rezente maximale Bearbeitungstiefe dar. Alle darunter folgenden Horizonte verlaufen nicht horizontal. Die beiden Bv-Tv-Horizonte stellen als Erosionsrest die unteren Horizonte einer ehemaligen Braunerde-Terra fusca dar. Die ursprüngliche Braunerde-Terra fusca wurde erodiert, was durch die anthropogene Nutzung nochmals verstärkt worden sein kann. Die drei basalen BvCv-Horizonte wurden durch Solifluktuations- und Erosionsprozesse infolge der Hangposition beeinflusst.

Die sehr hohen Tongehalte und die deutlich fortgeschrittene Entkalkung der oberen drei Horizonte unterstreichen, dass es sich hierbei um Terra fusca-Material handelt. Die hohen Tongehalte sind auf den Kalklösungsrückstand zurückzuführen. Der Bv-Tv₁-Horizont weist als tonreichster Horizont den niedrigsten Carbonatgehalt auf. Ferner weisen diese Horizonte auch einen deutlich geringeren Grobbodenanteil (Kalksteine) auf als die drei basalen BvCv-Horizonte.

Die Horizonte BvCv₁ und BvCv₂ weisen im Vergleich zum BvCv₃-Horizont weniger Kalksteine, dafür aber gelblichbraune verwitterte Schluffsteine auf, wie sie auch im Profil O 2 zu finden sind (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE ROHSTOFFE UND BERGBAU, 2022). Wie bereits angesprochen, sind insbesondere die basalen BvCv-Horizonte vermutlich auf Grund der Mittelhangposition stärker durch Solifluktion

durchmischt. So ist auch die Position von BvCv₁- und BvCv₂-Horizont neben dem BvCv₃-Horizont zur erklären.

Die Braunerde zeigt hohe Tongehalte und, damit verbunden, eine hohe Lagerungsdichte. Das ausgeprägte Polyedergefüge erlaubt jedoch eine gute Durchwurzelbarkeit. Bis in den BvCv₁-Horizont waren zahlreiche Grobwurzeln vorhanden. Trotz der geringen bzw. sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit der Stechzylinderproben aus Bv-Tv₁- und Bv-Tv₂-Horizont waren keine redoximorphen Merkmale im Profil O 3 zu finden. Dieser Widerspruch kann durch die zahlreichen präferentiellen Fließwege entlang von Gefügegrenzen, Kalksteinen und tiefreichenden Wurzelbahnen erklärt werden.

Das Profil O 3 ist, vermutlich auch auf Grund der anthropogenen Nutzung, stark erodiert und gestört. Der Ap-Horizont ist wegen der Erosionslage an Humus verarmt. Insgesamt sind die Standortverhältnisse am Profil O 3 nicht gut.

Standortanalyse Obbach

Der Monitoring-Standort erfordert auf Grund des geologischen Wechsels auf dem Sauberg eine differenzierte Betrachtung. Die Profile O 2 und O 3 stellen charakteristische Bodenprofile für einen Standort auf Muschelkalk und somit auch für den Naturraum der Eschenbacher Hochflächen dar. Das durch Erosion stark verkürzte Profil O 1 auf dem Unteren Keuper ist für diesen Naturraum nicht typisch. Zwar liegen in der übergeordneten Naturraumeinheit der Wern-Lauer-Platte viele Standorte im Übergangsbereich zwischen Oberem Muschelkalk und Unterem Keuper und befinden sich somit auch auf den Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten, allerdings muss bei Profil O 1 berücksichtigt werden, dass die Lössauflage mutmaßlich erodiert wurde. Es ist somit nur für einzelne erosions- und stauwasserbeeinflusste Standorte repräsentativ. Insgesamt gibt es im Bereich der Mainfränkischen Platten viele Ackerstandorte welche einen geologischen Wechsel und folglich unterschiedliche Bodentypen und Standortbedingungen aufweisen. Die wechselnden Böden bedingen durch unterschiedliche Wasserspeicherkapazitäten und Durchlässigkeiten unterschiedliche Wachstumsbedingungen für die Pflanzen, was sich im Falle des Saubergs sehr deutlich im Luftbild abzeichnet (LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023). Hier sind nicht nur die Wachstumsbedingungen betroffen, sondern auch die Bearbeitungseigenschaften. Während der Bereich um die Profile O 2 und O 3 nach Niederschlägen befahrbar ist, erlaubt der vernässte Bereich um Profil O 1 keine sofortige Befahrung (vgl. Abbildung 37).

Der Ackerstandort Sauberg ist nach Auskunft von Herrn Schreyer einer der schlechtesten Ackerstandorte um Obbach (mündl. Mitteilung Bernhard Schreyer, April 2019). Unterstützt wird

diese Aussage auch durch die schlechte Bodenschätzung des Ackers. Um das Profil O 1 liegt die Bodenzahl zwischen 24 und 31 (von 100), um die Profile O 2 und O 3 zwischen 34 und 42 (HAGER, 1979). Ursächlich für die niedrigen Bodenzahlen sind einerseits die oben beschriebene Bearbeitbarkeit und andererseits die Bodentypen selbst. Besonders östlich der Ortschaft Obbach, aber auch auf den Höhenzügen direkt westlich des Saubergs, haben sich in der Lössüberdeckung wesentlich fruchtbarere und besser zu bearbeitende Braunerden und Parabraunerden entwickelt. Die ungünstigen Standorteigenschaften der Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) am Sauberg zeigen sich auch darin, dass ein großer Teil der Ostflanke des Saubergs nicht mehr als Acker, sondern als Wiese (Bodenzahl 22 bis 29) genutzt wird (HAGER, 1979).

5.4 Uniwald Sailershausen

5.4.1 Standortüberblick

5.4.1.1 Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort Uniwald liegt im südöstlichen Teil des Naturraums 139 „Hesselbacher Waldland“, welcher Teil der Naturraum-Haupteinheit D56 „Mainfränkische Platten“ ist (s. Abbildung 38). Das „Hesselbacher Waldland“ kann nochmals in einen nördlichen und südlichen Teil untergliedert werden (SCHWENZER, 1968; SPÄTH, 1987). Die umgebenden Mainfränkischen Platten überragt das Hesselbacher Waldland um 50 m (im Westen) bis 100 m (Grabfeld im Norden) mit Durchschnittshöhen um 370 m NN. Die Anhöhen werden im südlichen Teil durch tief eingeschnittene Täler untergliedert (SPÄTH, 1987). Der größte Reliefunterschied innerhalb des Hesselbacher Waldlandes findet sich im südlichen Wässernachtal mit bis zu 100 m (BÜTTNER, 1989b). Auf Grund des kühleren und niederschlagsreicheren Klimas und der höheren Lage gegenüber den Mainfränkischen Platten sowie der räumlichen Nähe zu Schweinfurt wird das Hesselbacher Waldland im Volksmund auch „Schweinfurter Rhön“ genannt (BÜTTNER, 1989b; STEGER-FRÜHWACHT, 1988).

Der Monitoringstandort befindet im Universitätswald Sailershausen ca. 1,5 km nordwestlich der Ortschaft Sailershausen im Trockental des Saugrabens, einem linken Seitental der Wässernach. Das in Ost-West-Richtung verlaufende Tal des Saugrabens ist ein Klingental, welches auf etwa 1 km Länge ca. 65 Höhenmeter überwindet. Der höchste Punkt im Einzugsgebiet des Saugrabens liegt auf 397 m NHN im Bereich der Kohlplatte südlich des Saugrabens. Die Quelle des Saugrabens liegt auf einer Höhe von 363 m NHN. Das Einzugsgebiet oberhalb der Quelle ist flach geneigt, allerdings weist die Rodungsinsel direkt oberhalb der Quelle bereits eine deutliche Muldenstruktur auf. Auf dieser Rodungsinsel befindet sich das Bodendenkmal der mittelalterlichen Wüstung „Eginolfshausen“ (Aktenummer D-6-5928-0099, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE, 2022a). Von der Quelle verläuft der Saugraben etwa 140 m in einem deutlich erkennbaren Bachbett bis zu einer Lichtung laut topographischer Karte perennierend (LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023). Am westlichen Rand der Lichtung quert ein Forstwirtschaftsweg das Tal auf 353 m NHN. Bereits östlich des Forstwirtschaftsweges beginnt der nur episodisch wasserführende Saugraben sich auf ca. 720 m Länge mit einer schmalen Rinne von ca. 3 m bis 4 m Tiefe stark in den Talboden einzuschneiden.

Vom Talschluss bis zur Querung des Forstwirtschaftsweges ist das Tal muldenförmig. Westlich der Querung wird die für Unterfranken typische Klingentform des Saugrabens erkennbar (MÜLLER, 1996). Die nördlichen und südlichen Hänge sind zunächst noch wenig geneigt, jedoch nimmt die Hangneigung bis zur Mündung ins Wässernachtal stark zu. Der nördliche Hang ist ab etwa der kleinen

Lichtung bis zur Mündung von in Gefällerrichtung angelegten Wölbäckern überzogen, welche im digitalen Geländemodell und zum Teil auch im Gelände deutlich zu erkennen sind (vgl. Abbildung 38). Der Saugraben mündet auf 293 m NHN in das eng eingetieftete Sohlenkerbtal der Wässernach. Das Wässernachtal ist bis zu 100 m gegenüber den Anhöhen eingetieft und weist nur ein flaches Gefälle zum Main auf (BÜTTNER, 1989b; SPECHT, 2014). Sowohl talaufwärts des Saugrabens als auch talabwärts untergliedern zahlreiche Klingen die steilen Hänge des Wässernachtals. Die kleinen Bäche und Klingen haben meist erosiven Charakter, die Wässernach hingegen wirkt akkumulativ (BÜTTNER, 1989b; LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023).

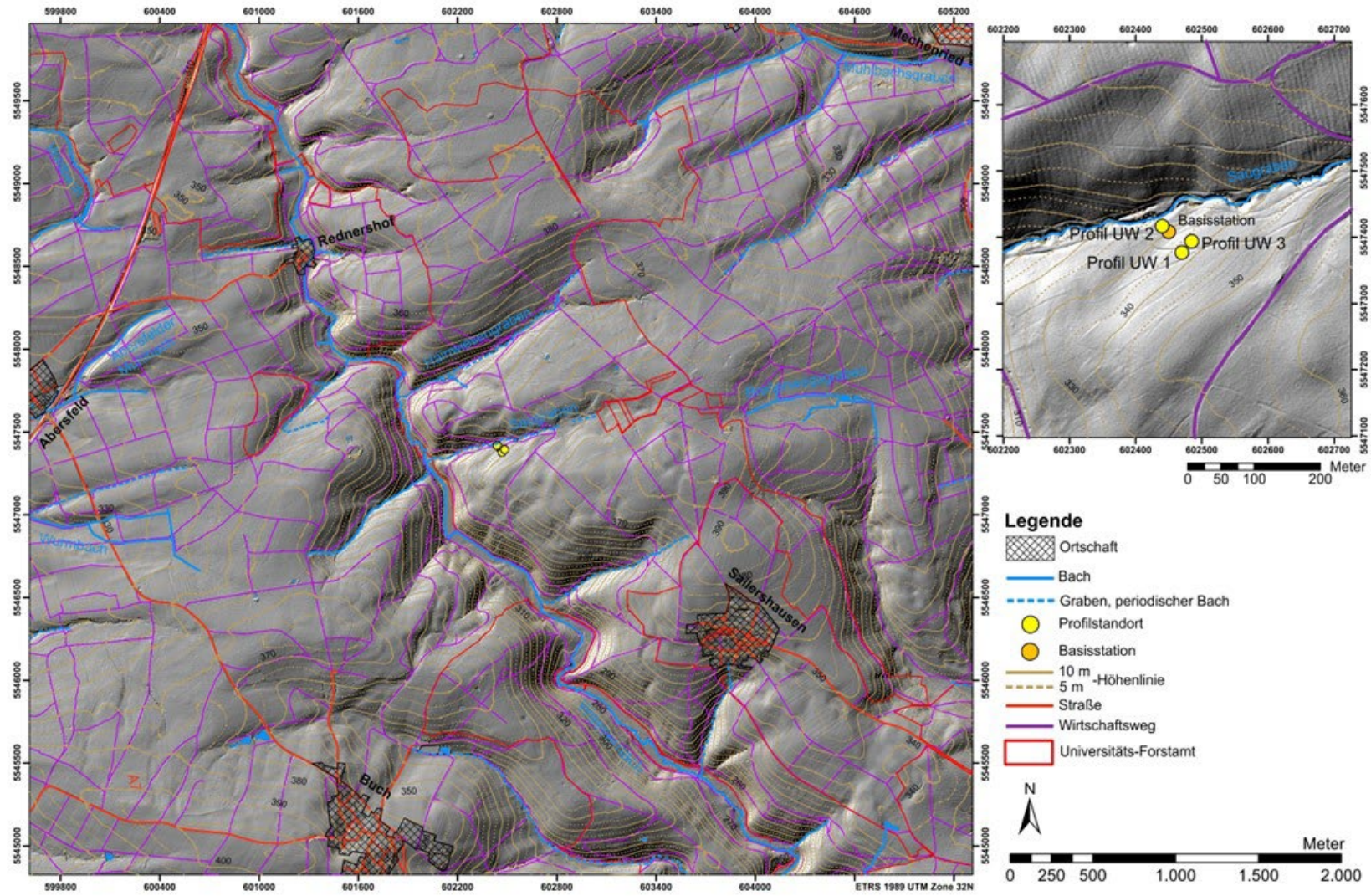


Abbildung 38: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Uniwald. Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

5.4.1.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet Sailershausen befindet sich, wie das gesamte Hesselbacher Waldland, im Übergangsbereich von Oberem Muschelkalk (mo) zu Unterem Keuper (ku). Die geologische Situation des Hesselbacher Waldlandes ist auf die herzynisch (NW-SE) verlaufende Kissingen-Haßfurter-Störungszone, welche im Zuge der alpidischen Orogenese entstand, zurückzuführen (BÜTTNER, 1989a). Das Hesselbacher Waldland wird dadurch von West nach Ost durch die Schweinfurter Mulde und den Kissingen-Haßfurter Sattel geprägt. Der Kissingen-Haßfurter Sattel spaltet sich nördlich von Wülflingen in einen östlichen und einen westlichen Ast auf. Der westliche Ast wird als Kissingen-Haßfurter Sattel (i.e.S.) bezeichnet. Der östliche Ast umfasst als Sailershäuser Sattel auch das Untersuchungsgebiet und streicht steil herzynisch (NNW-SSE). Querschlägige Bruchtektonik verstärkte die Aufwölbung des Sailershäuser Sattels. Die Grenze zwischen Oberem Muschelkalk (mo) und Unterem Keuper (ku) liegt in der Sattelachse bei etwa 360 m NHN. Ein NE-SW-streichendes Bruchsystem quert die Kissingen-Haßfurter Störungszone was auf ausgleichende Brüche zurückzuführen ist. Diese NE-SW-streichenden Brüche stellen Schwächezonen dar, denen die meisten Nebentäler bzw. Klingen entlang des Wässernachtals folgen. Auf die NW-SE und NE-SW streichenden Brüche sind die zahlreichen kleinräumigen geologischen Wechsel zurückzuführen (BÜTTNER, 1989b).

Der als enges Sohlenkerbtal ausgeprägte Unterlauf der Wässernach fließt im Oberen Muschelkalk (mo) (s. Abbildung 39). An der Mündung des Saugrabens in die Wässernach folgt diese einer NW-SE-streichenden Störung und mäandriert in einem Talboden mit einer quartären Talfüllung. Die Störung des Saugrabens quert das Wässernachtal und setzt sich auf der westlichen Talseite in einer weiteren Klinge fort. Am nordwestlichen Hangfuß der Wässernach steht der Obere Muschelkalk 3 (mo3, Meißner-Formation) mit einer Mächtigkeit von ca. 30 m an (BÜTTNER, 1989b). Südlich der Störung findet sich dagegen der Obere Muschelkalk 1+2 (mo1+2, Trochitenkalk- und Meißner-Formation), welcher dann vom Oberen Muschelkalk 3 (mo3) überlagert wird. Im Hangenden wird der Obere Muschelkalk 3 von den Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) des Unteren Keupers mit einer Mächtigkeit von ca. 25 m überlagert. Den oberen Abschluss des Westhangs bildet der Werksandstein-Bereich (kuW). Westlich der Hangschulter wird der Werksandstein von quartärem Löss überdeckt (BÜTTNER, 1989a, 2022).

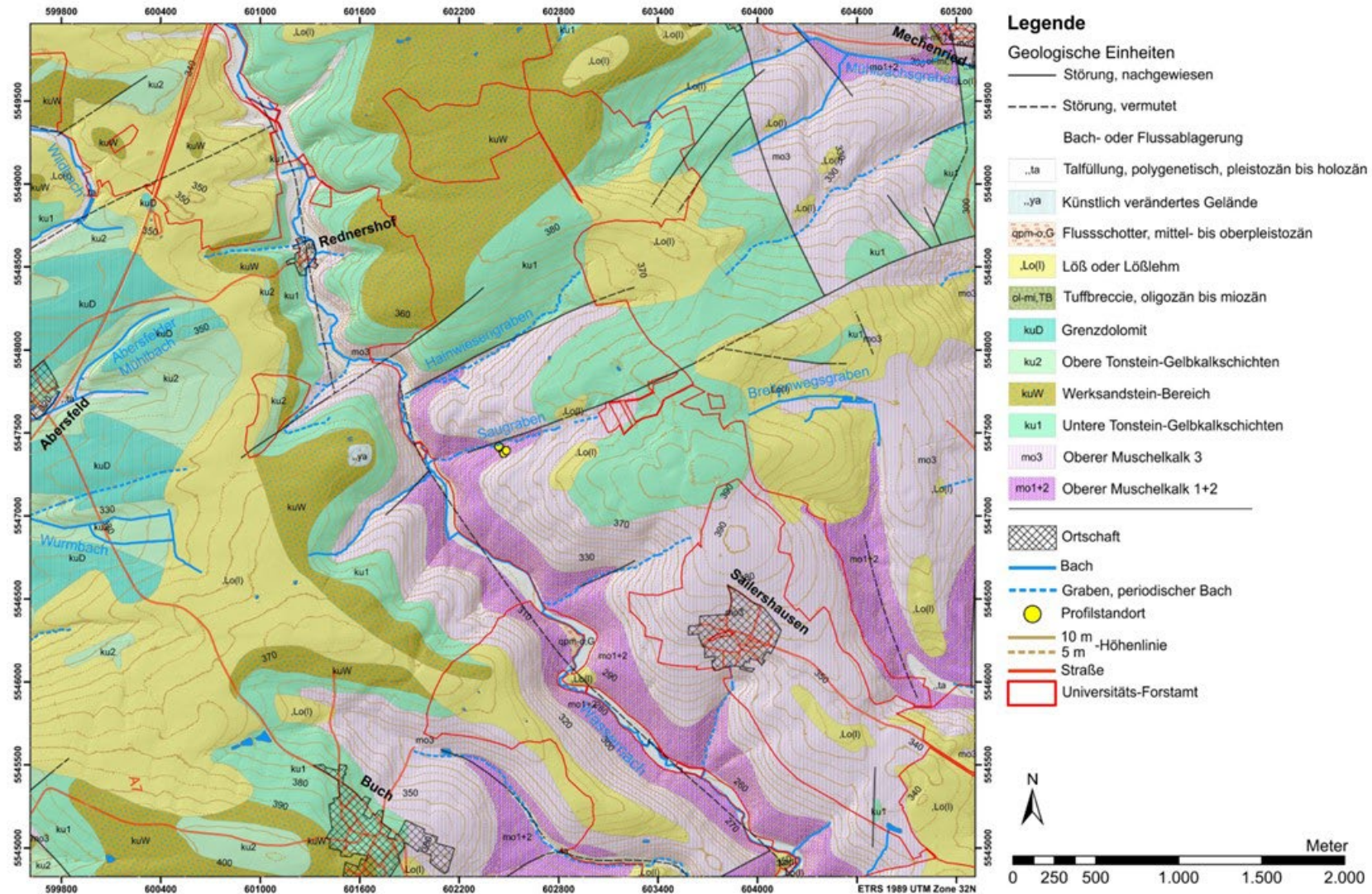


Abbildung 39: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiet Uniwald.

Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).

Am östlichen Hang des Wässernachtals, sowohl nördlich als auch südlich des Saugrabens, stehen am Hangfuß die wechselgelagerten Kalksteine und Tonmergelsteinlagen des Oberen Muschelkalk 1+2 (mo1+2) an. Nördlich der Saugraben-Störung ist der Obere Muschelkalk 1+2 (mo1+2) tektonisch bedingt nur bis in eine Höhe von 328 m NHN zu finden. Laut geologischer Karte verläuft die Schichtgrenze zum darüberliegenden Oberen Muschelkalk 3 (mo3) parallel zu einem im DGM erkennbaren Forstweg (s. Abbildung 39). Südlich der Störung hingegen reicht der Obere Muschelkalk 1+2 (mo1+2) bis etwa 60 m vor Querung des Forstwirtschaftsweges auf 349 m NHN. Im gesamten, stark in den Talboden eingeschnittenen Abschnitt des Saugrabens steht somit der Oberen Muschelkalk 1+2 (mo1+2) an und auch alle Profile der Monitoringstation liegen darauf. Die Mächtigkeit des Oberen Muschelkalk 1+2 (mo1+2) beträgt etwa 35 m. Darüber folgen mit ca. 35 m bis 40 m Mächtigkeit die Ton-, Tonmergel-, Kalk-, und Kalkmergelsteine des Oberen Muschelkalk 3 (mo3). Nördlich der Störung findet sich der Obere Muschelkalk 3 (mo3) nur bis auf 358 m NHN (etwa auf Höhe der Querung des Forstwirtschaftsweges) und wird von den Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) überlagert. Südlich der Störung wird der Obere Muschelkalk 3 (mo3) erst in einer Höhe von 379 m NHN von den Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) überlagert. Die horizontale Distanz beträgt etwa 550 m. Die Unteren Tonstein-Gelbkalkschichten (ku1) bilden das obere Ende des Saugraben-Einzugsgebiets. Sowohl am Nord- als auch am Südhang des Saugrabens sind zwei kleinere quartäre Lössüberlagerungen kartiert.

Im Universitätswald um Sailershausen finden sich einzelne Dolinen, welche auf eine Verkarstung des Oberen Muschelkalks (mo) hinweisen. Die Verkarstung orientiert sich stark an den tektonisch vorgeprägten Störungen und Brüchen (BÜTTNER, 1989b). Sowohl Unterer Keuper als auch Oberer Muschelkalk sind Kluftgrundwasserleiter. Die Quelle des Saugrabens entspringt im Oberen Muschelkalk 3 (mo3) (BÜTTNER, 1989b, 2022).

5.4.1.3 Klima

Bis März 2002 betrieb der Deutsche Wetterdienst in Sailershausen eine Niederschlagsmessstation (Stations-ID: 2057). Die fehlenden Daten wurden für die Klimareferenzperiode 1991 bis 2020 durch Rasterdaten ergänzt (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d). Weitere Stationen des Deutschen Wetterdienstes befinden sich bei Schonungen-Mainberg (Stations-ID: 6347), Hofheim in Unterfranken (Stations-ID: 2268), Haßfurt-Stadt (Stations-ID: 2056) und Gädheim-Greßhausen (Stations-ID: 1534). Die Stationen Schonungen-Mainberg und Haßfurt-Stadt liegen im Maintal, Hofheim i. Ufr. nordöstlich des Hesselbacher Waldlandes. Nur die Station Gädheim-Greßhausen befindet sich, ca. 5 km südwestlich von Sailershausen, im Hesselbacher Waldland.

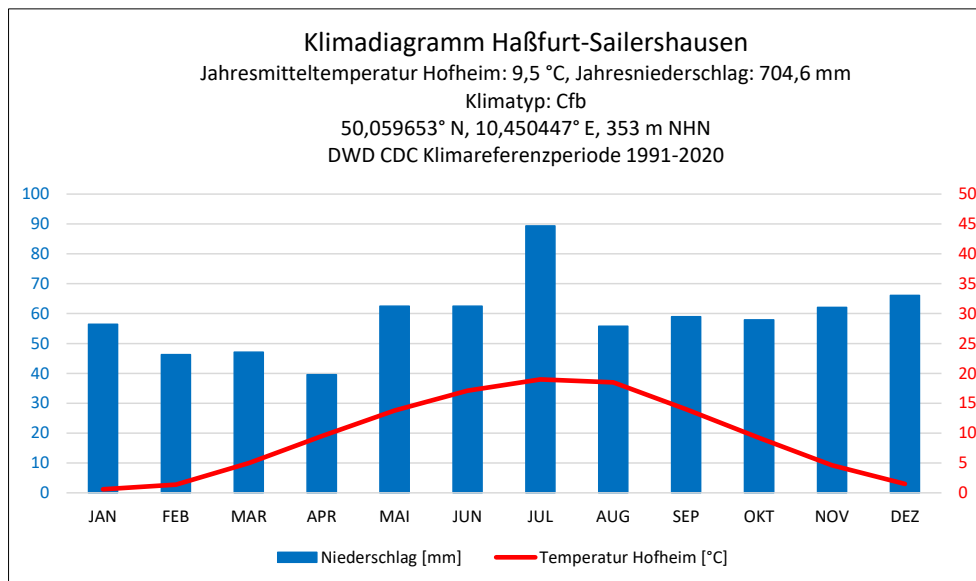


Abbildung 40: Klimadiagramm Haßfurt-Sailershausen 1971-2000.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d), eigene Darstellung.

Für den Klimareferenzzeitraum 1991 bis 2020 liegen nur Niederschlagsdaten für Sailershausen vor. Im Klimadiagramm Haßfurt-Sailershausen (s. Abbildung 40) wurden zusätzlich die Temperaturdaten von Hofheim i. Ufr. verwendet.

Die Wetterstation Hofheim i. Ufr. wies in der Klimareferenzperiode 1991 bis 2020 eine Jahresmitteltemperatur von 9,5 °C auf. Die kältesten Monate waren Dezember bis Februar, wobei das Temperaturminimum mit 0,6 °C im Januar war. Die höchsten Temperaturen wurden in den Monaten Juni bis August, mit dem Temperaturmaximum von 19 °C im Juli, gemessen. Für Sailershausen können etwas tiefere Temperaturen im Winter und Sommer angenommen werden, da Hofheim i. Ufr. ca. 100 m tiefer und nicht mehr im Naturraum des Hesselbacher Waldlandes liegt. Die Temperaturamplitude und der Jahresgang bleiben gleich.

Das Klima in Sailershausen ist ganzjährig humid. Im Zeitraum 1991 bis 2020 lag der Jahresniederschlag bei 704,6 mm. Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis Juli, mit dem Maximum von 89,3 mm im Juli. Ab August gehen die Niederschläge deutlich zurück und steigen dann bis zu einem zweiten Maximum im Dezember (66,1 mm) wieder an. Der trockenste Monat ist April mit 39,6 mm Niederschlag.

Für den Zeitraum seit 2000 kann die Wetterstation Ebertshausen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft am nördlichen Rand des Hesselbacher Waldlandes (ca. 11 km NNW von Sailershausen) Klimadaten liefern (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2022b).

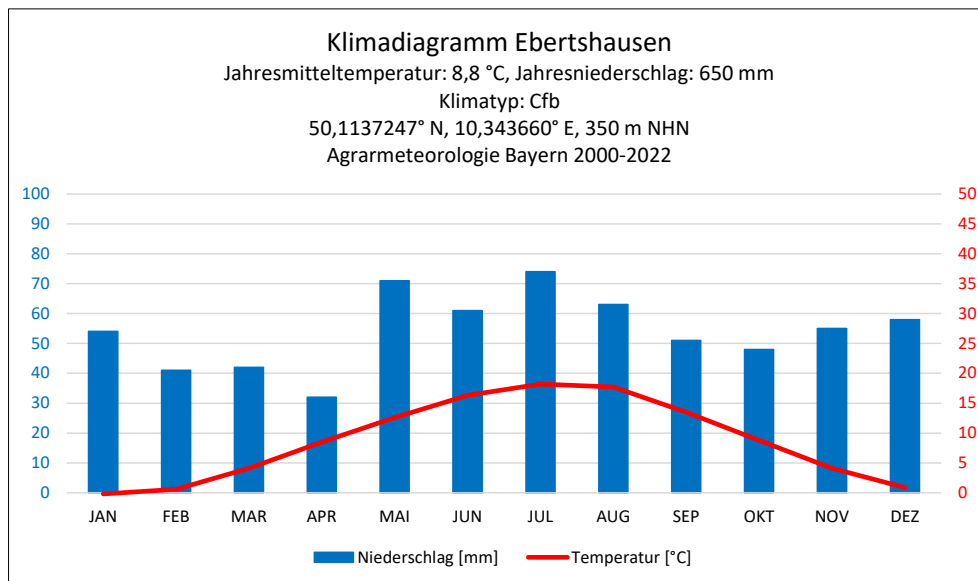


Abbildung 41: Klimadiagramm Ebertshausen 2002-2022.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022b), eigene Darstellung.

Die Wetterstation Ebertshausen verzeichnet im Zeitraum 2000 bis 2022 einen sehr ähnlichen Temperaturverlauf wie die Wetterstation Hofheim i. Ufr (s. Abbildung 41). Die Jahresmitteltemperatur in Ebertshausen liegt bei 8,8 °C Die kältesten Monate sind Dezember bis Februar, mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur von -0,2 °C im Januar. Die wärmsten Monate sind Juni bis August. Mit 18,2 °C ist Juli der wärmste Monat.

Das Klima in Ebertshausen ist ganzjährig humid und der Jahresniederschlag beträgt 650 mm. Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis August, wobei Mai und Juli ca. 10 mm mehr Niederschlag aufweisen als die jeweils folgenden Monate Juni und August. Im Oktober gibt es ein erstes Niederschlagsminimum, bevor die Niederschläge im Winter zum zweiten Niederschlagsmaximum im Dezember wieder ansteigen. Die trockensten Monate sind Februar bis April, wobei April mit 32 mm Niederschlag das Minimum bildet. Der Klimatyp für Ebertshausen, welcher auch auf Sailershausen übertragen werden kann, ist „Cfb“ (PEEL et al., 2007).

5.4.2 Bodengeographische Analysen Uniwald

5.4.3.1 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 1

Geländedaten

Die Braunerde-Terra fusca des Profil UW 1 befindet sich auf der Südseite der Saugraben-Klinge in einer Höhe von 337 m NHN (s. Abbildung 38). Die Profilwand ist nach Südosten, in den Hang hinein, ausgerichtet und weist an der linken Seite eine Höhe von 80 cm und an der rechten Seite eine Höhe von 75 cm auf. Das Profil befindet sich in einem Laubwald mit wenig Unterholz.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
UW 1-1	Ah-Bv	12 - 19	w, sc/de, h	10YR 4/2	Tu3	sub	Mullaufage fehlt	LH
UW 1-2	Bv-Tv	20 - 29	w, de, h	10YR 4/3 10YR 5/4	Tu2	pol	Tonverlagerung	LH
UW 1-3	IITv-Cv ₁	69 - 72	w, de, h	10YR 5/6 10YR 3/4	Tt	pol	Toncutane, Farben verschmiert 10YR 3/4	LB
UW 1-4	IITv-Cv ₂	75 - 80	-	10YR 4/2	Tu2	pol	-	LB

Tabelle 29: Geländedaten Profil UW 1.

Braunerde-Terra fusca. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil UW 1 konnte in vier Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 42 u. Tabelle 29). Die rezente Bodenoberfläche bildet der Ah-Bv-Horizont, welcher durch eine dünne Laubschicht bedeckt ist. Der Ah-Bv-Horizont besteht aus einem dunkel gräulichbraunen, mittel schluffigen Ton und zeigt ein Subpolyedergefüge. Der Anteil der Feinwurzeln ist stark, die Grobwurzeln sind nestartig stark im Horizont zu finden. Die wellige Horizontuntergrenze des Ah-Bv-Horizonts ist deutlich bis scharf erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 12 cm bis 19 cm. Der darunterliegende Bv-Tv-Horizont zeichnet sich durch einen schwach schluffigen Ton mit polyedrischem Gefüge aus. In die braune Grundfarbe sind gelblich-braune Flecken eingelagert. Im Bv-Tv-Horizont finden sich kantiger Feinkies bis kantige Steine aus Kalkstein mit einem Volumenanteil von 2 % bis 10 %. Die Durchwurzelung mit Feinwurzeln, zum Teil treten diese nestartig auf, ist mittel, mit Grobwurzeln dagegen schwach. Im Bv-Tv-Horizont können Toncutane auf Gefügebruchflächen beobachtet werden, was auf Tonverlagerung vom Ah-Bv-Horizont hinweisen kann. Die wellige Horizontuntergrenze verläuft deutlich erkennbar in einer Tiefe von 20 cm bis 29 cm. Darunter folgt der IITv-Cv₁-Horizont. Dieser besteht aus einem gelblich-braunen reinen Ton, welcher ein Polyedergefüge besitzt. Innerhalb von großen Flecken mit einem Flächenanteil von ca. 10 % weist der reine Ton eine dunkel gelblich-braune Farbe auf (s. Abbildung 42). Auf den Polyedern der Aggregatoberflächen finden sich braune Toncutane. Der IITv-Cv₁-Horizont weist einen sehr hohen Flächenanteil (ca. 20 % bis 25 %) von Feingrus bis hin zu kantigen Steinen aus Kalkstein auf. Einzelne Grobwurzeln finden sich nur im oberen Teil des IITv-Cv₁, einzelne Feinwurzeln sind im gesamten Horizont vorhanden. Die Untergränze des IITv-Cv₁-Horizont ist wellig, deutlich erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 69 cm bis 72 cm. Den unteren Abschluss des Profils bildet der IITv-Cv₂-Horizont, welcher bis in eine Tiefe von 75 cm bis 80 cm reicht. Der schwach schluffige Ton besteht aus einem polyedrischen Gefüge und hat eine dunkel gräulichbraune Farbe. Der Flächenanteil von Feingrus und kantigen Steinen aus Kalkstein ist sehr hoch. Einzelne Feinwurzeln finden sich auch im IITv-Cv₂-Horizont.

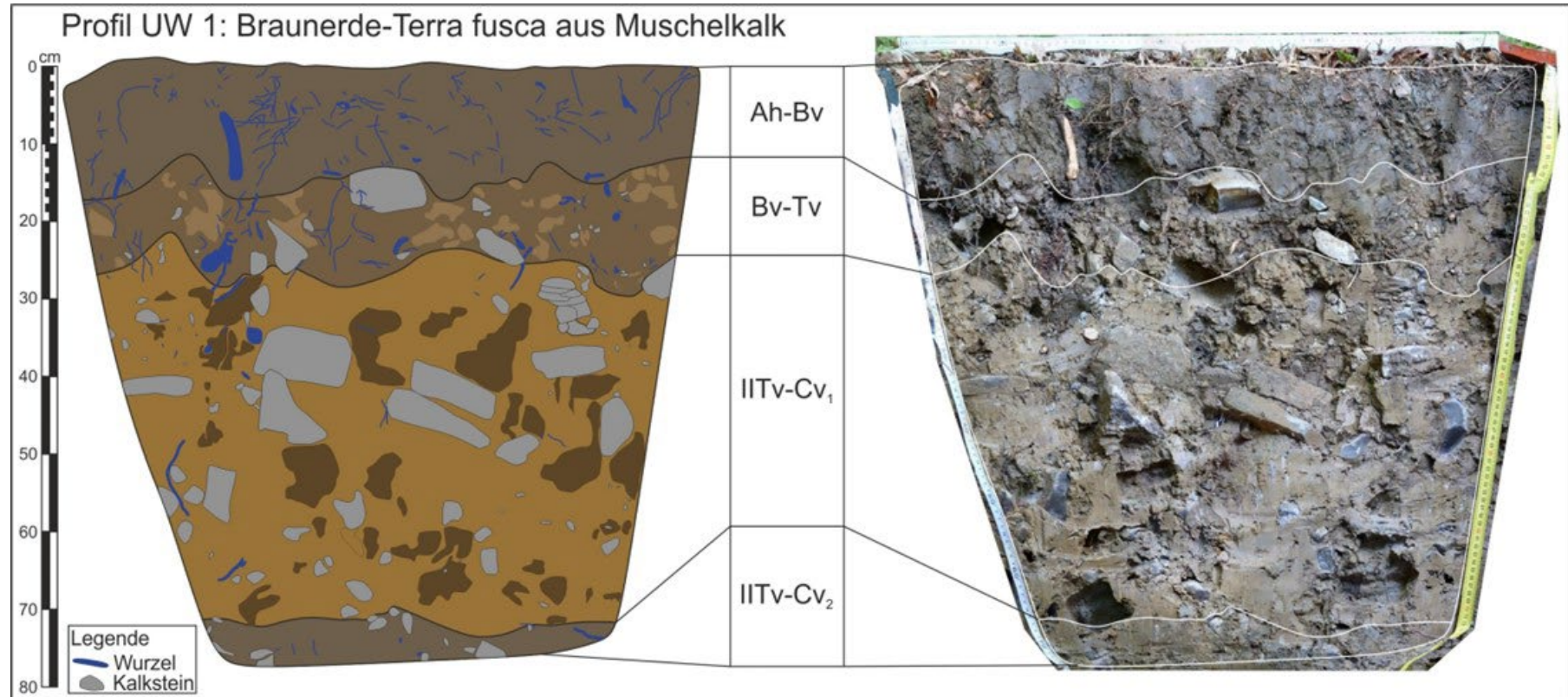


Abbildung 42: Profilzeichnung Profil UW 1.
Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk.
Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

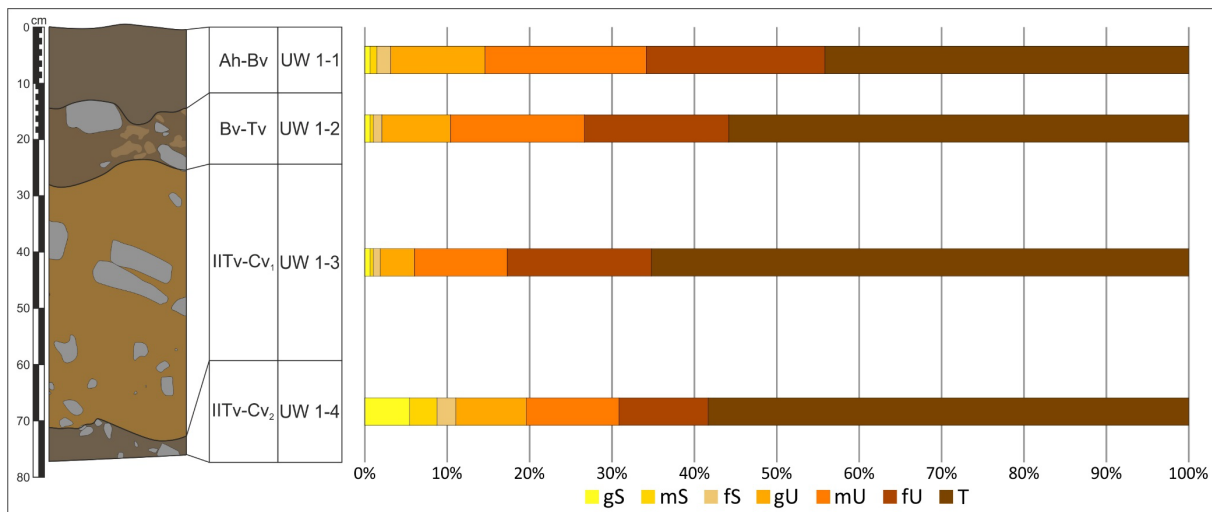


Abbildung 43: Korngrößendiagramm Profil UW 1.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil UW 1 liegen zwischen 1,98 % und 11,07 %, mit dem Maximum im IITv-Cv₂-Horizont (s. Abbildung 43 u. Tabelle 30). Im Ah-Bv nimmt die Feinsandfraktion (1,63 %) den größten Anteil ein. Die Sandfraktion der Horizonte Bv-Tv und IITv-Cv₁ sind nahezu identisch in ihrer Zusammensetzung. Der Sandanteil des IITv-Cv₂ besteht zur Hälfte aus Grobsand. Die Schluffanteile im Profil nehmen mit der Tiefe kontinuierlich ab und liegen zwischen 52,80 % im Horizont Ah-Bv und 30,68 % im IITv-Cv₂. In allen Horizonten überwiegen Fein- und Mittelschluff. Die Tonanteile liegen zwischen 44,10 % im Ah-Bv-Horizont und 65,18 % im IITv-Cv₁-Horizont. Der Tonanteil nimmt zunächst mit der Tiefe zu, liegt im untersten Horizont aber wieder unter dem des IITv-Cv₁.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
UW 1-1	19/67	Ah-Bv	0,61	0,87	1,63	11,49	19,53	21,77	44,10	3,11	52,80	44,10	5,7	-	8,30	8,98389·10 ⁻⁵
UW 1-2	19/68	Bv-Tv	0,65	0,48	0,96	8,40	16,33	17,41	55,76	2,10	42,14	55,76	7	2,10	0,00	0,000198258
UW 1-3	19/69	IITv-Cv ₁	0,61	0,47	0,90	4,09	11,37	17,38	65,18	1,98	32,84	65,18	7,2	20,18	2,50	n.b.
UW 1-4	19/70	IITv-Cv ₂	5,38	3,34	2,35	8,66	11,23	10,79	58,25	11,07	30,68	58,25	7,2	25,82	0,00	n.b.

Tabelle 30: Laborwerte Profil UW 1.

Die pH-Werte im Profil UW 1 nehmen mit der Tiefe von 5,7 im Ah-Bv-Horizont auf 7,2 im basalen Horizont zu (vgl. Tabelle 30). Parallel mit der Zunahme des pH-Werts mit der Tiefe, nimmt auch der Carbonatgehalt mit der Tiefe zu. Die basalen Horizonte sind „carbonatreich“ bzw. „sehr carbonatreich“. Signifikante Humusgehalte treten mit 8,3 % im Ah-Bv-Horizont (stark humos) und mit 2,5 % im IITv-Cv₁-Horizont (mittel humos) auf. Die Horizonte Bv-Tv und IITv-Cv₂ enthalten keinen Humus.

Der k_f-Wert wurde nur für die Horizonte Ah-Bv und Bv-Tv bestimmt. Auf Grund der vielen Kalksteine konnten aus den übrigen Horizonten keine Stechzylinder entnommen werden. Beide Horizonte weisen einen „extrem hohen“ k_f-Wert auf und sind damit sehr durchlässig.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
UW 1-1	Ah-Bv	21/151	1,01	1,06	1,34	Ld 2	51	23	20	94 mittel
		21/152	1,05							
		21/153	1,13							
UW 1-2	Bv-Tv	-	1,02	1,34 (UW 1-1)	Ld 2	47,2	15,8	13,6		
UW 1-3	IITv-Cv ₁	-	1,33	1,69 (UW 2-3)	Ld 3	44,4	10,4	5,55		
UW 1-4	IITv-Cv ₂	-	1,37	1,69 (UW 2-3)	Ld 3	41,6	11,6	6,6		

Tabelle 31: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 1.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach Renger et al. (2009) und Renger et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die TRD konnte nur für den Ah-Bv-Horizont gemessen werden. Für die darunterliegenden Horizonte wurde die TRD auf Basis der Ld von ähnlichen Horizonten mit gleicher geschätzter Ld berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t nimmt mit der Tiefe von 1,06 g/cm³ (sehr gering) im Ah-Bv-Horizont auf 1,37 g/cm³ (gering) im IITv-Cv₂-Horizont zu (s. Tabelle 31). Die effektive Lagerungsdichte der oberen beiden Horizonte ist „gering“, die der basalen IITv-Cv-Horizonte ist „mittel“. Die FK nimmt mit der Tiefe von „sehr hoch“ im Ah-Bv-Horizont auf „hoch“ im IITv-Cv₂-Horizont ab. Parallel dazu nimmt die nFK von „hoch“ auf „gering“ ab. Die LK nimmt mit der Tiefe von „hoch“ auf „mittel“ ab. Die nFKWe ist mit 94 l/m² „mittel“.

5.4.3.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 2

Geländedaten

Das Profil UW 2 (Braunerde-Terra fusca) ist unmittelbar neben dem Saugraben und das am tiefsten gelegene der drei Profile (s. Abbildung 38). Das Profil befindet sich in einer Höhe von 328 m NHN auf dem ehemaligen Talboden. Der Saugraben ist noch einmal ca. 4 m in den Talboden eingeschnitten. Die nach Südosten in den Hang hinein ausgerichtete Profilwand weist an der linken Seite eine Höhe von 103 cm und an der rechten Seite eine Höhe von 91 cm auf. Das Profil befindet sich in einem Laubwald, am Rand einer vom Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie der Universität Würzburg angelegten Freifläche (DBU-Projekt 34488/01 Beta-Diversität für nachhaltige Waldbewirtschaftung) (MÜLLER, 2020). Zum Zeitpunkt der Profiaufnahme war der Unterwuchs recht gering, dieser hat im Laufe der Jahre aber deutlich zugenommen.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
UW 2-1	Ah	8 - 18	w, sc, g	10YR 3/3	Tu3	G: sub F: kru	alle Gefügegrößen, locker gelagert	LH
UW 2-2	Bv-Tv	23 - 30	w, de-sc, g	10YR 4/3 10YR 5/6	Tu4	G: sub F: sub	Gefüge leichte Tendenz zu scharfkantigen Ecken	LH
UW 2-3	IIBv-Tv	43 - 49	e-w, de, h	10YR 5/4	Tu2	G: sub F: pol	Steine in situ verwittert	LM
UW 2-4	IIITv-Cv	91 - 103	-	10YR 5/6	Tu2	bro	Gefüge wird undeutlicher, lässt nach, nicht gut entwickelt	LB

Tabelle 32: Geländedaten Profil UW 2.

Braunerde-Terra fusca. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil UW 2 wurde in vier Horizonte untergliedert werden (s. Abbildung 44 und Tabelle 32). Der Ah-Horizont besteht aus einem locker gelagertem dunkelbraunen mittel schluffigen Ton. Das Grobgefüge entspricht einem Subpolyedergefüge, das Feingefüge einem Krümelgefüge. Der Anteil an Feinwurzeln im Ah ist mittel, der an Grobwurzeln schwach. Die wellige Horizontuntergrenze ist scharf erkennbar und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe zwischen 8 cm und 18 cm. Unter dem Ah folgt der Bv-Tv-Horizont, dessen stark schluffiger Ton eine braune Grundfarbe mit darin eingelagerten gelblichbraunen Flecken aufweist. Das Grob- und Feingefüge des Bv-Tv-Horizonts ist ein Subpolyedergefüge, welches leichte Tendenzen zu scharfkantigen Ecken erkennen lässt. Der schwache Anteil an Feinwurzeln im Bv-Tv-Horizont tritt zum Teil nestartig auf, Grobwurzeln finden sich nur vereinzelt. Die Horizontuntergrenze verläuft wellig in einer Tiefe von 23 cm bis 30 cm in horizontaler Lage und ist deutlich bis scharf erkennbar. Mit dem darunterliegenden IIBv-Tv-Horizont erfolgt ein Schichtwechsel im Profil. Der IIBv-Tv-Horizont besteht aus einem gelblichbraunen schwach schluffigen Ton. Das Gefüge des IIBv-Tv unterscheidet sich in ein subpolyedrisches Grob-, und ein polyedrisches Feingefüge. Im IIBv-Tv-Horizont finden sich auch einige Kalksteine, die hier in situ verwittert sind. Fein- und Grobwurzeln nehmen im IIBv-Tv-Horizont nur einen sehr schwachen Flächenanteil ein, der sich hauptsächlich auf die obere Hälfte des Horizonts beschränkt. Die ebene bis wellige Horizontuntergrenze des IIBv-Tv lässt sich deutlich erkennen und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 43 cm bis 49 cm. Den unteren Abschluss des Profils UW 2 bildet der Horizont IIITv-Cv. Dieser besteht aus einem gelblichbraunen schwach schluffigen Ton. Darin sind 25 bis 50 Vol.-% Kalksteine in den Fraktionen von Feingrus bis kantige Steine eingebettet. Das vorhandene Bröckelgefüge weist eine schwächere Ausprägung auf als der darüberliegenden IIBv-Tv-Horizont. Vereinzelt finden sich Grobwurzeln. Der IIITv-Cv-Horizont ist ca. 50 cm mächtig und reicht bis in eine Tiefe von 91 cm bis 103 cm.

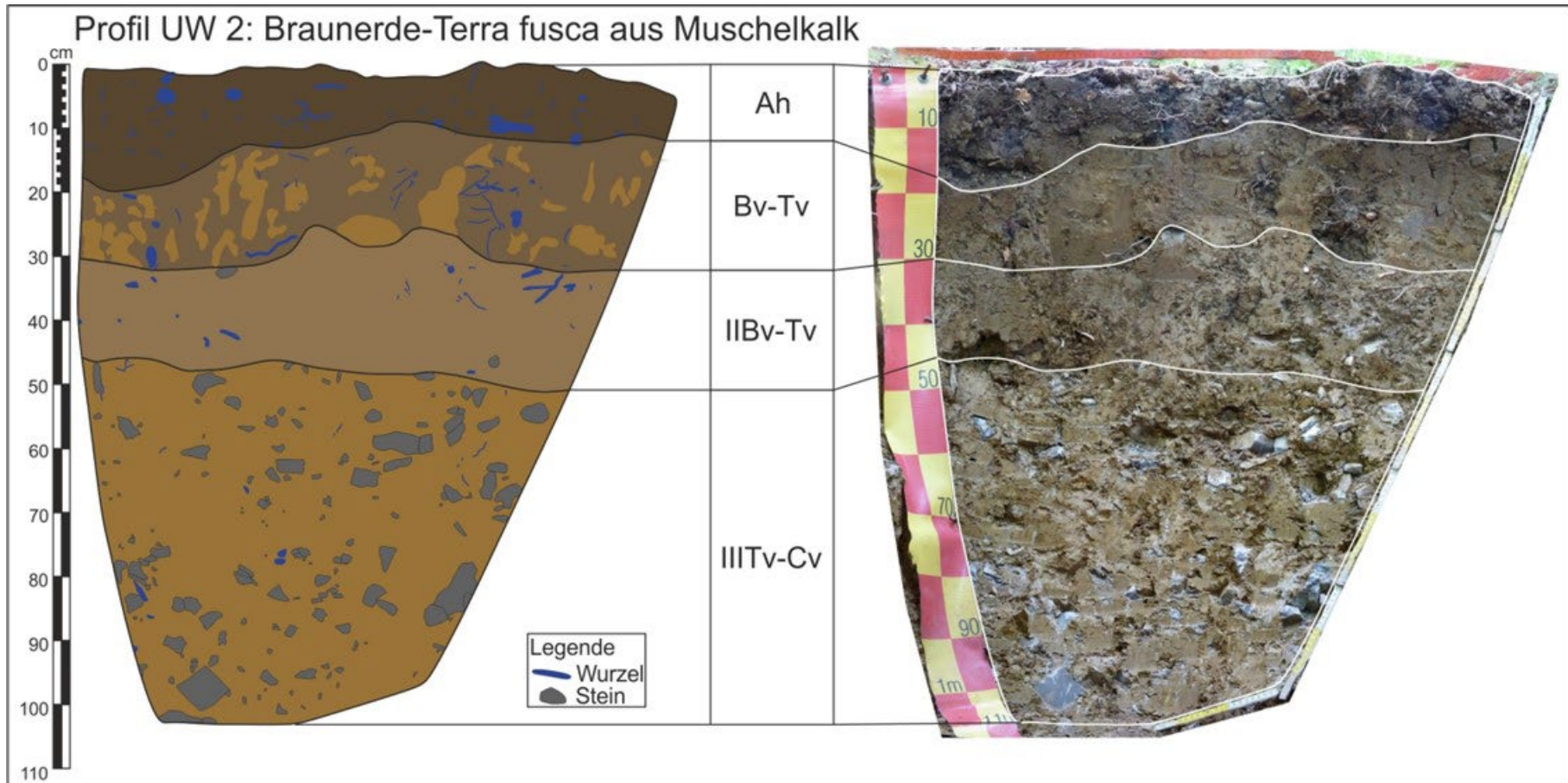


Abbildung 44: Profilzeichnung Profil UW 2.

Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk. Das Profil UW 2 befindet sich auf dem ehemaligen Talboden, unmittelbar neben dem ca. 4 m tiefer liegenden Saugraben.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

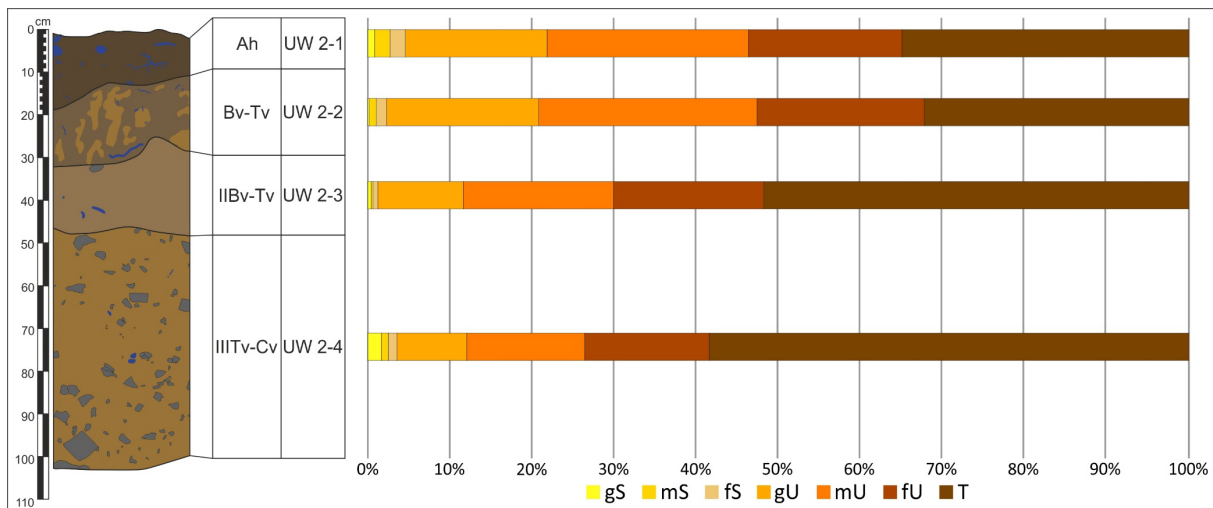


Abbildung 45: Korngrößendiagramm Profil UW 2.

Quelle: eigene Darstellung.

Im Ah-Horizont dominiert mit 60,56 % Schluff, während der Tonanteil mit 34,89 % den übrigen Anteil ausmacht (s. Abbildung 45 u. Tabelle 33). Die einzelnen Schlufffraktionen haben etwa die gleichen Anteile. Der Bv-Tv-Horizont unterscheidet sich durch einen etwas höheren Schluffanteil nur geringfügig vom Ah-Horizont. Der IIBv-Tv-Horizont besteht fast vollständig aus Ton (51,72 %) und Schluff (47,03 %). Den jeweils höchsten Tonanteil und niedrigsten Schluffanteil des Profils weist der IIIIV-Tv-Horizont auf. Mittel- und Feinschluff sind sowohl im Horizont IIBv-Tv als auch IIIIV-Tv jeweils mit identischen Anteilen vertreten.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _r -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
UW 2-1	19/77	Ah	0,72	1,99	1,83	17,29	24,54	18,73	34,89	4,55	60,56	34,89	5,2	-	8,40	0,000156532
UW 2-2	19/78	Bv-Tv	0,25	0,73	1,29	18,57	26,56	20,43	32,16	2,28	65,56	32,16	4,4	-	4,88	0,000103321
UW 2-3	19/79	IIBv-Tv	0,31	0,17	0,76	10,32	18,33	18,38	51,72	1,25	47,03	51,72	5,9	0,16	1,87	0,000128314
UW 2-4	19/80	IIIIV-Tv	1,60	0,80	1,12	8,42	14,35	15,24	58,46	3,53	38,01	58,46	7,1	25,08	0,00	n.b.

Tabelle 33: Laborwerte Profil UW 2.

Die pH-Werte im Profil UW 2 nehmen mit der Tiefe zu und liegen zwischen 5,2 im Ah- und 7,1 im IIIIV-Tv-Horizont (s. Tabelle 33). Abweichend davon weist der Bv-Tv-Horizont mit 4,4 den niedrigsten pH-Wert des Profils auf. Parallel zum pH-Wert nimmt der Carbonatgehalt im Profil UW 2 mit der Tiefe zu. Die Horizonte Ah und Bv-Tv sind carbonatfrei. Der basale IIIIV-Tv-Horizont ist „sehr carbonatreich“.

Der Humusgehalt im Profil UW 2 nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Die Humusgehalte liegen zwischen 8,4 % (stark humos) im Ah- und 1,87 % (schwach humos) im IIBv-Tv-Horizont. Der IIIIV-Tv-Horizont ist „humusfrei“.

Die kf-Werte konnten nur für die oberen drei Horizonte ermittelt werden, da der basale Horizont auf Grund des hohen Kalksteingehalts nicht beprobt werden konnte (vgl. Abbildung 44). Die hydraulische Leitfähigkeit der drei beprobten Horizonte kann als „extrem hoch“ bezeichnet werden.

Horizont- nummer	Horizont	Labor- nummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
UW 2-1	Ah	21/154	1,05	1,05	1,29	Ld 1	51	23	20	129,1 hoch
		21/155	1,05							
UW 2-2	Bv-Tv	21/156	1,34	1,38	1,60	Ld 3	44,4	21,2	16,4	
		21/157	1,41							
UW 2-3	IIBv-Tv	21/158	1,40	1,38	1,69	Ld 3	48,4	16,4	11,4	
		21/159	1,36							
UW 2-4	IIITv-Cv	-	1,36		1.69 (UW 2-3)	Ld 3	41,8	11,8	6,8	

Tabelle 34: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 2.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die TRD wurde nur für die obersten drei Horizonte an Stechzylindern gemessen. Für den IIITv-Cv-Horizont wurde die TRD auf Basis der Ld berechnet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t nimmt mit der Tiefe zu und liegt zwischen 1,05 g/cm³ (sehr gering) im Ah-Horizont und 1,38 g/cm³ (gering) im Bv-Tv- und IIBv-Tv-Horizont (s. Tabelle 34). Parallel nimmt die effektive Lagerungsdichte mit der Tiefe von „sehr gering“ auf „mittel“ zu. Die FK ist „sehr hoch“ bis „hoch“ und nimmt mit der Tiefe leicht ab. Die nFK nimmt auch mit der Tiefe ab und liegt zwischen 23 Vol.-% (hoch) im Ah-Horizont und 11,8 Vol.-% (gering) im IIITv-Cv-Horizont. Die LK ist im Ah-Horizont „hoch“ und geht auf „gering“ im basalen IIITv-Cv-Horizont zurück. Die nFKWe des Profils ist mit 129,1 l/m² „hoch“.

5.4.3.3 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil UW 3

Geländedaten

Das Profil UW 3 ist eine Braunerde-Terra fusca und liegt hangparallel zum Profil UW 1 auf 337 m NHN (s. Abbildung 38). Die Profilwand ist ebenfalls nach Südosten, in den Hang hinein, ausgerichtet und misst an der linken Seite eine Tiefe von 83 cm und an der rechten Seite von 79 cm. Das Profil UW 3 befindet sich in einem Laubwald mit relativ wenig Unterholz.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
UW 3-1	Ah	10 - 14	e-w, sc, h	10YR 3/2	Tu3	G: sub F: sub	-	LH
UW 3-2	IIBv-Tv	21 - 34	w, de/di, h(g)	10YR 4/3 10YR 4/6	Tu2	G: sub-pol F: sub	streifige Farbe	LB
UW 3-3	IITv-Cv ₁	61 - 64	e-w, di, h	10YR 5/8	Tu2	G: pol F: pol	sehr steinig + dicht	LB
UW 3-4	IITv-Cv ₂	76 - 83	w, de/sc, h	10YR 5/6	Tu2	G: pol/koh F: pol	extrem dicht + fest	LB
-	IIImC	-	-	-	-	-	oberste cm der Steinlage, nicht mehr aufgeschlossen	-

Tabelle: 35: Geländedaten Profil UW 3.

Braunerde-Terra fusca. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Die Braunerde-Terra fusca (UW 3) besteht aus vier Horizonten (s. Abbildung 46 u. Tabelle: 35). Der Ah-Horizont entspricht einem sehr dunkel gräulichbraunen mittel schluffigen, lockeren Ton. Der Horizont ist in Grob- und Feingefüge von einem Subpolyedergefüge geprägt. Der Ah-Horizont zeigt einen hohen Anteil an Feinwurzeln, welche sich gleichmäßig über den Horizont verteilen. Die Grobwurzeln nehmen einen etwas geringeren Anteil ein und finden sich vor allem in der unteren Horizonthälfte und entlang der Horizontuntergrenze des Ah-Horizonts. Hier findet sich auch vereinzelt Feingrus. Die scharf erkennbare Horizontuntergrenze ist eben bis wellig und verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe zwischen 10 cm und 14 cm. Der darunterliegende IIBv-Tv-Horizont besteht aus einem braunen schwach schluffigen Ton. Der braune IIBv-Tv-Horizont ist von dunkel gelblichbraunen Flecken mit einem hohen bis sehr hohen Flächenanteil durchzogen. Der schwach schluffige Ton des IIBv-Tv-Horizont besitzt ein subpolyedrisch bis polyedrisches Grobgefüge und ein subpolyedrisches Feingefüge. Der IIBv-Tv-Horizont weist einen sehr hohen Flächenanteil (ca. 10 % bis 25 %) von Feingrus bis hin zu kantigen Steinen aus Kalkstein auf. Feinwurzeln sind hier noch stark vertreten, während Grobwurzeln nur einen schwachen Flächenanteil haben. Die wellige bis taschenförmige Horizontuntergrenze ist deutlich erkennbar und verläuft in der linken Profilhälfte horizontal in der rechten Profilhälfte geneigt in einer Tiefe von 21 cm bis 34 cm. Der darunterliegende IITv-Cv₁-Horizont besteht aus einem dicht gelagertem, gelblichbraunen, schwach schluffigen Ton, welcher ein polyedrisches Grob- und Feingefüge aufweist. Der IITv-Cv₁-Horizont ist durch einen hohen Grobskelettanteil aus Kalksteinen geprägt. Der Skelettanteil besteht aus 10 bis

20 Vol.-% Fein- bis Grobgrus, 25 bis 50 Vol.-% kantigen Steinen und 2 bis 10 Vol.-% kantigen Blöcken. Fein- und Grobwurzeln sind nur noch wenig vorhanden und nehmen nach unten weiter ab. Die diffus erkennbare ebene bis wellige Horizontuntergrenze des IITv-Cv₁-Horizont verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 61 cm bis 64 cm. Den unteren Abschluss des Profils UW 3 bildet der IITv-Cv₂-Horizont. Dieser besteht aus einem extrem dicht und fest gelagerten gelblichbraunen schwach schluffigen Ton. Das Grobgefüge des IITv-Cv₂-Horizont ist ein Polyeder- bis Kohärentgefüge, das Feingefüge ein Polyedergefüge. Der Grobboden im IITv-Cv₂-Horizont besteht aus 2 bis 10 Vol.-% Mittel- und Grobgrus und 10 bis 25 Vol.-% kantigen Steinen. Der Grobbodenanteil befindet sich vor allem in der unteren Horizonthälfte, sowie entlang der linken und rechten Profilgrenze (s. Abbildung 46). Die wellige, deutlich bis scharf erkennbare Horizontuntergrenze des IITv-Cv₂-Horizont verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 76 cm bis 83 cm. Darunterliegend folgt die Kalksteinlage eines IlmcC-Horizonts, welcher nicht mehr grabbar war.

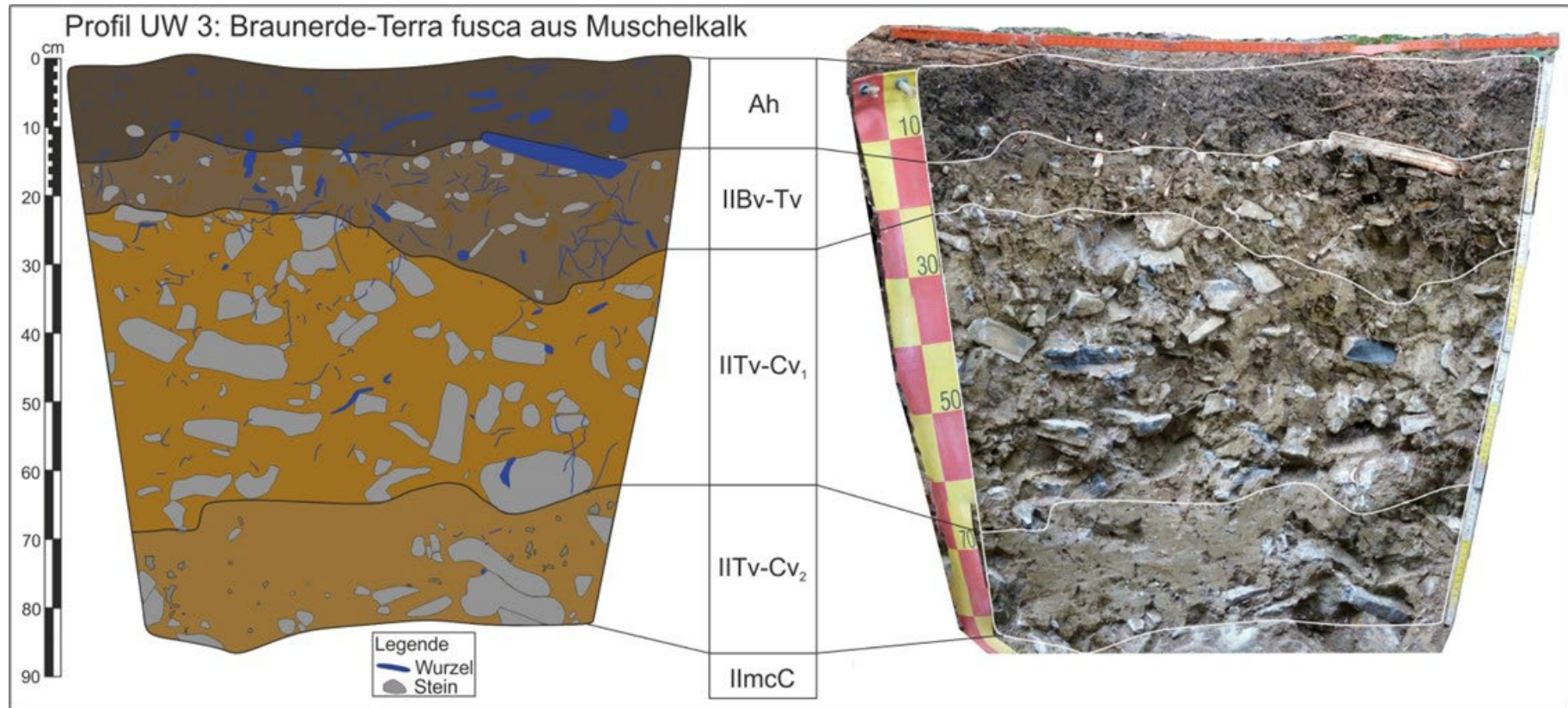


Abbildung 46: Profilzeichnung Profil UW 3.

Braunerde-Terra fusca aus Muschelkalk. Das Profil UW 3 befindet sich hangparallel zu Profil UW 1 und wurde nach dem Verfüllen mit Totholz bedeckt.
Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

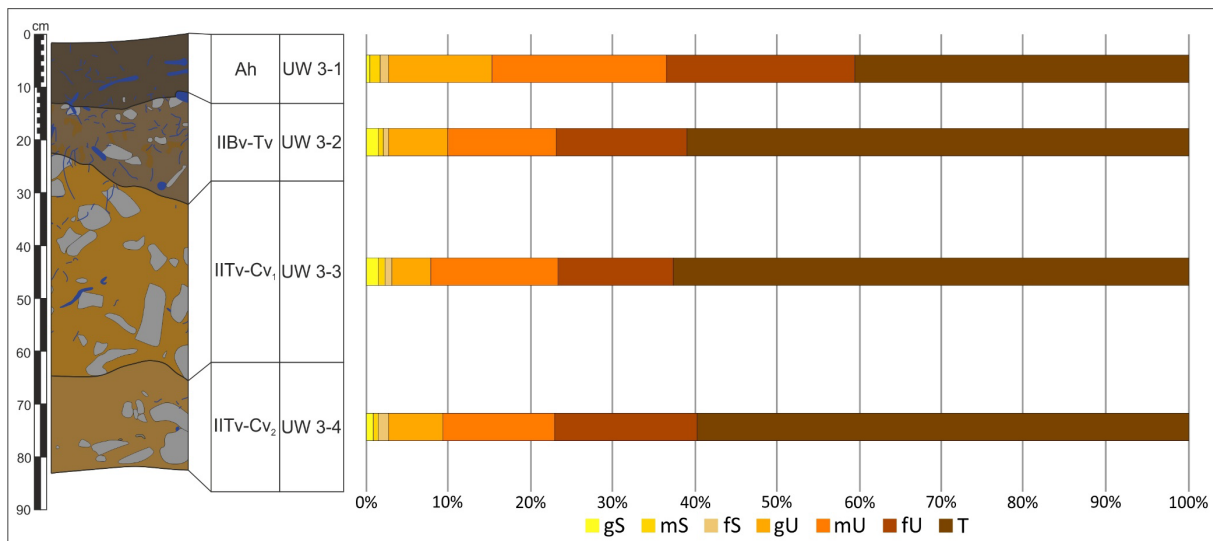


Abbildung 47: Korngrößendiagramm Profil UW 3.

Quelle: eigene Darstellung.

Die Sandanteile im Profil UW 3 sind in allen Horizonten mit < 3 % sehr gering (s. Abbildung 47 u. Tabelle 36). Der Ah-Horizont besteht aus 56,68 % und 40,73 % Ton, wobei Mittel- und Feinschluff zu fast gleichen Teilen vorhanden sind. Die übrigen Horizonte bestehen hauptsächlich aus Ton (ca. 60 %). Der Schluffanteil bewegt sich um 35 % und wird von der Mittel- und Feinschlufffraktion dominiert.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
UW 3-1	19/94	Ah	0,34	1,31	0,94	12,70	21,24	22,74	40,73	2,60	56,68	40,73	6,5	-	14,17	0,000382485
UW 3-2	19/95	IIBv-Tv	1,44	0,56	0,66	7,14	13,24	15,99	60,97	2,66	36,37	60,97	7,1	3,24	2,37	n.b.
UW 3-3	19/96	IITv-Cv ₁	1,49	0,75	0,75	4,91	15,30	14,04	62,76	2,99	34,25	62,76	7,2	15,53	0,00	n.b.
UW 3-4	19/97	IITv-Cv ₂	0,88	0,62	1,12	6,70	13,52	17,33	59,83	2,63	37,55	59,83	7,3	19,52	0,00	n.b.

Tabelle 36: Laborwerte Profil UW 3.

Der pH-Wert im Profil UW 3 liegen zwischen 6,5 im Ah-Horizont und 7,3 im IITv-Cv₂-Horizont und nehmen mit der Tiefe kontinuierlich zu (s. Tabelle 36). Der Carbonatgehalt im Profil UW 3 nimmt mit der Tiefe zu und liegt zwischen 3,24 % (schwach carbonathaltig) im IIBv-Tv-Horizont und 19,52 % (carbonatreich) im IITv-Cv₂-Horizont. Der Ah-Horizont ist carbonatfrei.

Humus findet sich im Profil UW 3 nur in den zwei oberen Horizonten. Der Ah-Horizont ist „sehr stark humos“, während der IIBv-Tv-Horizont nur noch „mittel humos“ ist. Die Horizonte IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ sind „humusfrei“.

Der kf-Wert konnte nur für den Ah-Horizont ermittelt werden. Die hydraulische Leitfähigkeit ist „extrem hoch“. Auf Grund des hohen Grobbodenanteils konnte aus den Horizonten IIBv-Tv, IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ kein Stechzylinder entnommen werden.

Horizont- nummer	Horizont	Labor- nummer	TRD ρ_t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
UW 3-1	Ah	-	1,08	1,34 (UW 1-1)	Ld 2	51,0	23,0	20,0	97,6 mittel
UW 3-2	IIBv-Tv	-	1,00	1,34 (UW 1-1)	Ld 2	49,5	18,5	17,0	
UW 3-3	IITv-Cv ₁	-	1,34	1,69 (UW 2-3)	Ld 3	42,2	12,2	7,2	
UW 3-4	IITv-Cv ₂	-	1,35	1,69 (UW 2-3)	Ld 3	42,0	12,0	7,0	

Tabelle 37: Bodenphysikalische Kennwerte Profil UW 3.

Auf Grund des hohen Grobbodenanteils konnte kein Stechzylinder zur Messung der TRD entnommen werden. Die TRD wurde auf Basis der Ld vergleichbarer Horizonte nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und FK, nFK und LK wurden abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Mit der Tiefe nimmt die Trockenrohdichte ρ_t von „sehr gering“ auf „gering“ zu (s. Tabelle 37). Parallel dazu nimmt auch die effektive Lagerungsdichte von „gering“ auf „mittel“ zu. Die FK ist im Ah- und IIBv-Tv-Horizont „sehr hoch“, im IITv-Cv₁- und IITv-Cv₂-Horizont „hoch“. Die nFK nimmt mit der Tiefe deutlicher von 23 Vol.-% (hoch) im Ah-Horizont auf 12 Vol.-% (gering) im IITv-Cv₂-Horizont ab. Parallel dazu nimmt auch die LK von „hoch“ auf „mittel“ ab. Die nFKWe des Profils ist mit 97,6 l/m² „mittel“.

5.4.3 Profil- und Standortanalyse

Profilanalyse UW 1

Beim Profil UW 1 handelt es sich um eine Braunerde-Terra fusca mit der Horizontfolge Ah-Bv/Bv-Tv/IITv-Cv₁/IITv-Cv₂. Der Substratwechsel im Profil entspricht einer Einteilung in Haupt- und Basislage.

Ah-Bv- und Bv-Tv-Horizont werden der Hauptlage zugerechnet, weil sie einen deutlich höheren Schluffanteil haben, carbonatfrei bzw. schwach carbonathaltig sind und keine bzw. deutlich weniger Kalksteine aufweisen. Die Bodenentwicklung verlief in der Hauptlage stärker als in der Basislage.

Der hohe Humusgehalt des Ah-Bv-Horizonts spricht für eine intensive Bioturbation, in deren Folge der Horizont entkalkt und schwach sauer wurde (STAHR et al., 2020). Die Ausbildung eines Subpolyedergefüges im Ah-Bv-Horizont ist ein Produkt dieser Bodenentwicklung. Im Bv-Tv-Horizont ist die Bodenentwicklung nicht so weit fortgeschritten wie im Ah-Bv-Horizont. Die Entkalkung ist hier noch nicht abgeschlossen. Gegenüber den Horizonten der Basislage wurde die Bodenentwicklung und insbesondere die Entkalkung durch den höheren Schluffanteil, welcher sich in einer besseren Durchlässigkeit ausdrückt, in den beiden Horizonten befördert (HEMPEL 1955:86 zit. in BULLMANN, 2011; BULLMANN & HEINRICH, 2013). Auf Grund von Hanglage und Oberflächenerosion handelt es sich bei den Horizonten Ah-Bv und Bv-Tv wahrscheinlich nur um den Rest einer Hauptlage. In tonigem Material sind Hauptlagen ca. 40 cm mächtig, hier sind aber nur noch ca. 30 cm vorhanden (KLEBER & TERHORST, 2013).

Der IITv-Cv₁-Horizont entspricht als einziger Horizont dem Mindesttongehalt von 65 % für einen Tv-Horizont, wird aber als Tv-Cv-Horizont bezeichnet, da er nicht frei von Primärcarbonat (Kalksteine) ist (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Auf den Bruchkanten der Gefügapolyeder waren deutlich Toncutane zu erkennen, was auf eine Tonverlagerung entlang von Gefügegrenzen, Trockenrissen und Wurzelröhren hinweist. Der mittlere Humusgehalt im IITv-Cv₁-Horizont ist vermutlich auf Wurzeln in der Probe zurückzuführen.

Der IITv-Cv₂-Horizont fällt durch einen hohen Sandanteil von 11,07 % auf. Der hohe Grobsandanteil lässt vermuten, dass es sich hierbei um Kalksteinverwitterungsschutt handelt. Dieser ist durch die noch nicht so weit fortgeschrittene Lösungsverwitterung zu erklären. Je geringer die Korngröße ist, desto besser kann die Lösungsverwitterung an der größeren Oberfläche angreifen (BULLMANN, 2011). Auf Grund der Hanglage ist davon auszugehen, dass es sich bei IITv-Cv₁- und IITv-Cv₂-Horizont um solifluidal umgelagertes parautochthones Bodenmaterial handelt.

Trotz der sehr hohen Tongehalte und dichten Lagerung sind die kf-Werte im Profil UW 1 extrem hoch. Dies ist auf die vielen Gesteinsfragmente und das polyedrische Gefüge und die damit verbundenen zahlreichen präferentiellen Fließwege zurückzuführen. Insbesondere im trockenen Zustand entstehen viele feine Schwundrisse und es bilden sich mittel- bis grobpolyedrische Bodenaggregate (BULLMANN, 2011)

Profilanalyse UW 2

Beim Profil UW 2 handelt es sich um eine Braunerde-Terra fusca mit der Horizontabfolge Ah/Bv-Tv/IIBv-Tv/IIITv-Cv. Das Profil UW 2 befindet sich im ehemaligen Talboden und damit in einer Akkumulationsposition sowohl für Bodenmaterial als auch für Wasser. Durch solifluidale Verlagerung hat sich im Profil UW 2 neben Haupt- und Basislage eine Mittellage gebildet und erhalten. Ah- und Bv-Tv-Horizont werden der Hauptlage, der IIBv-Tv-Horizont der Mittellage und der IIITv-Cv-Horizont der Basislage zugeordnet.

Die Bodenentwicklung der Braunerde-Terra fusca im Profil UW 2 ist von allen drei Profilen am tiefgründigsten fortgeschritten. Ah- und Bv-Tv-Horizont sind entkalkt und frei von Primärcarbonat. Der IIBv-Tv-Horizont ist sehr carbonatarm weist aber noch einzelne stark lösungsverwitterte gerundete Kalksteine auf (weißer CaCO₃-Überzug des grauen Muschelkalks). Die drei obersten Horizonte sind bereits deutlich im sauren pH-Bereich. Ihr Grobgefüge ist als Subpolyedergefüge ausgeprägt, das Feingefüge wird mit der Tiefe zunehmend polyedrischer. Die hohen, mit der Tiefe abnehmenden Humusgehalte weisen auf eine intensive Humusanreicherung hin. Anhand der dunkleren Bodenfarbe kann auf eine stärkere, vertikal in situ fortschreitende Verbraunung von Bv-Tv- und IIBv-Tv-Horizont geschlossen werden (BULLMANN, 2011: 183).

Auf Grund der Lage im Talboden und dem stark eingeschnittenen Saugraben ist davon auszugehen, dass im Liegenden des IIITv-Cv-Horizonts noch weitere Horizonte aufgeschlossen werden können. Beim IIITv-Cv-Horizont handelt es sich vermutlich nur um den oberen Teil einer Basislage. Auf eine parautochthone Basislage weisen die nicht eingeregelteten Kalksteine im IIITv-Cv-Horizont hin. Diese sind nur an ihrer Oberseite erkennbar lösungsverwittert, während die Seiten scharfkantig sind. An Bruchflächen von Handstücken sind großflächige Rostflecken erkennbar. Der Tonanteil im IIITv-Cv-Horizont ist der höchste im Profil.

Die Basislage (IIITv-Cv) besteht aus autochthonem Bodenmaterial. Der deutlich höhere Schluffanteil im hangenden IIBv-Cv-Horizont (Mittellage) weist auf den Eintrag von äolischem Material hin. Vermutlich handelt es sich bei der Mittellage um parautochthones Bodenmaterial in welches der Löss, während der solifluidalen Umlagerung eingearbeitet wurde. Darauf weisen die einzelnen

Kalksteine im IIBv-Tv-Horizont hin. Die Hauptlage unterscheidet sich hier von der Mittellage durch die unterschiedlichen Schluffanteile. Der sehr hohe Schluffanteil der beiden oberen Horizonte macht einen Lössseintrag wahrscheinlich. Durch die Kalkverwitterung bleibt überwiegend Ton übrig (AMELUNG et al., 2018:44). Die nur im Bv-Tv-Horizont zu findenden gelblichbraunen Flecken (10YR 5/6) weisen auf eine deutlich nach dem IIBv-Tv-Horizont erfolgte Akkumulation hin. Der Sedimentation von Mittel- (IIBv-Tv) und Hauptlage (Ah/Bv-Tv) muss jeweils eine Erosionsphase oder der Abbau von Humus vorangegangen sein, da sich keine Anzeichen eines fossilen Ah-Horizonts finden.

Profilanalyse UW 3

Das Profil UW 3 ist eine Braunerde-Terra fusca mit der Horizontabfolge Ah/IIBv-Tv/IITv-Cv₁/IITv-Cv₂/IImcC. Beim Ah-Horizont handelt es sich auf Grund des hohen Schluffanteils um den Rest einer Hauptlage. Die darunter folgenden Horizonte IIBv-Tv, IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ sind Teil einer allochthonen Basislage. Darauf weist auch der unterhalb des IITv-Cv₂-Horizont anstehende IImcC-Horizont hin. Die Unterscheidung in Haupt- und Basislage wurde nicht nur anhand der Korngröße, sondern auch am Carbonatgehalt festgemacht. Der Ah-Horizont ist carbonatfrei und folglich sehr schwach sauer. Das gut ausgeprägte Subpolyederggefüge weist auf eine intensive Bodenbildung hin. Durch die fortgeschrittene Bodenentwicklung des Ah-Horizonts ist auch die Entkalkung und Verbraunung im IIBv-Tv-Horizont fortgeschritten. Der Bodenentwicklungsvorsprung des Ah-Horizont vor dem IIBv-Tv-Horizont ist auf den höheren Schluffgehalt und den dadurch ausgelösten Selbstverstärkungsprozess der Lösungsverwitterung zurückzuführen (BULLMANN, 2011). Gegenüber den Horizonten IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ ist der IIBv-Tv-Horizont stärker entkalkt, verbraunt und weist bereits ein Subpolyederggefüge auf. Die geringen Korngrößenunterschiede können durch Perkolation und Verschleppung von Bodenteilchen hervorgerufen worden sein.

Die Horizonte IIBv-Tv, IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ sind in ihrer Korngrößenzusammensetzung den Horizonten IITv-Cv₁ und IITv-Cv₂ des Profils UW 1 sehr ähnlich. Gleiches gilt für den Ah-Horizont von Profil UW 3 und den Horizont Ah-Bv von Profil UW 1.

Die Wasserleitfähigkeit des Ah-Horizonts ist extrem hoch. Auf Grund der sehr ähnlichen Korngrößenverteilung und der geringen Distanz der Profile sind auch die kf-Werte für die unteren Horizonte von Profil UW 1 auf Profil UW 3 übertragbar.

Standortanalyse Uniwald

Der Monitoringsstandort Uniwald ist ein für den Naturraum „Hesselbacher Waldland“ typischer Standort. Im Uniwald finden sich große Reliefunterschiede, unterschiedliche geologische Ausgangsgesteine und eine lange anthropogene Nutzung, was eine hohe bodenkundliche Diversität zur Folge hat (ZUCKER, 2022).

Die vorgefundenen Braunerde-Terrae fusca zeugen von einer lang andauernden Boden- und Landschaftsentwicklung mindestens seit dem Pleistozän (BULLMANN, 2011; KLEBER & TERHORST, 2013). Terrae fusca zählen zu den natürlichen Böden, welche sich auf Muschelkalk entwickeln. Durch die geschützte Reliefposition des alten Talbodens oberhalb des Saugraben und der vorrangigen forstlichen Nutzung des Hesselbacher Waldlands, blieben die Terrae fusca-Reste hier sehr gut erhalten.

Als Waldstandort ist der Uniwald und damit auch die Umgebung des Saugraben gut geeignet. Die Braunerde-Terrae fusca weisen zwar eine mittlere bis hohe Lagerungsdichte und einen sehr hohen Tongehalt auf, gleichzeitig aber auch eine extrem hohe Wasserleitfähigkeit. Dies ist auf das gut ausgeprägte Polyedergefüge, den hohen Grobbodenanteil und die Klüfte im anstehenden Muschelkalk zurückzuführen. Die Toncutane auf den Bruchflächen des Polyedergefüges (s. Tabelle 29: Horizont IITv-Cv₁, UW 1-3) sind Zeugen dieser präferentiellen Fließwege. Die Klüfte im anstehenden Muschelkalk führen das Bodenwasser weiter nach unten ab. Polyedergefüge im Boden und Klüftigkeit des Gesteins verhindern so eine Stauwasserbildung (BULLMANN, 2011; REHFUESS, 1990).

Die hohen Ton- und Schluffanteile sorgen zwar für eine hohe FK, allerdings ist auch der Totwasseranteil hoch, was die nFK deutlich einschränkt so dass die nFKWe aller Profile nur „mittel“ ist (Bayerisches Landesamt für BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022j). Bei sehr lang anhaltender Trockenheit besteht auf Grund des hohen Tongehalts außerdem die Gefahr von Trockenrissen. Die Trockenrisse haben die Wurzelzerreiung von Feinwurzeln zur Folge, was die Nährstoff- und Wasseraufnahme für die Pflanzen zusätzlich erschwert.

Die Wasserversorgung der Pflanzen ist auf Grund des großen Grundwasserabstands (über 2 m) von regelmäßigen Niederschlägen abhängig. Niederschläge können dank der hohen Wasserleitfähigkeit schnell aufgenommen werden. Wegen der guten Durchlässigkeit werden allerdings nicht alle Niederschläge im Boden gespeichert.

5.5 Oberrimbach

5.5.1 Standortüberblick

5.5.1.1 Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort Oberrimbach liegt zentral im Naturraum 115 „Steigerwald“, welcher Teil der Naturraum-Haupteinheit D59 „Fränkisches Keuper-Lias-Land“ ist. Der Steigerwald kann nochmals in einen südlichen bzw. vorderen, mittleren und nördlichen Steigerwald untergliedert werden. (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, o.J.; HABBE, 2003). Der Steigerwald mit seinem Vorland stellt auch kulturlandschaftlich einen eigenen Raum dar (REH & BLUM, 2011e).

Der Steigerwald grenzt sich vom westlich gelegenen Steigerwaldvorland (Naturraum 137) durch den Steigerwaldtrauf mit bis zu 250 m Höhenunterschied ab. Nach Osten fällt die flach geneigte Abdachung des Steigerwalds von ca. 450 m bis 500 m NHN auf ca. 300 m NHN zum Regnitztal ab (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1991; REH & BLUM, 2011e). Charakteristisch für den Steigerwald ist die Gliederung der Landschaft in Hochflächen und Täler durch die zur Regnitz hin entwässernden Bäche. Die langgestreckten Höhenzüge sind in der Regel bewaldet, während die Talböden landwirtschaftlich genutzt werden (EMMERT, 1965; HABBE, 2003; REH & BLUM, 2011e). Die Höhenzüge sind durch viele Nebentäler in fiederförmige Riedelrücken untergliedert (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1991). Im Süden wird der Steigerwald durch das Einzugsgebiet der Aisch begrenzt (HABBE, 2003).

Der Monitoringstandort befindet sich im Fürstl. Castell'schen Forstrevier Oberrimbach, ca. 800 m südlich der Ortschaft Appenfelden (s. Abbildung 48). Der Naturraum wird der Untereinheit 115.1 „Mittlerer Steigerwald“ zugeordnet (HABBE, 2003). Die Hochfläche bzw. der Riedel südlich von Appenfelden ist ein fingerartig bzw. fiederförmig nach Osten auslaufender Rücken, welcher im Norden durch das Tal des Appenbachs und im Süden durch den Haselbach begrenzt wird. Beide Bäche vereinigen sich bei Oberrimbach zum Rimbach, welcher schließlich über Haslach, Reiche Ebrach und Regnitz in den Main entwässert. Der höchste Punkt des Höhenrückens befindet sich ca. 1 km westlich des Untersuchungsgebiets in der Nähe des „Roten Kreuz“ auf 465 m NHN und ist damit etwa so hoch wie die Schichtstufe im Westen. Nach Osten fällt das Gelände um ca. 3° bis 5° ein. Entlang der Forststraße verläuft ein ca. 80 m breiter, flacher Rückenriffel. Dieser fällt im Süden auf kurzer Distanz um ca. 5 m ab und geht in eine Hochfläche mit sehr geringer Hangneigung über. Die Hänge des Rückenriffels sind insbesondere am Oberhang steil und werden am Unterhang flacher. Die Bodenprofile befinden sich auf der Südseite des Rückenriffels, welcher hier noch 440 m NHN misst. Die Plateaukante liegt auf einer Höhe von 425 m NHN. Von hier fällt das Gelände in das kleine Seitentälchen „Binsenschlag“ bis auf ca. 380 m NHN ab. Der Höhenrücken wird im Süden durch das

Tal „Würzburger Loch“ begrenzt, welches noch bis auf etwa 359 m NHN abfällt. Südlich des „Würzburger Lochs“ reicht mit dem „Schloßberg“ ein weiterer fingerartiger Höhenrücken nach Osten. Das „Würzburger Loch“ entwässert zunächst als Trockental, bevor es bei ca. 359 m NHN in den nördlichen Quellbach des Haselbachs mündet. Diese nördliche Quelle entspringt etwa 500 m östlich des Monitoringstandorts am Hangfuß des Höhenrückens auf ca. 369 m NHN (LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG, 2023).

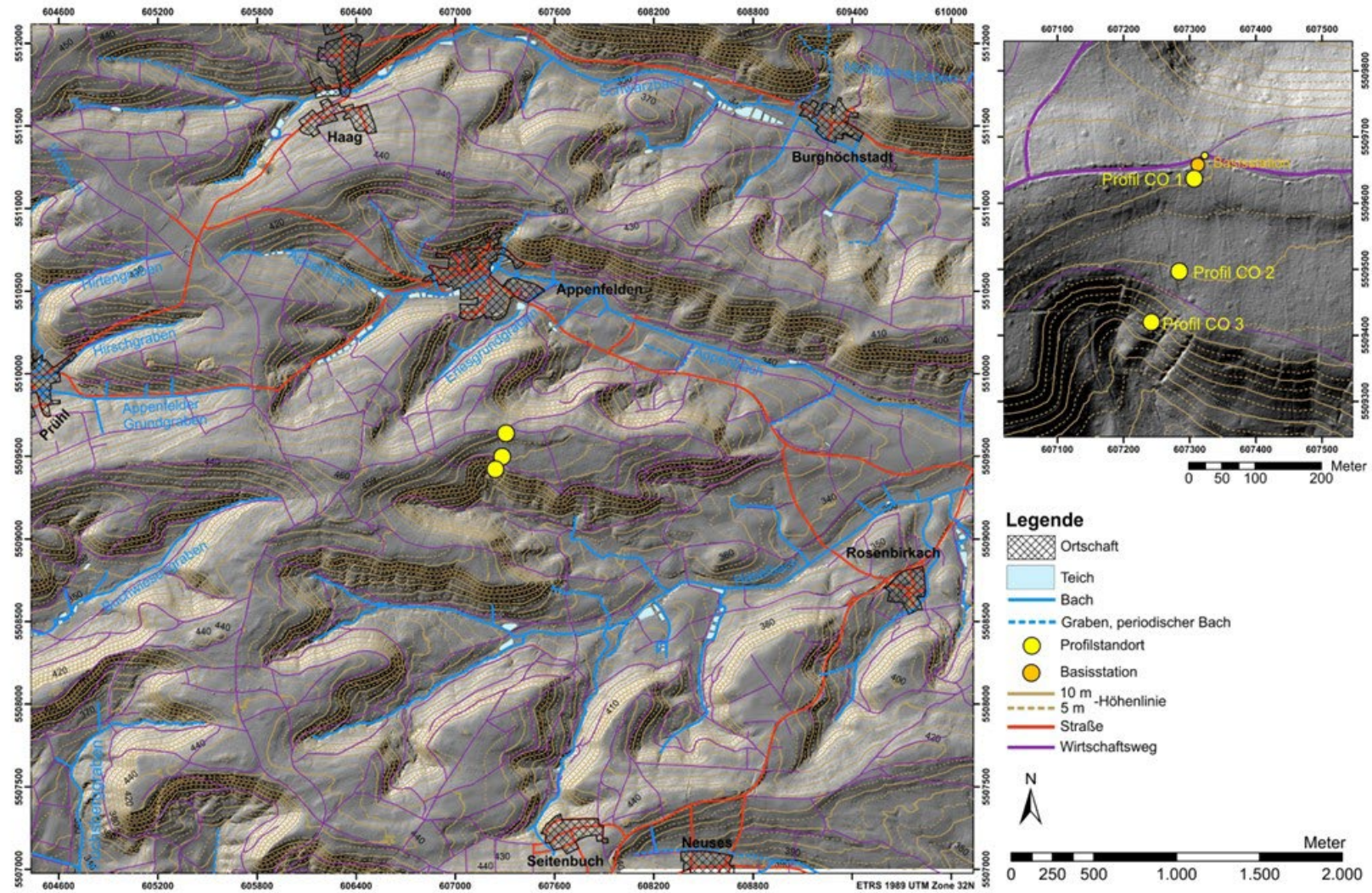


Abbildung 48: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Oberrimbach. Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

5.5.1.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet Oberrimbach befindet sich zentral im Steigerwald und geologisch somit im Mittleren Keuper (s. Abbildung 49). Der Untere Keuper steht auf den Mainfränkischen Platten – hier zum Teil durch Löss überdeckt – und im Steigerwaldvorland sowie am Fuß der Steigerwaldschichtstufe an. Der Obere Keuper findet sich im Steigerwald – bedingt durch das Einfallen der Schichten um 1° bis 2° - nur im Osten zwischen Hirschaid und Forchheim unmittelbar westlich der Regnitz und wird hier bereits von Unterem Jura überlagert. Großflächiger tritt der Obere Keuper nur im unmittelbaren Vorland der Fränkischen Alb auf (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1996b; HAARLÄNDER, 1969).

Der Hangfuß der breiten Täler von Appenbach und Haselbach wird vom Schilfsandstein (kmS, Stuttgart-Formation) gebildet. Die Talböden werden von einer polygenetischen Talfüllung gebildet, welche die Bäche als schmales Band begleiten. Am Talschluss der kleinen Seitentäler des Appenbachs besteht der Talboden aus pleistozänen Fließerden. Entlang des Haselbachs sind diese Fließerden auch Gerölle führend und überlagern hier zum Teil auch den Hangfuß. Im Untersuchungsgebiet steht der olivgrüne (selten bräunlich/rötliche) Schilfsandstein (kmS) bis in eine Höhe von etwa 376 m NHN an. Auf Grund des Schichteinfallens nimmt diese Höhenlage nach Osten hin ab. Den oberen Abschluss des Schilfsandsteins bildet südlich von Appenfelden eine etwa 5 cm mächtige, gelbe Karbonatschieferlage (EMMERT, 1965, 2022). Im Hangenden wird der Schilfsandstein von den roten Tonsteinen der Lehrbergschichten (kmL, Steigerwald-Formation) überlagert. Im Untersuchungsgebiet haben die Lehrbergschichten eine Mächtigkeit von ca. 27 m und reichen bis in eine Höhe von 402 m NHN. Den oberen Abschluss der Lehrbergschichten bilden die drei Steinmergellagen der Lehrbergbänke, welche im Abstand von 1 m bis 2 m aufeinander folgen. Zwischen den bis zu 30 cm mächtigen Lehrbergbänken und an deren Basis, findet sich blaugrüner bis grauer Tonstein. Überlagert werden die Lehrbergbänke wieder durch roten Tonstein, welcher aber bereits dem Blasensandstein i. e. S. (kmBL, Hassberge-Formation) zugeordnet wird. Dieser 6 m bis 9 m mächtige basale Tonstein des Blasensandsteins unterscheidet sich nicht von dem der Lehrbergschichten. Etwa 1 m unterhalb der ersten Sandsteinbank geht die rötliche Farbe in ein Blau-Grün über (EMMERT, 1965). Auf der Geologischen Karte von 1964 (EMMERT, 1964) ist der basale Tonstein noch gesondert auskartiert, in der neuen digitalen Geologischen Karte wurde er gänzlich dem Blasensandstein zugeordnet (EMMERT, 2022). Über dem basalen Tonstein folgt eine ca. 25 m mächtige Wechselfolge von Sand- und Tonsteinen, so dass der Blasensandstein (kmBL) eine Gesamtmächtigkeit von etwa 30 m bis 35 m aufweist (EMMERT, 1965). Er bildet damit die Hochfläche des Riedels im Untersuchungsgebiet, aber auch auf den umliegenden Höhenzügen. Die mittel- bis feinkörnigen Sandsteine des Blasensandsteins sind weiß, rötlich- oder gelbgrau und häufig mit schwarzen Mangantupfen bedeckt (s. Abbildung 50). In den Sandsteinen finden sich die namensgebenden

zentimetergroße grün-weißliche Steinmergelknollen (s. Abbildung 51) (EMMERT, 1965; HAARLÄNDER, 1969).

Westlich der Monitoringstation wird der Blasensandstein vom 5 m bis 6 m mächtigen Coburger Sandstein (kmC, Hassberge-Formation) überlagert. Dieser mittelkörnige Sandstein ist hellgrau bis weiß, zum Teil mit kleinen braunen Flecken. Der Coburger Sandstein (kmC) ist auf Grund von Faziesübergängen nur schwer vom liegenden Blasensandstein unterscheidbar und stellenweise im Gelände durch Stufenbildung zu erkennen (EMMERT, 1965). Auf Grund der Geländestufe im Untersuchungsgebiet, könnte der Coburger Sandstein weiter nach Osten ausgreifen und im Profil CO 1 anstehen. Andererseits könnte die Geländestufe auch auf eine Sandsteinbank des Blasensandsteins zurückzuführen sein, da im Profil CO 1 im basalen Horizont noch Tonsteine anstehen. Der Coburger Sandstein (kmC) steht bis in eine Höhe von ca. 450 m NHN an. Der höchste Punkt des Riedels am „Roten Kreuz“ (465 m NHN), wird vom Unteren Burgsandstein (kmBU, Heldburg-Fazies, GK25 von 1964) bzw. den Heldburg-Schichten (kmH, Weser- bis Arnstadt-Formation) gebildet (EMMERT, 1964, 2022). Die Ton- und Sandsteinwechsellagen des Untere Burgsandstein (kmBU) stehen hier mit einer Mächtigkeit von etwa 16 m an (EMMERT, 1965).

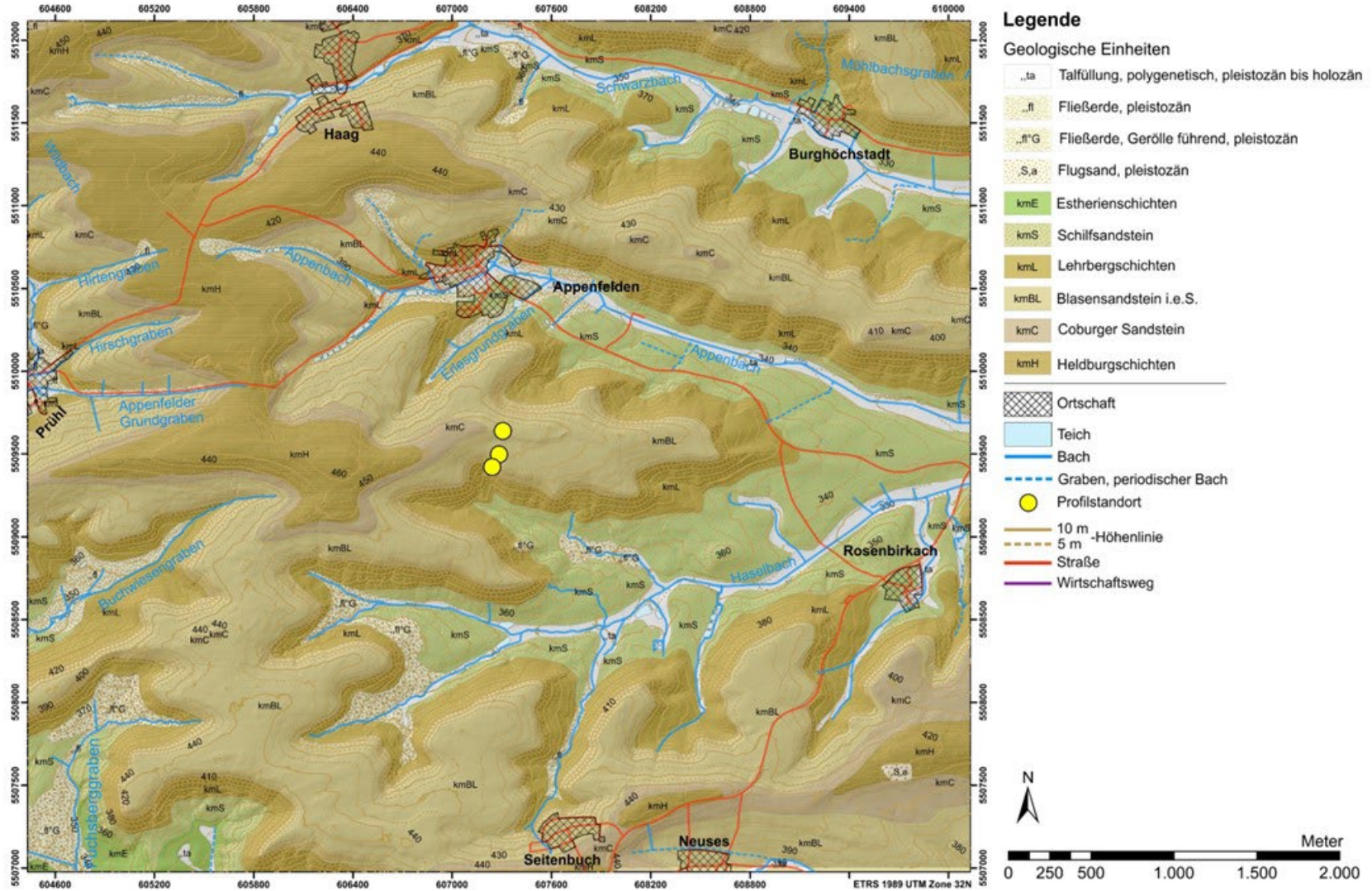


Abbildung 49: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Oberrimbach.

Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).



Abbildung 50: Blasensandstein mit schwarzen Mangantupfen. Handstück aus Profil CO 1. Im mittelkörnigen Sandstein sind die schwarzen Mangantupfen sehr deutlich erkennbar, Toneinschlüsse sind nicht erkennbar. Es könnte sich daher auch um einen Coburger Sandstein und nicht um einen Blasensandstein handeln. Quelle: eigene Aufnahme.



Abbildung 51: Blasensandstein mit charakteristischen zentimetergroßen grünweißlichen Toneinschlüssen. Handstück aus Profil VMK-II in ca. 35 cm Tiefe. Quelle: KAATSCH (2019).

5.5.1.3 Klima

Etwa 1,1 km nordwestlich der Monitoringstation, am Ortsrand von Appenfelden, betrieb der Deutsche Wetterdienst bis 2005 eine Niederschlagsmessstation (Stations-ID: 3721). Für die Klimareferenzperiode 1991 bis 2020 wurden die fehlenden Messwerte durch den DWD über Rasterdaten ergänzt.

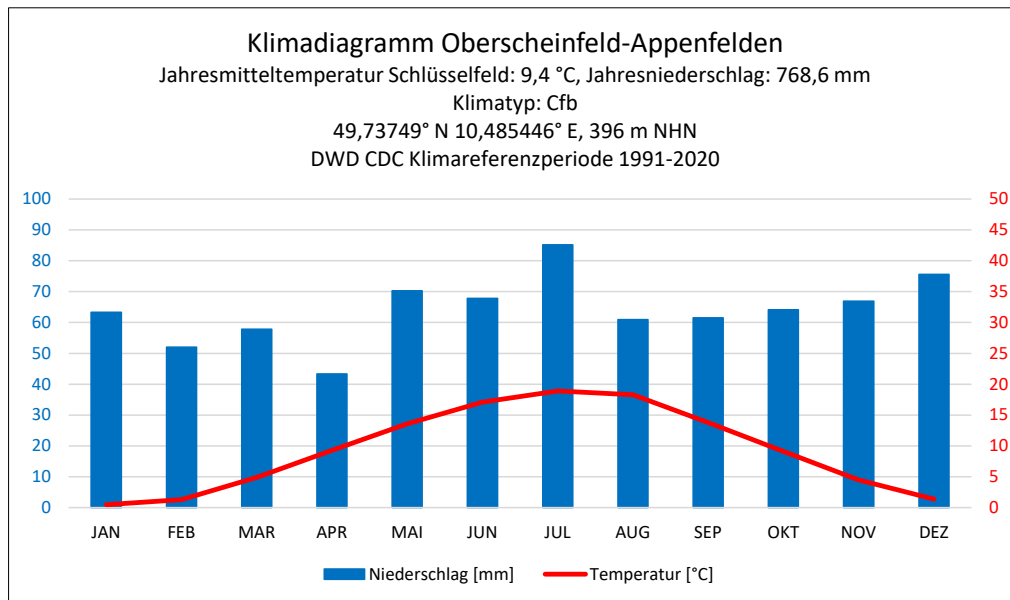


Abbildung 52: Klimadiagramm Oberscheinfeld-Appenfelden 1991-2020.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d), eigene Darstellung.

Für den Klimareferenzzeitraum 1991 bis 2020 liegen nur Niederschlagsdaten für Appenfelden vor. Im Klimadiagramm Oberscheinfeld-Appenfelden (Stations-ID: 807; s. Abbildung 52) wurden zusätzlich die Temperaturdaten von Schlüsselfeld (Kläranlage) für den Zeitraum 1991 bis 2020 verwendet. Diese sind auf Grund der geringen Distanz übertragbar, allerdings sind für Appenfelden auf Grund der höheren Lage und des kleineren Tals etwas niedrigere Temperaturen anzunehmen.

Die Klimastation Schlüsselfeld (Kläranlage) wies in der Klimareferenzperiode 1991 bis 2020 eine Jahresmitteltemperatur von 9,4 °C auf. Die kältesten Monate waren Dezember bis Februar, mit dem Temperaturminimum von 0,5 °C im Januar. Die höchsten Temperaturen wurden in den Monaten Juni bis August, mit dem Temperaturmaximum von 18,9 °C im Juli, gemessen.

Das Klima in Appenfelden ist ganzjährig humid. Im Zeitraum 1990 bis 2020 lag der Jahresniederschlag bei 768,6 mm. Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis Juli, mit einem deutlichen Maximum von 85,2 mm im Juli. Im August gehen die Niederschläge deutlich auf 60,9 mm zurück und steigen bis November geringfügig an. Der Dezember bildet mit 75,6 mm ein sekundäres Niederschlagsmaximum. Ab Januar gehen die Niederschläge zurück und erreichen im April mit 43,3 mm das Minimum.

Abweichend davon nehmen die Niederschläge im März kurzzeitig zu. Der Klimatyp von Appenfelden ist Cfb (PEEL et al., 2007).

Gegenüber der Klimareferenzperiode 1981 bis 2010 nahmen die Jahresniederschläge in Appenfelden von 845 mm um 76,4 mm auf nun 768,6 mm ab. Besonders in den Monaten März, April und Juni nahmen die Niederschläge um über 10 mm ab. Weitere deutliche Niederschlagsrückgänge waren in den Monaten September (- 8,5 mm), Oktober (- 6,9 mm) und Dezember (- 7,4 mm) zu verzeichnen (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022e).

Die Jahresmitteltemperatur von Schlüsselfeld nahm im gleichen Zeitraum um 0,6 °C von 8,8 °C auf 9,4 °C zu. Auch die Jahresniederschläge gingen hier um 32,3 mm auf 680,7 mm zurück (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022e).

5.5.2 Bodengeographische Analysen Oberrimbach

5.5.2.1 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 1

Geländedaten

Das Profil CO 1 ist eine Braunerde und befindet sich auf dem Plateau des Geländerückens in einer Höhe von 440 m NHN (s. Abbildung 48). Die Profilwand ist nach Osten ausgerichtet und weist auf der linken Seite eine Höhe von 90 cm und auf der rechten Seite von 78 cm auf. Das Profil befindet sich unter einem Laubmittelwald mit sehr wenig Unterholz. Etwa 5 m südlich befindet sich das Profil VMK-II, welches 2019 als Ergänzung angelegt wurde (KAATSCH, 2019).

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
CO 1-1	Ah	6 - 20	w, z, sc, h	10YR 3/2	Sl4	ein	-	LH-Rest
CO 1-2	Bv ₁	41 - 40	w, z, di/de, h	10YR 6/4	Sl3	ein, kit	-	LB1u
CO 1-3	Bv ₂	55 - 64	w, de/sc, h/g	10YR 5/4	Sl3	ein, kit	sehr dicht, viele Steine bis mehrere cm d	LB1u
CO 1-6	Bv ₂ -IICv-P	60 - 65	w, de, g	10YR 5/4	Ls4	ein, kit	-	LB2u
CO 1-4	IICv-P	90 - 78	-	2,5Y 7/2	Lts	pol	gräulicher Ton	
CO 1-5				5YR 5/3	Lts	pol	rötlicher Ton	

Tabelle 38: *Geländedaten Profil CO 1.*

Braunerde auf Blasensandstein. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das untersuchte Bodenprofil lässt sich in fünf Horizonte unterteilen (s. Abbildung 53 und Tabelle 38). Der obere Ah-Horizont besteht aus bis zu 20 cm mächtigem humosem Material. Es handelt sich um einen sehr dunklen gräulichbraunen stark lehmigen Sand. Der Horizont ist durchwurzelt, locker gelagert und besitzt ein Einzelkorngefüge. Die scharfe Grenze zum darunterliegenden Bv₁-Horizont ist wellig mit zwei Taschen und nach rechts geneigt. Der mittel lehmige Sand des Bv₁-Horizonts weist eine leicht gelblichbraune Farbe auf. Der Bv₁-Horizont reicht bis in eine Tiefe von 41 cm und die untere Horizontgrenze ist wellig bis taschenförmig ausgeprägt, deutlich bis diffus erkennbar und verläuft horizontal. Der Bv₂-Horizont reicht bis in eine Tiefe von 55 cm bis 64 cm. Der gelblichbraune mittel lehmige Sand weist ein Einzelkorn- bis Kittgefüge auf und ist dichter gelagert als der Bv₁-Horizont. Außerdem finden sich hier viele Sandsteine mit Durchmessern von mehreren Zentimetern. Die untere wellige Horizontgrenze des Bv₂ ist deutlich bis scharf erkennbar und verläuft in leicht geneigter Lage. Der Übergangshorizont Bv₂-IICv-P unterscheidet sich vom Bv₂-Horizont durch einen stark sandigen Lehm, die gelblichbraune Farbe sowie das Gefüge sind jedoch gleich. Die wellige, deutlich erkennbare Grenze des Bv₂-IICv-P-Horizonts, verläuft leicht geneigt in einer Tiefe von 60 cm bis 65 cm. Den unteren Abschluss des Profils bildet der IICv-P-Horizont, welcher bis in eine Tiefe von 90 cm auf der linken und 78 cm auf der rechten Seite reicht. Der sandig-tonige Lehm weist ein Polyedergefüge auf und ist sehr dicht gelagert. Der IICv-P-Horizont weist große leicht graue Flecken auf, welche sich deutlich von der rötlichbraunen Grundfarbe abheben. Im gesamten Horizont sind

hellrostfarbene Rostflecke zur erkennen. Zum Zeitpunkt der Profilaufnahme war das gesamte Profil trocken.

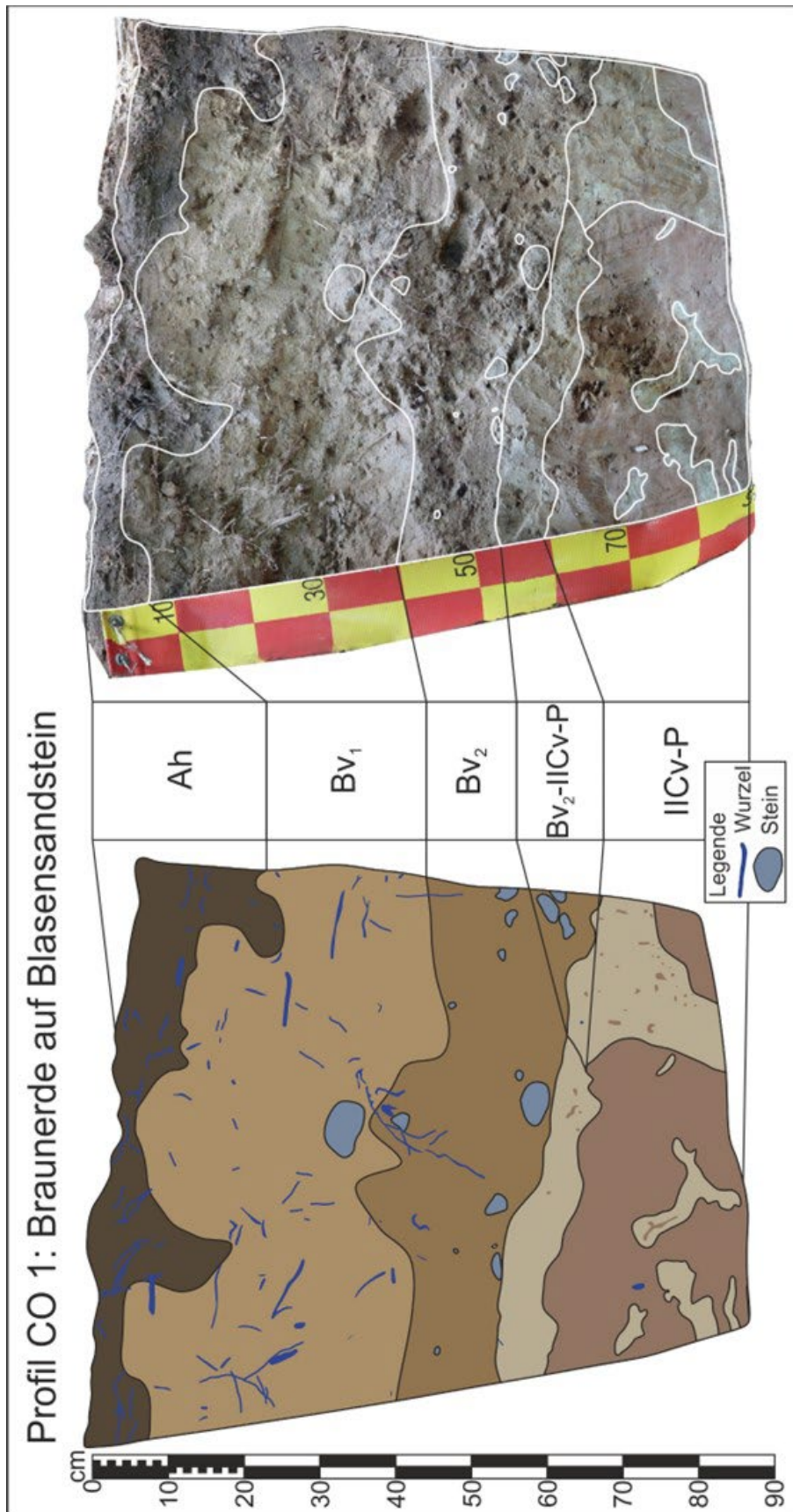


Abbildung 53: Profilzeichnung Profil CO 1.
Braunerde auf Blasen sandstein. Das Profil CO 1 befindet sich auf dem Plateau des Geländerrückens in ca. 440 m NHN.
Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

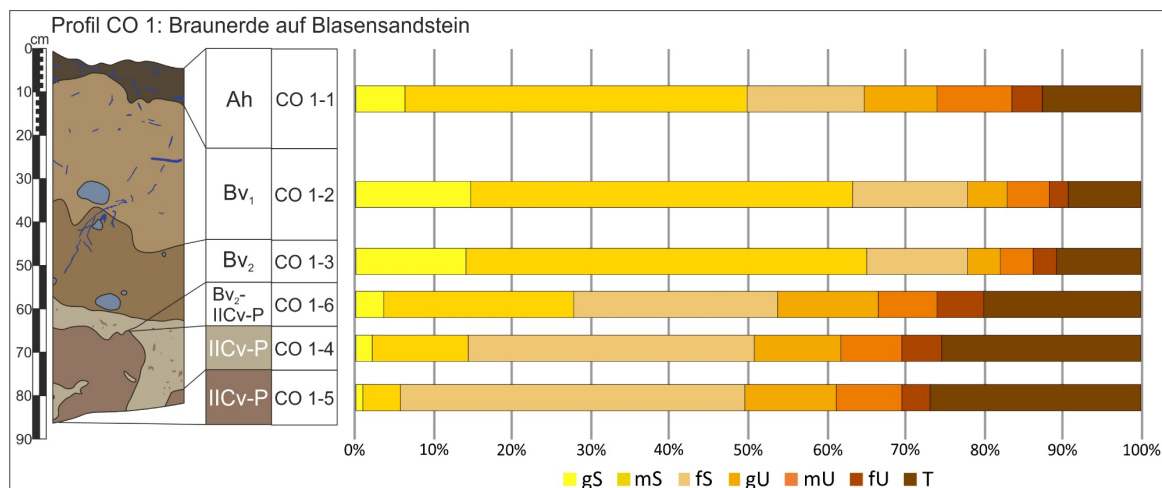


Abbildung 54: Korngrößenendiagramm Profil CO 1.

Quelle: eigene Darstellung.

Der Sandanteil im Profil CO 1 liegt zwischen 77,82 % im Bv₁-Horizont und 49,46 % im IICv-P-Horizont (CO 1-5) und nimmt mit der Tiefe ab (s. Abbildung 54 u. Tabelle 39). In den oberen drei Horizonten wird die Sandfraktion vom Mittelsand dominiert. Mit zunehmender Tiefe wird der Feinsand dominierend. Der Schluffanteil liegt zwischen 11,53 % im Bv₁-Horizont und 26,11 % im Bv₂-IICv-P-Horizont. Grob- und Mittelschluff haben in den oberen drei Horizonten die gleichen Anteile. In den basalen Horizonten wird der Grobschluff dominierend. Der Tonanteil nimmt mit der Tiefe zu und liegt zwischen 9,39 % im Bv₁-Horizont und 27,01 % im basalen IICv-P-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
CO 1-1	18/162	Ah	6,47	43,23	14,98	9,18	9,60	3,99	12,56	64,68	22,77	12,56	3,63	0,16	11,10	3,086 · 10 ⁻⁵
CO 1-2	18/163	Bv ₁	14,61	48,71	14,50	4,95	5,43	2,41	9,39	77,82	12,79	9,39	4,19	-	1,17	1,713 · 10 ⁻⁵
CO 1-3	18/164	Bv ₂	14,24	50,76	12,69	4,44	4,13	2,96	10,78	77,69	11,53	10,78	4,06	-	0,21	-
CO 1-6	18/167	Bv ₂ -IICn	3,60	24,16	26,09	12,60	7,56	5,95	20,04	53,85	26,11	20,04	3,83	-	0,23	-
CO 1-4	18/165	IICv-P	2,25	12,08	36,55	10,96	7,71	5,06	25,39	50,88	23,73	25,39	3,93	-	0,16	4,85 · 10 ⁻⁷
CO 1-5	18/166	IICv-P	0,87	5,03	43,55	11,84	8,14	3,56	27,01	49,46	23,54	27,01	3,94	0,19	0,55	

Tabelle 39: Labordaten Profil CO 1.

Aus dem Horizont IICv-P wurden zwei Proben entnommen. Zur einfacheren Zuordnung der Probenahme wurden die Horizonte farblich hinterlegt. Die k_f-Werte wurden aus dem Profil VMK-II übernommen (KAATSCH, 2019).

Die pH-Werte im Profil CO 1 liegen zwischen 3,63 (sehr stark sauer) und 4,19 (stark sauer) und schwanken im Tiefenverlauf leicht (s. Tabelle 39). Der Carbonatgehalt konnte nur für Ah- und IICv-P-Horizont (CO 1-5) bestimmt werden. Ah- und IICv-P-Horizont sind „sehr carbonatarm“, alle anderen Horizonte sind carbonatfrei.

Signifikante Humusgehalte treten mit 11,10 % im Ah-Horizont (sehr stark humos) und 1,17 % im Bv₁-Horizont (schwach humos) auf. Alle darunterliegenden Horizonte sind „sehr schwach humos“.

Die kf-Werte wurden vom Profil VMK-II für die Horizonte Ah, Bv₁ und IICv-P übernommen. Die hydraulische Leitfähigkeit von Ah- und Bv₁-Horizont wird als „sehr hoch“ eingestuft, die des basalen IICv-P-Horizonts als „sehr gering“ (AD-HOC-AG BODEN, 2005; KAATSCH, 2019).

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD pt [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
CO 1-1	Ah	18/168	1,01	1,09	Ld 1	45	28	25	103,9 mittel
CO 1-2	Bv ₁	18/169	1,93	1,99	Ld 5	22	11	9	
CO 1-3	Bv ₂	18/170	1,51	1,57	Ld 3	23	13	20	
CO 1-6	Bv ₂ -IICv-P	-	1,52	1,65	Ld 3	27	12	16	
CO 1-4	IICv-P	-	1,92 (CO 1-5)	2,08	Ld 5	zu hohe TRD, kein Tabellenwert			
CO 1-5	IICv-P	18/171	1,92	2,08	Ld 5	zu hohe TRD, kein Tabellenwert			

Tabelle 40: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 1.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die TRD der Horizonte Bv₂-IICv-P (CO 1-6) und IICv-P (CO 1-4) wurden von den ähnlichen Horizonten Bv₂ (CO 1-3) bzw. IICv-P (CO 1-5) übernommen. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohddichte ρ_t liegt zwischen 1,01 g/cm³ und 1,93 g/cm³ (s. Tabelle 40). Abgesehen vom Bv₁-Horizont nimmt die TRD und somit auch die effektive Lagerungsdichte Ld mit der Tiefe zu. Die Ld liegt zwischen „sehr gering“ im Ah-Horizont und „sehr hoch“ im Bv₁- und IICv-P-Horizont.

Die FK liegt zwischen 45 Vol.-% (hoch) im Ah-Horizont und 22 Vol.-% (gering) im Bv₁-Horizont. Die nFK nimmt unterhalb des Ah-Horizonts (28 Vol.-%, hoch) deutlich ab und darunter nur noch „gering“. Der Bv₁-Horizont weist mit 9 Vol.-% die geringste LK auf. Die anderen Horizonte haben eine „hohe“ LK, wobei sie mit der Tiefe abnimmt. Die nFKWe ist mit 103,9 l/m² „mittel“.

5.5.2.2 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 2

Geländedaten

Das Profil CO 2 ist eine Braunerde auf Blasensandstein und befindet sich am Rand des Plateaus am Übergang zur Hangschulter in einer Höhe von 430 m NHN (s. Abbildung 48). Es wurden die nach Norden und Westen ausgerichteten Profilwände aufgenommen und beprobt. Auf Grund von sehr großen Steinblöcken konnte die nördliche Profilwand nicht vollständig aufgenommen werden. Die Profilwände weisen eine Höhe von 80 cm auf. Das Profil befindet sich auf einer kleinen Lichtung in einem Mischwald, wobei Nadelbäume in der direkten Umgebung dominieren.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
CO 2-1	Ah	5 - 10	w,z,k, de, h	10YR 3/2	Sl4	ein, sub	-	
CO 2-2	Bv ₁	28 - 33	w, di, h	10YR 6/4	Sl4	ein, kit	-	LB1uv
CO 2-3	Bv ₂	40 - 52	w, de, h	10YR 7/3	Sl4	ein, kit	dichter als Bv ₁ , viele Steine	LB1uv
CO 2-4	IICv-P	75 - 80	-	2,5YR 4/4, Gley1 6/10Y; Rost 7,5YR 6/8	Tl	pol	sehr viele Rostflecken	

Tabelle 41: Geländedaten Profil CO 2.

Braunerde auf Blasensandstein. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil CO 2 konnte in vier Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 55 u. Tabelle 41). Der Ah-Horizont reicht bis in eine Tiefe von bis zu 10 cm. Der sehr dunkel gräulichbraune stark lehmige Sand weist als Grundgefüge ein Einzelkorngefüge und im Makrofeingefüge ein Subpolyederggefüge auf. Der Horizont ist stark durchwurzelt und locker gelagert. Die wellige bis zungenförmige Horizontgrenze ist deutlich erkennbar und verläuft in horizontaler Lage. Der darunterliegende Bv₁-Horizont besitzt eine leicht gelblichbraune Farbe auf und besteht ebenfalls aus einem stark lehmigen Sand. Das Gefüge stellt eine Mischung aus Einzelkorn- und Kitgefüge dar. Die wellige untere Horizontgrenze des Bv₁-Horizont verläuft in 28 cm bis 33 cm Tiefe, ist diffus erkennbar und in horizontaler Lage. Der darunter folgende Bv₂-Horizont unterscheidet sich vor allem durch die höhere Lagerungsdichte und die hohe Anzahl sehr großer Sandsteine (bis zu 50 cm im Nordprofil) vom Bv₁-Horizont. Die Bodenart des Bv₂-Horizonts entspricht ebenfalls einem stark lehmigen Sand mit einem Einzelkorn- und Kitgefüge, allerdings zeigt er eine sehr blassbraune Farbe. Die untere Horizontgrenze befindet sich in 40 cm bis 52 cm Tiefe, ist wellig, deutlich erkennbar und in horizontaler Lage. Den unteren Abschluss des Profils bildet der IICv-P-Horizont, welcher bis in eine Tiefe von 80 cm reicht. Mit dem Übergang vom Bv₂- zum IICv-P-Horizont findet ein Substratwechsel statt. Der IICv-P-Horizont besteht aus einem lehmigen Ton mit einer inhomogenen fleckigen Farbe aus rötlichbraun und grünlichgrau. Der lehmige Ton besitzt ein Polyederggefüge. Zahlreiche rötlichgelbe Rostflecke im IICv-P-Horizont weisen auf Stauwassereinfluss hin.

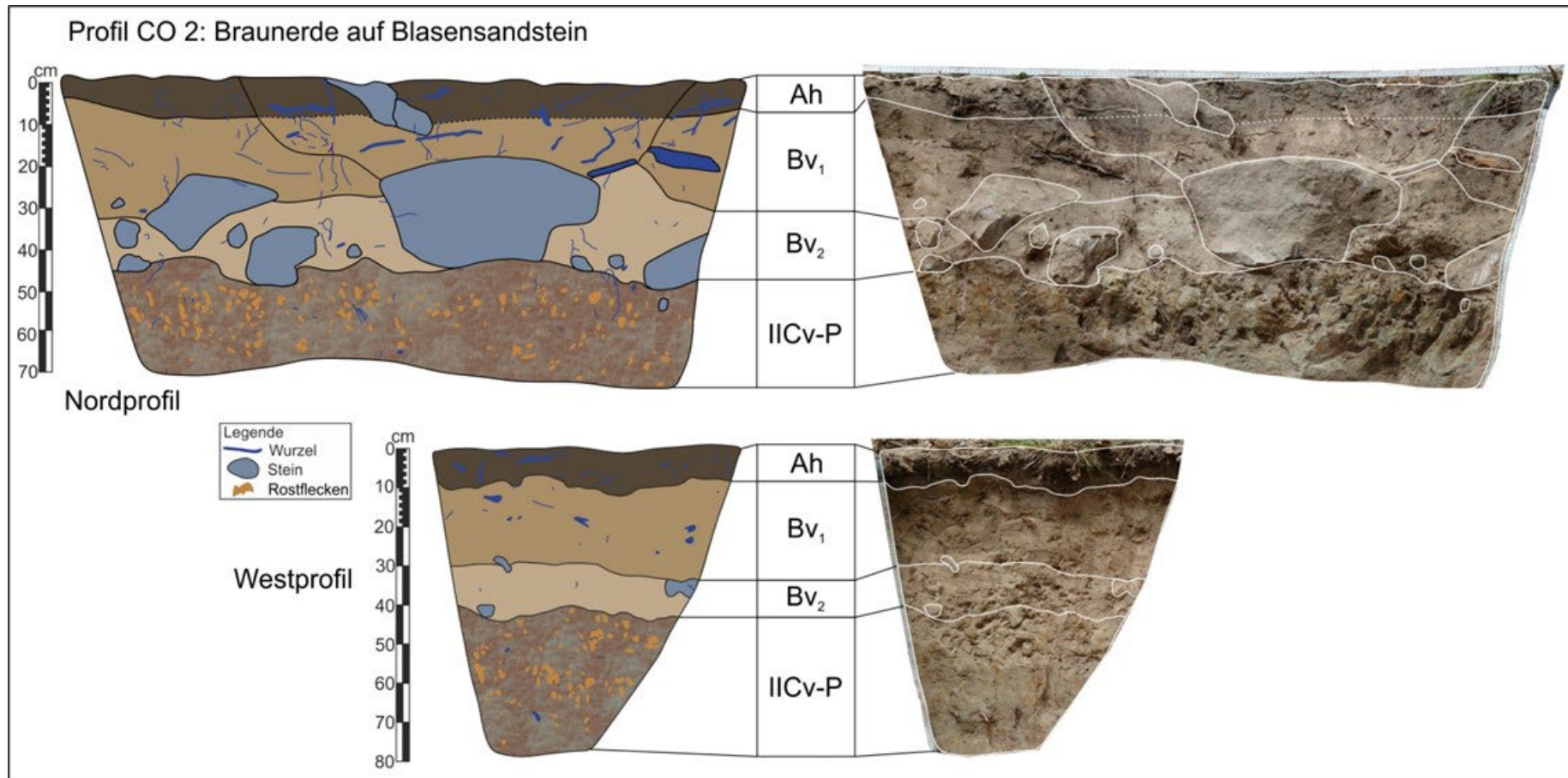


Abbildung 55: Profilzeichnung Profil CO 2.

Braunerde auf Blasensandstein. Im Profil CO 2 wurden auf Grund der großen Sandsteinblöcke in der Nordwand zwei Profilwände aufgenommen. Die Bodenfeuchtesensoren befinden sich an der linken Grenze des Nordprofils.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

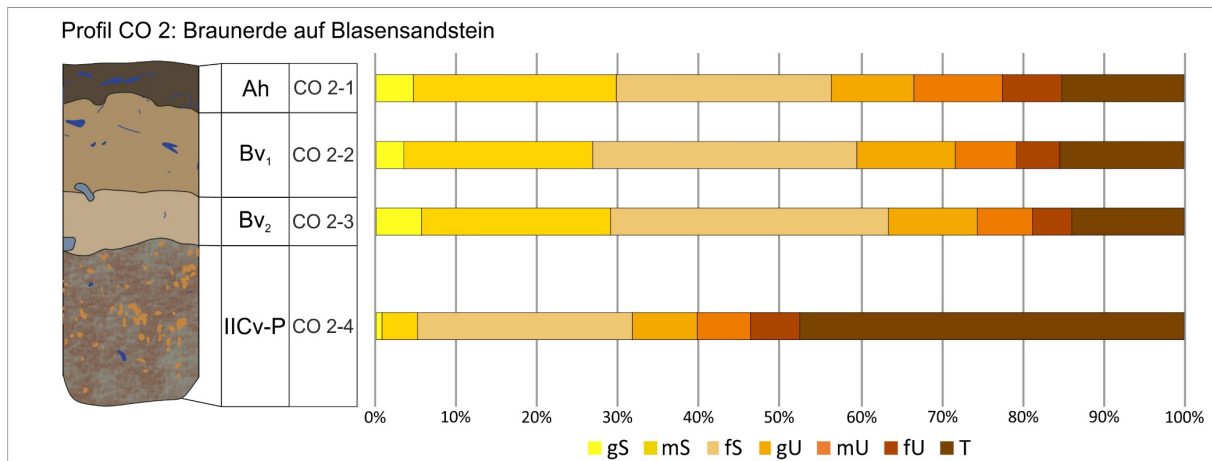


Abbildung 56: Korngrößendiagramm Profil CO 2.

Quelle: eigene Darstellung

Die Sandfraktion der oberen drei Horizonte wird von Mittel- und Feinsand dominiert, wobei der Feinsandanteil mit der Tiefe zunimmt (s. Abbildung 56 u. Tabelle 42). Im IICv-P-Horizont dominiert die Feinsandfraktion, während Grobsand fast nicht vorkommt. Der Schluffanteil liegt zwischen 28,53 % im Ah-Horizont und 20,86 % im IICv-P-Horizont und nimmt mit der Tiefe kontinuierlich ab. Die Schlufffraktion wird im Ah-Horizont von Grob- und Mittelschluff, in Bv₁- und Bv₂-Horizont von Grobschluff dominiert. Im IICv-P-Horizont sind die Schlufffraktionen in etwa gleich vertreten. Der Tonanteil liegt zwischen 14,00 % im Bv₂-Horizont und 47,50 % im IICv-P-Horizont. In den oberen drei Horizonten schwankt der Tonanteil nur gering um max. 1,44 %.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fs	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
CO 2-1	18/172	Ah	4,71	25,10	26,53	10,26	11,00	7,27	15,13	56,34	28,53	15,13	3,46	-	5,29	6,49 · 10 ⁻⁶
CO 2-2	18/173	Bv ₁	3,55	23,42	32,50	12,30	7,49	5,30	15,44	59,47	25,09	15,44	3,95	-	0,41	-
CO 2-3	18/174	Bv ₂	5,69	23,42	34,30	11,07	6,71	4,81	14,00	63,40	22,59	14,00	3,95	0,10	0,00	-
CO 2-4	18/175	IICv-P	0,87	4,39	26,38	8,12	6,60	6,14	47,50	31,64	20,86	47,50	3,69	0,06	0,00	-

Tabelle 42: Laborwerte Profil CO 2.

Die pH-Werte im Profil CO 2 liegen zwischen 3,46 im Ah-Horizont und 3,95 in Bv₁- und Bv₂-Horizont und werden als „sehr stark sauer“ eingestuft (s. Tabelle 42). Ah- und Bv₁-Horizont sind carbonatfrei, Bv₂- und IICv-P-Horizont „sehr carbonatarm“.

Ein signifikanter Humusgehalt konnte mit 5,29 % nur im Ah-Horizont (stark humos) nachgewiesen werden. Der Bv₁-Horizont ist noch „schwach humos“, dagegen sind die beiden basalen Horizonte humusfrei.

Der k_f-Wert wurde vom Profil VMK-I für den Ah-Horizont übernommen (KAATSCH, 2019). Die hydraulische Leitfähigkeit des Ah-Horizonts wird als „hoch“ eingestuft. Die übrigen k_f-Werte des

Profils VMK-I waren auf Grund von Korngrößenunterschieden nicht direkt übertragbar. Im Vergleich und unter Berücksichtigung der Unterschiede in Hangposition und Korngröße, kann für die Bv-Horizonte des Profils CO 2 eine hohe, für den IICv-P eine geringe bis mittlere hydraulische Leitfähigkeit angenommen werden (AD-HOC-AG BODEN, 2005; KAATSCH, 2019).

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
CO 2-1	Ah	18/176	1,08	1,18	Ld 1	39	18	26	67,5 gering
CO 2-2	Bv ₁	18/177	1,49	1,60	Ld 3	25	12	18	
CO 2-3	Bv ₂	18/178	1,46	1,55	Ld 3	27,25	14,25	21,25	
CO 2-4	IICv-P	18/179	1,56	1,82	Ld 4	38,25	7,5	3,5	

Tabelle 43: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 2.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohddichte ρ_t liegt zwischen 1,08 g/cm³ und 1,56 g/cm³ (s. Tabelle 43). Analog zur TRD nimmt auch die effektive Lagerungsdichte im Profil CO 2 mit der Tiefe von „sehr gering“ auf „hoch“ zu. Die FK liegt zwischen 39 Vol.-% (hoch) im Ah- und 25 Vol.-% (gering) im Bv₁-Horizont. Im IICv-P-Horizont steigt sie wieder auf einen ähnlichen Wert wie im Ah-Horizont. Die nFK in den oberen drei Horizonten schwankt nur wenig und ist mit 7,5 Vol.-% (gering) im IICv-P-Horizont am niedrigsten. Die LK ist im Ah-Horizont „hoch“, nimmt mit der Tiefe zunächst leicht ab und stellt sich mit 3,5 Vol.-% im IICv-P-Horizont als „sehr gering“ dar. Mit 67,5 l/m² ist die nFKWe „gering“.

5.5.2.3 Ergebnisse der Gelände- und Laboranalysen Profil CO 3

Geländedaten

Das Profil CO 3 ist eine Braunerde in Hangablagerungen über Blasensandstein (kmBL) und befindet sich am südwestexponierten Mittelhang auf einer Höhe von 409 m NHN (s. Abbildung 48). Die Profilwand ist nach Norden ausgerichtet und weist eine Tiefe von 100 cm auf. Das Profil befindet sich in einem von Buchen dominierten Hochwald mit wenig Unterholz. Etwa 25 m hangabwärts befindet sich das Profil VMK-III (KAATSCH, 2019).

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
CO 3-1	Ah	9 - 20	w, de, g	10YR 4/2	Sl3	ein	-	
CO 3-2	AhBv	21	e, de, h	10YR 6/3	Sl3	ein, kit	-	LH
CO 3-3	Bv ₁	41 - 45	w, di, h	10YR 7/3	Sl3	ein, kit	-	LH
CO 3-4	IIBv ₂	60 - 64	w, di, h	7,5YR 6/3	Sl3	ein, kit, plattig	plattig, sehr dicht	LB
CO 3-5	IIBv ₃	80 - 82	w, sc, h	7,5YR 6/3	Sl4	pol	-	LB
CO 3-6	IIICv-P	100	-	2,5YR 4/4	Lts	pol	sehr dicht	

Tabelle 44: Geländedaten Profil CO 3.

Braunerde in Hangablagerungen über Blasensandstein (kmBL). Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil CO 3 konnte in sechs Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 57 u. Tabelle 44). Der Ah-Horizont bildet die rezente Bodenoberfläche. Bedeckt wird er durch eine dünne Streuschicht aus Laub und kleinen Ästen. Der Ah-Horizont weist einen dunkel gräulichbraunen mittel lehmigen Sand mit einem Einzelkorngefüge auf. Der Humusgehalt ist hoch. Die untere Horizontgrenze reicht auf der linken Profilstelle bis in eine Tiefe von 9 cm, auf der rechten Profilstelle in einer Tiefe von 20 cm. Die wellige Horizontgrenze zum liegenden AhBv-Horizont ist deutlich erkennbar und verläuft von links nach rechts in geneigter Lage. Der AhBv-Horizont unterscheidet sich vor allem durch eine blassbraune Farbe und einen geringeren Humusgehalt vom Ah-Horizont. Das Gefüge des mittel lehmigen Sands besteht aus einer Mischung aus Einzelkorn- und Kitgefüge. Sowohl im Ah- als auch im AhBv-Horizont finden sich zahlreiche Wurzeln mit einer Stärke von 1 cm bis 2 cm. Die ebenförmige Horizontgrenze ist deutlich erkennbar und verläuft in ebener Lage in 21 cm Tiefe. Im Liegenden folgt der Bv₁-Horizont bis in eine Tiefe von 41 cm bis 45 cm. Der mittel lehmige Sand weist eine Mischung aus Einzelkorn- und Kitgefüge auf und ist dicht gelagert. Der sehr blassbraune Bv₁-Horizont schließt mit einer leicht welligen, diffus erkennbaren horizontalen Horizontgrenze ab. Der Bv₂-Horizont weist eine hellbraune Farbe auf. Der mittel lehmige Sand im IIBv₂-Horizont ist sehr dicht gelagert und besitzt ebenfalls eine Mischung aus Einzelkorn- und Kitgefüge. Der IIBv₂-Horizont ist sehr dicht gelagert. An der linken Profilstelle reicht ein ca. 30 cm großer Sandstein in das Profil hinein, welcher neben dem Profil noch weiter aufgeschlossen ist. Die untere Horizontgrenze des IIBv₂-Horizonts ist diffus und verläuft leicht wellig in einer Tiefe von 60 cm bis 64 cm in horizontaler Lage. Der darunterliegende IIBv₃-Horizont unterscheidet sich durch einen stark lehmigen Sand mit einem polyedrischen Gefüge von den hangenden Horizonten. Anhand der hellbraunen Bodenfarbe ist der IIBv₃- nicht vom IIBv₂-Horizont zu unterscheiden. Die Horizontuntergrenze des IIBv₃-Horizonts ist scharf erkennbar und verläuft wellig in horizontaler Lage in einer Tiefe von 80 cm bis 82 cm. Der Übergang vom IIBv₃- zum IIICv-P-Horizont ist durch einen Schichtwechsel und mehrere etwa faustgroße Sandsteine gekennzeichnet. Der rötlichbraune sandig-tonige Lehm des IIICv-P-Horizont weist ein polyedrisches Gefüge auf und ist dicht gelagert.

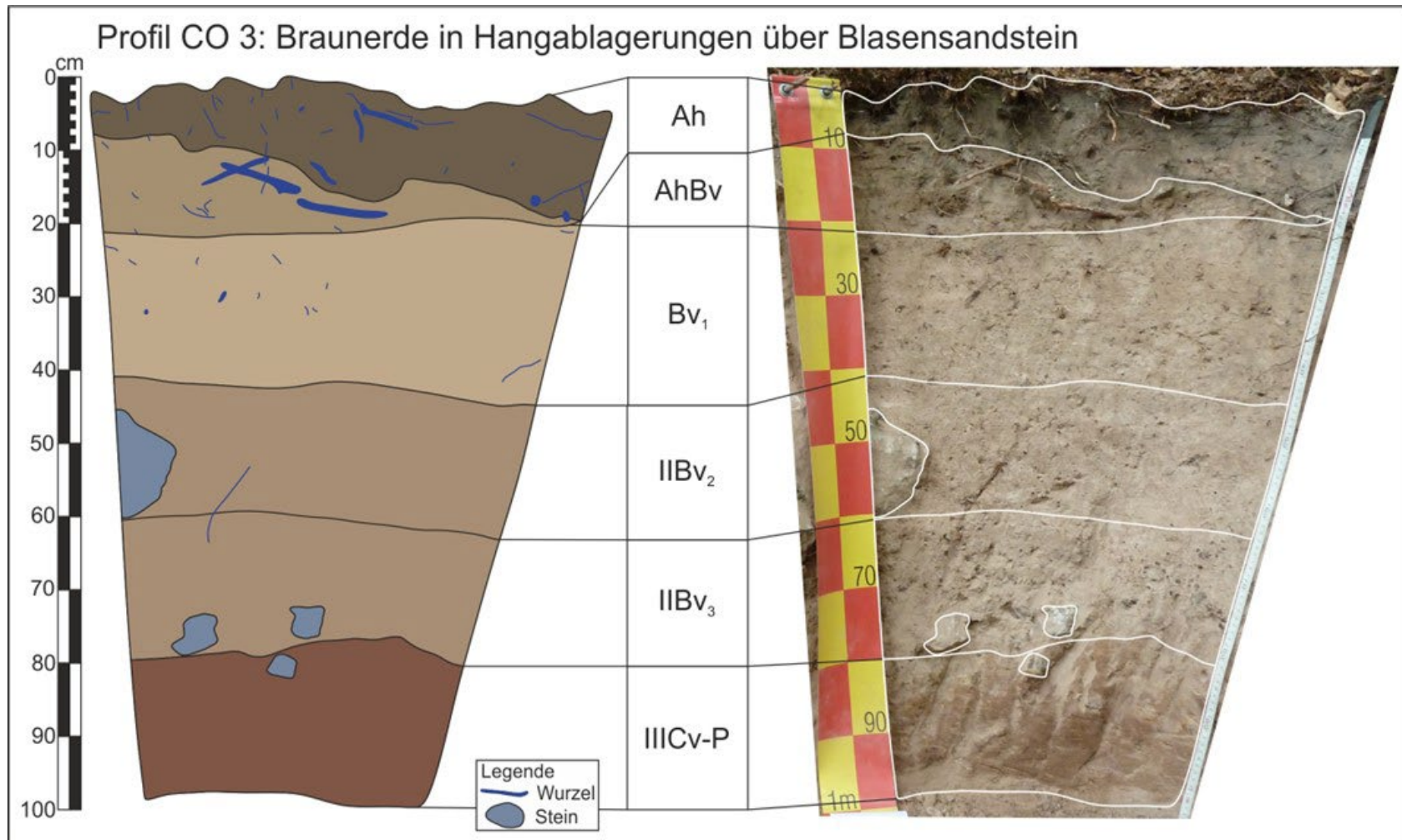


Abbildung 57: Profilzeichnung Profil CO 3.

Braunerde in Hangablagerungen über Blasensandstein. Das Profil CO 3 befindet sich am Mittelhang auf 409 m NHN und damit ca. 20 m tiefer als das Profil CO 2. Die im IIICv-P-Horizont anstehenden Tonsteine werden dem Blasensandstein (kmBL*bl) zugeordnet.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

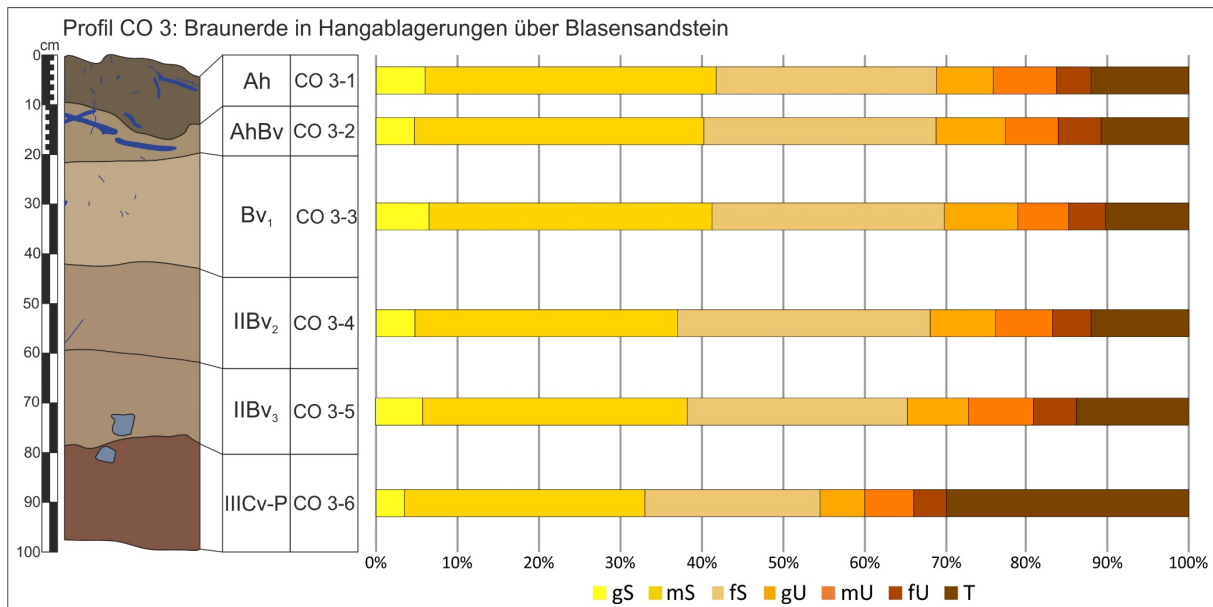


Abbildung 58: Korngrößendiagramm Profil CO 3.

Quelle: eigene Darstellung.

Der Sandanteil im Profil CO 3 liegt zwischen 69,93 % im Bv₁-Horizont und 54,66 % im IIICv-P-Horizont und ist die dominierende Fraktion. Die Sandfraktion wird in allen Horizonten von Mittel- und Feinsand dominiert (s. Abbildung 58 u. Tabelle 45). Der Schluffanteil liegt zwischen 15,65 % im IIICv-P- und 20,68 % im IIBv₃-Horizont. In den oberen fünf Horizonten weicht der Schluffanteil allerdings nur geringfügig vom IIBv₃-Horizont ab. Die einzelnen Schlufffraktionen haben in etwa gleiche Anteile, wobei der Feinschluff immer den geringsten Anteil ausmacht. Der Tonanteil schwankt in den oberen Horizonten nur gering zwischen 10,09 % im Bv₁- und 13,83 % im IIBv₃-Horizont. Der IIICv-P-Horizont weist mit 26,69 % den höchsten Tonanteil im Profil CO 3 auf.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _r -Wert [m/s]	
			gS	mS	fs	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
CO 3-1	18/180	Ah	6,01	35,77	27,28	6,98	7,65	4,39	11,93	69,06	19,02	11,93	3,54	-	6,59	-
CO 3-2	18/181	AhBv	4,84	35,50	28,63	8,64	6,47	5,13	10,80	68,97	20,23	10,80	4,00	-	1,05	-
CO 3-3	18/182	Bv ₁	6,44	34,91	28,58	8,97	6,45	4,56	10,09	69,93	19,98	10,09	4,11	-	0,36	-
CO 3-4	18/183	IIBv ₂	4,72	32,29	31,28	7,93	6,98	4,85	11,95	68,28	19,77	11,95	4,06	0,13	0,00	-
CO 3-5	18/184	IIBv ₃	5,70	32,61	27,17	7,58	8,01	5,09	13,83	65,49	20,68	13,83	4,06	-	0,00	-
CO 3-6	18/185	IIICv-P	3,41	29,60	21,65	5,61	5,84	4,20	29,69	54,66	15,65	29,69	4,34	0,24	0,00	-

Tabelle 45: Laborwerte Profil CO 3.

Die pH-Werte nehmen im Profil CO 2 mit der Tiefe zu und liegen zwischen 3,54 (sehr stark sauer) im Ah- und 4,34 (stark sauer) im IIICv-P-Horizont (s. Tabelle 45). Analog zu den pH-Werten nimmt der Carbonatgehalt mit der Tiefe geringfügig zu. Die oberen drei Horizonte sind carbonatfrei, ebenso wie der IIBv₃-Horizont. Nur der IIBv₂-Horizont bzw. IIICv-P-Horizont sind „sehr carbonatarm“.

Signifikante Humusgehalte sind nur im Ah-Horizont mit 6,59 % (stark humos) und im AhBv-Horizont mit 1,05 % (schwach humos) vorhanden. Der Bv₁-Horizont ist noch „sehr schwach humos“, die darunterliegenden Horizonte sind humusfrei.

Die kf-Werte von Profil VMK-III sind auf Grund zu großer Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung nicht direkt auf das Profil CO 3 übertragbar (KAATSCH, 2019).

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD pt [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
CO 3-1	Ah	18/186	1,25	1,33	Ld 2	33,5	20,5	25,5	109,5 mittel
CO 3-2	AhBv	-	1,25	1,32	Ld 2	27,5	16,5	27,5	
CO 3-3	Bv ₁	18/187	1,44	1,51	Ld 2	23,6	13,6	21,8	
CO 3-4	IIBv ₂	18/188	1,50	1,58	Ld 3	23	13	20	
CO 3-5	IIBv ₃	18/189	1,75	1,84	Ld 4	21,5	11,5	10,75	
CO 3-6	IIICv-P	18/190	1,95	2,12	Ld 5	zu hohe TRD, kein Tabellenwert			

Tabelle 46: Bodenphysikalische Kennwerte Profil CO 3.

TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t liegt zwischen 1,25 g/cm³ und 1,95 g/cm³ (s. Tabelle 46). Analog zur TRD nimmt auch die effektive Lagerungsdichte im Profil CO 2 mit der Tiefe von „gering“ auf „sehr hoch“ zu. Die FK nimmt mit der Tiefe ab und liegt zwischen 33,5 Vol.-% im Ah-Horizont (mittel) und 21,5 Vol.-% im IIBv₂-Horizont (gering). Parallel dazu nimmt auch die nFK mit der Tiefe von 20,5 Vol.-% (mittel) im Ah- auf 11,5 Vol.-% (gering) im IIBv₂-Horizont ab. Die LK liegt zwischen 27,5 Vol.-% im AhBv-Horizont (sehr hoch) und 10,75 Vol.-% im IIBv₂-Horizont (mittel). Die mittlere nFKWe beträgt 109,5 l/m².

5.5.3 Profil- und Standortanalyse

Profilanalyse CO 1

Das Profil CO 1 ist eine Braunerde auf Blasensandstein mit der Horizontabfolge Ah/Bv₁/Bv₂/Bv₂-IICv-P/IICv-P. Der Ah-Horizont unterscheidet sich nur geringfügig, vor allem durch höhere Schluff- und Tonanteile, von den darunterliegenden Horizonten Bv₁ und Bv₂. Der höhere Schluffanteil kann durch einen stärkeren äolischen Eintrag erklärt werden. Der Bv₂-IICv-P-Horizont stellt einen Übergangshorizont zum basalen IICv-P-Horizont dar. Erkennbar wird dies an dessen Korngrößenverteilung, welche sich zwischen denen der Bv-Horizonte und des IICv-P-Horizonts befindet. Besonders deutlich ist dieser Übergang, wenn man die Korngrößenverteilung des Bv₂-IICv-P mit den leicht grauen Flecken des IICv-P-Horizonts (CO 1-4) vergleicht. Beim IICv-P-Horizont handelt

es sich um verwitterten Tonsiltstein des Blasensandsteins, wie er auf dem Rücken häufiger anzutreffen ist (vgl. Profil VMK-II, Profil VMK-I und Profil CO 2). Die drei oberen Horizonte hingegen bestehen aus verwittertem Sandstein des Blasensandsteins (kmBL; vgl. auch Handstück in Abbildung 51), welcher als Bank auch im Profil VMK-II über dem basalen Tonstein ansteht (KAATSCH, 2019).

Die sehr niedrigen pH-Werte und die fast völlige Abwesenheit von CaCO_3 deuten, ebenso wie die deutliche Horizontierung, auf eine ununterbrochene holozäne Bodenbildungsphase hin. Dafür spricht auch der Erhalt der Basislage in Form der hohen Lagerungsdichte und der vielen Sandsteine im Bv₂-Horizont. Die höheren Schluffgehalte im Ah-Horizont stellen möglicherweise den Rest der Hauptlage dar, welche auf Grund der exponierten Lage auf dem Plateau möglicherweise erodiert ist.

Profilanalyse CO 2

Das Profil CO 2 ist eine Braunerde auf Blasensandstein mit der Horizontabfolge Ah/Bv₁/Bv₂/IICv-P. Die oberen drei Horizonte unterscheiden sich nur im mit der Tiefe zunehmenden Sand- und abnehmenden Schluffanteil. Der etwas höhere Schluffanteil ist durch äolischen Eintrag von allochthonem Löss zu erklären, welcher in die Horizonte eingearbeitet wurde. Im Vergleich der Schlufffraktion mit dem Ah-Horizont von Profil VMK-I (VMK-I-1), könnte es sich beim Ah-Horizont um den Rest einer Hauptlage handeln (KAATSCH, 2019). Bv₁- und Bv₂-Horizont sind der Basislage zuzuordnen. Auf Grund der großen Sandsteinblöcke im Bv₂-Horizont, vor allem in der nördlichen Profilwand, wurde die Basislage in LB1 (Bv₁-Horizont) und LB2 (Bv₂-Horizont) unterteilt. Die Sandsteinblöcke sind hangparallel eingeregelt und wurden vermutlich durch Solifluktionsprozesse von den höher gelegenen Bereichen des Plateaus an diese Position bewegt. Nördlich des Profils CO 2 (Richtung Profil CO 1) sind an der Geländeoberfläche zahlreiche Sandsteinblöcke zu beobachten, was für die hangabwärtige Verlagerung spricht. Diese können aber auch aus einer vor Ort verwitterten dünnen Sandsteinbank stammen. Der stark lehmige Sand der oberen Horizonte besteht überwiegend aus verwitterten Sandsteinen des Blasensandsteins (kmBL). Beim basalen IICv-P-Horizont handelt es sich um verwitterte Tonsiltsteine des Blasensandsteins (kmBL). Dieser Horizont ist auf Grund der Höhenlage sehr wahrscheinlich identisch mit dem IVSwd-Horizont des Profils VMK-I (VMK-I-6), aber nicht mit dem IICv-P-Horizont des Profils CO 1 (CO 1-4 und CO 1-5) (KAATSCH, 2019). Die Rostflecke im IICv-P-Horizont weisen auf eine zeitweise wasserstauende Wirkung des lehmigen Tons hin. Da in den hangenden Horizonten aber keine redoximorphen Merkmale festgestellt werden konnten, ist von einer hohen lateralen hydraulischen Leitfähigkeit dieser Horizonte auszugehen. Das Wasser staut sich nur im IICv-P-Horizont auf Grund dessen geringer hydraulischer Leitfähigkeit.

Die sehr niedrigen pH-Werte, die fast völlige Abwesenheit von CaCO_3 und die deutliche Horizontierung deuten, wie im Profil CO-1, auf eine ununterbrochene holozäne Bodenbildungsphase hin.

Profilanalyse CO 3

Das Profil CO 3 ist eine Braunerde in Hangablagerungen über basalen Tonsteinen des Blasensandsteins (kmBL*bl) mit der Horizontabfolge Ah/AhBv/Bv₁/IIBv₂/IIBv₃/IIICv-P. Die oberen fünf Horizonte Ah bis IIBv₃ sind in ihrer Korngrößenzusammensetzung sehr ähnlich. Dies ist ein starker Hinweis darauf, dass es sich bei dem mittel bis stark lehmigen Sand um parautochthone Hangablagerungen handelt. Das parautochthone Bodenmaterial stammt ursprünglich vom Plateau und wurde durch solifluidale Prozesse und Oberflächenabfluss hangabwärts verlagert und dort akkumuliert. Beim IIICv-P-Horizont handelt es sich um verwitterte autochthone Tonsteine. Laut Geologischer Karte von 1964 handelt es sich hierbei um die basalen Tonsteine des Blasensandsteins (kmBL*bl) (EMMERT, 1964). Lehrbergbänke und Lehrbergsschichten (kmL) folgen im Liegenden erst etwa 20 m hangabwärts. Das Profil VMK-III befindet sich dagegen bereits auf Lehrbergsschichten (kmL) (KAATSCH, 2019).

Die interne stratigraphische Differenzierung des Profils wurde in erster Linie anhand der mit der Tiefe zunehmenden Lagerungsdichte und dem Vorhandensein von Sandsteinblöcken vorgenommen. Die Sandsteine in den Horizonten IIBv₂ und IIBv₃ müssen durch Solifluktion an ihre Position gelangt sein. Auf Grund dessen wurden die beiden IIBv₂- und IIBv₃-Horizonte der Basislänge zugeordnet. Die hangenden AhBv- und Bv₁-Horizonte wurden dagegen der Hauptlage zugeordnet. Ein erhöhter Schluffanteil findet sich hier zwar nicht, allerdings kann dieser auf Grund der Hangposition bereits erodiert worden sein. Die deutlich hellere Bodenfarbe des Bv₁-Horizonts spricht auch für eine spätere Akkumulation, welche eine erste initiale Bodenbildungsphase in den Horizonten IIBv₂ und IIBv₃ stoppte. Im Hauptlagenmaterial findet die rezente Bodenbildung statt.

Obwohl die kf-Werte von Profil VMK-III nicht eins zu eins auf das Profil CO 2 übertragen werden können, kann ein Vergleich getroffen werden (KAATSCH, 2019). Für Ah-, AhBv- und Bv₁-Horizont kann auf Grund ihrer geringen effektiven Lagerungsdichte eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit angenommen werden. Eine noch hohe bis mittlere hydraulische Leitfähigkeit wird für IIBv₂- und IIBv₃-Horizont angenommen. Die Lagerungsdichte und die Korngrößenzusammensetzung des IIICv-P-Horizonts ist sehr ähnlich zu der des IICv-P-Horizonts von Profil CO 1 (CO 1-5), weshalb hier eine „sehr geringe“ hydraulische Leitfähigkeit am wahrscheinlichsten ist.

Die sehr niedrigen pH-Werte und die fast völlige Abwesenheit von CaCO_3 deuten auf eine lange Bodenbildungsphase hin. Die wenig ausgeprägte farbliche Differenzierung weist auf eine noch nicht sehr lange rezente Bodenbildungsphase hin.

Standortanalyse Oberrimbach

Der Monitoringstandort Oberrimbach ist ein typischer Standort für den Naturraum „Steigerwald“. Der Steigerwald ist geologisch vergleichsweise homogen und tektonische Störungen wirken sich nur lokal aus. Die Höhenrücken bestehen im Westen vor allem aus Blasensandstein (kmBL), und die Hänge aus Tonsteinen der Lehrbergschichten (kmL) bzw. des Blasensandsteins (kmBL). Nach Osten (etwa ab Höhe Schlüsselfeld) dominiert Unterer, Mittlerer und Oberer Burgsandstein nicht nur die Höhenrücken, sondern auch die Hänge. Dies bedingt, dass auch die Böden an diesen Standorten sehr ähnlich sind. Lediglich in den Talböden ist eine kleinräumigere Varianz zu erwarten. Auf den sauren Ausgangsgesteinen entwickeln sich auf den Höhenrücken saure Braunerden und an den Hängen Pelosole. Nach Osten kommen auch Pseudogleye, Braunerde-Pseudogleye bzw. Pseudogley-Braunerden häufiger vor (HAMMERL, 2022; SCHILLING, 2022).

Als Forststandort ist der Monitoringstandort Oberrimbach gut geeignet, allerdings weist er einige Schwierigkeiten auf. Die sandigen Braunerden weisen zwar eine hohe hydraulische Leitfähigkeit, aber ein sehr geringes Wasserspeichervermögen auf (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022h, 2022i). Niederschläge können so zwar schnell in den Boden infiltrieren, aber nur schlecht gespeichert werden und fließen als Interflow lateral ab. In Verbindung mit der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit der basalen Tonsteine (kmBL und kmL) können sich die Braunerden, wie in Profil VMK-I, zu Pseudogley-Braunerden entwickeln (KAATSCH, 2019). Die geringe Wasserspeicherfähigkeit der Böden im Untersuchungsgebiet werden besonders in sehr trockenen Jahren wie 2018 bis 2020 zum Problem und führen zu Trockenstress der Bäume. Auf Grundwasser können die Bäume auf den Höhenrücken und an den Hängen der Riedel nicht zurückgreifen, sondern sind vollständig vom Niederschlag abhängig. Blasensandstein (kmBL), Coburger Sandstein (kmC) und Burgsandstein sind zwar gute Grundwasserleiter, allerdings ist ihre Mächtigkeit am Monitoringstandort zu gering für ein ausreichendes Grundwasserdargebot (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2007; BÜTTNER et al., 2003). Die Täler haben eine bessere Wasserversorgung und werden deshalb aber meist ackerbaulich genutzt.

Die schlechte Wasserverfügbarkeit in Verbindung mit sehr sauren pH-Werten und einer mittleren Kationenaustauschkapazität, machen den Standort für die Landwirtschaft uninteressant (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022h, 2022i). Als einzige Nutzung bleibt somit nur die forstwirtschaftliche Nutzung.

5.6 Willmars

5.6.1 Standort

5.6.1.1 Naturräumliche Gliederung und geomorphologische Situation

Der Monitoringstandort Willmars liegt im Südosten des Naturraums 353 „Vorder- und Kuppenrhön“, welcher Teil der Naturraum-Haupteinheit D 47 „Osthessisches Bergland, Vogelsberg und Rhön“ ist (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, o.J.). Im Naturraum „Vorder- und Kuppenrhön“ befindet sich Willmars in der Untereinheit 353.3 „Östliches Rhönvorland“, welcher den Bereich des Streutals um Ostheim v.d. Rhön, Nordheim v.d. Rhön, Sondheim v.d. Rhön, Fladungen und des Sulztals bis zur der bayerisch-thüringischen Grenze umfasst (RÖLL, 1962; SCHWENZER, 1968). Kulturlandschaftlich wird er dem Raum „Rhön“ zugeordnet (REH & BLUM, 2011a; REINKE et al., 2013). Das „Östliche Rhönvorland“ wird von Buntsandsteinhöhen zwischen 500 m und 538 m NHN beherrscht und durch die weiten Täler der Sulz und ihrer Nebenbäche untergliedert. Die Kuppen und Rücken sind bewaldet und nur die Täler werden landwirtschaftlich für Ackerbau oder Grünland genutzt (SCHWENZER, 1968).

Der Monitoringstandort befindet sich an der Ostflanke des Hasenkopfs (514 m NHN) in der Flur „Altensteiner Wald“ (s. Abbildung 59). Der Hasenkopf ist Teil des von NNW nach SSE verlaufenden Rückens zwischen Fladungen und Ostheim v.d. Rhön. Nach Westen fällt das Gelände steil ins Streutal ab, während die Ostabdachung flacher in die Täler von Oberer Grund und Sulz abfallen. Die Kuppen des Rückens sind durch Sättel untergliedert. Durch den südlichen Sattel zwischen Hasenkopf und Königsburg (533 m NHN) verläuft die Kreisstraße NES 32 von Nordheim v.d. Rhön durch das Linztal über Neustädtles nach Willmars. Am Talschluss des Linztals fällt das Gelände vom Hasenkopf auf ca. 650 m Länge stark zur Ortschaft Neustädtles (399 m NHN) ein. Die Ostabdachung des Hasenkopfs und gleichzeitig die Nordflanke des Linztals bildet ein flacher Rücken mit gleichmäßigem Gefälle. Nach Norden fällt das Gelände wieder stärker zur Flur „Schwarzer Teich“, ein Paralleltal der Linz, ein.

Entwässert wird der Monitoringstandort über die Bäche Linz und Sulz zur Streu, welche in die Fränkische Saale mündet (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2016). Nördlich der Sulz verläuft die Wasserscheide zwischen Rhein und Weser (BÜCKING, 1889).

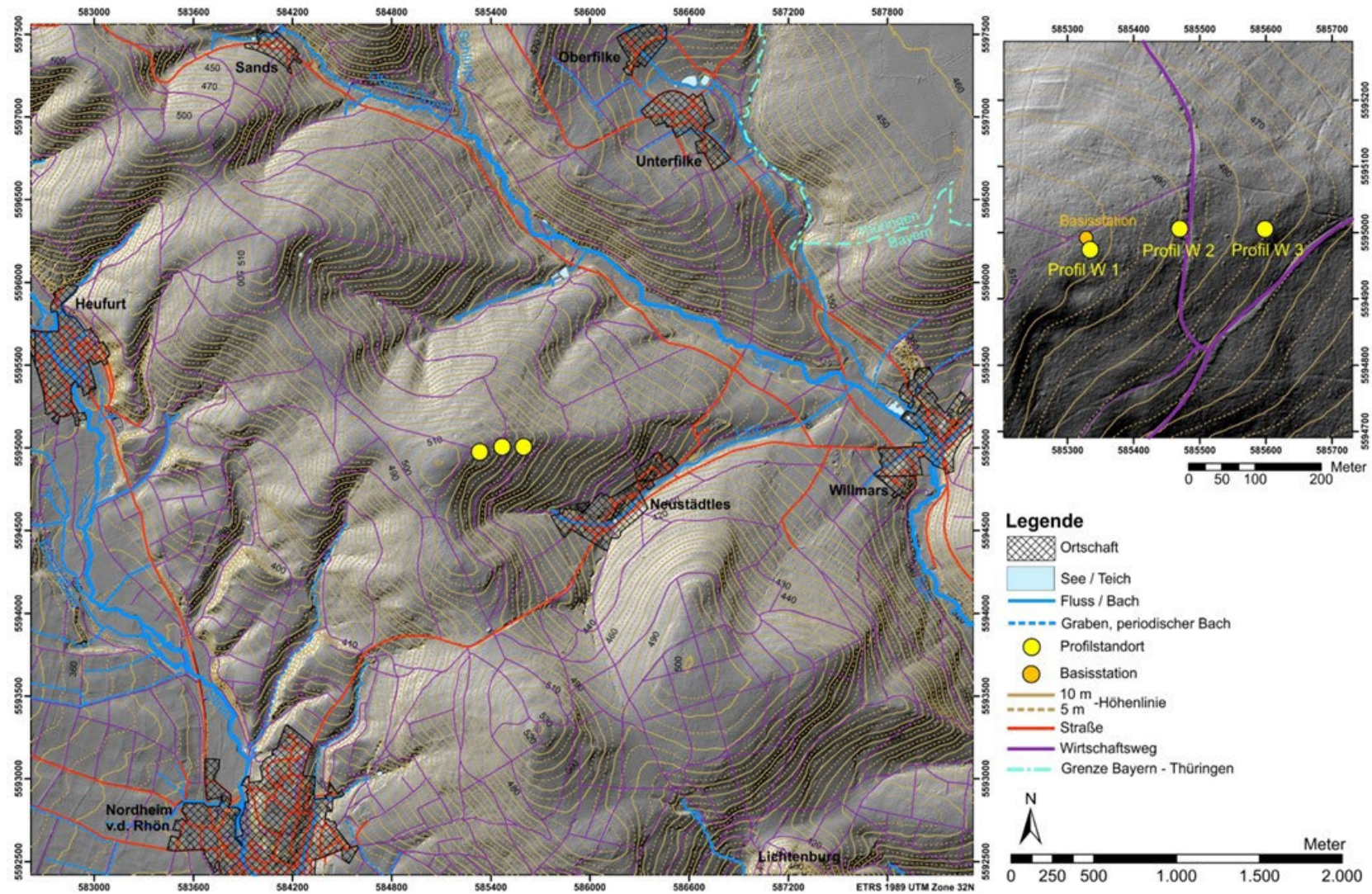


Abbildung 59: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und des Monitoringstandorts Willmars. Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023b, 2023c).

5.6.1.2 Geologie

Das Untersuchungsgebiet Willmars befindet sich im Übergangsbereich von Mittlerem Buntsandstein zu Unterem und Mittlerem Muschelkalk, obwohl die Rhön eigentlich aus Buntsandsteinen und Basalten besteht. Dies ist auf eine NNW-SSE verlaufenden Störungszone zurückzuführen, welche sich von der hessischen Vorder- und Kuppenrhön bis in die Haßberge verfolgen lässt. Im Streutal steht großflächig Unterer und Mittlerer Muschelkalk an, in Horststrukturen wie dem Heidelberg aber auch Mittlerer Buntsandstein (sm) (BLANCKENHORN, 1910a; BÜCKING, 1889). Die zahlreichen Störungen führen zu einer sehr kleinräumigen geologischen Gliederung des Streutals (s. Abbildung 60). Östlich der Streu zwischen Nordheim v.d. Rhön und Ostheim v.d. Rhön bildet Unterer und Mittlerer Muschelkalk den Hangfuß des Höhenrückens und somit auch des Hasenkopfs. Im Süden bei Ostheim bildet der Untere Muschelkalk auch den Schloßberg mit der Lichtenburg und reicht bis in eine Höhe von 482 m NHN (FRIEDLEIN, 2022a; GEYER, 2022). Im Hangenden des Muschelkalks und das Top des Hasenkopfs bildend steht der Mittlere Buntsandstein (sm) an. Das gesamte Sulz-Tal verläuft im Mittleren Buntsandstein (sm). In der digitalen Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 ist der Mittlere Buntsandstein allerdings nicht weiter untergliedert (GEYER, 2022; SCHRÖDER, 2022). In der historischen Geologischen Karte ist der Hasenkopf als „sm1-Mittlerer Buntsandstein mit vorwiegend grobkörnigen roten Sandsteinen“ auskartiert (BLANCKENHORN, 1910b). Nur auf dem BLATT 5426 HILDERS ist der Höhenrücken östlich von Fladungen genauer aufgeschlossen (FRIEDLEIN, 2022b). Die Hänge sind hier der Volpriehausen-Geröllsandstein bis Hardeggen-Wechselfolge (smVS-HW, Volpriehausen- bis Hardeggen-Formation) zugeordnet. Im Hangenden findet sich zum Teil auch noch der Felssandstein und Solling-Sandstein (smHF+S, Hardeggen- und Solling-Formation), welcher aber nicht immer das Top der Kuppen bildet (BÜCKING & WAGNER, 2022).

Nördlich des Hasenkopfs, am Hang zum Steinernen Teich, und großflächig an den Westhängen zwischen Heufurt und Fladungen stehen oberflächlich pleistozäne bis holozäne Hangablagerungen an (FRIEDLEIN, 2022b). Ausgehend vom BLATT 5426 HILDERS kann für die Ostabdachung des Hasenkopfs auch der Volpriehausen-Geröllsandstein bis Hardeggen-Wechselfolge (smVS-HW) angenommen werden (BÜCKING & WAGNER, 2022; FRIEDLEIN, 2022b). Dabei handelt es sich um einen beständigen Wechsel von mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen, die immer wieder auch durch umfangreiche Tonsteinlagen untergliedert sind. In der Hardeggen-Wechselfolge können Tonstein-Sandstein-Wechselagerungen über 4 m Mächtigkeit aufweisen und rotbraune Schluffstein-Sandstein-Wechselagerungen etwa 1,5 m (GEYER, 2002). Im Hangenden kann noch der Felssandstein und Solling-Sandstein (smHF+S) anstehen. Der violett- bis braunrote, mittelkörnige Felssandstein verursacht als Härtling im Buntsandstein oft Geländestufen. Der Felssandstein wird von sehr

glimmerreichen Tonsteinhorizonten durchzogen. Der braunrot bis violette Solling-Sandstein ist fein- bis mittelkörnig und meist reich an Glimmer (GEYER, 2002).

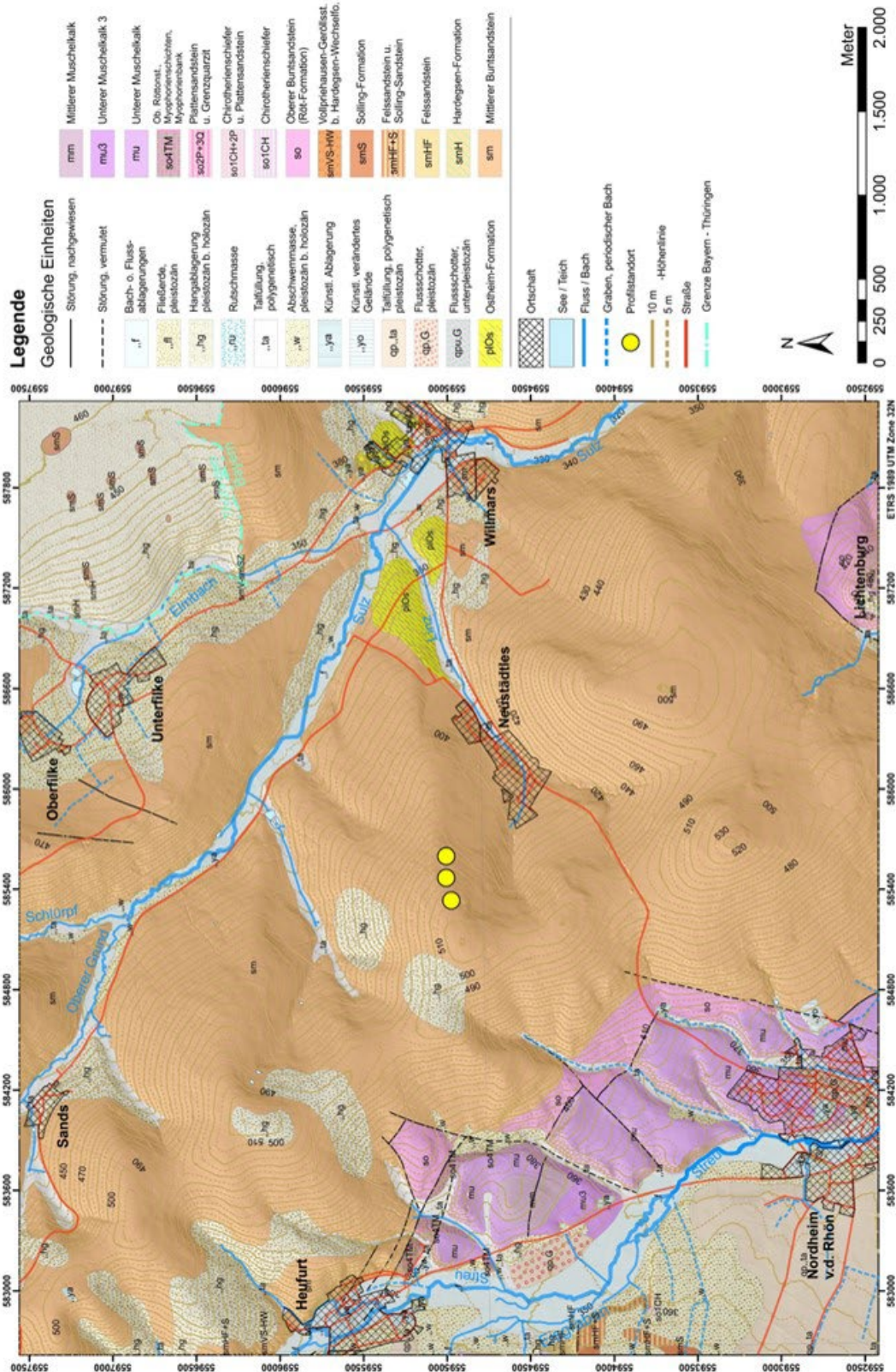


Abbildung 60: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Willmars. Maßstab: 1:20.000. Daten: BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a, 2023c); BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020).

Der östliche Hangfuß des Hasenkopf am Zusammenfluss von Linz und Sulz wird durch pliozäne Ablagerungen der Ostheim-Formation (plOs) gebildet (BLANCKENHORN, 1910a; BÜCKING, 1889; GEYER,

2022). Diese pliozänen Ablagerungen haben sich im Becken von Willmars gebildet und finden sich verstärkt vor allem weiter östlich in Thüringen (ELLENBERG et al., 2022). Weiter unten am Hangfuß finden sich pleistozäne bis holozäne Hangablagerungen und der Talboden von Linz und Sulz wird durch eine polygenetische Talfüllung gebildet (GEYER, 2022).

5.6.1.3 Klima

Die Klimastation Ostheim v. d. Rhön des Deutschen Wetterdienstes (Stations-ID: 3836) befindet sich etwa 5,4 km SSE der Monitoringstation Willmars im Streutal am südlichen Ortsrand von Ostheim v. d. Rhön. Die Klimastation liegt auf einer Höhe von 312 m NHN und damit fast 200 m tiefer als die Messstation.

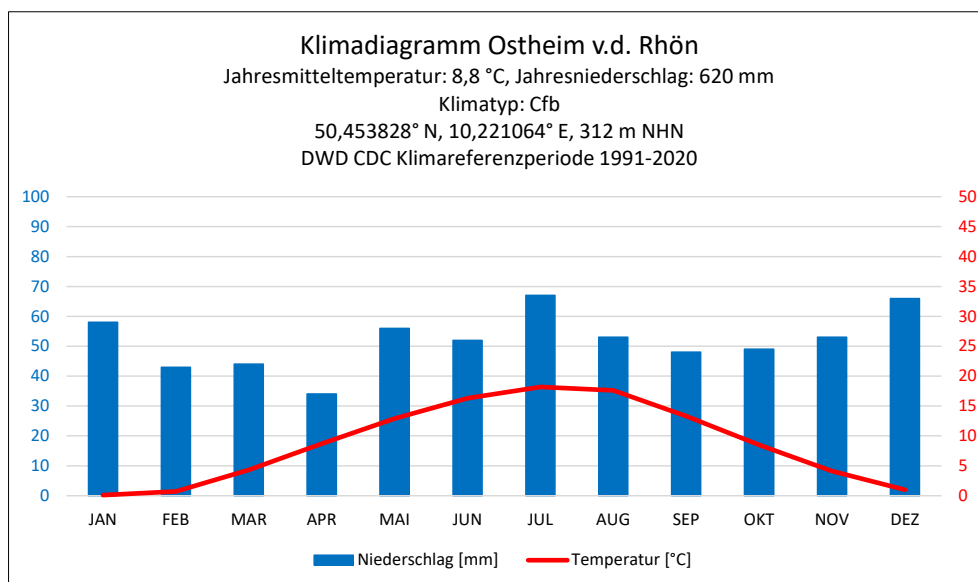


Abbildung 61: Klimadiagramm Ostheim v.d. Rhön 1991-2020.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d), eigene Darstellung.

Die Wetterstation Ostheim v. d. Rhön weist im Referenzzeitraum 1991 bis 2020 eine Jahresmitteltemperatur von 8,8 °C und einen Jahresniederschlag von 620 mm auf (s. Abbildung 61). Die kältesten Monate sind Dezember bis Februar, mit dem Temperaturminimum von 0,1 °C im Januar. Die wärmsten Monate sind Juni bis August, mit dem Temperaturmaximum von 18,2 °C im Juli.

Das Klima in Ostheim v. d. Rhön ist humid. Im Referenzzeitraum 1991 bis 2020 lag der Jahresniederschlag bei 620 mm. Die niederschlagsreichsten Monate sind Mai bis August, mit einem ausgeprägten Maximum von 67 mm im Juli. Im Herbst gehen die Niederschläge deutlich zurück um dann zu einem zweiten Niederschlagsmaximum im Dezember (66 mm) anzusteigen. Ab Januar gehen die Niederschläge zurück und erreichen mit 34 mm im April das Minimum.

Im Vergleich zum Referenzzeitraum 1981 bis 2010 hat die Jahresmitteltemperatur von 8,4 °C um 0,4 °C zugenommen. Der Jahresniederschlag dagegen ging von 633 mm um 13 mm zurück (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022c). Der Klimatyp ist ein Cfb-Klimat (PEEL et al., 2007).

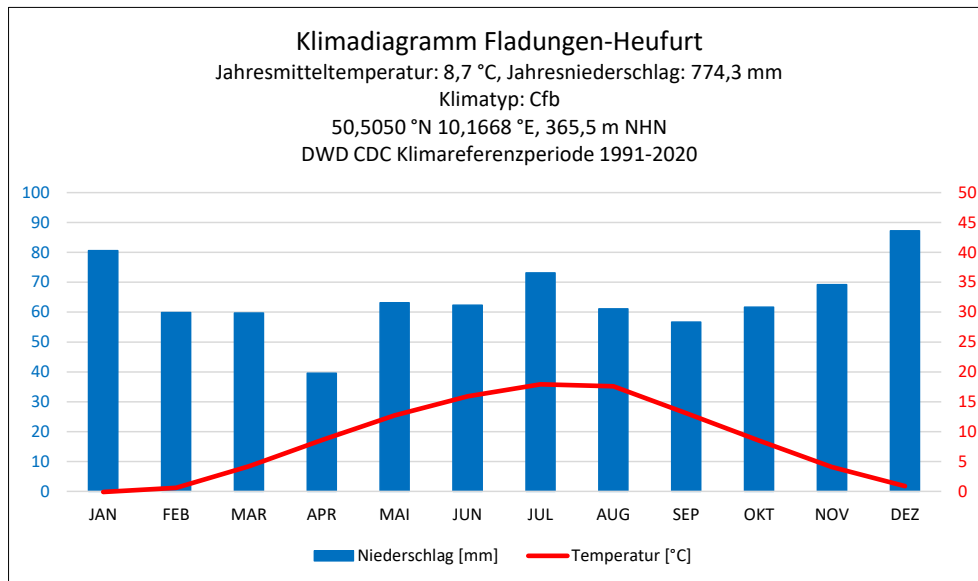


Abbildung 62: Klimadiagramm Fladungen-Heufurt 1991-2020.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d), eigene Darstellung.

Etwa 7 km NNE von Ostheim v. d. Rhön befindet sich die Klimastation Fladungen-Heufurt (Stations-ID: 1374, s. Abbildung 62). Von der Monitoringstation ist die Klimastation etwa 2,7 km entfernt. Der Jahresniederschlag betrug im Referenzzeitraum 1991 bis 2020 774,3 mm und die Jahresmitteltemperatur 8,7 °C. Die monatlichen Temperaturen liegen nur geringfügig niedriger als in Ostheim v. d. Rhön, allerdings sind die Jahresniederschläge um 154,3 mm höher. Das Niederschlagsmaximum liegt mit 87,2 mm im Dezember. In Februar und März gehen die Niederschläge deutlich zurück und erreichen mit 39,6 mm im April das Minimum. Von Mai bis August sind die Niederschläge konstant, abgesehen von einem sekundären Maximum im Juli (73,2 mm). Im September gehen die Niederschläge zunächst zurück, bevor sie dann kontinuierlich bis Dezember ansteigen.

Im Vergleich zur Klimastation Ostheim v. d. Rhön sind an der Messstation auf Grund des Höhenunterschieds von ca. 200 m etwas niedrigere Temperaturen zu erwarten. Da sich die Messstation zwischen Ostheim und Heufurt befindet werden die Niederschläge zwischen denen der beiden Stationen liegen, aber auf Grund des Luvs des Höhenrückens vermutlich näher an Heufurt. Zusätzlich befindet sich die Monitoringstation nur ca. 250 m östlich und 15 Höhenmeter unterhalb des Hasenkopf (514 m NHN).

Alle drei Standorte liegen allerdings im Regenschatten der Langen Rhön oder Hochrhön und erhalten deutlich weniger Niederschläge als die Wasserkuppe mit 1108,2 mm (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2022d).

5.6.2 Bodengeographische Analysen Willmars

5.6.2.1 Gelände- und Labordaten Profil W 1

Geländedaten

Das Profil W 1 ist eine schwach podsolierte Braunerde und befindet sich auf einer Höhe von 503 m NHN, etwa 264 m östlich des Hasenkopfs (514 m NHN, s. Abbildung 59). Die nach Westen ausgerichtete Profilwand ist 124 cm tief und auf Grund des hohen Anteils an Sandsteinblöcken leicht geneigt. Das Profil befindet sich in einem Mischwald mit einem hohen Fichtenanteil.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
-	L	2 - 6	e - w, sc, h	-	-	-	-	-
W 1-1	Ah	7 - 11	e, sc, h	10YR 2/1	SI2	G: sub, kru F: ein	einzelne gebleichte Sandkörner	
W 1-2	Aeh	27 - 40	w, de, h-g	7,5YR 4/3	Su2	G: sub F: ein	gebleichte Sandkörner	LB1
W 1-3	Bv	53 - 83	w + z, di-de, h	10YR 4/6	SI2	G: sub F: ein	einzelne gebleichte Sandkörner	LB1
W 1-4	ICv ₁	105	h	10YR 5/6 5YR 4/6	SI2	G: sub F: ein	dichter als Bfv und ICv ₂	LB1
W 1-5	ICv ₂	124	-	10YR 6/6	SI2	G: sub F: ein	-	LB2

Tabelle 47: *Geländedaten Profil W 1.*

Schwach podsolierte Braunerde auf Mittlerem Buntsandstein. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Bodenprofil W 1 konnte in fünf Horizonte unterteilt werden (s. Abbildung 63 u. Tabelle 47). Die rezente Bodenoberfläche besteht im linken Bereich aus einer 2 cm bis 6 cm mächtigen organischen Auflage (L-Horizont) aus Nadeln und Moosen. Der oberste Horizont wurde als Ah-Horizont angesprochen. Der schwach lehmige Sand weist eine schwarze Bodenfarbe auf und ist locker gelagert. Der Ah-Horizont besitzt als Grobgefüge ein Krümel- bis Subpolyedergefüge, als Feingefüge ein Einzelkorngefüge. Im Ah-Horizont waren einzelne gebleichte Sandkörner zu finden, was auf eine initiale Podsolierung schließen lässt. Die Horizontuntergrenze des Ah-Horizonts verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 7 cm bis 11 cm, ist ebenförmig bis wellig und scharf erkennbar. Der schwach schluffige Sand des darunterliegenden Aeh-Horizonts weist als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge, als Feingefüge ein Einzelkorngefüge auf. Die braune Farbe des Aeh-Horizonts weist einen leichten Graustich auf. Auf eine Podsolierung weisen gebleichte Sandkörner hin. Neben zahlreichen kleinen Sandsteinen finden sich im Aeh-Horizont vor allem in der rechten Profilhälfte mehrere große Sandsteinblöcke mit Durchmessern von mehreren Dezimetern. Der Aeh-Horizont weist einen hohen Anteil an Feinwurzeln und einen mittleren Anteil an Grobwurzeln auf. Die wellige und deutlich erkennbare Untergrenze des Aeh-Horizonts verläuft in geneigter Lage in einer Tiefe von 27 cm auf der linken Profiseite bis auf eine Tiefe von 40 cm auf der rechten Profiseite. Der schwach lehmige Sand des Bv-Horizonts ist sehr locker gelagert und besitzt als Grobgefüge ein

Subpolyedergefüge, als Feingefüge ein Einzelkorngefüge. Vom Aeh-Horizont unterscheidet sich der Bv-Horizont durch eine dunkel gelblichbraue Farbe. Im Bv-Horizont finden sich viele mittlere Sandsteinblöcke. In der oberen Hälfte des Bv-Horizonts findet sich ein mittlerer Anteil an Feinwurzeln und ein schwacher Anteil an Grobwurzeln. In der unteren Horizonthälfte findet sich hingegen nur ein schwacher Anteil an Feinwurzeln. Die Untergrenze des Bv-Horizonts verläuft geneigt in einer Tiefe von 53 cm auf der linken Seite bis 83 cm auf der rechten Seite. Die wellige und stellenweise zungenförmige Horizontuntergrenze ist diffus bis deutlich erkennbar. Der schwach lehmige Sand des darunterliegende ICv₁-Horizont weist eine inhomogene Farbe aus gelblichbraun und gelblichrot auf. Der ICv₁-Horizont besitzt als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge, als Feingefüge ein Einzelkorngefüge und ist dichter gelagert als der hangende Bv- und der liegende ICv₂-Horizont. Im ICv₁-Horizont findet sich ein sehr schwacher Anteil an Feinwurzeln. Die Untergrenze des ICv₁-Horizont verläuft entlang großer Sandsteinblöcke und hat nur an der rechten Profilseite in 105 cm Tiefe direkten Kontakt zum ICv₂-Horizont. Der basale ICv₂-Horizont reicht bis zu einer großen Sandsteinplatte in 124 cm Tiefe. Der ICv₂-Horizont weist einen bräunlichgelben schwach lehmigen Sand mit einem Subpolyedergefüge als Grobgefüge und Einzelkorngefüge als Feingefüge auf. Der ICv₂-Horizont ist durch große Sandsteinblöcke geprägt.

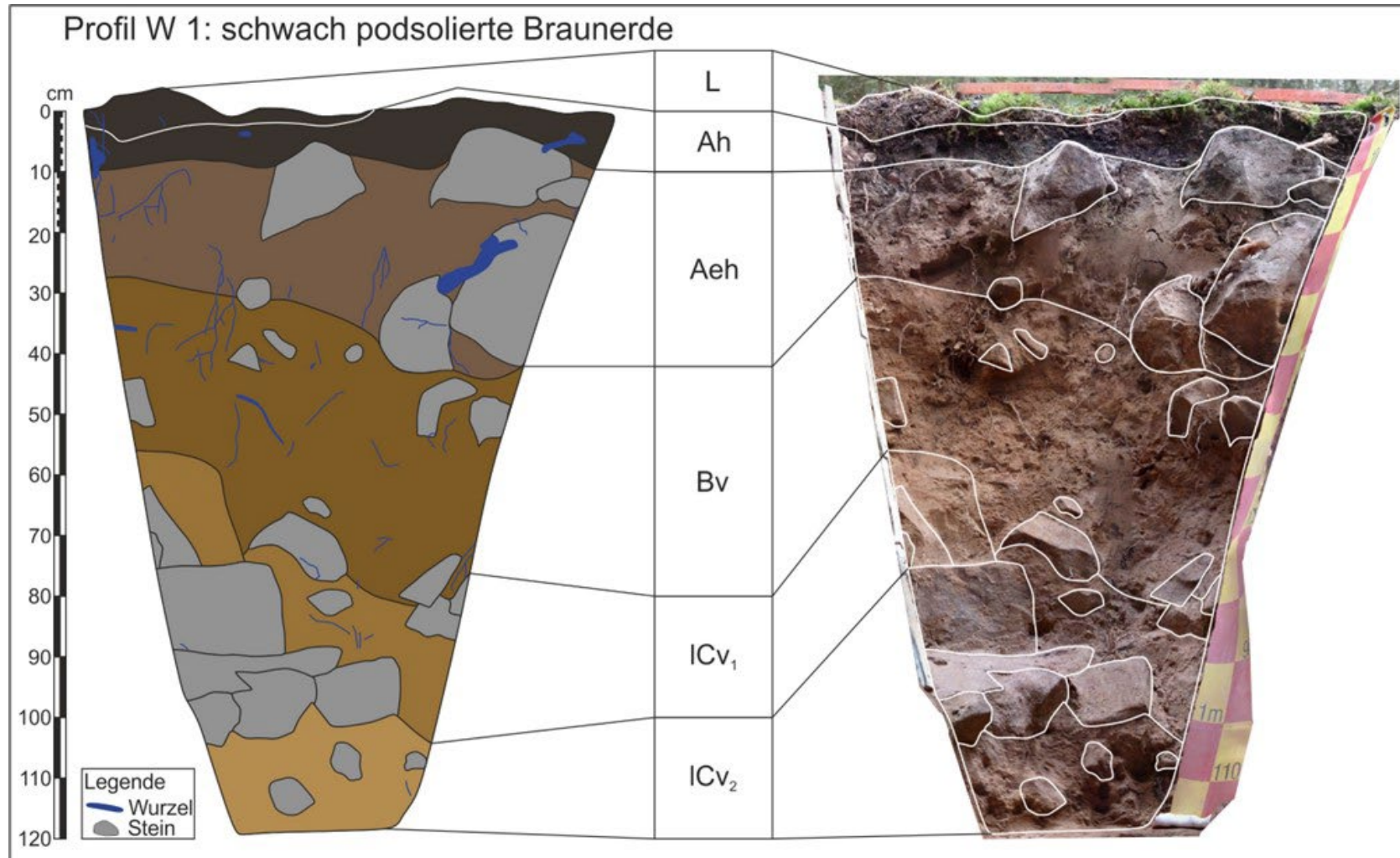


Abbildung 63: Profilzeichnung Profil W 1.

Schwach podsolierte Braunerde. Die organische Streu des L-Horizonts ist nur in der linken Profilhälfte mehrere Zentimeter mächtig. Das Profil W 1 befindet sich 13 m unterhalb des Hasenkopfs auf einer Höhe von 503 m NHN.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

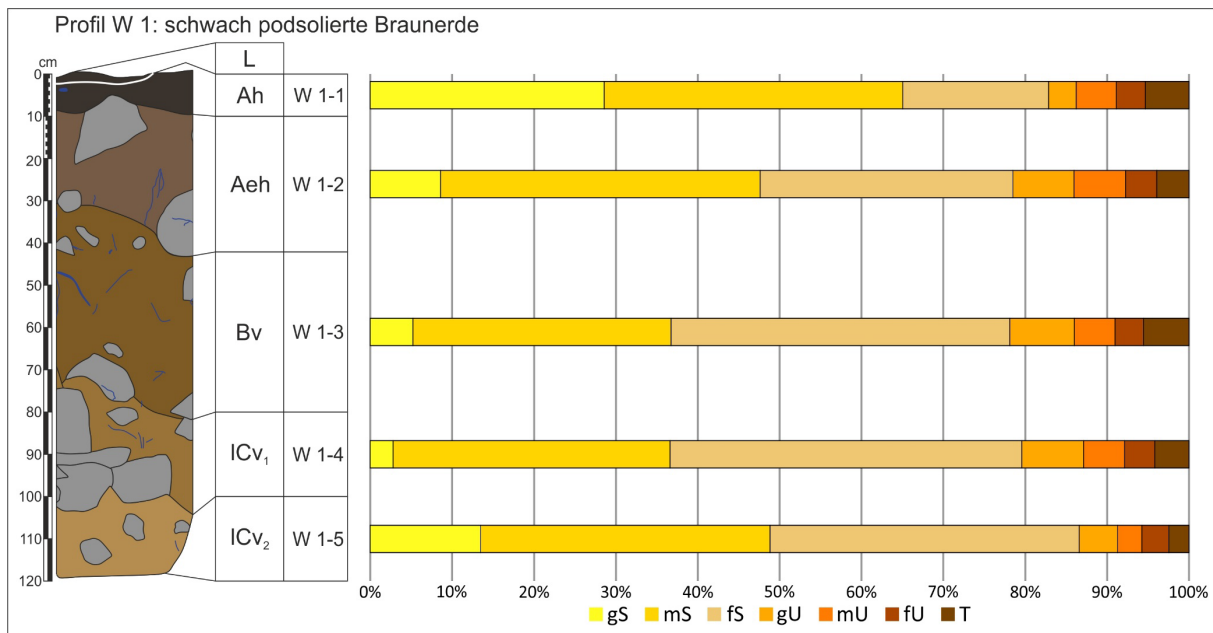


Abbildung 64: Korngrößendiagramm Profil W 1.

Quelle: eigene Darstellung.

Der Sandanteil im Profil W 1 liegt zwischen 78,12 % im Bv-Horizont und 86,61 % im IC_{v2}-Horizont (s. Abbildung 64 u. Tabelle 48). Die Sandfraktion wird im Ah-Horizont durch Grob- und Mittelsand, in den darunterliegenden Horizonten durch Mittel- und Feinsand dominiert. Der Schluffanteil liegt zwischen 10,96 % im IC_{v2}- und 17,6 % im Aeh-Horizont. In den Horizonten mit den höchsten Schluffanteilen (Aeh, Bv und IC_{v1}) überwiegen die Grob- und Mittelschlufffraktionen. Der Tonanteil liegt zwischen 2,43 % im basalen IC_{v2}-Horizont und 5,54 % im Bv-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fs	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
W 1-1	19/259	Ah	28,57	36,48	17,81	3,39	4,88	3,54	5,33	82,86	11,81	5,33	3,01	-	22,21	2,7347 · 10 ⁻⁵
W 1-2	19/260	Aeh	8,59	39,02	30,88	7,46	6,31	3,83	3,91	78,50	17,60	3,91	3,30	-	1,38	-
W 1-3	19/261	Bv	5,21	31,51	41,40	7,88	4,97	3,49	5,54	78,12	16,34	5,54	3,96	-	0,51	-
W 1-4	19/262	IC _{v1}	2,80	33,84	42,94	7,57	5,01	3,68	4,16	79,58	16,26	4,16	4,08	-	0,35	-
W 1-5	19/263	IC _{v2}	13,50	35,32	37,79	4,67	2,99	3,31	2,43	86,61	10,96	2,43	3,95	-	0,22	-

Tabelle 48: Laborwerte Profil W 1.

Die pH-Werte im Profil W 1 nehmen mit der Tiefe zu und liegen zwischen 3,01 (extrem sauer) im Ah- und 4,08 (sehr stark sauer) im IC_{v1}-Horizont (s. Tabelle 48). Das gesamte Profil W 1 ist carbonatfrei. Signifikante Humusgehalte finden sich nur im Ah-Horizont mit 22,21 % (extrem humos) und im Aeh-Horizont mit 1,38 % (schwach humos). Darunter nimmt der Humusgehalt mit der Tiefe weiter ab.

Der k_f-Wert konnte nur für den Ah-Horizont bestimmt werden. Aus den darunterliegenden Horizonten konnte auf Grund des hohen Sandsteinanteils keine Stechzylinder entnommen werden. Die hydraulische Leitfähigkeit des Ah-Horizonts wird als „sehr hoch“ eingestuft.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
W 1-1	Ah	21/110	0,63	0,76	0,80	Ld 1	35	33	31	130,8 mittel
		21/111	0,89							
W 1-2	Aeh	21/112	1,33	1,29	1,33	Ld 2	24,05	18,05	30,35	
		21/113	1,25							
W 1-3	Bv	-	1,29		1,33 (W 1-2)	Ld 2	23,1	15,1	28,3	
W 1-4	ICv ₁	-	1,56		1,60	Ld 3	20,4	12,4	20,5	
W 1-5	ICv ₂	-	1,31		1,33 (W 1-2)	Ld 2	22,9	14,9	27,7	

Tabelle 49: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 1.

Aus den Horizonten Bv, ICv₁ und ICv₂ konnten auf Grund der zahlreichen Sandsteinblöcke keine Stechzylinder entnommen werden. Die TRD wurde auf Basis der Ld vergleichbarer Horizonte berechnet. TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach Renger et al. (2009) und Renger et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Für die sehr geringe TRD des Ah-Horizonts konnte Renger et al. (2009) kein Tabellenwert für FK, nFK und LK entnommen werden. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohddichte ρ_t nimmt vom Ah-Horizont mit 0,76 g/cm³ (sehr gering) auf 1,56 g/cm³ (mittel) im ICv₁-Horizont zu (s. Tabelle 49). Im ICv₂-Horizont nimmt sie wieder leicht ab (vgl. Tabelle 49). Die effektive Lagerungsdichte nimmt mit der Tiefe von 0,80 g/cm³ (sehr gering) auf 1,60 g/cm³ (mittel) im ICv₁-Horizont zu. Die FK aller Horizonte ist „gering“. Die nFK nimmt mit der Tiefe leicht von 18,05 Vol.-% (mittel) im Aeh-Horizont auf 12,4 Vol.-% (gering) im ICv₁-Horizont ab. Parallel dazu nimmt auch die LK von 30,35 Vol.-% (sehr hoch) auf 20,5 Vol.-% (hoch) ab. Die nFKWe ist mit 130,8 l/m² als „mittel“ eingestuft.

5.6.2.2 Gelände- und Labordaten Profil W 2

Geländedaten

Das Profil W 2 ist eine pseudovergleyte Braunerde in Hangablagerungen über Tonsiltstein des Mittleren Buntsandsteins und befindet sich am flachen Mittelhang auf einer Höhe von 489 m NHN (s. Abbildung 59). Die Profilwand ist nach Westen ausgerichtet und ist 106 cm tief. Das Profil befindet sich in einem Mischwald mit einem hohen Laubbaumanteil in der näheren Umgebung des Profils.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
W 2-1	Ah	5 - 18	w - k, sc, h	10YR 2/1	Sl3	G: sub F: sub	einzelne gebleichte Sandkörner	LH
W 2-2	Bv ₁	23 - 32	w, de, h	7,5YR 4/6	Sl3	G: sub F: sub, ein	stark durchwurzelt	LH
W 2-3	Bv ₂	36 - 40	w - e, de, h	10YR 4/6	Sl3	G: sub F: sub - ein	dichter als Bv ₁	LH
W 2-4	Bv ₃	45 - 70	w - k, de, g	10YR 7/3 7,5YR 4/6	Sl3	G: sub F: sub - kit	Rostflecken 10 R 4/4	LH
W 2-5	Sw-Bv	57 - 78	e + Stufe, de, h	2,5YR 3/6 2,5YR 7/3	Sl4	G: pol F: ein + pol	Rostflecken + weiße Flecken	LH
W 2-6	IICv-P ₁ (Sd)	70 - 73	e, de, h	2,5YR 4/4	Lt3	G: pol F: pol	-	LB
W 2-7	IICv-P ₂ (Sd)	99 - 106	-	2,5 YR 4/4 Gley1 6/N	Lt2	G: pol F: pol	alte Wurzelgänge, Rostflecken	LB

Tabelle 50: Geländedaten Profil W 2.

Pseudovergleyte Braunerde in Hangablagerungen über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandsteins. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil W 2 wurde in sieben Horizonte unterteilt (s. Abbildung 65 u. Tabelle 50). Die rezente Bodenoberfläche bildet der Ah-Horizont, welcher durch eine dünne Laubschicht bedeckt ist. Der schwarze, mittel lehmige Sand des Ah-Horizonts besitzt ein Subpolyedergefüge. Unregelmäßige Feinwurzeln und nestartige Grobwurzeln haben einen starken Anteil im Ah-Horizont. Im Horizont fanden sich auch einzelne gebleichte Sandkörner. Die wellige bis keilförmige Horizontuntergrenze verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 5 cm bis 18 cm und ist scharf erkennbar. Der darunterliegende Bv₁-Horizont unterscheidet sich durch eine kräftig braune Farbe. Der mittel lehmige Sand weist als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge, als Feingefüge ein Subpolyedergefüge stellenweise auch ein Einzelkorngefüge auf. Der Anteil der Grobwurzeln im Bv₁-Horizont ist schwach, der Anteil der Feinwurzeln stark. Die wellige, deutlich erkennbare Horizontuntergrenze des Bv₁-Horizonts verläuft in einer Tiefe von 23 cm bis 32 cm in horizontaler Lage. Der dunkel gelblichbraune mittel lehmige Sand des Bv₂-Horizonts besitzt als Grobgefüge ein Subpolyedergefüge und als Feingefüge ein Subpolyeder- bis Einzelkorngefüge und ist dichter gelagert als der Bv₁-Horizont. Im Bv₂-Horizont findet sich ein sehr schwacher Anteil an Grob- und Feinwurzeln. Die ebene bis leicht wellige Horizontuntergrenze des Bv₂-Horizonts verläuft in einer Tiefe von 36 cm bis 40 cm in horizontaler Lage und ist deutlich erkennbar. Der mittel lehmige Sand des Bv₃-Horizont besitzt eine

sehr blassbraune Grundfarbe und kräftig braune Flecken. Das Grundgefüge ist ein Subpolyederggefüge, das Feingefüge ein Subpolyederggefüge, stellenweise ein Kitgefüge. Am Übergang zum darunterliegenden Sw-Bv-Horizont sind schwach rote Rostflecken zu finden. Feinwurzeln haben einen sehr schwachen Anteil im Bv₃-Horizont und im unteren Bereich es Keils findet sich eine Grobwurzel. Die Horizontuntergrenze des Bv₃-Horizont ist leicht wellig in einer Tiefe von 45 cm mit einem Keil in der rechten Profilhälfte bis auf eine Tiefe von 70 cm. Die Horizontuntergrenze ist deutlich erkennbar und verläuft in leicht geneigter Lage. Der darunterliegende Sw-Bv-Horizont besitzt einen mittel lehmigen Sand mit einem Polyederggefüge als Grobgefüge und einem Einzelkorngefüge, stellenweise einem Polyederggefüge, als Feingefüge. Die Bodenfarbe des Sw-Bv-Horizont besitzt eine dunkel rote Grundfarbe und leicht rötlich braune Flecken. Zusätzlich findet sich im Sw-Bv-Horizont, vor allem in der rechten Profilhälfte, ein hoher Flächenanteil schwach roter Rostflecken. Einzelne Grobwurzeln finden sich im Sw-Bv-Horizont nur punktuell, Feinwurzeln sind keine zu finden. Am Übergang zum IICv-P₁(Sd)-Horizont verläuft die wellige Horizontuntergrenze in einer Tiefe von 57 cm bis 60 cm und endet in der Profilmittle mit einer Stufe von ca. 20 cm. Rechts davon verläuft die Untergrenze des Sw-Bv-Horizonts zum liegenden IICv-P₁(Sd)-Horizont eben in 78 cm Tiefe. Der IICv-P₁(Sd)-Horizont befindet sich nur in der linken Profilhälfte. Der rötlichbraune mittel tonige Lehm besitzt als Grob- und Feingefüge ein Polyederggefüge. Im IICv-P₁(Sd)-Horizont findet sich ein sehr schwacher Anteil an Grob- und Feinwurzeln. Die ebene Horizontgrenze verläuft horizontal in einer Tiefe von 70 cm bis 73 cm und ist deutlich erkennbar. Der basale IICv-P₂(Sd)-Horizont besteht aus einem schwach tonigen Lehm mit einem Polyederggefüge als Grob- und Feingefüge. In die rötlichbraune Grundfarbe des IICv-P₂(Sd)-Horizont sind graue Flecken eingelagert. Außerdem finden sich hier kleinere Rostflecken. Der IICv-P₂(Sd)-Horizont weist einen sehr schwachen Anteil Feinwurzeln, aber auch noch alte Wurzelgänge, auf. Das Profil endet in einer Tiefe von 99 cm bis 106 cm, der IICv-P₂(Sd)-Horizont setzt sich aber noch in die Tiefe fort.

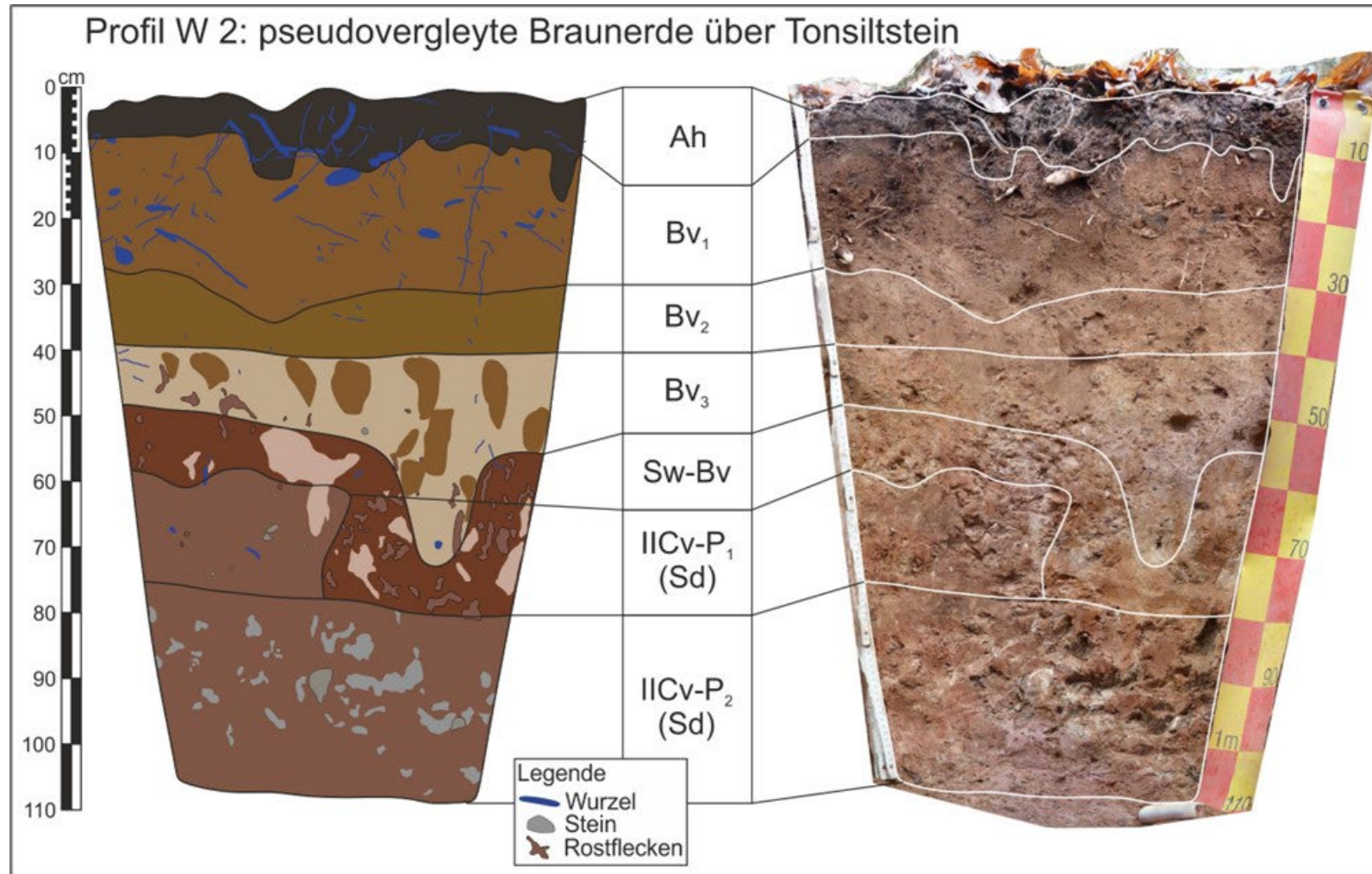


Abbildung 65: Profilzeichnung Profil W 2.

Pseudovergleyte Braunerde in Hangablagerungen über Tonsiltsteinen. Die anstehenden Tonsiltsteine fungieren als Wasserstauer und sind für die Pseudovergleyung verantwortlich. Der Forst in der Umgebung des Profils ist ein Mischwald mit hohem Laubbaumanteil.

Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

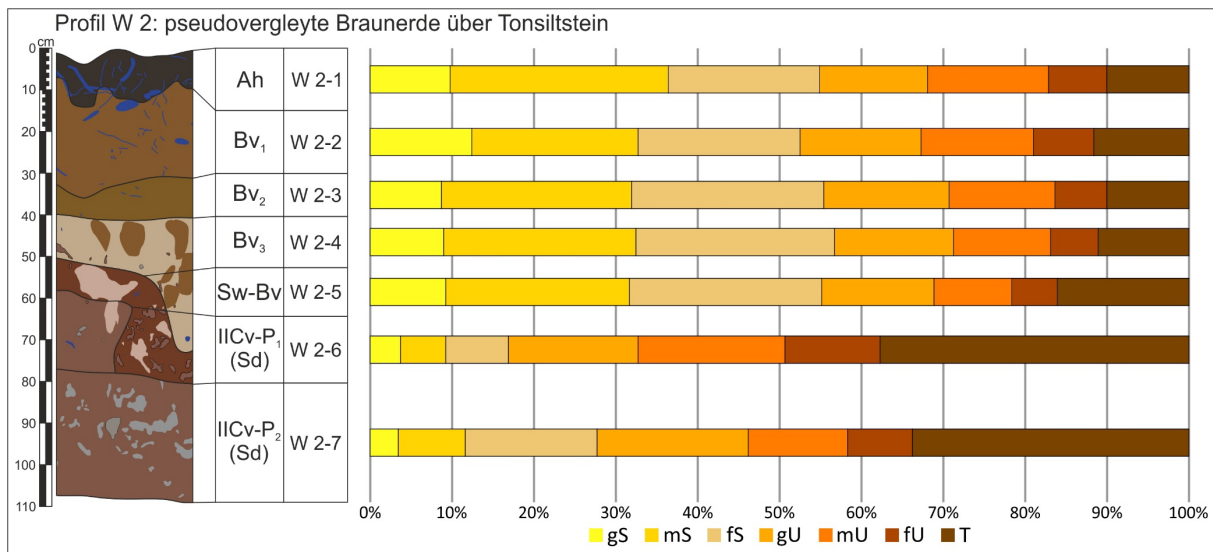


Abbildung 66: Korngrößendiagramm Profil W 2.

Quelle: eigene Darstellung

Der Sandanteil im Profil W 2 liegt zwischen 56,74 % im Bv₃-Horizont und 16,90 % im IICv-P₁(Sd)-Horizont (s. Abbildung 66 u. Tabelle 51). In den oberen fünf Horizonten schwankt der Sandanteil aber nur geringfügig und die größten Unterschiede finden sich in den einzelnen Sandfraktionen, wobei Mittel- und Feinsand dominierend sind. Der Schluffanteil liegt zwischen 28,72 % im Sw-Bv- und 45,23 % im IICv-P₁(Sd)-Horizont. Bis zum Sw-Bv-Horizont nimmt der Schluffanteil zunächst mit der Tiefe ab. Die dominierenden Fraktionen sind Grob- und Feinschluff. Der Tonanteil liegt zwischen 10,16 % im Ah-Horizont und 37,89 % im IICv-P₁(Sd)-Horizont und nimmt mit der Tiefe zu.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _r -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
W 2-1	19/264	Ah	9,85	26,56	18,38	13,23	14,67	7,15	10,16	54,79	35,05	10,16	3,83	-	6,97	5,423 · 10 ⁻⁵
W 2-2	19/265	Bv ₁	12,29	20,39	19,81	14,61	13,77	7,38	11,75	52,49	35,76	11,75	3,61	-	3,03	0,000151284
W 2-3	19/267	Bv ₂	8,81	23,15	23,50	15,12	12,94	6,31	10,19	55,45	34,36	10,19	3,85	-	0,18	5,971 · 10 ⁻⁵
W 2-4	19/268	Bv ₃	8,99	23,43	24,33	14,51	11,81	5,81	11,11	56,75	32,14	11,11	3,86	-	0,02	3,372 · 10 ⁻⁵
W 2-5	19/269	Sw-Bv	9,35	22,31	23,53	13,71	9,35	5,66	16,10	55,19	28,72	16,10	3,75	-	0,00	1,709 · 10 ⁻⁵
W 2-6	19/270	IICv-P ₁ (Sd)	3,63	5,51	7,76	15,90	17,83	11,49	37,86	16,90	45,23	37,86	3,5	-	0,00	4,924 · 10 ⁻⁷
W 2-7	19/271	IICv-P ₂ (Sd)	3,51	8,17	15,96	18,39	12,22	7,82	33,93	27,64	38,43	33,93	3,45	-	0,00	5,881 · 10 ⁻⁷

Tabelle 51: Laborwerte Profil W 2.

Die pH-Werte im Profil W 2 nehmen mit der Tiefe ab und liegen zwischen 3,86 im Bv₃- und 3,45 im IICv-P₂(Sd)-Horizont (s. Tabelle 51). Alle Horizonte sind „sehr stark sauer“. Das gesamte Profil W 2 ist carbonatfrei. Signifikante Humusgehalte finden sich nur mit 6,98 % (stark humos) im Ah- und 3,03 % (mittel humos) im Bv₁-Horizont.

Die oberen fünf Horizonte weisen eine hohe bis extrem hohe hydraulische Leitfähigkeit auf. Die wasserstauend basalen Horizonte IICv-P₁(Sd) und IICv-P₂(Sd) haben dagegen nur eine sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit.

Horizontnummer	Horizont	Labornummer	TRD ρ_t [g/cm ³]		nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
					Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
W 2-1	Ah	21/114	1,45	1,32	1,41	Ld 2	32,8	19,8	23,6	135,7 mittel
		21/115	1,19							
W 2-2	Bv ₁	21/116	1,23	1,29	1,38	Ld 2	29,1	18,1	25,2	
		21/117	1,35							
W 2-3	Bv ₂	21/118	1,34	1,36	1,45	Ld 2	24,6	14,6	24,8	
		21/119	1,38							
W 2-4	Bv ₃	21/120	1,59		1,68	Ld 3	22,55	12,55	17,3	
W 2-5	Sw-Bv	-	1,57		1,68 (W 2-5)	Ld 4	24,65	11,65	15,9	
W 2-6	IICv-P ₁ (Sd)	-	1,57		1,80 (W 2-7)	Ld 4	32,3	8,3	8,25	
W 2-7	IICv-P ₂ (Sd)	21/121	1,59		1,80	Ld 4	29,1	9,1	10,75	

Tabelle 52: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 2.

Aus den Horizonten Sw-Bv und IICv-P₁ konnten keine Stechzylinder entnommen werden. Die TRD wurde für diese Horizonte auf Basis der Ld vergleichbarer Horizonte berechnet TRD und Ld, sowie FK, nFK und LK wurden nach Renger et al. (2009) und Renger et al. (2014a) berechnet und abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohdichte ρ_t im Profil W 2 nimmt mit der Tiefe von „gering“ auf „mittel“ zu (s. Tabelle 52). Analog dazu nimmt auch die effektive Lagerungsdichte von „gering“ im Ah-Horizont auf „hoch“ im IICv-P₂(Sd)-Horizont zu. Die FK nimmt mit der Tiefe von 32,8 Vol.-% im Ah-Horizont (mittel) auf 22,55 Vol.-% im Bv₃-Horizont (gering) ab und steigt im IICv-P₁(Sd)-Horizont wieder auf 32,3 Vol.-% (mittel) an. Die nFK nimmt von 19,8 Vol.-% im Ah-Horizont (mittel) auf 8,3 Vol.-% (gering) im IICv-P₁(Sd)-Horizont ab. Parallel dazu nimmt auch die LK von „hoch“ im Ah-Horizont auf „mittel“ im IICv-P₁(Sd)-Horizont ab. Die mittlere nFKWe beträgt 135,7 l/m².

5.6.2.3 Gelände- und Labordaten Profil W 3

Geländedaten

Das Profil W 3 ist eine schwach podsolierte Braunerde über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandseins und befindet sich am flachen Mittelhang auf einer Höhe von 476 m NHN (s. Abbildung 59). Die Profilwand ist nach Westen ausgerichtet und 110 cm tief. Das Profil W 3 befindet sich in einer Fichtenmonokultur mit sehr wenig Unterholz und der Boden ist fast vollständig durch Moose und Rohhumus bedeckt. Um das Profil finden sich viele Sandsteinblöcke an der Geländeoberfläche.

Horizontnummer	Horizont	Tiefe [cm]	Horizontuntergrenzen	Farbe	Bodenart	Gefüge	sonstige Merkmale	Periglaziale Lagen
W 3-1	Ah	8 - 13	e, sc, h	10YR 2/1	Sl3	G: sub F: sub	stark durchwurzelt	LH
W 3-2	Bv-Aeh	15 - 20	e (w), de, h	7,5YR 4/1	Sl3	G: sub F: sub	gebleichte Sandkörner	LH
W 3-3	Bv	53 - 58	w, di, h	7,5YR 6/4	Sl3	G: sub F: sub	-	LH
W 3-4	BvCv	60 - 65	w, di, h	2,5YR 6/4	Sl4	G: pol F: pol	-	LB
W 3-5	IICv-P	110	-	10R 4/6	Lts	G: pol F: pol	-	LB

Tabelle 53: Geländedaten Profil W 3.

Schwach podsolierte Braunerde über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandsteins. Bodenansprache nach KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005) und Munsell Soil Color Chart (MUNSELL, 1994).

Das Profil W 3 wurde in fünf Horizonte unterteilt (s. Abbildung 67 u. Tabelle 53). Die rezente Bodenoberfläche bildet der Ah-Horizont, welcher durch eine dünne Rohhumus- und Moossschicht bedeckt ist. Der schwarze, mittel lehmige Sand weist als Grob- und Feingefüge ein Subpolyedergefüge auf. Der Ah-Horizont besitzt einen schwachen Grobwurzel- und einen starken Feinwurzelanteil. Die ebene, scharf erkennbare Horizontuntergrenze des Ah-Horizonts verläuft in einer Tiefe von 8 cm bis 13 cm in horizontaler Lage. Der darunterliegende Bv-Aeh-Horizont besteht aus einem dunkelgrauen mittel lehmigem Sand. Der Bv-Aeh-Horizont weist ein Subpolyedergefüge als Grob- und Feingefüge auf und enthält gebleichte Sandkörner. Im Bv-Aeh-Horizont befindet sich ein ca. 20 cm großer Sandsteinblock, der den Horizont unterbricht und bis in eine Tiefe von 25 cm in den Bv-Horizont hineinreicht. Die teils ebene, teils wellige Untergränze des Bv-Aeh-Horizonts verläuft horizontal in einer Tiefe von 15 cm bis 20 cm und ist deutlich erkennbar. Der mittel lehmige Sand des Bv-Horizonts unterscheidet sich vom Bv-Aeh-Horizont vor allem durch seine hellbraune Farbe. Das Grob- und Feingefüge des Bv-Horizonts ist ein Subpolyedergefüge. Im Bv-Horizont finden sich neben mehreren bis zu 40 cm großen Sandsteinblöcken, sehr viele kleine Sandsteine von bis zu 10 cm Durchmesser. Die Durchwurzelung des Bv-Horizonts ist hoch, wobei Grobwurzeln und Feinwurzeln einen nestartigen mittleren Anteil haben. Die wellige Untergränze des Bv-Horizonts verläuft in horizontaler Lage in einer Tiefe von 53 cm bis 58 cm und ist diffus erkennbar. Darunter folgt der Bv-Cv-Horizont welcher einen leicht rötlichbraunen stark lehmigen Sand mit einem Polyedergefüge als Grob- und Feingefüge besitzt. Der Bv-Cv-Horizont ist dichter gelagert als der Bv-Horizont und weist ebenfalls zahlreiche Sandsteine auf. Der Bv-Cv-Horizont hat einen schwachen unregelmäßigen Anteil an Grob- und Feinwurzeln. Die wellige, horizontal verlaufende und diffus erkennbare Horizontuntergränze des befindet sich in einer Tiefe von 60 cm bis 65 cm. Den basalen Abschluss des Profils W 3 bildet der IICv-P-Horizont, der bis in eine Tiefe von 110 cm reicht. Der IICv-P-Horizont weist einen sandig-tonigen Lehm mit roter Bodenfarbe und einer hohen Lagerungsdichte auf. Das Grob- und Feingefüge des sandig-tonigen Lehms ist ein Polyedergefüge. Im IICv-P-Horizont findet sich

ein schwacher Anteil an Grob- und Feinwurzeln. Sandsteine haben einen hohen Anteil mit Durchmessern von wenigen Zentimetern bis zu 20 cm. Einige Sandsteine weisen Rostfarben auf.

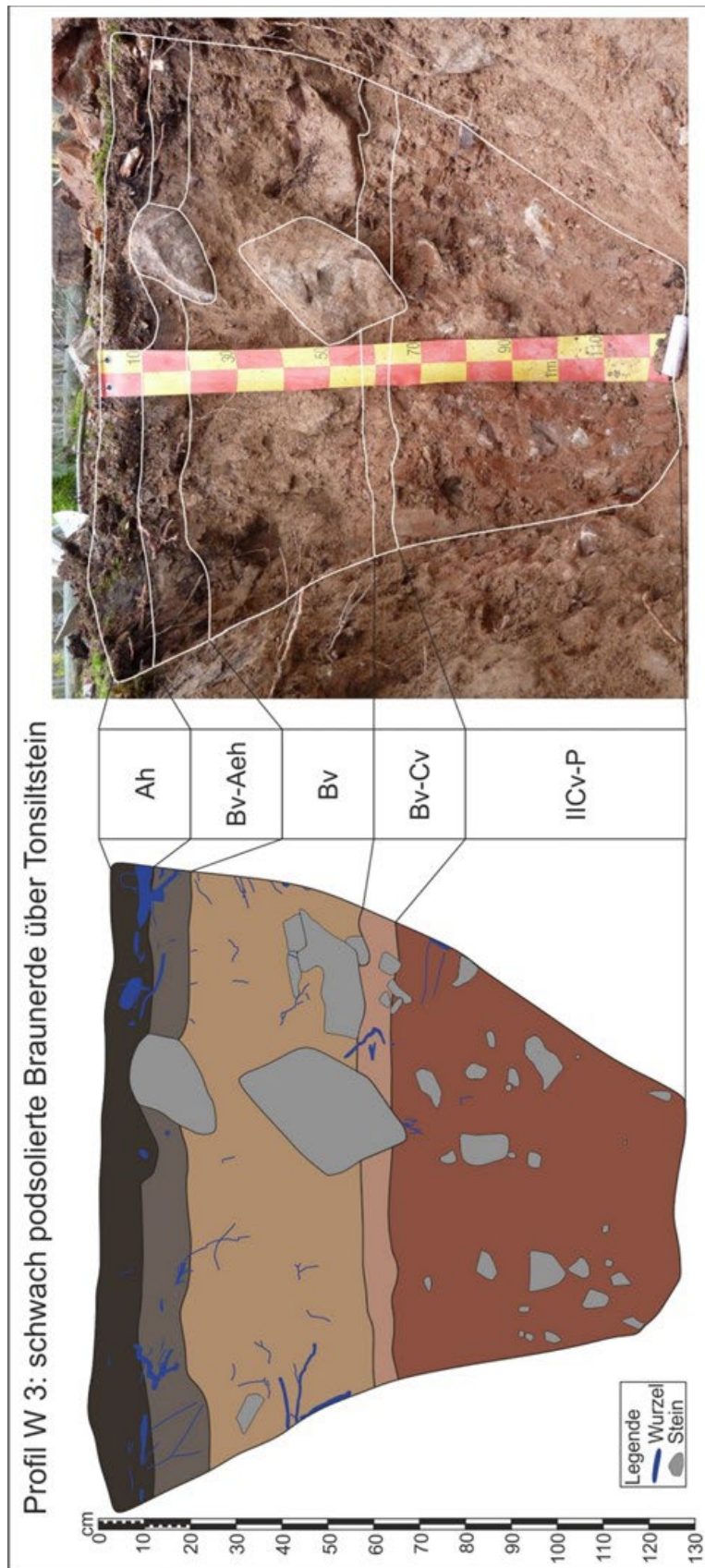


Abbildung 67: Profilzeichnung Profil W 3.
Schwach podsolierte Braunerde über Tonsiltsteinen. Das Profil W 3 befindet sich am flachen Mittelhang auf 476 m NHN in einer Fichtenmonokultur. Der Boden ist fast vollständig mit Moos und Rohhumus bedeckt. Oberflächlich finden sich sehr viele Sandsteinblöcke in der Umgebung des Profils.
Quelle: eigene Darstellung.

Labordaten

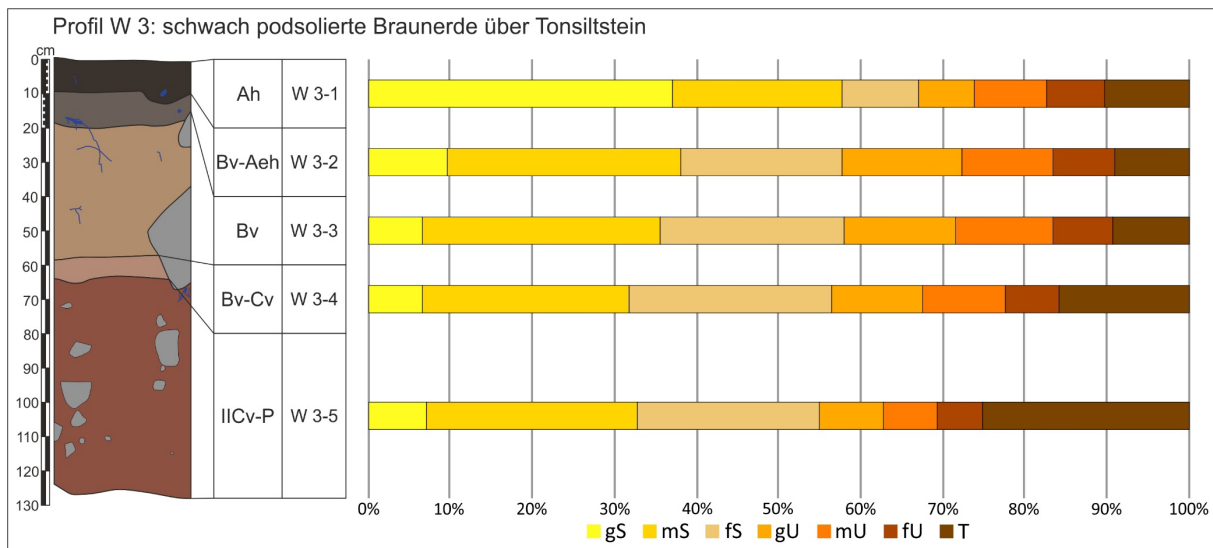


Abbildung 68: Korngrößendiagramm Profil W 3.

Quelle: eigene Darstellung.

Der Sandanteil im Profil W 3 nimmt mit der Tiefe ab und liegt zwischen 66,99 % im Ah-Horizont und 54,72 % im IICv-P-Horizont (s. Abbildung 68 u. Tabelle 54). Im Ah-Horizont dominieren die Grob- und Mittelsandfraktionen, in den darunterliegenden Horizonten dagegen Mittel- und Feinsand. Der Schluffanteil liegt zwischen 20,03 % im IICv-P-Horizont und 33,27 % im Bv-Aeh-Horizont. Die Schlufffraktion wird im Bv-Aeh-, Bv- und Bv-Cv-Horizont von Grob- und Mittelschluff dominiert. In den anderen Horizonten sind die Schlufffraktionen gleichmäßig vertreten. Der Tonanteil liegt zwischen 9,22 % im Bv-Aeh-Horizont und 25,25 % im basalen IICv-P-Horizont.

Horizontnummer	Labornummer	Horizont	Korngrößenverteilung [%]									pH [CaCl ₂]	CaCO ₃ [%]	Humusgehalt [%]	k _f -Wert [m/s]	
			gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	ΣS	ΣU					ΣT
W 3-1	19/272	Ah	36,85	20,67	9,46	6,82	8,78	6,95	10,47	66,99	22,54	10,47	3,17	-	37,15	-
W 3-2	19/273	Bv-Aeh	9,60	28,48	19,42	14,60	11,27	7,40	9,22	57,50	33,27	9,22	3,20	-	3,09	8,342 · 10 ⁻⁵
W 3-3	19/274	Bv	6,46	28,93	22,43	13,70	11,68	7,50	9,31	57,81	32,88	9,31	3,70	-	0,92	5,835 · 10 ⁻⁵
W 3-4	19/275	Bv-Cv	6,40	25,27	24,58	11,05	10,12	6,63	15,95	56,25	27,80	15,95	3,64	-	0,00	-
W 3-5	19/276	IICv-P	7,06	25,59	22,07	7,99	6,57	5,47	25,25	54,72	20,03	25,25	3,54	-	0,00	-

Tabelle 54: Laborwerte Profil W 3.

Der pH-Wert im Profil W 3 nimmt mit der Tiefe zu und liegt zwischen 3,17 (extrem sauer) im Ah-Horizont und 3,7 (sehr stark sauer) im Bv-Horizont (s. Tabelle 54). Das gesamte Profil W 3 ist carbonatfrei. Signifikante Humusgehalte finden sich mit 37,15 % (organisch) im Ah-Horizont und 3,09 % (mittel humos) im Bv-Aeh-Horizont. Der Bv-Horizont ist noch „sehr schwach humos“, die basalen Horizonte sind humusfrei.

Der k_f-Wert konnte auf Grund der hohen Sandsteingehalte nur für den Bv-Aeh- und den Bv-Horizont bestimmt werden. Beide Horizonte weisen eine extrem hohe hydraulische Leitfähigkeit auf.

Horizont- nummer	Horizont	Labor- nummer	TRD ρ_t [g/cm ³]	nach Renger et al 2014		nach Renger et al 2009			nFKWe [l/m ²]
				Ld [g/cm ³]	Kurzzeichen Ld	FK [Vol%]	nFK [Vol%]	LK [Vol%]	
W 3-1	Ah	-	1,34	1,41 (W 2-1)	Ld 2	39,6	24,6	21,8	114 mittel
W 3-2	Bv-Aeh	-	1,30	1,38 (W 2-2)	Ld 2	29,0	18,0	25,0	
W 3-3	Bv	-	1,37	1,45 (W 2-3)	Ld 2	24,3	14,3	23,9	
W 3-4	Bv-Cv	-	1,34	1,45 (W 2-3)	Ld 2	27,4	14,4	22,0	
W 3-5	IICv-P	-	1,65	1,80 (UW 2-7)	Ld 4	31,5	9,5	7,25	

Tabelle 55: Bodenphysikalische Kennwerte Profil W 3.

Aus dem Profil W 3 konnten keine Stechzylinder zur Bestimmung der TRD entnommen werden. Auf Basis der Ld vergleichbarer Horizonte wurde die TRD für alle Horizonte nach RENGGER et al. (2009) und RENGGER et al. (2014a) berechnet, sowie FK, nFK und LK abgeleitet. Die nFKWe wurde nach ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016) berechnet und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) eingestuft.

Die Trockenrohddichte schwankt in den oberen vier Horizonten wenig und nimmt im basalen Horizont deutlich zu (s. Tabelle 55). Sie liegt zwischen 1,30 g/cm³ (gering) im Bv-Aeh-Horizont und 1,65 g/cm³ (hoch) im IICv-P-Horizont. Parallel dazu nimmt die effektive Lagerungsdichte deutlich von „gering“ auf „hoch“ im IICv-P-Horizont zu. Die FK liegt zwischen 39,6 Vol.-% (hoch) im Ah-Horizont und 24,3 Vol.-% (gering) im Bv-Horizont. Die nFK nimmt mit der Tiefe von „hoch“ auf „gering“ ab. Die LK ist in den oberen Horizonten „hoch“, im basalen IICv-P-Horizont „mittel“. Die nFKWe ist mit 114 l/m² „mittel“.

5.6.3 Profil- und Standortanalyse

Profilanalyse W 1

Das Profil W 1 ist eine schwach podsolierte Braunerde auf Mittlerem Buntsandstein mit der Horizontabfolge Ah/Aeh/Bv/ICv₁/ICv₂. Der Ah-Horizont unterscheidet sich von den darunterliegenden Horizonten durch einen höheren Sand- und geringeren Schluffanteil, insbesondere der Grobsand mit 28,57 % sticht hier heraus. Da der L-Horizont überwiegend aus wenig zersetzten Nadeln, kleinen Ästen und Moosen bestand, wurde bei der Profilaufnahme ein extrem hoher Humusgehalt angenommen. Die Horizonte Aeh, Bv und ICv₁ unterscheiden sich in ihrer Korngrößenzusammensetzung nur bei den Mittel- und Feinsandanteilen stärker. Der Aeh-Horizont weist einen deutlich höheren Mittelsandanteil auf, Bv- und ICv₁-Horizont dagegen einen höheren Feinsandanteil. Der basale ICv₂-Horizont gleicht wiederum dem Ah-Horizont.

Das herausstechende Merkmal des Profils W 1 ist die schwache Podsolierung der Braunerde. Direkt unterhalb des Ah-Horizonts ist die Sauerbleichung des Aeh-Horizonts am stärksten und nimmt mit der Tiefe leicht ab. Gebleichte Sandkörner finden sich aber im gesamten Aeh-Horizont und auch darunter im Bv-Horizont. Gegenüber dem liegenden Bv-Horizont ist der gesamte Aeh-Horizont deutlich aufgehellt und dichter gelagert. Auf Grund der extrem sauren pH-Werte und der vollständigen Entkalkung des Profils W 1 wird für die Zukunft das Fortschreiten der Podsolierung und die Ausbildung eines Ae- und Bs-Horizonts erwartet.

Der Bv-Horizont ist auffallend locker gelagert und weist – zumindest im Profil – deutlich weniger Sandsteinblöcke auf als der hangende Aeh- und der liegende ICv₁-Horizont. Der ICv₁-Horizont wurde auf Grund der Bodenfarbe, der deutlich höheren Lagerungsdichte und der zahlreichen großen Sandsteinblöcke vom Bv-Horizont abgegrenzt, obwohl die Korngrößenverteilung nahezu identisch ist.

Die zahlreichen Sandsteinblöcke im gesamten Profil zeugen von der periglazialen Überprägung des Profils W 1. Es wurden auf Grund der Korngrößenverteilung zwei Basislagen unterschieden. Der Basislage LB1 wurden auf Grund des höheren Schluffanteils die Horizonte Aeh, Bv und ICv₁ zugeordnet. Der ICv₁-Horizont wird der Basislage LB2 zugeordnet. Ob im Liegenden des ICv₂-Horizonts noch weitere Basislagen zu finden sind oder ob es sich bei der basalen Sandsteinplatte bereits um den anstehenden Sandstein handelt, konnte nicht ermittelt werden. Da die Sandsteinblöcke im Profil W 1 sehr glimmerhaltig sind, wird vermutet, dass es sich bei dem anstehenden Sandstein um den Solling-Sandstein handelt (GEYER, 2002). Keiner der Horizonte konnte einer Hauptlage zugeordnet werden.

Profilanalyse W 2

Das Profil W 2 ist eine pseudovergleyte Braunerde in Hangablagerungen über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandsteins mit der Horizontabfolge Ah/Bv₁/Bv₂/Bv₃/Sw-Bv/IICv-P₁(Sd)/IICv-P₂(Sd). Die oberen fünf Horizonte sind in ihrer Korngrößenzusammensetzung fast identisch und unterscheiden sich deutlich von den anstehenden IICv-P₁- und IICv-P₂-Horizonten.

Durch die sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit der oberen Bodenhorizonte können Niederschläge schnell in den Boden infiltrieren. Die sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit der basalen IICv-P₁(Sd)- und IICv-P₂(Sd)-Horizonte verhindert dagegen eine schnelle Drainage des Profils W 2 und es kann zu Stauwasser im Boden kommen, wovon Sw-Bv- und Bv₃-Horizont betroffen sind. Der Bv₃-Horizont ist nur selten von Stauwasser betroffen, weshalb hier nur wenige Rostflecken zu finden waren. Der Sw-Bv-Horizont steht auf Grund der stauenden IICv-P(Sd)-Horizonte regelmäßig unter Stauwassereinfluss, was eine fortgeschrittene Pseudovergleyung zur Folge hat. Sehr wahrscheinlich kommt es an der Grenze von Sw-Bv- zu IICv-P(Sd)-Horizont zu lateralem Interflow.

Trotz ähnlich geringer pH-Werte wie im Profil W 1, hat sich im Profil W 2 noch kein Aeh-Horizont entwickelt. Der höhere Schluffgehalt ist sehr wahrscheinlich auf eine ehemals carbonathaltige Lössbeimengung zurückzuführen, welcher die Versauerung des Profils W 2 länger abgepuffert hat. Im Ah-Horizont sind bereits einzelne gebleichte Sandkörner zu finden. Des Weiteren kann zur geringeren Versauerung auch die Laubbaum-dominierte Vegetation um das Profil W 2 beigetragen haben. Im Ah-Horizont fanden sich fast keine Nadeln, wodurch sich auch weniger Huminsäuren bilden. Die Versauerung des Profils W 2 wird weiter fortschreiten und die Braunerde sich zu einer Podsol-Braunerde weiterentwickeln.

Bei dem mittel bis stark lehmigen Sand der oberen fünf Horizonte handelt es sich wahrscheinlich um parautochthone Hangablagerungen. Das parautochthone Bodenmaterial entstammt der Verwitterung von Sandsteinen des Mittleren Buntsandstein (sm) und wurde solifluidal hangabwärts verlagert. Der im Vergleich zum Profil W 1 deutlich höhere Schluffanteil spricht dafür, dass es sich hierbei um die Hauptlage handelt. Die basalen Horizonte IICv-P₁(Sd) und IICv-P₂(Sd) entstanden aus autochthonen, verwitterten Tonsiltstein des Mittleren Buntsandsteins (sm) und stellen die Basislage dar. Die Stufe zwischen Sw-Bv- und IICv-P₁(Sd)-Horizont ist vermutlich auf einen Windwurf, die Tasche des Bv₃-Horizonts auf einen Wurzel- oder Tiergang zurückzuführen.

Profilanalyse W 3

Das Profil W 3 ist eine schwach podsolierte Braunerde über Tonsiltsteinen des Mittleren Buntsandsteins (sm) mit der Horizontabfolge Ah/Bv-Aeh/Bv/Bv-Cv/IICv-P. Die Horizonte Ah, Bv-Aeh und Bv unterscheiden sich in ihrer Korngrößenzusammensetzung nur geringfügig, was auf ihren Ursprung als parautochthones solifluidal umgelagertes Bodenmaterial zurückzuführen ist. Der höhere Sand- und geringere Schluffgehalt im Ah-Horizont können auf die oberflächliche Erosion des Schluffs zurückgeführt werden. Relativ dazu würde sich dadurch der Sandanteil erhöhen. Der geringmächtige Bv-Cv-Horizont stellt einen Übergangshorizont zum basalen IICv-P-Horizont dar. Hauptunterscheidungsmerkmale zum hangenden Bv-Horizont sind die rötlichere Bodenfarbe und der höhere Tongehalt. Der basale IICv-P-Horizont unterscheidet sich durch höhere Sand- und niedrigere Schluff- und Tonanteile deutlich vom basalen IICv-P₂ (Sd)-Horizont des Profils W 2 (W 2-7). Auf Grund des Höhenunterschieds von 13 m zwischen den Profilen W 2 und W 3 ist ein deutlicher Unterschied in den IICv-P-Horizonten zu erwarten. Die Tonstein-Sandstein-Wechselagerungen der Hardeggen-Wechselfolge können nur etwas mehr als 4 m Mächtigkeit erreichen, die Schluffstein-Sandstein-Wechselagerungen dagegen nur etwa 1,5 m (GEYER, 2002). In beiden Profilen stehen also unterschiedliche Tonsiltsteine an. Der hohe, nicht eingeregelter Grobskelettanteil im IICv-P-Horizont deutet auf eine starke Kryoturbation hin. Die oberen Horizonte Ah, Bv-Aeh und Bv sind der Hauptlage zuzuordnen, Bv-Cv- und IICv-P-Horizont stellen die autochthone Basislage dar.

Die Podsolierung des Profils W 3 ist noch nicht so weit fortgeschritten wie in Profil W 1. Wie in Profil W 2 könnte auch im Profil W 3 der höhere Schluffanteil auf eine ehemals carbonathaltige Lösskomponente zurückzuführen sein, welche einer Versauerung entgegenwirkte. Auf Grund der extrem sauren pH-Werte und der vollständigen Entkalkung des Profils W 3 wird für die Zukunft das Fortschreiten der Podsolierung erwartet.

Die extrem hohe hydraulische Leitfähigkeit von Bv-Aeh- und Bv-Horizont kann auch für den Ah-Horizont angenommen werden. Analog zu Profil W 2 ist für den IICv-P-Horizont von einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit auszugehen. Der IICv-P-Horizont fungiert hier aber nicht als Wasserstauer, da in den hangenden Horizonten keine redoximorphen Merkmale festgestellt werden konnten. Nur die Sandsteinblöcke im IICv-P-Horizont weisen Rostflecken auf. Vermutlich existieren hier wegen der Sandsteinblöcke mehr präferentielle Fließwege die für eine höhere Durchlässigkeit sorgen, deshalb ist der kf-Wert des IICv-P₂ (Sd)-Horizont (W 2-7) von Profil W 2 nicht auf den IICv-P-Horizont übertragbar.

Standortanalyse Willmars

Der Monitoringstandort Willmars ist für den Buntsandsteinbereich des Naturraum „Vorder- und Kuppenrhön“ ein typischer Standort. Der Buntsandsteinrücken zwischen Fladungen und Ostheim v. d. Rhön ist von sauren Braunerden, podsoligen Braunerden und Podsol-Braunerden bedeckt. Dies trifft auch auf die anderen Bereiche der Vorder- und Kuppenrhön sowie der Hohen Rhön auf Buntsandstein zu. Die Sand- und Tonsteine des Buntsandsteins sind saure Ausgangsgesteine für die Bodenbildung und ohne eine carbonathaltige Lössauflage schreitet die Versauerung schnell voran, insbesondere unter Nadelwald. Der große Einfluss von Nadelwald auf die Versauerung kann auch am Standort Willmars sehr punktuell und kleinräumig beobachtet werden. Etwa 150 m westlich von Profil W 1 wurde ein gut entwickelter Braunerde-Podsol mit der Horizontabfolge Aeh/Ae/Bsv/IICv-P/IIICbv/IVCv-P/VcV (Kartierpunkt W 4, R 585200, H 5594916, Datum: 19.09.2019) kartiert. Je stärker die Rohhumusaufgabe aus Nadeln ist und je länger der Standort sich unter Nadelwald befindet, desto weiter ist die Bodenentwicklung zum Podsol vorangeschritten.

Als Waldstandort ist der Monitoringstandort Willmars gut geeignet, allerdings scheiden andere Nutzungsformen bereits auf Grund der sehr sauren Böden und der geringen Nährstoffverfügbarkeit aus. Weiter ist die Wasserversorgung am Standort als schwierig zu bezeichnen. Das Grundwasser kann von den Bäumen nicht erreicht werden, sodass sie allein auf Niederschläge angewiesen sind. Die sandigen Oberböden haben eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit und nur eine geringe nutzbare Feldkapazität (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022k, 2022l, 2022m). Niederschläge können zwar gut infiltrieren, aber nicht gut gespeichert werden und fließen z.T. als Interflow lateral ab. Auf Grund der höheren Niederschläge in der Rhön wurde dies aber noch nicht zu einem Problem wie z.B. am Standort Oberrimbach (vgl. Kapitel 5.5.3).

6 Analyse der Monitoringdaten

6.1 Charakterisierung der Monitoringstandorte

6.1.1 Bürgstadt

Die Messreihe am Standort Bürgstadt reicht vom 16. März 2020 bis 2. September 2022 und umfasst damit drei Sommerperioden. Die Besonderheit des Standorts liegt in den sehr sandigen Bodenarten und der geringen Lagerungsdichte, was hohe hydraulischen Leitfähigkeiten zur Folge hat. Potenziell können Niederschläge dadurch sehr schnell in den Boden infiltrieren und zügig bis in größere Tiefen vordringen. Die große Hangneigung wirkt dem entgegen und kann zu starkem Oberflächenabfluss und Erosion führen.

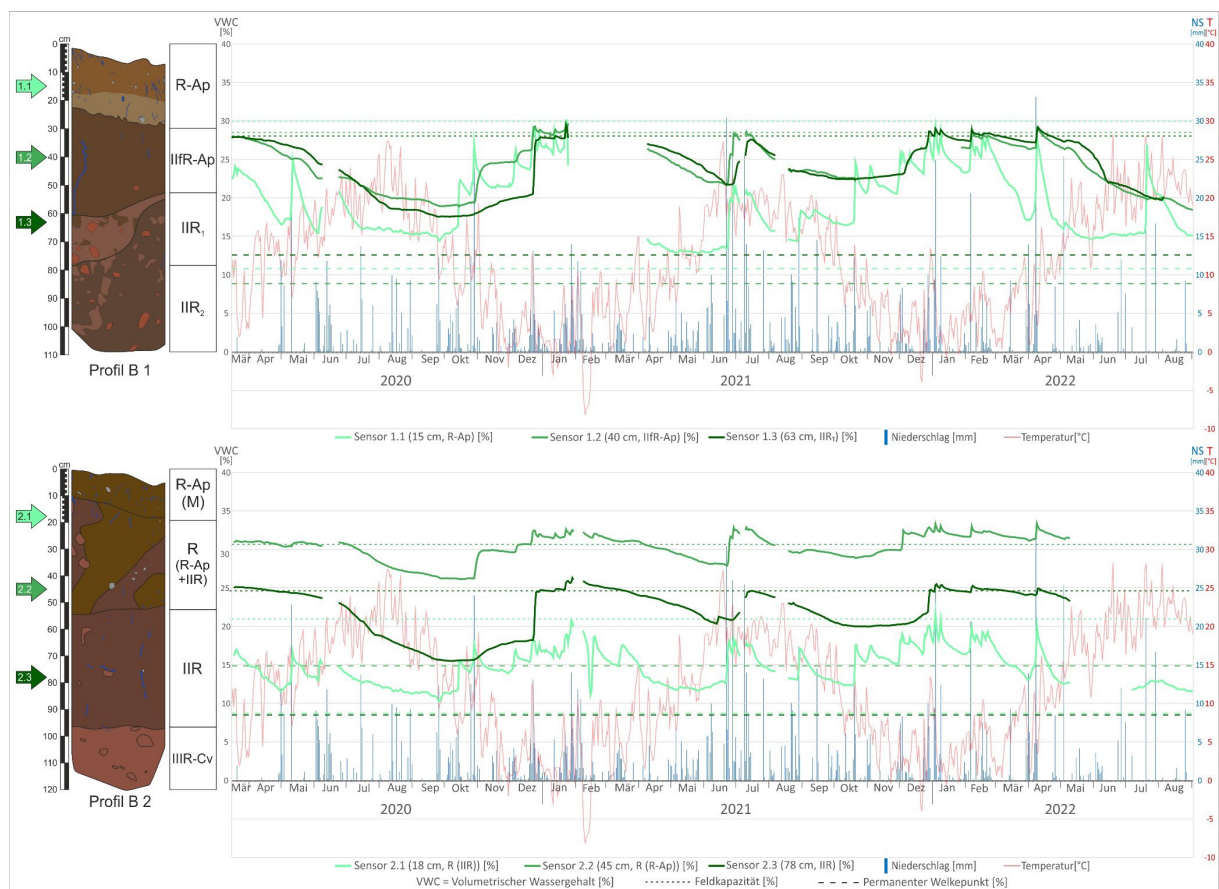


Abbildung 69: Monitoringzeitreihen der Profile B 1 und B 2 (Rigosole; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 16.03.2020 bis 02.09.2022.

Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Trotz der geringen Entfernung der beiden Profile sowie der Ähnlichkeit bzw. Übereinstimmung einzelner Horizonte konnten deutliche Unterschiede beobachtet werden (s. Abbildung 69). Im Profil B 1 bewegte sich die Bodenfeuchte an allen Sensoren im Profil B 1 zwischen 13 % und 30 %. Im Gegensatz dazu zeigten sich im Profil B 2 drei deutlich unterschiedliche Kurven mit verschiedenen Amplituden.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums im März 2020 erreichten bis auf die obersten Sensoren (S 1.1 und S 2.1) alle Sensoren die FK. Nach einem zu trockenen Januar, waren die Niederschläge im Februar überdurchschnittlich hoch (+80 mm bzw. +164,9 %, s. Tabelle 56). Ab März begann eine Trockenphase mit stark unterdurchschnittlichen Niederschlägen. Mit Ausnahme des Monats Oktober hielt die Trockenphase dann bis zum Jahresende an.

Im Profil B 1 nahm ab März 2020 die Bodenfeuchte an allen Sensoren deutlich ab. Die Niederschläge im Frühjahr und Frühsommer 2020 sorgten nur für einen kurzfristigen Anstieg der Bodenfeuchte. Die Niederschläge verzögerten den Bodenfeuchterückgang an Sensor 1.1 noch bis Mitte/Ende Juli. Auffällig ist, dass die Niederschläge von Juni und August 2020 kein deutliches Signal an Sensor 1.1 erzeugten, was eine hohe Verdunstung und Oberflächenabfluss vermuten lässt. Ein generelles Minimum erreichten alle Sensoren im September 2020. Ab Ende September führten die Niederschläge zunächst an Sensor 1.1 zu einem graduellen Anstieg der Werte. Nach insgesamt 163,1 mm Niederschlag erreichten alle Sensoren erst wieder Ende Dezember 2020 die FK.

Im Vergleich mit Profil B 2, kann für Profil B 1 ab Februar 2021 von einer Abnahme der Bodenfeuchte ausgegangen werden. Das sehr trockene Frühjahr 2021 führte dazu, dass der oberste Sensor 1.1 bereits Ende April das Minimum erreichte, während dies bei den tieferen Horizonten erst Ende Juni der Fall war. Während der Niederschlagsperiode Ende Juni/Anfang Juli 2021 fielen 143,6 mm Niederschlag – mehr als die nFKWe (140 l/m^2) – wodurch die Bodenfeuchte im gesamten Profil vorübergehend anstieg, was auch ab Mitte Oktober 2021 beobachtet werden konnte. Da von Mitte Oktober bis Ende Dezember nur 77,4 mm Niederschlag fielen, erreichte der Sensor 1.3 die FK erst zum Jahresende 2021.

Im Januar 2022 führte die lange niederschlagsfreie Phase bereits zu einer deutlichen Abnahme der Bodenfeuchte an Sensor 1.1 und ab Ende Februar 2022 kam es oberflächennah zu einer stärkeren Abnahme als in den Vorjahren. Die Niederschläge von Ende März/Anfang April mit 73,1 mm verzögerten das Erreichen des Jahresminimums 2022 an Sensor 1.1 bis Ende Mai. Die tieferen Sensoren 1.2 und 1.3 verzeichneten ab April einen kontinuierlichen Rückgang bis zum Ende des Beobachtungszeitraums.

An Profil B 2 erzeugten die Niederschläge und Trockenphasen die gleichen Signale an den Bodenfeuchtesensoren, allerdings wies insbesondere Sensor 2.1 einen deutlich geringeren Wertebereich auf als Sensor 1.1. Die tieferen Sensoren 2.2 und 2.3 reagieren deutlich zeitverzögert als die vergleichbaren Sensoren in Profil B 1. In den Zeiträumen Oktober bis Dezember 2020 und Oktober bis Dezember 2021 sind im Profil B 2 die unterschiedlichen Zeitpunkte, an denen ein Sensor erstmals die FK erreicht, deutlich zu erkennen. Je tiefer ein Sensor verbaut wurde, desto mehr Niederschlag war nötig, um die FK zu erreichen.

Während der Frostperiode im Februar 2021 kam es zur Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit, was einen deutlichen Rückgang der Bodenfeuchte an Sensor 2.1 verursachte. Die tieferen Sensoren waren davon nicht betroffen. Das gleiche Phänomen trat schwächer ausgeprägt auch während der Frostperiode im Dezember 2021 an den Sensoren 1.1 und 2.1 auf. Ein frostbedingter Rückgang an Sensor 1.1 wird auch während der Datenlücke im Februar 2021 angenommen.

	2020		2021		2022	
	mm	%	mm	%	mm	%
Jan	18,3	-64,9	56,7	+8,6	56,7	+8,6
Feb	128,5	+164,9	40,4	-16,7	50,4	+3,9
Mär	32	-42,5	26,3	-52,8	18,8	-66,2
Apr	2,1	-96	10,9	-79,3	75	+42,3
Mai	48	-31	39,2	-43,7	36,4	-47,7
Jun	64,1	-20,5	121,8	+51,1	28,7	-64,4
Jul	32,2	-51,4	82,2	+24,2	48,7	-26,4
Aug	42,9	-33,7	68,6	+6	12,8	-80,2
Sep	25,7	-44,3	29,7	-35,6	95,2	+106,5
Okt	70	+41,1	41,5	-16,3	70	+41,1
Nov	14,6	-75,1	21,4	-63,5	53	-9,7
Dez	55,1	-14,8	52,8	-18,4	29,5	-54,4
Summe	533,5	-24,8	591,7	-16,6	575,2	-18,9

Tabelle 56: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Bürgstadt von 2020 bis 2022.

Neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, sind die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2021a).

6.1.2 Herchsheim

Die Messreihe am Standort Herchsheim reicht vom 2. August 2018 bis zum 25. November 2019. Auf Grund der Ähnlichkeit der beiden Profile H 1 und H 2 sowie den in unterschiedlichen Tiefen verbauten Sensoren, ergibt sich ein ganzheitliches Bild der Bodenfeuchte bis in 1 m Tiefe (s. Abbildung 70).

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums Anfang August 2018 waren die Messwerte in allen Horizonten und Tiefen bereits an oder nahe ihres permanenten Welkepunkts (PWP). Bis Ende Juli 2018 fielen seit Jahresbeginn nur 300,2 mm Niederschlag und damit 111,5 mm (-27,1 %) weniger als im vieljährigen Mittel (s. Tabelle 57) und die Trockenheit setzte sich bis Ende November fort (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023b). Mit den am 29.11.2018 einsetzenden Niederschlägen stieg die Bodenfeuchte bis in eine Tiefe von 35 cm (Sensor 2.2) innerhalb von 2 bis 3 Tagen auf FK an. Bis zum 24.12.2018 fielen 116,1 mm Niederschlag und auch die Sensoren in 62 cm Tiefe (S 1.2 und S 2.3) stiegen auf FK an. Der tiefste Sensor 1.3 in 101 cm erreichte erst am 13.1.2019 nach 152,7 mm Niederschlag die FK.

Der deutliche Rückgang der Bodenfeuchte an den Sensoren 1.1 und 2.1 in der zweiten Januarhälfte 2019 ist auf die zweiwöchige Frostperiode mit dem Minimum von $-10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ am 22.1.2019 zurückzuführen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023b). Durch den Bodenfrost nahm die elektrische Leitfähigkeit des Bodens ab. Nach der Frostperiode blieb die Bodenfeuchte bis in 10 cm Tiefe (Sensor 2.1) deutlich unter der FK. Durch die unterdurchschnittlichen Niederschläge ab Anfang Februar 2019 kam es auch in 20 cm Tiefe (Sensor 1.1) zu einem Rückgang der Bodenfeuchte. Die steigenden Temperaturen ab März beschleunigten den Rückgang der Bodenfeuchte auch in den tieferen Horizonten.

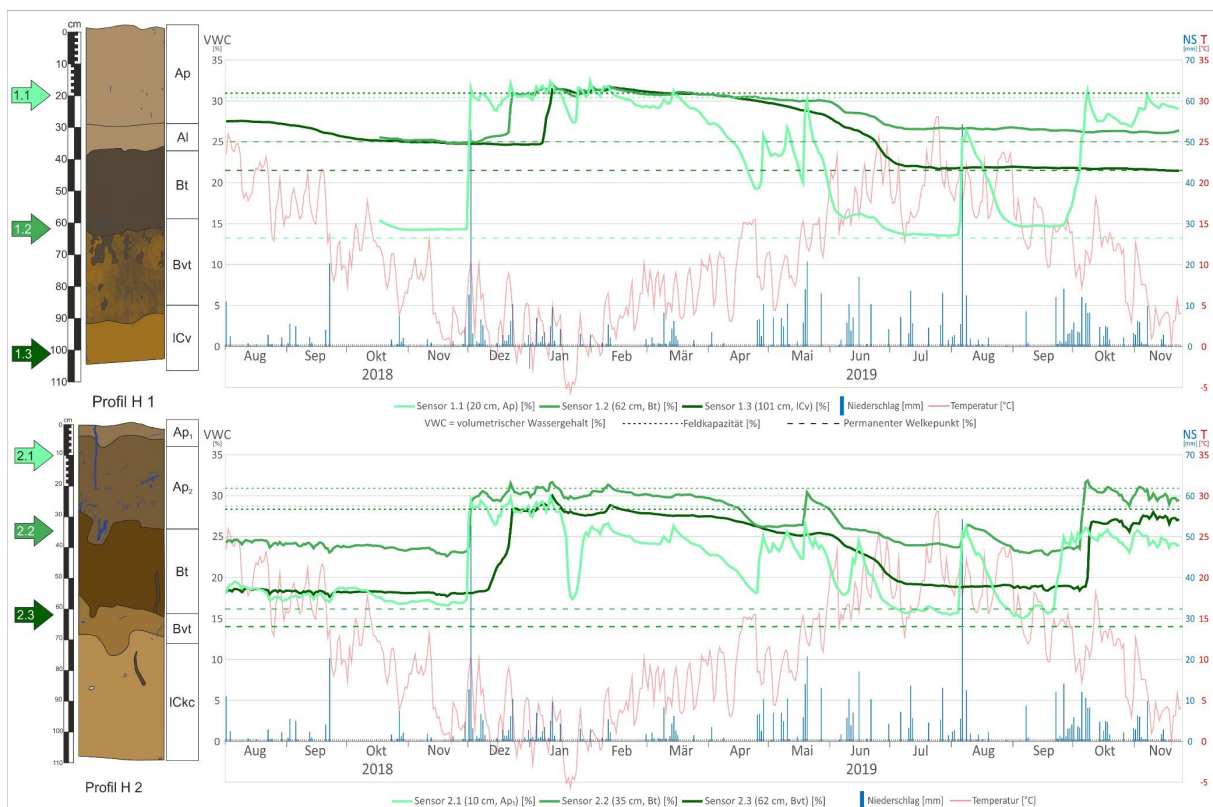


Abbildung 70: Monitoringzeitreihen der Profile H 1 und H 2 (Parabraunerden; Ebene) für den Beobachtungszeitraum 02.08.2018 bis 25.11.2019.

Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Die Temperatur- und Niederschlagsdaten stammen von der Wetterstation Euerhausen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023b). Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Die Niederschläge von Ende April und Mai führten nur bis in 35 cm Tiefe zu einem Bodenfeuchteanstieg. Hier zeigte sich sehr deutlich, dass das Niederschlagssignal mit zunehmender Tiefe immer stärker abgedämpft wird, so reagiert Sensor 2.1 in 10 cm Tiefe stärker als Sensor 1.1 in 20 cm Tiefe. Bei Sensor 2.2 (35 cm) brachten die Niederschläge nur eine Stabilisierung der Werte. Erst durch ein stärkeres Niederschlagsereignis mit 40,7 mm vom 19. bis 21.5.2019 stieg die Bodenfeuchte an.

Mit den weiter steigenden Temperaturen waren die Niederschläge im Juni nur noch bis in 10 cm Tiefe wirksam. Bereits in 20 cm Tiefe stabilisierten sich die Messwerte nur noch kurzzeitig. Anfang Juli 2019 war in allen Horizonten das Jahresminimum erreicht und nur noch ein Starkregenereignis am 9.8.2019 mit 54,3 mm führte zu einem kurzfristigen Anstieg der Bodenfeuchte. Erst die ab dem 23.9.2019 beginnenden Niederschläge leiteten die Zunahme der Bodenfeuchte ein. Bis zum 10.10.2019 fielen 94 mm Niederschlag, was aber nur bis in 62 cm Tiefe (S 2.3) für einen Anstieg ausreichte. Die Sensoren 1.2 (62 cm) und 1.3 (101 cm) verharrten bis Ende November auf dem im Juli erreichten Minimum. Am Sensor 1.3 (ICv-Horizont) lag das Minimum von 2019 deutlich unter dem Minimum von 2018, obwohl in Summe 2019 deutlich mehr Niederschläge fielen (s. Tabelle 57).

	2018		2019		2020		2021		2022	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Jan	83,7	+37,8	44,7	-2,6	16,2	-64,7	46,1	+0,4	56,1	+22,2
Feb	14,6	-67,3	12,5	-32,2	3	+176,7	37,5	-16,1	48,3	+8,1
Mär	43,6	-11,9	33,8	-31,7	31,8	-35,8	27,9	-43,6	19,9	-59,8
Apr	58,2	+5,6	31	-43,7	3	-94,6	23	-58,3	74,5	35,2
Mai	38,1	-43,9	86,4	+27,2	44,7	-34,2	55,3	-18,6	19,3	-71,6
Jun	43,1	-48,8	57,4	-29,1	87,4	7,9	134,4	+65,9	30	-63
Jul	18,9	-72	59	-12,7	14,6	-78,4	126,5	+87,1	16,6	-75,4
Aug	22,2	-66,7	85,7	+28,5	50,7	-24	60,9	-8,7	36,2	-45,7
Sep	39,9	-18,4	46,7	-4,5	35,8	-26,8	4,6	-90,6	87,1	+108,4
Okt	13,3	-72,3	78,6	+63,4	70,5	+46,6	34,3	-28,7	57,5	+27,5
Nov	10,6	-77,9	44,8	-6,7	8,6	-82,1	27,1	-43,5	47,9	-8,2
Dez	112,1	+57,2	53,5	-2,6	54	-1,6	65,6	+19,5	43,5	-25,9
Summe	498,3	-26,5	634,1	-6,5	541	-20,2	643,2	-5,2	536,9	-18,2

Tabelle 57: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Euerhausen für die Jahre 2019 bis 2022. Die Niederschlagsdaten für die Jahre 2020 bis 2022 wurden hier für die Vergleichbarkeit mit den anderen Monitoringstationen aufgeführt, obwohl diese nicht mehr im Beobachtungszeitraum der Monitoringstation Herchsheim liegen. Neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, sind die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt. Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023b).

6.1.3 Obbach

Die Messreihe am Standort Obbach reicht vom 10. April 2019 bis 30. November 2022 und umfasst vier Sommerperioden (s. Abbildung 71 u. Tabelle 58). Hervorzuheben ist Profil O 1 als stark stauwasserbeeinflusstes Profil. Auf Grund des sehr homogenen Sw-Ap-Horizonts und den darin verbauten Sensoren, lässt sich an Profil O 1 der direkte Einfluss der Witterung auf die Bodenfeuchte in den oberen 30 cm veranschaulichen. Sensor 1.1 in 10 cm Tiefe reagierte sehr rasch auf Witterungsänderungen, während die Sensoren 1.2 auf 25 cm und 1.3 auf 27 cm Tiefe bereits deutlich

zeitverzögerter und mit geringeren Ausschlägen auf kurzfristige Witterungsänderungen reagierten. Auch auf Grund der Stauwassersituation wies der Sensor 1.1 die höchste jährliche Amplitude der Bodenfeuchte sowie die höchste Amplitude insgesamt von 7,4 % im September 2022 bis 54,6 % im Februar 2021 auf.

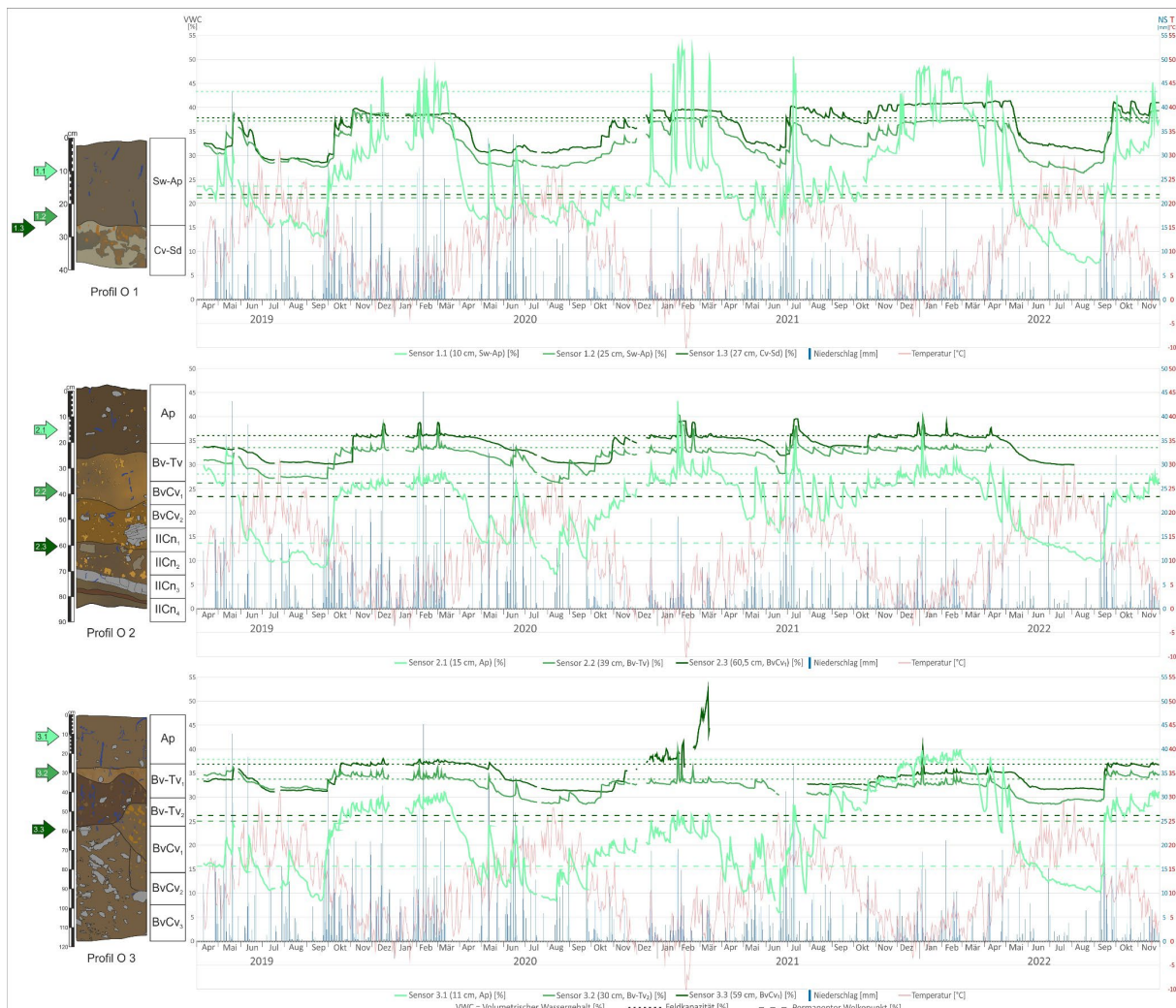


Abbildung 71: Monitoringzeitreihen für die Profile O 1 (Ranker; Hangverflachung), O 2 (Braunerde; Kuppe) und O 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 10.04.2019 bis 30.11.2022. Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Zu Beginn des Messzeitraums im April 2019 war das Profil O 1 bereits deutlich abgetrocknet, die Bodenfeuchte bewegte sich aber auf einem ähnlichen Niveau wie in den gleichen Zeiträumen 2020 und 2021. Normale Sommerniederschläge waren im Profil O 1 in der Regel nur am obersten Sensor 1.1 messbar, die tieferen Sensoren 1.2 und 1.3 reagierten nur auf langanhaltende oder sehr starke Sommerniederschläge. Im September 2019 reagierten alle Sensoren schnell auf die Herbstniederschläge, wobei die tiefen Sensoren schneller die FK erreichten als Sensor 1.1. Die Bodenfeuchte an Sensor 1.1 stieg nach einer anfänglich schnellen Zunahme langsamer bis auf etwa 30 % an. Weitere Niederschläge führten zu einer plötzlichen Zunahme um etwa 10 % bis 15 % und

einer anschließenden raschen Abnahme. Über mehrere dieser treppenartigen Zyklen stieg die Bodenfeuchte an Sensor 1.1 schrittweise an. Zwar existiert im Januar 2020 eine Datenlücke, allerdings ist dieses Muster auch in den Wintern 2020/2021 und 2021/2022 erkennbar. Die Peaks von Sensor 1.1 sind als Stauwasser, welches oberflächlich sichtbar war, zu interpretieren (vgl. Abbildung 37 vom 16. Januar 2020). Die Pfützen trockneten oder flossen ab, wodurch die Bodenfeuchte abnahm.

Auffällig ist, dass sich die Kurven der Sensoren 1.2 und 1.3, obwohl sich diese auf fast der gleichen Tiefe befanden, in den Sommermonaten 2020, 2021 und 2022 immer weiter voneinander entfernten und auch in den Wintermonaten nicht die gleichen Werte erreichten. Erst ab September 2022 näherten sich die Kurven wieder deutlich an. Besonders an Sensor 1.2 sank das jeweilige sommerliche Minimum im Beobachtungszeitraum deutlich ab.

Profil O 2 zeigte einen sehr ähnlichen Verlauf der Bodenfeuchte wie Profil O 1. Auf Grund der größeren Tiefe und der größeren Abstände der Sensoren ist die zeitliche Verzögerung zwischen Bodenfeuchteminimum am Ende des Sommers und Erreichen der FK im Winter sehr ausgeprägt (z.B. Sept-Nov 2019, Sept-Nov 2020). Sobald die FK erreicht war, reagierte auch Sensor 2.3 sehr schnell auf Niederschläge (z.B. Peaks im Dez 2019, Jan und Feb 2020, Jan und Feb 2021).

Sensor 2.1 reagierte sehr schnell und deutlich auf Witterungsänderungen, während Sommerniederschläge in der Regel nur noch an Sensor 2.2 erkennbar waren. Eine Ausnahme bildete die Niederschlagsperiode vom 19. Juni bis 17. Juli 2021. Mit 225,8 mm fiel in diesem Zeitraum mehr als das Doppelte der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ($n_{FKWe} = 93,6 \text{ l/m}^2$) und alle Sensoren verzeichneten Werte oberhalb ihrer FK.

Profil O 3 zeigte einen sehr ähnlichen Jahresgang wie Profil O 2. Insbesondere die Kurven der Sensoren 3.2 und 3.3 verliefen fast identisch zu den Sensoren 2.2 und 2.3, wodurch trotz der Datenlücke in 2022 für letztere eine Abschätzung erfolgen kann. Im Umkehrschluss kann der Peak von Sensor 3.3 im Februar 2021 mit hoher Wahrscheinlichkeit auf eine Fehlfunktion des Sensors zurückgeführt werden. Auch die Sensoren 3.1 und 2.1 zeigten zu Beginn des Beobachtungszeitraums einen parallelen Bodenfeuchteverlauf, wobei der in nur 11 cm Tiefe verbaute Sensor 3.1 in den Frühjahrs- und Sommermonaten immer niedrigere Werte aufwies. Ab der Niederschlagsperiode im Juni und Juli 2021 änderte sich dies allerdings und Sensor 3.1 erreichte eine durchgehend höhere Bodenfeuchte sowohl im Winterhalbjahr 2021 als auch nach Niederschlägen im Sommerhalbjahr 2022.

Im Vergleich der drei Profile zeigte sich die Bedeutung der Niederschläge während der Frühjahrs- und Sommermonate besonders deutlich. In den Jahren 2019, 2020 und besonders 2022 fielen im Frühjahr

unterdurchschnittlich wenig Niederschläge (s. Tabelle 58). In der Folge nahm die Bodenfeuchte vor allem oberflächennah sehr schnell ab und verharrte dann bis zum Herbst auf einem sehr niedrigen Niveau nahe oder unterhalb des PWP. Ein besonders anschauliches Beispiel hierfür ist das Jahr 2022. Gerade für einen Standort wie Obbach mit geringen nFK ist dies problematisch.

	DWD-Niederschlagsstation Sömmersdorf										Monitoringstation Obbach			
	2018		2019		2020		2021		2022		2019	2020	2021	2022
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	mm	mm	mm
Jan	74,4	43,1	52,1	0,2	28,3	-45,6	77,1	48,3	67,6	30,0		61,2	63,2	67
Feb	9,3	-74,9	14,9	-59,7	110,0	197,3	54,1	46,2	59,2	60,0		226	43,2	79
Mrz	50,8	10,4	64,0	39,1	29,2	-36,5	37,5	-18,5	13,1	-71,5		72,4	43,6	11,4
Apr	52,0	23,8	29,8	-29,0	7,3	-82,6	18,2	-56,7	70,3	67,4		15,6	15,6	60,6
Mai	123,5	128,7	90,1	66,9	47,3	-12,4	66,7	23,5	24,8	-54,1	160	107,2	78	31,4
Jun	29,2	-55,8	42,1	-36,2	97,5	47,7	102,0	54,5	17,9	-72,9	90,4	187,2	102,6	31,4
Jul	75,6	21,9	26,7	-56,9	19,0	-69,4	160,9	159,5	13,0	-79,0	66,8	67,4	146	17,6
Aug	22,7	-58,7	36,3	-34,0			83,6	52,0			72,4	73,8	75	8,4
Sep	39,0	-22,0	45,7	-8,6	27,4	-45,2	18,1	-63,8			92,8	27,8	19,4	125,6
Okt	11,3	-78,7	67,6	27,5	54,8	3,4	42,4	-20,0	57,7	8,9	137,6	53,4	42,2	54
Nov	19,8	-62,6	68,1	28,5	18,8	-64,5	21,6	-59,2	46,4	-12,5	135,2	16,8	28,8	42,2
Dez	81,4	29,2	66,5	5,6	53,3	-15,4	64,6	2,5	62,9	-0,2	138,4	43,8	61,4	64,4
Summe	589,0	-6,8	603,9	-4,4	492,9	-22	746,8	18,2	432,9		893,6	952,6	719	593

Tabelle 58: Monatliche Niederschläge der DWD-Station Sömmersdorf (Stations-ID: 1322) und der Monitoringstation Obbach für die Jahre 2018 bis 2022.

Für die DWD-Station Sömmersdorf sind neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel (Klimareferenzperiode 1991-2020) in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt. Als Vergleich sind für die Monitoringstation Obbach nur die monatlichen Niederschläge [mm] und die Jahresniederschlagssummen angegeben.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2021, 2022a).

6.1.4 Uniwald

Der Beobachtungszeitraum reicht vom 9. Juni 2019 bis 30. November 2022 und umfasst drei komplette Sommerperioden (s. Abbildung 72). Der Standort Uniwald sticht mit seinen Braunerde-Terrae fusca unter den anderen Standorten hervor. Ihre hohen Ton- und Schluffgehalte sind für eine - zumindest rechnerisch - hohe FK und gleichzeitig niedrige nFK verantwortlich. Die extrem hohe hydraulische Leitfähigkeit der oberen Horizonte war an den oberen Sensoren 1.1, 2.1 und 3.1 messbar. Gleichzeitig zeigte sich aber auch an diesem Standort die mit der Tiefe zunehmende Dämpfung der Niederschlagssignale. In den drei Profilen wies jeweils der oberste Sensor eine FK um 25 % und die höchste Amplitude der Bodenfeuchte auf, während die beiden unteren Sensoren jeweils eine FK um 35 % und eine sehr flache Bodenfeuchteamplitude zeigten (s. Abbildung 72). Der Bodenfeuchteverlauf aller Profile glich sich stark, bei der Auswertung war aber zu berücksichtigen, dass Profil UW 2 am tiefsten und auf einer Lichtung lag, während die Profile UW 1 und UW 3 auf

gleicher Höhe etwa 10 m auseinanderlagen. Profil UW 3 war außerdem zusätzlich mit Totholz bedeckt.

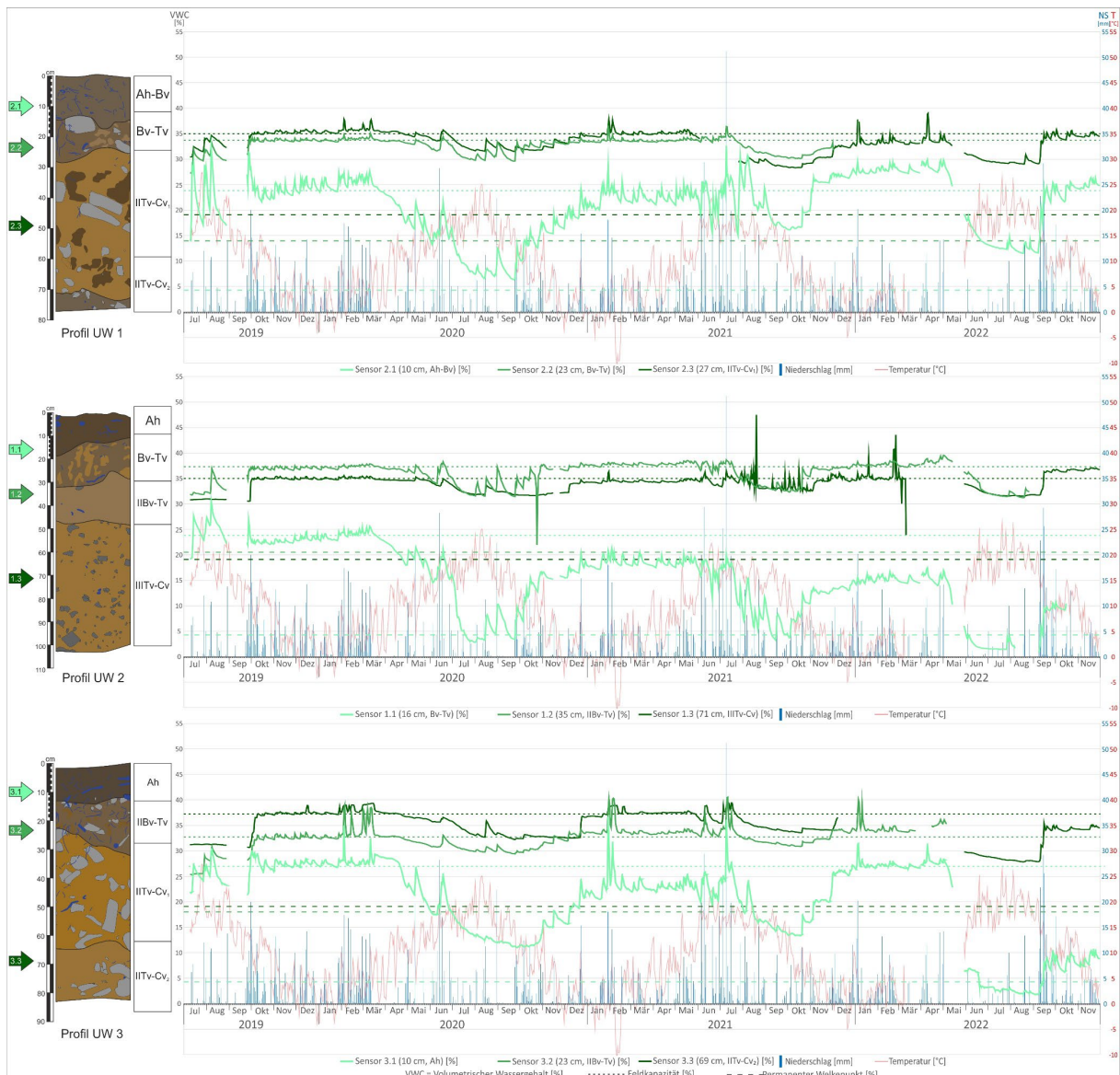


Abbildung 72: Monitoringzeitreihen der Profile UW 1 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang), UW 2 (Braunerde-Terra fusca; Talboden) und UW 3 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 09.07.2019 bis 30.11.2022.

Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums befanden sich die tieferen Sensoren auf einem Minimum. Die oberen Sensoren zeigten dagegen Werte, wie sie auch im Juli der Folgejahre beobachtet werden konnten. Im Zeitraum vom 24. September bis 10. Oktober 2019 fielen 104,4 mm Niederschlag, was die Bodenfeuchte an allen Sensoren bis auf FK ansteigen ließ. Rechnerisch reichte diese Niederschlagsmenge aus, um die nFKWe der Profile UW 1 und UW 3 vollständig aufzufüllen. Die schnelle Abnahme der Bodenfeuchte an den oberen Sensoren aller Profile zeigte, dass diese bis deutlich über ihre jeweilige FK gesättigt waren. Über den Verlauf des Winters stieg die FK der oberen

Sensoren bis zum März 2020 langsam an, während die FK der tieferen Sensoren stabil blieb. Ab Mitte März 2020 nahm die Bodenfeuchte an allen drei Profilen kontinuierlich ab und nur zwei Niederschlagsphasen Ende April/Anfang Mai und im Juli unterbrachen diesen Trend kurzfristig. Erst mit den Ende September beginnenden Niederschlägen stiegen die Werte in allen Tiefen wieder an. Aufgrund der weitgehend fehlenden Niederschläge im November 2020, dauerte es bis Ende Januar 2021 bis an allen Sensoren die FK erreicht wurde. Bis Januar 2021 fielen 237,2 mm Niederschlag. Auffällig war, dass die FK der oberen Sensoren im Winter 2020/2021 deutlich unter der FK des Winters 2019/2020 lag. In 2021 sorgten das feuchte Frühjahr und der Sommer dafür, dass die Bodenfeuchte erst im September für einen längeren Zeitraum das Minimum des Jahres erreichte. Die Mitte Oktober 2021 einsetzenden Niederschläge bewirkten dann wieder eine Erhöhung der Werte im Boden. Der Anstieg verlief auch 2021 stufenartig und erst Anfang Januar 2022 hatten alle Sensoren die FK erreicht. Über mehrere Phasen fielen in diesem Zeitraum 173,2 mm Niederschlag. Im November 2021 regnete es beispielsweise nur 32,6 mm, an der Klimastation Gädheim-Greßhausen sogar nur 29,7 mm (s. Tabelle 59).

2022 nahm die Bodenfeuchte von Anfang Mai bis Anfang/Mitte Juni durch die steigenden Temperaturen und ausbleibenden Niederschläge in allen Tiefen sehr schnell ab. Von Juni bis Anfang September 2022 sank die Bodenfeuchte langsam noch weiter ab. Mit den Mitte September einsetzenden Niederschlägen kam es zu einem schnellen ersten Anstieg, der sich bis zum Ende des Beobachtungszeitraums langsam weiter fortsetzte.

Profil UW 1 zeigte auch an den tieferen Sensoren 1.2 und 1.3 eine relativ zügige Reaktion selbst auf geringe Niederschläge.

Profil UW 2 sticht durch die über den Beobachtungszeitraum kontinuierlich abnehmende Bodenfeuchte an Sensor 2.1 hervor. Von den Wintern 2019/2020 über 2020/2021 bis 2021/2022 nahm die durchschnittliche FK ab. Auch das sommerliche Minimum sank an Sensor 2.1 von 2020 bis 2022 immer weiter ab, was aber zumindest teilweise durch die hohen Sommertemperaturen auf der Lichtung und die fehlenden Niederschläge erklärt werden kann (s. auch Tabelle 59). Diese Beobachtungen trafen allerdings nicht auf die tieferen Sensoren 2.2. und 2.3 zu. Die plötzlichen Ausschläge dieser beiden Sensoren nach oben und unten sind sehr wahrscheinlich auf Fehlfunktionen der Sensoren zurückzuführen.

Profil UW 3 zeigte an Sensor 3.1 geringere Ausschläge infolge von Niederschlägen, im Gegensatz zu Sensor 1.1. Vermutlich ist dies auf die Verzögerung des Niederschlags durch das bedeckende Totholz zurückzuführen. Die sehr geringe Bodenfeuchte an Sensor 3.1 ab Juni 2022 könnte auch auf einen Sensorfehler zurückzuführen sein, da kurz zuvor eine Reparatur durchgeführt werden musste.

	2019		2020		2021		2022	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Jan	46,1	-3,2	28,0	-41,2	74,3	+56,1	59,4	+24,8
Feb	9,3	-76,3	87,8	+124	49,0	+25	42,1	+7,4
Mär	51,5	+23,5	36,5	-12,5	29,5	-29,3	11,4	-72,7
Apr	26,8	-22,5	11,5	-66,8	15,8	-54,3	66,1	+91
Mai	68,2	+12,9	39,7	-34,3	78,1	+29,3	25,1	-58,4
Jun	66,1	+0,6	116,0	+76,6	105,2	+60,1	12,6	-80,8
Jul	34,5	-56,6	20,4	-74,3	143,4	+80,4	28,9	-63,6
Aug	41,5	-31,6	63,0	+3,8	88,9	+46,5	11,1	-81,7
Sep	45,7	-12,6	30,6	-41,5	30,1	-42,4	152,1	+190,8
Okt	70,2	+31,5	52,4	-1,9	48,6	-9,0	65,4	+22,5
Nov	59,7	+7,6	21,5	-61,3	29,7	-46,5	42,8	-22,9
Dez	62,9	+8,8	48,0	-17	61,5	+6,4	58,7	+1,6
Summe	582,5	-10,2	555,4	-14,3	754,1	+16,3	575,7	-11,2

Tabelle 59: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Gädheim-Greßhausen für die Jahre 2019 bis 2022.

Neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, sind die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel (Klimareferenzperiode 1991-2020) in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2021).

6.1.5 Oberrimbach

Der Beobachtungszeitraum reicht vom 29. Juni 2018 bis 31. Oktober 2022 und umfasst vier komplette Sommerperioden. Die Monitoringstation Oberrimbach wurde als erste in Betrieb genommen und weist die längste Zeitreihe dieser Arbeit auf. Zusammen mit der Monitoringstation Herchsheim waren dies die einzigen Stationen, welche bereits im Sommer 2018 Messdaten liefern konnten.

Die drei Profile stellen drei Braunerden verschiedener Mächtigkeiten und in unterschiedlichen Hangpositionen dar. Trotz der Ähnlichkeit der drei Profile zeigten sich deutliche Unterschiede in den Bodenfeuchtedaten (s. Abbildung 73).

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums Ende Juni 2018 waren die Sensoren in allen Tiefen bereits auf einem niedrigen Bodenfeuchteniveau, hatten das Jahresminimum aber noch nicht erreicht. In Profil CO 1 nahm die Bodenfeuchte bis zur Datenlücke im Oktober 2018 weiter ab. Die Niederschläge zwischen Juli und Oktober sorgten nur an den oberen Sensoren für einen Anstieg. In Profil CO 1 waren diese Niederschläge nur an Sensor 1.1 messbar, in den beiden anderen Profilen auch an den mittleren Sensoren 2.2 bzw. 3.2. Für einen deutlichen Anstieg der Bodenfeuchte sorgten erst die ab November 2018 einsetzenden starken Niederschläge. In den Profilen CO 2 und CO 3 erreichten alle

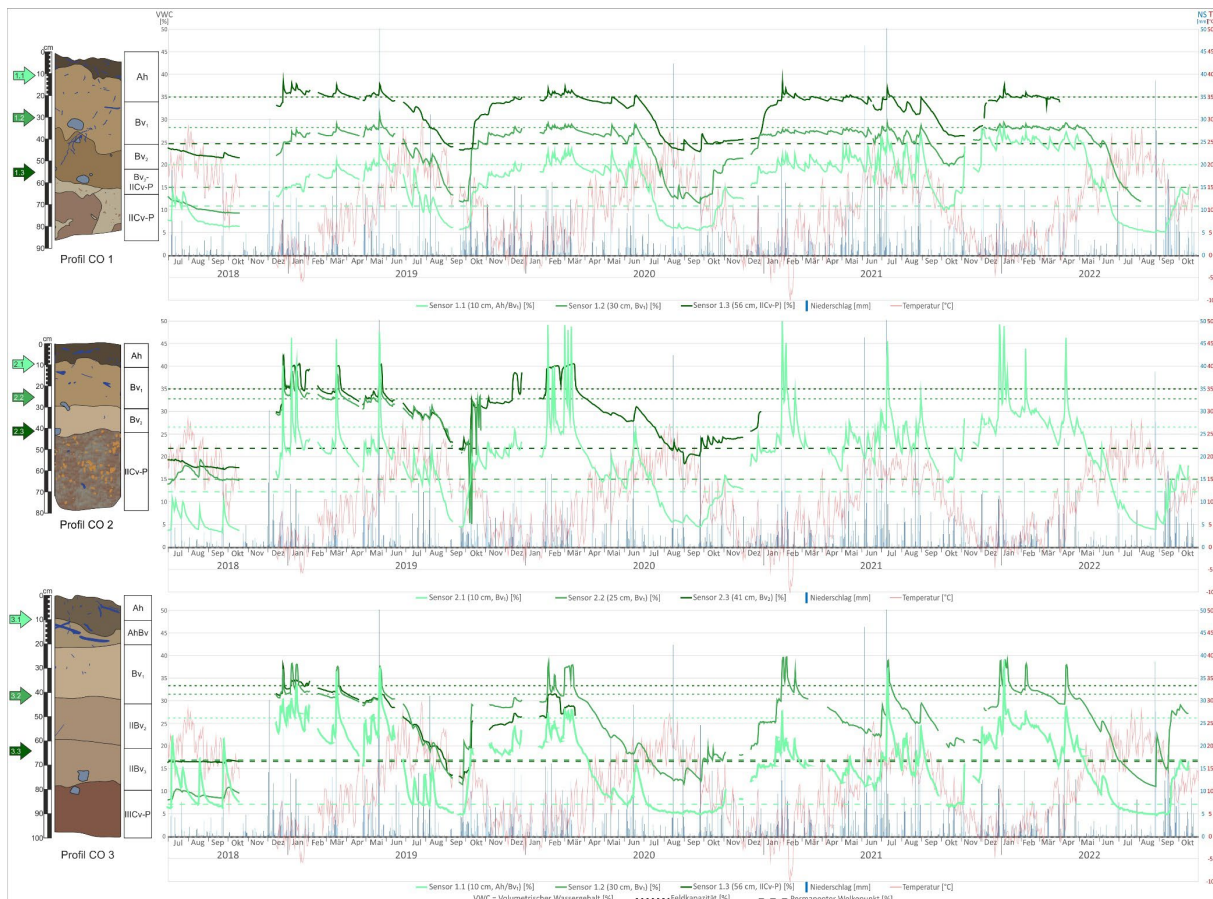


Abbildung 73: Monitoringzeitreihen der Profile CO 1 (Braunerde; Plateau), CO 2 (Braunerde; Hangschulter) und CO 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 29.06.2018 bis 31.10.2022.

Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Da die Niederschlagsdaten der Monitoringstation Fehler und Datenlücken aufwiesen, wurden die Niederschlagsdaten der Wetterstation Kleingressingen verwendet (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2021b). Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Sensoren bereits Mitte Dezember 2018 nach 123,5 mm Niederschlag die FK, in Profil CO 1 dagegen erst Mitte Januar 2019 nach 177,8 mm. Zwar benötigten alle Profile deutlich mehr Niederschläge als ihre nFKWe um die FK zu erreichen, aber Profil CO 1 mit seiner flachen Umgebung benötigte im Vergleich am meisten. Bereits im Februar 2019 setzte der Rückgang der Bodenfeuchte ein, was besonders an den Sensoren 2.1 und 3.1 zu Veränderungen führte. Niederschlagsphasen im März und Mai 2019 unterbrachen den Abwärtstrend und hoben die Bodenfeuchte in allen Tiefen kurzfristig wieder bis auf die FK an. Nach dem Starkregenereignis vom 21. Mai nahmen die Werte kontinuierlich ab und erreichten Anfang September das Jahresminimum für 2019. Die seit Mai gefallenen Niederschläge hatten nur einen geringen kurzfristigen Effekt und waren vor allem an den obersten Sensoren messbar. Ab dem 23. September einsetzender Regen führte bis Ende Oktober an allen Sensoren zunächst zu einem schnellen Anstieg. Es dauerte aber bis Ende Dezember 2019 bis auch die untersten Sensoren die FK erreicht hatten. Obwohl der Januar 2020 viel zu trocken war (s. Tabelle 60) und die Bodenfeuchte bereits wieder abnahm, sorgten die mit 159,9 mm stark

überdurchschnittlichen Niederschläge von Ende Januar bis Mitte März 2020 wieder für eine Anhebung auf FK. Die flachen Kurvenverläufe der Sensoren 2.3, 3.2 und 3.3 weisen auf eine Sättigung einzelner Horizonte hin. Insbesondere an Sensor 2.3 kann es zu Stauwasser gekommen sein, da der basale IICv-P-Horizont hier als Wasserstauer (Sd) fungierte. Mit Ende der Niederschläge begann die Bodenfeuchte besonders in den Profilen CO 2 und CO 3 sehr stark abzunehmen. Im Profil CO 1 war der Rückgang langsamer und mit der Tiefe zeitverzögert. Eine Niederschlagsphase Ende Mai/Anfang Juni verzögerte das Erreichen des Jahresminimums nur etwas hinaus. Ab Ende Juli/Anfang August pendelte sich die Bodenfeuchte auf einem niedrigen Niveau ein und Anfang September 2020 wurde das Jahresminimum verzeichnet. Die ab Ende September 2020 beginnende Niederschlagsphase ließ die Werte wieder ansteigen. Während der oberste Sensor 2.1 in Profil CO 2 unmittelbar auf den Regen reagierte, verharrten die Sensoren 1.1 und 3.1 bis Mitte Oktober auf dem niedrigen Niveau und stiegen erst dann an. In Profil CO 3 stach der mittlere Sensor 3.2 heraus, da er vor dem Sensor 3.1 steigende Werte verzeichnete. Möglicherweise war dies auf veränderte präferentielle Fließwege (z.B. Tiergang oder Wurzeln) oder Interflow zurückzuführen. Auch im August 2022 stieg die Bodenfeuchte an Sensor 3.2 als erstes an. Die Trockenheit des Jahres 2020 setzte sich auch im Herbst und Winter fort (s. Tabelle 60), sodass die FK an den untersten Sensoren erst Ende Januar 2021 erreicht wurde. Mit 239,3 mm Niederschlag fiel von Oktober 2020 bis Januar 2021 mehr als das Doppelte der nFKWe aller drei Profile. Die Böden waren aber derart ausgetrocknet, dass die Bodenfeuchte nur sehr langsam ansteigen konnte.

Nach den Niederschlägen im Januar 2021 führten die trockenen Frühjahrsmonate Februar bis April zu einem deutlichen Rückgang der Bodenfeuchte. Dieser war besonders an den oberen Sensoren der Profile CO 2 und CO 3 sehr ausgeprägt. Die niederschlagsreichen Sommermonate von Mai bis August – im Beobachtungszeitraum war dies die längste Phase mit etwa durchschnittlichen bzw. überdurchschnittlichen Niederschlägen (s. Tabelle 60) – bewirkten aber wieder eine regelmäßige Anhebung der Bodenfeuchte auf die FK. Erst während des trockenen September 2021 sank die Bodenfeuchte an allen Sensoren auf ein mit den Vorjahren vergleichbares Niveau ab. Das Jahresminimum 2021 lag aber deutlich über den Minima der Vorjahre und noch oberhalb des PWP der jeweiligen Horizonte. Ab Mitte Oktober begann die Bodenfeuchte zunächst an den obersten Sensoren langsam, dann deutlich wieder anzusteigen. Am Sensor 3.1 dagegen nahmen die Werte erst Anfang November zu. Auf Grund des trockenen Herbstes 2021 erreichten die obersten Sensoren erst Anfang Dezember die FK, wobei hierfür nur 58,7 mm Niederschlag nötig waren. Sensor 1.3 erreichte nach 133,9 mm Niederschlag die FK Ende Dezember 2021, womit ca. 100 mm weniger als im Vorjahr nötig waren.

Bis Ende Februar 2022 blieb die Bodenfeuchte an allen Profilen an der FK. Der sehr trockene März sorgte vor allem an den Profilen CO 2 (S 2.1) und CO 3 (S 3.1) für eine schnelle Austrocknung. An Profil CO 1 (S 1.1) äußerte sich der Rückgang dagegen nur leicht. Die Niederschlagsphase Ende März/Anfang April brachte einen sehr starken kurzfristigen Anstieg an den Profilen CO 2 und CO 3, ab Mitte April setzte sich der starke Rückgang allerdings wieder bis Juli fort. Ab Juli/August flachte der Rückgang ab und Mitte August wurde das Jahresminimum 2022 dieser Profile erreicht. An Profil CO 1 blieb die Bodenfeuchte dagegen bis Mai stabil, bevor auch hier ein starker Rückgang einsetzte und Ende August das Jahresminimum erreicht wurde. Die Jahresminima aller Profile lagen auf dem gleichen niedrigen Niveau wie in den vorangegangenen Trockenjahren 2018, 2019 und 2020.

Auffällig ist, dass das Starkregenereignis vom 26. und 27. August 2022 mit 66,34 mm Niederschlag an Profil CO 1 nur minimal und an Profil CO 2 gering sichtbar war. Der größte positive Ausschlag wurde dagegen an Sensor 3.2 gemessen, während der darüber liegende Sensor 3.1 keinen Anstieg verzeichnete. Eine dauerhafte Erholung der Bodenfeuchte begann mit den Niederschlägen ab dem 8. September 2022. Bis zum Ende des Beobachtungszeitraums zeigte sich ein langsamer Bodenfeuchteanstieg, wie er auch nach der langen sommerlichen Trockenperiode 2020 auftrat.

	Kleingressingen									
	2018		2019		2020		2021		2022	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Jan	73,5	+25,6	68,2	+16,6	31,5	-46,2	74,3	+27	57,3	-2,1
Feb	18,8	-64,5	11,8	-77,7	104,8	+98,1	48,4	-8,5	46,4	-12,3
Mär	60,2	+1,2	63,5	+6,7	40,4	-32,1	38,4	-35,5	19,2	-67,7
Apr	24,4	-62,9	32,9	-50	20,5	-68,8	25,4	-61,4	68,3	+3,8
Mai	47,3	-37,4	132,3	+75,2	40,1	-46,9	85,1	+12,7	10,6	-86
Jun	66,4	-27	38,1	-58,1	90,7	-0,3	152,4	+67,5	22,8	-74,9
Jul	38,4	-51,3	47,6	-39,6	22,1	-72	140	+77,7	28,9	-63,3
Aug	12,8	-83,1	56,7	-25,1	89,2	+17,8	117,4	+55,1	73,7	-2,6
Sep	31,4	-46,5	35,5	-39,5	37,2	-36,6	13,4	-77,2	114,8	+95,6
Okt	13,3	-76,2	73,1	+31	59,9	+7,3	37,7	-32,4	47,8	-14,3
Nov	11,5	-81,6	60,1	-4	18,5	-70,4	29,8	-52,4	44,8	-28,4
Dez	128,0	+83,4	73,5	+5,3	52,7	-24,5	76,5	+9,6	57,2	-18,1
Summe	526,0	-34,6	692,9	-13,9	607,6	-24,5	838,9	+4,3	592,3	-26,4

Tabelle 60: Monatliche Niederschläge der Wetterstation Kleingressingen für die Jahre 2018 bis 2022. Neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, sind die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022d).

6.1.6 Willmars

Der Beobachtungszeitraum reicht vom 12. Dezember 2019 bis zum 30. November 2022 und umfasst drei Sommerperioden (s. Abbildung 74). Als einziger weist der Monitoringstandort Willmars natürliche Buntsandsteinböden auf. Die sehr sandigen Braunerden besitzen eine sehr hohe hydraulische Leitfähigkeit, haben allerdings nur eine geringe nFKWe. Die Horizonte aus Tonsiltsteinen haben eine höhere nFK sind aber zum Teil wasserstauend.

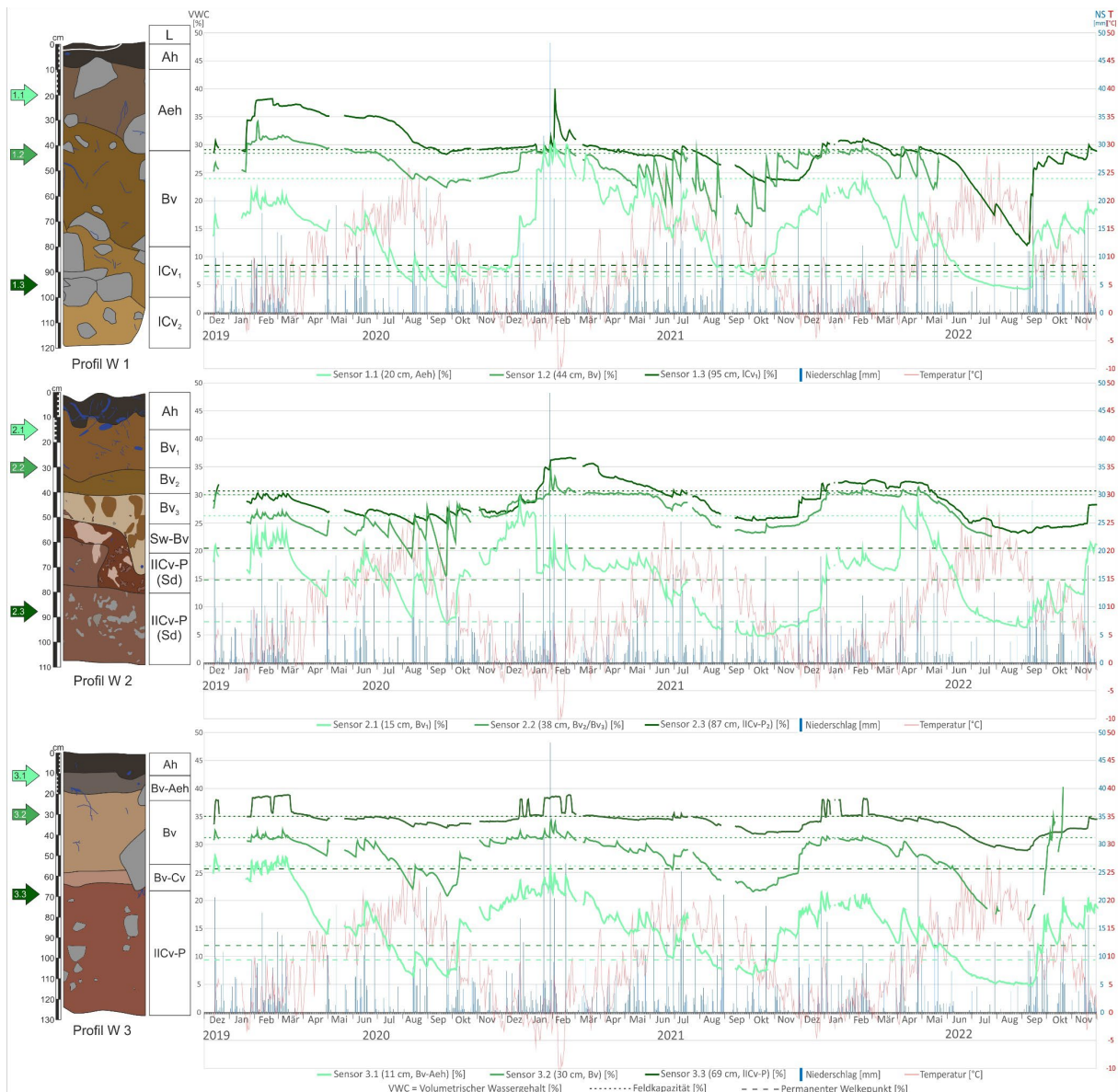


Abbildung 74: Monitoringzeitreihe für die Profile W 1 (podsolierte Braunerde; Oberhang), W 2 (pseudovergleyte Braunerde; Mittelhang), W 3 (podsolierte Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 12.12.2019 bis 30.11.2022.

Die Pfeile neben den Profilen geben die Tiefe der Sensoren an. Die Abbildung liegt zum Herausnehmen bei und ist in voller Auflösung im digitalen Anhang zu finden.

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums im Dezember 2019 war die Bodenfeuchte in allen Profilen bereits an der FK. Im Zeitraum der Datenlücke fielen in Fladungen-Heufurt 42 mm Niederschlag (DWD CLIMATE DATA CENTER, 2021). Ab dem 27. Januar 2020 begann eine lange Niederschlagsperiode und bis 12. März fielen 171,8 mm. Im Gegensatz zu den Profilen W 1 und W 3 rief dies in Profil W 2 keine besonderen Änderungen hervor. In Profil W 1 stieg die Bodenfeuchte an den Sensoren 1.2 und 1.3 deutlich an und Sensor 1.3 erreichte schließlich ein Plateau. Auch Sensor 3.3 in Profil W 3 erreichte zum gleichen Zeitpunkt ein Plateau, was auf Stauwasser in beiden Profilen (W 1 und W 3) hindeutet. Das Stauwasser hielt in beiden Profilen bis zum Ende der Niederschlagsphase an. Ab Mitte März begann eine bis Ende April dauernde Trockenphase und die Bodenfeuchte nahm oberflächennah in allen Profilen deutlich ab. Während der Trockenphase gab es nur drei kurze Niederschlagsereignisse, die an den oberen Sensoren für einen kurzfristigen Anstieg sorgten. Die Niederschlagsphase im Juni 2020 brachte 71 mm Niederschlag und verursachte einen etwas längeren Bodenfeuchteanstieg. Die hohen Temperaturen führten im Anschluss aber wiederum für einen sehr schnellen Rückgang, welcher erst durch die Niederschläge im August kurz unterbrochen wurde. Im Profil W 2 hatte dies einen sehr starken Anstieg an den oberen Sensoren 2.1 und 2.2 zur Folge. Das Jahresminimum 2020 erreichten alle Sensoren Ende September. Ab dem 23. September 2020 einsetzende Niederschläge ließen die Bodenfeuchte zunächst oberflächennah ansteigen. Sensor 3.2 erreichte die FK als erster Anfang Dezember, die beiden anderen Sensoren in Profil W 3 (3.1 und 3.3) erst Ende Dezember. Sensor 3.3 verzeichnete hier zwei kurze Stauwasserphasen. In Profil W 2 erreichte Sensor 2.1 die FK Ende Dezember, allerdings verursachte die Frostperiode im Januar 2021 einen plötzlichen Rückgang durch die abnehmende elektrische Leitfähigkeit. Gleichzeitig stieg die Bodenfeuchte darunter weiter an, bis es Ende Januar an Sensor 2.3 zu Stauwasser kam. Diese Stauwasserphase war auch an Sensor 3.3 zu beobachten. In Profil W 1 zeigte sich ein ähnliches Muster zu Profil W 3, bei dem die unteren Sensoren (1.2 und 1.3) die FK vor dem obersten Sensor 1.1 bereits Ende Dezember 2020 erreichten.

2021 begann mit überdurchschnittlichen Niederschlägen im Januar und Februar, wobei sich im Februar ein großer Anteil auf den Monatsanfang konzentrierte (s. Tabelle 61). Deshalb nahm die Bodenfeuchte bereits Mitte Februar oberflächennah ab, was durch die zu trockenen Monate März und April noch beschleunigt wurde. Ab Februar ging auch das Stauwasser an den Sensoren 2.3 und 3.3 zurück auf FK. Das Jahresminimum 2021 wurde erst Anfang Oktober erreicht, da der feuchte Mai und die Niederschläge im Juli die Abnahme unterbrachen. Die hohen Niederschläge im August riefen hierbei keine Veränderung hervor. Dies galt aber nur für die Profile W 1 und W 3, Profil W 2 wich von diesem Muster ab. Zwischen Februar und Juni war die Bodenfeuchte an den Sensoren 2.1 und 2.3 stabil, wobei die Temperaturzunahme und die Niederschläge nur für geringe Schwankungen sorgten. Erst ab Anfang Juni folgte die Bodenfeuchte in Profil W 2 dem zuvor beschriebenen Verlauf. Ab dem

3. Oktober 2021 nahm die Bodenfeuchte in allen Profilen langsam wieder zu. Die stark unterdurchschnittlichen Niederschläge im Herbst und Winter 2021 (s. Tabelle 61) hatten zur Folge, dass die FK in allen Horizonten erst Ende Dezember 2021 erreicht wurde. Von Oktober bis Ende Dezember 2021 fielen 146,2 mm Niederschlag, was nur geringfügig mehr ist als die nFKWe von Profil W 2 mit 135,7 l/m². Sensor 1.2 wich davon ab und erreichte die FK bereits Anfang Dezember. Allerdings zeigte Sensor 1.2 2021 immer deutlich größere Werteänderungen als Folge von Regenfällen als der darüber verbaute Sensor, was vermutlich auf eine Veränderung der präferentiellen Fließwege zurückzuführen ist.

2022 begann mit 122,1 mm Niederschlag in Januar und Februar, wobei die überdurchschnittlichen Februarniederschläge hervorstachen (s. Tabelle 61). Sensor 3.3 wies in diesem Zeitraum dreimal kurzzeitig Stauwasser auf, Sensor 2.3 hingegen gar nicht. Während des fast regenfreien März nahm die Bodenfeuchte an den oberen Sensoren stark ab und wurde erst mit den Starkniederschlägen Anfang April wieder angehoben. Auffällig war hier Sensor 2.1, welcher erst Anfang April kurzfristig die FK erreichte und nicht bereits im Dezember 2021 oder Januar 2022. Ab Anfang April begannen auch an den tiefsten Sensoren die Bodenfeuchte sehr deutlich abzunehmen. Durch die außergewöhnliche viermonatige Trockenphase zwischen Mai und August (s. Tabelle 61), erreichten alle Sensoren Anfang September 2022 den niedrigsten Wert des gesamten Beobachtungszeitraums. Besonders die am tiefsten verbauten Sensoren 1.3, 2.3 und 3.3 stachen dabei mit Tiefstwerten hervor. Alle Profile waren so ausgetrocknet, dass die Niederschläge ab dem 6. September erst mit erheblicher Zeitverzögerung an den oberflächennahen Sensoren messbar waren. Erst zwei Starkniederschläge brachten die Trendumkehr durch sehr kurzfristige Anstiege. Nach den Starkniederschlägen nahm die Bodenfeuchte bis zum Ende des Beobachtungszeitraums an allen Sensoren langsam zu, die FK wurde aber noch nicht erreicht.

Zwischen den drei Profilen zeigten sich Ähnlichkeiten im Jahresgang der Ah- und B-Horizonte. Die obersten Sensoren hielten die FK nur für kurze Zeit während der winterlichen Niederschläge. Sobald die Niederschläge ausblieben, nahm auch im Winter die Bodenfeuchte rasch ab. Die mittleren Sensoren in den B-Horizonten reagierten, wie auch an anderen Monitoringstationen, zeitverzögerter und mit geringeren Werteamplituden. Da in Profil W 1 alle Horizonte sehr sandig sind, ähnelte der Jahresgang der Sensoren 1.2 und 1.3 dem des obersten Sensors 1.1 deutlich stärker, als dies in den anderen Profilen der Fall war.

Unter allen Sensoren stach allerdings Sensor 3.1 hervor. Über den Beobachtungszeitraum nahm die im Winter erreichte FK um ca. 5 % ab.

	Fladungen-Heufurt							
	2019		2020		2021		2022	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Jan	90,2	+11,9	41,4	-48,6	101,3	+25,7	76,8	-4,7
Feb	34,3	-42,7	141,9	+137	81,6	+36,3	87,2	+45,7
Mär	78,2	+30,9	54,1	-9,4	40,6	-32,0	14,5	-75,7
Apr	21	-47,0	7,2	-81,8	23,4	-40,9	78,1	+97,3
Mai	77,7	+23,1	43,6	-30,9	69,8	+10,5	37,8	-40,1
Jun	38,7	-37,9	71,8	+15,2	53	-14,9	16,7	-73,2
Jul	24,5	-66,5	22,1	-69,8	91,1	+24,5	15	-79,5
Aug	62,9	+2,9	63,2	+3,4	80,1	+31	27,1	-55,7
Sep	32	-43,6	24,9	-56,1	15,6	-72,5	121,8	+114,8
Okt	54,2	-12,1	63,8	+3,4	46,2	-25,1	57,7	-6,4
Nov	79,6	+15,1	19,8	-71,4	40	-42,2	53,7	-22,4
Dez	77,3	-11,4	67,9	-22,1	61,1	-29,9	62,3	-28,6
Summe	670,6	-13,4	621,7	-19,7	703,8	-9,1	648,7	-16,2

Tabelle 61: Monatliche Niederschlagswerte der Klimastation Fladungen-Heufurt für die Jahre 2019 bis 2022.

Neben den monatlichen Niederschlägen [mm] und der Jahresniederschlagssumme, sind die jeweiligen Abweichungen vom vieljährigen Mittel (Klimareferenzperiode 1991-2020) in Prozent angegeben. Negative Abweichungen sind rot, positive Abweichungen sind grün hinterlegt.

Quelle: DWD CLIMATE DATA CENTER (2021).

6.2 Vergleich der Monitoringdaten

Ein direkter Vergleich aller Monitoringstationen ist auf Grund der unterschiedlichen geographischen Lagen, der unterschiedlichen Geologie und der verschiedenen Klimate nur bedingt möglich. Es zeigen sich aber charakteristische Muster der Bodenfeuchte, welche an allen Monitoringstationen zu beobachten waren. Eine zusammenfassende Abbildung aller Monitoringzeitreihen findet sich im digitalen Anhang (s. Abbildung A1).

Die Sensitivität der Sensoren auf die Witterung (Niederschläge und Temperatur) nimmt mit der Tiefe ab. Die oberflächennahen Sensoren bis etwa 30 cm Tiefe reagieren direkt auf die Witterungsänderungen und weisen die größte Werteamplitude im Jahresgang auf. Niederschläge erzeugen i.d.R. eine schnelle Bodenfeuchteänderung, während sich Temperaturänderungen längerfristig und mittelbar auswirken. Die Temperaturänderungen gehen immer mit der Vegetationsphase und dem entsprechenden Wasserbedarf der Pflanzen sowie der jeweiligen Evapotranspiration einher. Lange Frostperioden im Winter können zu einer vermeintlich schnellen Abnahme der Bodenfeuchte führen, allerdings ist dies auf die Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit infolge des Bodenfrosts zurückzuführen (z.B. Bürgstadt S 2.1, Herchsheim S 1.1 und S 2.1 und Willmars S 2.1).

Mit zunehmender Tiefe werden die Niederschlagssignale immer stärker gedämpft. Einzelne Niederschlagsereignisse erzeugen an den untersten Sensoren nur dann eine Werteänderung, wenn sehr viel Regen fällt und das gesamte Profil durchfeuchtet wird. Dies kann entweder ein einzelner Starkregen oder eine mehrtägige Niederschlagsphase sein. Unterschiede ergeben sich hier aus den unterschiedlichen Bodenarten und hydraulischen Leitfähigkeiten, wobei sandige Böden Niederschläge i.d.R. schneller als tonige Böden in die unteren Horizonte leiten.

Über alle Monitoringstationen hinweg zeigen sich saisonale Muster, wobei sich auch die jahresspezifischen Muster ähneln (vgl. Abbildung A1). Zu Jahresbeginn im ausgehenden Winter sind alle Sensoren an ihrer jeweiligen FK, d.h. die Profile sind wassergesättigt. Mit den steigenden Temperaturen im Frühling und dem Beginn der Wachstumsperiode nimmt die Bodenfeuchte in allen Horizonten ab. Abhängig von den Niederschlägen im Frühjahr und Sommer erreicht die Bodenfeuchte ihr Jahresminimum zwischen Juli und Anfang Oktober. Niederschläge in diesem Zeitraum wirken sich dabei meist nur auf die oberen 30 cm des Profils aus. Mit den Herbstniederschlägen und dem reduzierten Wasserbedarf der Pflanzen beginnen die Werte wieder anzusteigen. Der Anstieg ist abhängig von der Niederschlagsmenge, aber auch davon, wie lange und intensiv die Trockenheit der Sommermonate ausfällt. Je ausgeprägter die Trockenheit ist, desto länger benötigen die Böden, um die FK zu erreichen. Die Hysterese ist dann sehr ausgeprägt.

In den Beobachtungszeitraum fielen vier sehr trockene Jahre und nur ein Jahr mit einer durchschnittlichen Regenmenge. Von 2018 bis 2020 herrschte eine mehrjährige europaweite Dürre und auch 2022 war als Gesamtjahr und auch saisonal zu trocken, einzig 2021 entsprachen die Sommerniederschläge dem langjährigen Mittelwert (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022c; HARI et al., 2020; HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ, 2023; IMBERY et al., 2023; RAKOVEC et al., 2022; UMWELTBUNDESAMT, 2022; ZIMMERMANN & RASPE, 2022c).

In den Jahren 2020 und 2022 traten sehr ausgeprägte Trockenphasen mit einem zu trockenen Frühjahr auf. In der Folge nahm die Bodenfeuchte bereits sehr früh in der Vegetationsperiode - auch in der Tiefe – ab (ZIMMERMANN & RASPE, 2022d). Da die Niederschläge in dieser Zeit nur oberflächennah für eine Steigerung der Werte sorgen, nimmt das pflanzenverfügbare Wasser in der Tiefe weiter ab und steht später in der Vegetationsperiode nicht mehr als Reserve zur Verfügung.

Im Gegensatz dazu traten 2021 im Frühjahr und Sommer regelmäßig Niederschläge auf (vgl. Abbildung A1), wodurch die Bodenfeuchte an den tieferen Sensoren nur wenig bis gar nicht abnahm und an oder nahe der FK verblieb (ZIMMERMANN & RASPE, 2022c). Die Pflanzen konnten in diesem Fall ihren Wasserbedarf aus den obersten Bodenhorizonten decken, was nicht zu einer Abnahme der Werte in den tieferen Horizonten führte. Erst im Hochsommer seit dem Monat Juli begann die Bodenfeuchte auch in der Tiefe abzunehmen. Damit konnten die tiefen Horizonte als Wasserreserve dienen und den Wasserstress für die Pflanzen hinauszögern.

7 Diskussion des Monitorings

7.1 Gemeinsamkeiten aller Standorte

Durch das meteorologisch-bodenhydrologische Monitoring konnten die Dürreperioden der Jahre 2018 bis 2020 erfasst und einem „normalen“, durchschnittlich niederschlagsreichen Jahr 2021 gegenübergestellt werden. Die Messreihen erfassen zusätzlich das Dürrejahr 2022 und damit liegen nun sehr spannende Datensätze zum Bodenfeuchteverlauf unter unterschiedlichen meteorologischen Voraussetzungen vor, was Rückschlüsse für die Entwicklung der Bodenfeuchte an verschiedenen charakteristischen Standorten im Hinblick auf das zukünftige Klima zulässt.

Die Auswirkungen der Bodenfeuchtwerte auf die Vegetation konnte an allen Standorten beobachtet werden. Während der Dürrephasen in den Jahren 2018 bis 2020 wurde in jedem Jahr das pflanzenverfügbare Bodenwasser (nFKWe) an allen Standorten über mehrere Monate ausgeschöpft und die Pflanzen litten unter Trockenstress. Diese Beobachtung deckt sich mit den Beobachtungen der nordbayerischen Waldklimastationen (ZIMMERMANN & RASPE, 2021). Nur im Jahr 2021 trat dank der durchschnittlichen Niederschläge und der regelmäßigen Sommerniederschläge kein Trockenstress auf, da die nFKWe nur in einzelnen Bodenprofilen erst gegen Ende der Vegetationszeit kurzzeitig ausgeschöpft waren (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022c; ZIMMERMANN & RASPE, 2022c). Der Hitze- und Dürresommer 2022 hatte die gleichen Auswirkungen auf die Vegetation wie der vorletzte Dürresommer 2020 (ZIMMERMANN & RASPE, 2022a, 2022b).

Die geographisch bedingten Unterschiede in Temperatur und Niederschlag traten im Vergleich der Standorte deutlich heraus (vgl. Tabelle 62). Die für Unterfranken typische Niederschlagsverteilung mit topographisch bedingten ausgeprägten Luv-Lee-Effekten (s. Kapitel 3.3) konnte anhand der Monitoringdaten nachvollzogen werden. Die höchsten Niederschläge wiesen Bürgstadt im Westen und Willmars in der Rhön auf (vgl. Tabelle 56 und Tabelle 61), während Herchsheim und Obbach auf den zentralen Mainfränkischen Platten die geringsten Niederschläge verzeichneten (vgl. Tabelle 57 und Tabelle 58). Weiter östlich stiegen die Niederschläge im Uniwald und in Oberrimbach erwartungsgemäß wieder an. Auch die gemessenen Temperaturen entsprachen jeweils Höhenlage und Naturraum wie in Abbildung 7. Die höchste Jahresmitteltemperatur wies Bürgstadt im Maintal/Erftal auf, die niedrigsten Willmars in der Rhön und der Uniwald im Hesselbacher Waldland. Die Standorte Herchsheim und Obbach auf den Mainfränkischen Platten sowie Oberrimbach im Steigerwald lagen im Mittelfeld.

Bodentyp, Bodenart, Ausgangsgestein und Hangposition besitzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Bodenfeuchte, weshalb ein direkter Vergleich der Bodenfeuchteverläufe aller sechs Monitoringstationen nur bedingt möglich ist. Dagegen sind sich die Feuchtigkeitsdaten der Böden an

einer Monitoringstation jedoch sehr ähnlich und Unterschiede beschränken sich auf die natürliche Variabilität der Böden eines Standorts (vgl. HAFERKORN, 2000). Im Vergleich aller Monitoringstationen treten diese Unterschiede zurück und geben ein einheitlicheres Bild eines Standorts. Die erhobenen Datenreihen sind mit vergangenen und aktuellen Messungen ähnlicher Standorte aus Unterfranken sehr gut vergleichbar (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2012, 2023; RIPPEL et al., 2002; WEINBAURING FRANKEN E.V., 2023).

Der saisonale Verlauf der Bodenfeuchte zeigt ein jahresspezifisches Muster und spiegelt die Witterung wider. Das Minimum der Bodenfeuchte wird zwischen Ende August und Oktober, also gegen Ende des Hydrologischen Jahres erreicht (LESER, 2015). Mit den Herbst- und Winterniederschlägen steigt die Bodenfeuchte auf die FK an und wenn diese in allen Horizonten erreicht ist, kann Sickerwasser dem Grundwasser zufließen (BOHNE, 2005). Die Dämpfung des Witterungssignals (Niederschlag und Temperatur) mit der Tiefe kann als normal bezeichnet werden, da dieses Verhalten in allen vergleichbaren Messreihen zu beobachten ist (HAFERKORN, 2000; KLIWA-AG GRUNDWASSER et al., 2012; TRESSEL & SCHNEIDER, 2005; ZUBER, 2007). Das Ausmaß der Dämpfung ist wiederum sehr stark von den Bodeneigenschaften, v.a. von der Korngröße, der hydraulischen Leitfähigkeit und den präferentiellen Fließwegen abhängig.

Ein weiterer potenziell starker Einflussfaktor auf die Bodenfeuchtwerte ist die Hydrophobie oder Hydrophobizität der Humusaufgabe. Auf Grund der Sensoranzahl und -tiefen konnte dies nicht direkt gemessen werden. Aus anderen Studien und Langzeitversuchen ist bekannt, dass die Hydrophobizität von der Menge und Art der organischen Substanz in den oberen 25 bis 30 cm eines Bodens abhängig ist (DEKKER & RITSEMA, 1994; GRAMS et al., 2021). Wie stark die Hydrophobizität schließlich ausgeprägt ist, hängt maßgeblich vom Wassergehalt des Bodenmaterials sowie der Bodentemperatur ab (BEISECKER et al., 2020; ZUBER, 2007). Sie tritt nur unterhalb eines bestimmten Bodenfeuchtwerts auf und nimmt dann mit abnehmender Bodenfeuchte weiter zu, mit ansteigender Bodenfeuchte nimmt sie aber auch wieder ab (DOERR & THOMAS, 2000). Die Hydrophobizität variiert im Jahr und ist in einem trockenen Sommer am wirksamsten. Nach längeren Niederschlägen im Herbst ist sie am schwächsten ausgeprägt, bis sie schließlich völlig unwirksam wird (DEKKER & RITSEMA, 1994; DOERR & THOMAS, 2000). GRAMS et al. (2021) wiesen nach, dass die Hydrophobizität unter langanhaltender Dürre in einem Fichtenwald deutlich stärker zunimmt als in einem Buchenwald. Bereits in 10 cm Tiefe nimmt die Hydrophobizität unter Buche und Fichte deutlich ab. Bei einer ausgeprägten Hydrophobizität kann der Niederschlag nur über Makroporen in den Boden infiltrieren und es kommt in der Folge zu verstärktem Oberflächenabfluss (BEISECKER et al., 2020; RITSEMA & DEKKER, 1994). Durch variierende Porenräume kommt es zu großen Inhomogenitäten auf kleinem Raum (BOHNE, 2005; DEKKER & RITSEMA, 1994). Gerade während kürzerer Trockenphasen oder mehrmonatiger Dürren in

der Vegetationsphase, in denen die Pflanzen auf die wenigen Niederschläge angewiesen sind, steht den Pflanzen wegen der Hydrophobizität nicht das volle Bewässerungspotential der Niederschläge zur Verfügung. Die Hydrophobizität wurde im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht mit dem Water Drop Penetration Time (WDPT)-Test gemessen, allerdings konnte das Phänomen mehrfach während Wartungsarbeiten in Oberrimbach, Willmars und im Uniwald beobachtet werden. Auch nach einem längeren Sommerregen war nur die Humusauflage feucht und das darunterliegende Bodenmaterial trocken. Die Humusauflage war hydrophob und verhinderte eine rasche Infiltration des Niederschlags

7.2 Diskussion der einzelnen Standorte

Bürgstadt

Der Standort Bürgstadt unterscheidet sich von den anderen Standorten durch die sandigen Rigosole aus Buntsandstein-Material und die weinbauliche Nutzung. Bürgstadt befindet sich in einer Region, welche auch zukünftig mehr Jahresniederschlag erhalten wird als die Mainfränkischen Platten. Der Sommerniederschlag hingegen bleibt im Szenario rcp45 allerdings konstant bzw. nimmt leicht ab. Für das Szenario rcp85 ist allerdings ein sehr deutlicher Rückgang modelliert. Gleichzeitig werden die Trockenperioden (eine Folge von min. sechs Trockentagen) und die Starkniederschläge zunehmen (www.bigdata-at-geo.eu/klimaatlas JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG, 2023a; SCHÖNBEIN et al., 2020). Unter diesen klimatischen Bedingungen wird nicht mehr das Geländeklima für die Qualität des Weines bestimmend sein, sondern die Wasserversorgung der Reben über die Böden (MICHEL et al., 2005). Dies stellt für den Standort Bürgstadt eine große Herausforderung dar, denn sowohl die Laboruntersuchungen als auch das Monitoring zeigten, dass die sandigen Rigosole schlechte Wasserspeicherfähigkeiten besitzen. Die nFKWe ist zwar „hoch“, allerdings nimmt die Bodenfeuchte ohne regelmäßige Niederschläge rasch ab. Gleichzeitig sind die locker gelagerten sandigen Rigosole sehr erosionsanfällig, wenn sie nicht durch Bewuchs geschützt sind, um der erwarteten Zunahme der Starkniederschläge zu trotzen. Damit am Standort Bürgstadt auch unter dem zukünftig zu erwartenden Klima erfolgreich Weinbau betreiben werden kann, ist eine Erhöhung der Wasserspeicherfähigkeiten und eine Verhinderung von Erosion notwendig.

Herchsheim

Die Parabraunerden am Standort Herchsheim bieten die besten bodenhydrologischen Eigenschaften aller untersuchten Standorte. Bedingt durch die hohen Schluffgehalte und die tiefe Durchwurzelbarkeit (physiologische Gründigkeit), kann viel Wasser im Boden gespeichert und – viel

wichtiger – auch von den Pflanzen genutzt werden. Die nFKWe sind hier etwa doppelt so hoch wie in den sehr tonigen Böden der Standorte Obbach und Uniwald. Damit sind die Parabraunerden die landwirtschaftlich am besten geeigneten Böden für die niederschlagsarmen Mainfränkischen Platten. Sofern der Bodenwasserspeicher ausreichend gefüllt ist, können die Parabraunerden längere Trockenperioden überbrücken als andere Bodentypen. Die Infiltrationsleistung der Parabraunerden ist auf Grund des großen Porenvolumens sowie zahlreicher Makroporen hoch (s. Sensoren 1.1 und 2.1).

Um dieses Potential nutzen zu können, muss der Boden vor Erosion und Verschlammung geschützt werden (vgl. Abbildung 25 u. Abbildung 26). Insbesondere als Folge von Starkregenereignissen kann die Infiltrationsleistung der Böden reduziert und die Erosion begünstigt werden. Neben der Verschlammung kann es auch zu Krustenbildung durch Niederschläge kommen, wodurch Makroporen verschlossen und Luft im Porenraum eingeschlossen wird (ALHASSOUN, 2009; BOHNE, 2005; BOT & BENITES, 2005). Auch durch die Verdichtung der Böden infolge des Befahrens mit landwirtschaftlichen Maschinen werden Makroporen verschlossen und das Porenvolumen verringert (BEISECKER et al., 2020; BRAND-SASSEN, 2004). Folglich können Niederschläge nicht infiltrieren und fließen oberflächlich ab (vgl. Abbildung 25), was wiederum die Erosion begünstigt. Durch eine dauerhafte Bedeckung des Bodens durch Bepflanzung oder Pflanzenreste kann die Bodenoberfläche bei Starkniederschlägen geschützt und die Infiltrationsleistung erhalten werden (BOT & BENITES, 2005; MOSIMANN et al., 2007). Werden die Parabraunerden vor Erosion geschützt und die Infiltrationskapazitäten durch entsprechende Bearbeitungsmaßnahmen erhalten bzw. durch Humusaufbau verbessert, sind diese für die zukünftig erwarteten Klimabedingungen gut gewappnet (vgl. Tabelle 62). Auf Grund der zunehmenden Evapotranspiration wird hier allerdings die Sickerwasserrate ins Grundwasser abnehmen und das Sickerwasser eine höhere Nitratkonzentration aufweisen (BRÄUNIG & KLÖCKING, 2008; RIPPEL et al., 2002). Der Evapotranspiration und dem Nitrataustrag kann aber z.B. durch den Anbau von Zwischenfrüchten entgegengewirkt werden (RIPPEL et al., 2002).

Obbach

Der flachgründige pseudovergleyte Ranker von Profil O 1 und die beiden Braunerden der Profile O 2 und O 3 stellen einen schlechten Ackerstandort für die Mainfränkischen Platten dar. Auf Grund des regelmäßigen oberflächlichen Stauwassers an Profil O 1, aber auch wegen der hohen Tongehalte, ist der Ackerstandort im sehr feuchten Zustand (feu4) sehr schlecht zu befahren und zu bearbeiten. Zusätzlich erschweren die zahlreichen großen Muschelkalksteine die Bearbeitung.

Mit Profil O 1 konnten die beiden Extreme – Stauwasser und völlige Austrocknung – beobachtet werden. Beide Zustände sind primär auf die geringe Profilmächtigkeit über stauendem Tonstein zurückzuführen. Die anderen beiden Profile können durch ihre Mächtigkeit mehr Wasser aufnehmen, dieses auch länger speichern und lateral abgeben. Die nFKWe der Profile O 2 und O 3 ist allerdings trotz ihrer Mächtigkeit wegen des hohen Tonanteils vergleichsweise niedrig.

Sowohl in ihrer Genese auf Muschelkalk als auch hinsichtlich ihrer bodenhydrologischen Eigenschaften sind die Braunerden mit Terra fusca-Resten der Profile O 2 und O 3 sehr ähnlich zu den Braunerde-Terrae fusca im Uniwald. Profil O 1 dagegen ist auf Grund der geringen Mächtigkeit und des intensiven Stauwassereinflusses in dieser Arbeit singulär.

Uniwald

Die Braunerde-Terrae fusca im Uniwald sind typische Muschelkalkböden in Unterfranken. Heute sind sie nur noch in wenig gestörten Bereichen unter Wald zu finden, da sie in Folge der landwirtschaftlichen Nutzung vielerorts stark überprägt oder erodiert wurden. Außerhalb der Waldnutzung finden sich heute nur noch Terra fusca-Reste wie z.B. am Standort Obbach in den Profilen O 2 und O 3. Bisher wurde in Unterfranken noch keine Terra fusca durch ein Bodenfeuchtemonitoring untersucht, obwohl dieser Bodentyp gerade in den großen Waldgebieten auf Muschelkalk (z.B. Gramschatzer Wald) noch großflächig zu finden ist. Als Waldstandort ist eine Terra fusca bzw. eine Braunerde-Terra fusca gut geeignet, obwohl die nFKWe wegen der hohen Tongehalte überwiegend nur mittlere Werte aufweist (vgl. Tabelle 62). Die Ah-Horizonte zeigen auf Grund der höheren Humusgehalte die höchste nFK, die tonigen B- und T-Horizonte kompensieren die geringe nFK durch ein ausgeprägtes polyedrisches Gefüge mit guten präferentiellen Fließwegen. Daraus folgt eine hohe hydraulische Leitfähigkeit (vgl. kf-Werte von Profil UW 2 in Tabelle 34) und eine gute Durchwurzelbarkeit. Dies ermöglicht den Bäumen, das Bodenwasser auch in größeren Tiefen zu erreichen und zu nutzen. Gleichzeitig ist der anstehende Muschelkalk sehr klüftig und wasserwegsam und verhindert so Staunässe.

Die Monitoringdaten zeigen, dass die nFK der Bv-Tv- und Tv-Cv-Horizonte deutlich niedriger ist als die aus Tabellen abgeleiteten nFK-Werte. Lediglich die Ah-Horizonte entsprachen den Tabellenwerten. Die Bodenartenhauptgruppe der Tone ist in dem zugrundeliegendem Datensatz der Tabellenwerte unterrepräsentiert (DEHNER et al., 2015). Gleichzeitig war der Trockenstress der Bäume in den Trockenjahren 2019, 2020 und 2022 nicht ausgeprägter als auf anderen Bodentypen. Dies unterstreicht die Bedeutung des Bodenfeuchtemonitorings.

Oberrimbach

Der Monitoringstandort Oberrimbach ist mit seinen Braunerden typisch für den Steigerwald und stellt den einzigen Standort auf Keuper dar. Die sandigen Horizonte – insbesondere die Ah-Horizonte – weisen im Vergleich der Profile einen sehr ähnlichen Jahresgang der Bodenfeuchte auf. Die Infiltration und die hydraulische Leitfähigkeit der Ah- und Bv-Horizonte ist hoch und ermöglicht einen schnellen Anstieg der Bodenfeuchte auch in größerer Tiefe, allerdings ist die Wasserspeicherkapazität auf Grund der Bodenart (Sl3 und Sl4) nicht gut (nFKWe gering bis mittel).

Der wichtigste Einflussfaktor auf die FK und nFK der Ah- und Bv-Horizonte ist hier der Humusgehalt der einzelnen Horizonte. Ohne die Humuskorrektur von FK, nFK und LK würden die ermittelten Werte in jedem Profil sehr nahe beieinander liegen. Im Ah-Horizont von Profil CO 3 führte der hohe Humusgehalt (6,59 %, h4) nach RENGER et al. (2009) zu einer Humuskorrektur der FK um +8 Vol.-%. Im darunterliegenden AhBv-Horizont betrug die Humuskorrektur der FK (Humusgehalt 1,05 %, h2) nur +2 Vol.-%. Die FK im sehr schwach humosen Bv₁-Horizont (0,36 %, h1) wird aufgrund des geringen Humusgehaltes nicht korrigiert.

Insgesamt stellen die geringen nFKWe besonders in Trockenjahren wie 2018 bis 2020 ein großes Problem dar. Die sehr dicht gelagerten basalen Cv-P-Horizonte haben eine sehr geringe nFK und können zu Stauwasser führen (vgl. Profil CO 2 in Kapitel 5.5.2.2 und Profil VMK-I von KAATSCH (2019)) und sind auch durch tiefwurzelnde Bäume schlecht nutzbar. In der Dürreperiode 2018 bis 2020 führte die vergleichsweise schlechte Wasserversorgung zu einem Fichten- und Buchensterben im Steigerwald (mündl. Mitteilungen Förster Uwe Reisenweber, Fürstl. Castell'sche Forstabteilung und Förster Manuel Neubauer, Forstbetrieb Paul Freiherr von Franckenstein).

Willmars

Die Braunerden auf Buntsandstein am Monitoringstandort Willmars sind typisch für den Naturraum Rhön (vgl. Kapitel 5.6.3). Bereits unter dem heutigen Klima ist der Standort auf Grund der bodenhydrologischen Eigenschaften problematisch (vgl. Tabelle 62). Zwar wird der Naturraum Rhön in allen Klimaszenarien noch am meisten Jahresniederschlag erhalten, aber die deutliche Abnahme der Sommerniederschläge und die Zunahme der Trockenperioden wird die Rhön vor Herausforderungen stellen (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2021c, 2022b; JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG, 2023a; SCHÖNBEIN et al., 2020).

Die sandigen Braunerden weisen einerseits eine gute Infiltrationsleistung mit einer sehr hohen hydraulischen Leitfähigkeit auf, andererseits ist die Wasserspeicherkapazität sehr eingeschränkt. Die Monitoringdaten zeigen, dass bereits eine kurze Trockenphase im Winter zu einem deutlichen

Rückgang der Bodenfeuchte führt, ohne dass die zusätzlichen Verluste durch die Evapotranspiration berücksichtigt werden. Die mittlere nFKWe kann dank der hohen hydraulischen Leitfähigkeit auch im Sommerhalbjahr schnell aufgefüllt werden, allerdings bietet sie nur einen sehr geringen Puffer, um eine mehrwöchige Trockenperiode zu überbrücken. Obwohl die tonigen Cv-P-Horizonte nur eine sehr geringe nFK besitzen und im Winter zu Stauwasser in den darüberliegenden Horizonten führen können, bieten sie tiefwurzelnden Bäumen noch eine Wasserreserve (vgl. Abbildung 74 Profil W 3). Der Baumwuchs an den Profilen W 2 und W 3 könnten dadurch in Zukunft einen Standortvorteil gegenüber dem Standort des Profils W 1 haben.

Positiv wirkt sich der hohe Humusgehalt auf die nFK der Ah-Horizonte aus, allerdings besteht dieser im Umfeld der Profile Großteils aus Nadelstreu. Besonders im Sommer kann dies hier zu einer verstärkten Hydrophobizität führen und die Infiltration der Niederschläge hemmen (vgl. Kapitel 7.1).

Parameter		Bürgstadt	Herchsheim	Obbach	Uniwald	Oberrimbach	Willmars
Bodenhydrologie	FK	-	+	o	++	o	o
	nFK	o	o	o	o	o	o
	LK	+	+	o	o	o	+
	nFKWe	+	+	o	o	o	o
	Zeitl. Speicherfähigkeit	--	++	o	++	--	--
	Infiltration	++	+	+	++	+	+
	Hydraulische Leitfähigkeit	+	+	+	+	+	++
	Durchwurzelbarkeit	+	++	o	+	o	o
Schadpotential	Verschlämmungsneigung	o	o	--	--	-	o
	Erodierbarkeit	++	++	o	o	o	o
	Verdichtungsneigung	-/+	-/+	o	o	-/+	-/+
Klima	Jahresniederschlag	+	-	-	o	o	++
	Jahresmitteltemperatur	++	+	+	o	o	-
Zukunftsaussicht		-	++	o	++	-	o
Standortbewertung		-	++	o	+	o	o

Tabelle 62: Vergleichende Gegenüberstellung aller Standorte.

Die einzelnen Parameter wurden in fünf Stufen bewertet: -- sehr schlecht/gering, - schlecht/gering, o mittel, + gut/hoch, ++ sehr gut/hoch. Die Farbgebung stellt die entsprechende Einschätzung dar: rot = sehr schlecht, orange = schlecht, gelb = mittel, hellgrün = gut, dunkelgrün = sehr gut. Die Verdichtungsneigung ist für feuchten (feu4) und trockenen (feu4) Zustand angegeben.

Die Bewertung der bodenhydrologischen Parameter und zum Schadpotential erfolgte auf Basis der Labordaten nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Für die Parameter Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur, Zukunftsaussicht und Standortbewertung erfolgte die Bewertung im direkten Vergleich der Standorte.

7.3 Kritische Betrachtung des Bodenfeuchtemonitoring

Bei der Standortauswahl wurden für Unterfranken charakteristische Naturräume in Abhängigkeit von Geologie, Bodentyp und Nutzung berücksichtigt. Zudem ist die Auswahl der Monitoringstandorte durch die projektbedingte Bindung an die Flächen der Projektpartner beeinflusst. Das führte letztendlich zu einer Standortauswahl, welche nicht alle Naturräume, wie z. B. den Spessart, abdeckt.

Der Versuchsaufbau mit mehreren Profilen in unterschiedlichen Geländepositionen pro Monitoringstandort hat sich bewährt. So konnten deutlich mehr unterschiedliche Böden beobachtet werden, was die Übertragbarkeit auf den Naturraum verbessert. Wegen der technischen Einschränkung auf nur drei Sensoren pro Profil wurden die Sensoren horizontweise und nicht in einheitlichen Tiefen eingebaut. Durch dieses Vorgehen ergibt sich ein besseres Bild der Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen. Besonders an Standorten mit sehr ähnlichen Profilen (Herchsheim, Uniwald, Oberrimbach Profile CO 1 und CO 2, Obbach Profile O 2 und O 3) kommt dieser Vorteil zum Tragen. Allerdings sind die Monitoringdaten durch den horizontweisen Einbau nicht direkt vergleichbar und der Versuchsaufbau macht deshalb eine Berücksichtigung aller Profildaten erforderlich. Bei anderen Versuchsaufbauten werden die Sensoren in der Regel in festen Tiefen verbaut (BECKER et al., 2019; BOGENA et al., 2010; GRAMS et al., 2021; ILLSTON et al., 2008). Befinden sich wie bei BOGENA et al. (2010) in allen Profilen die Sensoren in den gleichen Tiefen von z.B. 5 cm, 20 cm und 50 cm lassen sich die Bodenfeuchteverläufe direkt vergleichen, ohne genauere Kenntnis der Profildaten haben zu müssen. Dies ist insbesondere bei sehr vielen untersuchten Profilen, einer engmaschigen Untersuchung eines Standorts oder dem direkten Vergleich von Experiment- mit Kontrollplots wie im Kroof-Experiment wichtig und hilfreich (GRAMS et al., 2021).

Insgesamt gesehen, muss ein Bodenfeuchtemonitoring durch weitere Untersuchungen begleitet werden, um den Informationsgehalt der Monitoringdaten umfassend nutzen zu können. Aufbauend auf einer ausführlichen Profilaufnahme stellen Korngrößenanalyse und Trockenrohdichte das Minimum im Rahmen von Laboranalysen dar. Auf Basis dieser Laborwerte lassen sich zusätzliche Daten, wie die FK, nFK, LK, nFKWe und PWP aus Tabellen ableiten und berechnen (AD-HOC-AG BODEN, 2005; ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG, 2016; DEHNER et al., 2015; RENGER et al., 2009). Weiterhin ist es möglich, die Kornrohdichte und den Porenanteil zu bestimmen. Weitere wichtige Informationen stellen die hydraulische Leitfähigkeit und die pF-Kurve und damit FK, nFK und PWP dar. Die hydraulische Leitfähigkeit k_f und die pF-Kurve müssen wegen der Heterogenität der Böden aus einem Mittelwert ermittelt werden. Hierfür sind Mehrfachbeprobungen mit Stechzylindern nötig, deren Entnahme sich in den hier untersuchten Profilen z.T. als schwierig herausgestellt hat. Die Stechzylinder sollten am besten horizontal entnommen werden, um präferentielle Fließwege und Makroporen auszuschließen. Gleichzeitig ist

eine Beprobung bei durchgehenden Wurzeln und vielen Steinen in den Horizonten sehr schwierig bis unmöglich (z.B. Uniwald, Obbach). Die notwendigen Parallelmessungen von hydraulischer Leitfähigkeit k_f und pF -Kurve gestalten sich damit noch schwieriger. Auf der anderen Seite zeigt der Vergleich der Monitoringdaten mit den Tabellenwerten, dass FK, nFK und PWP von den Tabellen meist deutlich überschätzt wurden.

Alle Untersuchungsmethoden der Bodenfeuchte haben spezifische Vor- und Nachteile, die jedoch wechselseitig ausgeglichen werden können (RASHEED et al., 2022; VERECKEN et al., 2008). Das Monitoring hat eine sehr hohe zeitliche und vertikale Auflösung, liefert jedoch nur Punktdaten. Fernerkundliche Methoden haben eine große räumliche Auflösung, allerdings nur eine geringe zeitliche Auflösung (1 bis 12 Tage) und können nur oberflächennahe Daten liefern (BABAEIAN et al., 2019; MOHANTY et al., 2017). Modellierungen sind in der Lage, die Lücke zwischen den punktuellen Monitoring- und großräumigen Satellitendaten schließen, sind aber ebenso wie die Satellitendaten auf die Monitoringdaten zur Kalibrierung angewiesen (BOEING et al., 2022; ROBINSON et al., 2008; VERECKEN et al., 2016; ZINK, 2016; ZINK et al., 2017). Als Vergleich kann hier die Wettervorhersage herangezogen werden, die neben den Satellitenbildern auf den Daten der Wetterstationen basiert. Temperatur und Niederschlag werden in Unterfranken an 58 Wetterstationen von Deutschem Wetterdienst, Bayerischer Landesanstalt für Landwirtschaft und dem Weinbauring Franken e.V. gemessen (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2022a; DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023b; WEINBAURING FRANKEN E.V., 2023). Den 58 Wetterstationen stehen in Unterfranken nur 13 Bodenfeuchtemonitoringstationen gegenüber, wovon 6 im Zuge dieser Arbeit installiert worden sind (vgl. Tabelle 63). Bei der Verteilung der Monitoringstationen fällt auch die Fokussierung auf Wald und Weinberge auf (LWF und Weinbauring). Landwirtschaftliche Flächen wurden bisher ausschließlich in dieser Arbeit untersucht.

Gerade vor dem Hintergrund häufigerer Trockenperioden ist für Landwirte das Wissen zum Bodenfeuchteverlauf in der Tiefe und im Jahresgang auf unterschiedlichen landwirtschaftlichen Flächen essenziell, damit eine standort- und klimaangepasste Nutzung ermöglicht wird. Die einzigen regelmäßigen standortspezifischen Auswertungen werden für den Wald gemacht. Winzern und vor allem Landwirten stehen keine solch standortspezifischen Auswertung zur Verfügung, auf Basis derer sie ihre Betriebsentscheidungen treffen können. Vor allem, weil Winzer und Landwirte durch Bewässerung kurzfristig auf Trockenheit reagieren können.

Bodenfeuchtstationen Unterfranken			
	Standort	Nutzung	Betreiber
1	Bürgstadt	Weinberg	diese Arbeit
2	Herchsheim	Acker	
3	Obbach	Acker	
4	Oberriembach	Wald	
5	Uniwald	Wald	
6	Willmars	Wald	
7	Waldklimastation Würzburg	Wald	LWF
8	Castell	Weinberg	Weinbauring Franken e.V.
9	Eibelstadt	Weinberg	
10	Sand am Main	Weinberg	
11	Sommerach	Weinberg	
12	Himmelstad	Weinberg	LWG
13	Thüngersheim	Weinberg	

Tabelle 63:

Bodenfeuchtemonitoringstationen in Unterfranken mit öffentlich verfügbaren Daten.

Modellierte Werte stehen noch für 3 weitere Waldklimastationen der LWF zur Verfügung.

Quelle: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2023); WEINBAURING FRANKEN E.V. (2023); ZHUANG (2020).

Die Nutzung der Bodenfeuchtedaten in Unterfranken wird auch dadurch erschwert, dass die Daten nicht zentral abgerufen werden können. Die Integration der Daten z.B. in den Geoboxviewer der LfL wäre sinnvoll, insbesondere da die Wetterdaten der Weinbauring-Stationen hier bereits abrufbar sind. Im Geoboxviewer gibt es außerdem bereits ein tagesaktuelles Bodenfeuchtemodell (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023d). Weitere aktuelle und öffentlich zugänglichen Bodenfeuchteinformationen stellt der Dürremonitor Deutschland (HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ, 2023). Daneben stehen öffentlich nur Informationen zum Bodenwasserpotential (FK, nFK, nFKWe, etc.) im Umweltatlas Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2023) und im Hydrologischen Atlas von Deutschland (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, 2020) zur Verfügung. Um das Messnetz in Unterfranken auszubauen, wäre z.B. die Ausstattung der 31 LfL-Wetterstationen mit Bodenfeuchtesensoren eine kostengünstige Option (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2022a).

8 Auswirkungen von klimatischen Phasen auf die Bodenhydrologie

Über den Beobachtungszeitraum zeigte sich, dass alle Böden auch während der Dürre von 2018 bis 2020 im Winterhalbjahr die FK erreichten. Dies unterstreicht die zunehmende Bedeutung der Herbst- und Winterniederschläge für die Bodenfeuchte. Unabhängig von der Wasserspeicherkapazität sind regelmäßige Niederschläge im Frühjahr und Sommer entscheidend für hohe Bodenfeuchtwerte während der Vegetationsperiode. Die Beobachtungsdaten zeigen, dass auch in einem durchschnittlich niederschlagsreichen Jahr wie 2021 die Sommerniederschläge die Bodenfeuchte nur konstant halten konnten (vgl. Abbildung A1). Bleiben diese Frühjahrs- und Sommerniederschläge aus, kann die Bodenfeuchte bereits im Februar deutlich abnehmen und zu Beginn der Vegetationsperiode steht nicht die gesamte nFKWe zur Verfügung, um eine Trockenphase zu überbrücken.

Es existieren verschiedene Dürredefinitionen, so unterscheidet der DEUTSCHER WETTERDIENST (2023c) abhängig von ihrer Dauer meteorologische (1-2 Monate), landwirtschaftliche (> 2 Monate), hydrologische (> 4 Monate) und sozioökonomische Dürren (> 1 Jahr). Eine genaue Abgrenzung ist schwierig, da es einen fließenden Übergang gibt. So nimmt z.B. als Folge einer meteorologischen Dürre die Bodenfeuchte ab und kann zu einer landwirtschaftlichen Dürre werden (RIEDEL et al., 2021).

Sofern auch während zukünftiger Dürren im Winter immer die FK erreicht wird, bleibt die direkte Auswirkung einer langen Trockenphase auf ein hydrologisches Jahr (Nov-Okt) beschränkt. Dies wird vermutlich auch während der zukünftig häufiger und länger andauernden Dürrephasen der Fall sein. Dürren wie die von 2018 bis 2020 werden die neue Norm sein, wobei deren Dauer deutlich zunehmen wird (HARI et al., 2020; HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ, 2018; RAKOVEC et al., 2022; THOBER et al., 2018). Bei einem moderaten Emissionsszenario (rcp4.5) werden Dürren bis zum Jahr 2099 zwischen 25 und 60 Monaten, bei einem hohen Emissionsszenario (rcp8.5, Business-as-usual-Szenario) sogar bis zu 180 Monate andauern (RAKOVEC et al., 2022). Auch ohne ausgeprägte Dürren werden die Tage, an denen die nFKWe unter 30 % liegen und damit für die Pflanzen Trockenstress herrscht, bis 2050 um 10 bis 20 Tage zunehmen. Für den Zeitraum 2071 bis 2100 könnten nochmal 30 bis 40 Tage hinzukommen, sodass Regionen mit geringmächtigen Böden, wie der Steigerwald, auf über 100 Tage mit weniger als 30 % nFKWe kommen (KLIWA-AG GRUNDWASSER et al., 2012).

Mittelbar können sich Dürren jedoch nachhaltig auf die Bodenhydrologie auswirken. Wie in Kapitel 7.1 dargelegt, kann während langer Trockenheit und damit einhergehenden hohen Temperaturen die Hydrophobizität bestimmter Humusformen zunehmen und die Infiltration negativ

beeinflussen (BEISECKER et al., 2020; BUCZKO et al., 2005; DOERR & THOMAS, 2000; WALLIS et al., 1990; ZUBER, 2007). Langfristig kann dies zu einer Abnahme der maximalen FK, wie möglicherweise im Profil W 3 (s. Kapitel 6.1.6, Sensor 3.1), führen. Wird die FK immer später erreicht, geht die Sickerwasserrate, welche für die Grundwasserneubildung entscheidend ist, zurück (KLIWA-AG GRUNDWASSER et al., 2012). Die geringere Sickerwassermenge weist gleichzeitig höhere Nitratkonzentrationen auf (RIPPEL et al., 2002). Bei sinkendem Grundwasserspiegel kann die kapillare Steighöhe aus dem Grundwasser nicht mehr ausreichen, die Distanz zwischen Grundwasserspiegel und dem effektiven Wurzelraum zu überbrücken. Bei Verlust des Grundwasseranschlusses können die Böden nach Erschöpfen der nFK die Pflanzen dann nicht mehr über das Grundwasser mit Wasser versorgen (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Die Niederschläge im Frühjahr und Sommer werden vermehrt als Starkregeneignisse fallen, wodurch es zu vermehrter Verschlammung und Oberflächenabfluss kommen kann (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2017; DEUMELANDT et al., 2014; HELBIG et al., 2010; SCHÖNBEIN et al., 2020). Bei ungeschützter Bodenoberfläche kommt es durch den Niederschlag zu einer Krustenbildung und gleichzeitig wird Luft im Porenraum eingeschlossen. Infolgedessen nimmt die Infiltrationsrate deutlich ab und der Oberflächenabfluss führt zur Erosion des humusreichen Oberbodens (ALHASSOUN, 2009; BOHNE, 2005). Besonders bei geringer Vorfeuchte im Boden ist die Verschlammungsgefährdung hoch (BEISECKER et al., 2020). Werden die den Boden bedeckenden Pflanzen entfernt (v.a. Acker und Weinberg), ist der Boden vermehrter Erosion durch Wasser und Wind ausgesetzt (vgl. Abbildung 25 u. Abbildung 26).

Die humusreichen Horizonte weisen die höchsten FK und nFK sowie die höchsten Infiltrationsraten und hydraulischen Leitfähigkeiten auf. Nicht nur die Erosion in Folge von Starkregen setzt diese Werte herab, sondern auch hohe Lufttemperaturen welche höhere Bodentemperaturen zur Folge haben. Höhere Bodentemperaturen führen zu einem Abbau des organischen Kohlenstoffs, was wiederum zu einer Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit der Horizonte führt (KLOTZ, 2007). Nach HANGEN (2008) nimmt die nFK in Folge der Zehrung des Humus um 1 % um 1,4 Vol.-% ab. Abhängig von der Bodenart führt die Zunahme um 1 % Humus zu einer Zunahme der nFK um 3,7 Vol.-% bis 5,1 Vol.-% (HUDSON, 1994; LIBOHOVA et al., 2018).

Das zukünftige Klima in Unterfranken wird durch höhere Temperaturen im Sommer geprägt sein, was unmittelbar eine höhere Evapotranspiration zur Folge hat. Gleichzeitig werden die Niederschläge im Sommer nicht zunehmen und könnten sogar zurückgehen. Die intraanuelle Variabilität der Niederschläge wird aber zunehmen, sodass es sehr feuchte, aber auch sehr trockene Jahre geben wird. Der Jahresniederschlag wird insgesamt zunehmen, jedoch gehen die Prognosen von einer Zunahme der Winterniederschläge aus. Im Sommer kann mit einer Zunahme der

Starkregenereignisse und der Konzentration der Niederschläge auf weniger Tage gerechnet werden (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022a, 2022e; BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA), 2020; SCHÖNBEIN et al., 2020). Zusammenfassend wirken sich diese Klimaveränderungen auf unterschiedlichen Zeitskalen direkt und indirekt auf den Boden und das Bodenwasser aus. Direkt wirken sich der Anstieg der Evapotranspiration, längere Trockenphasen, Starkregenereignisse durch Verschlammung und Oberflächenabfluss und die Humuszehrung durch Abnahme der Wasserspeicherkapazität aus. Indirekt machen sich die Veränderungen der Vegetation durch eine Verlängerung der Vegetationszeit und der zwangsweise angepassten Landnutzung bemerkbar (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2022e; VÁRALLYAY, 2010).

9 Ausblick und Anpassungsmöglichkeiten

Die vorliegende Studie zeigt, dass die zukünftigen Klimabedingungen die unterfränkischen Böden nachhaltig prägen werden und enorme Stressfaktoren aufgebaut werden können. Besonders die Wasserspeicherfähigkeit der Böden wird bei zunehmender Trockenheit verstärkt in den Fokus rücken, wenn die unterfränkischen Landwirte, Winzer und Forstwirte weiterhin gute Erträge erwirtschaften wollen. Auch wenn die bodenhydrologischen Ausgangsbedingungen mancher Bodentypen besser als die anderer sind, kann durch gezielte Anpassungsmaßnahmen die Bodenhydrologie aller Bodentypen wirksam auf das zukünftige Klima vorbereitet werden.

Damit die klimaadaptiven Maßnahmen gelingen können, müssen auf öffentlicher und institutioneller Ebene Informationen und Daten zum Bodenwasser sowohl zeitlich als auch räumlich hoch aufgelöst erhoben, ausgewertet, aufbereitet und bereitgestellt werden. Hier sind alle beteiligten Ministerien und Ämter sowie die Forschungseinrichtungen des Bundes, der Länder und die Universitäten gefordert. Um die Landwirte, Winzer und Forstwirte bei ihren Anpassungsmaßnahmen zu unterstützen wäre ein gebündelter Transfer von Informationen und Daten in nutzerfreundlicher Art wünschenswert. Wie bereits in Kapitel 7.3 erwähnt, sind die verfügbaren Informationsangebote zur Bodenfeuchte nicht zentral abrufbar und verständlich aufbereitet. Hierfür böte sich z.B. der GeoBox-Viewer der BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023d) als etabliertes nutzerspezifisches Informationsportal an. Die verfügbaren Bodenfeuchtemonitoringdaten von LWF, LWG, Weinbauring Franken e.V. und der Universität Würzburg wären in Echtzeit zugänglich. Zusätzlich könnten die verschiedenen Bodenfeuchtemodellierungen, wie z.B. das LWF-Brook90-Modell (WEIS et al., 2015; WEIS et al., 2022), der Dürremonitor Deutschland (HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ, 2023) oder der Bodenfeuchteviewer des DEUTSCHER WETTERDIENST (2023a) integriert und um nutzerspezifische Erläuterungen (z.B. zu den Modellunterschieden) erweitert werden. Für den Bodenschutz könnte der Erosionsatlas Bayern (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2023c) und das EUSO Soil Health Dashboard (EUROPEAN SOIL DATA CENTRE, 2023) integriert werden.

Ausgestattet mit den nötigen Informationen können die Landwirte, Winzer und Forstwirte die Bodenwasserspeicherkapazität durch aktive Maßnahmen fördern. Bodenwasser und Bodenschutz gehen in der Praxis Hand in Hand. Soll z.B. die Infiltration erhöht werden, wirkt sich das auch positiv auf die Erodierbarkeit der Böden aus und umgekehrt wirkt sich Erosionsschutz positiv auf den Bodenwasserhaushalt aus (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2021). Um möglichst viel Bodenwasser in der Vegetationszeit nutzen zu können, muss die Verdunstung verringert, die Infiltration erhöht und die Wasserspeicherkapazität ausgebaut werden. Die Verdunstung kann durch Windschutz und Beschattung reduziert werden. Wirksame Mittel hierfür

sind die Anlage von Hecken und Bäumen und der Anbau von Zwischenfrüchten (BRAND-SASSEN, 2004; BRÄUNIG & KLÖCKING, 2008; DEUMELANDT et al., 2014). Besonders auf den offenen Mainfränkischen Platten ist dies auch ein wirksamer Schutz gegen Winderosion (vgl. Abbildung 26 für fehlenden Schutz).

Um die Infiltration zu verbessern, kann der Porenraum des Bodens erhöht und die Verschlämmung verhindert werden. Durch Humusaufbau und eine veränderte Landnutzung lassen sich beide Ziele wirksam verbinden. Eine Humuszunahme führt zu mehr Mikro- und Makroporen durch eine geringere Trockenrohdichte, eine höhere Aggregatstabilität und mehr Bodenfauna (z.B. Regenwürmer). Besonders die Makroporen sind für die Infiltration des ungesättigten Bodens entscheidend (BOT & BENITES, 2005; SANDERS & HEß, 2019). Neben Grabgängen von Regenwürmern können auch tiefwurzelnde Pflanzen tiefreichende Makroporen bilden, die für die Infiltration in die Tiefe wichtig sind (WILLIAMS et al., 2017). Gleichzeitig sollte für eine möglichst ganzjährige Bedeckung des Bodens mit organischer Masse in Form von Zwischenfrüchten oder Mulch gesorgt werden, um die Bodenaggregate vor den Regentropfen zu schützen und die Verschlämmung und Verkrustung der Bodenoberfläche zu verhindern (ALHASSOUN, 2009; BOT & BENITES, 2005; BRAND-SASSEN, 2004). Bei geschützter Bodenoberfläche ist der Oberflächenabfluss und damit auch die Erosion geringer, was wiederum der Infiltration und der Bodenwasserspeicherkapazität zugutekommt (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2017). Im Maisanbau kann durch Zwischenfrüchte die Bodenerosion um bis zu 36 % gesenkt werden (BRAND-SASSEN, 2004). Der Oberflächenabfluss kann zusätzlich z.B. durch die Bewirtschaftung quer zum Hang, Begrünung von Hangmulden und die Anlage von Gehölzstreifen (z.B. Agroforst oder Keyline-Prinzip) weiter reduziert werden (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT, 2019b; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2021). Auch bei der Bearbeitung mit schweren Maschinen wird die Infiltration durch die Bildung einer Pflugsohle und eines Verdichtungshorizonts reduziert. Durch den Einsatz leichterer Maschinen und die pfluglose Bearbeitung kann dies verhindert bzw. reduziert werden (FIENER & WILKEN, 2021; VAN DER PLOEG et al., 2006). Schlussendlich müssen auch oberirdische Wasserspeicher angelegt werden, um bei Bedarf bestimmte Kulturen bewässern zu können und dabei nicht auf Grundwasser angewiesen zu sein. Erste Pilotprojekte hierzu wurden bereits 2016 in Thüngersheim umgesetzt (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WEINBAU UND GARTENBAU, 2016).

Unter dem Eindruck der zunehmend spürbar werdenden Klimakrise und der – noch – wenig beachteten Biodiversitätskrise (HALLMANN et al., 2017; VAN KLINK et al., 2020) finden die Böden mehr Beachtung. Auf EU-Ebene spiegelt sich dies z.B. in der „EU-Bodenstrategie für 2030“ wieder (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2021). In der breiten Öffentlichkeit werden Böden aktuell v.a. wegen ihres CO₂-Senkenpotentials wahrgenommen. Das Bodenwasser rückt während sommerlicher Dürren wie

2018 bis 2020 und 2022 stärker in den Fokus der Berichterstattung. Im Nachgang der Überschwemmungen im Ahr-Tal wurde aber auch die Speicherfunktion der Böden einer breiteren Öffentlichkeit bekannt (SÜDWESTRUNDFUNK, 2021; WEIDINGER, 2022). Den Böden und somit auch dem Bodenwasser kommt zugute, dass sich Bodenschutz- und Anpassungsmaßnahmen in ihrer Wirkung nicht nur auf eine Bodenfunktion beschränken und mittelbar die Böden in ihrer Gesamtheit profitieren. Die Böden bieten ein großes Potential, einerseits die kurzfristigen direkten Auswirkungen des Klimawandels (z.B. Starkregen) abzumildern und gleichzeitig durch gezielte Anpassung die Lebensgrundlage vieler Menschen langfristig zu sichern. Anders als z.B. Infrastrukturprojekte haben auf die Böden und das Bodenwasser ausgerichtete Anpassungsmaßnahmen den großen Vorteil, dass sie vor Ort mit vergleichsweise einfachen Mitteln umgesetzt werden können und ihre Wirkung unmittelbar vor Ort entfalten. Hier setzen z.B. mit „REKLINEU“ und „MainPro“ zwei aktuelle Forschungsprojekte der Universität Würzburg an und unterstützen lokale Anpassungsmaßnahme durch Wissenstransfer (JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG, 2023b; TERHORST, 2023).

Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland. Hannover.
- AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN DER DDR (1985): Physikalische Bodenuntersuchung - Bodenfeuchte und Bodenfeuchtekenwerte. TGL 31222/04.
- ALHASSOUN, R. (2009): *Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils*. Dissertation, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Braunschweig.
- AMELUNG, W., BLUME, H.-P., FLEIGE, H., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., et al. (2018): *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (17. überarbeitete und ergänzte Aufl.). Springer Spektrum. Berlin. (<https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>).
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG (2016): *Forstliche Standortsaufnahme* (7. Aufl.). Eching.
- BABAEIAN, E., SADEGHI, M., JONES, S. B., MONTZKA, C., VEREECKEN, H., & TULLER, M. (2019): Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. *Reviews of Geophysics*, Vol. 57(2), S. 530-616 (<https://doi.org/10.1029/2018rg000618>).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2017): *Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten. Beobachtungen und Analysen im Mai/Juni 2016*. Freising-Weihenstephan.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2019a): Böden und ihre Nutzung - Parabraunerde aus Löss. URL: https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/nutzung/034149/Boeden_und_ihre_Nutzung_Druckversion.pdf (zuletzt abgerufen am 23.06.2022).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2019b): *Bodenerosion - Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung - ABAG - Hilfsmittel und Handlungsempfehlung* (Lfl-Information). Freising-Weihenstephan.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2021a): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Bürgstadt 1990-2020*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 28.06.2021).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2021b): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Kleingressingen 1991-2020*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 29.06.2021).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022a): *Agrarmeteorologie Bayern*. URL: <https://www.wetter-by.de>
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022b): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Ebertshausen 2000-2022*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 19.01.2022).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022c): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Ettleben 1990-2021*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 19.01.2022).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2022d): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Kleingressingen 1991-2022*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 29.06.2021).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023a): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Bürgstadt 1990-2022*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 28.06.2021).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023b): *Agrarmeteorologie Bayern. Wetterstation Euerhausen 1990-2022*. URL: <https://www.wetter-by.de> (abgerufen am 29.06.2021).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023c): *Erosionsatlas Bayern*. URL: <https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/029288/> (zuletzt abgerufen am 25.02.2023).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2023d): *GeoBox-Viewer*. URL: <https://geobox-i.de/GBV-BY-Wetter/> (zuletzt abgerufen am 26.02.2023).
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2012): *Bayerische Waldklimastation Würzburg (Flyer)*. Freising.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2023): *Bayerischen Waldklimastationen (WKS)*. URL: <https://www.lwf.bayern.de/boden-klima/umweltmonitoring/145089/index.php>; <https://www.fovgis.bayern.de/wks/> (zuletzt abgerufen am 05.02.2023).

- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WEINBAU UND GARTENBAU (2016): Dezentrale Bewässerung fränkischer Weinberge. URL: <https://www.lwg.bayern.de/weinbau/138930/index.php> (zuletzt abgerufen am 02.03.2023).
- BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (2015): *Klimaschutzprogramm Bayern 2050*. München.
- BAYERISCHE STAATSREGIERUNG (2016): *Bayerische Klima-Anpassungsstrategie*. München.
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2018): *ALKIS-Verwaltungsgebiete*. URL: <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=verwaltung> (abgerufen am 24.04.2023).
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023a): *ATKIS Basis-DLM* [Shapefile]. URL: https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=atkis_basis_dlm (abgerufen am 24.04.2023).
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023b): *Digitale Topographische Karte 1:25.000 (DTK)*. München. URL: <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=dtk25> (abgerufen am 24.04.2023).
- BAYERISCHE VERMESSUNGSVERWALTUNG (2023c): *Digitales Geländemodell 1m (DGM1)*. URL: <https://geodaten.bayern.de/opengeodata/OpenDataDetail.html?pn=dgm1> (abgerufen am 24.04.2023).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1991): *Geologische Karte 1:100.000 Naturpark Steigerwald - Kurzerläuterung*. München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1993): *Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Main - Hydrogeologie*. München. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl_geo.htm,APGxNODENR:276915,AARTxNR:93009,AARTxNODENR:278536,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl_geo.htm,APGxNODENR:276915,AARTxNR:93009,AARTxNODENR:278536,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996a): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000* (4. neubearbeitete Aufl.). München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT (1996b): *Geologische Karte von Bayern 1:500.000*. München.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE (2022a): *Bodendenkmal D-6-5928-0099*. Bayerischer Denkmal-Atlas. München. URL: <https://geoportal.bayern.de/denkmalatlas/searchResult.html?objtyp=boden&koid=889308#>
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE (2022b): *Bodendenkmal D-6-6325-0021*. Bayerischer Denkmal-Atlas. München. URL: <https://geoportal.bayern.de/denkmalatlas/searchResult.html?objtyp=boden&koid=88893#>
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE (2022c): *Bodendenkmal D-6-6325-0290*. Bayerischer Denkmal-Atlas. München. URL: <https://geoportal.bayern.de/denkmalatlas/searchResult.html?objtyp=boden&koid=977089#>
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2007): *Hydrogeologischer Teilraum Keuper-Bergland. Karte der hydrogeologischen Teilräume 1:2.000.000*. Augsburg.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2012): *Der Klimawandel in Bayern - Regionalbericht Unterer Main*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=2009455218&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,AARTxNR:lfu_klima_00091,USERxZUORDARTIKEL:artdtl.htm,USERxAPGNODE:1325,USERxAARTNR:lfu_klima_00082\)=Z](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=2009455218&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,AARTxNR:lfu_klima_00091,USERxZUORDARTIKEL:artdtl.htm,USERxAPGNODE:1325,USERxAARTNR:lfu_klima_00082)=Z).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2016): *Verzeichnis der Bach- und Flussgebiete in Bayern - Flussgebiet Main*. Augsburg.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2018a): *Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Bayern 1981-2010. Karten zur Wasserwirtschaft*. Augsburg.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2018b): *Naturräumliche Gliederung Bayerns* [Shapefile]. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/naturraeume/index.htm> (abgerufen am 14.05.2019).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2019): *Kirchheimer Quaderkalk - Naturwerkstein-Potenziale im Oberen Muschelkalk* (Umwelt Spezial). Augsburg. URL:

- [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:203258,AARTxNR:93035,AARTxNODENR:355956,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:203258,AARTxNR:93035,AARTxNODENR:355956,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2020): *Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 (dGK25)* [Shapefile]. Augsburg. (abgerufen am 06.03.2023).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021a): *Entwicklung der Grundwassersituation in Bayern*. URL: https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwassersituation_bayern/index.htm (zuletzt abgerufen am 12.08.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021b): *Klima-Faktenblätter Bayern und Mainregion - Klima der Vergangenheit und Zukunft*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00188,AARTxNODENR:358799,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00188,AARTxNODENR:358799,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021c): *Klima-Faktenblätter Bayern und Spessart-Rhön - Klima der Vergangenheit und Zukunft*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_klima_00192%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_klima_00192%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021d): *Normtschernosem Objekt-ID 6325AB015010*. URL: https://www.umweltatlas.bayern.de/mapapps/resources/apps/lfu_boden_ftz/index.html?lang=de&activeTool=locationInformationTool (zuletzt abgerufen am 22.06.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2021e): *Schwarzerde in Bayern - Extrem seltener schwarzer Ackerboden bei Würzburg*. URL: https://www.lfu.bayern.de/boden/zentrales_geoarchiv/bodenprofilsammlung/schwarzerde/index.htm (zuletzt abgerufen am 24.06.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022a): *Bayerns Klima im Wandel - Klimaregion Mainregion*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_klima_00178%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_klima_00178%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022b): *Bayerns Klima im Wandel - Klimaregion Spessart-Rhön*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu_klima_00183%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_klima_00183%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022c): *Gewässerkundlicher Jahresbericht 2021*. URL: https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserkundlicher_jahresbericht_2021/index.htm (zuletzt abgerufen am 05.01.2023).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022d): *Kirchheimer Quaderkalk II - Neue Natursteinwerk-Potenziale im Oberen Muschelkalk* (Umwelt Spezial). Augsburg.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022e): *Klima-Steckbrief Unterfranken. Auswirkungen des Klimawandels und Betroffenheit von Kommunen*. Augsburg. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00207,AARTxNODENR:365872,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:lfu_klima_00207,AARTxNODENR:365872,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022f): *Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Bürgstadter Berg*. URL: https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=521481.92192003585%2C5506978.987604964&extent=517296.99252003554%2C5505029.842404963%2C525666.8513200361%2C5508928.132804964&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=Lfu-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.Erdwaermeso

[ndenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=B%C3%BCrgstadt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A102.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F102.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=569074.4341581272%2C5498949.245553218&extent=568787.6681581272%2C5498827.370003218%2C569361.2001581271%2C5499071.121103218&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=B%C3%BCrgstadt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A102.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F102.0) (zuletzt abgerufen am 10.10.2022).

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022g): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Herchsheim. URL:

[https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=569074.4341581272%2C5498949.245553218&extent=568787.6681581272%2C5498827.370003218%2C569361.2001581271%2C5499071.121103218&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Giebelstadt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=569074.4341581272%2C5498949.245553218&extent=568787.6681581272%2C5498827.370003218%2C569361.2001581271%2C5499071.121103218&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Giebelstadt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 22.06.2022).

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022h): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Oberrimbach CO 1. URL:

[https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=607343.5030947074%2C5509638.25231624&extent=605251.0383947074%2C5508663.679716241%2C609435.9677947074%2C5510612.82491624&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Burghaslach&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=607343.5030947074%2C5509638.25231624&extent=605251.0383947074%2C5508663.679716241%2C609435.9677947074%2C5510612.82491624&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Burghaslach&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 02.08.2022).

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022i): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Oberrimbach CO 3. URL:

[https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=607305.284561374%2C5509355.19630374&extent=606259.052211374%2C5508867.91000374%2C608351.5169113739%2C5509842.48260374&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Burghaslach&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=607305.284561374%2C5509355.19630374&extent=606259.052211374%2C5508867.91000374%2C608351.5169113739%2C5509842.48260374&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Burghaslach&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 02.08.2022).

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022j): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Sailershausen. URL:

[https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=602469.5977555579%2C5547375.826552835&extent=602182.8317555579%2C5547253.951002835%2C602756.3637555578%2C5547497.702102835&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Ha%C3%9Ffurt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=602469.5977555579%2C5547375.826552835&extent=602182.8317555579%2C5547253.951002835%2C602756.3637555578%2C5547497.702102835&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Ha%C3%9Ffurt&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 03.06.2022).

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022k): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Willmars W 1. URL:

https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585300.487374105%2C5594961.482573886&extent=583208.022674105%2C55939

- [86.909973887%2C587392.952074105%2C5595936.055173886&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585450.972849105%2C5595016.421715553&extent=583358.508149105%2C5594041.849115553%2C587543.437549105%2C5595990.9943155525&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 10.08.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022l): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Willmars W 2. URL: [https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585450.972849105%2C5595016.421715553&extent=583358.508149105%2C5594041.849115553%2C587543.437549105%2C5595990.9943155525&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585450.972849105%2C5595016.421715553&extent=583358.508149105%2C5594041.849115553%2C587543.437549105%2C5595990.9943155525&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 10.08.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2022m): Umweltatlas Bayern - Standortauskunft Bodenkundliche Bewertung Willmars W 3. URL: [https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585656.3974657718%2C5595166.907190553&extent=583563.9327657718%2C5594192.334590553%2C587748.8621657718%2C5596141.4797905525&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20\(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0\)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0](https://www.umweltatlas.bayern.de/standortauskunft/rest/reporting/sta_boden/generate?location=585656.3974657718%2C5595166.907190553&extent=583563.9327657718%2C5594192.334590553%2C587748.8621657718%2C5596141.4797905525&srs=25832&reportAuthor=Landesamt%20f%C3%BCr%20Umwelt%20Bayern&format=pdf&application=LfU-WebGIS&reportingParameterClass=de.conterra.reporting.reports.geothermie.ErdwaermesondenReportParameterInitializer&reportTitle=Bodenkundliche%20Bewertung&reportType=Bodenkundliche%20Bewertung&placename=Nordheim%20v.d.Rh%C3%B6n&platform=Win32&userAgent=Mozilla%2F5.0%20(Windows%20NT%2010.0%3B%20Win64%3B%20x64%3B%20rv%3A91.0)%20Gecko%2F20100101%20Firefox%2F91.0) (zuletzt abgerufen am 10.08.2022).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2023): UmweltAtlas Bayern. URL: <https://www.umweltatlas.bayern.de/> (zuletzt abgerufen am 05.05.2023).
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (o.J.): Karte der Naturraum-Haupteinheiten und Naturraumeinheiten in Bayern. Augsburg.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2023a): Bayerischer Agrarbericht 2022. URL: <https://www.agrarbericht.bayern.de/> (zuletzt abgerufen am 14.03.2023).
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2023b): Integriertes Bayerisches Landwirtschaftliches Informations-System (iBALIS). URL: www.ibalis.bayern.de (zuletzt abgerufen am 03.05.2023).
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2021): *Klima-Report Bayern 2021. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten*. München. URL: [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:stmuv_klima_012,AARTxNODENR:358070,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000002?SID=334064428&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:stmuv_klima_012,AARTxNODENR:358070,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X).
- BECHER, H. H. (2004): Kapitel 2.6.2.3 Wasserbindung und Porengrößenverteilung. In: BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., & STAHR, K. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde*. Weinheim. (<https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk2008004>).
- BECKER, J. N., HUGHES, H. J., GROTHEER, J., ZEPPENFELD, T., & SAUER, D. (2019): *The Ebergoetzen Measurment Site: Linking Biogeochemical Cycles and Soil Development in a Central European Beech Forest*. EGU General Assembly 2019, Wien.
- BEISECKER, R., DIEBELBERG, F., HANNAPPEL, S., SEITH, T., SENONER, F., STROM, A., & ZETTL, E. (2020): *Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und*

Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse (UMWELTBUNDESAMT, Texte, Vol. 63). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

- BLANCKENHORN, M. (1910a): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten Blatt Ostheim v.d. Rhön*. Königlich Preußische Geologische Landesanstalt. Berlin.
- BLANCKENHORN, M. (1910b): *Historische Geologische Karte 1:25.000 5527 Ostheim (alte Nummer 6936)*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., et al. (2010): *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Aufl.). Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. (<https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2251-4>).
- BLUME, H.-P., STAHR, K., & LEINWEBER, P. (2011): *Bodenkundliches Praktikum*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. (<https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2733-5>).
- BOEING, F., RAKOVEC, O., KUMAR, R., SAMANIEGO, L., SCHRÖN, M., HILDEBRANDT, A., et al. (2022): High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 26(19), S. 5137-5161 (<https://doi.org/10.5194/hess-26-5137-2022>).
- BOGENA, H. R., HUISMAN, J. A., WEUTHEN, A., & VERECKEN, H. (2010): *Analysis of spationtemporal soil moisture patterns at the catchment scale using a wireless sensor network*. EGU General Assembly 2010, Wien.
- BOHNE, K. (2004): Kapitel 2.6.2.4 Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens. In: BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., & STAHR, K. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde*. (<https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1998002>).
- BOHNE, K. (2005): *An Introduction into Applied Soil Hydrology* (Lecture Notes in GeoEcology). Catena Verlag. Reiskirchen. URL: http://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510653904/Bohne_An_Introduction_into_Appl_Soil_H.
- BOT, A., & BENITES, J. (2005): *The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food and production* (FAO Soils Bulletin, Vol. 80). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rom. URL: https://soilhealth.ucdavis.edu/application/files/2115/4222/0652/FAO_importance_of_SOM.pdf.
- BRAND-SASSEN, H. (2004): *Bodenschutz in der deutschen Landwirtschaft - Stand und Verbesserungsmöglichkeiten*. Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.
- BRASSEUR, G. P., JACOB, D., & SCHUCK-ZÖLLER, S. (Hrsg.) (2017): *Klimawandel in Deutschland*. Heidelberg. (<https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3>).
- BRÄUNIG, A., & KLÖCKING, B. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt in Sachsen. *Marktedwitzer Bodenschutztage Tagungsband 5 "Boden und Klima im Wandel*, S. 42-47.
- BÜCKING, H. (1889): *Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten Blatt Helmershausen*. Berlin.
- BÜCKING, H., & WAGNER, W. (2022): *Digitale Geologische Karte von Thüringen 1:25.000 Blatt 5426 Hilders*. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Weimar.
- BUCZKO, U., BENS, O., & HÜTTL, R. F. (2005): Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma*, Vol. 126(3), S. 317-336 (<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.10.003>).
- BULLMANN, H. (2011): *Eigenschaften und Genese periglazialer Deckschichten auf Carbonatgesteinen des Muschelkalks in einem Teilgebiet der ostthüringischen Triaslandschaft*. Dissertation, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig. Leipzig. (<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa-67899>).

- BULLMANN, H., & HEINRICH, J. (2013): Sensitivity of frost weathering and aeolian deposition during genesis of Late Quaternary periglacial slope covers on calcareous rocks of a Muschelkalk landscape, eastern Thuringian Basin, Germany. *Catena*, Vol. 103, S. 74-86 (<https://10.1016/j.catena.2012.01.011>).
- BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (2020): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft - Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder*. München. URL: https://www.lawa.de/documents/lawa-klimawandel-bericht_2020_1618816705.pdf.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2017): *Digitales Landschaftsmodell 1:250.000 (DLM250)*. Leipzig. URL: <https://www.geoportal.de/Info/fe53b281-fc8c-4f42-bee5-dc1d27acc2b0> (abgerufen am 24.04.2023).
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2020): *Verwaltungsgebiete 1:1.000.000 (VG1000)*. Leipzig. URL: <https://www.geoportal.de/Info/100c1dc0-3e0b-4a71-ad79-a060966d927a> (abgerufen am 24.04.2023).
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2023): Geoportal.de. URL: <https://www.geoportal.de/> (zuletzt abgerufen am 29.03.2023).
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2005): *Soil Regions of the European Union and Adjacent Countries 1:5.000.000 (Version 2.0)*. Hannover.
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2008a): *Bodengroßlandschaften von Deutschland 1:5.000.000*. Hannover. URL: <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Produkte/Karten/Downloads/BGL5000.pdf?blob=publicationFile&v=3> (abgerufen am 28.09.2022)
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2008b): *Gruppen der Bodenausgangsgesteine in Deutschland 1:5.000.000 (BAG500)*. Hannover. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche_Karten_Datenbanken/Themenkarten/BAG5000/bag5000_node.html (abgerufen am 28.09.2022)
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2010): *Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:200.000 Bayern (WMS)*. Hannover. URL: <https://services.bgr.de/wms/boden/buek200/> (abgerufen am 03.04.2023)
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (o.J.): *Hydrogeologische Großräume und Räume in Deutschland*. URL: www.bgr.bund.de/hyraum (abgerufen am 05.02.2018)
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2020): *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. URL: https://www.bafig.de/DE/05_Wissen/01_InfoSys/HAD-Seite/HAD.html
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV) (2022): *Deutsches Klimavorsorgeportal KLIVO*. URL: https://www.klivoportal.de/DE/Home/home_node.html (zuletzt abgerufen am 10.03.2023).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV) (2023): *Nationale Wasserstrategie*. Berlin. URL: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/BMUV_Wasserstrategie_bf.pdf.
- BUNDESREGIERUNG (2008): *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Berlin. URL: <https://www.bmu.de/download/deutsche-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel>.
- BUNDESREGIERUNG (2021): *Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Berlin. URL: <https://www.bmu.de/download/zweiter-fortschrittsbericht-zur-deutschen-anpassungsstrategie-an-den-klimawandel>.
- BÜTTNER, G. (1989a): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5928 Obertheres*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- BÜTTNER, G. (1989b): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Erläuterungen zum Blatt Nr. 5928 Obertheres*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- BÜTTNER, G. (2022): *Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5928 Obertheres*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dGK25_5928_obertheres.pdf

- BÜTTNER, G., PAMER, R., & WAGNER, B. (2003): *Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern* (BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, GLA-Fachbericht, Vol. 20). München.
- DEHNER, U., RENGER, M., BRÄUNIG, A., LAMPARTER, A., BAURIEGEL, A., BURBAUM, B., et al. (2015): *Neue Kennwerte für die Wasserbindung in Böden - Ergebnisse der Abstimmung zwischen dem Personenkreis Wasserhaushaltstabellen der Ad-hoc-AG Boden und dem DWA*. Jahrestagung der DBG 2015 "Unsere Böden - Unser Leben", München.
- DEKKER, L. W., & RITSEMA, C. J. (1994): How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, Vol. 30(9), S. 2507-2517 (<https://doi.org/10.1029/94wr00749>).
- DEUMELANDT, P., KASIMIR, M., STEININGER, M., & WURBS, D. (2014): *Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Lokale Kooperation zwischen Landwirten und Gemeinden sowie weiteren Akteuren zur Vermeidung von Bodenerosion*. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg. URL: https://lvwa.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/LVWA/LVwA/Dokumente/4_landwirtschaftumwelt/4kke/Klikominfo_Webseite/14_berat-leitfaden_bo-erosion_sturzflut.pdf
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2023a): Bodenfeuchteviewer. URL: https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/5_bofeuvew/node.html (zuletzt abgerufen am 26.02.2023).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2023b): Climate Data Center (CDC). URL: <https://cdc.dwd.de/portal/> (zuletzt abgerufen am 13.03.2023).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2023c): Wetter- und Klimalexikon. URL: <https://www.dwd.de/lexikon;> <http://www.wetterlexikon.eu/> (zuletzt abgerufen am 04.04.2023).
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1996): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Massebasis. DIN ISO 11465. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1997): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Carbonatgehaltes - Volumetrisches Verfahren. DIN ISO 10693. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2000): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glührückstandes und des Glührückstandes. DIN 19684-3. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2001): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohddichte. DIN ISO 11272. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2002): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation. DIN ISO 11277. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2003): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben. DIN 19683-9: 1998-05. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2005): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes. DIN ISO 10390. Berlin.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2007): Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrimeter. DIN 19682-7. Berlin.
- DISSE, M., ALCAMO, L., & TARANTIK, M. (2022): STUDIO - Steigerwald-Untersuchungsgebiet: Vorhersage- und Managementsystem zur Bewältigung von Dürreperioden in Franken. URL: <https://www.cee.ed.tum.de/hydrologie/forschung/abgeschlossene-projekte/studio/> (zuletzt abgerufen am 30.03.2023).
- DOERR, S. H., & THOMAS, A. D. (2000): The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, Vol. 231-232, S. 134-147 ([https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00190-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00190-6)).
- DORIGO, W. A., WAGNER, W., HOHENSINN, R., HAHN, S., PAULIK, C., XAVER, A., et al. (2011): The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture

- measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15(5), S. 1675-1698 (<https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2021): *Historische monatliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland*, Version v21.3. Offenbach. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/monthly/more_precip/historical/ (abgerufen am 12.12.2022).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2022a): *Aktuelle monatliche Niederschlagsbeobachtungen für Deutschland*. Offenbach. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/monthly/more_precip/recent/ (abgerufen am 12.12.2022).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2022b): *Station 1636 - Giebelstadt*. URL: <https://cdc.dwd.de/rest/metadata/station/html/812301005322> (abgerufen am 25.07.2022).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2022c): *Vieljährige Stationsmittelwerte für die Referenzperiode 1981-2010*. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/multiannual/mean_81-10/ (abgerufen am 25.07.2022).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2022d): *Vieljährige Stationsmittelwerte für die Referenzperiode 1991-2020*. URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/multiannual/mean_91-20/ (abgerufen am 25.07.2022).
- DWD CLIMATE DATA CENTER (2022e): *Vieljährige Stationsmittelwerte für die Referenzperiode 1991-2020, für aktuellen Standort und Bezugsstandort, Version V0.x, 2022*.
- EIJKELKAMP SOIL & WATER. (2017): *Labor Permeameter Gebrauchsanweisung (M-0912E)*. Giesbeck. URL: <https://de.eijkelkamp.com/produkte/laborger-te/bodenwasser-permeameter.html>.
- EIJKELKAMP SOIL & WATER. (2018): *Doppelring-Infiltrometer (M-0904D)*. Giesbeck
- EITZINGER, J., KERSEBAUM, K. C., & FORMAYER, H. (2009): *Landwirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa* (1. Aufl.). Agrimedia. Clenze.
- ELLENBERG, J., SCHRÖDER, B., & BÜCKING, H. (2022): *Digitale Geologische Karte von Thüringen 1:25.000 Blatt 5427 Helmershausen*. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Weimar.
- EMMERT, U. (1964): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 6228 Wiesentheid*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- EMMERT, U. (1965): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 6228 Wiesentheid*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- EMMERT, U. (2022): *Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 6228 Wiesentheid*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dGK25_6228_wiesentheid.pdf
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2021): *EU-Bodenstrategie für 2030. Die Vorteile gesunder Böden für Menschen, Lebensmittel, Natur und Klima nutzen*. Brüssel.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2019): *Der Boden und die Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen*. Kopenhagen. URL: https://www.eea.europa.eu/de/ds_resolveuid/INF-119-de.
- EUROPEAN SOIL DATA CENTRE (2023): *EUSO Soil Health Dashboard*. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/> (zuletzt abgerufen am 21.02.2023).
- EXPERTENKOMMISSION WASSERVERSORGUNG IN BAYERN (2021): *LAND: schaff(f)t: Wasser*. München. URL: <https://www.stmuv.bayern.de/aktuell/presse/pressemitteilung.htm?PMNr=174/21>.
- FÄTH, J., KUNZ, J., & KNEISEL, C. (2022): *Monitoring spatiotemporal soil moisture changes in the subsurface of forest sites using electrical resistivity tomography (ERT)*. *Journal of Forestry Research*, Vol. 33 (<https://doi.org/10.1007/s11676-022-01498-x>).

- FIENER, P., & WILKEN, F. (2021): Bodenerosion in Mitteleuropa - Auswirkungen des Klima- und Landmanagementwandels. In: LOZÁN, J. L., BRECKLE, S.-W., GRAßL, H., & KASANG, D. (Hrsg.), Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. S. 94-100. Hamburg. (<https://doi.org/10.25592/uhhfdm.9928>).
- FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH (2023): Wasser-Monitor für Deutschland und die Region. URL: <https://wasser-monitor.de/> (zuletzt abgerufen am 26.02.2023).
- FREUDENBERGER, W. (1997): *Geologische Karte von Bayern 1:25000 Erläuterungen zum Blatt Nr. 6425 Röttingen*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- FRIEDLEIN, V. (2022a): Digitale Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000 Blatt 5527 Mellrichstadt. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dgk25_5527_mellrichstadt.pdf
- FRIEDLEIN, V. (2022b): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5426 Hilders. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dgk25_5426_hilders.pdf
- FRITZ, T. (2016): Eßfeld nach dem Unwetter: Das vergessene Dorf. *Mainpost*. URL: <https://www.mainpost.de/regional/wuerzburg/essfeld-nach-dem-unwetter-das-vergessene-dorf-art-9249973>
- FRITZ, T. (2021): Gewitterzelle: Starkregen flutet Reichenberg in einer halben Stunde. *Mainpost*. URL: <https://www.mainpost.de/regional/wuerzburg/ueberschwemmung-in-reichenberg-feuerwehr-kaempft-erneut-gegen-die-fluten-art-10631525>
- GEIGER, K. (1985): Weinbau in Franken aus ökologischer Sicht. In: BOTSCH, H.-J. (Hrsg.), Die Weinberge Frankens, Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Vol. 62, S. 23-32. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. München.
- GEYER, G. (2002): *Geologie von Unterfranken und angrenzenden Regionen*. Gotha.
- GEYER, G. (2022): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5427 Helmershausen. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dgk25_5427_helmershausen.pdf
- GIERLING, K. (2023): Weinlagen-Info. URL: <https://www.weinlagen-info.de> (zuletzt abgerufen am 17.05.2023).
- GRAMS, T. E. E., HESSE, B. D., GEBHARDT, T., WEIKL, F., RÖTZER, T., KOVACS, B., et al. (2021): The Kroof experiment: realization and efficacy of a recurrent drought experiment plus recovery in a beech/spruce forest. *Ecosphere*, Vol. 12(3) (<https://doi.org/10.1002/ecs2.3399>).
- GROH, J., VANDERBORGH, J., PÜTZ, T., VOGEL, H.-J., GRÜNDLING, R., RUPP, H., et al. (2020): Responses of soil water storage and crop water use efficiency to changing climatic conditions: a lysimeter-based space-for-time approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 24(3), S. 1211-1225 (<https://doi.org/10.5194/hess-24-1211-2020>).
- HAARLÄNDER, W. (1969): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 6229 Schlüsselfeld*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HABBE, K.-A. (2003): Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 153 Bamberg 1:200.000. *Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft*, Vol. 50/51(2003/04), S. 55-102.
- HAFERKORN, U. (2000): *Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes - Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis*. Fakultät für Agrarwissenschaften, Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.
- HAGER, E. (1978): Bodenschätzungs-Übersichtskarte von Bayern 1:25.000 Blatt 6325 Giebelstadt. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HAGER, E. (1979): Bodenschätzungs-Übersichtskarte von Bayern 1:25.000 Blatt 5926 Geldersheim. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HALLMANN, C. A., SORG, M., JONGEJANS, E., SIEPEL, H., HOFLAND, N., SCHWAN, H., et al. (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, Vol. 12(10) (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>).

- HAMMERL, J. (2022): Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000 Blatt 6229 Schlüsselfeld. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- HANGEN, E. (2008): Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums in landwirtschaftlich genutzten Böden Bayerns - Abschätzung von Klimaeffekten. In: STADT MARKTREDWITZ (Hrsg.), *Marktredivitzer Bodenschutztagung Tagungsband 5 "Boden und Klima im Wandel* (S. 176-183). Marktredwitz.
- HARI, V., RAKOVEC, O., MARKONIS, Y., HANEL, M., & KUMAR, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018-2019 Central European drought under global warming. *Sci Rep, Vol. 10*(1), S. 12207 (<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>).
- HARTWICH, R., BARITZ, R., FUCHS, M., KRUG, D., & THIELE, S. (2005): *Erläuterungen zur Bodenregionenkarte der Europäischen Union und ihrer Nachbarstaaten im Maßstab 1:5.000.000 (Version 2.0)*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover.
- HAUNSCHILD, H. (1986): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Erläuterungen zum Blatt Nr. 6326 Ochsenfurt*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HAUNSCHILD, H. (1997): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Erläuterungen zum Blatt Nr. 6426 Aub.* Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HAUNSCHILD, H., & VOSSMERBÄUMER, H. (2021): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 6325 Giebelstadt. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- HEGENBERGER, W. (1969a): *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25.000 Blatt Nr. 5926 Geldersheim*. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HEGENBERGER, W. (1969b): Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5926 Geldersheim. Bayerisches Geologisches Landesamt. München.
- HEGENBERGER, W. (2022): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 5926 Geldersheim. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dGK25_5926_geldersheim.pdf
- HELBIG, H., SCHMIDT, G., & MÖLLER, M. (Hrsg.) (2010): *Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt - Ausmaß, Wirkungen und Vermeidungsstrategien*. Halle (Saale).
- HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ (2018): *Umweltperspektiven. Der UFZ-Newsletter - August 2018*. Leipzig. URL: https://www.ufz.de/newsletter/ufz/August2018/epaper/UFZ-Newsletter-Monat_13.pdf.
- HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG UFZ (2023): Dürremonitor Deutschland. URL: <https://www.ufz.de/index.php/www.europa-uni.de/de/forschung/institut/recap15/index.php?de=37937> (zuletzt abgerufen am 03.01.2023).
- HUDSON, B. D. (1994): Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 49*(2), S. 189-194.
- ILLSTON, B., BASARA, J., K. FISHER, D., ELLIOTT, R., FIEBRICH, C., C. CRAWFORD, K., et al. (2008): Mesoscale Monitoring of Soil Moisture Across a Statewide Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 25*(2), S. 167-182 (<https://doi.org/10.1175/2007JTECHA993.1>).
- IMBERY, F., FRIEDRICH, K., FLECKENSTEIN, R., PLÜCKHAHN, B., BRÖMSER, A., BISSOLLI, P., et al. (2023): *Klimatologischer Rückblick auf 2022 - Das sonnenscheinreichste und eines der beiden wärmsten Jahre in Deutschland*. Offenbach. URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/230123/artikel_jahresueckblick-2022.html (zuletzt abgerufen am 19.01.2023).
- INTERNATIONAL CENTRE FOR WATER RESOURCES AND GLOBAL CHANGE, & BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2023): International Soil Moisture Network. URL: <https://ismn.earth/en/> (zuletzt abgerufen am 13.03.2023).
- IUSS WORKING GROUP WRB (2022): *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. International Union of Soil Sciences (IUSS). Wien.
- JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG (2023a): *Klimaatlas Unterfranken*. URL: <https://www.bigdata-at-geo.eu/klimaatlas/> (zuletzt abgerufen am 11.02.2023).

- JULIUS-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT WÜRZBURG (2023b): REKLINEU - Regionale Wege zu klimareutralen Hochschulen. URL: <https://reklineu.de/> (zuletzt abgerufen am 26.04.2023).
- KAATSCH, V. M. (2019): *Bodengeographische und hydrologische Analyse ausgewählter Waldböden im südlichen Steigerwald*. Bachelorarbeit, Institut für Geographie und Geologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Würzburg.
- KARL, S., KORRES, W., KOYAMA, C., REICHENAU, T., & FIENER, P. (2012): *Monitoring and modeling spatial patterns and temporal dynamics of surface soil moisture*.
- KLAUSING, O. (1967): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 151 Darmstadt* (Geographische Landesaufnahme 1:200.000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands). Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bad Godesberg.
- KLEBER, A., & TERHORST, B. (2013): *Mid Latitude Slope Deposits (Cover Beds)* (Developments in Sedimentology, Vol. 66). Elsevier. Amsterdam.
- KLIWA-AG GRUNDWASSER, BLOMENHOFER, A., GUDERA, T., NEUMANN, J., SCHWEBLER, W., SPRENGER, W., & WINGERING, M. (2012): *Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien*. (ARBEITSKREIS KLIWA, KLIWA-Berichte, Vol. 17). Karlsruhe.
- KLOTZ, D. (2007): Einfluss des prognostizierten globalen Wandels auf die Sickerwasserparameter von Böden. *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, Vol. 51, S. 170-179.
- KORRES, W., REICHENAU, T. G., FIENER, P., KOYAMA, C. N., BOGENA, H. R., CORNELISSEN, T., et al. (2015): Spatio-temporal soil moisture patterns – A meta-analysis using plot to catchment scale data. *Journal of Hydrology*, Vol. 520, S. 326-341 (<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.042>).
- KRAUSE, J., & SCHÄFER, C. (2019): *Monitoring and Modelling of Soil Moisture in Lower Franconia. BigData@Geo - Data acquisition and first calibration results for the Brend Basin (Rhoen)*. 51. Jahrestagung des Arbeitskreis Hydrologie, Heidelberg, 21.-23.11.2019.
- LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG (2017): Amtliche Topographische Karte 1:25.000 ATK25-F02 Miltenberg. München.
- LANDESAMT FÜR DIGITALISIERUNG BREITBAND UND VERMESSUNG (2023): BayernAtlas. URL: <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/> (zuletzt abgerufen am 06.01.2023).
- LANDESAMT FÜR GEOLOGIE ROHSTOFFE UND BERGBAU (2022): LGRBWissen - Muschelkalk. URL: <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/geologie/schichtenfolge/trias/muschelkalk> (zuletzt abgerufen am 14.07.2022).
- LESER, H. (Hrsg.) (2015): *Diercke Wörterbuch Geographie* (15. völlig überarbeitete Aufl.). Braunschweig.
- LIBOHOVA, Z., SEYBOLD, C., WYSOCKI, D., WILLS, S., SCHOENEBERGER, P., WILLIAMS, C., et al. (2018): Reevaluating the effects of soil organic matter and other properties on available water-holding capacity using the National Cooperative Soil Survey Characterization Database. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 73(4), S. 411-421 (<https://doi.org/10.2489/jswc.73.4.411>).
- LYSIMETER RESEARCH GROUP (2022): lysimeter.at. URL: <https://www.lysimeter.at/index.html> (zuletzt abgerufen am 08.05.2023).
- MATHEWS, J., & GEOMATIK, A. A. W.-B. (2011): *Anpassung an den Klimawandel: Boden (Themenblatt)*. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikationen/kompass_themenblatt_boden_net.pdf.
- MCBRATNEY, A. B., MINASNY, B., & STOCKMANN, U. (Hrsg.) (2018): *Pedometrics*. Springer International Publishing (<https://doi.org/10.1007/978-3-319-63439-5>).
- MEIßNER, G. (2021, 02.09.2021): Ochsenfurter Gau: Bodenschätzer findet den Acker der Superlative. *Mainpost*. URL: <https://www.mainpost.de/regional/wuerzburg/ochsenfurter-gau-bodenschaezter-findet-den-acker-der-superlative-art-10653083>

- MENSCHING, H., & WAGNER, H.-G. (1963): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 152 Würzburg* (Geographische Landesaufnahme 1:200.000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands). Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Bad Godesberg.
- METER GROUP (2018a): *10HS Manual*. Pullman, WA.
- METER GROUP (2018b): *Installationsmethoden für Bodenfeuchtesensoren*. München. URL: <https://www.metergroup.com/de/environment/artikel/installationsmethoden-fuer-bodenfeuchtesensoren/>.
- METER GROUP (2019): *5TM Manual*. Pullman, WA; München.
- MICHEL, S., SCHWAB, A., & KÖNIGER, S. (2005): Standortbewertung: Das Geländeklima. *Der Deutsche Weinbau, Vol. 1*, S. 2-7.
- MINASNY, B., WHELAN, B. M., TRIANTAFILIS, J., & MCBRATNEY, A. B. (2013): Pedometrics Research in the Vadose Zone — Review and Perspectives. *Vadose Zone Journal, Vol. 12*(4) (<https://doi.org/10.2136/vzj2012.0141>).
- MOHANTY, B. P., COSH, M. H., LAKSHMI, V., & MONTZKA, C. (2017): Soil Moisture Remote Sensing: State-of-the-Science. *Vadose Zone Journal, Vol. 16*(1) (<https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>).
- MOLLENHAUER, K. (2004): Kapitel 5.3.3.2 Tiefenbearbeitung. In: BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., & STAHR, K. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde*. (<https://10.1002/9783527678495.hbbk2010006>).
- MOSIMANN, T., SANDERS, S., & BRUNOTTE, J. (2007): Erosionsminderung in Fahrgassen - Wirkung der Intervallbegrünung in Weizen und Zuckerrüben bei verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren. *Pflanzenbauwissenschaft, Vol. 11*(2), S. 57-66.
- MÜLLER, J. (1996): *Grundzüge der Naturgeographie von Unterfranken. Landschaftsökologie - Landschaftsgenese - Landschaftsräumlicher Vergleich*. Gotha.
- MÜLLER, J. (2020): *Beta-Diversität experimentell für nachhaltige Waldbewirtschaftung in Mitteleuropa. Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert unter dem AZ: 34488/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt*. Osnabrück. URL: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34488_01-Hauptbericht.pdf.
- MUNSELL (1994): *Munsell Soil Color Charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. New Windsor, NY.
- NASCIMENTO, Í., ASSIS, R., DE ARAÚJO, J., ALENCAR, T., FREIRE, A., LOBATO, M., et al. (2018): Estimation of van Genuchten Equation Parameters in Laboratory and through Inverse Modeling with Hydrus-1D. *Journal of Agricultural Science, Vol. 10*, S. 102 (<https://doi.org/10.5539/jas.v10n3p102>).
- NOVÁK, V., & HLAVÁČKOVÁ, H. (Hrsg.) (2019): *Applied Soil Hydrology*. Cham. (<https://doi.org/10.1007/978-3-030-01806-1>).
- OCHSNER, T. E., COSH, M. H., CUENCA, R. H., DORIGO, W. A., DRAPER, C. S., HAGIMOTO, Y., et al. (2013): State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring. *Soil Science Society of America Journal, Vol. 77*(6), S. 1888-1919 (<https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0093>).
- PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., & MCMAHON, T. A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 11*, S. 1633-1644 (<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>).
- PESSL INSTRUMENTS (2023): FieldClimate. URL: www.ng.fieldclimate.com (zuletzt abgerufen am 03.05.2023).
- RADCLIFFE, D. E., & SIMUNEK, J. (2010): *Soil Physics with Hydrus. Modelling and Applications*. CRC Press. Boca Raton. (<https://doi.org/10.1201/9781315275666>).
- RAKOVEC, O., SAMANIEGO, L., HARI, V., MARKONIS, Y., MORAVEC, V., THOBER, S., et al. (2022): The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth's Future, Vol. 10*(3) (<https://doi.org/10.1029/2021EF002394>).
- RASHEED, M. W., TANG, J., SARWAR, A., SHAH, S., SADDIQUE, N., KHAN, M. U., et al. (2022): Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability, Vol. 14*(18) (<https://doi.org/10.3390/su141811538>).

- RASSAM, D., ŠIMŮNEK, J., MALLANTS, D., & VAN GENUCHTEN, M. T. (2018): *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media: Tutorial, Version 1.00*. CSIRO Land and Water. Online.
- RAUH, J., & PAETH, H. (2011): Anthropogener Klimawandel und Weinwirtschaft - Wahrnehmung und Anpassungsmaßnahmen fränkischer Winzer auf den Wandel klimatischer Bedingungen. *Berichte zur deutschen Landeskunde, Vol. 85(2)*, S. 151-177.
- REGIONALE KLIMABÜROS DER HELMHOLTZ-GESELLSCHAFT (2023): Regionaler Klimaatlas Deutschland. URL: <https://www.regionaler-klimaatlas.de/> (zuletzt abgerufen am 03.05.2023).
- REH, J., & BLUM, P. (2011a): 3 - Rhön. In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.), Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/03.pdf>.
- REH, J., & BLUM, P. (2011b): 4 - Mainfränkische Gäulandschaften. In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.), Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/04.pdf>.
- REH, J., & BLUM, P. (2011c): 5 - Gäulandschaft zwischen Ochsenfurt und Bad Windsheim. In: UMWELT, B. L. F. (Hrsg.), Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/05.pdf>.
- REH, J., & BLUM, P. (2011d): 8 - Haßberge. In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.), Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/08.pdf>.
- REH, J., & BLUM, P. (2011e): 9 - Steigerwald mit Vorland. In: BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.), Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. Augsburg. URL: <https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/09.pdf>.
- REHFUESS, K.-E. (1990): *Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung*. Parey. Hamburg.
- REINKE, M., BLUM, P., REH, J., ZEHLIUS-ECKERT, W., AUGENSTEIN, I., HASLACH, H., & RENNER, F. (2013): *Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., et al. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe "Kennwerte des Bodengefüges" zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: FACKLAM, M. (Hrsg.), *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis*. Vol. 40, S. 4-51. Berlin.
- RENGER, M., BOHNE, K., & WESSOLEK, G. (2014a): Bestimmung und Aussagemöglichkeiten der effektiven Lagerungsdichte. In: RENGER, M., BOHNE, K., & WESSOLEK, G. (Hrsg.), *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II*. S. 27-41. Berlin.
- RENGER, M., BOHNE, K., & WESSOLEK, G. (2014b): Verfahren zur Berechnung der ungesättigten und gesättigten Wasserleitfähigkeit aus einfach zugänglichen Daten. In: RENGER, M., BOHNE, K., & WESSOLEK, G. (Hrsg.), *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Teil II*. S. 5-26. Berlin.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary Conduction of Liquids through Porous Media. *Physics*, Vol. 1(5), S. 318-333 (<https://doi.org/10.1063/1.1745010>).
- RIEDEL, T., NOLTE, C., AUS DER BREEK, T., & LIEDTKE, J. (2021): *Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung - Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien* (Texte, Vol. 174/2021). Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- RIPPEL, R., SCHWAMM, D., & BRANDHUBER, R. (2002): *Bodenwasserhaushalt unterfränkischer Ackerstandorte 1980-2000* (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Vol. 3/02). Freising.
- RITSEMA, C. J., & DEKKER, L. W. (1994): How water moves in a water repellent sandy soil: 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research*, Vol. 30(9), S. 2519-2531 (<https://doi.org/10.1029/94WR00750>).

- ROBINSON, D. A., CAMPBELL, C. S., HOPMANS, J. W., HORNBuckle, B. K., JONES, S. B., KNIGHT, R., et al. (2008): Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, Vol. 7(1), S. 358-389 (<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>).
- RÖLL, W. (1962): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 126 Fulda* (Geographische Landesaufnahme 1:200.000, Naturräumliche Gliederung). Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung. Bad Godesberg.
- RÖSNER, U. (1990): *Die Mainfränkische Lößprovinz. Sedimentologische, pedologische und morphodynamische Prozesse der Lößbildung während des Pleistozäns in Mainfranken* (WIRTH, E., Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft, Vol. 37). Fränkische Geographische Gesellschaft. Erlangen.
- SANDERS, J., & HEß, J. (2019): *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft* (Thünen Report 65). Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. (<https://doi.org/10.3220/REP1576488624000>).
- SAUER, D., & DROLLINGER, S. (2023): FLP Ebergötzen: Erfassung der Wasser- und Elementflüsse in einem Buchenwaldökosystem. URL: <https://www.uni-goettingen.de/de/flp+eberg%c3%b6tzen/603145.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2023).
- SCHAAP, M. G., LEIJ, F. J., & VAN GENUCHTEN, M. T. (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, Vol. 251(3-4), S. 163-176 ([https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)).
- SCHÄFER, C. (laufend): *Modellierung des regionalen Umweltwandels in Unterfranken (Arbeitstitel)*. Dissertation, Philosophische Fakultät, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- SCHÄFER, C., KRAUSE, J., TERHORST, B., & BAUMHAUER, R. (2020): Monitoring und Modellierung der Bodenfeuchte in Unterfranken im Projekt BigData@Geo. Datenerfassung und erste Ergebnisse für das Einzugsgebiet der Brend (Rhön). In: CHIFFLARD, P., KARTHE, D., HAHN, J., & MENZE, L. (Hrsg.), Beiträge zum 50. und 51. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie 2018 in Koblenz und 2019 in Heidelberg, *Geographica Augustana*. Bd. 31, S. 84-89. Institut für Geographie, Universität Augsburg. Augsburg.
- SCHALLER, M., & WEIGEL, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landesbauforschung Völknerode*, Vol. Sonderheft 316.
- SCHILLING, B. (2022): Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000 Blatt 6228 Wiesentheid. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- SCHÖNBEIN, D., KEUPP, L., POLLINGER, F., & PAETH, H. (2020): *Klimabericht für Unterfranken*. Würzburg.
- SCHRÖDER, B. (2022): Digitale Geologische Karte von Thüringen 1:25.000 Blatt 5527 Mellrichstadt. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. Weimar. (abgerufen am 03.08.2022)
- SCHULLA, J. (2017): Model description WaSiM (Water balance Simulation Model). Version 2017 (last change: July 8, 2017). Zürich: Hydrology Software Consulting.
- SCHWARZMEIER, J. (2021): *Geologische Karte von Bayern 1:25.000 - Digitale Erläuterungen zum Blatt 6221 Miltenberg*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.
- SCHWARZMEIER, J. (2022): Digitale Geologische Karte von Bayern 1:25.000 Blatt 6221 Miltenberg. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg. URL: https://www.lfu.bayern.de/download/geologie/dgk25/dGK25_6221_miltenberg.pdf
- SCHWENZER, B. (1968): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 140 Schweinfurt* (Geographische Landesaufnahme 1:200.000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands). Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bad Godesberg.
- SELKER, J., & OR, D. (2019): *Soil Hydrology and Biophysics* (1. Aufl.). Oregon State University. Corvallis. URL: <https://open.oregonstate.edu/soilhydrologyandbiophysics>. (<https://doi.org/10.5399/osu/1142>).
- SENEVIRATNE, S. I., CORTI, T., DAVIN, E. L., HIRSCHI, M., JAEGER, E. B., LEHNER, I., et al. (2010): Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, Vol. 99(3), S. 125 - 161 (<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>).

- SIMUNEK, J., SEJNA, M., & VAN GENUCHTEN, M. T. (2008): HYDRUS-1D. Prag.
- SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. T., & SEJNA, M. (2012): HYDRUS: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, Vol. 55(4), S. 1263-1276 (<https://doi.org/10.13031/2013.42239>).
- SOMMER, M., HERRMANN, L., & BLEICH, K. E. (2004): Kapitel 4.5.3.3 Lößgebiete Süddeutschlands. In: BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., & STAHR, K. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde*. (<https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk2003005>).
- SPÄTH, H. (1987): *Die naturräumlichen Einheiten auf Blatt 141 Coburg* (Geographische Landesaufnahme 1:200000, Naturräumliche Gliederung Deutschlands). Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bad Godesberg.
- SPECHT, S. (2014): *Stratigraphie und Tektonik im Großraum Maßbach (Lauer) zwischen den Naturparks Bayerische Rhön und Hassberge*. Dissertation, Philosophische Fakultät I, Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Würzburg.
- STAHR, K., KANDELER, E., HERRMANN, L., & STRECK, T. (2020): *Bodenkunde und Standortlehre* (4. Aufl.). Stuttgart.
- STEGER-FRÜHWACHT, R. (1988): *Die kulturlandschaftliche Entwicklung im Hesselbacher Waldland seit 1930. Landschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen im nordöstlichen Einzugsgebiet der Stadt Schweinfurt* (Würzburger Geographische Manuskripte, Vol. 20). Geographisches Institut der Universität Würzburg. Würzburg.
- STELLMACH, G. (2006): Gedanken zur Überlebensfähigkeit des heimischen Weinbaus angesichts des globalen Klimawandels. *Deutsches Weinbau-Jahrbuch*, Vol. 57, S. 37-42.
- SÜDWESTRUNDFUNK (2021): Wie das Hochwasser in der Eifel so katastrophal werden konnte. URL: <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/warum-das-hochwasser-in-eifel-so-katastrophal-100.html> (zuletzt abgerufen am 12.04.2023).
- TERENO (2022): TERENO - Terrestrial Environmental Observatories. URL: <https://www.tereno.net/> (zuletzt abgerufen am 30.03.2023).
- TERHORST, B. (2023): *Das Maintalprojekt: Ökosystembasierte Lösungen für Gefährdungs-Szenarios im fränkischen Maintal (MainPro)*.
- THOBER, S., MARX, A., & BOEING, F. (2018): *Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland*. Leipzig. URL: https://www.ufz.de/export/data/2/207531_HOKLIM_Brosch%C3%BCre_final.pdf (zuletzt abgerufen am 03.01.2023).
- TOTH, B., WEYNANTS, M., NEMES, A., MAKO, A., BILAS, G., & TOTH, G. (2015): New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, Vol. 66(1), S. 226-238 (<https://doi.org/10.1111/ejss.12192>).
- TRESSEL, E., & SCHNEIDER, R. (2005): Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung in der Trier-Bitburger Mulde. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Vol. 106, S. 59-60.
- TUREK, M. E., POGGIO, L., BATJES, N. H., ARMINDO, R. A., DE JONG VAN LIER, Q., DE SOUSA, L., & HEUVELINK, G. B. M. (2023): Global mapping of volumetric water retention at 100, 330 and 15.000 cm suction using the WoSIS database. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol. 11(2), S. 225-239 (<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.08.001>).
- UMWELTBUNDESAMT (2022): Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten> (zuletzt abgerufen am 03.01.2022).
- UNITED NATIONS (2023): Sustainable Development Goals. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (zuletzt abgerufen am 23.04.2023).
- UNIVERSITÄT HAMBURG (2021): HUSCO. URL: <https://www.geo.uni-hamburg.de/bodenkunde/forschung/abgeschlossene-projekte/husco.html> (zuletzt abgerufen am 30.03.2023).
- VAN DER PLOEG, R. R., EHLERS, W., & HORN, R. (2006): Schwerlast auf dem Acker. *Spektrum der Wissenschaft*, 8, 80-88.

- VAN GENUCHTEN, M. T., LEIJ, F. J., & YATES, S. R. (1991): *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. Riverside, California.
- VAN GENUCHTEN, M. T., SIMUNEK, J., LEIJ, F. J., & SEJNA, M. (2009): RETC, Version 6.02. Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Prag.
- VAN KLINK, R., BOWLER, D. E., GONGALSKY, K. B., SWENGEL, A. B., GENTILE, A., & CHASE, J. M. (2020): Meta-analysis reveals declines in terrestrial but increases in freshwater insect abundances. *Science*, Vol. 368(6489), S. 417-420 (<https://doi.org/10.1126/science.aax9931>; <https://doi.org/10.1126/science.abf1915>; <https://doi.org/10.5281/zenodo.4061807>).
- VÁRALLYAY, G. (2010): The impact of climate change on soils and on their water management. *Agronomy Research*, Vol. 8 (Special Issue II), S. 385-396.
- VEERMAN, C., PINTO CORREIA, T., BASTIOLI, C., BIRO, B., BOUMA, J., CIENCIALA, E., et al. (2020): *Caring for soil is caring for life - Ensure 75% of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate. Interim report of the mission board for soil health and food*. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate-General for Agriculture and Rural Development. Brüssel. (<https://doi.org/10.2777/918775>).
- VERECKEN, H., AMELUNG, W., BAUKE, S. L., BOGENA, H., BRÜGGEMANN, N., MONTZKA, C., et al. (2022): Soil hydrology in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 3(9), S. 573-587 (<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00324-6>).
- VERECKEN, H., HUISMAN, J. A., BOGENA, H., VANDERBORGH, J., VRUGT, J. A., & HOPMANS, J. W. (2008): On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, Vol. 44(4) (<https://doi.org/10.1029/2008wr006829>).
- VERECKEN, H., HUISMAN, J. A., HENDRICKS FRANSSSEN, H. J., BRÜGGEMANN, N., BOGENA, H. R., KOLLET, S., et al. (2015): Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives. *Water Resources Research*, Vol. 51(4), S. 2616-2633 (<https://doi.org/10.1002/2014wr016852>).
- VERECKEN, H., HUISMAN, J. A., PACHEPSKY, Y., MONTZKA, C., VAN DER KRUK, J., BOGENA, H., et al. (2014): On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, Vol. 516, S. 76-96 (<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061>).
- VERECKEN, H., SCHNEPF, A., HOPMANS, J. W., JAVAUX, M., OR, D., ROOSE, T., et al. (2016): Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. *Vadose Zone Journal*, Vol. 15(5) (<https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0131>).
- VETTERLEIN, E. (1983): Beziehungen zwischen hydraulischer Leitfähigkeit und Bodenwassergehalt in Sande-, Lehm- und Tonsubstraten. *Archiv für Acker- Pflanzenbau und Bodenkunde*, Vol. 27, S. 417-426.
- WALLIS, M. G., HORNE, D. J., & MCAULIFFE, K. W. (1990): A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Vol. 33(1), S. 139-144 (<https://doi.org/10.1080/00288233.1990.10430670>).
- WEIDINGER, A.-L. (2022): Was ist in der Flutnacht passiert? - Ein Protokoll. URL: <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/flut-rekonstruktion-ahrtal-protokoll-100.html> (zuletzt abgerufen am 12.04.2023).
- WEIHERMÜLLER, L., LEHMANN, P., HERBST, M., RAHMATI, M., VERHOEF, A., OR, D., et al. (2021): Choice of Pedotransfer Functions matters when simulating soil water balance fluxes. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* (<https://doi.org/10.1002/essoar.10505122.1>).
- WEINBAURING FRANKEN E.V. (2023): Wetterstationen. URL: <https://weinbauring.de/?content=showpage&id=0.48254300-1351173092> (zuletzt abgerufen am 05.02.2023).
- WEIS, W., RASPE, S., & FALK, W. (2015): Modellierung des Wasserhaushalts der BZE II-Punkte mit LWF-Brook90. In: SCHUBERT, A. & FALK, W. (Hrsg.), *Waldböden in Bayern - Ergebnisse der BZE II*. Vol. Forstliche Forschungsberichte München 213, S. 85-88. München.
- WEIS, W., WELLPOTT, A., & FALK, W. (2022): Wasserversorgung forstlicher Standorte im Klimawandel beurteilen. *LWF aktuell*, Vol. 4/2022(135), S. 8-11.
- WESSOLEK, G. (2016): Bodenwasserhaushalt. In: FOHRER, N. (Hrsg.), *Hydrologie*. Bern.

- WIESNER, S., ESCHENBACH, A., & AMENT, F. (2014): Urban air temperature anomalies and their relation to soil moisture observed in the city of Hamburg. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 23(2), S. 143-157 (<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2014/0571>).
- WIESNER, S., GRÖNGRÖFT, A., AMENT, F., & ESCHENBACH, A. (2016): Spatial and temporal variability of urban soil water dynamics observed by a soil monitoring network. *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 16(11), S. 2523-2537 (<https://doi.org/10.1007/s11368-016-1385-6>).
- WILLIAMS, D. M., BLANCO-CANQUI, H., FRANCIS, C. A., & GALUSHA, T. D. (2017): Organic Farming and Soil Physical Properties: An Assessment after 40 Years. *Agronomy Journal*, Vol. 109(2), S. 600-609 (<https://doi.org/10.2134/agronj2016.06.0372>).
- WITTMANN, O. (1966): *Die Weinbergböden Frankens* (Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch, Vol. 43,3). Bayerischer Landwirtschaftsverlag. München.
- WITTMANN, O. (2004): Kapitel 4.2.4.1 Deutsche Weinbaustandorte. In: BLUME, H.-P., FELIX-HENNINGSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., & STAHR, K. (Hrsg.), *Handbuch der Bodenkunde*. (<https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk2006006>).
- ZHANG, Y., & SCHAAP, M. G. (2017): Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). *Journal of Hydrology*, Vol. 547, S. 39-53 (<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.004>).
- ZHUANG, Y. (2020): *Soil properties in lower Franconian vineyards and their relevance for climate change*. Masterarbeit, Institut für Geographie und Geologie, Julius-Maximilians-Universität Würzburg. Würzburg.
- ZIMMERMANN, L., & RASPE, S. (2021): Dritter Trockensommer im Norden Bayern. *LWF aktuell*, Vol. 2/2021(129), S. 49-51.
- ZIMMERMANN, L., & RASPE, S. (2022a): Erneut ein Hitze- und Dürresommer. *LWF aktuell*, Vol. 5/2022(136), S. 26-27.
- ZIMMERMANN, L., & RASPE, S. (2022b): Höhepunkt und Ende der Dürre. *LWF aktuell*, Vol. 6/2022(137), S. 26-27.
- ZIMMERMANN, L., & RASPE, S. (2022c): Witterung 2021: Durchschnitt mit nassem Sommer. *LWF aktuell*, Vol. 2/2022(133), S. 27-29.
- ZIMMERMANN, L., & RASPE, S. (2022d): Zuerst stürmisch, dann sonnig und trocken. *LWF aktuell*, Vol. 3/2022(134), S. 26-27.
- ZINK, M. (2016): *Soil Moisture Droughts in Germany: Retrospective Analysis, Parametric Uncertainty, and Monitoring*. Dissertation, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät, Friedrich-Schiller-Universität Jena. Jena.
- ZINK, M., KUMAR, R., CUNTZ, M., & SAMANIEGO, L. (2017): A high-resolution dataset of water fluxes and states for Germany accounting for parametric uncertainty. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21(3), S. 1769-1790 (<https://doi.org/10.5194/hess-21-1769-2017>).
- ZUBER, T. (2007): *Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Fichtenwaldstandorts unter Berücksichtigung der Humusaufgabe*. Dissertation, Fakultät für Chemie, Biologie und Geowissenschaften, Universität Bayreuth. Bayreuth.
- ZUCKER, A. (2022): Übersichtsbodenkarte von Bayern 1:25.000 Blatt 5938 Obertheres. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

Anhang

Die folgende Liste gibt eine Übersicht über das digitale Zusatzmaterial:

Krause_Julian_Dissertation_2024.pdf

Krause_2024_Zeitreihen.pdf mit

Abbildung A1: Monitoringzeitreihen aller Standorte und Profile.

Abbildung 69: Monitoringzeitreihen der Profile B 1 und B 2 (Rigosole; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 16.03.2022 bis 02.09.2022.

Abbildung 70: Monitoringzeitreihen der Profile H 1 und H 2 (Parabraunerden; Ebene) für den Beobachtungszeitraum 02.08.2018 bis 25.11.2019.

Abbildung 71: Monitoringzeitreihen der Profile O 1 (Ranker; Hangverflachung), O 2 (Braunerde; Kuppe) und O 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 10.04.2019 bis 30.11.2022.

Abbildung 72: Monitoringzeitreihen der Profile UW 1 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang), UW 2 (Braunerde-Terra fusca; Talboden) und UW 3 (Braunerde-Terra fusca; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 09.07.2019 bis 30.11.2022.

Abbildung 73: Monitoringzeitreihen der Profile CO 1 (Braunerde; Plateau), CO 2 (Braunerde; Hangschulter) und CO 3 (Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 29.06.2018 bis 31.10.2022.

Abbildung 74: Monitoringzeitreihen der Profile W 1 (podsolierte Braunerde; Oberhang), W 2 (pseudovergleyte Braunerde; Mittelhang) und W 3 (podsolierte Braunerde; Mittelhang) für den Beobachtungszeitraum 12.12.2019 bis 30.11.2022.

Krause_2024_Karten.pdf mit

Abbildung 11: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Bürgstadt.

Abbildung 12: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Bürgstadt.

Abbildung 18: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Herchsheim.

Abbildung 19: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Herchsheim.

Abbildung 27: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Obbach.

Abbildung 28: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Obbach.

Abbildung 38: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Uniwald.

Abbildung 39: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Uniwald.

Abbildung 48: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Oberrimbach.

Abbildung 49: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Oberrimbach.

Abbildung 59: Übersichtkarte des Untersuchungsgebiets und der Monitoringstation Willmars.

Abbildung 60: Geologische Karte 1:25.000 des Untersuchungsgebiets Willmars.