

Mit Unterstützung von Bund, Land und Europäischer Union

 Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Regionen und Wasserwirtschaft


LE 14-20
Entwicklung für den Ländlichen Raum



LAND
OBERÖSTERREICH

Europäischer
Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des
ländlichen Raums:
Hier investiert Europa in
die ländlichen Gebiete.



HydroBOD OÖ


Endbericht, November 2023



Auftragnehmer: Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald (BFW)
Seckendorff- Gudent-Weg 8, 1131 Wien

Kooperationspartner: Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW)
Scharfling 18, 5310 Sankt Lorenz



 Bundesamt
für Wasserwirtschaft

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesforschungszentrum für Wald,
Landschaft und Naturgefahren,
Institut für Naturgefahren,
Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1130 Wien
bfw.ac.at

Bundesamt für Wasserwirtschaft,
Institut für Kulturtechnik und
Bodenwasserhaushalt,
Pollnbergstraße 1, 3252 Petzenkirchen
baw.at/wasser-boden-ikt.at

Autorinnen und Autoren:

BFW: Karl Hagen, Pia Feiel, Tobias Huber, Klaus Klebinder, Christian Demmler, Reinhard Fromm, Anne Hormes, Vanessa Färber, Patricia Gürth

BAW-IKT: Thomas Weninger, Irene Schwaighofer, Florian Darmann, Peter Strauss

Titelfoto: Karl Hagen

Innsbruck/Petzenkirchen, 30.11.2023

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der AutorInnen oder deren Institutionen ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtssprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Problemstellung	13
2.	Auftrag.....	14
3.	Ziele	14
3.1.	Verwendungshinweise, Genauigkeit.....	14
3.2.	Produkte	15
4.	Verfügbare Datengrundlagen.....	16
4.1.	Flächendaten	16
4.1.1.	Allgemeine Datensätze	16
4.1.2.	Gewässer und Gerinne	16
4.1.3.	Geländemodelle	17
4.1.4.	Geologische Karten.....	17
4.1.5.	Österreichische Waldkarte	19
4.1.6.	Österreichische Bodenkartierung.....	19
4.1.7.	Digitale Katastralmappe	19
4.1.8.	INVEKOS.....	20
4.1.9.	Gebäudelayer	20
4.1.10.	Klima	20
4.1.11.	Versiegelungsgrad	21
4.1.12.	Flächendeckende Bodenfeuchtedaten (Copernicus, BMon).....	21
4.1.13.	Sonstige Daten.....	22
4.2.	Punktinformationen - Bodenprofilaten im Gebiet	22
4.3.	Geländeaufnahmen im Rahmen von HydroBOD OÖ	24
4.3.1.	Geländeaufnahmen: Wald und Hochlagen (BFW)	25
4.3.2.	Geländeaufnahmen: Landwirtschaft.....	26
4.4.	Bestehende Datensätze.....	27
4.4.1.	Digitale österreichische Bodenkarte (eBOD).....	27
4.4.2.	Waldbodenzustandsinventur (WBZI/ BIOSOIL)	28
4.4.3.	Österreichische Waldinventur (ÖWI)	28
4.4.4.	HydroBOD NÖ.....	28
4.4.5.	Projektdaten BAW	28
4.4.6.	Projektdaten BFW	28
4.4.7.	Kartierung Nationalpark Kalkalpen	29
5.	Aufbereitung der Datengrundlagen	30
5.1.	Laboranalysen der Geländeaufnahme-Proben	30
5.2.	Geologie.....	30
5.3.	Topographische Daten	31
5.3.1.	Krümmung (curvature)	31

5.3.2.	Konvergenz Index (convergence)	31
5.3.3.	Ausrichtung (aspect).....	31
5.3.4.	Neigung (slope).....	31
5.3.5.	Hanglänge - Abflussakkumulation und Fließlänge (slope length)	31
5.3.6.	Topographische Heterogenität (tri).....	32
5.3.7.	Topographischer Positionsindex (tpi).....	32
5.3.8.	Topographischer Feuchtigkeitsindex (Saga-TWI)	32
5.3.9.	Reliefklassifikation	33
5.3.10.	Flow direction (Fließrichtung)	34
5.4.	Substratklassifikation (Wald/Hochlagen)	34
5.5.	Hydrogeologische Substratkarte	35
5.6.	Hangschuttmodellierung	37
5.7.	Landnutzung	39
5.7.1.	Datenaufbereitung, Methodik.....	40
5.7.2.	Landwirtschaftliche Flächen	40
5.7.3.	Waldflächen.....	42
5.7.4.	Gebäude	43
5.7.5.	Sonderfälle.....	44
5.7.6.	Zusammenfassung Landnutzungskarte	44
6.	Ermittlung der hydrologischen Bodenkenndaten	46
6.1.	Regionalisierung	46
6.1.1.	Allgemein.....	46
6.1.2.	Regionalisierungsverfahren Landwirtschaft.....	46
6.1.3.	Regionalisierungsverfahren Wald und waldfreie Hochlagen	47
6.1.4.	Zwischenergebnisse Regionalisierung Wald und waldfreie Hochlagen	50
6.1.4.1.	Bodenart.....	50
6.1.4.2.	Skelettgehalt.....	52
6.1.4.3.	Bodenmächtigkeit	53
6.1.4.4.	Lagerungsdichte	54
6.1.4.5.	Gehalt an organischer Substanz	54
6.1.4.6.	Porenvolumen	55
6.1.5.	Regionalisierungsverfahren Siedlungsgebiet	56
6.2.	Hydrologische Bewertung	56
6.2.1.	Pedotransferfunktionen (PTF)	56
6.2.2.	Pedotransferfunktion Landwirtschaft	58
6.2.3.	Pedotransferfunktion Wald.....	61

6.2.4.	Pedotransferfunktion Siedlungsgebiet.....	62
6.2.5.	Sonstige Flächen.....	62
7.	Aufbereitung der bodenhydrologischen Kennwerte.....	64
7.1.	Aufbereitung und Modifikation der Raster	64
7.2.	Abflussspeichernde Bodenmächtigkeit.....	64
7.3.	Skelettanteil im Boden	65
7.4.	Nutzbare Wasserspeicherkapazität.....	65
7.5.	Kapillarer Porenfluss.....	66
8.	Klassifikation dominanter Abflussprozesse und Berechnung von Abflussbeiwerten	68
8.1.	Abflusstypen	68
8.2.	Reaktionszeiten	69
9.	HydroBOD- Modell	70
9.1.	Eingabegrößen.....	70
9.1.1.	Räumliche Variabilität der Bodenfeuchte (topocls)	71
9.1.2.	Hangschutt	73
9.2.	Modellstruktur	73
9.2.1.	Infiltrationsmodell	74
9.2.2.	Bodenmodell/Abflussmodell.....	74
9.2.3.	Modell Geologie	75
9.3.	Steuerungsgrößen	75
9.3.1.	Vorfeuchtezustand	75
9.3.2.	Verschlämmung.....	76
9.3.3.	Beweidung.....	77
9.3.4.	Makroporenfaktor	78
9.3.5.	Basisintensität	79
9.4.	Szenarien	79
9.5.	Ausgabe HydroBOD-Modell	81
10.	Ergebnisse.....	82
10.1.	Allgemeines	82
10.2.	Technisches	83
10.3.	Landnutzung	83
10.4.	Bodenart.....	84
10.5.	Skelettgehalt.....	85
10.6.	Lagerungsdichte	86
10.7.	Gehalt an organischer Substanz	87
10.8.	Vertikale Wasserleitfähigkeit gesättigt (ks).....	88
10.9.	Kennwerte des Porensystems	90
10.10.	Bodenmächtigkeit	91
10.11.	Hydrologische Reaktionseinheit.....	92
10.12.	Oberflächenabflussbeiwert für definierte Niederschlags- und Systemzustandsszenarien ..	96
10.13.	Tabelle zur Oberflächenrauigkeit	98
11.	Validierung der Ergebnisse.....	100

11.1. Validierung Landnutzungskarte.....	100
11.2. Validierung bodenhydrologische Parameter.....	100
11.3. Validierung Oberflächenabfluss	100
11.3.1. Methodenvergleich Siedlungsraum	107
11.4. Validierung des dominanten Prozesstyps	108
12. Conclusio	110
13. Verbesserungspotenziale	113
14. Literaturverzeichnis.....	115
Anhang 1: Landnutzung (Volltext).....	120
Anhang 2: Bodenanalyse: genaue Beschreibung	121
Anpassung der Korngrößen an das Messverfahren	122
Anhang 3.....	125
Diskussion: PTF's für Wald anhand der PTF von Teepe.....	125
Anhang 4: Regionalisierung.....	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Geologische Karte 1:50.000, nur in Teilbereichen verfügbar (GeoSphere Austria)	17
Abbildung 4-2: Geologische Karte 1:50.000 (GeoSphere Austria) modifiziert, Versätze bei Blattsschnitten	18
Abbildung 4-3: Relative Bodenfeuchte (SSM), Oberösterreich, 9.4.2023 (Copernicus Global Land Service)	21
Abbildung 4-4: Punktdaten (wegen Übersichtlichkeit ohne eBOD), Quellen und Verteilung.....	23
Abbildung 4-5: Links Bodenprofil, flachgründiger Braunlehm auf Kalk, horizontweise Bodenansprache; rechts: Stechzylinder-Probenwerbung für Laboranalysen.....	26
Abbildung 4-6: Inhalte der eBOD (links) und kartographische Darstellung (rechts, Bsp. Wasserverhältnisse)	27
Abbildung 5-1: Konvergenzindex: Informationen zur Lage der Pixel in Bezug auf die Nachbarzellen (Bsp. links Kuppe, Mitte Mulde, rechts Hang).....	31
Abbildung 5-2: Abhängigkeit des TPI von der Ausdehnung des Benachbarten Umfeldes (Salinas-Melgoza et al. 2018)	32
Abbildung 5-3: Workflow der Relieffklassifikation	34
Abbildung 5-4: Hangfußbereiche ermittelt durch die Verschneidung aller Hangneigungen > 45° mit konkaven Geländebereichen und im WLK dokumentierte Steinschläge/Felsstürze (rote Punkte), Ausschnitt: südlicher Hallstätter See	38
Abbildung 5-5: Modellerte Bereiche mit hydrologisch wirksamen Hangablagerungen, Ausschnitt südlicher Traunsee (Ebensee).....	39
Abbildung 5-6: Workflowgraphik zur Landnutzungskarte HydroBOD OÖ	40
Abbildung 5-7: Kartenausschnitt: Illustration der Übertragung von INVEKOS-Nutzungen auf die DKM-Parzellen (gelb: Acker, hellgrün: Grünland, dunkelgrün: Intensivobstbau und Garten).....	42
Abbildung 5-8: Aufbereitung der Waldflächenabgrenzung	43
Abbildung 6-1: Lückenschluss mit nearest-neighbor Interpolationsalgorithmus	47
Abbildung 6-2:Häufigkeitsverteilung Bodenart Sand, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, links Häufigkeitsverteilung, Mitte R ² , RMSC und Vergleich Trainings - Testdatensatz und rechts Werteverteilung (Sandanteil in %).....	51
Abbildung 6-3: Häufigkeitsverteilung Bodenart Schluff, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, (Schluffanteil in %)	51
Abbildung 6-4: Häufigkeitsverteilung Bodenart Ton, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, (Tonanteil in %)	51
Abbildung 6-5: aus Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-4 mittels Regionalisierung abgeleitete Verteilung der Bodenarten für Wald und waldfreie Hochlagen	52
Abbildung 6-6: Ergebnis Regionalisierung Skelettgehalt, Tiefenstufe 20-50 cm	52
Abbildung 6-7: Datenquellen, Verteilung und Gründigkeit für den Parameter Bodenmächtigkeit (OÖ und NÖ)	53
Abbildung 6-8: Regionalisierte Bodenmächtigkeit auf Basis aller verfügbarer Punkte.....	53
Abbildung 6-9: Ergebnis Regionalisierung Lagerungsdichte, Tiefenstufe 20-50cm	54
Abbildung 6-10: Anteil organischer Substanz in der oberen (TS1) unteren (TS3) Tiefenstufe	55
Abbildung 6-11: Porenvolumen in der oberen TS (20-50cm)	55
Abbildung 6-12: Porenverteilung des Bodens (nach AG Boden 2005, modifiziert)	57
Abbildung 6-13: Ermittelter Wassergehalt bei Feldkapazität (pF = 1,8) für landwirtschaftliche Flächen in Oberösterreich. a: Wassergehalt bei Feldkapazität für Tiefenstufe 1 (TS1). b: Wassergehalt bei Feldkapazität (pF = 1,8) für das gesamte Profil. c: Interquartilsabstand (Q90-Q10) für Tiefenstufe 1 (TS1). d: Interquartilsabstand (Q90-Q10) für das gesamte Profil	60
Abbildung 7-1: Illustration der Ausweisung der abflussspeichernden Bodenmächtigkeit (asBM) auf landwirtschaftlichen Flächen anhand der Daten aus der österr. Bodenkartierung; Abkürzung: GWSP = Grundwasserspiegel (Eder et al. 2011)	64
Abbildung 7-2: Nutzbare Wasserkapazität der Tiefenstufe 1 in mm	66

Abbildung 7-3: Ausweisung des kapillaren Porenflusses G (mm) für die oberste Tiefenstufe	67
Abbildung 8-1: Klassifikation der dominanten Abflussprozesse (Klebindler et al. 2012, verändert).....	68
Abbildung 9-1: Räumliche Variabilität der Grundfeuchteklassen (topocls)	73
Abbildung 9-2: Schematische Abbildung der im HydroBOD-Ansatz modellierten Prozesse (Eder et al. 2011, verändert)	74
Abbildung 9-3: Vertikale Feuchteverteilung in der Modell-Bodensäule bei den unterschiedlichen Vorfeuchte-Szenarien (Sotier et al. 2017, verändert)	76
Abbildung 9-4: Bereiche und Grad der Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit durch Verschlammung	77
Abbildung 9-5: Niederschlagsmengen des Bemessungsereignisses (Dauer 60 Minuten, Eintrittswahrscheinlichkeit 100-jährlich)	80
Abbildung 10-1: Erstellte Landnutzungskarte Oberösterreichs	84
Abbildung 10-2: Tongehalt im Durchschnitt des Gesamtprofils in Volumenprozent	85
Abbildung 10-3: Skelettanteil im Gesamtprofil in Volumensprozent	86
Abbildung 10-4: Lagerungsdichte (g/cm^3) der obersten Tiefenstufe (0-20 cm)	87
Abbildung 10-5: Gehalt an organischer Substanz (Gewichts%) des Mineralbodens (oberste Tiefenstufe).....	88
Abbildung 10-6: K_s Werte (mm/h) der obersten Tiefenstufe (0-20 cm)	89
Abbildung 10-7: Nutzbare Feldkapazität (potenzieller Bodenwasserspeicher in Volumens% des Mineralbodens)	90
Abbildung 10-8: Als Bodenspeicher zu Verfügung stehende Bodenmächtigkeit.....	92
Abbildung 10-9: Änderung der dominanten Prozesseinheiten zwischen Szenario ohne Verschlammung (links) und mit Verschlammung (rechts) bei Vorfeuchtebedingung „gesättigt“. Zur besseren Darstellung wurden die einzelnen Prozesse zusammengefasst (TS und SP zu einer Kategorie, alle ZA-Abflussprozesse zu einer Kategorie; verzögerte Oberflächenabflussprozesse OAs und OAv zu einer Kategorie)	93
Abbildung 10-10: Dominante Prozesseinheiten für das Modellszenario gesättigt, mit Verschlammung 0 (keine dominante Prozesseinheit), OA (Oberflächenabfluss), ZA (Zwischenabfluss), TS (Tiefensickerung), SP (Speicher), s (stark verzögert), v (verzögert), u (unverzögert), ohne Kürzel (keine dominante Reaktionseinheit).....	94
Abbildung 10-11: Dominante Prozesseinheiten für das Modellszenario gesättigt, ohne Verschlammung 0 (keine dominante Prozesseinheit), OA (Oberflächenabfluss), ZA (Zwischenabfluss), TS (Tiefensickerung), SP (Speicher), s (stark verzögert), v (verzögert), u (unverzögert), ohne Kürzel (keine dominante Reaktionseinheit).....	95
Abbildung 10-12: Oberflächenabflussbeiwerte für das Modellszenario gesättigt mit Verschlammung	97
Abbildung 10-13: Oberflächenabflussbeiwerte für das Modellszenario gesättigt ohne Verschlammung	98
Abbildung 10-14: Rauigkeiten (k_{st}), Zusammenstellung aus Angaben in der Literatur (Huber et al. 2021).....	99
Abbildung 11-1: Vergleich der modellierten Abflussbeiwerte (alle sechs Szenarien) mit jenen aus Beregnungsversuchen des BFW in OÖ, Punktbeschriftung interne ID, Landnutzungs-kategorie, gegebenenfalls mit <> Darstellung von Nutzungsänderungen.....	101
Abbildung 11-2: Nutzungswechsel PsiBer 0,07, PsiMod 0,93; Nachbarschaft ähnlich hoch (ca. 0,80)	102
Abbildung 11-3: Nutzungswechsel PsiBer: 0,63-0,71, PsiMod 0,61-0,63	103
Abbildung 11-4: P224 Mähwiese (Schuttboden): PsiBer 0,56, PsiMod 0,28; Westl Nachbarschaft 0,45, P225: Laubwald - PsiBer 0, PsiMod 0,13	103
Abbildung 11-5: PsiBer 0,35; PsiMod 0,79 – N/W/O Nachbarschaft 0-0,22	104
Abbildung 11-6: PsiBer 0,01; PsiMod 0,67, Nachbarschaft 0,07	105
Abbildung 11-7: P252 0,68: PsiBer 0,68; PsiMod 0,56, P253: PsiBer 0,84; PsiMod 0,56	105
Abbildung 11-8: P228 Wald: PsiBer 0,01, PsiMod 0,26; Nachbarschaft ähnlich; P229 Mähwiese: PsiBer 0, PsiMod 0,50; Nachbarschaft ähnlich.....	106
Abbildung 11-9: Vergleich der Abflussbeiwerte für die Landnutzungs-kategorien im Siedlungsgebiet bei einem gesättigten Vorfeuchteszenario, in Kartenform und als Histogramm (negativer Bereich: Tabellenwerte höher, positiver Bereich: Modellwerte höher).....	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Übersicht (Allgemeine Datengrundlagen), Quelle und projektspezifischer Informationsgehalt	16
Tabelle 4-2: Kennzahlen der Punktdaten	23
Tabelle 4-3: Definition der Tiefenstufen des Mineralbodens	24
Tabelle 5-1: Grenzwerte für TPI-Raster in HydroBOD OÖ	33
Tabelle 5-2: Übertrag der S-Klassen von Niederösterreich auf Oberösterreich ¹⁾ Werte aus der Substratkarte OÖ ²⁾ Werte und Daten aus der hydrogeologischen Substratkarte NÖ	36
Tabelle 5-3: Zwischenabfluss im geologischen Untergrund (Modellwerte nach Pirkl 2015 in Sortier et al. 2017); in Abhängigkeit der Neigung kommen die verschiedenen Kennwerte [0-1] zum Tragen (Nicht alle S-Klassen sind in OÖ vertreten, S-Klasse 99 steht für Gewässer)	36
Tabelle 5-4: Die für NÖ ermittelten Grenzneigungswinkel GNW für Sturzprozesse gelten auch in Oberösterreich	37
Tabelle 5-5: Nutzungsklassen Landwirtschaft mit LN_Code, INV_Code und DKM_Code	41
Tabelle 5-6: Nutzungsklassen Wald LN-Code	43
Tabelle 5-7: Nutzungsklassen (LN-Code) der neuen Landnutzungskarte (LSE = Landschaftselemente)	45
Tabelle 6-1: Liste der Prädiktoren	49
Tabelle 6-2: Input-Parameter Regionalisierung	50
Tabelle 6-3: Bodeneigenschaften, die sowohl in der Bodendatenbank des IKT als auch bei der österreichischen Bodenkartierung quantifiziert wurden	58
Tabelle 6-4: Grobstoffklassen nach KA5 für Pedotransferfunktionen und Standardkurven	61
Tabelle 6-5: Humusklassen nach KA5 für Pedotransferfunktionen und Standardkurven	62
Tabelle 6-6: Lagerungsdichteklassen nach KA5, für Pedotransferfunktionen und Standardkurven, TRD = Trockenrohdichte	62
Tabelle 8-1: Klassifikation der Verzögerung nach Prozessgruppen und Reaktionseinheiten	69
Tabelle 9-1: Eingabefiles für die HydroBOD - Modellierung	70
Tabelle 9-2: Definition des Vorfeuchtezustandes	75
Tabelle 9-3: Reduktion des ks-Werts in Abhängigkeit der Bodenart für das Szenario mit Verschlammung	77
Tabelle 9-4: Mittlere relative Änderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit auf beweideten landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von der Bodenart	78
Tabelle 9-5: Erhöhungsfaktoren für Landnutzungsarten zur Berücksichtigung der Makroporosität	79
Tabelle 9-6: Szenarien der Systemzustände	80
Tabelle 10-1: Liste der ermittelten bodenhydrologischen Kennwerte (laut Auftrag) mit Anmerkung zur Erstellungsprozedur	82
Tabelle 10-2: Änderung der Flächenanteile der dominanten Prozesseinheiten zwischen verschlammtem und unverschlammtem Szenario (Vorfeuchte: gesättigt)	95
Tabelle 10-3: Abflussbeiwertklassen nach Markart et al. (2004) in % des Oberflächenabflusses (Ψ_{const})	96
Tabelle 10-4: Änderung der Flächenanteile der Abflussbeiwertklassen zwischen verschlammtem und unverschlammtem Szenario (Vorfeuchte: gesättigt)	97
Tabelle 11-1: Abflussbeiwert im Siedlungsgebiet in Abhängigkeit von Neigung und Versiegelungsgrad (aus Lecher et al. 2001)	108
Tabelle 11-2: Übereinstimmung Prozesstyp Beregnung / modelliert (Treffer Oberflächenabfluss > 50 % (J/N) für die sechs modellierten Szenarien	109

Abkürzungsverzeichnis

AKL	Oberflächen-Abflussklasse (nach Markart et al. 2004)
ALPECON	GmbH, Technisches Büro, Schwerpunkt Geologie (Tirol)
AMA	Agrarmarkt Austria
asBM	Abflussspeichernde Bodenmächtigkeit
BAW	Bundesamt für Wasserwirtschaft
BD	Bulk density (Rohdichte)
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
BFW	Bundesforschungszentrum für Wald
Bgld	Burgenland
BIOSOIL	EU-Projekt (2006-2007), Folgeprojekt der WBZI
BMLRT/BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BMN	Bundesmeldenetz (Koordinatensystem)
BMON	A Cloud-Based System for High-Resolution Soil Moisture Monitoring over Austria (FFG)
BoBi	Bodenerhebung in Kernzonen des Biosphärenpark Wienerwald
BOKU	Universität für Bodenkultur, Wien
C	Kohlenstoff (Gehalt)
COPERNICUS	Teil des europäischen Erdbeobachtungsprogrammes
Corg	Gehalt organischer Substanz (im Mineralboden)
Cv	In der Bodenkunde: Horizont des Ausgangssubstrates verwittert
DGM	Digitales Geländemodell
DHM/DEM	Digitales Höhenmodell/Digital Elevation Model (DHM10: digitales Höhenmodell mit 10m Auflösung usw.)
DKM	Digitale Katastermappe
DORIS	Landesgeoinformationssystem Oberösterreich
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft
eBOD	Digitale Bodenkarte Österreichs (landwirtschaftlich genutzte Flächen) ⁴
effBM	effektive Bodenmächtigkeit
eHYD	Hydrographisches Jahrbuch online
FFG	österreichische Förderagentur für wirtschaftsnahe Forschung, Entwicklung und Innovation
FK	Feldkapazität des Bodens
FORSITE I	Dynamische Walddtypisierung Steiermark (2019-2022), LE 2014-2020
FORSITE II	Dynamische Walddtypisierung Oberösterreich, Niederösterreich, Burgenland (Start 2022, Abschluss voraussichtlich 2026), Waldfond. WF101746
GBA	Geologische Bundesanstalt, jetzt GeoSphere Austria
GEORIOS	GIS gestütztes System zur Dokumentation von Massenbewegungen in Österreich
GKxx	Geologische Karte mit Maßstabsangabe (z.B. GK200= Maßstab 1:200.000)
GMF	Gravitative Massenflüsse
GNW	Grenzneigungswinkel
GPV	Gesamtporenvolumen des Bodens
HRL-IMD	High Resolution Layer Imperviousness Density
HYPROB	Gerät zur Bestimmung von Feuchte, Druck und hydraulischer Leitfähigkeit von Bodenproben
GeoSphere Austria	Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie
IKT	Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (Petzenkirchen) am BAW
ILUP	Integrated Land Use Planning and River Basin Management
IMG-Layer	Imperviousness-Layer, stellt die räumliche Verteilung versiegelter Flächen dar
INV_Code	Nutzungsklassen in INVEKOS-Schlaglayer
INVEKOS	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem, Kontrollsystem für Agrarsubventionen
Ks	Vertikale Wasserleitfähigkeit im gesättigten Boden

LK	Luftkapazität des Boden
LN-Code	Code für die Landnutzung in INVEKOS
nFK	nutzbare Feldkapazität des Bodens
N/Q	Niederschlag/Abfluss (hydrologische Modelle)
nWSK	nutzbare Wasserkapazität
OSM	Open street map
ÖK50	Österreichische Karte Maßstab 1:50.000
OÖ	Oberösterreich
ÖROK	Österreichische Raumordnungskonferenz
ÖWI	Österreichische Waldinventur
ÖWK	Österreichische Waldkarte der ÖWI
pF	negativer dekadischer Logarithmus des Matrixpotenzials im Boden ($pF = -\log_{10}(\Psi \text{ in cm oder hPa})$)
PSINOT	Abflussbeiwertkarte Nordtirol
PTF	Pedotransferfunktion
PWP	Permanenter Welkepunkt
RCP	Representative Concentration Pathway (IPCC-Szenarien)
RMSE	Root-mean-square deviation (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
R ²	Bestimmtheitsmaß (Anpassung an Regression)
SAFFER-CC	ACR-Projekt: Sensitivity Assessment of Critical Condition for Local Flash Floods - Evaluating the Recurrence under Climate Change
SAGA-GIS	System für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen (Geoinformationssystem)
SDPE	Standard Deviation of Prediction Error
Sentinel-1	Satellit mit SAR (Radarsensoren)
sGes	Chemischer Substrattyp (vgl. Forsite II)
SSM	Surface Soil Moisture (relativer Wassergehalt der obersten Bodenschichte)
S/U/T	Sand, Schluff, Ton (Gehalt)
TPI	Topographischer Positionsindex
TRI	Topographischer Ruggedness-Index (topografische Heterogenität)
TS	Tiefenstufe (im Boden)
TW	Totwasser (Anteil)
WBZI	Waldbodenzustandsinventur
WebGIS	Webbasiertes Geoinformationssystem
WL	Wildbach- und Lawinenverbauung (Österreich)
WLK	Wildbach- und Lawinenkataster der WLV
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, jetzt GeoSphere Austria
Ψ	Matrixpotenzial oder Bodenwasserspannung (als Druck oder Länge ausgedrückt)

1. Einleitung und Problemstellung

In Oberösterreich traten in den letzten Jahren und Jahrzehnten immer wieder große Schäden durch extreme Niederschlagsereignisse und dadurch ausgelöste Abflussereignisse auf. Dies nicht nur entlang der großen Flüsse im Zuge advektiver Niederschlagsereignisse, sondern auch lokal in kleinen Einzugsgebieten bis hinunter auf die Hangskala durch konvektive Niederschläge, die zu einer Zunahme pluvialer Hochwässer führten. Schadereignisse werden im Wesentlichen durch ein Zusammentreffen von Starkregen und ungenügender Infiltration des Niederschlagswassers in den Boden verursacht (Zahnt et al. 2017). Zudem spielen auch Exposition und Vulnerabilität der vorhandenen Werte (Schadobjekte) gegenüber der auftretenden Gefahr eine wesentliche Rolle (Risiko).

Durch den vom Menschen verursachten Klimawandel ist mit häufigeren und intensiveren Extremereignissen zu rechnen, deren Auswirkungen, über die durch die natürliche Klimavariabilität verursachten, möglichen Schäden hinausgehen (IPCC 2022). Auch wenn die Prognosen für kurze konvektive Niederschlagsereignissen besonders unsicher sind, ist doch davon auszugehen, dass diese zunehmend intensiver werden (IPCC 2021). Hosseinzadehtalaei et al. (2020) fanden, dass Ereignisse mit Intensitäten hoher Jährlichkeit stärker steigen werden. Für 100-jährliche Niederschlagsereignisse kurzer Dauer (RCP 8.5 Szenario, 2071-2100) ist demnach in Europa mit einer Erhöhung von etwa 25 % zu rechnen.

Daneben sind weitere klimainduzierte Faktoren, insbesondere die Bodenvorfeuchte relevant. Auch die räumliche Verteilung landschaftsbildender Faktoren wie Boden, geologisches Ausgangsmaterial, Vegetation, Art und Intensität der Nutzung bzw. Bewirtschaftung beeinflussen die Prozesse der Abflussbildung wesentlich. Der Einfluss dieser Faktoren ist jedoch aus verschiedensten Gründen schwierig zu quantifizieren.

Bei Betrachtung kleiner Räume, so wie sie für das Auftreten pluvialer Hochwasserereignisse von Bedeutung sind, können sich unterschiedliche Abflussprozesse (gesättigter oder ungesättigter Oberflächenabfluss, schneller oder langsamer oberflächennaher Zwischenabfluss, tiefgründiger Zwischenabfluss) überlagern, gegenseitig abschwächen oder verstärken und in Abhängigkeit von der Gebietsgröße auch unterschiedliche Bedeutung aufweisen.

Für die Abschätzung des Abflusses stehen dementsprechend viele Ansätze zu Verfügung, die Palette reicht von Formeln und einfachen konzeptionellen Ansätzen bis hin zu komplexen physikalisch basierten Prozessmodellen (Beven 2001). Allen gemeinsam ist jedoch, dass sie – in unterschiedlicher Form, Qualität und Auflösung flächenhafte Information zu den wichtigsten Eingangsgrößen benötigen. Dazu gehört insbesondere Kenntnis über die Bodeneigenschaften, die die Wasserbewegung im Boden charakterisieren. Eine solche hydropedologisch basierte Bewertung von Standorten wird in verschiedenen Ansätzen verfolgt, wie z.B. dem HOST Verfahren (Boorman et al. 1995) oder dem HydroBOD Ansatz (Klebinde et al. 2012, Sotier et al. 2017).

2. Auftrag

Die Beauftragung erfolgte durch das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Gruppe Hochwasserschutz unter Beteiligung der Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Oberösterreich via Schlussbrief vom 13.7.2021.

Auftragnehmer ist das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Naturgefahren in Kooperation mit dem Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (BAW-IKT). Dem BFW obliegt dabei die Bearbeitung der Landschaftsbereiche „Wald“ sowie „waldfreie Hochlagen“, dem BAW alle Flächen der Landschaftsbereiche „Landwirtschaft“, „Siedlungsgebiet“ und „Gewässer“.

3. Ziele

Das Projektziel von HydroBOD OÖ ist die flächendeckende Bereitstellung von Planungsgrundlagen und standardisierter, homogener bodenhydrologischer Kennwerte in geeigneter räumlicher Genauigkeit und Auflösung für Oberösterreich.

Folgende konkrete Ziele sind im Projektantrag festgelegt

1. Eine unter hydrologischen Aspekten erstellte Landnutzungskarte auf Basis bestehender digitaler Kartengrundlagen
2. Homogene Datensätze zu ausgewählten bodenphysikalischen Parametern (Bodenart, Lagerungsdichte, Skelettgehalt, organische Substanz) für die Landnutzungseinheiten Landwirtschaft, Wald und waldfreie Hochlagen
3. Ausgewählte hydropedologische Kennwerte (nutzbare Feldkapazität, Luftkapazität, Gesamtporenanteil, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, effektive Bodenmächtigkeit, nutzbare Wasserspeicherkapazität) auf Basis der unter Pkt. 1 und 2 generierten Informationen
4. Karten zu dominanten Abflussprozessen für mehrere definierte Niederschlagsszenarien und Systemzustände. Diese werden gemeinsam mit dem Auftraggeber definiert.
5. Karten zum Oberflächenabfluss für definierte Niederschlags- und Systemzustandsszenarien

3.1. Verwendungshinweise, Genauigkeit

Die Bearbeitung erfolgt im regionalen Maßstab flächendeckend für Oberösterreich auf Basis bestehender, verfügbarer Datensätze. Basisdaten, die vom Projektkonsortium in das Projekt eingebracht wurden (u.a. Bodenkarte, Daten der ÖWI, WBZI, INVEKOS) dürfen nicht weitergegeben werden.

Dem regionalen Bearbeitungsmaßstab entsprechend sind die Ergebnisse, insbesondere die Abflussdispositionskarten, als Hinweiskarten zu interpretieren. Für Modellierungen im lokalen Maßstab sind sie im Gelände zu überprüfen und ggf. zu adaptieren. Aufgrund der unterschiedlichen Datenbasis ist im Bereich landwirtschaftlich genutzter Flächen eine höhere Genauigkeit zu erwarten als bei Waldstandorten und waldfreien Hochlagen. Im Bereich von Siedlungen und Infrastruktureinrichtungen ist aufgrund der Bebauung, nicht bekannter/berücksichtigbarer Ableitung des Oberflächenwassers (Dachrinnen, Kanäle), dem unbekannten Anteil planierter Flächen und intensiver Flächennutzung ebenfalls mit erhöhter Ergebnisunsicherheit zu rechnen.

Entsprechend des Projektauftrages sind die Ergebnisse nicht über Niederschlags-Abfluss-Modellierungen überprüft. Stehen im Anwendungsfall keine Messdaten für die Validierung zur Verfügung, ist eine besonders gewissenhafte Plausibilitätsbetrachtung der Ergebnisse vorzunehmen.

3.2. Produkte

Folgende Produkte sollen entsprechend des Projektantrages flächendeckend für Oberösterreich und nach definierten Tiefenstufen gegliedert erstellt werden:

- Vertikale Wasserleitfähigkeit gesättigt
- Gesamtporenvolumen
- Nutzbares Porenvolumen, berechnet aus nutzbarer Feldkapazität + Luftkapazität
- Nutzbare Feldkapazität
- Luftkapazität
- Totwasserkapazität
- Bodenart (Sand, Schluff, Ton)
- Skelettgehalt
- Lagerungsdichte
- Gehalt an organischer Substanz
- Bodenmächtigkeit
- Flächennutzung
- Oberflächenabflussbeiwert für definierte Niederschlags- und Systemzustandsszenarien
- Tabellen zur Oberflächenrauigkeit, mit Landnutzungsdatensatz verknüpfbar

4. Verfügbare Datengrundlagen

Auf ausdrücklich geäußerten Wunsch des Auftraggebers wurde im Rahmen des Projektes besonderer Fokus auf die Identifizierung und Analyse aller verfügbaren Datengrundlagen gelegt. Diese wurden hinsichtlich ihrer Eignung und des projektrelevanten Informationsgehalts ausführlich überprüft und bewertet (Tabelle 4-1).

4.1. Flächendaten

Unter Flächendaten werden Datensätze verstanden, die flächendeckend oder in Teilen zu Verfügung stehen.

Tabelle 4-1: Übersicht (Allgemeine Datengrundlagen), Quelle und projektspezifischer Informationsgehalt

Flächenhafte Unterlagen	Quelle	projektspezifischer Informationsgehalt	Anmerkung
Allgemein (Grenzen...)	LandOÖ	+++	
Gewässer/Gerinne	LandOÖ	++	nodata
DHM (1, 10)	LandOÖ	+++	Topoinizes
Geologie 1:200.000	GBA	+++	homogen
Geologie 1:50.000	Forsite II	++	inhomogen
Geologie 1:20.000	LandOÖ	++	inhomogen
Österr. Bodenkartierung (eBOD)	BFW	+++	landw. Boden
Österr. Waldkarte (ÖWK)	ÖWI/BFW	+++	Landnutzung
Digitale Katastralmappe (DKM)	BEV	+++	Landnutzung
INVEKOS Schläge	AMA	+++	Landnutzung
Gebäudelayer	LandOÖ	+++	Landnutzung
Straßennetz	LandOÖ	+	Versiegelung
Klima (T, N), Spartacus	ZAMG	++	Bodenbildung
Imperviousness HRL	Copernicus OGD	++	Versiegelungsgrad (%)
HydroBOD-NÖ	BFW/BAW	++	Regionalisierung

4.1.1. Allgemeine Datensätze

Allgemeine Datensätze, insbesondere Verwaltungsgrenzen sind in Österreich zum größten Teil frei verfügbar (data.gv.at). Um die Produkte mit den Datenformaten und räumlichen Referenzen des WebGIS-Systems des Landes Oberösterreich (doris.ooe.gv.at) kompatibel zu gestalten, wurden solche Daten teilweise dennoch vom Land Oberösterreich bereitgestellt. Alle Analysen und Produkte beziehen sich auf diese als Vektordatensatz verfügbaren Layer der Landesgrenzen.

4.1.2. Gewässer und Gerinne

Flächen unterhalb des Wasserspiegels (Bäche, Flüsse, Seen) werden in diesem Projekt von allen Analysen ausgeklammert, da Niederschläge, die auf Wasserflächen treffen per se 100 % abflusswirksam werden. Die Daten wurden als Vektordatensätze bereitgestellt.

4.1.3. Geländemodelle

Vom Land Oberösterreich wurden auch digitale Geländemodelle (DGM) als Rasterdatensätze unterschiedlicher Auflösung bereitgestellt. Für die Analysen wurden, je nach Fragestellung und der damit verbundenen notwendigen bzw. sinnvollen räumlichen Auflösung (bzw. dem damit verbundenen Genauigkeitsgewinn) in Relation zum Rechenaufwand im Allgemeinen das DGM10, für Details (z.B. Hangschuttmodellierung) zusätzlich auch das DGM1, verwendet.

4.1.4. Geologische Karten

Vom Land Oberösterreich und der GeoSphere Austria (ehemals GBA) wurden mehrere Unterlagen zur Geologie Oberösterreich in unterschiedlichem Maßstab und Informationsgehalt als Polygonlayer bereitgestellt. Für die Analysen, insbesondere der Ableitung von Substratklassen, standen geologische Karten in verschiedenen Maßstäben mit unterschiedlicher Transparenz der Datenquellen, Homogenität und Informationsgehalt und zur Verfügung, die hinsichtlich der Zielsetzungen im Projekt im Vergleich zueinander spezifische Vor- und Nachteile haben (Abbildung 4-1).

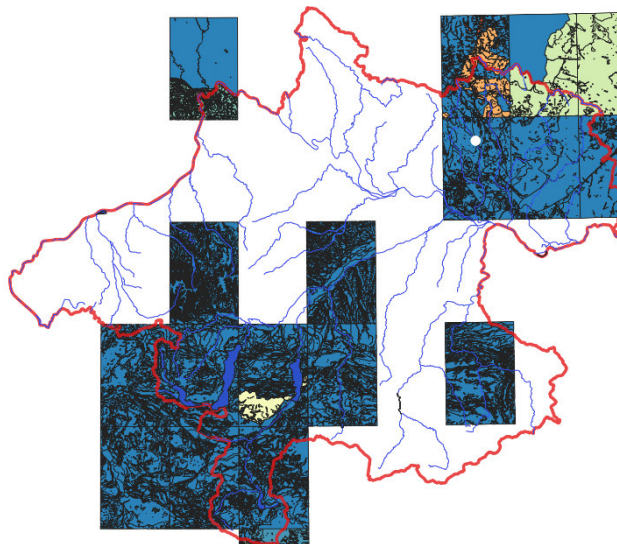


Abbildung 4-1: Geologische Karte 1:50.000, nur in Teilbereichen verfügbar (GeoSphere Austria)

GK200: Geologie 1:200.000

Vorteile: Flächendeckend und homogen
Standardisiert (über ganz OÖ)
Keine Blattschnitte (keine Versätze an den Grenzen)

Nachteile: Größte Auflösung

GK50: 1:50:000

Vorteile: Gute Auflösung, beste Qualität im Vergleich
Nachvollziehbarkeit (Quellen)

Nachteile: Nicht flächendeckend für ganz OÖ verfügbar (Abbildung 4-1)
 Nicht blattschnittbereinigt (Abbildung 4-2), Versätze, Probleme bei Regionalisierung und Plausibilisierung)

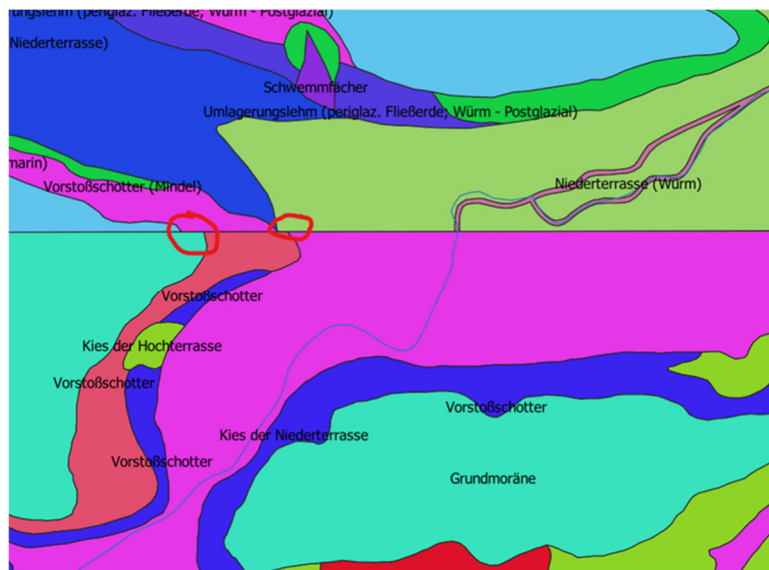


Abbildung 4-2: Geologische Karte 1:50.000 (GeoSphere Austria) modifiziert, Versätze bei Blattschnitten

GK20:

Vorteile: Höchste verfügbare Auflösung (in Teilbereichen)
 Flächendeckend verfügbar

Nachteile: Aus verschiedenen Quellen (Quelle GBA, Land OÖ)
 Inhomogene Qualität
 Intransparent (Quellen und Qualität)
 Wird aktuell immer wieder überarbeitet, zeitliche Inkonsistenz

FORSITE – Gentyen - Klassifikation

Aus den verfügbaren geologischen Unterlagen wurden im Rahmen des Projektes Forsite II neue Karten aus einer Kombination der GK 1:200.000, GK 1:50.000 und Geofast erstellt. Es handelt sich dabei einerseits um eine Karte des chemischen Substrattyps (sGes) und eine des genetischen Substrattyps. Auf Anfrage wurde seitens der Projektverantwortlichen von Forsite II die Nutzung dieser Unterlagen für das Projekt HydroBOD OÖ gestattet.

Der chemische Substrattyp wird anhand der mineralogischen Zusammensetzung beurteilt. Dabei werden die Anteile an Kalziumkarbonat, Magnesiumkarbonat, sauren Silikaten, basischen Silikaten und Tonmineralen bewertet (Forsite II, 2022). Ziel ist die Abschätzung der Nährstoffverfügbarkeit von Beständen, hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes lassen sich kaum Informationen ableiten. Der genetische Substrattyp klassifiziert den Bildungsprozess der jeweiligen Fest- oder Lockergesteins-Substratschicht.

Die im Zuge des Projektes Forsite II geplante Erstellung einer Karte physikalischer Substrattypen, die konkrete Bewertung der Bodenmatrix zum Ziel hat, stand leider (noch) nicht zu Verfügung.

Vorteile:

- Lt. Erstellern ist diese Kombination die qualitativ und fachlich beste Mischung

Nachteile:

- Nicht blattschnittbereinigt (Versätze, Abbildung 4-2)
- Intransparent (Quellen und Qualität)
- Nicht gesicherter Zusammenhang – Gentlyp – hydrologische Eigenschaften der Substrate bzw. kein direkter Zusammenhang sGes und Bodenhydrologie

4.1.5. Österreichische Waldkarte

Die Grundlage der von der österreichischen Waldinventur (ÖWI) erstellten, flächendeckenden Waldkarte sind primär Orthofotos. Als zusätzliche Informationen wurden DGMs, die ÖK50, der digitale Kataster und Straßenverzeichnisse genutzt. Der Datensatz wird seit 2020 jährlich mit aktualisierten Luftbildern und Orthofotos einem Update unterzogen. Er steht als Raster mit 1 m Auflösung zu Verfügung (Bauerhansl et al. 2007).

Die Definition der ÖWI, nach der bewaldete Flächen ausgeschieden werden, ist:

- Die Flächen müssen eine Mindestgröße von 500 m² haben, einzelne Baumgruppen werden daher nicht als Wald ausgeschieden (z.B. Kampfzone des Waldes)
- Mindestbreite sind 10 Meter, Windschutzanlagen oder bachbegleitende Ufervegetation werden daher oft nicht als Wald ausgeschieden
- Lücken < 10 m (z.B. Forststraßen) werden als Wald interpretiert
- Mindestüberschirmung mindestens 0,3; Parklandschaften werden daher meist nicht als Wald ausgeschieden
- Die Wuchshöhe ist, außer bei Neubewaldung, kein Kriterium (50 % einer Fläche > 3 Meter Höhe)

4.1.6. Österreichische Bodenkartierung

Die Daten der österreichischen Bodenkartierung (Schneider et al. 2001) sind für landwirtschaftlich genutzte Flächen in Oberösterreich flächendeckend als Polygonlayer verfügbar. Während in der offiziell abrufbaren Version der digitalen Bodenkarte (eBOD, bodenkarte.at) viele Kennwerte in klassifizierter Form eingepflegt sind (z.B. Bodentextur, Gründigkeit, etc.), waren für das Projekt auch die dahinterliegenden absoluten Zahlenwerte verwendbar.

4.1.7. Digitale Katastralmappe

Die digitale Katastralmappe (DKM) liegt für das gesamte Projektgebiet flächendeckend als Vektordatensatz vor. Sie beinhaltet die räumliche Ausdehnung aller Grundstücksparzellen und weist zudem deren Flächennutzungsart aus. Um die Qualität der DKM aufrecht zu erhalten, werden vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) laufende Aktualisierungen durchgeführt. Innerhalb der DKM kann es zu unterschiedlichen Qualitätsstufen kommen, da

es nicht in allen Gebieten zu Folgevermessungen gekommen ist und noch die Grenzen der Erstvermessung im 19. Jahrhundert ausgewiesen sind (BEV 2021).

4.1.8. INVEKOS

Im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (INVEKOS) werden Daten zu allen landwirtschaftlich genutzten Flächen verwaltet, die von Betrieben bewirtschaftet werden, die im Rahmen der gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union an Förderprogrammen teilnehmen. In Oberösterreich sind 98,3 % aller landwirtschaftlichen Nutzflächen Teil des INVEKOS Förderprogramms (Amt der OÖ-Landesregierung 2020). Die Digitalisierungsgrundlagen der INVEKOS-Daten sind Luft- und Satellitenbilder sowie die elektronischen Hofkarten der Agrarmarkt Austria (AMA). Dies ermöglicht eine lagegenaue Verarbeitung von Daten zur landwirtschaftlichen Nutzung auf den Feldstücken und Schlägen eines Betriebs.

4.1.9. Gebäudelayer

Der Gebäudelayer beinhaltet Gebäudeflächen, die mittels verschiedener fernerkundlicher Methoden erhoben wurden, sowie digitalisierte Gebäude der DKM. Der Erfassungszeitraum geht von 2008-2020 und weist einen höheren Informationsgehalt auf als die Gebäude der DKM allein. Es handelt sich dabei um einen Polygondatensatz mit 181,24 km² an Gebäudefläche.

4.1.10. Klima

Nach Gelybô et al. (2018) hat das Klima erheblichen Einfluss auf den Boden bzw. die Bodenbildung. Klimadaten werden vom Land Oberösterreich auf dem Landesgeoinformationssystem (DORIS) bereitgestellt. Sie enthalten digitale Karten und Informationsblätter mit Tabellen, Grafiken und textlichen Analysen. Es sind viele Klimaparameter wie Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer, aber auch Informationen zu Gletschern, Vegetationsperioden oder Klimaszenarien abrufbar.

Im Rahmen des Projektes ForSite II wurden wesentlich hochauflösendere Klimadaten erstellt, die eine Rastergröße von 10 m Metern aufweisen (Land Oberösterreich 1 km). Die Verwendung dieser Daten ließ eine höhere räumliche Genauigkeit erwarten und wurde daher für die Regionalisierung in HydroBOD OÖ herangezogen. Folgende Klimaindikatoren wurden für die Regionalisierung der Waldbodeneigenschaften und waldfreien Hochlagen verwendet:

- Evapotranspiration
- Globalstrahlung
- Hygrische Kontinentalität
- Thermische Kontinentalität
- Jahresniederschlag
- Durchschnittliche Jahrestemperatur
- Länge der Vegetationsperiode
- Wasserbilanz

4.1.11. Versiegelungsgrad

Um das Ausmaß der Bodenversiegelung in Österreich und anderer europäischer Länder zu ermitteln, bietet der „Imperviousness“ High Resolution Layer Imperviousness Density (HRL IMD) aus dem COPERNICUS Projekt (Copernicus Global Land Service) eine aktuelle und aussagekräftige Datengrundlage (Smith 2020; Strand 2022).

Basierend auf Sentinel-2 Satellitendaten wird der HRL IMD seit 2018 in einer 10 m Pixelauflösung zur Verfügung gestellt und zeigt die räumliche Verteilung aller versiegelten Landnutzungseinheiten. Der Grad an Bodenversiegelung wird in Prozent angegeben und ist in Klassen von 0-100 eingeteilt. Der HRL IMD ist für verschiedene Jahre vorhanden, womit sich auch zeitliche und räumliche Veränderungen der Landnutzung erheben lassen (Smith 2020). Das Anwendungsfeld bietet zudem viele verschiedene Möglichkeiten, darunter auch die Modellierung hydrologischer Prozesse, Verlust wertvoller Böden bzw. auch die unumkehrbare Verdichtung des Bodens oder der Rückgang der Biodiversität (GeoVille 2018).

4.1.12. Flächendeckende Bodenfeuchtedaten (Copernicus, BMon)

Vom Copernicus Global Land Service der Europäischen Union sind Informationen zu Surface Soil Moisture (SSM, relativer Wassergehalt der obersten Bodenschicht) in einer Auflösung von 1 km verfügbar (Abbildung 4-3). Sie werden von Sentinel-1 C-SAR seit Oktober 2019 mittels Radarsensoren gemessen (Copernicus Global Land Service 2023).

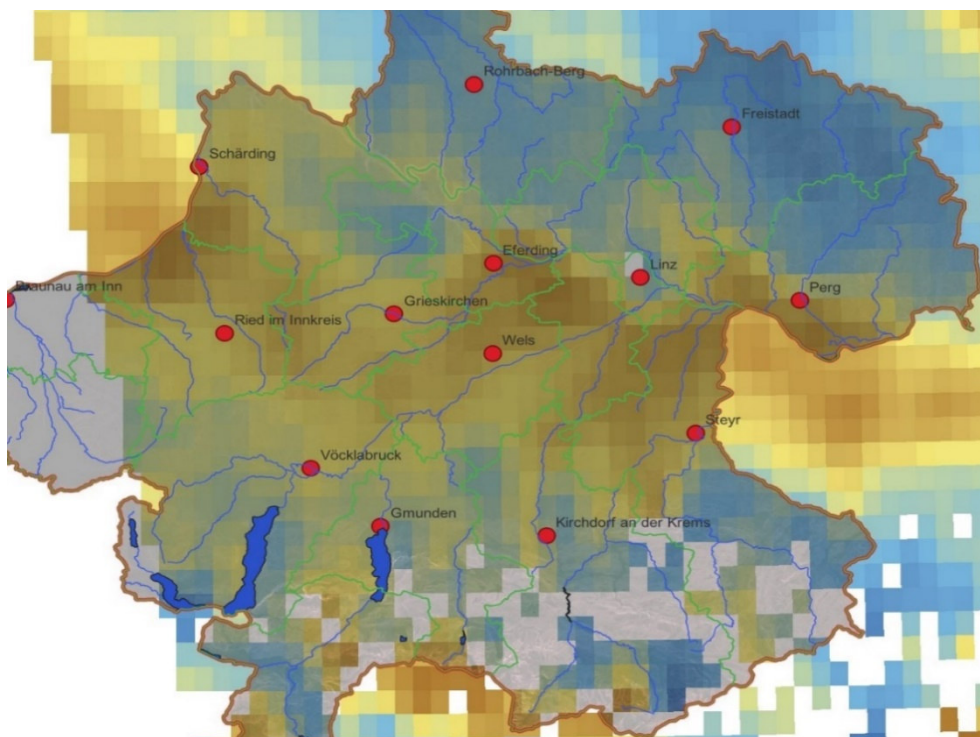


Abbildung 4-3: Relative Bodenfeuchte (SSM), Oberösterreich, 9.4.2023 (Copernicus Global Land Service)

Das FFG Projekt BMon (2018-2020) hatte zum Ziel, ein verbessertes System für die Beobachtung der oberflächennahen Bodenfeuchtigkeit zu etablieren, das österreichweit

flächendeckend Informationen mit geringer zeitlicher Verzögerung für unterschiedliche Nutzungen bereitstellt. Auf Basis einer neuen Generation hochauflösender Satellitendaten (Sentinel-1 Mikrowellendaten) und der Koppelung mit drei unterschiedlichen Prozessmodellen (der Hydrologie, Agronomie, und Meteorologie) wird die Bodenfeuchte in einem 100 m Raster abgeschätzt und über Ensembles mit in situ Bodenfeuchtigkeitsdaten und anderen, eng mit der Bodenfeuchtigkeit gekoppelten Messungen (Niederschlag, Abfluss, Grundwasserstand, Ernte) verglichen.

Wenn auch die Bodenfeuchtedaten über die Feuchtedifferenzen zwischen definierten Messzeitpunkten starken Bezug zu den Bodeneigenschaften haben, so sind die Zusammenhänge doch komplex, da neben der Bodenart auch viele andere Einflussparameter (z.B. lokale Niederschläge, Wind, Sonneneinstrahlung) für das Ausmaß der Feuchtedifferenz von Bedeutung sind. Deren Einfluss kann, wenn überhaupt, nur mit erheblichem Aufwand herausgefiltert werden und stellt jedenfalls eine bedeutende Fehlerquelle dar. Grundsätzlich ist die räumliche Auflösung von maximal 100 m für die Fragestellungen gegenständlichen Projektes (zu) gering, zudem nimmt die Qualität der Bodenfeuchtedaten mit zunehmender Vegetationsdichte und Höhe (Wald) ab. Aus diesen Gründen wurden diese Daten nicht für die Erstellung der Bodeninformationen herangezogen.

4.1.13. Sonstige Daten

Für Darstellungen und zur Orientierung wurden noch allgemein verfügbare Daten wie z.B. die OSM (open street map), Bezirksorte, Gewässerlayer etc. verwendet. Die Festlegung des Arbeitsgebietes erfolgte auf Basis eines vom Land OÖ bereitgestellten Grenzlayers.

4.2. Punktinformationen - Bodenprofilaten im Gebiet

Es wurden sämtliche zur Verfügung stehende Bodendaten (Bodenprofile) für Oberösterreich gesammelt, gesichtet und hinsichtlich des Informationsgehalts und der Eignung zur Erreichung des Projektzieles bewertet (Abbildung 4-4, Tabelle 4-2). Im Rahmen des Projektes wurden zusätzlich Bodeninformationen an ausgewählten Standorten erhoben.

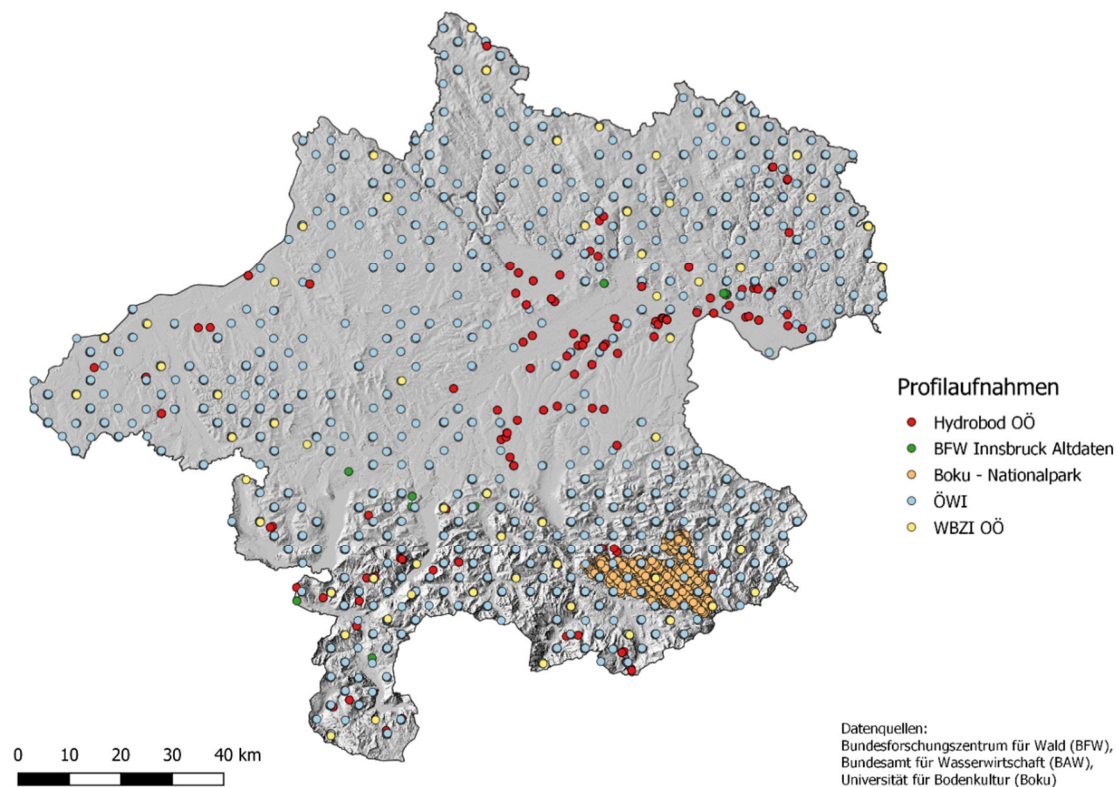


Abbildung 4-4: Punktdaten (wegen Übersichtlichkeit ohne eBOD), Quellen und Verteilung

Tabelle 4-2: Kennzahlen der Punktdaten

Punkte (Bodenprofile)	Quelle	Projektspez. Informationsgehalt	Bereich	Anzahl Profile	Anmerkung
eBOD	BFW	+++	LW	1649	OÖ (zugeordnet zu Flächen)
Aufnahmen im Projekt	BFW	+++	W/Ho	50	OÖ-Laboranalysen
Aufnahmen im Projekt	BAW	+++	LW	50	OÖ-Laboranalysen
Waldbodenzustandinventur	WBZI	+++	W	69	OÖ-Laboranalysen
BFW Bestand	BFW, Inst.3	+	W/LW	21	(OÖ-Laboranalysen)
BFW Bestand	BFW, Inst.6	++	W	34	OÖ-Laboranalysen
BAW Bestand	BAW	+++	LW	487	Laboranalysen AT
NP-Kalkalpen	BOKU	++	W/Ho	(1777)	Raster
Österr. Waldinventur	ÖWI/BFW	+	W	517	OÖ - Raster
GEORIOS	GeoSphere A	(+)			Hangschuttmod.
WLK Ereignisdokumentation	WLV	(+)			Hangschuttmod.
Hydrobod NÖ	BFW	++	W/LW/Ho		Vergleich/Regionalisierung

Der Fokus der Suche lag dabei auf Datensätzen, die bodenphysikalische Parameter enthalten, wie sie für die Ableitung der auszuweisenden bodenhydrologischen Kennwerte oder von Pedotransferfunktionen notwendig sind. Das sind insbesondere Bodenmächtigkeit, Bodenart (Gehalt S/U/T), Lagerungsdichte, Kohlenstoffgehalt und Skelettanteil. Für HydroBOD sind weiters Informationen zur Bodenmächtigkeit, Grundwasser, Staukörpern und Humusaufgabe relevant. Die Punktdaten aus den landwirtschaftlichen Flächen (eBOD) wurden aufgrund ihrer

großen Anzahl nicht in Abbildung 4-4 dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu erhalten. Diese Standorte sind auf www.bodenkarte.at abrufbar. Die Daten aus den oberösterreichischen Bodenzustandsinventuren (BZI) konnten nicht zur Verfügung gestellt werden.

Die heterogenen Datensätze, die aus unterschiedlichen Quellen stammen und sowohl Aufnahmen im Feld wie auch Laboranalysen beinhalten, wurden für die weiteren Analysen homogenisiert:

- Abgleich und Vereinheitlichung von Spaltennamen und Inhalten
- Abgleich und Vereinheitlichung von Klassifizierungen und deren Codierungen
- Abgleich von NoData-Werten
- Vereinheitlichung der Einheiten (von Parametern)
- Umrechnung der Koordinaten in das BMN31 (MGI / Austria GK M31, EPSG 31255)
- Umrechnung der Aufnahmen mit deutschen Bodentexturklassen in österreichische Texturklassen
- Standardisierung von Parametern in Klassen mit numerischen Angaben
- Umrechnung von genetischen Horizonten in geometrische Tiefenstufen
- Umrechnung von bereits vorhandenen geometrischen Tiefenstufen in drei Tiefenstufen

Vor der Weiterverarbeitung der angeführten Punktdatensätze in den Regionalisierungsschritten, wurden die genetischen Mineralbodenhorizonte in diskrete Tiefenstufen (TS) umgerechnet. Die kontinuierlich verlaufenden Horizontober- und untergrenzen wurden für jeden Standort individuell bezüglich ihrer Zugehörigkeit zu einer Tiefenstufe faktorisiert. Danach wurden die anhand dieser Faktoren gewichteten Werte den jeweiligen Tiefenstufen zugewiesen. Für die hydrologische Modellierung wurden die in Tabelle 4-3 definierten Tiefenstufen als Basis der Regionalisierung gewählt.

Tabelle 4-3: Definition der Tiefenstufen des Mineralbodens

Tiefenstufe (TS)	Von – bis [cm]
1	0 – 20
2	20 – 50
3	50 – 80

4.3. Geländeaufnahmen im Rahmen von HydroBOD OÖ

Im Zeitraum Sommer 2021 bis Frühjahr 2022 wurden an insgesamt 100 Standorten der Landnutzungsklassen Landwirtschaft, Wald und waldfreie Hochlagen in Oberösterreich Bodenprofile erstellt, angesprochen und Proben geworben (Abbildung 4-4, Abbildung 4-5). Es wurden sowohl Lockermaterial- als auch ungestörte Zylinderproben in bis zu fünf Tiefenstufen für die labortechnische Ermittlung bodenphysikalischer Kennwerte (u.a. Bodentextur, Lagerungsdichte, Anteil organischer Substanz, Porenvolumen und gesättigte Leitfähigkeit) entnommen.

In Siedlungsgebieten gibt es aufgrund von Aufschüttungen, Umlagerungen oder Verdichtung durch die Auflast von Gebäuden oder Verkehrswegen kaum natürliche Bodenbildung, weshalb auch eine Beprobung nicht als sinnvoll erachtet wurde. Stadtböden dienen vorrangig dazu, die Auflast des Siedlungsgebietes zu tragen und verlieren dabei viele natürliche Funktionalitäten, wie die Fähigkeit Wasser aufzunehmen oder eine gute Durchlüftung des Bodens (ÖROK 2023).

4.3.1. Geländeaufnahmen: Wald und Hochlagen (BFW)

Die Profile auf Waldstandorten und waldfreien Hochlagen wurden, wenn möglich, > 60 cm ab Mineralboden-Oberkante gegraben (Abbildung 4-5). Mit einem Pürckhauer-Bohrer wurde (soweit möglich) bis 1 m Tiefe nachgeschlagen um gegebenenfalls sich wesentlich ändernde hydrologisch relevante Parameter (z.B. Stauhorizont) zu identifizieren. In diesen Fällen wurde das Profil entsprechend tiefer gegraben.

Die Ansprache im Feld wurde mittels BFW-Standardformular durchgeführt, dieses umfasst:

- Allgemeine Daten (Lage, Erheber:in, Datum, Relief usw.)
- Vegetation (Wald-Baumarten, Schlussgrad und Struktur, Bodenvegetation)
- Landnutzung – anthropogener Einfluss (Weide, Mahd, Ackerland, Bodenverdichtung etc.)
- Ansprache der Bodeneigenschaften im Feld:
 - Auflage-Humusform und Lagerung
 - Mineralbodenansprache bodenhydrologisch relevanter Eigenschaften je Horizont (Mächtigkeit, Bodenart mittels Fingerprobe - österr. Texturdreieck, Skelettgehalt, Lagerungsdichte, Durchwurzelung, Stauschichten, Bodenmächtigkeit)
- Abflussspezifische Hinweise (Muldenrückhalt, Feingerinnenetz, Fließspuren, Rauigkeit und Abflussklasse nach Markart et al. 2004)
- Ausgesuchte geologische Parameter nur, soweit aufgrund der Bodengrube oder in der Nähe befindlicher Aufschlüsse eindeutig möglich

Ein kurzes Video dazu ist verfügbar:

<https://www.instagram.com/reels/audio/975518526685565/>



Abbildung 4-5: Links Bodenprofil, flachgründiger Braunlehm auf Kalk, horizontweise Bodenansprache; rechts: Stechzylinder-Probenwerbung für Laboranalysen

Die Auswahl der Erhebungspunkte erfolgte für waldfreie Hochlagen (20 Profile) und Waldflächen (30 Profile) hauptsächlich auf Basis von Informationen aus der Geologischen Karte und einer vorläufigen, groben Substratklassifizierung. Bei dieser Vorauswahl wurden topographische Merkmale und aktuelle Nutzungen vor Ort nach Möglichkeit berücksichtigt. Wichtige Faktoren in der Praxis der Datenerhebung waren auch die Zugänglichkeit der Standorte und die Zustimmung der Grundstückseigentümer:innen.

4.3.2. Geländeaufnahmen: Landwirtschaft

Bei der Auswahl der zu beprobenden landwirtschaftlichen Böden wurde die Bodendatenbank des BAW-IKT zugrundegelegt. Es sollte eine möglichst zielgerichtete Erweiterung dieses Datensatzes durch die Beprobung von wenig repräsentierten Böden (in diesem Fall Bodenarten) erzielt werden, weswegen hauptsächlich tonreiche Böden in Oberösterreich ausgewählt wurden.

Im Gelände wurde die Lage der Profilgrube mittels Pürckhauer-Bohrstock bestimmt, um eine erste Beurteilung der Bodenbeschaffenheit zu ermöglichen. Die Profilgrube wurde auf eine Mindestdiefe von 80 cm ausgehoben, was der dritten Tiefenstufe im Modell entspricht. Das Bodenprofil wurde gemäß der österreichischen Bodensystematik beschrieben, und die Bodeneigenschaften wurden in einem Aufnahmeformular dokumentiert. Es wurden drei ungestörte Stechzylinderproben pro Horizont/Tiefenstufe entnommen, und pro Tiefenstufe wurde eine gestörte Mischprobe genommen.

4.4. Bestehende Datensätze

4.4.1. Digitale österreichische Bodenkarte (eBOD)

Die eBOD ist eine Web-GIS-Applikation der digitalen Bodenkarte und enthält flächendeckend und in hoher Auflösung hydropedologisch relevante Informationen für landwirtschaftlich genutzte Böden Österreichs (Abbildung 4-6).

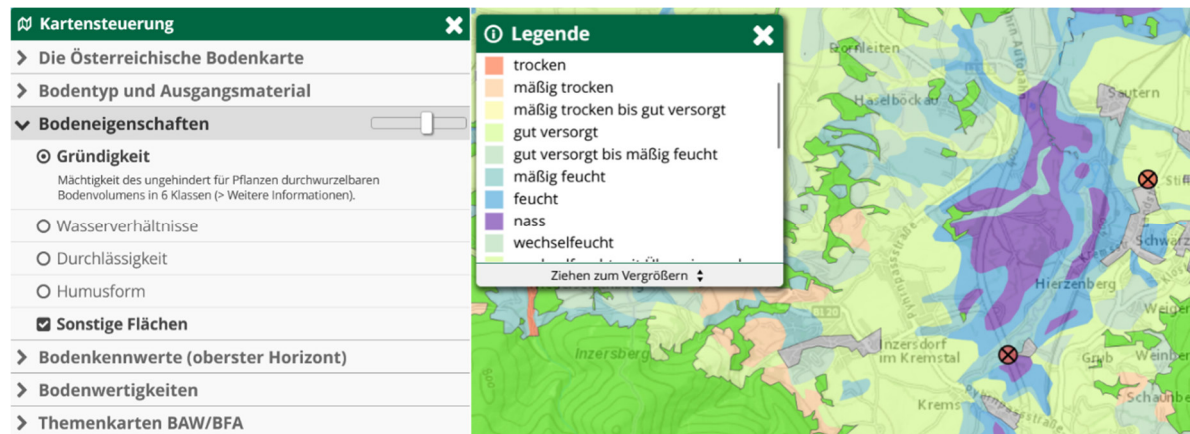


Abbildung 4-6: Inhalte der eBOD (links) und kartographische Darstellung (rechts, Bsp. Wasserverhältnisse)

Sie basiert auf der Geometrie der seit dem Jahr 1958 durchgeführten Bodenkartierung, welche als GIS-Datensatz digitalisiert wurde. Dieser Datensatz umfasst nicht nur die räumliche Abgrenzung der verschiedenen Bodenformen, sondern auch detaillierte textliche Beschreibungen, die Informationen zu den Charakteristiken und Besonderheiten jeder einzelnen Bodenform, sowie deren Variationen. Eine Bodenform kann mehrere Kartiereinheiten umfassen, deren Eigenschaften innerhalb bestimmter definierter Schwankungsbreiten übereinstimmen. Jeder Bodenformation, dargestellt als Polygonfläche in der eBOD, ist zudem ein repräsentatives Leitprofil zugeordnet.

Dieses Leitprofil verfügt über standardisierte Beschreibungen der Bodenhorizonte sowie Analyseergebnisse bezüglich der bodengenetischen Eigenschaften (BFW 2010, Schneider et al. 2001). Die so ermittelten Bodenkennwerte sind dem jeweiligen Horizont zugewiesen, die repräsentierten Tiefenbereiche sind also sehr variabel. Für die spätere Verwendung ist ein Verarbeitungsschritt notwendig, der die variablen, horizontbezogenen Daten auf die im Projekt HydroBOD OÖ verwendeten, fixen Tiefenstufen umlegt. Dazu wurde ein gewichtetes arithmetisches Mittel über den gewünschten Ausgabebereich gebildet. Tiefenstufen, die nur teilweise vorhanden waren, wurden anteilmäßig berücksichtigt. So ist bei einer Bodenmächtigkeit von 35 cm das Speichervolumen der obersten TS (0-20 cm) voll jenes der 2. TS (20-50 cm) zur Hälfte und jenes der untersten TS (50-80 cm) gar nicht eingerechnet.

Bei der Verwendung der digitalen Bodenkarte für hydrologische Bewertungen muss berücksichtigt werden, dass die meisten Daten der Bodenkartierung aus Geländeaufnahmen der 1960er und 1970er Jahre stammen. Seit dieser Zeit haben die Böden zahlreiche

Veränderungen erlebt, die hauptsächlich auf natürliche Prozesse, aber auch auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind, insbesondere in den siedlungsnahen Gebieten.

4.4.2. Waldbodenzustandsinventur (WBZI/ BIOSOIL)

Für Analysen auf Waldflächen stellen die Erhebungspunkte der WBZI bzw. von BIOSOIL (Folgeerhebungen, BFW 2013) eine wertvolle Datenquelle dar, da sie viele hydropedologische Informationen enthalten. Ihre Anzahl ist aber gerade in Oberösterreich im Verhältnis zur Gesamtfläche des Landes sehr gering. Weiters decken die Daten der WBZI-Punkte nicht alle für HydroBOD relevanten Tiefenstufen ab. So konnten in der Regel nur Messwerte der Tiefenstufe 2 (20 – 50 cm) herangezogen werden.

4.4.3. Österreichische Waldinventur (ÖWI)

Neben der ÖWK standen auch die vorteilhaft verteilten Erhebungspunkte (Raster) der der ÖWI zu Verfügung. Der Fokus dieser Erhebungen liegt allerdings auf Waldparametern, hydropedologische Informationen sind nur teilweise enthalten (z.B. Bodenmächtigkeit).

4.4.4. HydroBOD NÖ

Im Zuge des Projektes zeigte sich, dass die Datengrundlage in Oberösterreich trotz zusätzlicher Aufnahmen und Analysen im Rahmen des Projektes, insbesondere die geringe Anzahl der Bodenprofile in den Bereichen des Waldes und der Hochlagen, für viele relevante Parameter sehr spärlich ist. Da in Niederösterreich großteils ähnliche geologische und bodenspezifische Verhältnisse zu finden sind wie in Oberösterreich, wurden die im Rahmen des Projekts HydroBOD NÖ gesammelten Bodeninformationen ebenfalls aufbereitet, zusätzliche Informationen nachgeführt und für verschiedene Fragestellungen, insbesondere im Bereich der Regionalisierung, herangezogen.

4.4.5. Projektdaten BAW

Eine Sammlung von Labormesswerten aus dem Forschungsbetrieb des BAW-IKT wurde für die Verwendung im Projekt HydroBOD OÖ aufbereitet. Der Datensatz umfasst bodenphysikalische Daten aus diversen Projekten und Monitoringkampagnen von 1992 bis 2022 und repräsentiert verschiedenste Bodentypen und Landschaftsräume aus ganz Österreich. Da die Messdaten zur Beantwortung unterschiedlicher Forschungsfragen gewonnen wurden, stehen für jede Zielvariable unterschiedlich viele Datensätze zur Verfügung. Zur Entwicklung neuer Pedotransferfunktionen zur Abschätzung von hydrologischen Bodeneigenschaften für landwirtschaftliche Flächen wurden Daten aus ganz Österreich verwendet, die auch die notwendigen hydrologischen Kennwerte für den ungesättigten Zustand enthalten (z.B. Feldkapazität, permanenter Welkepunkt; vgl. Kapitel 6.2.2). Insgesamt umfasst dieser aufbereitete Datensatz etwa 2500 Probehorizonte aus 520 Profilen.

4.4.6. Projektdaten BFW

Aus den Projekten Rainman, SAFFER, versiegelte Flächen und gegen Projektende auch aus Erhebungen im MZG-Rindbach, standen im Zuge von Berechnungen gewonnene Bodeninformationen zu Verfügung. Im Wald liegen allerdings nur fünf dieser Aufnahmestandorte. Die Geländedaten und Laboranalysen aus dem Projekt Forsite II (Gebiet

OÖ, NÖ, Bgld) konnten nicht in HydroBOD OÖ einfließen, da sie noch nicht zu Verfügung standen. Mit Abschluss dieses Projektes (voraussichtlich 2026) besteht eine wesentlich verbesserte Datengrundlage für Waldflächen.

4.4.7. Kartierung Nationalpark Kalkalpen

Von 1994-2003 wurden vom Institut für Waldökologie (BOKU Wien) im Gebiet des Nationalparks Kalkalpen Geländeerhebungen durchgeführt, in denen auch hydropedologische Informationen enthalten sind, es wurden aber keine Bodenproben labortechnisch analysiert.

5. Aufbereitung der Datengrundlagen

5.1. Laboranalysen der Geländeaufnahme-Proben

Die bei den Feldaufnahmen geworbenen Bodenproben wurden am BFW-Innsbruck und am BAW-IKT Petzenkirchen labortechnisch analysiert.

Folgende Analyseschritte wurden dabei an den Lockermaterialproben durchlaufen:

- Mehrere Tage Lufttrocknung bei Raumtemperatur
- Siebung auf 2 mm, um Feinbodenfraktion abzutrennen
- Bestimmung der Feststoffdichte
- Nasssiebung (Lösung) auf 0,063 mm (Grob/ Mittel/ Feinsand)
- Ermittlung der organischen Substanz (Glühverlust)
- Bestimmung der Korngrößenverteilung der Schluff- und Tonfraktion (BFW: Nasssiebung bis 63 µm, < 63 µm Malvern Mastersizer, BAW-IKT: Nasssiebung und Sedimentationsmethode)
- Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz, Wiegung
- Anpassung der Korngrößen (Schluff/ Ton) entsprechend dem Messverfahren

An ungestörten Zylinderproben:

- Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (KSAT, metergroup.com)
- Bestimmung der ungesättigten, hydraulischen Bodeneigenschaften mittels Verdunstungsmethode und Taupunkthygrometrie (HYPROP, WP4C; metergroup.com)
- Bestimmung der Lagerungsdichte

Eine ergänzende Beschreibung der Methoden findet sich in Anhang 2.

5.2. Geologie

Geologische Karten wurden im Projekt zur Ableitung von Bodensubstratkarten mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften in Bereichen verwendet, in denen keine anderen (besseren) flächenhaften Bodeninformationen zu Verfügung standen. Bei der Auswahl der für die Zielerreichung am besten geeigneten geologischen Karte sind die Anforderung an Standardisierung (Datenhomogenität für OÖ, z. B. keine Blattschnitte), räumlicher Auflösung, Qualität und Aktualität zu gewichten. Schließlich wurde die GK200 aufgrund ihrer Homogenität gewählt. Die geringere räumliche Auflösung wurde, da die Substratklassen eine Zusammenfassung über mehrere geologischen Einheiten sind, als weniger bedeutend bewertet als die Inhomogenität der anderen Produkte. Zudem stehen in weiten Bereichen um Siedlungsräume bessere Bodeninformationen der eBOD zu Verfügung.

5.3. Topographische Daten

Auf Basis des digitalen Höhenmodells (DHM) mit 10 m Auflösung wurden zahlreiche topographische Indizes abgeleitet, die in unterschiedlichem Maße Einfluss auf die Bodenbildung, die Bodenfeuchte und den Oberflächenabfluss haben können. Diese Indizes werden für die Regionalisierung der Bodenkennwerte als Kovariablen verwendet.

5.3.1. Krümmung (curvature)

Mit der Krümmung (zweite Ableitung der Geländehöhe) wird die Form der Oberflächenneigung beschrieben (konkav, konvex, eben). Sie ermöglicht es, die Wasserverteilung an Land, Bodenerosions- und Depositionsmuster zu identifizieren.

5.3.2. Konvergenz Index (convergence)

Der Konvergenzindex stellt die Konvergenz/Divergenz in Bezug auf den Oberflächenabfluss dar, mit ähnlichem (geglättetem) Informationsgehalt wie die ebene und horizontale Krümmung. Bei der Berechnung wird die Exposition der umliegenden Zellen in Bezug auf die zentrale Zelle überprüft (Abbildung 5-1). Das Ergebnis sind Prozentwerte, wobei negative Werte konvergierenden und positive Werte divergierenden Strömungsverhältnissen entsprechen.

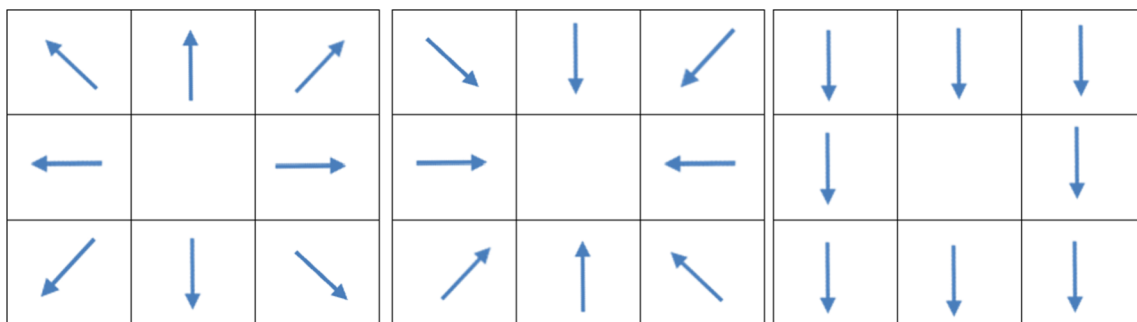


Abbildung 5-1: Konvergenzindex: Informationen zur Lage der Pixel in Bezug auf die Nachbarzellen (Bsp. links Kuppe, Mitte Mulde, rechts Hang)

5.3.3. Ausrichtung (aspect)

Die Exposition beschreibt die Neigungsrichtung eines Hanges als Richtung der Flächennormale in Bezug auf die Nordrichtung und hat durch die damit verbundene unterschiedliche Sonneneinstrahlung Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt.

5.3.4. Neigung (slope)

Die Hangneigung gibt Auskunft über den Neigungswinkel zwischen einer Hangfläche und dem Geoid als Bezugsfläche im Schwerfeld der Erde und beeinflusst die Bodenbildung in mehreren Beziehungen (z.B. Erosion, Hangwasser).

5.3.5. Hanglänge - Abflussakkumulation und Fließlänge (slope length)

Die Fließrichtung ergibt sich aus dem Neignungsvergleich der Nachbarzellen – jeweils jene mit der größten Neigung wird ausgewählt. Die Abflussakkumulation beschreibt die Anzahl der

Rasterzellen (Einzugsgebiet) oberhalb einer Rasterzelle, die Fließlänge jene (Hanglänge) bis zu einem Gerinne.

5.3.6. Topographische Heterogenität (tri)

Der topographische Ruggedness-Index (TRI, Riley et al. 1999) ist ein Maß für den Höhenunterschied zwischen benachbarten Zellen eines DEM. Er wird über die Quadratwurzel der acht quadrierten Höhenunterschiede gebildet und bietet ein objektiv ermittelbares, quantitatives Maß für die Geländeheterogenität.

5.3.7. Topographischer Positionsindex (tpi)

Der topografische Positionsindex ist eine Methode zur Klassifizierung des Geländes, bei der die Höhe jedes Datenpunktes im Vergleich zu seiner Umgebung bewertet wird. Liegt ein Punkt höher als seine Umgebung, so ist der Index positiv (z. B. bei Bergrücken), liegt er tiefer, so ist er negativ (Täler). Für die Interpretation spielt der Radius der betrachteten Umgebung eine Rolle (Abbildung 5-2).

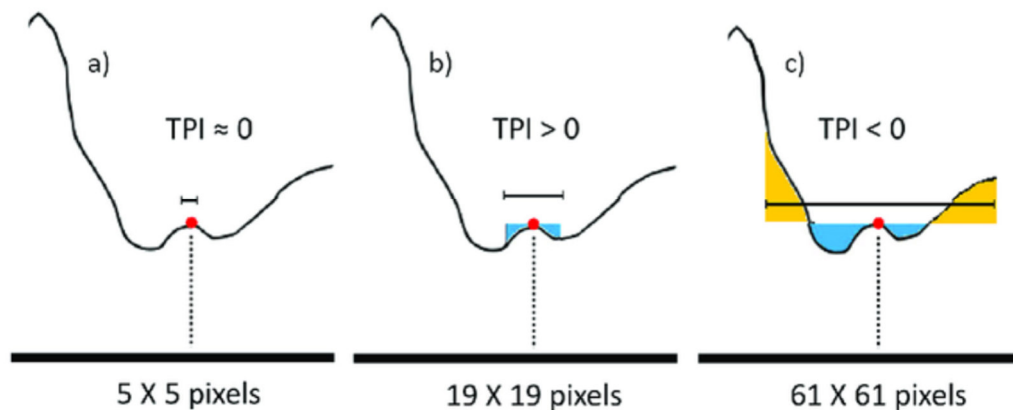


Abbildung 5-2: Abhängigkeit des TPI von der Ausdehnung des Benachbarten Umfeldes (Salinas-Melgoza et al. 2018)

Weiss (2001) hat eine Klassifizierung des Geländes vorgeschlagen, die auf der Kombination von Höhenunterschied und Entfernung beruht.

5.3.8. Topographischer Feuchtigkeitsindex (Saga-TWI)

Der Saga TWI ist eine Weiterentwicklung des Topographischen Feuchteindex und beschreibt das reliefbedingte Abflussverhalten. Er wird für die Vorhersage von Standorts- und Bodeneigenschaften sowie für hydrologische Modellierungen genutzt. Dabei wird die Hangneigung einer Rasterzelle ($\tan\beta$) ins Verhältnis zu ihrer spezifischen Einzugsgebietsgröße (A_n) gesetzt (Beven et al. 1979).

$$TWI = \ln\left(\frac{A_n}{\tan\beta}\right)$$

5.3.9. Reliefklassifikation

Bei der Reliefklassifikation handelt es sich um eine GIS-basierte Einteilung des Geländes. Hintergrund ist die Annahme, dass sich die Bodenbildung in Abhängigkeit von der Position im Gelände (Art, Geschwindigkeit...) unterschiedlich verhält. Die Reliefklassifikation liefert eine Unterteilung des Geländes in verschiedene Reliefklassen, denen jeweils unterschiedliche Werte für TPI und slope zugrunde liegen.

Zuerst wurde auf Basis des digitalen Geländemodells mittels SAGA-GIS der slope sowie der TPI abgeleitet. In einem weiteren Schritt wurden diese beiden Raster Skript-gestützt miteinander verschnitten. Die Wahl der Grenzwerte für den TPI-Raster ist stark vom jeweiligen Gelände abhängig und muss entsprechend gewählt werden, damit die Strukturen zur Geltung kommen. Für das untersuchte Gebiet wurden die in Tabelle 5-1 angeführten Werte zur Klassifikation herangezogen.

Tabelle 5-1: Grenzwerte für TPI-Raster in HydroBOD OÖ

Klasse	Beschreibung	Werte	
		TPI (Saga TPI)	Slope (degree)
1	Ebene		$\leq 5^\circ$
2	Bergspitze	> 8	$> 5^\circ$
3	Oberhang	$4 < \text{TPI} \leq 8$	$> 5^\circ$
4	Mittelhang	$-1 < \text{TPI} \leq 4$	$> 5^\circ$
5	Unterhang	$-8 < \text{TPI} \leq -1$	$> 5^\circ$
6	Canyon	$\text{TPI} \leq -8$	$> 5^\circ$

In einem finalen Arbeitsschritt wurde in SAGA-GIS noch ein majority filter angewendet, um den Ergebnis-Raster zu glätten. Abbildung 5-3 veranschaulicht den, wie im Vorangegangenen beschriebenen, Arbeitsablauf zur Erstellung der Reliefklassifikation.

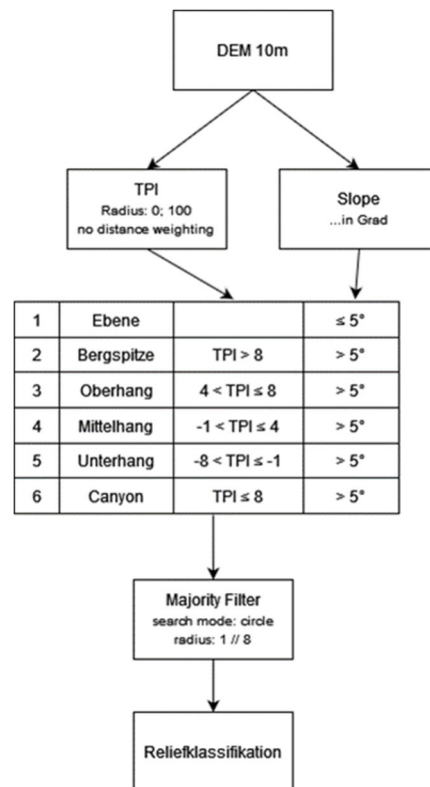


Abbildung 5-3: Workflow der Reliefklassifikation

5.3.10. Flow direction (Fließrichtung)

Die Fließrichtung beschreibt, in welche Richtung Wasser in einem Gelände fließt. Sie ist entscheidend für die Entwässerungsmuster und die Bestimmung von Wassereinzugsgebieten. Die genaue Berechnung basiert auf Algorithmen, die Höhenunterschiede zwischen benachbarten Zellen berücksichtigen.

5.4. Substratklassifikation (Wald/Hochlagen)

Das geologische Ausgangssubstrat hat entscheidenden Einfluss auf die Bodenbildung. Über die Verknüpfung von Bodenprofilaten mit der geologischen Karte (GK200) wurde eine Substratkarte erstellt, die als Kovariable in die Regionalisierung einfließt. Von den Profildaten wurden jeweils die untersten Horizonte, die dem Ausgangssubstrat am nächsten liegen, und daher am wenigsten von extrinsischen Bodenbildungsfaktoren und Bodenbearbeitung beeinflusst sind, für die Analysen herangezogen.

Um die Grundgesamtheit zu erhöhen, wurden neben den für Oberösterreich verfügbaren Punktdaten auch Bodenkennwerte aus Niederösterreich in die Analyse einbezogen. Dies ist zulässig, da die beiden Bundesländer eine ähnliche Geologie haben. Mit der hierarchischen Clusteranalyse nach Ward wurden für die Grundgesamtheit Niederösterreich und Oberösterreich 20 Cluster ausgewiesen. Ziel war es, Gentypen mit ähnlichem Korngrößenspektrum zusammenzufassen. In Oberösterreich waren davon 14 vertreten. Diese

wurden zusammengefasst, wenn in einem Cluster eine zu geringe Anzahl von Bodenpunkten lag. Da die gesamte Böhmisches Masse denselben Gendtyp aufweist, bildete sie einen Cluster. Dieser wurde in der Folge auf Basis der geologischen Karte in Bereiche mit geologisch fein-, mittel- bzw. grobkörnigem Ausgangsmaterial weiter differenziert.

5.5. Hydrogeologische Substratkarte

Zusätzlich zur Boden-Substratkarte wurde eine hydrogeologische Substratkarte erstellt, die die Tiefensickerung (geologische Durchlässigkeit) unterhalb der Böden in Abhängigkeit von der jeweiligen geologisch-lithologischen Serie abbildet.

Für das Bundesland Niederösterreich lagen bereits flächendeckend Angaben zum Anteil des Zwischenabflusses vor, der zur Perkolation in den Untergrund beiträgt (Sortier et al. 2017). Diese in ihrem hydrogeologischen Verhalten einheitlichen Bereiche werden als 19 verschiedene S-Klassen ausgewiesen und sind jeweils einer geologisch-lithologischen Serie zugeordnet. Die Klassifizierung konnte so von Niederösterreich auf Oberösterreich übertragen werden. Dabei wurde jeder in Oberösterreich vorkommenden Substratklasse die lithologisch verwandte S-Klasse aus Niederösterreich auf Basis der GK 1:200.000 zugewiesen (Tabelle 5-2, Tabelle 5-3). Alle in Oberösterreich ausgewiesenen Klassen haben eine Entsprechung in Niederösterreich.

Zusätzlich wurde die Neigung bei der Festlegung des Zwischenabflusses im geologischen Untergrund nach konservativer Einschätzung berücksichtigt: Flache Bereiche ($< 2^\circ$) bekommen den mittleren in der Tabelle ausgewiesenen Wert zugewiesen, geneigte Bereiche ($> 2^\circ$) den durch vermehrten Oberflächenabfluss reduzierten Wert zugewiesen. Die Ausgangswerte stammen aus der Zuweisung von ZWA-Werten im Rahmen der Bewertung des geologischen Untergrunds in HydroBOD NÖ 2 (Pirkl 2015 in Sortier et al. 2017).

Tabelle 5-2: Übertrag der S-Klassen von Niederösterreich auf Oberösterreich

¹⁾ Werte aus der Substratkarte OÖ ²⁾ Werte und Daten aus der hydrogeologischen Substratkarte NÖ

Substratklasse OOe ¹⁾	S-Klasse NOe ²⁾	Prozent ZWA zur Perkolations in Untergrund in % ²⁾	Geologisch-lithologische Serien (hauptsächlich) ²⁾
1	S7	100	Lockersediment; Terrassenkörper – Sand-Kies-Serien
3	S50	10	Löss, Lösslehm
5	S6	10-100	Lockersedimente, Talalluvionen
6	S6	10-100	Lockersedimente, Talalluvionen
9	S12	50	Flyschserien Voralpen und Wienerwald
10	S2	75-100 (reduziert bei steilen Felsflanken)	Karbonatserien der Nördlichen Kalkalpen und Marmore der Böhmischen Masse
14	S7	100	Lockersediment; Terrassenkörper – Sand-Kies-Serien
19	S3	10-20	Lithologisch heterogene Lockersedimentserien der Molasse und der inneralpinen Becken
21	S3	10-20	Lithologisch heterogene Lockersedimentserien der Molasse und der inneralpinen Becken
160	S8	50	Lockersedimente; schluffig-sandige Serien
161	S42	25-50	div. Paragneise der Böhmischen Masse
162	S8	50	Lockersedimente; schluffig-sandige Serien
163	S41	50-75	Grobkorngranite der Böhmischen Masse (i.a. Weinsbergergranit)
18	S99	Gewässer, kein Wert ausgewiesen	-

Tabelle 5-3: Zwischenabfluss im geologischen Untergrund (Modellwerte nach Pirkl 2015 in Sortier et al. 2017);
in Abhängigkeit der Neigung kommen die verschiedenen Kennwerte [0-1] zum Tragen (Nicht alle S-Klassen
sind in OÖ vertreten, S-Klasse 99 steht für Gewässer)

Substratklasse OOe	S-Klasse NOe	Klasse 1 – Ebene < 2°	Klasse 2 – geneigt > 2°	Klasse 3 – Fels
1	S7	1	1	0,5625
3	S50	0,1	0,1	0,1
5	S6	1	0,55	0,3375
6	S6	1	0,55	0,3375
9	S12	0,5	0,4	0,2625
10	S2	0,8	0,7	0,4125
14	S7	1	1	0,5625
18	S99	0	0	0
19	S3	0,2	0,15	0,125
21	S3	0,2	0,15	0,125
160	S8	0,5	0,5	0,3125
161	S42	0,5	0,375	0,25
162	S8	0,5	0,5	0,3125
163	S41	0,75	0,625	0,375

5.6. Hangschuttmodellierung

Aufgrund ihrer hydrologischen Relevanz wurden Hangablagerungen, die in den geologischen Karten unvollständig enthalten sind, räumlich modelliert. Als Hangablagerungen sind durch Sturzprozesse verursachte Lockermaterialschichten definiert, die sowohl Verwitterungsprozesse als auch Umlagerungsprozesse weitgehend ausschließen (Steinbichler et al. 2019). Sturzprozesse setzen entsprechend geneigte Flächen voraus, wie sie in Oberösterreich primär im südlichen Teil zu finden sind. Die geologischen Einheiten weisen eine unterschiedliche Anfälligkeit für Sturzprozesse auf, die über die Variation des Grenzneigungswinkels (GNW) berücksichtigt wurde (Tabelle 5-4). In Niederösterreich wurden die Grenzneigungswinkel im Projekt MoNOE durch Orthofotos, Geländemodelle und Geländedaten ermittelt (Proske und Bauer, 2013). Diese wurden auf Basis der Ereignisdatenbank der WLV und GEORIOS der GBA auf ihre Eignung für Oberösterreich überprüft.

Ausgehend von den auf dieser Basis ermittelten Abbruchbereichen von Steinschlägen und Felsstürzen wurden mittels des am BFW entwickelten open source Modells Flow-Py (D'Amboise et al. 2022) potenzielle Hangablagerungen flächendeckend modelliert. Das auf dem α -Winkel-Ansatz (Auslaufwinkel) basierende empirische Modell zur Simulation gravitativer Massenflüsse (GMF) berechnet Streckenführung und Intensitäten von GMFs. Es verwendet als Inputdaten ein digitales Höhenmodell, die Positionen der Abbruchflächen und vier weitere variable Modellparameter (Neuhauser et al. 2021, Perzl et al. 2015). Der Schattenwinkelansatz (Winkel in Luftlinie vom Felswandfuß bis zum untersten Ende der Hangablagerung) lieferte die besten Ergebnisse (22-28°, Lied 1977, Dorren et al. 2011, Evans und Hungr 1993).

Tabelle 5-4: Die für NÖ ermittelten Grenzneigungswinkel GNW für Sturzprozesse gelten auch in Oberösterreich

Gesteinstyp in Oberösterreich	GNW NÖ	GNW
metablastischer/metatektonischer Paragneis	schiefrige kristalline Gesteine der Böhmisches Masse	48°
Migmatit des Moldanubikums	schiefrige kristalline Gesteine der Böhmisches Masse	48°
Breccien aus dem Dogger (Grünanger-Formation), Konglomerate der autochthonen Vorlandmolasse	Klippen-, Flysch- und Molassezone	46°
Zementmergelserie, Mergelschiefer, Gosaumergel	Mergelige Gesteine der Nördlichen Kalkalpen	46°
Gosausandstein	Quarzite und Schiefer des Permomesozoikums	44°
Hauptdolomit, Plattenkalk, Wettersteinkalk, Dachsteinkalk, Steinalmkalk, Rettenbachkalk	Oberostalpine Kalke und Dolomite des zentralalpinen Permomesozoikums	42°
Glaziale Vorstoßschotter, pleistozäne Niederterrassen, Grundmoränen, quartäre Schwemmkegel und Deltaablagerungen	Hangschutt und glaziale Ablagerungen	38°

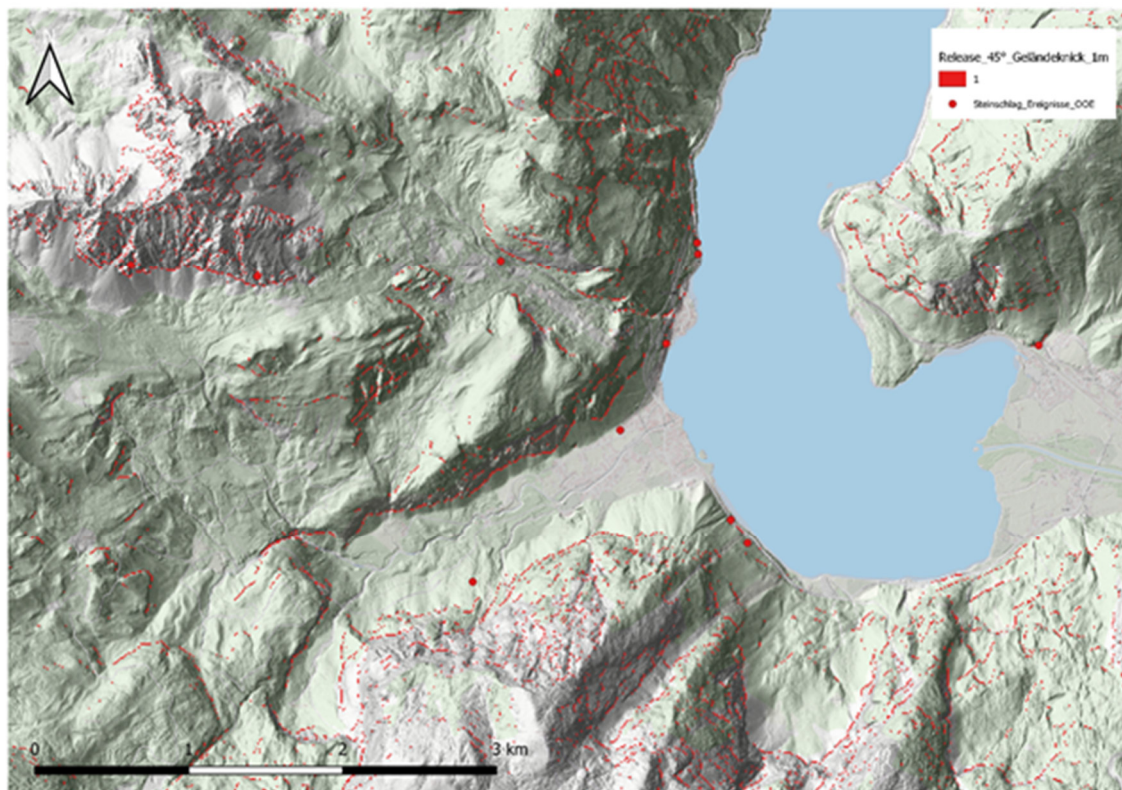


Abbildung 5-4: Hangfußbereiche ermittelt durch die Verschneidung aller Hangneigungen $> 45^\circ$ mit konkaven Geländebereichen und im WLK dokumentierte Steinschläge/Felsstürze (rote Punkte), Ausschnitt: südlicher Hallstätter See

Um die Startbereiche zu identifizieren, wurden Hangneigungen von $> 45^\circ$ mit dem Parameter Profilkrümmung („Geländeknick“) in einem GIS verschnitten (Abbildung 5-4). Eine negative Profilkrümmung (konkave Bereiche) indiziert den Übergang von einer steilen Felswand zu einem schwächer geneigten Bereich.

Angemerkt wird, dass nicht alle relevanten Einflussgrößen in die Modellierung einfließen konnten. So treten Steinschläge und Felsstürze z.B. oft an großen, durch tektonische Strukturen vorgegebenen Kluftscharen auf (Ewald et al. 2019, Kuhn et al. 2021), die in Ermangelung entsprechender flächendeckender Informationen nicht berücksichtigbar waren.

Bei der Parametrisierung des Modells war auch zu bedenken, dass sich die Hangablagerungen über viele Einzelereignisse im Laufe von Jahrhunderten bilden, wobei sich die Topographie sukzessive ändert. Dem wurde durch modifizierte Modelleingangsparameter Rechnung getragen. Die Kalibrierung der Parameter erfolgte iterativ in einer Validierungsschleife. Validiert wurden die Ergebnisse über dokumentierte Steinschlag- und Felssturzereignisse (GEORIOS-Datenbank der GBA, Ereigniskataster der WLV), über in der GK50 und GK200 ausgewiesene Hangschuttbereiche und für ausgewählte Testgebiete über den Vergleich mit

optisch identifizierten Hangablagerungen (Basis: hochauflösende Geländemodelle und Orthofotos).

Die flächendeckend für Oberösterreich generierte Karte (Abbildung 5-5) der Hangablagerungen wurde mit einem Schattenwinkel von 22° und einem GNW von 45° in gebirgigen Regionen bzw. einem GNW von 38° im Bereich quartärer Ablagerungen generiert.

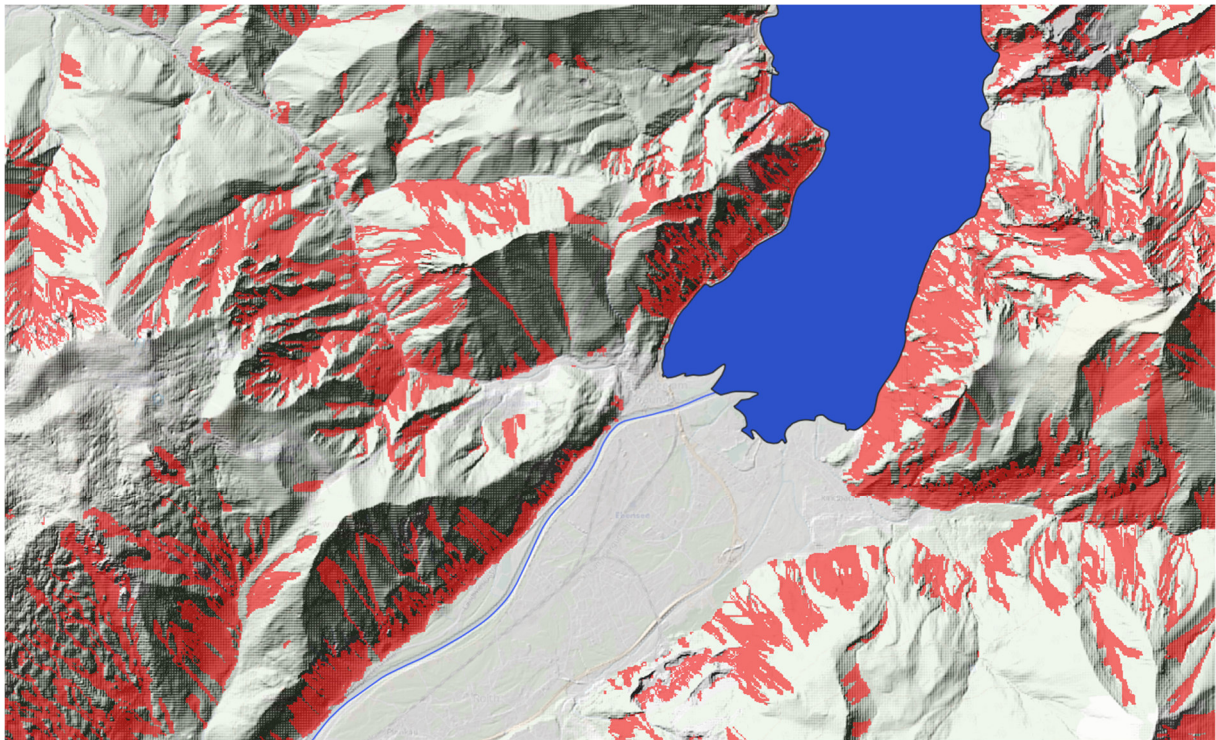


Abbildung 5-5: Modellerte Bereiche mit hydrologisch wirksamen Hangablagerungen, Ausschnitt südlicher Traunsee (Ebensee)

Eine ausführliche interne Dokumentation der Modellparametrisierung und Validierung sowohl der Eingangsdaten als auch der Ergebnisse ist auf Anfrage verfügbar.

5.7. Landnutzung

Die Erstellung einer präzisen Landnutzungskarte bildet die Basis für die Ermittlung flächendeckender hydrologischer Bodenkennwerte. Ziel war es daher, eine solche möglichst aktuell, räumlich und inhaltlich detailliert für Oberösterreich zu erstellen. Die Basis bildeten mehrere Geodatenquellen verschiedener Aktualität und in unterschiedlichem Detailgrad.

Die digitale Katastralmappe (DKM) von Oberösterreich bietet flächenhafte Informationen über Grundstücksparzellen und deren Nutzungsart. Vor allem durch die Einbeziehung der INVEKOS Daten, zusätzlicher Vermessungen im Siedlungsraum sowie der österreichischen

Waldkarte der österreichischen Waldinventur (ÖWK) konnte eine präzisere Differenzierung der Nutzungsart getroffen werden.

5.7.1. Datenaufbereitung, Methodik

Die Durchführung der nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte wurde mithilfe von ESRI-ArcGIS Analyse-Tools sowie Funktionen von SAGA-GIS realisiert. Der Prozess der Datenverarbeitung orientierte sich im Wesentlichen an der Vorgehensweise des Projekts HydroBOD NÖ (Klebinder et al. 2012). Kleinere Anpassungen wurden vorgenommen, um den Veränderungen in den Datenquellen gerecht zu werden. In der aktuellen Ausgabe der DKM werden beispielsweise die Nutzungsarten "Ödland" und "Sonstiges" nicht mehr verwendet, was sich in der Landnutzungskarte HydroBOD OÖ widerspiegelt.

Zusätzlich stand die ÖWK als eine aktualisierte und präzisere Quelle zur Verfügung, um Waldflächen abzugrenzen. Eine stichprobenartige Plausibilitätskontrolle ergab, dass durch die Verwendung dieser Waldabgrenzung anstelle der DKM-Waldabgrenzung eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit erzielt werden konnte (Abbildung 5-6).

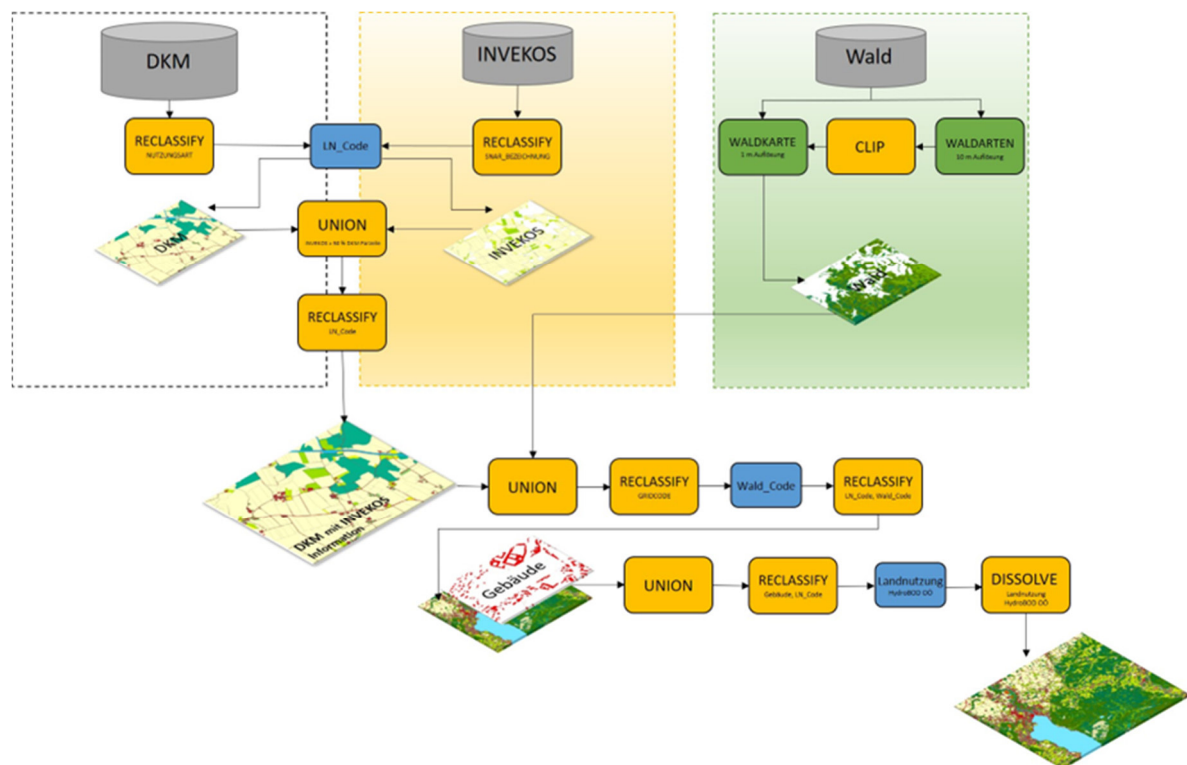


Abbildung 5-6: Workflowgraphik zur Landnutzungskarte HydroBOD OÖ

5.7.2. Landwirtschaftliche Flächen

In der DKM sind verschiedene Nutzungsarten angeführt, die eine landwirtschaftliche Nutzung ausdrücken. Diese Einteilung beinhaltet jedoch geringen Detailgrad, während die Schlagnutzungsarten aus dem INVEKOS jahresaktuell und in einer sehr detaillierten Klassifikation zur Verfügung stehen. Daher erfolgte eine Überarbeitung der Nutzungsarten der

DKM. Diese wurden in Nutzungsklassen (DKM_Code) zusammengefasst und erhielten für diese neue Zuweisungen (LN_Code). Die Klassen Acker, Wiese, Weide und Dauerkulturanlage und Erwerbsgarten wurden in einer neuen Sammelklasse "Acker" vereint. Diese Sammelklasse wurde anschließend mithilfe der INVEKOS-Nutzungen verfeinert. Ebenso wurden die Schläge der INVEKOS-Daten zusammengefasst und daraus gesammelte Nutzungsklassen (INV_Code) erstellt. Im Zuge dieser Zusammenfassung wurden beispielsweise alle einjährigen Feldfrüchte in die Klasse "Ackerkulturen" aufgenommen, während Obstkulturen wie Äpfel, Birnen, Kirschen und Pfirsiche der Klasse Intensivobstbau zugeordnet wurden. Klee, einmähliche Wiesen, Futtergräser und Ähnliches zur Klasse "Grünland" zusammengefasst (Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5: Nutzungsklassen Landwirtschaft mit LN_Code, INV_Code und DKM_Code

Nutzungsklassen Landwirtschaft	LN_Code	INV_Code	DKM_Code
Grünland	31	Grünland	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Streuwiese	32	Streuwiese	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Intensivobstbau	33	Intensivobstbau	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Weide	34	Weide	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Hutweide	35	Hutweide	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Brachland	37	Brachland	Brachland
LSE	38	LSE	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Almen	39	Almfutterfläche	Alpe
Acker	51	div. Feldfrüchte	Acker, Wiese oder Weidefläche, Dauerkulturanlage oder Erwerbsgarten
Weingarten	53	Wein	Weingarten

Die Übertragung der INVEKOS-Daten auf die DKM-Parzellen erfolgte durch Verknüpfung der Shapefiles beider Datensätze. Hierbei wurden die Polyongrenzen überlagert und die Flächenanteile der einschließenden Landnutzungsklassen an den neuen Polygonen berechnet. DKM-Parzellen übernahmen die INVEKOS-Nutzung, wenn sie zu mindestens 50 % von einer INVEKOS-Fläche überdeckt wurden, sonst behielten sie ihre DKM-Nutzung bei (Abbildung 5-7).

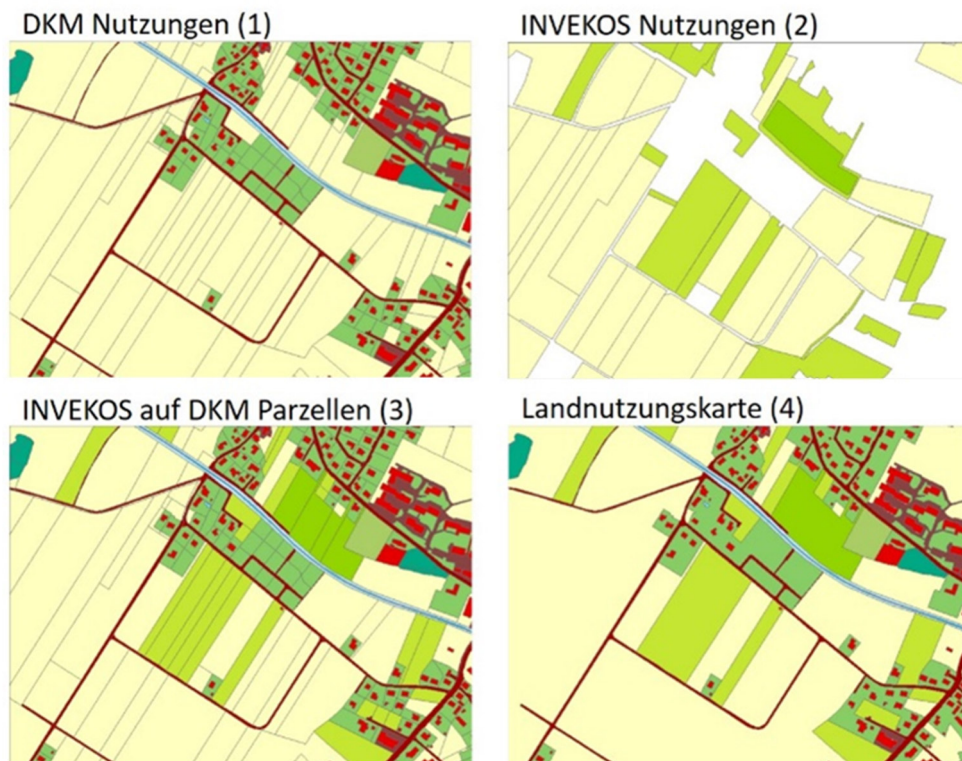


Abbildung 5-7: Kartenausschnitt: Illustration der Übertragung von INVEKOS-Nutzungen auf die DKM-Parzellen (gelb: Acker, hellgrün: Grünland, dunkelgrün: Intensivobstbau und Garten)

5.7.3. Waldflächen

Aufgrund unterschiedlicher Grundlagen (DKM und ÖWK) ergaben sich Abweichungen in der Erfassung von Waldflächen. Die DKM basiert auf Grundstücksgrenzen ohne genaue Walddefinition, während die ÖWK nach spezifischen Kriterien Waldgebiete erfasst. Ein Ersatz der DKM-Waldflächen durch die ÖWK würde zu Lücken führen, da die DKM auch kleine Waldgebiete enthält, während in der ÖWK, Flächen unter 500 m² aber nicht als Wald interpretiert werden.

Um eine präzise Waldabgrenzung zu gewährleisten, ist eine Überlagerung beider Waldinformationen erforderlich. Die ÖWK ist als Rasterdatensatz in 1 m Auflösung für Waldgebiete verfügbar, während die Information über die Waldtypen aus einem separaten Raster (10 m Auflösung) stammt (Tabelle 5-6).

Die endgültige Waldabgrenzung für die Landnutzungskarte wurde durch die Zusammenführung der DKM-Waldflächen und der ÖWK generiert. Die Nutzungsklassen wurden unter Berücksichtigung einer Priorisierung zugewiesen: ÖWK-Waldflächen haben Vorrang, andernfalls wird die Nutzung der Landnutzungskarte übernommen. Die resultierenden Flächen wurden von inneren Grenzen befreit und die ÖWK somit um zusätzliche Waldflächen ergänzt. Das Ergebnis ist eine optimierte, finale Waldabgrenzung (Waldmaske, Abbildung 5-8).

Tabelle 5-6: Nutzungsklassen Wald LN-Code

GRIDCODE	WALD_CODE	WALDTYP
2	21	Laubwald
1	22	Mischwald
0	24	Nadelwald
3	25	Niedrige Waldvegetation
29	29	Undifferenzierte Waldflächen

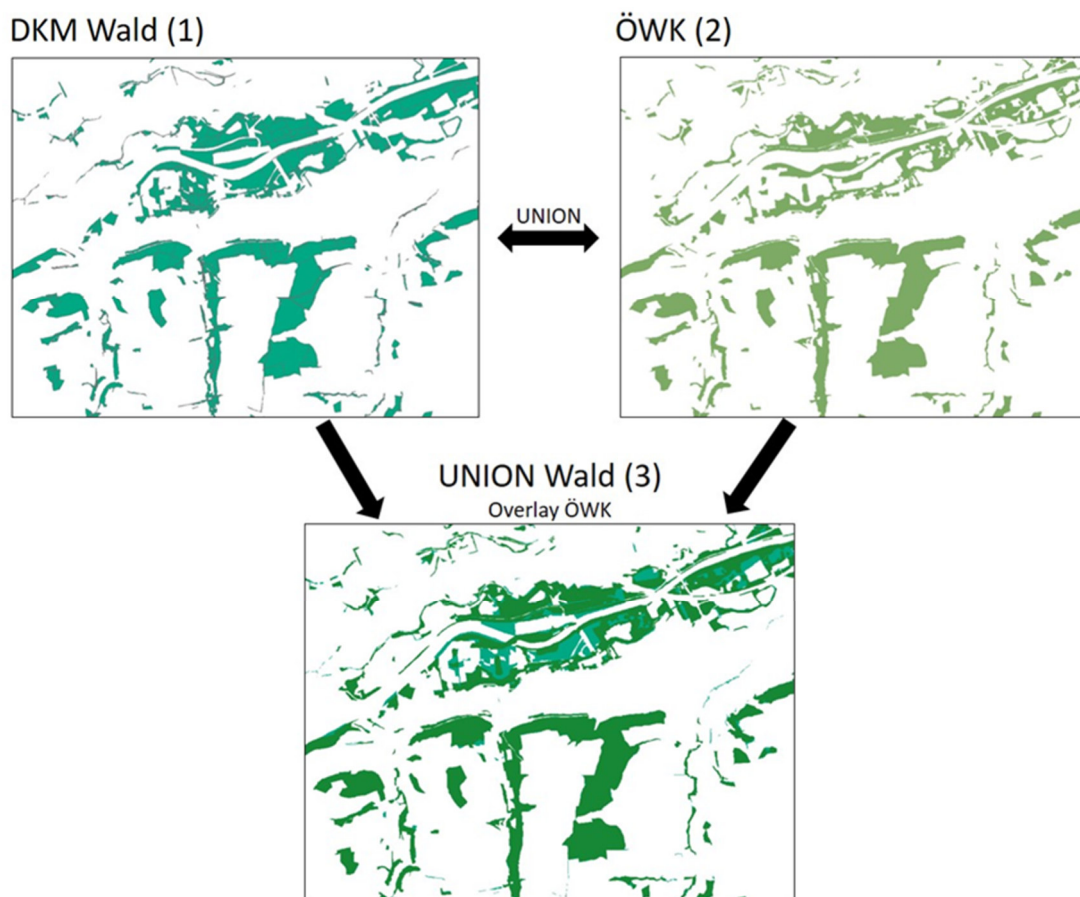


Abbildung 5-8: Aufbereitung der Waldflächenabgrenzung

5.7.4. Gebäude

Die DKM weist, wie erwähnt, Schwächen bei der Aktualität bestimmter Nutzungsklassen auf. Aus diesem Grund wurden die Gebäudeflächen aus einer separat verfügbaren, aktuellen Vermessung für Gebäude im Bundesland Oberösterreich über eventuell vorkommende andere Nutzungsklassen geschrieben.

5.7.5. Sonderfälle

Almflächen: Die Almgebiete wurden im INVEKOS-Datensatz zu größeren Flächen mit der Nutzungsklasse "Almen" zusammengefasst, wobei kleine räumlich benachbarte Almflächen in einem Polygon vereint wurden. Dies würde bei der Übertragung auf die DKM zu ungewollt großen Almgebieten führen, die auch andere Nutzungen, wie Waldflächen, überschreiben. Besonders in den südlichen Hochgebirgsregionen von Oberösterreich würden einige Flächen fälschlicherweise als "Almen" eingestuft, was auf die Parzellenstruktur der DKM in diesen Bereichen zurückzuführen war. Diese Problematik wurde durch eine Priorisierung der Waldkarte gegenüber der DKM und den INVEKOS-Almflächen behoben, um eine korrekte Zuordnung sicherzustellen.

Moor- bzw. Feuchtflächen: Für die Ausweisung von Moor- bzw. Feuchtflächen standen folgende Datensätze zu Verfügung:

- DKM
- eBOD (nur landwirtschaftliche Flächen)
- Biotopkartierung (Gruppenname „Moore“)

Für die Erstellung der Landnutzungskarte HydroBOD OÖ war es in erster Linie wichtig, die aktuelle Flächennutzungsart auszuweisen. Da nicht alle Moorflächen nur als solche genutzt werden, sondern oftmals im Wald oder auf landwirtschaftlichen Nutzflächen liegen, entspricht die tatsächliche Flächennutzung dann einer anderen.

In der eBOD sind in OÖ insgesamt 84 Bodenformen als Moor (Moor, Übergangsmoor, Hochmoor, Niedermoor, Anmoor) kartiert worden, das entspricht ~60 km². Aus den Biotopflächen wurden alle Flächen mit dem Gruppennamen „Moore“ selektiert. Hier werden 3,2 km² Moorflächen ausgewiesen. Viele dieser Moore liegen im Wald oder fallen in eine andere Nutzungsart der DKM oder INVEKOS (z.B. Almen, Acker). Die Moorflächen der Biotopkartierung werden bei landwirtschaftlichen Flächen von der eBOD abgedeckt und wurden deshalb nicht zusätzlich in die Landnutzungskarte mit aufgenommen.

5.7.6. Zusammenfassung Landnutzungskarte

Es zeigte sich, dass die Integration der verschiedenen Datenquellen die Landnutzungskarte erheblich verbessert. Die Kombination der DKM, INVEKOS, Waldtypenkarte und des Gebäudelayers ermöglichte eine genauere und aktualisierte Darstellung der Landnutzung. Fehler und Lücken in den ursprünglichen Daten wurden reduziert. Die neue Karte enthält detaillierte Informationen über 29 verschiedene Nutzungsklassen (Tabelle 5-7). Es ist jedoch zu beachten, dass aus dieser Karte keine direkten Rückschlüsse auf Abfluss- oder Retentionsverhalten gezogen werden können.

Anhang 1 liegt als eigenes Dokument (Landnutzung.pdf) bei, in welchem eine detaillierte Dokumentation der Erstellung und Validierung der Landbedeckung gegeben wird.

Tabelle 5-7: Nutzungsklassen (LN-Code) der neuen Landnutzungskarte (LSE = Landschaftselemente)

Nutzungsklassen	LN_Code	Anzahl der Polygone	Fläche in km ²	Fläche in %
Gletscher	10	11	5,53	0,05
stehendes Gewässer	11	12196	124,89	1,04
fließendes Gewässer	12	3726	130,84	1,09
Feuchtgebiete	13	314	2,17	0,02
Gewässerrandfläche	14	2597	12,95	0,11
Laubwald	21	882628	845,49	7,06
Mischwald	22	1180811	1308,03	10,92
Nadelwald	24	1146992	2240,26	18,70
Niedrige Waldvegetation	25	874058	524,05	4,38
Wald, undifferenziert	29	18	187,84	1,57
Grünland	31	17344	241,63	2,02
Streuwiese	32	207	2,16	0,02
Intensivobstbau	33	418	9,39	0,08
Weide	34	85361	1949,89	16,28
Hutweide	35	1176	8,43	0,07
vegetationsarme Fläche	36	2296	100,36	0,84
Brachland	37	9175	44,42	0,37
LSE	38	9521	3,67	0,03
Almen	39	677	44,89	0,37
Garten	41	103605	298,88	2,50
Erholungsfläche	42	5034	37,98	0,32
Acker	51	127348	3087,51	25,78
Weingarten	53	75	0,57	0,00
Fels/Geröll	61	586	116,25	0,97
Bahnanlage	72	761	16,36	0,14
Abbaufäche, Halde oder Deponie	75	786	17,60	0,15
Gebäude	81	731795	194,95	1,63
Straßenanlage	83	13689	300,30	2,51
Betriebsfläche	86	51732	121,02	1,01
Summe		5132861	11978,30	100,00

6. Ermittlung der hydrologischen Bodenkenndaten

Zur Ermittlung und flächigen Ausweisung von hydrologischen Bodenkenndaten auf Basis der beschriebenen Eingangsdaten, werden verschiedene Verfahrensschritte kombiniert. Die wichtigsten sind:

- Das rechnerische Ausbreiten von Punktdaten in die Fläche über Regionalisierungsverfahren und
- die Berechnung der spezifischen, hydrologischen Kennwerte aus breiter verfügbaren Standardmesswerten über Pedotransferfunktionen (PTF).

Bei der Umsetzung dieser Berechnungsschritte müssen die Anwendung der PTF und der Regionalisierung aufeinander abgestimmt werden. Es besteht die Möglichkeit, die hydrologischen Bodenkennwerte aus gemessenen oder über PTF errechneten Punktdaten zu regionalisieren (direkter Ansatz) oder die Eingangsdaten zu regionalisieren und danach die PTF auf jede resultierende Rasterzelle anzuwenden (indirekter Ansatz; Bouma, 1989). Die flächendeckende Anwendung des HydroBOD-Modelles ist jedenfalls erst möglich, wenn beide Schritte abgeschlossen sind.

6.1. Regionalisierung

6.1.1. Allgemein

Unter dem Begriff Regionalisierung werden Verfahren zusammengefasst, die dazu dienen, aus in ihrer Ausdehnung limitierten Daten, meist Punktdaten, flächig gültige Informationen abzuleiten. Im einfachsten Fall sind dies Interpolationsverfahren, heute kommen jedoch oft komplexe geostatistische oder Machine-Learning-basierte Techniken zum Einsatz. Anzumerken ist aber, dass auch letztgenannte eine solide Datenbasis nicht ersetzen können! Im Projekt HydroBOD OÖ wurden die verschiedenen Landnutzungsmasken unterschiedlich behandelt, da große Unterschiede in der Qualität und räumlichen Auflösungen für die verschiedenen Nutzungseinheiten bestehen.

Im Folgenden werden die Ansätze kurz beschrieben, die für die flächenhafte Ermittlung der Eingangskennwerte für das HydroBOD Modell notwendig waren. In Anhang 4 finden sich zusätzliche Informationen dazu.

6.1.2. Regionalisierungsverfahren Landwirtschaft

In der österreichischen Bodenkartierung wurden für eine zum Kartierungszeitpunkt ausgewiesene Gebietskulisse mit allen landwirtschaftlichen Böden, flächendeckende Informationen kartiert. Die Abgrenzung der einzelnen Flächeneinheiten erfolgte nach Expertenwissen. Sie kann heute noch als weitgehend belastbar angesehen werden und wird deshalb für dieses Projekt übernommen. Bei der Weiterverarbeitung dieser Daten kamen hybride Ansätze zur Anwendung, da die Regionalisierung zum Teil durch die Flächenkartierung

vorgegeben war oder hydrologisch bedingte Fixgrößen die Ergebnisse aus den PTF überschrieben.

Unterschiede zum kartierten Status bestehen jedoch in der Landnutzung, die sich seit dem Kartierungszeitraum stellenweise geändert hat. Durch die unterschiedliche Ausweisung der landwirtschaftlichen Fläche in der Bodenkartierung (basierend auf naturräumlichen Gegebenheiten zum Kartierungszeitpunkt und der damals aktuellen ÖK50) und im Projekt (hauptsächlich basierend auf DKM) ergaben sich kleinere Lücken, die über einen Nearest-Neighbor Interpolationsalgorithmus gefüllt wurden.

Die Auffüllung der Lücken mit Pixelinformation erfolgte mit dem ArcGIS Tool „Euclidean Allocation“ (Abbildung 6-1). Das Tool berechnet die Entfernung oder Richtung zu den nächsten Zellen mit einem bestimmten Attribut oder einer bestimmten Eigenschaft in einem Raster-Dataset. Die Berechnung der Entfernung mittels „PLANAR“ basiert auf einer flachen, zweidimensionalen Ebene, um die Entfernung zwischen zwei Punkten zu ermitteln. Bei dieser Methode wird die Geländeform ignoriert und die Distanz wird auf einer geraden Linie zwischen zwei Punkten berechnet. Da die Erstellung der Raster auf einer zweidimensionalen Landbedeckungskarte basiert, wurde die „planare“ Methode zur Entfernungsberechnung gewählt (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/euclidean-allocation.htm>). Dies entspricht der Entfernung, die man auf einer Karte oder einer ebenen Oberfläche messen würde.

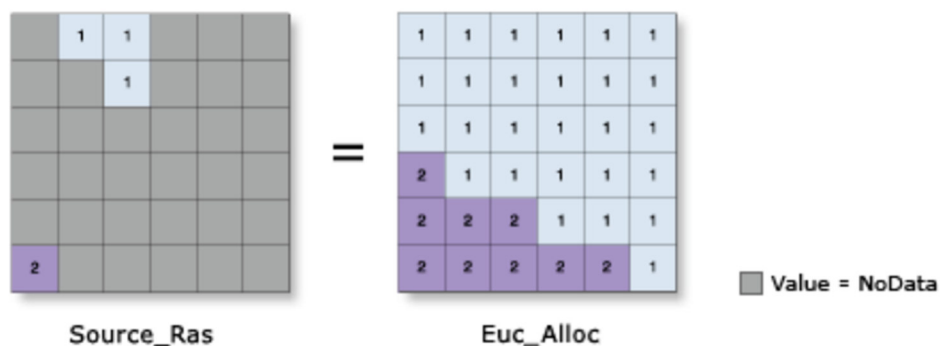


Abbildung 6-1: Lückenschluss mit nearest-neighbor Interpolationsalgorithmus

6.1.3. Regionalisierungsverfahren Wald und waldfreie Hochlagen

Aufgrund der zu ermittelnden Bodenkenngrößen, Erfahrungen im Projekt HydroBOD NÖ, vergleichenden Arbeiten in der Literatur (z.B. Zeitfogel et al. 2023) und den beauftragten Produkten (Kapitel 2) wurde dem indirekten Verfahren der Vorzug gegeben. Das heißt, dass Standardeingangsgrößen wie Textur, Bodenkohlenstoff oder Lagerungsdichte mittels Regionalisierungsverfahren generiert wurden und danach die Berechnung von hydrologischen Bodenkennwerten über die PTF erfolgte. Zudem wurden andere für das HydroBOD-Modell notwendige Input-Parameter wie z.B. die für die Speicherkapazität zur Verfügung stehende Bodenmächtigkeit auf demselben Weg berechnet. Grundsätzlich wurde die Wahl des

Regionalisierungsansatzes für Wald und waldfreie Hochlagen maßgeblich von der geringen Anzahl und ungünstigen Verteilung der verfügbaren Bodenprofile bzw. den sehr heterogenen Informationen der einzelnen Datenquellen bestimmt. Um den unterschiedlichen Informationsgehalt bestmöglich auszunutzen und auch Aussagen zur Qualität der Berechnungen treffen zu können, wurde Machine-Learning eingesetzt.

Im Projekt HydroBOD wurden die notwendigen flächigen Datengrundlagen für Wald und waldfreie Hochlagen aus Standortsinformationen (Tabelle 6-1) abgeleitet. Dazu werden i.d.R. Modelle entwickelt, die Prognosen für den Zielwert auf Basis von Prädiktoren erstellen. Das Modell errechnet dabei, je nach Konzept, statistische oder klassifikatorische Zusammenhänge der Messwerte (= Information am Standort) und der an diesem Punkt vorhandenen Prädiktoren. Die Modelle werden an einer zufälligen Auswahl an Standorten trainiert, der Rest der Standorte wird zum Test der Modelle verwendet. Unabhängige Datensätze, welche keinen Eingang in das Regionalisierungsmodell gefunden haben, können zur weiteren Validierung herangezogen werden.

Die Regionalisierung in HydroBOD OÖ erfolgte überwiegend mit dem Verfahren Random Forest (Cutler et al. 2007). Dabei wird für jeden Parameter in den Tiefenstufen folgender Prozess individuell durchgeführt:

- 1) Sammeln homogener Punktdaten für jede Zielgröße und deren Tiefenstufe
- 2) Verorten und umprojizieren der gesammelten Daten
- 3) Sammeln von Prädiktorkarten/Kovariablen und Ausschluss von autokorrelierenden Kovariablen
- 4) Erstellen einer Trainingstabelle, in der die Punktdaten mit den Werten der Prädiktoren am jeweiligen Punkt verbunden werden
- 5) (zufällige) Trennung der vorhandenen Daten in Trainingsdaten und Testdaten
- 6) Erstellen eines Modells basierend auf Random Forest
- 7) Bewertung des Modells anhand der Testdaten:
 - a. Ermitteln der optimalen Konfigurationseinstellungen durch die Anwendung eines Gittersuchverfahrens zur Erprobung unterschiedlicher Einstellungen
 - b. Auswahl der relevanten Prädiktoren und Weglassen von nicht benötigten (mittels Recursive Feature Elimination)
 - c. Ableiten der Feature Importance: Dabei werden die Prädiktoren bestimmt, die den größten Einfluss auf das Ergebnis haben und daher am wichtigsten für das Modell sind
- 8) Anwendung des an den Trainingsdaten erstellten Modells auf ganz Oberösterreich, um einen AusgaberaSTER zu berechnen
- 9) Produktion von Ergebnissen, Histogrammen, Scatterplots und Karten mit Übersicht der statistischen Kennwerte (z.B. R^2 , RMSE) für Test- und Trainingsdaten (z.B. Abbildung 6-2)
- 10) Expertenbeurteilung der Ergebnisse

- 11) Gegebenenfalls Neuberechnung unter Weglassen/Hinzunahme bestimmter Daten aus den jeweiligen Quellen
- 12) Postprocessing der Daten, einschließlich Quantile Mapping, um den Wertebereich an den der Trainingsdaten anzupassen und Mapping der Bodenarten aus Sand/Schluff/Ton-Gehalt auf KA5 Texturklassen
- 13) Resampling der Daten auf die 30 m Zielauflösung.

Das Glätten der Daten höherer Auflösung auf eine Pixelgröße von 30 m erfolgte mit Hilfe des Modalwertfilters für kategorische Variablen bzw. des Mittelwertes für kontinuierliche Variablen mittels eines GDAL-Befehls (siehe Anhang 4). Entscheidend bei diesem Verfahren ist, die Bereiche ohne Daten, also außerhalb der Waldmaske, von dieser Filterung bzw. Glättung auszuschließen. Dadurch können an den Rändern des Untersuchungsgebietes bei der Glättung keine Daten verloren gehen und die Nodata-Werte der waldfreien Flächen in die Mittelung/Modalwertermittlung nicht miteinfließen.

Bei der Auswahl der Prädiktoren wurden die Kriterien potenzieller, inhaltlicher Zusammenhang zwischen Prädiktoren und Zielparametern, Verfügbarkeit der Daten sowohl für Oberösterreich als auch für Niederösterreich (um zusätzlich Punktdaten von dort verwenden zu können), die ausreichende räumliche und inhaltliche Qualität und die Homogenität des Datensatzes über das gesamte Projektgebiet herangezogen. Die Prädiktoren lassen sich in klimatische, topographische und geologische Prädiktoren sowie ergänzende Fernerkundungsdaten einteilen (Tabelle 6-1). Die Inputparameter für die Regionalisierung inklusive der Quelle und Anmerkungen sind in Tabelle 6-2 aufgelistet.

Tabelle 6-1: Liste der Prädiktoren

Klimatische Prädiktoren:	Topographische Prädiktoren:	Geologische Prädiktoren: GK200	Prädiktoren aus Fernerkundung
<ul style="list-style-type: none"> Jahresniederschlag Durchschnittliche Jahrestemperatur Evapotranspiration Globalstrahlung Hygrische Kontinentalität Thermische Kontinentalität Länge der Vegetationsperiode 	<ul style="list-style-type: none"> Aspekt (Himmelsrichtung) Fließrichtung Konvergenzindex Digitales Geländemodell Maximale Krümmung Minimale Krümmung Profilkrümmung Allgemeine Krümmung Gesamtkrümmung Planungskrümmung 	<ul style="list-style-type: none"> Gengruppe Gentyp Substratgruppe Substratgesellschaft Clusterung der Substratgruppen Clusterung gleicher Legendenbeschriftungen 	<ul style="list-style-type: none"> Landnutzungsklassen Waldmaske (abgeleitet aus Landnutzungskarte)

Tabelle 6-2: Input-Parameter Regionalisierung

Parameter	Tiefenstufe	Quelle	Anmerkung
Bodenart	10, 35, 65	Feld	Nicht regionalisiert-> über SUT Labor gemappt
Bodenart	10, 35, 65	Labor	nicht regionalisiert-> über SUT Labor gemappt
Sand	10, 35, 65	Labor	HydroBOD Aufnahmepunkte, BFW Innsbruck Altdaten
Schluff	10, 35, 65	Labor	HydroBOD Aufnahmepunkte, BFW Innsbruck Altdaten
Ton	10, 35, 65	Labor	HydroBOD Aufnahmepunkte, BFW Innsbruck Altdaten
(Grob-) Skelettgehalt	10, 35, 65	Feld	HydroBOD Aufnahmepunkte, BOKU Kalkalpen Nationalpark, WBZI OÖ + NÖ, BoBi, ILUP
Lagerungsdichte	10, 35, 65	Labor	HydroBOD Aufnahmepunkte, BFW Innsbruck Altdaten
Organische Substanz	10, 35, 65	Labor	HydroBOD Aufnahmepunkte, WBZI OÖ + NÖ
Kohlenstoffgehalt	10, 35, 65	Labor	Umgerechnet in OS (Faktor 1,72) und mit OS regionalisiert
GPV	10, 35, 65	Labor	
Bodenmächtigkeit		Feld	Hydrobod Aufnahmepunkte, BOKU Kalkalpen Nationalpark, WBZI OÖe + Noe, BoBi, ILUP
Stauhorizont	J/N	Feld	HydroBOD Aufnahmepunkte, BOKU Kalkalpen
Durchwurzelung		Feld	HydroBOD Aufnahmepunkte, BOKU Kalkalpen Nationalpark, WBZI Ooe, ILUP

6.1.4. Zwischenergebnisse Regionalisierung Wald und waldfreie Hochlagen

6.1.4.1. Bodenart

Für Wald- und waldfreie Hochlagen wurden mithilfe von Machine-Learning die prozentualen Anteile von Sand, Schluff und Ton im Mineralboden für alle drei Tiefenstufen ermittelt. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden Häufigkeitsverteilungen der jeweiligen Werte, statistische Kennwerte (R^2 , RMSE) sowie Scatterplots des Vergleichs zwischen Trainings- und unabhängigen Testwerten herangezogen. Ebenso wurde der Umfang des verfügbaren Datensatzes (n) berücksichtigt. Während die statistischen Kennwerte für die Regionalisierung auf Basis dieser wenigen Punkte durchaus gut sind, muss man sich darüber im Klaren sein, dass durch die geringe Punktdichte die Belastbarkeit der Flächendaten trotzdem limitiert ist (Abbildung 6-2 - Abbildung 6-4).

In einem weiteren Schritt werden die Fraktionen von Sand, Schluff und Ton mithilfe der KA5-Bodenartenklassifizierung auf ein Raster der Bodenarten abgebildet (Abbildung 6-5). Wie ersichtlich ist, fallen die regionalisierten Bodenarten in Oberösterreich hauptsächlich in den stark schluffigen, teilweise auch sandigen Bereich.

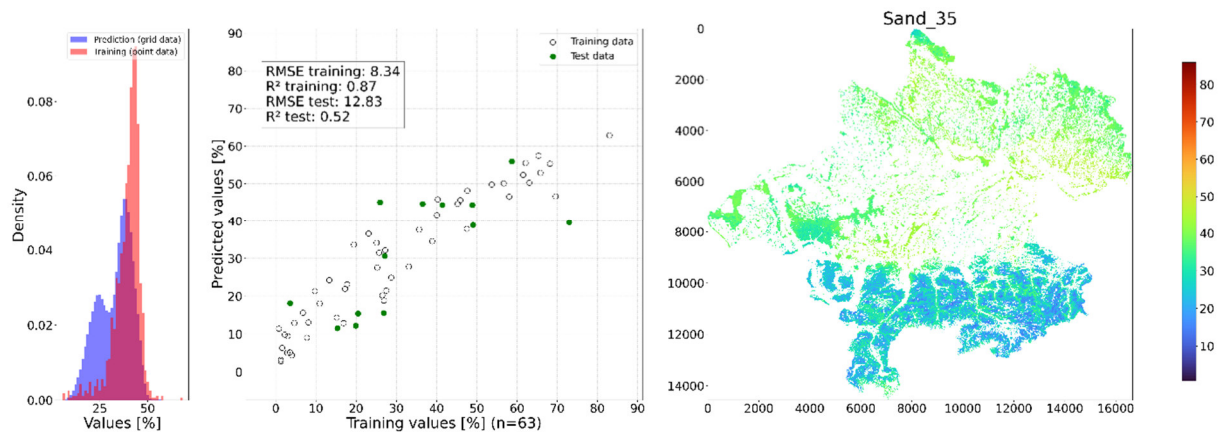


Abbildung 6-2: Häufigkeitsverteilung Bodenart Sand, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, links Häufigkeitsverteilung, Mitte R^2 , RMSC und Vergleich Trainings - Testdatensatz und rechts Verteilung (Sandanteil in %)

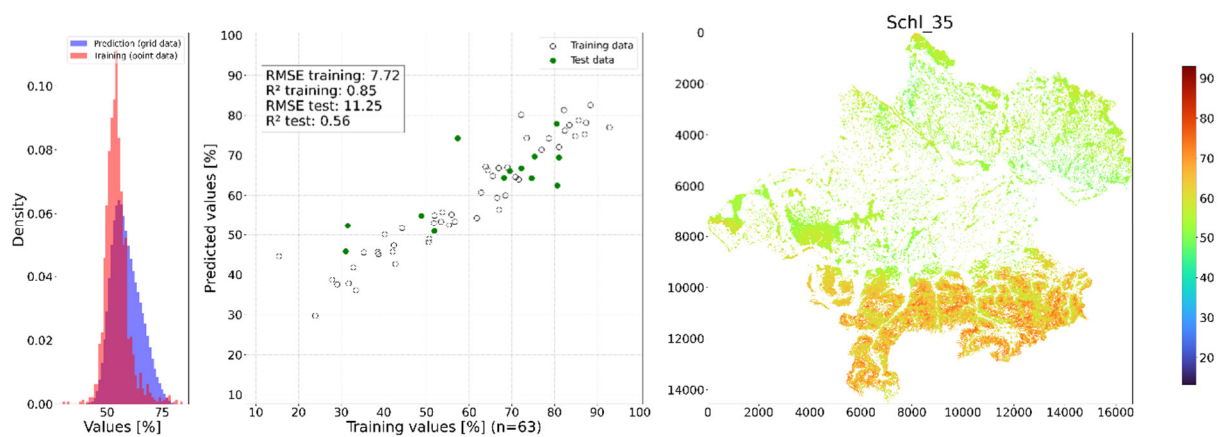


Abbildung 6-3: Häufigkeitsverteilung Bodenart Schluff, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, (Schluffanteil in %)

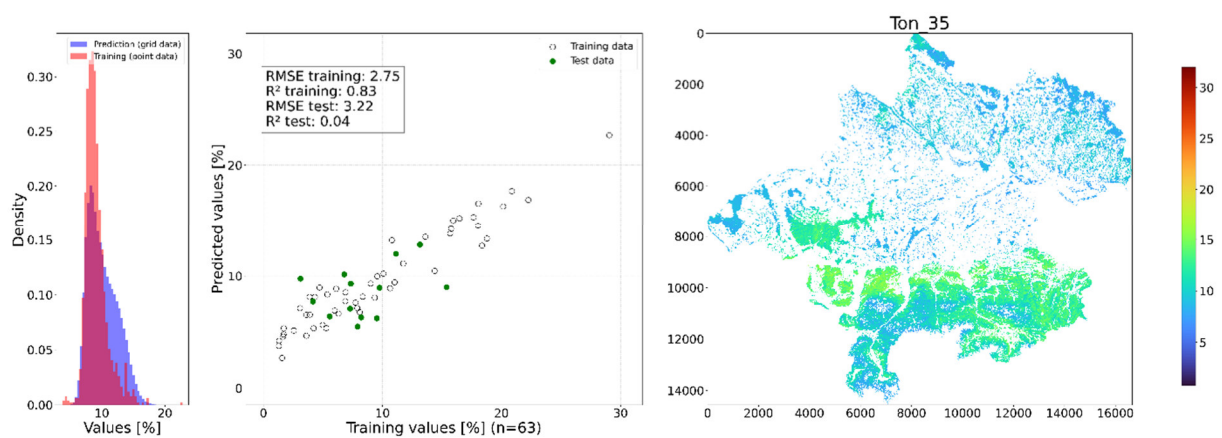


Abbildung 6-4: Häufigkeitsverteilung Bodenart Ton, Tiefenstufe 2 (20-50 cm), Modellergebnisse inkl. statistischer Kennwerte, (Tonanteil in %)

Bodenarten 20 - 50cm [KA5]

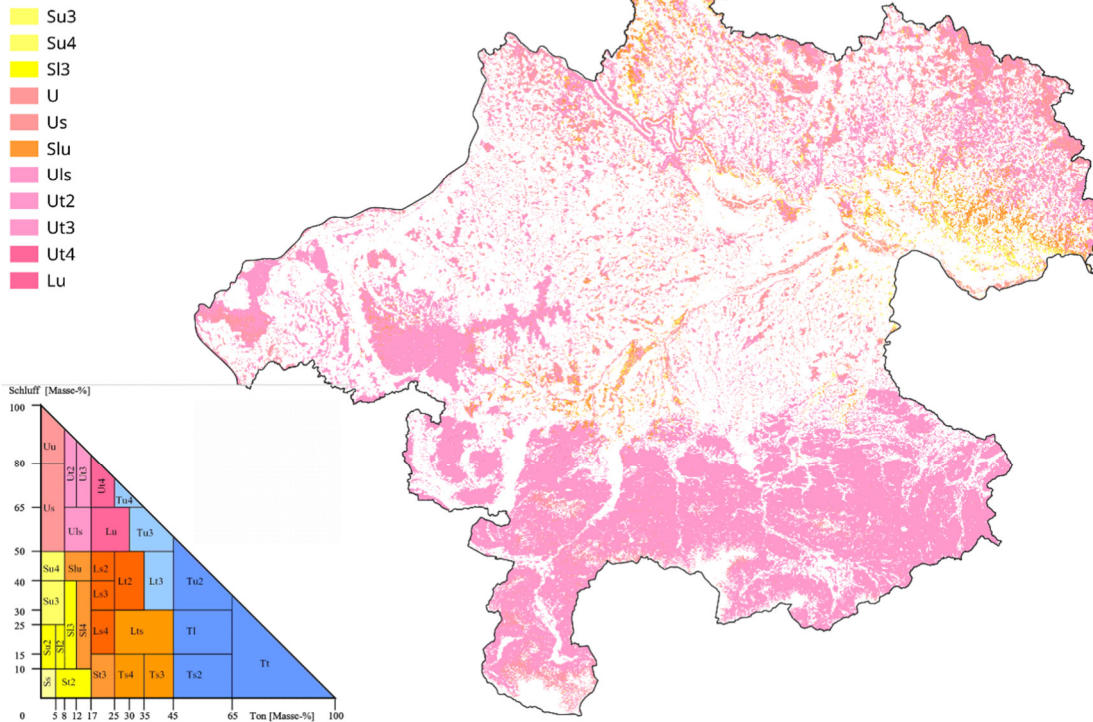


Abbildung 6-5: aus Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-4 mittels Regionalisierung abgeleitete Verteilung der Bodenarten für Wald und waldfreie Hochlagen

6.1.4.2. Skelettgehalt

Ebenfalls mittels Machine-Learning wurden die Volumenprozentsätze des Skeletts im Mineralboden für alle drei Tiefenstufen in Wald- und waldfreien Hochlagen ermittelt. Es standen vergleichsweise viele Punktdaten für die Modellierung zur Verfügung (Abbildung 6-6). Jedoch ist zu beachten, dass die Punktdaten aus verschiedenen Datensätzen stammen und daher möglicherweise inhomogen sind. Dennoch konnten plausible Ergebnisse generiert werden.

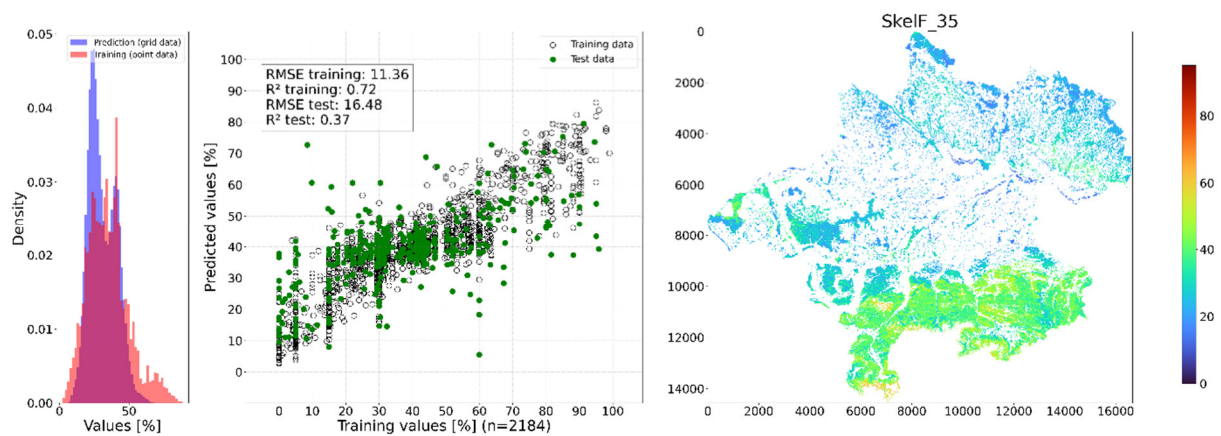


Abbildung 6-6: Ergebnis Regionalisierung Skelettgehalt, Tiefenstufe 20-50 cm

6.1.4.3. Bodenmächtigkeit

Die im Feld ermittelte Bodenmächtigkeit war in vielen Datenquellen enthalten (Abbildung 6-7), dementsprechend gut ist die Datenbasis für diesen Parameter. Die Regionalisierung der Bodenmächtigkeit liefert plausible Ergebnisse (Abbildung 6-8).

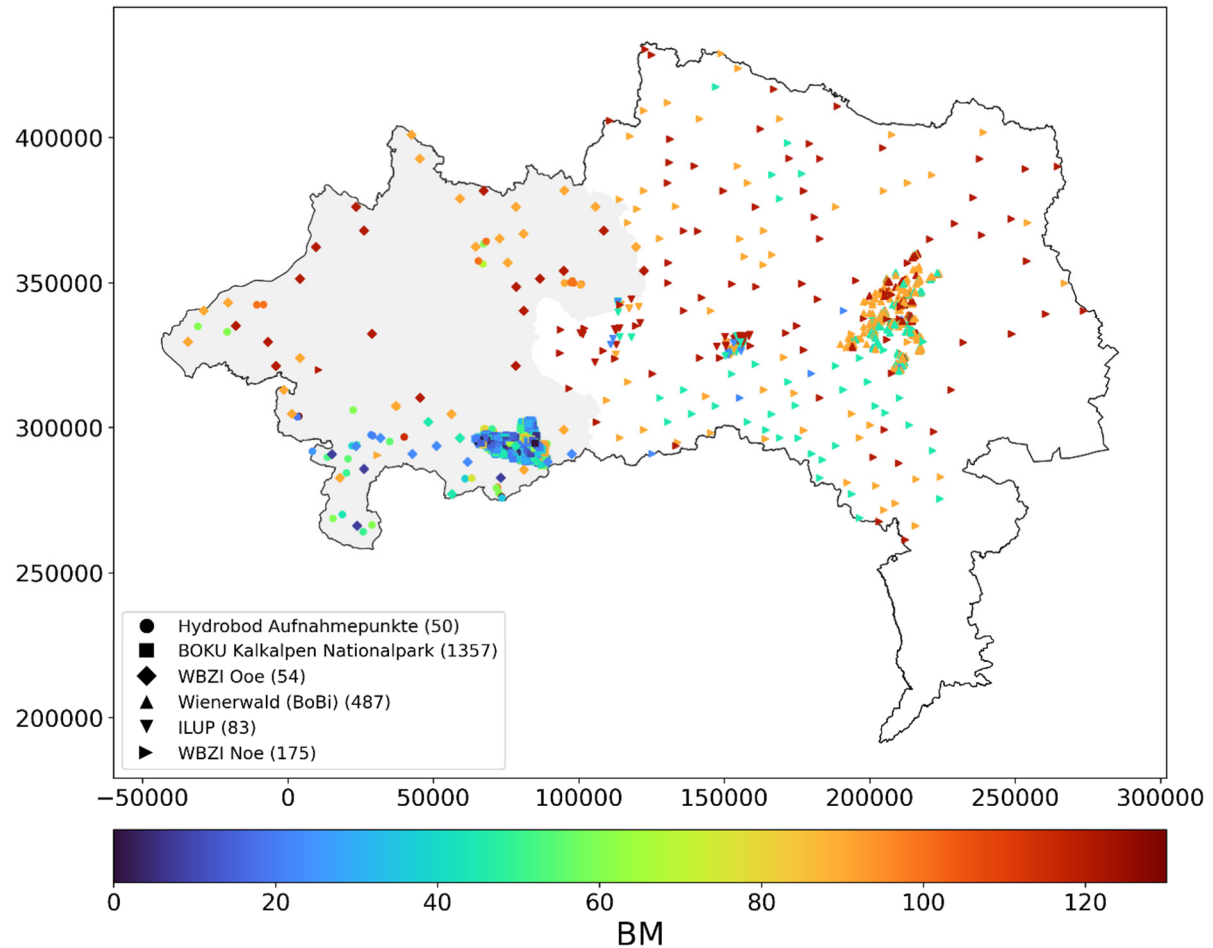


Abbildung 6-7: Datenquellen, Verteilung und Gründigkeit für den Parameter Bodenmächtigkeit (OÖ und NÖ)

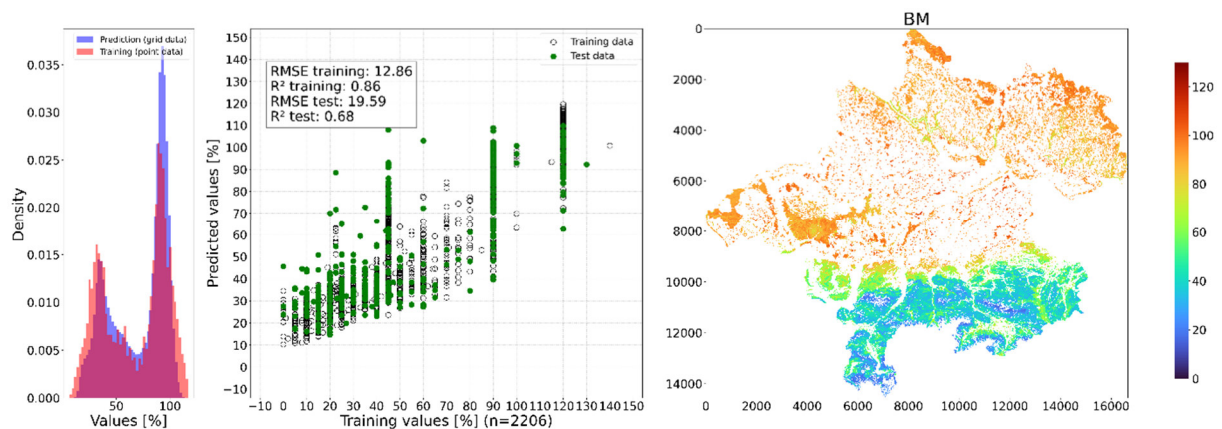


Abbildung 6-8: Regionalisierte Bodenmächtigkeit auf Basis aller verfügbarer Punkte

6.1.4.4. Lagerungsdichte

Dieser Parameter ist für den Oberflächenabfluss (in Verbindung mit der Bodenart) von großer Bedeutung. Leider ist die Datengrundlage sehr begrenzt, da die Daten dafür nur im Rahmen des Projektes HydroBOD erfasst werden konnten. Obwohl die statistischen Kennwerte vergleichsweise gut sind (Abbildung 6-9), zeigte sich im weiteren Verlauf, dass Einflüsse wie z.B. Beweidung auf dieser Datenbasis nicht zufriedenstellend erfasst und bewertet werden konnten.

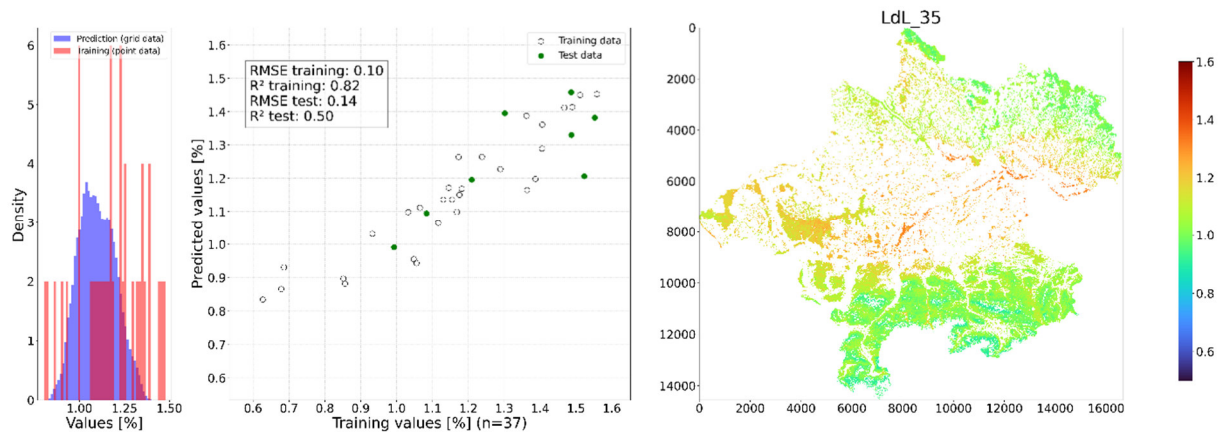
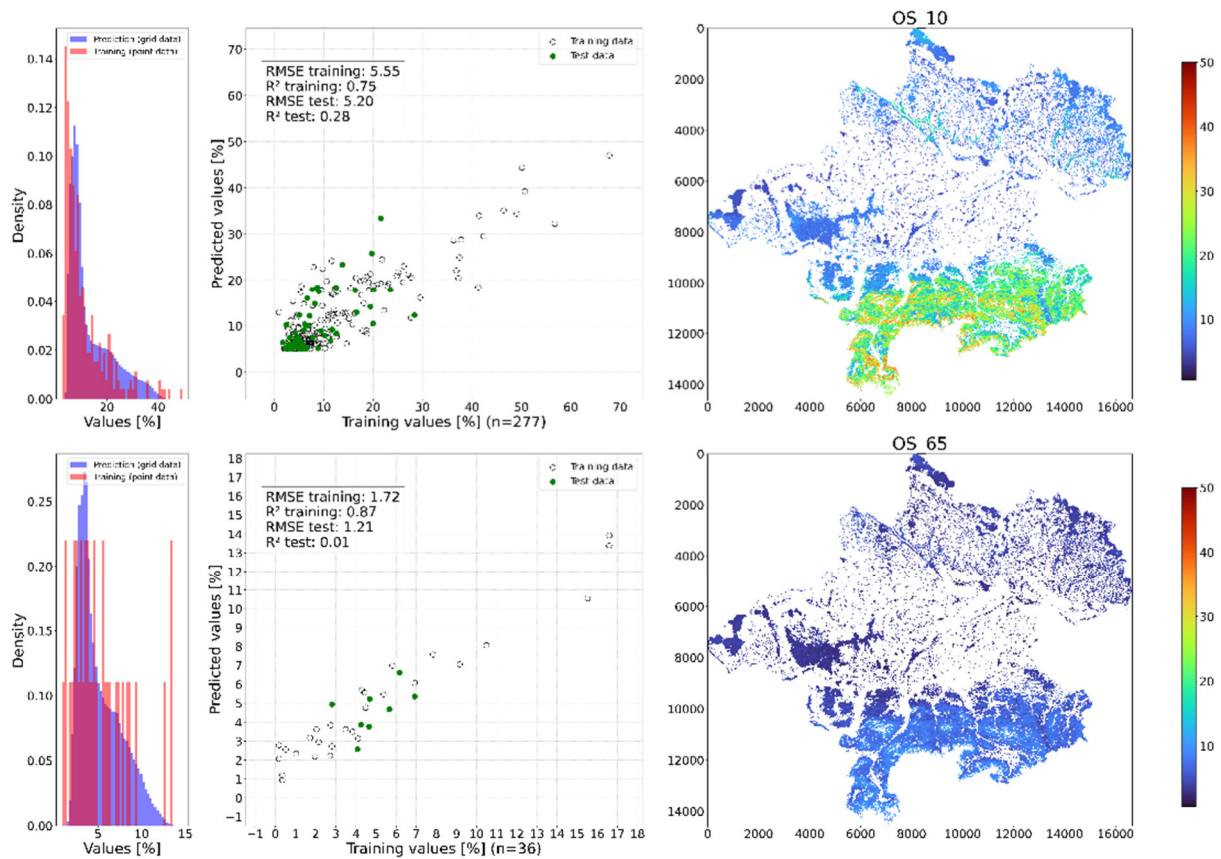


Abbildung 6-9: Ergebnis Regionalisierung Lagerungsdichte, Tiefenstufe 20-50 cm

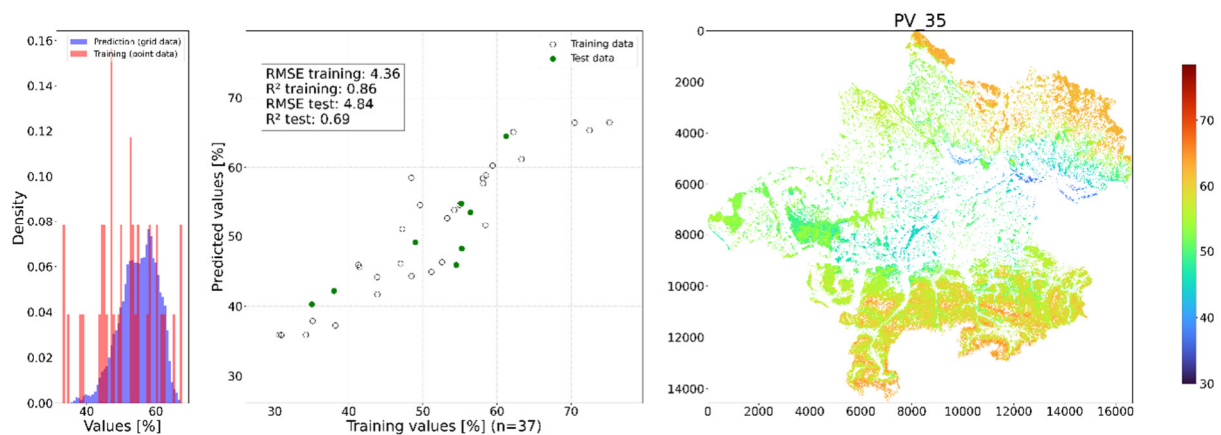
6.1.4.5. Gehalt an organischer Substanz

Der Gehalt an organischer Substanz, der z.B. für die Speicherfähigkeit relevant ist, nimmt mit der Tiefe deutlich ab (Abbildung 6-10).



6.1.4.6. Porenvolumen

Die Regionalisierung des direkt aus dem Probematerial analysierten Gesamtporenvolumens zeigt plausible Ergebnisse. Auch in diesem Fall sind ausschließlich Daten aus den Felderhebungen für HydroBOD verfügbar, wodurch die Datengrundlage für die Regionalisierung stark eingeschränkt ist. Dennoch lassen sich zumindest plausible Ergebnisse ableiten (Abbildung 6-11), und die statistischen Kennwerte sind akzeptabel.



6.1.5. Regionalisierungsverfahren Siedlungsgebiet

Innerhalb des Siedlungsgebiets kommt es aufgrund eines mehr oder minder hohen Anteils an versiegelten Flächen verstärkt zu Oberflächenabfluss (Achleitner et al. 2020, Klebinder et al. 2010, 2007), da die Infiltration des Niederschlagswassers in den Boden verhindert wird. Darüber hinaus verliert der Boden sämtliche wichtige Funktionen, wie die Wasserspeicherkapazität, damit auch die Fähigkeit der Evapotranspiration und wird auf seine Trägerfunktion reduziert. Angemerkt wird, dass die Bodenversiegelung neben dem Verlust an wertvollen Böden auch einen erheblichen Effekt auf das Stadtklima hat (ÖROK 2023).

Der Siedlungsraum ist durch Landnutzungsklassen gekennzeichnet, die den anthropogenen und wirtschaftlichen Bedürfnissen angepasst sind. Darunter fallen Flächennutzungen wie Wohnraum, Verkehrs- oder Betriebsflächen. Der Trend der Flächeninanspruchnahme für Siedlungsgebiet und somit Bodenversiegelung liegt in Österreich weiterhin auf einem hohen Niveau. Diese Boden- bzw. Flächeninanspruchnahme geht größtenteils auf Kosten der land- und forstwirtschaftlichen Flächen und bedeutet neben erhöhtem Oberflächenabfluss auch einen dauerhaften Verlust von biologisch produktiven Böden (ÖROK 2023).

Für das Siedlungsgebiet in Oberösterreich sind keine Bodendaten aus systematischen Messungen verfügbar. Es ist davon auszugehen, dass ein überwiegender Anteil der Böden unter den in der Landbedeckungskarte als Siedlungsgebiet ausgewiesenen Flächen durch menschliche Eingriffe massiv verändert wurde. Dadurch ist eine Regionalisierung auf der Basis von konzeptionellen, bodenkundlichen Zusammenhängen nicht zielführend. Aufgrund der räumlichen Nähe vieler Siedlungsgebiete zu landwirtschaftlichen Flächen kann jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass sich das Grundsubstrat bzw. das Bodenmaterial ähnelt. Daher wurden die Bodeneigenschaften aus den landwirtschaftlichen Flächen unter Anwendung eines Nearest-Neighbour-Algorithmus auf die angrenzenden Siedlungsflächen übertragen (Kapitel 6.1.2). Aufgrund der in Österreich ausgeprägten Zersiedelung ist der größte Teil der als Siedlungsgebiet ausgewiesenen Rasterzellen direkt von landwirtschaftlichen Flächen umgeben, sodass dieser Ansatz fachlich gerechtfertigt werden kann. Die wesentliche Berücksichtigung der veränderten hydrologischen Bodeneigenschaften durch Siedlungstätigkeit erfolgt anhand von Daten zum Versiegelungsgrad im nächsten Schritt (Kapitel 6.2.4).

6.2. Hydrologische Bewertung

6.2.1. Pedotransferfunktionen (PTF)

Pedotransferfunktionen (PTF) ermöglichen die Abschätzung von bodenhydrologischen Kennwerten zur Wasserspeicherfähigkeit und hydraulischen Leitfähigkeit im gesättigten und ungesättigten Zustand auf Basis vergleichsweise leicht bestimmbarer Bodenparameter. Für das HydroBOD-Modell werden als Input unter anderem die nutzbare Feldkapazität (nFK), die Luftkapazität (LK) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit benötigt, in Verbindung damit

ist auch eine Ausweisung des Totwasseranteils (Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt; TW) notwendig (Abbildung 6-12).

Es stehen aus der internationalen Literatur verschiedene hydrologische PTFs zur Auswahl, die meisten davon wurden für landwirtschaftlich genutzte Böden entwickelt. Sie wurden mit unterschiedlichsten Methoden erstellt, die von einfachen linearen Regressionen über multiple Regressionen bis zur Anwendung von selbstlernenden Algorithmen, verschiedene Komplexitätsstufen umfassen. Mittlerweile existieren unzählige PTFs, die aber nur für bestimmte Einzugsgebiete oder Regionen Gültigkeit haben (Van Looy et al. 2017).

Die Einteilung von PTFs erfolgt dabei in zwei Gruppen: Parametrische und Punkt-PTFs. Während durch die Parametrischen PTFs die Parameter zur Beschreibung der Retentionskurve ermittelt werden, werden bei Punkt-PTFs die Wassergehalte für einzelne Wasserspannungswerte (z.B. Wassergehalt bei pF 1,8 zur Ermittlung der Feldkapazität) berechnet.

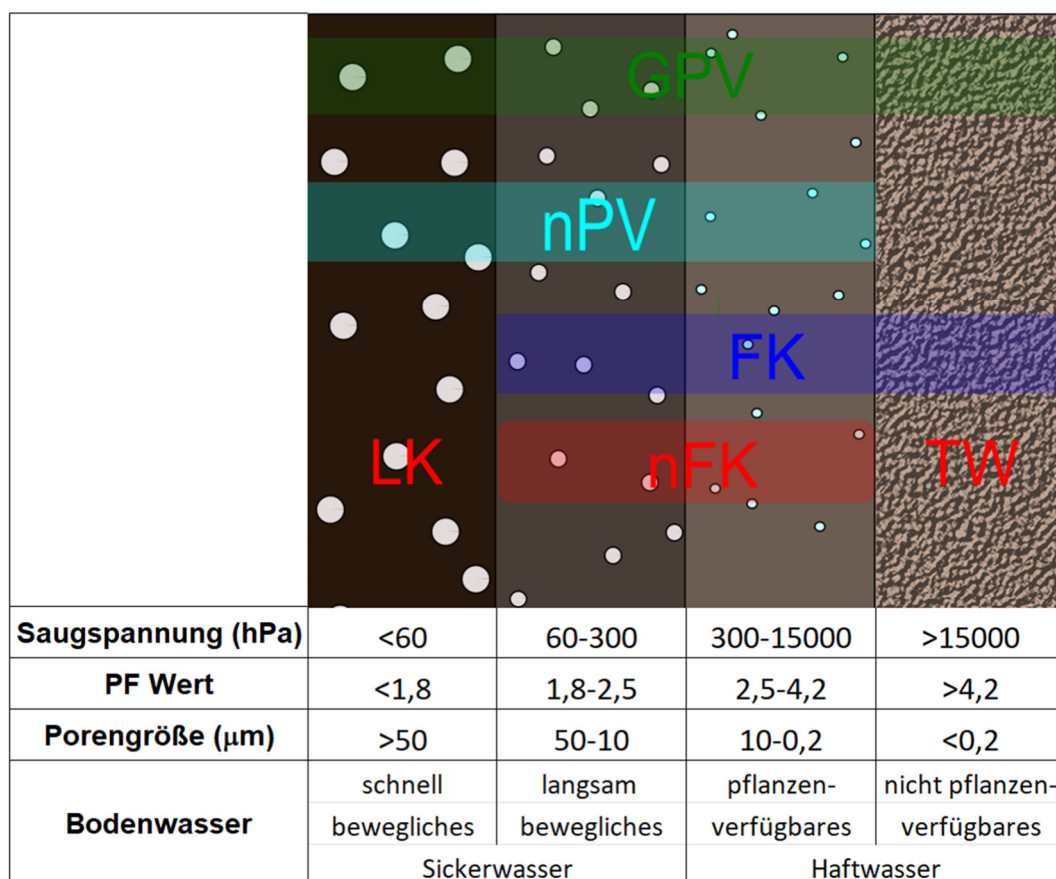


Abbildung 6-12: Porenverteilung des Bodens (nach AG Boden 2005, modifiziert), GPV = Gesamtporenvolumen, nPV = nutzbares Porenvolumen

6.2.2. Pedotransferfunktion Landwirtschaft

Zur flächenhaften Ermittlung der hydrologischen Bodeneigenschaften für landwirtschaftliche Flächen wurden verschiedene Ansätze getestet. Aufgrund der Tatsache, dass der Großteil der bestehenden PTFs für bestimmte Einzugsgebiete bzw. Regionen entwickelt wurde, erfolgte im Rahmen des Projekts die Entwicklung von neuen Vorhersagemodellen (IKT-PTF; Darmann et al. in Vorbereitung). Diese hatten die Berechnung der Parameter Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und gesättigte hydraulische Leitfähigkeit zum Ziel. In weiterer Folge konnten die für das Projekt erforderlichen Zielvariablen Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität abgeleitet werden. Die Basis zur Ableitung neuer Modelle bildet die Labordatenbank des BAW-IKT (vgl. Kapitel 4.4.5). Diese beinhaltet Bodendaten von diversen Projekten und Monitoringkampagnen aus ganz Österreich, die unterschiedlichste Bodentypen und Landschaftsräume repräsentieren.

Zur Entwicklung der neuen PTFs wurden verschiedene Methoden geprüft, wobei die Umsetzung schlussendlich durch die Anwendung der „Random Forest“-Methode erfolgte. Dabei handelt es sich um ein Klassifikations- bzw. Regressionsverfahren, welches aus mehreren unkorrelierten Entscheidungsbäumen besteht.

Da in der Folge die Anwendung der IKT-PTF auf die Profildaten der österreichischen Bodenkartierung vorgesehen war, standen als mögliche Input-Variablen nur die Parameter zur Verfügung, die auch in diesem Datensatz bestimmt wurden (Tabelle 6-3). Bei der Anpassung der IKT-PTF wurden die Parameter beliebig kombiniert, lediglich die Textur und die mittlere Entnahmetiefe wurden vorab als fixe Eingangsparameter definiert.

Tabelle 6-3: Bodeneigenschaften, die sowohl in der Bodendatenbank des IKT als auch bei der österreichischen Bodenkartierung quantifiziert wurden

Bodeneigenschaft	Einheit
Mittlere Entnahmetiefe	cm
Bodentextur	Masseprozent
Humusgehalt	Masseprozent
Grobstoffanteil	Masseprozent
pH-Wert	-
CaCO ₃ -Gehalt	Masseprozent

Bei der Entwicklung der Modelle wurden vorab 20 % vom vorhandenen Datensatz für Validierungszwecke separiert, die verbleibenden 80 % wurden als Trainingsdatensatz verwendet. Anhand dieser Trainingsdaten erfolgte die Entwicklung von PTFs für die entsprechenden Zielvariablen, während die vorab isolierten Testdaten eine Überprüfung der eigenen PTF, aber auch die Anwendung und Vergleich von bereits existierenden PTFs erlauben.

Zur Bewertung der Genauigkeit der Vorhersagen auf Basis mehrerer Parameter wie dem Bestimmtheitsmaß R^2 , dem Root Mean Square Error (RMSE), dem Mean Error (negativer Wert: Überschätzung, positiver Wert: Unterschätzung der Prognose) oder dem Standard Deviation of Prediction Error (SDPE).

Die Treffsicherheit der neu entwickelten IKT-PTF kann für alle Zielgrößen als gut bis sehr gut beurteilt werden, die R^2 lagen durchwegs im Bereich 0,8, außer bei der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, wo die erreichten Werte um 0,6 im internationalen Vergleich dennoch führend sind. Zur Visualisierung der Unsicherheit des Rechenergebnisses wurde auch der Interquantilsabstand (zwischen 10 %- und 90 %-Quantil) als Maß für die Modellunsicherheit ausgegeben (Meinshausen, 2006). Es zeigte sich bei so gut wie allen Kennwerten (Abbildung 6-13; steht hier beispielhaft), dass im Bearbeitungsbereich Landwirtschaft ein deutlicher Unterschied in der Treffsicherheit der Prognosen in Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit besteht

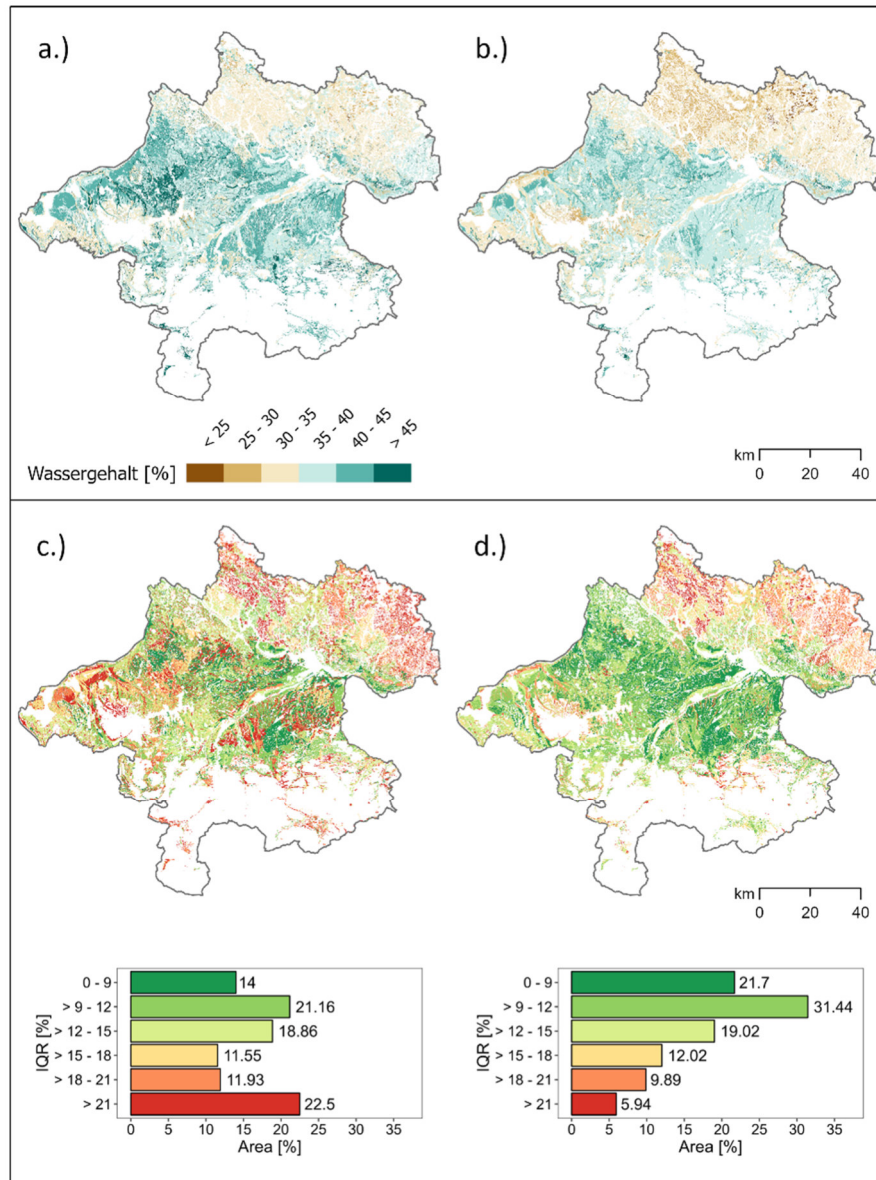


Abbildung 6-13: Ermittelter Wassergehalt bei Feldkapazität ($pF = 1,8$) für landwirtschaftliche Flächen in Oberösterreich. a: Wassergehalt bei Feldkapazität für Tiefenstufe 1 (TS1). b: Wassergehalt bei Feldkapazität ($pF = 1,8$) für das gesamte Profil. c: Interquartilsabstand (Q90-Q10) für Tiefenstufe 1 (TS1). d: Interquartilsabstand (Q90-Q10) für das gesamte Profil

Im oberösterreichischen Zentralraum und weiten Teilen des Innviertels herrschen schluffreiche Böden vor, die auch in den meisten ackerbaulich dominierten Regionen Österreichs zu finden sind. Daher findet sich auch in der Ausgangsbasis für die PTF-Entwicklung, der Bodendatenbank des BAW-IKT ein Überhang von schluffreichen Böden und die Unsicherheiten der PTF sind gering. Weniger gute Ergebnisse werden in den sandigen Böden der Böhmisches Masse und in den schweren Böden der voralpinen Talfüllungen erzielt, da hier die Datengrundlage wesentlich schlechter ist.

6.2.3. Pedotransferfunktion Wald

Für den Wald gestaltete sich die Auswahl einer geeigneten PTF insofern schwierig, als die meisten PTFs für landwirtschaftliche Böden entwickelt wurden und daher für Wald sowie waldfreie Hochlagen nur bedingt geeignet sind. Grund dafür sind die unterschiedlichen Eigenschaften von Waldböden, speziell die höheren Humusgehalte und geringeren Lagerungsdichten, die nicht oder nur vereinfacht (etwa durch Zusammenfassen geringer Lagerungsdichteklassen zu einer Klasse) abgebildet.

Um die Durchlässigkeit humos geprägter Waldstandorte besser abzudecken, wurden zwei in Deutschland speziell für Waldböden entwickelte Ansätze (Puhlmann & Wilpert 2011, Teepe et al. 2003) auf ihre Eignung überprüft. Beide Ansätze waren für Bodendaten in Oberösterreich jedoch ungeeignet und mussten verworfen werden. In Anhang 3 wird die Problematik von Wald-PTFs anhand der PTF nach Teepe et al. (2003) im Detail erläutert.

Aufgrund dieser Probleme wurde schließlich auf den schon in HydroBOD NÖ eingesetzten Ansatz nach Stenitzer et al. (1988) zurückgegriffen, der allerdings auch für landwirtschaftliche Böden entwickelt wurde. Dadurch gibt es für die unter Waldstandorten auftretenden hohen Humusgehalte (h6 und h7) keine Angaben. Dies führte dazu, dass bei der flächenhaften Anwendung der PTF teilweise Lücken in den Daten entstanden. In diesen Fällen wurden die Humusstufen so modifiziert, dass die höchste verfügbare Humusstufe herangezogen wurde, die finalen Tabellen finden sich ebenfalls im Anhang 3.

Ein Vorteil der PTF nach Stenitzer et al. (1988) ist, dass aus dieser nicht nur LK und nFK, sondern auch FK, GPV und ks-Werte direkt abgeleitet werden konnten (Abbildung 6-12).

Die benötigten Eingabegrößen Grobstoffklassen, Humusklassen, Dichteklassen und Bodenart nach KA5 stammen aus der Regionalisierung (Tabelle 6-4 - Tabelle 6-6). Dazu wurden die regionalisierten, flächenhaften Werte für Skelettgehalt (Feldwerte), Lagerungsdichte (Laborwerte), organische Substanz (Umrechnung in Humusgehalt über den Zusammenhang $C_{org} = OS/1,72$) in die entsprechenden Klassen nach KA5 eingeteilt. Ebenso wurden die regionalisierten Werte zu Sand, Schluff und Ton in die Bodenarten nach KA5 umgerechnet.

Tabelle 6-4: Grobstoffklassen nach KA5 für Pedotransferfunktionen und Standardkurven

Klasse		In Masse-%	In Masse-%
g0	sehr schwach	< 2	< 3
g1	schwach	2 bis < 10	3 bis < 15
g2	mittel	10 bis < 25	15 bis < 40
g3	stark	25 bis < 50	40 bis < 60
g4	sehr stark	50 bis < 75	60 bis < 85
g5	extrem stark	≥ 75	≥ 85

Tabelle 6-5: Humusklassen nach KA5 für Pedotransferfunktionen und Standardkurven

Klasse	Bezeichnung	in Masse-%
h0	humusfrei	0
h1	sehr schwach humos	< 1
h2	schwach humos	1 bis < 2
h3	mittel humos	2 bis < 4
h4	stark humos	4 bis < 8
h5	sehr stark humos	8 bis < 15
h6	extrem humos, anmoorig	15 bis < 30
h7	organisch, Torf	≥ 30

Tabelle 6-6: Lagerungsdichteklassen nach KA5, für Pedotransferfunktionen und Standardkurven, TRD = Trockenrohdichte

Klasse	Bezeichnung	Kennwert TRD + 0,009 Ton (%)
Ld1	sehr gering	< 1,4 g/cm ³
Ld2	gering	1,4 bis < 1,6 g/cm ³
Ld3	mittel	1,6 bis < 1,8 g/cm ³
Ld4	hoch	1,8 bis < 2,0 g/cm ³
Ld5	sehr hoch	≥ 2,0 g/cm ³

6.2.4. Pedotransferfunktion Siedlungsgebiet

Um die Veränderungen in der hydrologischen Funktionsfähigkeit der Böden aufgrund von Bautätigkeiten abzubilden, werden die ermittelten Kennwerte mit dem Versiegelungsgrad (vgl. Kapitel 4.1.11) korrigiert. Bei den Kennwerten, die eine Speicherkapazität repräsentieren, werden die Ergebnisse mit dem Versiegelungsgrad (in 10 %-Stufen klassifiziert) reduziert. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird direkt im Modell über den Versiegelungsgrad modifiziert und muss nicht vorab korrigiert werden.

6.2.5. Sonstige Flächen

In vielen Bereichen treten Flächen mit besonderen hydrologischen Verhältnissen auf, die im HydroBOD Modell nicht zur Gänze abgebildet werden können. Solche Bereiche müssen daher in den Input-Daten gesondert berücksichtigt werden.

Felsflächen: Bezüglich der Größe des Zwischenabflusses auf unbedeckten Felsflächen differieren die Angaben und Meinungen sowohl in der Literatur als auch zwischen Experten. Im Allgemeinen sind Felsflächen oft kompakt und wenig durchlässig (PSINOT, Kohl et al. 2021, interne Bewertung der Lithologie Kärntens nach Abflussklassen, Kohl 2023 unpubliziert). Durchlässig werden sie durch Risse, Spalten und Klüfte (z.B. Karst). Mit zunehmender Abflussmenge und steigender Neigung und damit verbundener steigender Abflussgeschwindigkeiten sinkt jedoch das Infiltrationspotential tendenziell.

Da auf Felsflächen aufgrund der fehlenden Bedeckung mit Boden allein das Verhältnis zwischen oberirdischem Abfluss und Abfluss im Untergrund relevant ist, wurden diese gesondert ausgewiesen. Es wurden Bereiche mit einer Hangneigung $> 50^\circ$ als Felsflächen definiert und diesen in Abhängigkeit der geologischen Zwischenabfluss-Klasse eigene Zwischenabflusswerte zugeordnet. Diese setzen sich aus dem Zwischenabfluss der zugrundeliegenden geologischen Einheit zugewiesen (Tabelle 5-2, Tabelle 5-3) und dem Mittelwert der Abflussklasse 5 (bei 87,5 %) nach Definition von Markart et al. 2004) zusammen.

Hangschuttflächen: Hangschuttflächen weisen, durch +/- permanente Umlagerung bzw. Übersarung, besondere bodenhydrologische Eigenschaften auf, die von Bereichen mit ungestörter Bodenbildung abweichen. Aus diesem Grund wurde als Erweiterung zum bestehenden Modellansatz aus HydroBOD Niederösterreich 2 die Eingabe eines Hangschuttlayers ins Modell aufgenommen. Diese potenziellen Hangschuttflächen repräsentieren die ermittelte Bedeckung mit Hangschutt je Pixel der Hangschuttmodellierung (Kapitel 5.6). Dieser Layer wird wie in Kapitel 9.1.2 - 9.1.2 beschrieben im Modell behandelt.

Wasserflächen: Niederschläge, die auf Wasserflächen treffen, werden zu 100 % abflusswirksam. Da die für das Modell relevanten Bodenparameter (k_s -Werte, LK, n_{FK} etc.) für Wasserflächen nicht vorliegen, sind diese bei den finalen Ergebnissen ausgespart worden.

Gletscher: Für Gletscher wurde angenommen, dass diese schneefrei sind (worst case) und der auf das Eis treffende Niederschlag daher zu 100 % als Oberflächenabfluss abgeleitet wird.

Moore auf landwirtschaftlichen Flächen: Für die meisten organischen Böden sind in der österreichischen Bodenkartierung keine Messwerte für die Textur aufgenommen worden. Die Abschätzung von hydrologischen Bodenkennwerten für organische Böden erfolgte daher durch Tabellenwerte (AG Boden 2005). Da die Datengrundlage auch keine genaue Zuordnung der Tabelleneingangsparameter Torfart, Zersetzungsstufe oder Substanzvolumen zulässt, wurden jeweils mittlere Klassenwerte für diese Kennwerte gewählt.

7. Aufbereitung der bodenhydrologischen Kennwerte

7.1. Aufbereitung und Modifikation der Raster

Als Auflösung der Endprodukte wurde 30 m festgelegt. Die mit den beschriebenen Ansätzen gewonnenen Ergebnisse der Landschaftsbereiche (Siedlungsgebiet, Landwirtschaft, Wald und waldfreie Hochlagen) wurden zusammengeführt und auf Lücken bzw. Überschneidungen überprüft. Die regionalisierten Raster wurden teilweise noch modifiziert (abflussspeichernde Bodenmächtigkeit) beziehungsweise wurden aus ihnen die finalen bodenhydrologischen Kennwerte ermittelt und die für das HydroBOD-Modell notwendigen Inputfiles erstellt.

Aufgrund der Aggregation von Detailinformation auf die Zellengröße des Ausgaberrasters sind Information von linearen Elementen mit besonderen hydrologischen Eigenschaften wie Straßen oder Gewässer entsprechend ihres Flächenanteils am Pixel mitunter unscharf. Bei nachfolgenden Modellierungsanwendungen ist dem Rechnung zu tragen, indem verfügbare Vektordatensätze solcher linearer Elemente miteinbezogen werden.

7.2. Abflussspeichernde Bodenmächtigkeit

Die abflussspeichernde oder abflusswirksame Bodenmächtigkeit (asBM, Eder et al. 2011) ist Grundlage für die Berechnung des Bodenwasserspeichers. Sie wird für diese Arbeit als Mächtigkeit des Solums bis zum Ausgangsgestein definiert. Ein allfälliger Cv-Horizont wird noch zum Solum dazugerechnet. Die Maximaltiefe wurde mit 80 cm festgelegt, was der Untergrenze von Tiefenstufe 3 entspricht.

Die Ausweisung der asBM erfolgt bei landwirtschaftlich genutzten Flächen anhand der Horizontansprache der österreichischen Bodenkartierung. Unter Berücksichtigung von vier Beurteilungskriterien konnte die Untergrenze für die asBM festgelegt werden (Abbildung 7-1).

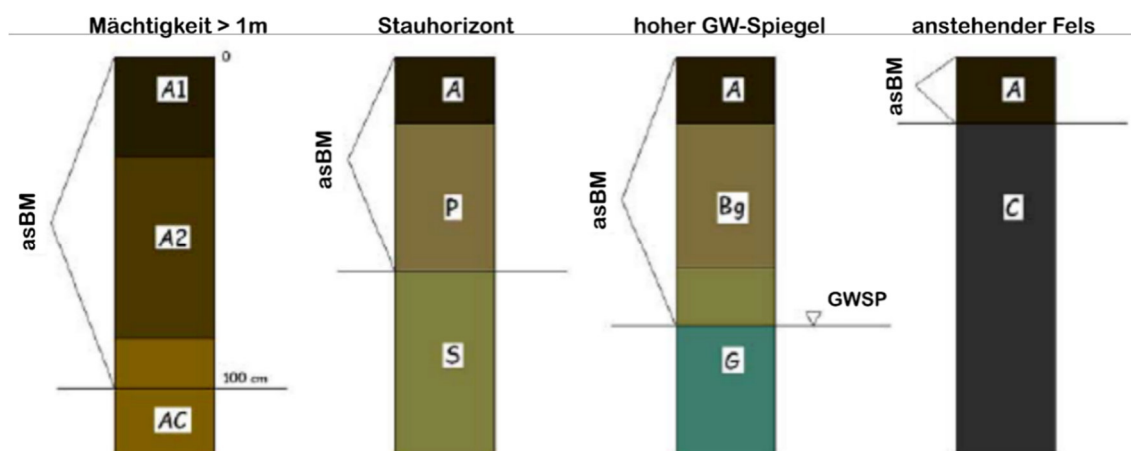


Abbildung 7-1: Illustration der Ausweisung der abflussspeichernden Bodenmächtigkeit (asBM) auf landwirtschaftlichen Flächen anhand der Daten aus der österr. Bodenkartierung; Abkürzung: GWSP = Grundwasserspiegel (Eder et al. 2011)

Für die waldfreien Hochlagen und bewaldete Flächen erfolgte die Bestimmung der abflussspeichernden Bodenmächtigkeit über den beschriebenen Regionalisierungsansatz. Zur Ausweisung von Stauhorizonten, die die wasserspeichernde Bodenmächtigkeit bei ihrem Auftreten verringern, wurde aufgrund der Datenlage im Wald und bei waldfreien Hochlagen ein zweiteiliges Verfahren gewählt. Zunächst wurden Pixel mit potenziellen Stauhorizonten (ja/nein) ermittelt. Gleichzeitig wurde auf Basis aller Probepunkte, in denen ein solcher ausgewiesen wurde (S, SP-Horizont) oder anzunehmen ist (P-Horizont, Untergrenze) die mittlere Tiefe des Staukörpers ermittelt. Die beitragende Mächtigkeit des Bodenspeichers wurde dann an den Pixeln mit potenziellem Staukörper um die so ermittelte Tiefe des Staukörpers reduziert (mittlere Tiefe des Staukörpers im Bearbeitungsgebiet Wald bei 43 cm).

Information über die Lage des Grundwasserspiegels lag für das Bearbeitungsgebiet Wald und waldfreie Hochlagen nur an sehr wenigen Erhebungspunkten vor, auch gab es keine anderen Datenquellen, aus denen diese schlüssig abgeleitet werden konnte. Eine Begrenzung der Gründigkeit in Gewässernähe wurde daher entsprechend den Erfahrungen von HydroBOD NÖ (1 und 2) nicht vorgenommen.

7.3. Skelettanteil im Boden

Die Bestimmung des Skelettanteiles (Korngrößen > 2 mm) im Boden ist insofern von Bedeutung, als er das Speichervolumen (die in Oberösterreich vorkommenden Gesteine weisen überwiegend kein nennenswertes Porenvolumen auf, es wird daher mit 0 angenommen) im Boden reduziert. Auf einem Standort mit z.B. 500 dm³/m³ Gesamtporenvolumen (ohne Skelett) verringert sich dieses bei z.B. 30 % Skelettanteil auf 350 dm³/m³.

Auf den landwirtschaftlichen Flächen wurde der Skelettanteil im Zuge der österr. Bodenkartierung erhoben, die Ergebnisse daraus werden direkt verwendet und wie in Kapitel 6.1.5 beschrieben auf das Siedlungsgebiet umgelegt. Für Waldstandorte und waldfreie Hochlagen wurde der Skelettanteil ebenso wie andere relevante Bodenparameter auf Basis der verfügbaren Grundlagen wie in Kapitel 6.1.3 beschrieben regionalisiert.

7.4. Nutzbare Wasserspeicherkapazität

Die nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK), auch „Bodenwasserspeicher“, beschreibt den potenziellen Gesamtwasserspeicher in mm. Die Berechnung erfolgte in zwei Schritten:

- 1.) Berechnung der effektiven Bodenmächtigkeit (effBM) aus asBM (in mm) und Anteil Skelettgehalt (in Anteilen zwischen 0 und 1)

$$effBM = asBM * (1 - Skelett)$$

2.) Berechnung des nWSK aus effBM und Anteil nFK (in Anteilen zwischen 0 und 1)

$$nWSK = effBM * nFK$$

Diese Berechnungen wurden flächenhaft, auf Basis der regionalisierten Kennwerte, für die erste Tiefenstufe (TS1, 0-20 cm, *Abbildung 7-2*) und für das gesamte Profil (TS1-TS3, 0-80 cm) durchgeführt.

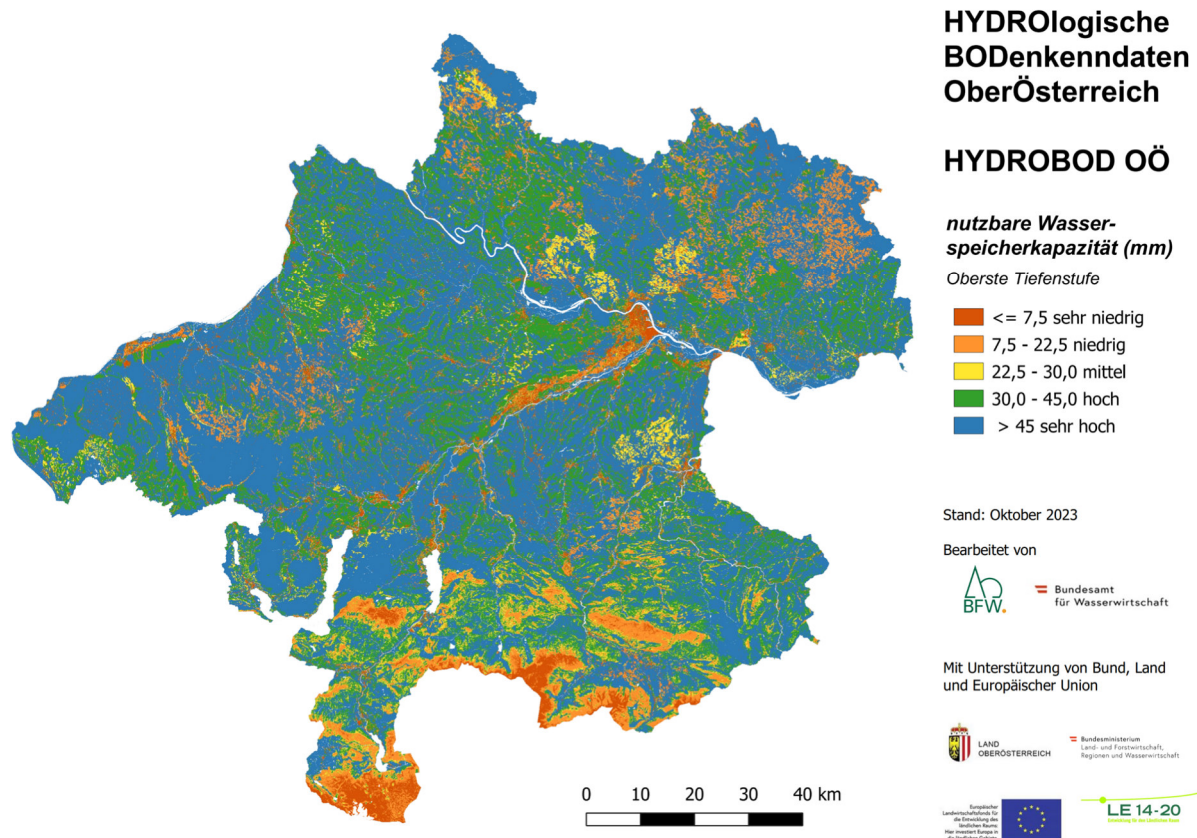


Abbildung 7-2: Nutzbare Wasserkapazität der Tiefenstufe 1 in mm

7.5. Kapillarer Porenfluss

Als Input für das in HydroBOD implementierte Infiltrationsmodell (vgl. Kapitel 9.2.1) ist neben der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit k_s auch ein Wert für den sogenannten kapillaren Porenfluss (G [L]) bereitzustellen. Er wird aus der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ($K(\Psi)$ [L/T]) als Funktion der Bodenwasserspannung (Ψ [L]) folgendermaßen errechnet:

$$G = \frac{1}{k_s} \int_{-\infty}^0 K(\Psi) d(\Psi)$$

Für die ungesättigte Leitfähigkeit sind nur in äußerst geringem Umfang Messdaten verfügbar, sodass wiederum eine PTF eingesetzt wurde. In den PTF nach Stenitzer (1988) sind für eine Vielzahl von Kombinationen aus Bodenart, Gesamtporenvolumen, Humusgehalt und Grobstoffgehalt G-Werte ausgewiesen, die bereits im Zuge von HydroBOD NÖ für die großflächige Verwendung aufbereitet wurde. Daher wurde diese PTF auch für HydroBOD OÖ

eingesetzt. Wo die Eingangsdaten aus der Regionalisierung Kombinationen ergaben, die nicht im ursprünglichen Datensatz enthalten sind, wurde mittels einer multiplen linearen Regressionsgleichung ein G-Wert ermittelt (Abbildung 7-3).

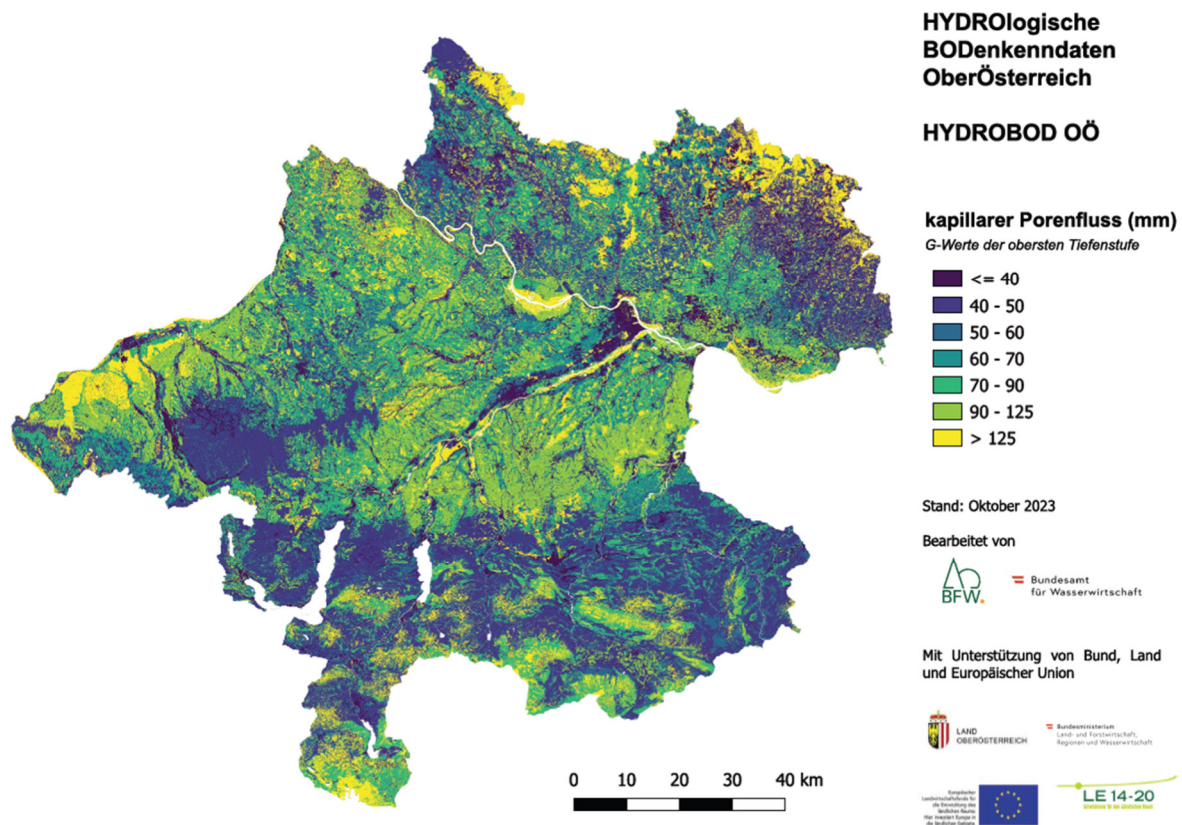


Abbildung 7-3: Ausweisung des kapillaren Porenflusses G (mm) für die oberste Tiefenstufe

8. Klassifikation dominanter Abflussprozesse und Berechnung von Abflussbeiwerten

8.1. Abflusstypen

Im Modellansatz von HydroBOD werden drei Hauptabflussprozessgruppen und 12 Subprozessgruppen (Abbildung 8-1) unterschieden. Um einen dominanten Prozess festzustellen, wird jedes Pixel im Bearbeitungsgebiet zuerst einer Hauptgruppe (OA – Oberflächenabfluss, ZA – Zwischenabfluss und SP&TS – Speicherung und Tiefensickerung) zugeordnet. Ein Abflussprozesstyp ist dann dominant, wenn mehr als 50 % der Abflussfracht einer Zelle über diesen gebildet werden (Sotier et al. 2017).

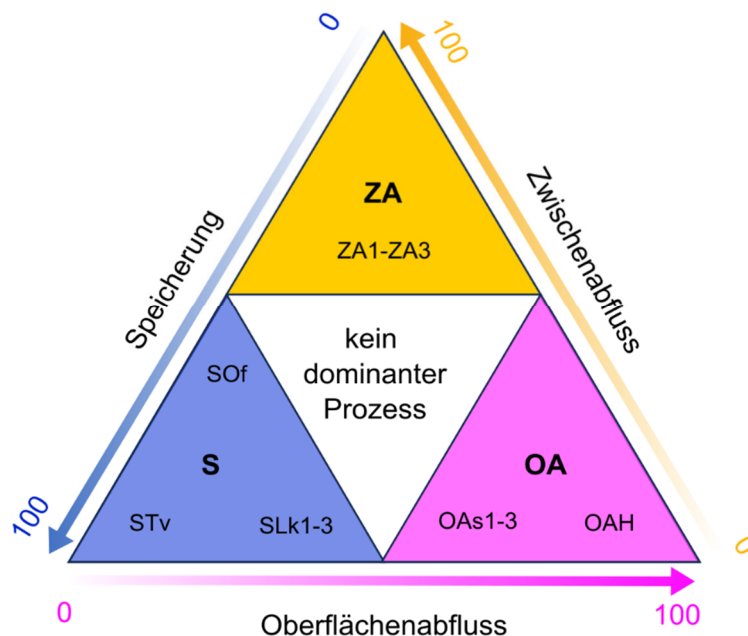


Abbildung 8-1: Klassifikation der dominanten Abflussprozesse (Klebinde et al. 2012, verändert)

Oberflächenabfluss (OA) wird durch ein Infiltrationsdefizit in der Infiltrationsschicht, (Horton'scher Oberflächenabfluss OAH) ausgelöst. Dies tritt auf, wenn die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten wird oder die Oberflächenbeschaffenheit keine Infiltration in den Boden zulässt. Weiters kann auch Sättigungsoberflächenabfluss (OAs), aufgrund von Stauprozessen in den Bodenschichten auftreten.

Zwischenabflussprozesse (ZA) treten aufgrund von Perkulationsdefiziten in den tieferen Bodenschichten und im geologischen Untergrund auf. Im Modell ist eine Geländeneigung von mehr als 10 % erforderlich, um das Auftreten von Zwischenabfluss zu induzieren.

Speicherprozesse (S) umfassen verschiedene Arten der Wasserspeicherung. Dazu gehören die Interzeption von Niederschlag durch Pflanzen oder andere Oberflächen (SOf), die

vorübergehende Speicherung von Wasser an der Bodenoberfläche sowie die Speicherung von Wasser in den Bodenschichten (SLk). Zu den Speicherprozessen wird auch die Tiefenperkolation (STv) gezählt, bei der das Wasser in den geologischen Untergrund versickert.

8.2. Reaktionszeiten

Auf der zweiten Klassifikationsebene ist es möglich, den individuellen Prozessen Reaktions- und Verzögerungszeiten zuzuordnen. Diese Zuordnung beruht auf der Tiefe, in der die Abflussreaktion stattfindet, wobei tiefere Lagen eine verstärkte Verzögerung der Reaktion aufweisen. Es ist zu beachten, dass im Modell selbst keine Berechnung der Wasserverlagerungsgeschwindigkeiten erfolgt, daher ist diese Klassifizierung qualitativ und von regionalen Gegebenheiten abhängig.

Das Klassifikationsschema nach Sotier et al. (2017) weist flachgründigen (0-20 cm) Prozessen der Kategorie „rasch“ oder „unverzögert“ zu. Verzögerte Abflussreaktionen treten in der mittleren Tiefenstufe (20-50 cm = mittelgründig) auf, während stark verzögerte Abflussreaktionen in der untersten Tiefenstufe (50-80 cm = tiefgründig) auftreten. Abflussreaktionen im geologischen Untergrund werden keiner spezifischen Reaktionsgruppe zugewiesen, da sie in verschiedenen Tiefen auftreten können. Sofern keine dominante Reaktionsgruppe ermittelt werden kann, wird die Bezeichnung "keine dominante Reaktionsgruppe" verwendet.

Tabelle 8-1: Klassifikation der Verzögerung nach Prozessgruppen und Reaktionseinheiten

Prozessgruppe	Prozess	Reaktionsgruppe	Code	Anmerkung
Oberflächen-/ Sättigungsabfluss	OAsH	unverzögert	11	Horton'scher Oberflächenabfluss
	OAs1	unverzögert	11	Sättigungsabfluss oberste Bodenschicht
	OAs2	verzögert	12	Sättigungsabfluss mittlere Bodenschicht
	OAs3	stark verzögert	13	Sättigungsabfluss untere Bodenschicht
	OAs4, OA	keine Klassifizierung	10	im geol. Untergrund, nicht klassifiziert
Zwischenabfluss	ZA1	unverzögert	21	ZA in oberster Bodenschicht
	ZA2	verzögert	22	ZA in mittlerer Bodenschicht
	ZA3	stark unverzögert	23	ZA in unterer Bodenschicht
	SOA4, OA	keine Klassifizierung	10	im geol. Untergrund, nicht klassifiziert
Speicherung /Tiefensickerung	SP	keine Klassifizierung	30	Bodenspeicher
keine dominante Prozessgruppe	KdPG1	unverzögert	41	ZA in oberster Bodenschicht
	KdPG2	verzögert	42	ZA in mittlerer Bodenschicht
	KdPG3	stark unverzögert	43	ZA in unterer Bodenschicht
	KdPG	keine Klassifizierung	40	keine dominante Reaktionsgruppe

9. HydroBOD- Modell

Das HydroBOD-Modell ist ein konzeptionelles Ereignismodell, das im Rahmen von HydroBOD NÖ (Sotier et al. 2017) entwickelt wurde. Folgende Annahmen liegen dem Modell zugrunde:

- Das Modell ist ein Ereignismodell, es wird nur über die Dauer des Niederschlagsereignisses modelliert.
- Eine mögliche Entleerung der Bodenspeicher wird nicht berücksichtigt, weder während des Ereignisses noch danach.
- Alle Prozesse laufen in allen Tiefenstufen gleichzeitig ab.
- Jede Zelle wird isoliert betrachtet, eine Interaktion mit den Nachbarzellen wird nicht modelliert.
- Ausgegeben werden Abflussfracht, Gesamtabflussbeiwert, Oberflächenabflussbeiwert am Simulationsende und der dominante Prozessstyp je Pixel.

9.1. Eingabegrößen

Die in der Tabelle 9-1 angeführten 20 Raster müssen als TIFF-Dateien vorliegen und dabei eine einheitliche Zellengröße sowie dasselbe Bezugsraster aufweisen. Details zu der Erstellung der jeweiligen Raster sind den entsprechenden Kapiteln zu entnehmen.

Tabelle 9-1: Eingabefiles für die HydroBOD - Modellierung

Datei-Kürzel Modell	Bezeichnung	Details	Einheit	abgeleitet aus...
hybod_g1, hybod_g2, hybod_g3	G-Werte (kapillarer Porenfluss)	als Inputgröße für das Infiltrationsmodell	mm	Standardkurven BAW <ul style="list-style-type: none"> • GPV (gerundet auf 10er) • Grobstoffklassen • Humusklassen • Bodenartenklassen (de)
hybod_geo	geologische Einheit	definiert im Modell den Anteil an Zwischenabfluss zur Perkolation in den Untergrund	-	Substratklassifikation
hybod_k0_mv, hybod_k0_ov	vertikale gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Infiltrationslayers	bei verschlammtem („mv“) und nicht verschlammtem („ov“) Zustand	mm/d	k0_ov entspricht k1 k0_mv entspricht k1 mit entsprechendem Verschlämmungsfaktor
hybod_k1, hybod_k2, hybod_k3	ks-Wert; vertikale gesättigte hydraulische Leitfähigkeit		mm/d	PTF nach Stenitzer (1988) bzw. IKT-PTF <ul style="list-style-type: none"> • Grobstoffklasse • Humusklasse • Lagerungsdichteklasse • Bodenart (de)
hybod_In	Landnutzungseinheiten	Verwendung im Modell für <ul style="list-style-type: none"> • Größe des Interzeptionsspeichers • „Makroporenfaktor“ (Unterscheidung Wald/nicht Wald/Almen) • Oberflächenabfluss im Siedlungsgebiet 	-	siehe Landbedeckung

		<ul style="list-style-type: none"> Verschlämmungsneigung (Unterscheidung Acker/nicht Acker) 		
hybod_s1_lk, hybod_s2_lk, hybod_s3_lk	Speicher Luftkapazität		mm	PTF nach Stenitzer (1988) bzw. IKT-PTF <ul style="list-style-type: none"> Grobstoffklasse Humusklasse Lagerungsdichteklasse Bodenart (de)
hybod_s1_nfk, hybod_s2_nfk, hybod_s3_nfk	Speicher Feldkapazität		mm	PTF nach Stenitzer (1988) bzw. IKT-PTF <ul style="list-style-type: none"> Grobstoffklasse Humusklasse Lagerungsdichteklasse Bodenart (de)
hybod_sied	Versiegelung	Geht als Versiegelungsanteil in die Gesamtberechnung ein	%	
hybod_slope	Klassifizierte Geländeneigung in 3 Klassen 1... <= 2 % 2... > 2 % bis <=10 % 3... > 10 %		-	DGM
hybod_topocls	räumliche Variabilität der Bodenfeuchte		7 Klassen	ArcGIS Toolbox (eigenes Modell) <ul style="list-style-type: none"> DHM asBM ks (harmonisches Mittel aller Tiefenstufen)
Hangschutt	Hangschuttlayer; relative Bedeckung je Zelle; wird gesondert ins Modell geladen (MAIN-Modul).	Modifikation des ks-Werts	0-1	Hangschuttmodellierung
Niederschlag (ooe_bns_100a_60m.tif)	Räumliches Raster zu Bemessungsniederschlag; wird gesondert ins Modell geladen (GIS-Modul).		0..	eHYD: Bemessungsniederschlag (60min, 100-jährlich)

9.1.1. Räumliche Variabilität der Bodenfeuchte (topocls)

Die räumliche Variabilität der Grundfeuchte (topocls) wird im Modell über sieben verschiedene Klassen berücksichtigt, wobei der Wert 1 feuchte, und der Wert 7 trockene Grundverhältnisse widerspiegelt. Tallagen sind tendenziell feuchter, da Wasser aus Flächen oberhalb akkumuliert, Kuppen dagegen eher trocken (Abbildung 9-1).

In Anlehnung an das in HydroBOD NÖ entwickelte ArcGIS-Modell zur Ableitung der sieben Grundfeuchteklassen wurde diese in OÖ über TWI (Kapitel 5.3.8) und Transmissivität abgeleitet. Durch die Normierung der Werte vor der Klassenbildung lässt sich dieser Ansatz zur Ableitung der topocls auch auf andere Gebiete übertragen. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte und Berechnungen kurz erläutert.

Für die Einteilung in sieben Grundfeuchteklassen wurden

- a) der Topographic Wetnessindex (SAGA Wetnessindex, suction = 5) gewichtet mit dem verfügbaren Jahresniederschlag (im Folgenden „Raster A“)

$$\text{verfügbarer Jahresniederschlag} = N * (1 - \text{Anteil ZWA})$$

N... gemittelter lokaler Jahresniederschlag der Periode 1991-2020

Anteil ZWA... Anteil Zwischenabfluss (0-1) aus Geologie (hybod_geo)

- b) und die Transmissivität (im Folgenden „Raster B“) berücksichtigt.

$$\text{Transmissivität} = ks * asBM$$

ks... ks-Wert (gewichtetes harmonisches Mittel über alle Tiefenstufen)

asBM... abflussspeichernde Bodenmächtigkeit

Die Werte in Raster A wurden normiert ((x-Mittelwert)/Standardabweichung), ebenso Raster B. So wurde eine symmetrische Verteilung der Werte um 0 erreicht. Bei Raster B wurden die Werte vor der Normierung logarithmiert (natürlicher Logarithmus) und ein Minimum von 1 festgelegt (alle Werte $\ln(x) < 1$ gleich 1 gesetzt). Dieser Schritt dient dazu, äußerst geringe Transmissivitätswerte, die durch geringe Bodenmächtigkeiten zustanden kommen, herauszufiltern.

Für die Zusammenführung von Raster A und Raster B zur räumlichen Grundfeuchtekategorie wurde ein gewichtetes Mittel gerechnet (Gewichtung: A = 1, B = 0,5).

$$\text{Grundfeuchte} = \left(A + \frac{B}{2} \right) / 1,5$$

Die finale Einteilung erfolgte mittels equal interval (7 Klassen, Wertebereich gesetzt auf \pm zweifache Standardabweichung).

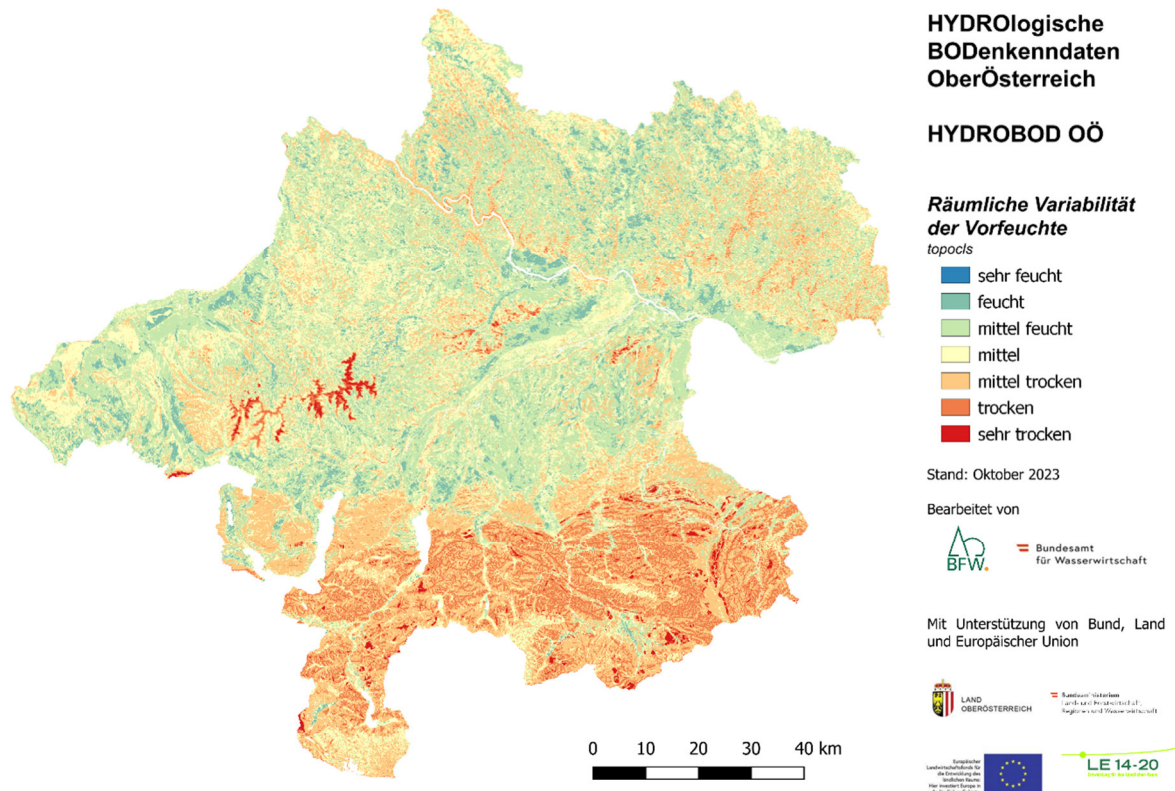


Abbildung 9-1: Räumliche Variabilität der Grundfeuchteklassen (topocls)

9.1.2. Hangschutt

Als Erweiterung zu HydroBOD NÖ wurden in HydroBOD OÖ Bereiche mit potenziellen Hangschuttablagerungen berücksichtigt. Diese gehen als relative Bedeckung der Pixel mit Hangschutt ins Modell ein (Wertebereich 0-1). Die mit Hangschutt bedeckten Bereiche stammen aus einer Hangschuttmodellierung (vgl. Kapitel 5.6).

Im Modell wird an Hangschuttbereichen der k_s -Wert modifiziert: Sind beispielsweise bei einem k_s -Wert von 300 mm/Tag und einer Niederschlagsintensität von 600 mm/Tag 60 % einer Zelle mit Hangschutt bedeckt, wird der k_s -Wert neu berechnet als:

$$k_{s\text{Hangschutt}} = 0,4 * 300 + 0,6 * 600$$

Dieser neue k_s -Wert (480 mm/Tag) setzt sich zusammen aus einem Hangschutt-Anteil ($0,6 * 600$, Gesamtniederschlagsmenge wird infiltriert) und einem hangschuttfreien Anteil ($0,4 * 300$).

9.2. Modellstruktur

Die Modell-Bodensäule gliedert sich in fünf Bereiche: Eine Infiltrationsschicht, drei Bodenschichten entsprechend den Tiefenstufen 0-20 cm, 20-50 cm und 50-80 cm, sowie einer

Schicht des geologischen Untergrunds (Abbildung 9-2). In jeder dieser Modellschichten findet in jedem Berechnungsintervall Abfluss bzw. Perkolation statt. Ist keine Bodenschicht mehr vorhanden (entweder durch Erreichen der maximalen modellierten Tiefe von 80 cm oder wegen geringerer Bodenmächtigkeit), wird auf das Geologie Modell gewechselt. Im Folgenden werden die einzelnen Modelle kurz erläutert, für eine detaillierte Beschreibung sei auf den Endbericht von HydroBOD NÖ 2 verwiesen (Sotier et al. 2017).

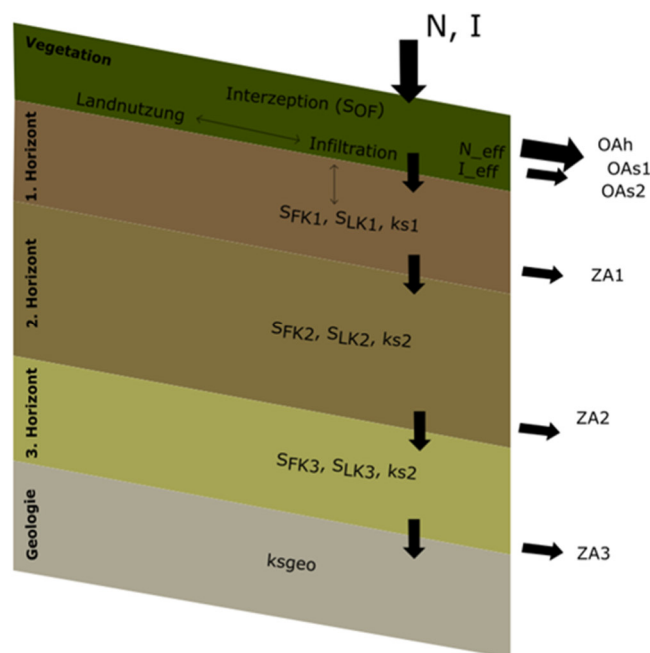


Abbildung 9-2: Schematische Abbildung der im HydroBOD-Ansatz modellierten Prozesse (Eder et al. 2011, verändert)

9.2.1. Infiltrationsmodell

Durch Integration eines Infiltrationsmodells (Sotier et al. 2017) können auch ungesättigte Verhältnisse zu Beginn des Niederschlagsereignisses berücksichtigt werden. Der Infiltrationsprozess wird in Zeitschritten berechnet, da sich der Wassergehalt im Boden und damit die Infiltrationskapazität im Verlauf des Ereignisses ändern. Die Berechnung erfolgt über das Infiltrationsmodell aus KINEROS (Woolhiser et al. 1990; Smith und Parlange 1978).

9.2.2. Bodenmodell/Abflussmodell

Die Abflussbilanz wird in allen drei Tiefenstufen einzeln berechnet. Es stehen im HydroBOD-Modell zwei unterschiedliche Versionen des Abflussmodells zur Verfügung: In Version 1 werden erst die Bodenspeicher gefüllt, bevor Wasser perkoliert, in Version 2 wird das Wasser erst in tiefere Schichten perkoliert, bevor eine Füllung der Speicher stattfindet. Der verfügbare Speicher wird stark durch die Hangneigung beeinflusst. Im Projekt HydroBOD OÖ wurde Version 1 gewählt (Speicherfüllung vor Perkolation).

9.2.3. Modell Geologie

Basierend auf der Geologie (hydrogeologische Substratkarte) wird ein definierter Anteil des infiltrierten Niederschlags zugewiesen, der in den geologischen Untergrund versickert (siehe Kapitel 5.5).

9.3. Steuerungsgrößen

Die Abflussganglinie in einem Einzugsgebiet ergibt sich aus dem Niederschlagsverlauf, den topographischen Gegebenheiten, der Art der Landbedeckung, der Bodenbeschaffenheit (einschließlich Verdichtung und Verschlämmung) sowie dem Vorfeuchtezustand des Bodens.

Neben der Variation der Eingaberaster lässt sich der Modelloutput durch den Anwender auch über die Definition des Vorfeuchtezustandes, der Verschlämmung (vgl. Szenarien) und anderer Modellparameter steuern.

9.3.1. Vorfeuchtezustand

Im Modell sind vier verschiedene Vorfeuchtezustände definiert (trocken, mittel, feucht, gesättigt, Sotier et al. 2017; Tabelle 9-2, Abbildung 9-3). Diese Unterteilung in Klassen erfolgte auf Basis von Messergebnissen des Lysimeters „Feldmessstelle Petzenkirchen“, unterteilt nach ihrer Häufigkeit. Als „mittel“ wurde ein Sättigungsgrad des Bodens gewählt, der in 50 % über- und in 50 % unterschritten wird (Median). Der Sättigungsgrad „feucht“ entspricht den Werten, die in 25 % der Fälle überschritten werden und der Sättigungsgrad „trocken“ jenem, der in 25 % der Messwerte unterschritten wird. „Gesättigt“ bedeutet, dass der gesamte Bereich der nFK gefüllt ist.

Tabelle 9-2: Definition des Vorfeuchtezustandes

Vorfeuchte	Speicherfüllung
Gesättigt	0 % der nFK frei / 100 % gefüllt
Feucht	12 % der nFK frei / 88 % gefüllt
Mittel	27 % der nFK frei / 73 % gefüllt
Trocken	56 % der nFK frei / 44 % gefüllt

Bei der Umlegung dieser Vorfeuchtezustände auf die Modell-Bodensäule wurde angenommen, dass die Bodenvorfeuchte mit der Tiefe zunimmt (vgl. Abbildung 9-3).

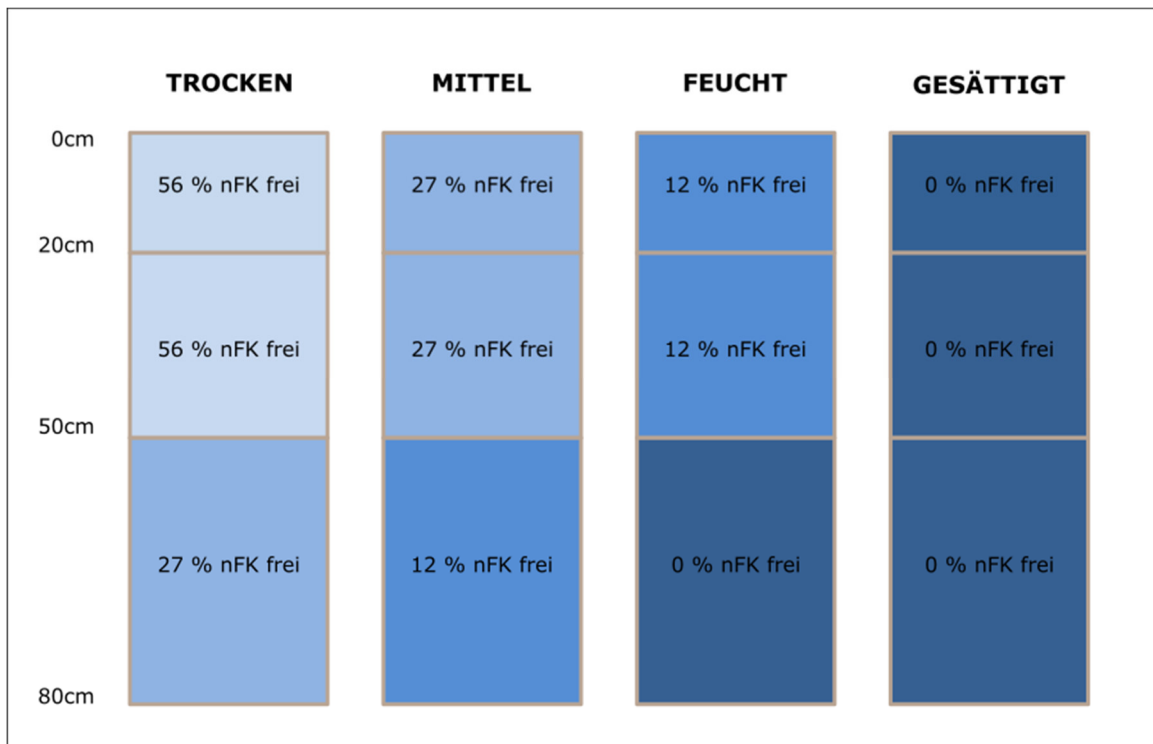


Abbildung 9-3: Vertikale Feuchteverteilung in der Modell-Bodensäule bei den unterschiedlichen Vorfeuchte-Szenarien (Sotier et al. 2017, verändert)

9.3.2. Verschlämmung

Auf Ackerflächen kann es in Abhängigkeit von der Bodenart, Vegetation und Bearbeitung zu Verschlämmung der Bodenoberfläche kommen, die das Abflussverhalten der Böden wesentlich beeinflusst. Die Verschlammungsneigung variiert mit der wechselnden Bodenbedeckung durch die Ackerkulturen oder Fruchtfolgeglieder. Der Anteil der verschlammten Bereiche auf einer Fläche bzw. in einem Einzugsgebiet kann also sowohl innerhalb eines Jahres als auch zwischen den Jahren schwanken. Der momentane Zustand zum Zeitpunkt eines Niederschlagsereignisses kann somit im Rahmen der HydroBOD OÖ Karten nicht allgemein gültig ausgewiesen werden, sondern muss bei der Niederschlags-Abflussmodellierung festgelegt werden. Dafür wurden in HydroBOD OÖ zwei Szenarien gerechnet, eines ohne Verschlammung und eines mit Ackerflächen, deren Aufnahmefähigkeit durch Verschlammung beeinträchtigt ist.

Für das Szenario verschlammte wurde die Verschlammungsneigung in Abhängigkeit von der Bodenart (Texturklassifizierung nach AG Boden, 2005) in vier Klassen unterteilt (Abbildung 9-4) und der ursprüngliche k_s -Wert der Infiltrationsschicht reduziert. Basis für die Zuweisung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_s) für die Infiltrationsschicht sind die k_s -Werte der obersten Tiefenstufe. Für den k_s -Layer ohne Verschlammung (hybod_k0_ov) wurden die k_s -Werte aus der ersten Tiefenstufe übernommen. Für das Szenario mit Verschlammung (hybod_k0_mv) wurden diese k_s -Werte, wie in Tabelle 9-3 dargestellt, in Abhängigkeit von der Bodenart reduziert.

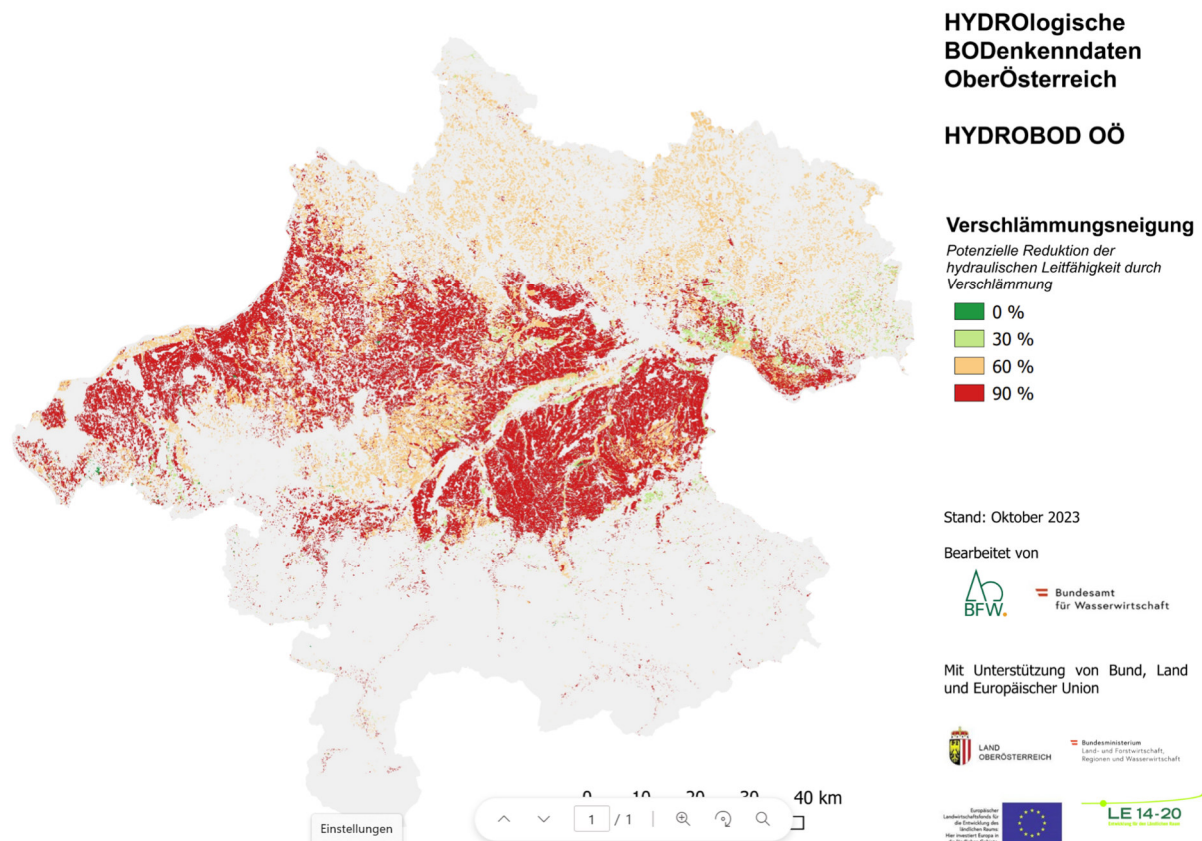


Abbildung 9-4: Bereiche und Grad der Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit durch Verschlämmung

Tabelle 9-3: Reduktion des k_s -Werts in Abhängigkeit der Bodenart für das Szenario mit Verschlämmung

Bodenart	Verschlämmungsneigung	Reduktion des k_s -Werts um ...%
Tl, Tt, Moor, Anmoor	sehr gering	0
Ss, Ls2, Ls3, Ls4, St2, St3, Lt3, Lts, Tu2, Ts2, Ts3, Ts4	gering	30
Sl2, Sl3, Sl4, Slu, Su2, Su3, Su4, Lt2, Tu3, Tu4	mittel	60
Uu, Lu, Uls, Us, Ut2, Ut3, Ut4	hoch	90

9.3.3. Beweidung

Kontinuierliche Beweidung führt zur Verdichtung der oberen Bodenschicht und beeinflusst somit das Abflussverhalten der betroffenen Landoberfläche mitunter erheblich. Beweidung kann auf den beiden Landnutzungsklassen Weide und Almen erwartet werden. Die Nutzungsklasse Weide wird durch die gleichnamige INVEKOS-Schlagnutzungsart bestimmt, fällt also in den Bearbeitungsbereich der landwirtschaftlichen Flächen, während die Almen zur übergeordneten Landnutzungsmaske Wald und waldfreie Hochlagen gezählt werden. Um den Beweidungseffekt in die Ausweisung der bodenhydrologischen Kennwerte einfließen zu lassen, mussten also zwei verschiedene Wege in der Datenverarbeitung gegangen werden.

Die Berechnungsverfahren für die landwirtschaftlichen Böden, vor allem die Entwicklung der IKT-PTF, erfolgt auf der Basis von Profildaten, die zum größten Teil auf Ackerfläche und untergeordnet Mähwiesen gewonnen wurden. Es wird also nicht davon ausgegangen, dass der Beweidungseffekt in den Ausgangsdaten adäquat repräsentiert ist. Um die Verdichtung des Oberbodens auf den Weideflächen abzubilden, wurde daher eine Reduktion der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Lagerungsdichte und Bodenart durchgeführt (Tabelle 9-4). Diese Änderung basiert auf einer statistischen Auswertung aus HydroBOD NÖ, bei der festgestellt wurde, dass der überwiegende Teil der als Weide ausgewiesenen Flächen der Lagerungsdichteklasse 2 zugeordnet werden konnte. Durch eine Erhöhung der Lagerungsdichte von Klasse 2 auf Klasse 3 konnte eine mittlere relative Änderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Bodenart ermittelt werden (Eder et al. 2011).

Im Gegensatz dazu sind in den Punktdaten der waldfreien Hochlagen Almflächen enthalten. Es kann angenommen werden, dass der Beweidungseffekt in den Ausgangsdaten und somit auch in den darauf aufbauenden Modellansätzen repräsentiert wird. Eine manuelle Reduktion des k_s -Wertes ist daher nicht erfolgt.

Tabelle 9-4: Mittlere relative Änderung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit auf beweideten landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von der Bodenart

Bodenart	mittlere relative Änderung (%)	Bodenart	mittlere relative Änderung (%)
Ss	36	Lu	48
Sl2	35	Uu	53
Sl3	37	Uls	51
Sl4	38	Us	62
Slu	49	Ut2	58
St2	42	Ut3	53
St3	0	Ut4	50
Su2	42	Tt	0
Su3	34	Tl	38
Su4	45	Tu2	61
Ls2	49	Tu3	60
Ls3	57	Tu4	54
Ls4	54	Ts2	0
Lt2	38	Ts3	0
Lt3	57	Ts4	0
Lts	17		

9.3.4. Makroporenfaktor

Die Infiltrationseigenschaften von Böden hängen neben dem Parameter k_s auch erheblich von sekundären Strukturen wie Tiergängen, Trockenrissen und Makroporen ab. Daher

unterscheidet sich die tatsächliche Infiltrationsleistung meist deutlich von der berechneten oder im Labor gemessenen Matrixdurchlässigkeit. Die Bestimmung der Erhöhungsfaktoren erfolgte zunächst auf Basis von Erfahrungen, die bei der Gegenüberstellung von gemessenen Infiltrationswerten aus Beregnungsversuchen und der an diesen Standorten berechneten Durchlässigkeit gewonnen wurden. In der Folge wurden die Auswirkungen auf die Modellierungsergebnisse im Zuge der Ergebnisvalidierung beurteilt und verfeinert. Mit diesen (Tabelle 9-5) wurde die Infiltrationsleistung der entsprechenden Einheiten multipliziert, um die Makroporosität zu berücksichtigen. Ein Faktor 1,35 (z.B. Wald) erhöht dabei den zuvor ermittelten k_s -Wert um 35 %. Der Faktor für Almen fällt gering aus (starke Reduktion von k_s), weil sich aufgrund der schlechten Datenlage der Einfluss der Beweidung nur unzureichend in den ermittelten k_s -Werten abbildet. Dadurch musste korrigierend eingegriffen werden.

Tabelle 9-5: Erhöhungsfaktoren für Landnutzungsarten zur Berücksichtigung der Makroporosität

Landnutzungsklasse	Faktor
Wald	1,35
Almen	0,3
Andere Flächen	1

9.3.5. Basisintensität

Kohl (2011) hat auf Basis zahlreicher Beregnungsversuche mit verschiedenen Beregnungsintensitäten nachweisen können, dass der Abflussbeiwert bei Abflusskonstanz zwischen einer Regenintensität von 30 mm/h und 100 mm/h um nur rund 6 % steigt. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Infiltrationskapazität mit zunehmender Niederschlagsintensität steigen muss. Im Modell wird dies durch eine Steigerung des Abflussbeiwertes um 0,00073% pro Zunahme der Niederschlagsintensität um einen mm/h umgesetzt (Sotier et al. 2017). Die Niederschlagsdifferenz wird dabei auf einen Wert von 40 mm/h bezogen.

9.4. Szenarien

Infiltration, verfügbarer Bodenspeicher und Zwischenabfluss sind, wie bereits ausgeführt, von variablen Systemgrößen wie dem Niederschlag (Intensität und Summe), der Vorfeuchte zu Ereignisbeginn und der Verschlammung abhängig. Deshalb wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber Szenarien für ausgewählte Systemzustände sowie der Bemessungsniederschlag vereinbart.

Als Bemessungsereignis wurde ein Niederschlag mit 60 Minuten Dauer und einer 100-jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit vereinbart. Die Werte dafür wurden der offiziellen hydrographischen Datenbank für Österreich (eHYD.gv.at, Raster Bemessungsereignis)

entnommen, zwischen den Rasterpunkten wurden die Werte für die einzelnen Pixel durch Interpolation ermittelt (Abbildung 9-5).

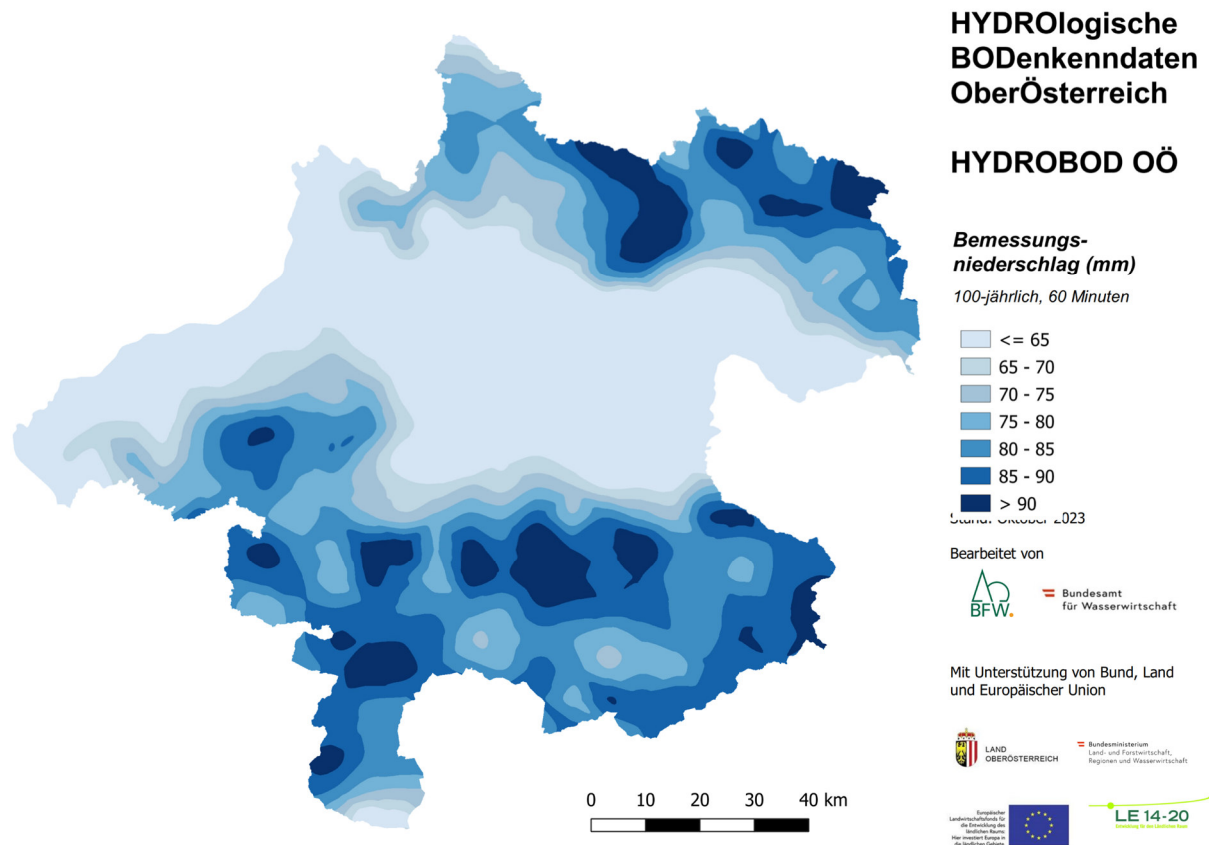


Abbildung 9-5: Niederschlagsmengen des Bemessungsereignisses (Dauer 60 Minuten, Eintrittswahrscheinlichkeit 100-jährlich)

Die Karten wurden für drei im Modell definierte Vorfeuchtestufen (mittel, feucht und gesättigt, vgl. Kapitel 9.3.1), jeweils mit und ohne Verschlammung (Kapitel 9.3.2) erstellt. Es stehen somit Informationen zu sechs verschiedenen Systemzustände für die Niederschlags-Abflussmodellierung zu Verfügung (Tabelle 9-6).

Tabelle 9-6: Szenarien der Systemzustände

	mittel	feucht	gesättigt
ohne Verschlammung			
mit Verschlammung			

9.5. Ausgabe HydroBOD-Modell

Folgende relevanten Kennwerte werden als .tif von HydroBOD ausgegeben, beziehungsweise daraus abgeleitet:

Vout_0/1/2/3/V_down: errechnete Mengen [mm] von Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss der Tiefenstufen TS1-3 und Tiefsickerung in geologischen Untergrund.

S_0/S_Surface/SLK_1/SnFK_1/SLK_2/SnFK_2/SLK_3/SnFK_3(/S_Geo): errechnete Menge der verbleibenden Speicherkapazitäten [mm] an Oberfläche (Interzeption und Pfützenbildung) und in den Tiefenstufen TS1-3. Die eventuell mögliche Speicherkapazität des geologischen Untergrundes (**SGeo**) wurde in HydroBOD OÖ auf 0 gesetzt (nicht berechnet).

DPE/DPE kategorisiert (dominante Prozesseinheiten): Gibt den Anteil der Prozesstypen (Oberflächenabfluss/ Zwischenabfluss/ Speicherung/ Tiefensickerung, [0-1]) bezogen auf die örtliche Niederschlagsmenge aus. Zusätzlich wird bei Oberflächen- und Zwischenabfluss deren Auftreten nach Tiefenstufe (unverzögert, verzögert, stark verzögert) in 10 beschrifteten Rasterbändern ausgegeben. Kategorisiert: Ausgabe jenes Prozesses, welcher lokal >50 % der Eintragsmenge ausmacht (vgl. Kapitel 8.1).

Oberflächenabflussbeiwert [0-1] (psioa): ermittelt aus Oberflächenabfluss/ Niederschlagsintensität am Ereignisende.

Gesamtabflussbeiwert [0-1]: ermittelt aus Gesamtabfluss/ Gesamtniederschlag des Ereignisses.

Abflussfracht (V0): Definiertes Abflussvolumen in einer definierten Zeiteinheit

10. Ergebnisse

10.1. Allgemeines

Für das Landesgebiet von Oberösterreich wurde eine Reihe von bodenhydrologisch relevanten Kennwerten flächendeckend generiert. Die Bewertung erfolgte grundsätzlich sowohl für drei definierte Tiefenstufen: 0-20 cm, 20-50 cm sowie 50-80 cm als auch für das gesamte Profil (0-80 cm). Durch die Aufteilung des Bearbeitungsgebiets in landwirtschaftlichen Bereich und Wald/waldfreie Hochlagen, setzen sich die finalen Datensätze der bodenphysikalischen und -hydrologischen Parameter aus zwei separaten Datensätzen mit teils unterschiedlicher Methodik zusammen, die erst am Ende der Bearbeitung zusammengefügt wurden. Die methodischen Unterschiede sind auf die unterschiedliche Datenlage in den beiden Bearbeitungsgebieten zurückzuführen. Tabelle 10-1 bietet eine Übersicht zu den erstellten Kennwerten und der Datenherkunft der einzelnen Parameter.

Tabelle 10-1: Liste der ermittelten bodenhydrologischen Kennwerte (laut Auftrag) mit Anmerkung zur Erstellungsprozedur

Kennwert bzw. Karte	Erstellungsprozedur	
	Wald und Hochlagen	Landwirtschaft und Siedlungsgebiet
Landnutzung	Datenfusion, gesamtes Landesgebiet	
Bodenart (Sand, Schluff, Ton)	Regionalisierung	eBOD
Skelettgehalt	Regionalisierung	eBOD
Lagerungsdichte	Regionalisierung	PTF BAW
Gehalt an organischer Substanz	Regionalisierung	eBOD
Wasserleitfähigkeit gesättigt (ks)	PTF BFW	PTF BAW
Nutzbare Feldkapazität	PTF BFW	PTF BAW
Luftkapazität	PTF BFW	PTF BAW
Totwasserkapazität	PTF BFW	PTF BAW
Gesamtporenvolumen	PTF BFW	PTF BAW
Nutzbare Porenvolumen	PTF BFW	PTF BAW
Bodenmächtigkeit	Regionalisierung	eBOD
Hydrologische Reaktionseinheit		Modell
Oberflächenabflussbeiwert		Modell
Oberflächenrauigkeit		Modell

Im folgenden Ergebnisteil werden die Ergebnisse für das gesamte Bundesland vorgestellt und Anhand von Beispielen diskutiert. Die vollständigen Datensätze sind in digitaler Form verfügbar. Die einzelnen Schritte und Zwischenergebnisse, die für die Kalibrierung und Bewertung zur Erstellung der Ergebnisse notwendig waren, sind nicht in den digital bereitgestellten Datensätzen enthalten, um die Übersichtlichkeit zu wahren. Zu den beauftragten einzelnen Parametern sind für alle Tiefenstufen Files im tif-Format verfügbar (Ordner: Raster), als pdf wurden daraus jeweils die Tiefenstufe 1 sowie das Gesamtprofil

generiert (Ordner: Karten). Zur Herangehensweise bei der Erstellung der unterschiedlichen Datensätze wird auf die jeweiligen Methodik-Kapitel verwiesen (Kapitel 6.1.4 und 7.1).

10.2. Technisches

Die flächenhaften Raster mit Bodenkennwerten wurden für das gesamte Untersuchungsgebiet Oberösterreich erstellt. Für Flächen, an denen aufgrund der Landnutzung kein Boden vorhanden ist, wurden die Raster maskiert: Pixeln mit der Landnutzung Gletscher, stehende Gewässer, fließende Gewässer, Gewässerrandflächen oder Feuchtgebiete (LN-Codes 10, 11, 12, 13 oder 14) wurde der Wert -9998 zugewiesen. Der Leerwert für Gewässer unterscheidet sich damit vom allgemeinen Leerwert (-9999), welcher Bereiche außerhalb des definierten Untersuchungsgebiets anzeigt. Auf diese Weise lassen sich die Gewässerflächen auch in den maskierten Rastern eindeutig identifizieren und von außerhalb des Bearbeitungsgebiets liegenden Bereichen unterscheiden. Dieselbe Vorgehensweise wurde für die Maskierung der Gewässerflächen in den Modelloutput-Rastern angewendet.

10.3. Landnutzung

Im Kapitel 5.7 ist die Erstellung der Landnutzungskarte beschrieben, eine detaillierte Vorgehensweise ist zusätzlich im Anhang 1 zu finden. Das Ergebnis der Landnutzungskarte wird in 30 m Pixelauflösung zur Verfügung gestellt. Durch die Integration von verschiedenen Datenquellen konnte eine Karte mit zurzeit höchstmöglicher Aktualität und größtmöglichem Detailgrad erstellt werden. Die Veränderung der Landbedeckung schreitet aber rapide voran, sodass im späteren Anwendungsfall eine Aktualisierung notwendig sein kann.

Die Karte enthält detaillierte Informationen über 29 verschiedene Nutzklassen (Abbildung 10-1) und wird als pdf (Landnutzung.pdf) und als Raster (LNK_30m.tif) bereitgestellt.

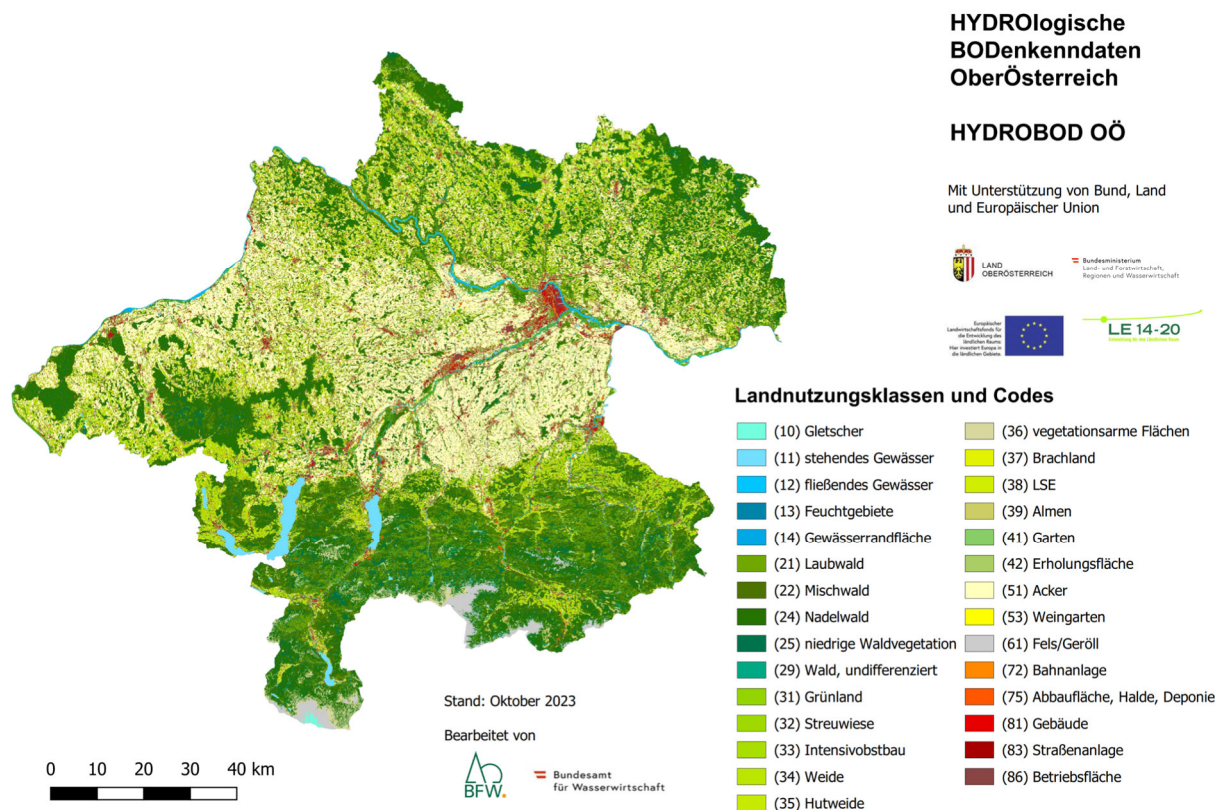


Abbildung 10-1: Erstellte Landnutzungskarte Oberösterreichs

10.4. Bodenart

Die Bodenart ist eine zentrale Größe des Bodenwasserhaushaltes und hat direkten Einfluss auf die Wasserleit- und Speicherfähigkeit des Bodens. Indirekt wirkt sie sich zudem über die unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber Verdichtung (Böden mit hohem Tonanteil neigen stärker zu Verdichtung) und Verschlammung (Böden mit hohem Schluffanteil neigen eher zu Verschlammung, Abbildung 9-4) auf das hydrologische Verhalten der Böden aus.

Für die Regionalisierung im Bereich Wald und waldfreie Hochlagen standen leider nur rund 60 Datensätze und Messwerten zur Bodenart zur Verfügung, wodurch Unschärfen zu erwarten sind (Kapitel 6.1.4.1). Im Gegensatz dazu sind für die landwirtschaftlichen Flächen ca. 1500 Profile aus der Bodenkartierung verfügbar, in denen jeweils in mehreren Tiefen die Bodenart bestimmt wurde.

Die Bodenart spiegelt in ihren Grundzügen weitgehend die Geologie des Bundeslandes wieder. Besonders die Böden der böhmischen Masse im nördlichen Oberösterreich (Mühlviertel) und zum Teil auch im Bereich der Kalkalpen weisen meist geringen Tongehalt auf, während sich im Flachland überwiegend schwerere Böden finden. Die tonreichen Talfüllungen der Kalkalpen und des Alpenvorlandes umgeben von weniger schweren Gebirgsböden sind ebenfalls gut ersichtlich (Abbildung 10-2).

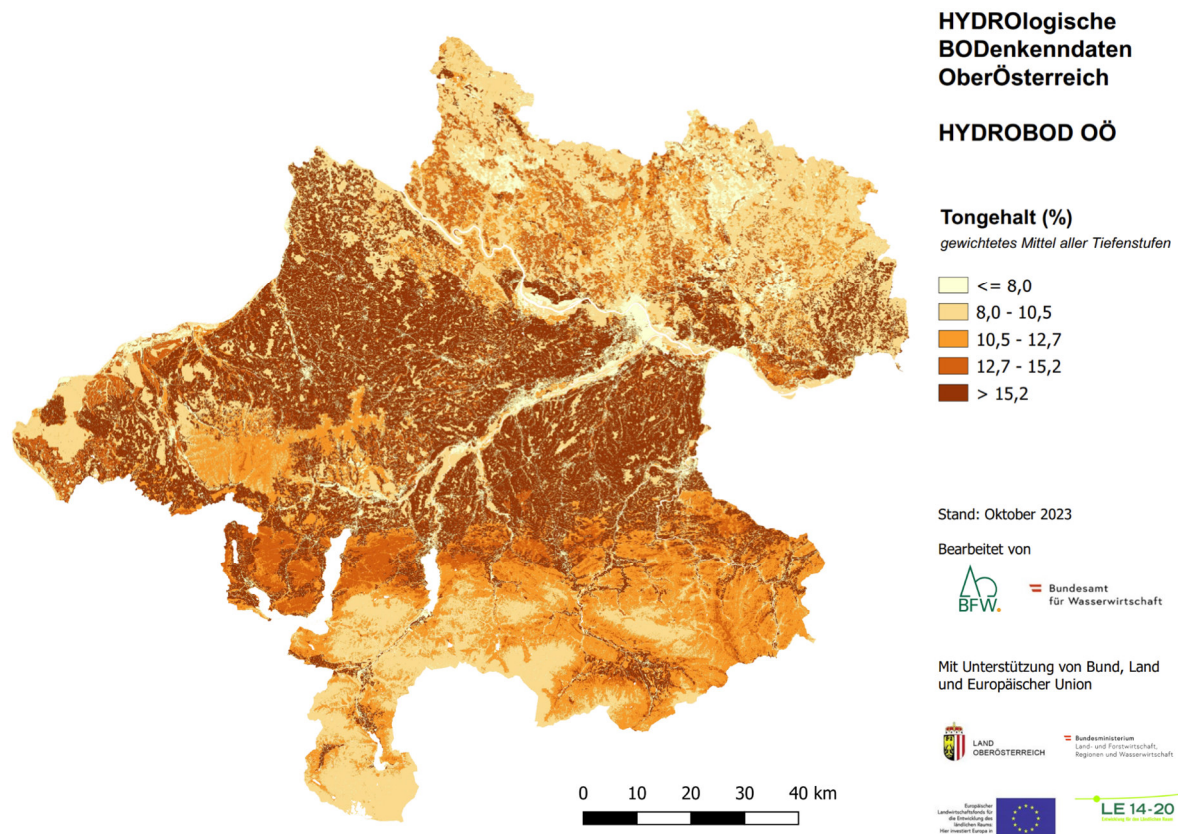


Abbildung 10-2: Tongehalt im Durchschnitt des Gesamtprofiles in Volumenprozent

Die entsprechenden Karten liegen als pdf für alle Bodenarten (Sand, Schluff, Ton) sowohl für die Gesamtprofile (z.B. Ton_profil.pdf) als auch die oberste Tiefenstufe (Ton_1.pdf) vor. Als Raster sind sie entsprechend für das Gesamtprofil (ton_combined_profil.tif) als auch für die einzelnen Tiefenstufen (z.B. ton_combined_1-3.tif) verfügbar.

10.5. Skelettgehalt

Der Skelettgehalt (Korngröße > 2 mm) reduziert im Modell den potenziellen Bodenwasserspeicher. Für die Regionalisierung standen vergleichsweise viele Punktdaten zur Verfügung (Kapitel 6.1.4.2), wodurch eine gute Datenqualität unterstellt werden kann.

Der Skelettgehalt nimmt grundsätzlich mit der Tiefe zu, allerdings nicht in der Tiefenstufe 3 im Bereich der Kalkalpen. In diesem Bereich sind die häufig vorkommenden skelettreichen Rendsinen und Kalklehm-Rendzinen zu flachgründig und relikte Braunlehmdecken weisen auch in der Tiefenstufe 3 keinen nennenswerten Skelettanteil auf. Im Flachland ist der Skelettgehalt in allen Tiefenstufen gering. Besonders die Böden im Bereich der Kalkalpen, aber auch im nördlichen Oberösterreich (Mühlviertel) und im Westen, weisen über das Gesamtprofil gesehen einen hohen Skelettgehalt auf, während dieser im Flachland überwiegend gering ist (Abbildung 10-3).

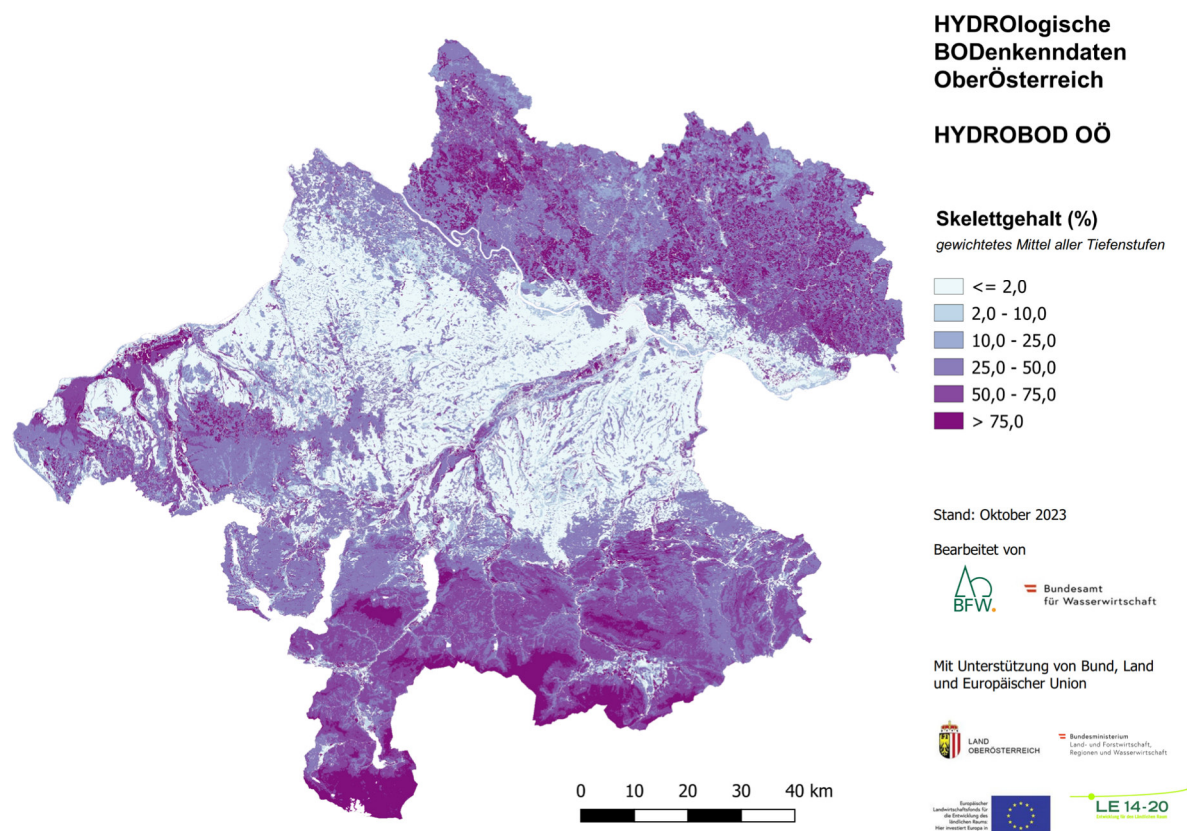


Abbildung 10-3: Skelettanteil im Gesamtprofil in Volumensprozent

Die entsprechenden Karten liegen als pdf sowohl für das Gesamtprofil (Skelett_profil.pdf) als auch die oberste Tiefenstufe (Skelett_1.pdf) vor. Als Raster sind sie entsprechend für das Gesamtprofil (skelett_combined_profil.tif) als auch für die einzelnen Tiefenstufen (skelett_combined_1-3.tif) verfügbar.

10.6. Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte wird häufig durch anthropogene Nutzung beeinflusst, verdichtete Oberböden (Weide, Rückegassen) weisen meist wesentlich höhere Abflusskoeffizienten auf als unverdichtete. So wurden bei Beregnungsversuchen im Wienerwald (2023 - laufendes Projekt HoBo: Waldbewirtschaftung im Klimawandel - Sicherung der Bodenfunktionen von Waldökosystemen durch standortsgerechte Holzernte) in Reifenspuren von Forstmaschinen Abflusswerte von bis über 90 % des Beregnungsniederschlages beobachtet (AKL 5), während auf unbeeinflussten angrenzenden Flächen wenig bis gar kein Oberflächenabfluss (max. AKL 1) beobachtet wurde. In Ackerböden findet sich oft eine stark verdichtete Schicht in 15-25 cm Tiefe, die sogenannte Pflugsohle, die als Stauschicht unter der Oberfläche fungieren kann. Darüberliegende Bereiche sättigen sich rasch auf und der Abflussprozess wird beeinflusst.

Die Regionalisierung im Bereich Wald und waldfreie Hochlagen basiert auf einem sehr limitierten Datensatz, weswegen mit entsprechenden Unschärfen zu rechnen ist (Kapitel

6.1.4.4). Angemerkt wird, dass im Regelfall in Forschungsprojekten keine Proben auf offensichtlich verdichteten Flächen (Planien, Rückegassen) geworben wurden, die dort anzutreffenden Dichteverhältnisse daher nicht in den Datensätzen vorhanden sind und über die Lagerungsdichte auch nicht abgebildet werden.

In den allermeisten Fällen haben Waldböden eine deutlich geringere Lagerungsdichte als landwirtschaftliche Böden. Erwartungsgemäß zeigte sich außerdem, dass die Lagerungsdichte mit zunehmender Tiefe generell steigt. Sie ist auf den überwiegend lockeren Böden auf Kalk im Süden von OÖ überwiegend gering (Abbildung 10-4).

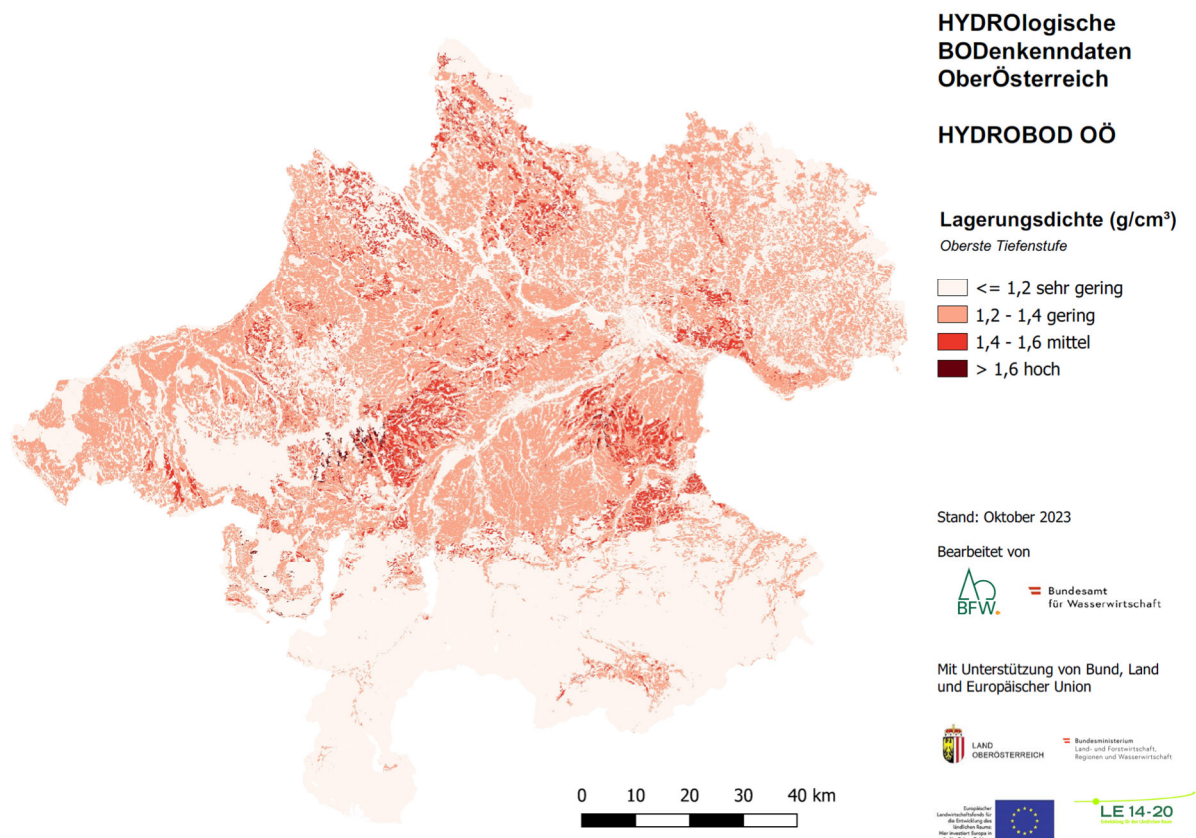


Abbildung 10-4: Lagerungsdichte (g/cm^3) der obersten Tiefenstufe (0-20 cm)

Die entsprechenden Karten liegen als pdf für die Gesamtprofile (ld_profil.pdf) und für die oberste Tiefenstufe (ld_1.pdf) für alle Bodenarten vor, als tif sind sie sowohl für das Gesamtprofil (ld_combined_profil) als auch für die einzelnen Tiefenstufen (ld_combined_1-3) verfügbar.

10.7. Gehalt an organischer Substanz

Auch der Gehalt an organischer Substanz des Mineralbodens hat Einfluss auf den Wasserhaushalt des Bodens, insbesondere die Speicherkapazität steigt mit dessen Zunahme. Darüber hinaus haben Böden mit hohem Humusgehalt höhere Strukturstabilität,

verschlämmen also weniger und können im Normalfall größere Regenintensitäten aufnehmen.

Die Regionalisierung im Bereich Wald und waldfreie Hochlagen basiert auf einem vergleichsweise umfangreichen Datensatz (Kapitel 6.1.4.5).

Auffallend sind die hohen Anteile an organischer Substanz der obersten Tiefenstufe im südlichen Landesteil, die für die dort vorherrschenden Bodentypen (Rendsina, Kalklehm-Rendsina) typisch sind (Abbildung 10-5). In den landwirtschaftlich genutzten Bereichen ist der organische Anteil durchwegs deutlich geringer als auf Waldstandorten, mit zunehmender Tiefe nimmt er aber auch dort stark ab.

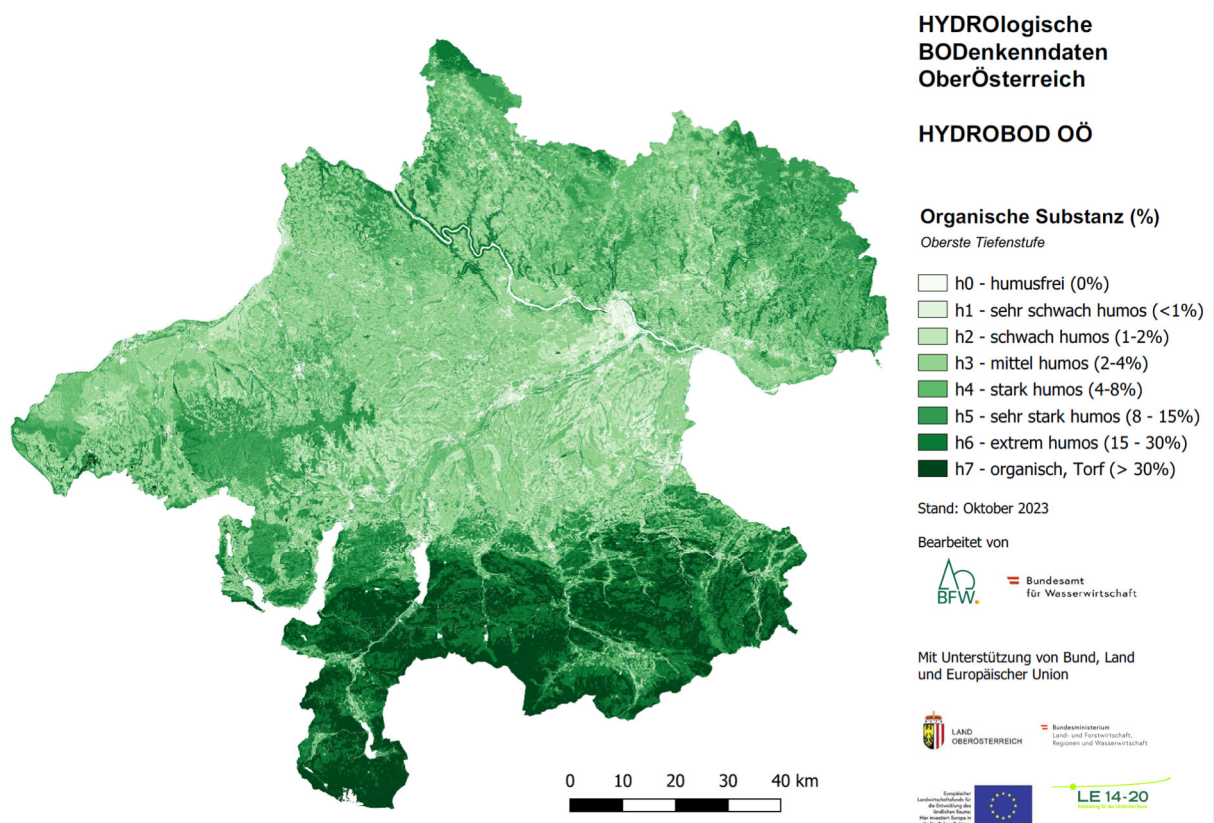


Abbildung 10-5: Gehalt an organischer Substanz (Gewichts%) des Mineralbodens (oberste Tiefenstufe)

Die entsprechenden Karten liegen als pdf für die Gesamtprofile (z.B. SOM_combined_profil.pdf) und für die oberste Tiefenstufe (SOM_1.pdf) für alle Bodenarten vor, als tif sind sie sowohl für das Gesamtprofil (corg_combined_profil) als auch für die einzelnen Tiefenstufen (corg_combined_1-3) verfügbar.

10.8. Vertikale Wasserleitfähigkeit gesättigt (ks)

Die vertikale Wasserleitfähigkeit wassergesättigter Böden (mm/Tag) ist eine zentrale Größe für die Bestimmung der Infiltrationsleistung von Böden. Die Wasserleitfähigkeit wurde mittels

PTF in den einzelnen Bearbeitungsbereichen ermittelt und anschließend zu einer flächendeckenden Karte zusammengeführt.

Die Wasserleitfähigkeit ist sowohl kleinräumig, als auch in größeren Maßstäben ein schwierig zu erfassender Kennwert, da einerseits kleine Inhomogenitäten in der Bodenoberfläche oder -struktur große Auswirkungen auf den Messwert haben können und andererseits durchwegs geringe Datengrundlagen zur Verfügung stehen. Im internationalen Vergleich ist die Datenlage in OÖ als mittel bis gering einzustufen. Durch die teilweise unscharfen Eingangsparameter sowie nur bedingt geeigneten PTF in waldfreien Hochlagen und Waldgebieten ist in diesen Bereichen auch bei den ks-Werten mit vergleichsweise höherer Ergebnisunschärfe zu rechnen.

Wie zu erwarten nimmt die ks mit zunehmender Tiefe ab. In der für den Oberflächenabfluss besonders bedeutsamen obersten Tiefenstufe zeigt sich deutlich der Einfluss der Flächenversiegelung in den Siedlungsräumen. Auch felsige, skelettreiche Bereiche im Süden weisen überwiegend geringe ks auf (Abbildung 10-6). Der Einfluss allfälliger Verschlämmung auf landwirtschaftlichen Flächen (Szenario, Kapitel 9.4) bildet sich hier noch nicht ab.

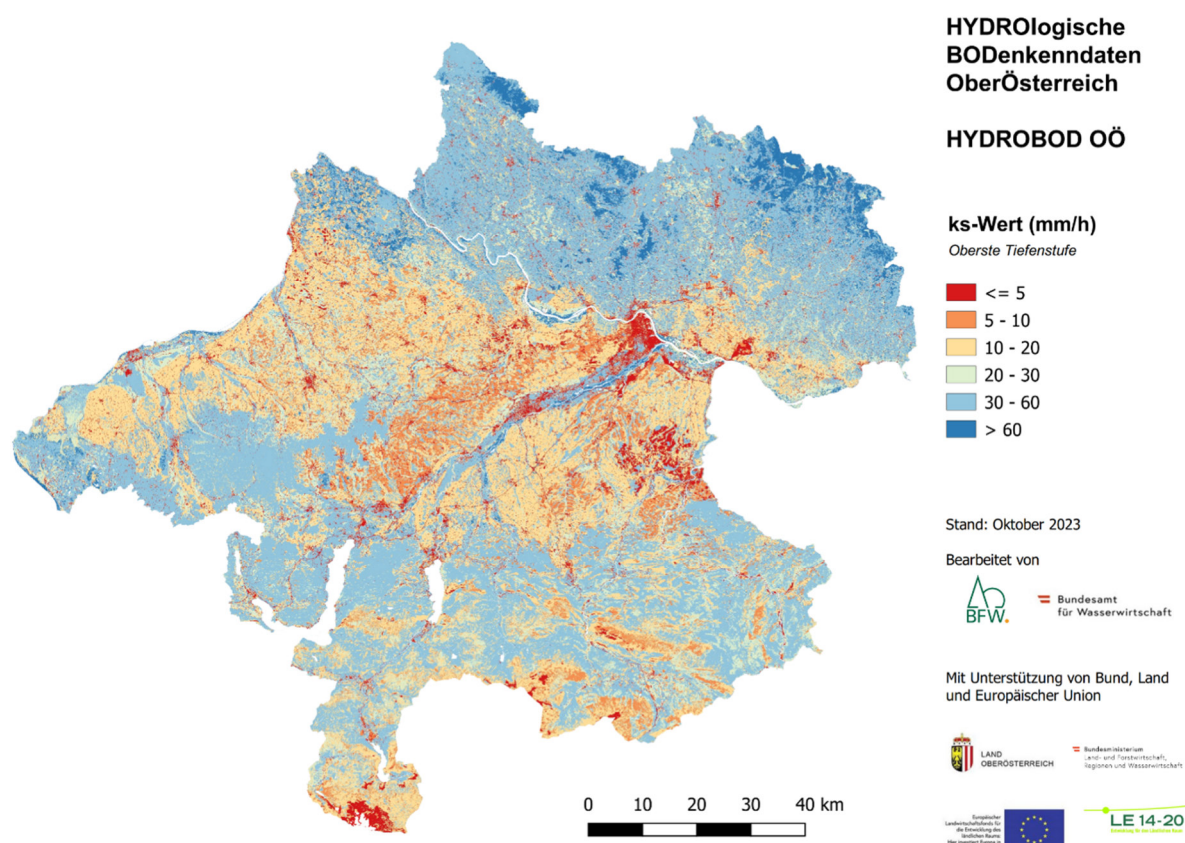


Abbildung 10-6: ks Werte (mm/h) der obersten Tiefenstufe (0-20 cm)

Die entsprechenden Karten liegen als pdf für die Gesamtprofile (z.B. ks_mm_d_combinded_profil.pdf) und für die oberste Tiefenstufe (z.B. ld_1.pdf) für alle Bodenarten vor, als tif sind sie sowohl für das Gesamtprofil (ld_combined_profil) als auch für die einzelnen Tiefenstufen (ld_combined_1-3) verfügbar.

10.9. Kennwerte des Porensystems

Gesamtporenvolumen, nutzbares Porenvolumen, Luftkapazität, Totwasserkapazität und nutzbare Feldkapazität beschreiben die Anteile der Poren im Mineralboden. Damit eng verbunden sind die hydrologischen Eigenschaften des gesamten Bodens (Abbildung 6-12). Der nutzbaren Feldkapazität kommt dabei besondere Bedeutung zu, da sie im HydroBOD-Modell dem potenziellen Bodenwasserspeicher entspricht, der je nach Vorfeuchtezustand zu Beginn des Ereignisses unterschiedlich gefüllt ist.

Wie zu erwarten, zeigte sich eine Abnahme der Porenvolumina und damit auch der nFK mit zunehmender Tiefe. Die nFK über das Gesamtprofil liegt in weiten Bereichen zwischen 20 und 25 %. Auffallend ist die großräumig verringerte Speicherkapazität im Bereich der Ballungsräume (Linz), wo durch die starke Versiegelung der hydrologisch wirksame Porenraum im Boden wegfällt. Durch die meist geringere Bodenmächtigkeit im Bereich der hochgelegenen Kalkalpen treten dort die geringsten Absolutwerte (mm) über das Gesamtprofil auf (Abbildung 10-7).

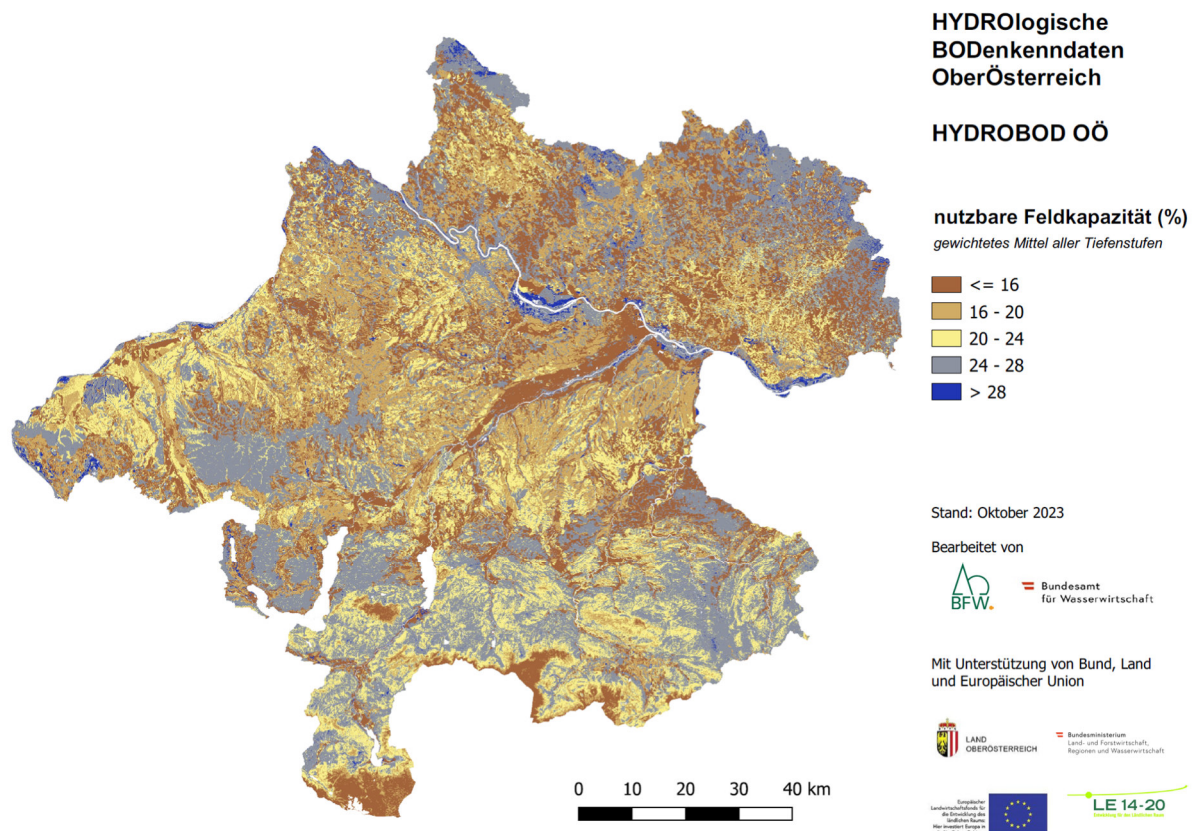


Abbildung 10-7: Nutzbare Feldkapazität (potenzieller Bodenwasserspeicher in Volumens% des Mineralbodens)

Die entsprechenden Karten liegen als pdf für die Gesamtprofile für die einzelnen Kenngrößen wie folgt vor:

Gesamtporenvolumen: Karten: Oberste Tiefenstufe: GPV_1.pdf, Gesamtprofil: GPV_profil.pdf, Raster: Gesamtprofil: gpv_combined_profil.tif, Tiefenstufen: gpr_combined_1-3.tif

Nutzbares Porenvolumen, Karten: Oberste Tiefenstufe: nPV_1.pdf, Gesamtprofil: nPV_profil.pdf, Raster: Gesamtprofil: npv_combined_profil.tif, Tiefenstufen: npr_combined_1-3.tif

Luftkapazität, Karten: Oberste Tiefenstufe: LK_1.pdf, Gesamtprofil: LK_profil.pdf, Raster: lk_combined_profil.tif, Tiefenstufen: lk_combined_1-3.tif

Totwasserkapazität: Oberste Tiefenstufe: PWP_1.pdf, Gesamtprofil: PWP_profil.pdf, Raster: pwp_combined_profil.tif, Tiefenstufen: pwp_combined_1-3.tif

Nutzbare Feldkapazität, Karten: Oberste Tiefenstufe: nFK_1.pdf, Gesamtprofil: nFK_profil.pdf, Raster nfk in mm: nfk_mm_combined_profil.tif, Tiefenstufen: nfk_mm_combined_1-3.tif, Raster in Prozent: nfk_prozent_combined_profil.tif, Tiefenstufen: nfk_prozent_combined_1-3.tif

10.10. Bodenmächtigkeit

Die effektive Bodenmächtigkeit fußt auf einem umfangreichen Datensatz (Kapitel 6.1.4.3), weswegen die flächendeckenden Ergebnisse vergleichsweise gut abgesichert sind. Allerdings reduzieren Stauhorizonte oder Grundwasserspiegellagen nahe der Oberfläche den für Speicherung zu Verfügung stehenden Bereich (auf die abflussspeichernde Bodenmächtigkeit asBM). Die Reduktion auf die asBM ist jedoch aufgrund der schlechten Datenlage mit Unsicherheiten verbunden.

Besonders im Bereich der Kalkalpen, aber zum Teil auch in Bereichen des Mühlviertels finden sich flachgründige Böden, während diese im Flachland und im Voralpenbereich überwiegend tiefgründig sind. Durch die Reduktion auf die Abflussspeichernde Bodenmächtigkeit gibt es aber auch hier Regionen mit im mittleren Wertebereich (Abbildung 10-8).

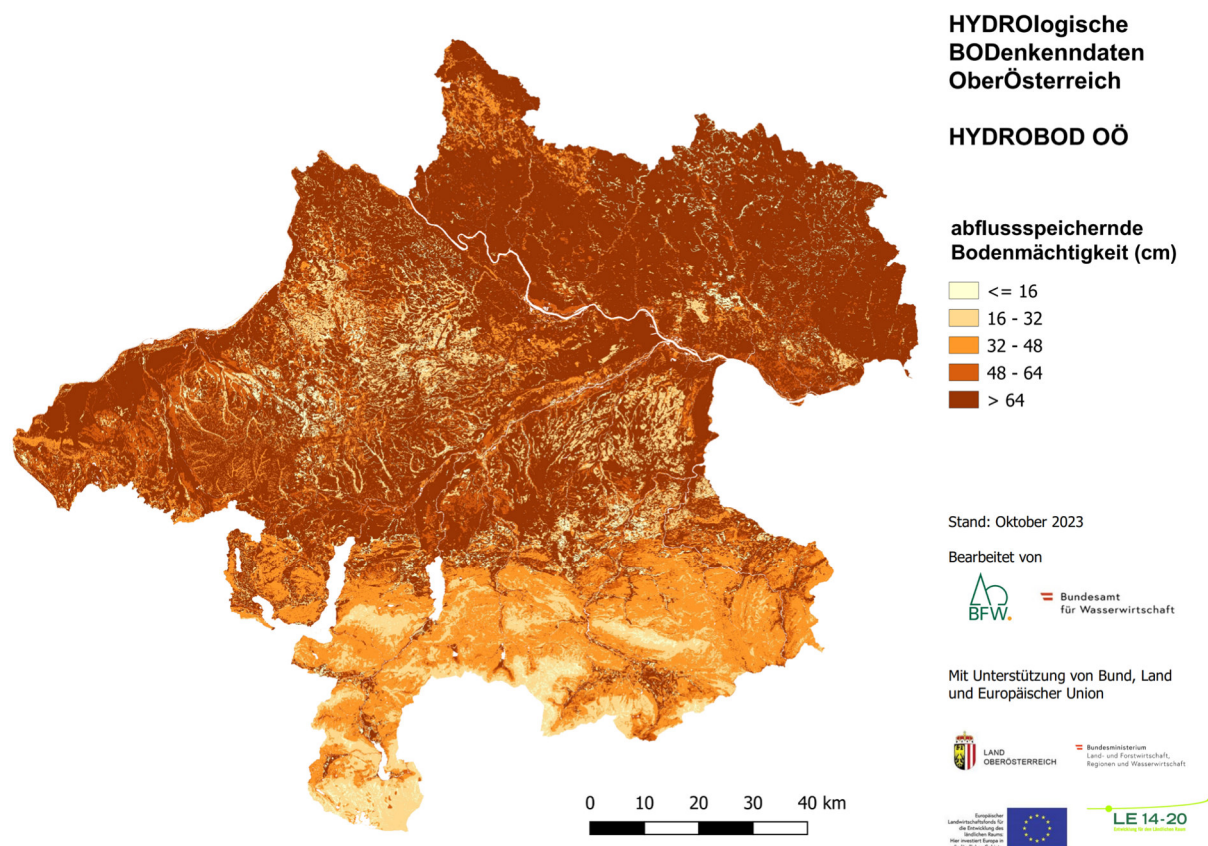


Abbildung 10-8: Als Bodenspeicher zu Verfügung stehende Bodenmächtigkeit (cm)

Karten (pdf) für die effektive (effbm.pdf) und die abflussspeichernde Bodenmächtigkeit (asbm.pdf) sowie entsprechende Raster (effbm.tif, asbm.tif) sind verfügbar.

10.11. Hydrologische Reaktionseinheit

Bei der Abgrenzung der hydrologischen Reaktionseinheiten wird zwischen Oberflächenabfluss (OA), Zwischenabfluss (ZA) und Speicherung/Tiefensickerung (SP/TS) als dominante Prozesseinheiten (dpe) unterschieden. Ein Abflussprozesstyp ist dann dominant, wenn mehr als 50 % der Abflussfracht einer Zelle über diesen gebildet werden. Die Reaktionszeit ist abhängig von der Tiefe, in der der Prozess auftritt (0-20 cm für unverzögert, 20-50 cm für verzögert, 50-80 cm für stark verzögert, siehe dazu auch Kapitel 8).

Die Ergebnisse aus der Modellierung werden hier beispielhaft für das Szenario mit maximaler Vorfeuchte (gesättigt) diskutiert. Ohne Verschlammung findet auf Ackerstandorten teils Speicherung, teils unverzögerter Oberflächenabfluss statt. Durch Verschlammung sinkt das Infiltrationsvermögen der Böden und der flächenhafte Anteil an Oberflächenabfluss steigt. Im Salzkammergut und im südlichen Traunviertel findet vorwiegend Zwischenabfluss statt. Dort trifft der Niederschlag auf seichtgründige, aber ausreichend durchlässige Böden.

Bei geringerer Vorfeuchte findet auf tiefergründigen Böden vermehrt Speicherung statt. Tiefensickerung tritt als dominanter Prozess kaum auf und beschränkt sich auf einzelne Standorte mit geringer Bodenmächtigkeit und gleichzeitig hoher Durchlässigkeit.

Vergleicht man die Szenarien mit und ohne Verschlämmung (mit gleichen Vorfeuchtebedingungen), wird deutlich, dass es zu einer Verschiebung von Speicherprozessen (SP und TS) zu unverzögertem Oberflächenabfluss (OAu) kommt (Abbildung 10-9 - Abbildung 10-11).

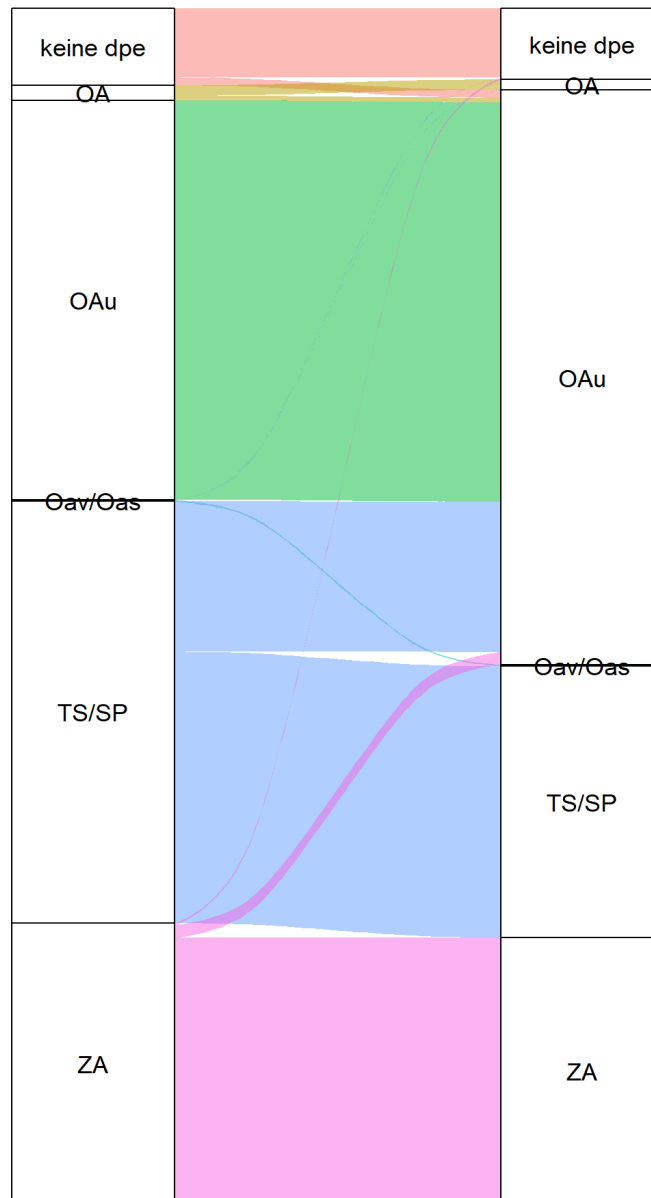


Abbildung 10-9: Änderung der dominanten Prozesseinheiten zwischen Szenario ohne Verschlammung (links) und mit Verschlammung (rechts) bei Vorfeuchtebedingung „gesättigt“. Zur besseren Darstellung wurden die einzelnen Prozesse zusammengefasst (TS und SP zu einer Kategorie, alle ZA-Abflussprozesse zu einer Kategorie; verzögerte Oberflächenabflussprozesse OAs und OAv zu einer Kategorie)

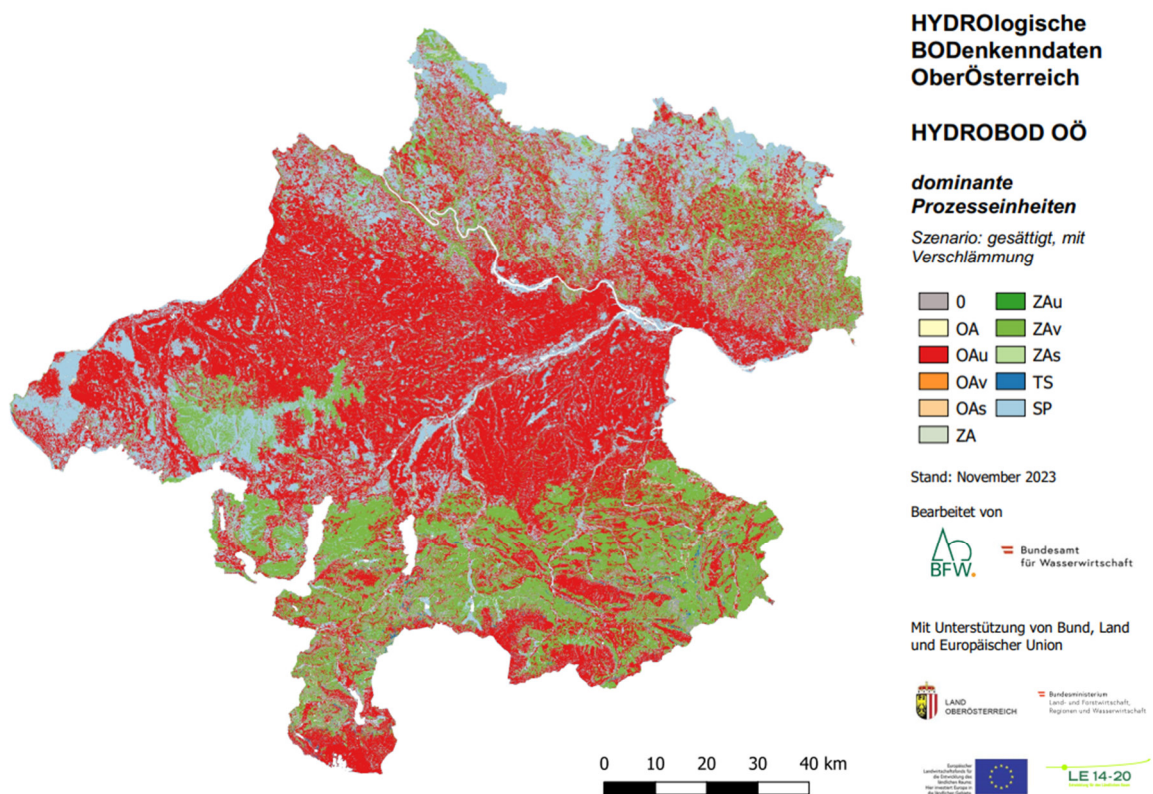


Abbildung 10-10: Dominante Prozesseinheiten für das Modellszenario gesättigt, mit Verschlammung
0 (keine dominante Prozesseinheit), OA (Oberflächenabfluss), ZA (Zwischenabfluss), TS (Tiefensickerung), SP
(Speicher), s (stark verzögert), v (verzögert), u (unverzögert), ohne Kürzel (keine dominante Reaktionseinheit)

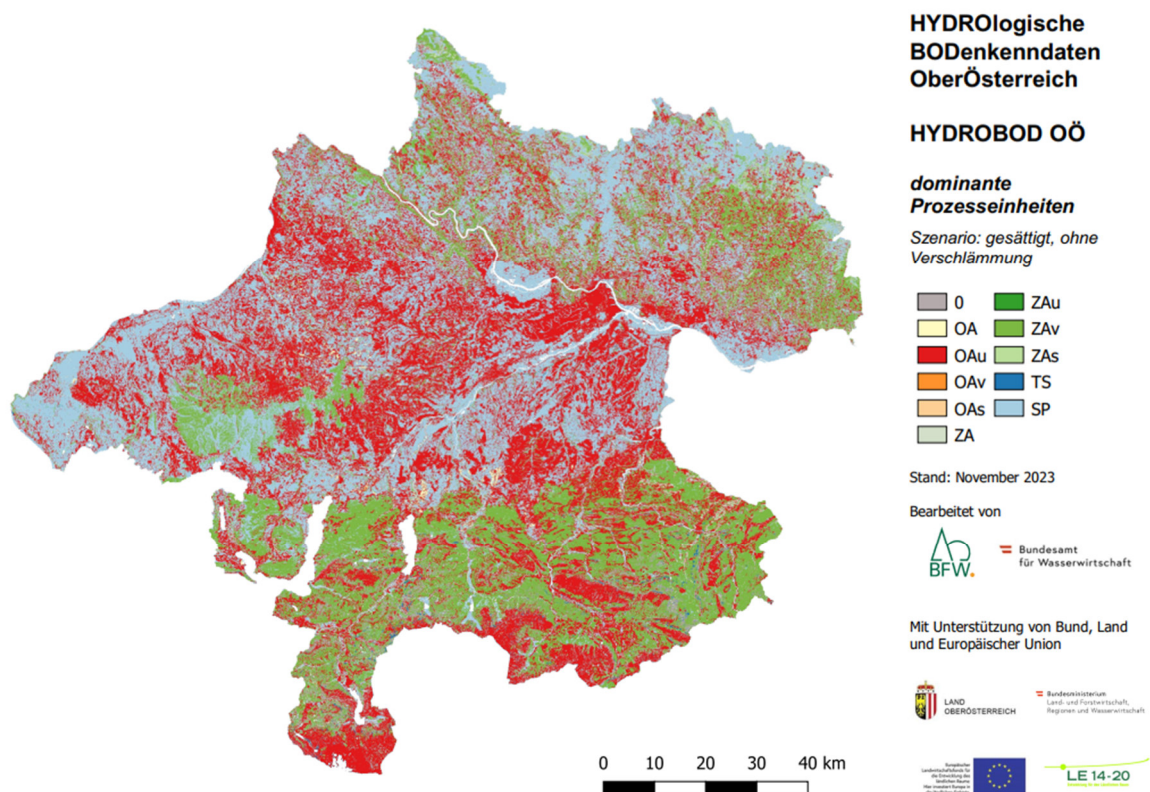


Abbildung 10-11: Dominante Prozesseinheiten für das Modellszenario gesättigt, ohne Verschlammung
 0 (keine dominante Prozesseinheit), OA (Oberflächenabfluss), ZA (Zwischenabfluss), TS (Tiefensickerung), SP (Speicher), s (stark verzögert), v (verzögert), u (unverzögert), ohne Kürzel (keine dominante Reaktionseinheit)

Tabelle 10-2: Änderung der Flächenanteile der dominanten Prozesseinheiten zwischen verschlammtem und unverschlammtem Szenario (Vorfeuchte: gesättigt)

Szenario gesättigt, ohne Verschlammung			Szenario gesättigt, mit Verschlammung		
Prozesseinheit	Fläche (km ²)	Anteil (%)	Prozesseinheit	Fläche (km ²)	Anteil (%)
0	75,08	6,4	0	69,38	5,9
OA	14,63	1,3	OA	10,13	0,9
OAu	390,65	33,4	OAu	563,09	48,1
OAv	1,55	0,1	OAv	1,54	0,1
OAs	0,00	0,0	OAs	0,00	0,0
ZA	17,49	1,5	ZA	15,00	1,3
ZAu	0,00	0,0	ZAu	0,00	0,0
ZAv	254,63	21,8	ZAv	242,97	20,8
ZAs	3,04	0,3	ZAs	3,03	0,3
TS	5,46	0,5	TS	5,01	0,4
SP	407,59	34,8	SP	259,98	22,2

10.12. Oberflächenabflussbeiwert für definierte Niederschlags- und Systemzustandsszenarien

Der Oberflächenabflussbeiwert liegt in einem Wertebereich zwischen 0 und 1 und beschreibt jenen Anteil des Niederschlags, der direkt zum Abfluss gelangt. Ein Beiwert von 0 bedeutet, dass kein Oberflächenabfluss entsteht, ein Beiwert von 1, dass der gesamte Niederschlag an der Oberfläche abfließt (z.B. versiegelte Böden, Tabelle 10-3).

Es wird explizit darauf hingewiesen, dass aufgrund der Datenbasis in Relation zur Fläche Oberösterreichs die Ergebnisse als Hinweiskarte auf die Infiltrationsleistung zu interpretieren sind. Mit abnehmender Flächengröße der Niederschlags-Abflussmodellierung ist eine Verifikation im Gelände zunehmend unabdingbar.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Modellresultate entsprechend der verschiedenen Bearbeitungsbereiche (Datengrundlagen) unterschiedliche Qualität aufweisen, in absteigender Reihenfolge: Landwirtschaftlich genutzte Flächen, Siedlungsraum, Wald, waldfreie Hochlagen. Bereiche mit höheren Abflussbeiwerten ($> 0,5$) stimmten tendenziell besser mit den Validierungsdaten überein (siehe dazu auch Kapitel 11.3).

Die Ergebnisse werden beispielhaft am worst case Szenario Vorfeuchte „gesättigt“ diskutiert. Wie auch bei den dominanten Prozesseinheiten ist der Unterschied zwischen den Szenarien mit und ohne Verschlammung größer als der Unterschied zwischen den verschiedenen Vorfeuchtezuständen (Tabelle 10-4, Abbildung 10-12, Abbildung 10-13).

Im Mühlviertel und den bewaldeten Bereichen der Kalkalpen sind überwiegend geringe Oberflächenabflussbeiwerte zu beobachten, während in Siedlungsbereichen und auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Flachland, insbesondere wenn sie zu Verschlammung neigen, meist hohe Abflussbeiwerte ausgewiesen werden.

Tabelle 10-3: Abflussbeiwertklassen nach Markart et al. (2004) in % des Oberflächenabflusses (Ψ_{const})

Abflussbeiwert- klasse (AKL)	Oberflächenabfluss in % des Niederschlags
0	0
1	> 0-10
2	11-30
3	31-50
4	51-75
5	> 75 - <100
6	100 (vernässte, versiegelte Flächen)

Tabelle 10-4: Änderung der Flächenanteile der Abflussbeiwertklassen zwischen verschlammtem und unverschlammtem Szenario (Vorfeuchte: gesättigt)

Szenario gesättigt, ohne Verschlammung			Szenario gesättigt, mit Verschlammung		
AKL	Fläche (km ²)	Anteil (%)	AKL	Fläche (km ²)	Anteil (%)
0	158,94	13,6	0	103,49	8,8
1	151,67	13,0	1	136,36	11,7
2	235,69	20,1	2	199,72	17,1
3	210,28	18,0	3	152,61	13,0
4	285,27	24,4	4	235,90	20,2
5	119,28	10,2	5	331,65	28,3
6	8,99	0,8	6	10,39	0,9

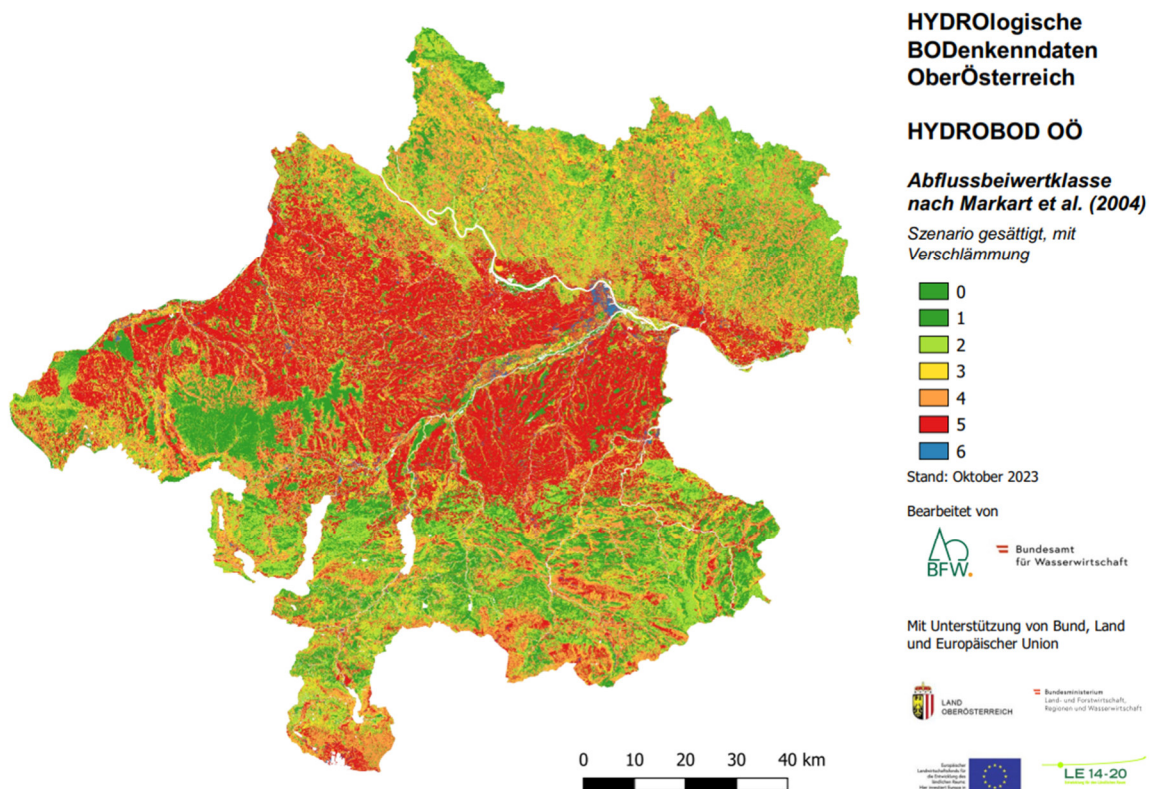


Abbildung 10-12: Oberflächenabflussbeiwerte für das Modellszenario gesättigt mit Verschlammung

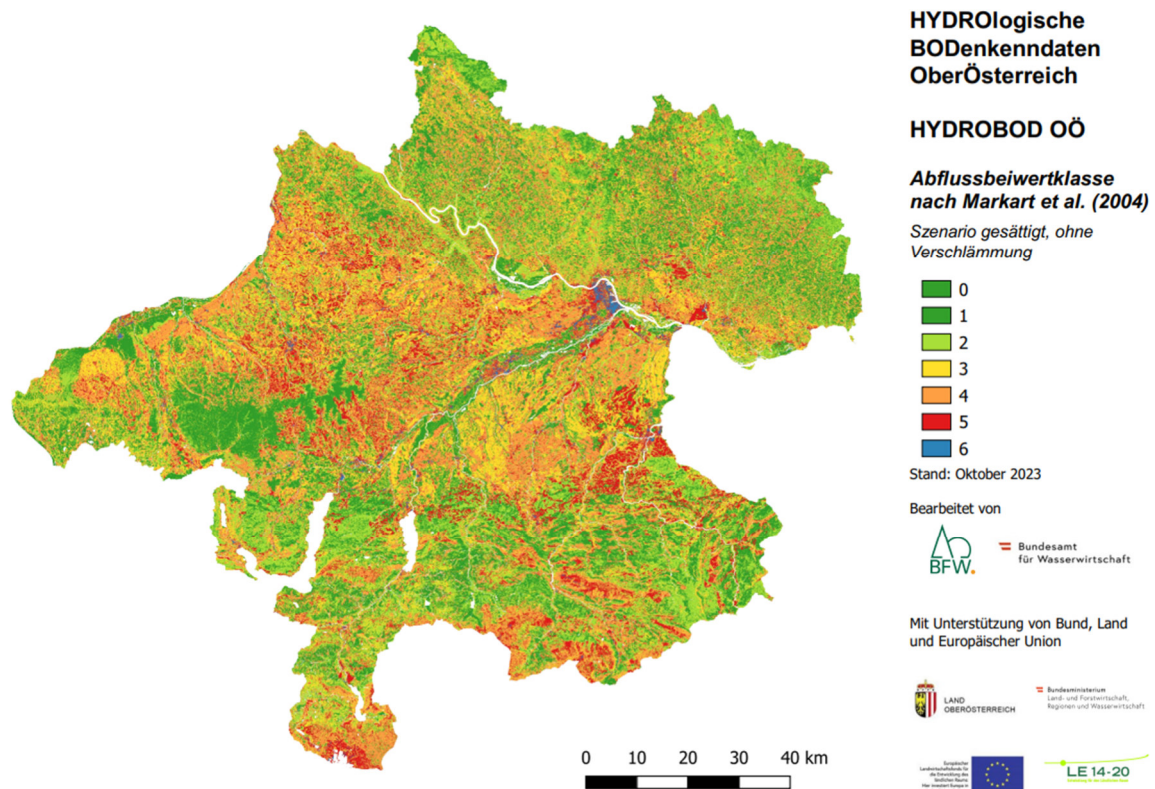


Abbildung 10-13: Oberflächenabflussbeiwerte für das Modellszenario gesättigt ohne Verschlammung

10.13. Tabelle zur Oberflächenrauigkeit

Die hydraulische Rauheit einer Geländeoberfläche wird von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst (Vegetation, Oberflächenbedingungen, etc.). Diese können nicht als konstant angenommen werden, sie ändern sich häufig im Jahreszyklus (Fruchtfolge) oder auch innerhalb einer Saison (z.B. Äcker, Weide). Deshalb können entsprechende Werte nicht sinnvoll in einer statischen Karte dargestellt werden, sondern müssen Teil der jeweils gewählten Szenarien für die Modellierung des Oberflächenabflusses sein.

Abbildung 10-14 zeigt eine aktuelle Zusammenstellung von Rauheitswerten (Strickler-Koeffizienten) aus der Literatur für verschiedene Landnutzungsklassen/-typen. Der Strickler-Beiwert (k_{st}) ist ein hydraulisch äquivalentes Rauheits- und Widerstandsmaß, dass in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit und Bewuchs die Fließgeschwindigkeit reduziert. Er ist kein konstanter Wert, sondern von der Fließtiefe abhängig, mit zunehmender Fließtiefe verringert sich der Einfluss der Rauheit.

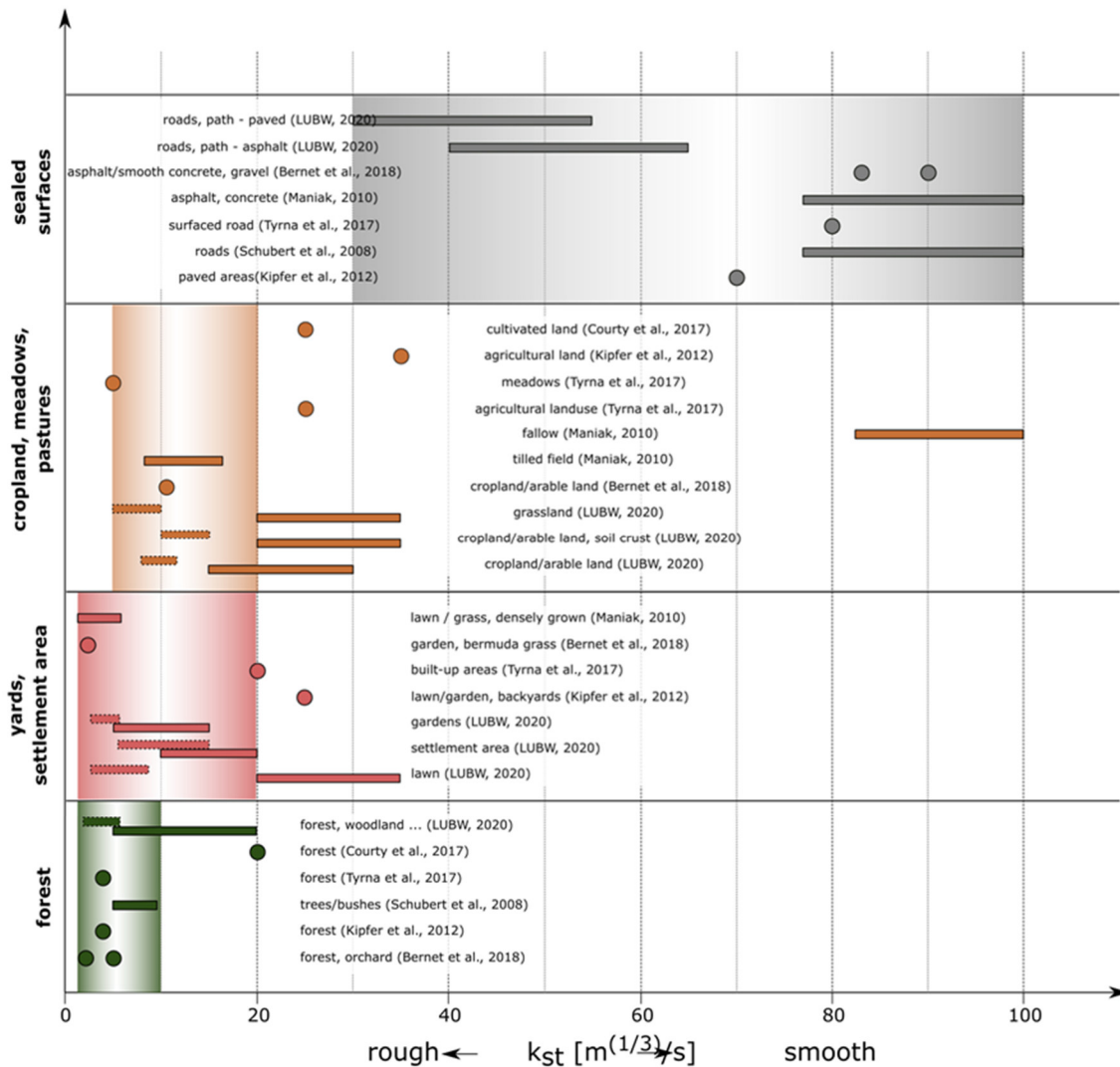


Abbildung 10-14: Rauigkeiten (k_{st}), Zusammenstellung aus Angaben in der Literatur (Huber et al. 2021)

Die gestrichelt umrandeten Wertebereiche in Abbildung 10-14 werden für geringe Wassertiefen vorgeschlagen, die entsprechenden durchgezogenen Kästchen in den LUBW-Quellen beziehen sich auf Wertebereiche für Wassertiefen von mehr als 10 cm (Huber et al. 2021).

Im Rahmen der Pilotstudie RAINMAN (Achleitner et al. 2020), die in Oberösterreich durchgeführt wurde, zeigte sich, dass die maximal modellierten Fließtiefen bei hohen Rauigkeiten tendenziell zu-, die maximal modellierten Fließgeschwindigkeiten tendenziell abnahmen. Zu berücksichtigen ist weiter, dass die Erhöhung der hydraulischen Rauheit zu verzögerten Abflussreaktionen führen kann, wodurch Spitzenabflüsse später auftreten.

11. Validierung der Ergebnisse

11.1. Validierung Landnutzungskarte

Um die Konsistenz innerhalb der Landnutzungskarte zu validieren, wurde eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt, die auf der Übertragung von den INVEKOS Nutzungen auf die DKM-Parzellen basierte. In fünf willkürlich gewählten Gemeinden wurde ein Kontrollraster mit 1000x1000 m Fläche mittels INVEKOS Nutzungsarten, DKM-Nutzungsarten und Orthofotos auf ihre Richtigkeit geprüft. Der Fehler in der Landnutzungskarte belief sich auf 6,3 %, was vor allem auf die Aktualität der DKM zurückzuführen ist (siehe Anhang 1).

11.2. Validierung bodenhydrologische Parameter

Die Validierung der regionalisierten bodenhydrologischen Parameter erfolgte sowohl im Bearbeitungsbereich Wald und waldfreie Hochlagen als auch für die landwirtschaftlichen Flächen implizit durch die Anwendung der eingesetzten Machine-Learning Ansätze (Kapitel 6.1.3, 6.2.2). Die verwendeten Algorithmen splitten den Eingangsdatensatz automatisch in Trainings- und Validierungs-Teildatensätze und optimieren die Berechnungen anhand von Qualitätskriterien.

Die Qualität der gefundenen Funktionen ist über den Umfang des Probensamples, dem Bestimmtheitsmaß (R^2) und der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) sowie der Verteilung der Punktwolke (Trainingsdatensatz – Validierungsdatensatz) beurteilbar. Darüber hinaus wurden sämtliche Datensätze einer visuellen Plausibilitätskontrolle unterzogen.

11.3. Validierung Oberflächenabfluss

Die Validierung der modellierten Infiltrationsbeiwerte erfolgte primär mittels Vergleichs von über Beregnungsversuche ermittelte Werte gemeinsam für alle Bearbeitungseinheiten (Abbildung 11-1). Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Es stehen für den Vergleich nur eine begrenzte Anzahl an Beregnungsversuchen zur Verfügung, deren Verteilung (Bearbeitungsbereiche, Abflussklassen) nicht optimal sind.
- die Beregnungsversuche sind z.T. schon vor längerer Zeit erfolgt. Die Lagegenauigkeit (Verortung) nimmt mit zunehmendem Alter ab, z.T. erfolgte sie noch ohne GPS (variierende Lageunschärfe) auf dem Orthofoto. Auch ist die Lage des Beregnungsplots als Punkt angegeben, im Feld war der beregnete Bereich meist ca. 50 m² groß. Deshalb floss auch die nähere Umgebung in die Ergebnisinterpretation ein.
- Die Beregnungsversuche fanden unter bestimmten Systemzuständen statt (Vorfeuchte, Vegetation, Landnutzung, Trockenrisse, Fahrrinnen...), die nur teilweise dokumentiert sind.

- die Nutzungsform kann sich geändert haben, bzw. hat die Flächenversiegelung oft zugenommen

Entsprechende Abweichungen der Modellergebnisse sind daher teilweise erklärbar und nicht unbedingt auf Unschärfen der Modellierung zurückzuführen. Unter Umständen sind sie sogar positiv zu bewerten.

Abbildung 11-1 zeigt die über Beregnungsversuche gewonnenen Oberflächenabflussbeiwerte im Vergleich zu den mit dem Modell ermittelten Werten der verschiedenen Szenarien.

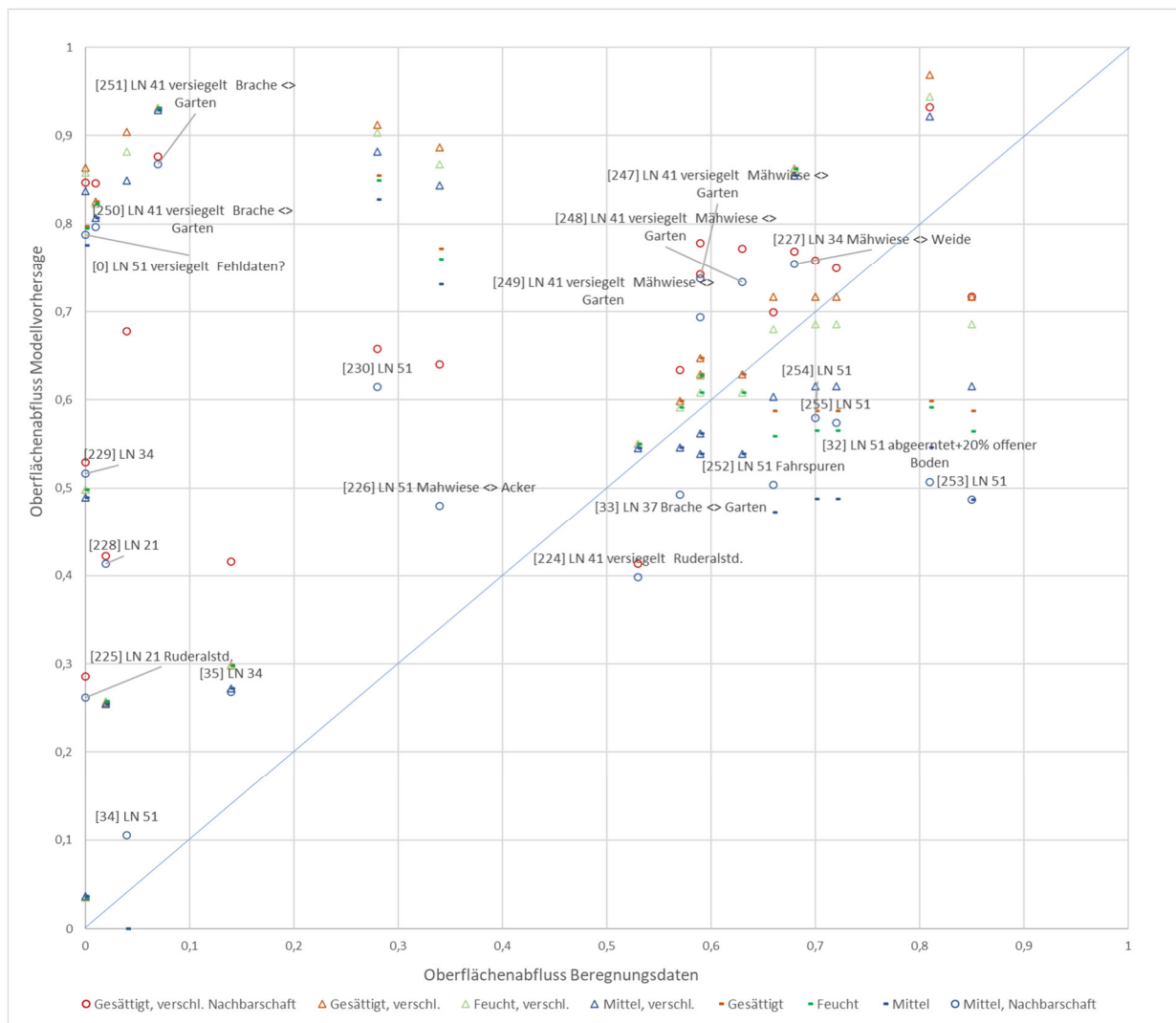


Abbildung 11-1: Vergleich der modellierten Abflussbeiwerte (alle sechs Szenarien) mit jenen aus Beregnungsversuchen des BFW in OÖ, Punktschriftung interne ID, Landnutzungs-kategorie, gegebenenfalls mit <-> Darstellung von Nutzungsänderungen

Insgesamt scheint das Modell die Abflussbeiwerte (PsiMod) tendenziell zu überschätzen. Dort, wo die in den Beregnungsversuchen ermittelten Abflussbeiwerte (PsiBer) zwischen 0,5 und 0,75 liegen, ist eine gute Übereinstimmung zu beobachten, während dies bei geringen, im Feld beobachteten Oberflächenabflussbeiwerten häufig nicht der Fall ist. Es zeigt sich weiters, dass

beim gewählten Ereignisniederschlag (100-jährliches Ereignis 60 minütiger Dauer) die Vorfeuchte durchwegs einen relativ geringen Einfluss (Variation um 5-10 %) auf den ermittelten Abflusskoeffizienten hat. Der Einfluss der Verschlämmung streut an den Vergleichsstandorten zwischen gering und bis über 15 % Erhöhung des Oberflächenabflusses.

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele für das Szenario feucht mit Fokus auf „schlecht passende“ Modellergebnisse diskutiert, die Standortseigenschaften wurden der Beschreibung der Beregnungsversuche entnommen.

Schwertberg: Nutzungswechsel, Mähwiese - Siedlungsgebiet



Abbildung 11-2: Nutzungswechsel PsiBer 0,07, PsiMod 0,93; Nachbarschaft ähnlich hoch (ca. 0,80)

Zum Beregnungszeitpunkt war die Fläche eine Wiese mit geringem Oberflächenabfluss (AKL1), aktuell ist sie Siedlungsgebiet mit sehr hohem Oberflächenabfluss (AKL 5) – die Differenz zwischen Beregnung und modelliertem Oberflächenabfluss ist durch den Nutzungswechsel weitgehend erklärbar.

Schwertberg: Nutzungswechsel, Mähwiese – Garten



Abbildung 11-3: Nutzungswechsel PsiBer: 0,63-0,71, PsiMod 0,61-0,63

Obwohl ein Nutzungswechsel von Mähwiese zu Garten (lt. Landnutzung) ausgewiesen ist, passen die modellierten Werte gut. Auf Basis des Orthofotos lässt sich annehmen, dass das Grundstück auch weiterhin als Mähwiese genutzt wird.

Gmunden Umgebung: P224, Lageunschärfe



Abbildung 11-4: P224 Mähwiese (Schüttboden): PsiBer 0,56, PsiMod 0,28; Westl Nachbarschaft 0,45, P225: Laubwald - PsiBer 0, PsiMod 0,13

Durch die räumlich stark variierenden Angaben der errechneten Abflusskoeffizienten und Lageungenauigkeiten sowie der Modellauflösung würde eine Verschiebung um wenige Meter nach Westen wesentlich besser passen, westlich des Punktes kommt der modellierte Wert jenem der Berechnung relativ nahe (0,45). Zudem war der Punkt zum Berechnungszeitpunkt als Mähwiese ausgewiesen, aktuell scheint die Fläche zuzuwachsen, was tendenziell eine Verringerung der Abflussbeiwerte bewirken sollte. In Waldpunkt 225 überschätzt die Modellierung den tatsächlichen Beiwert etwas, die Abweichung liegt aber in einem akzeptablen Bereich.

Bad Goisern: Lageunschärfe, Modellauflösung

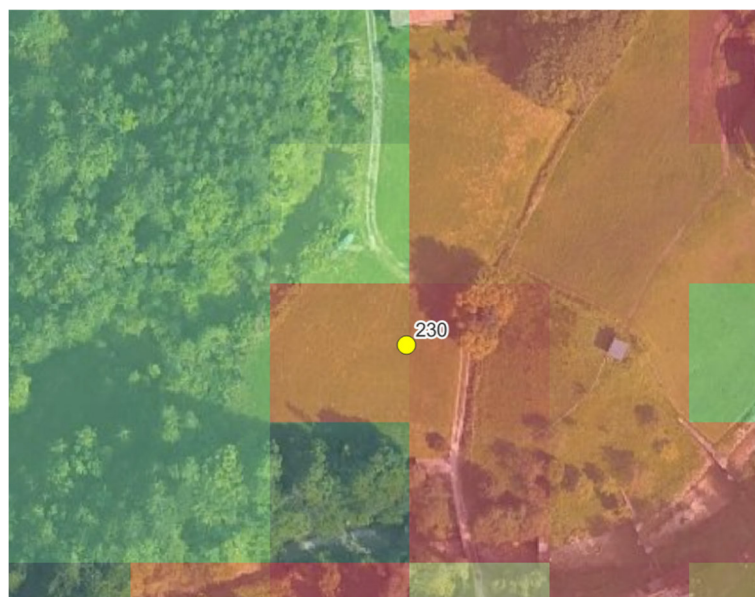


Abbildung 11-5: PsiBer 0,35; PsiMod 0,79 – N/W/O Nachbarschaft 0-0,22

Durch die räumlich stark variierenden Angaben der errechneten Abflusskoeffizienten und der Modellauflösung ergibt die Betrachtung einer größeren Flächeneinheit eine deutlich bessere Annäherung an die im Feld festgestellten Werte (Nachbarschaft z.T. wesentlich geringere Beiwerte). Es zeigen sich an diesem Beispiel (wie auch schon bei P224) Potenzial sowie Einschränkungen der modellierten Werte hinsichtlich der Modellauflösung.

Ebensee: Schutzwald- Modelleinzugsgebiet Rindbach, Lageunschärfe



Abbildung 11-6: PsiBer 0,01; PsiMod 0,67, Nachbarschaft 0,07

Durch die räumlich stark variierenden Angaben würde eine Verschiebung um wenige Meter nach Osten wesentlich besser passen (PsiMod 0,07). Potenzial und Einschränkungen der Kartenunterlagen zeigen sich auch an diesem Beispiel.

Schwertberg Umgebung: Modellierungsunschärfe, Szenarienwahl



Abbildung 11-7: P252 0,68; PsiBer 0,68; PsiMod 0,56, P253: PsiBer 0,84; PsiMod 0,56

Viele auf landwirtschaftlich genutzten Flächen gelegene Vergleichsstandorte ähneln den im Beispiel ausgewählten Punkten. Beim Szenario feucht/unverschlämmt wird der

Oberflächenabfluss auf beiden Flächen, besonders aber für P253 deutlich unterschätzt. Bei Wahl des Szenarios feucht/verschlämmt ergeben sich höhere Abflussbeiwerte (PsiMod je 0,69), was für Punkt 252 sehr gut passt, und für P253 eine noch akzeptable Abweichung bedeutet. Die Flächen wurden im Zuge der Berechnung als Acker (P252 Mais, P253 Rüben) ausgewiesen. Hinsichtlich des Deckungsgrades der Vegetation und des zum Zeitpunkt der Berechnung vorliegenden Verschlammungsgrads, gibt es keine näheren Informationen. Somit kann dieser Punkt als gutes Beispiel dafür dienen, dass auf Ackerböden immer wieder zeitlich variable Unschärfen als Ergebnis von Kultur, Deckungsgrad und Bodenbearbeitung auftreten können. In diesem Fall legt eine Interpretation des Luftbilds (Abbildung 11-7) nahe, dass auf den beiden knapp nebeneinander liegenden Punkten unterschiedliche Bodenbearbeitungsstrategien angewandt werden. Auf Punkt 253 sind Verdichtungserscheinungen aus der Ferne sichtbar, die höchstwahrscheinlich zu einer Erhöhung des Oberflächenabflusses führten, die in dieser Größenordnung durch die Eingangsdaten im Berechnungsmodell nicht abgebildet wurden.

Wolfgangsee: Modellierungsfehler oder Systemzustand?

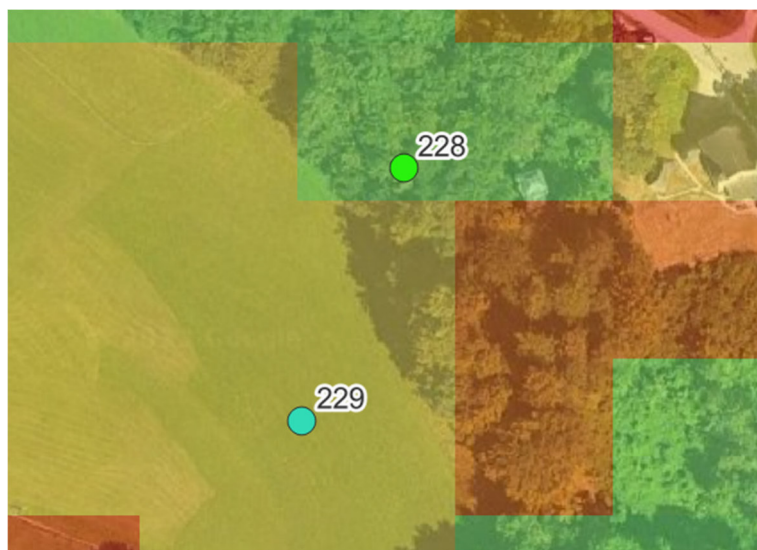


Abbildung 11-8: P228 Wald: PsiBer 0,01, PsiMod 0,26; Nachbarschaft ähnlich; P229 Mähwiese: PsiBer 0, PsiMod 0,50; Nachbarschaft ähnlich

Auffallend ist die, besonders im landwirtschaftlichen Bereich (P229), hohe Differenz zwischen Berechnungswert und modelliertem Wert. Die Nutzung zwischen Berechnungszeitpunkt und Berechnungszeitpunkt hat sich offenbar nicht wesentlich geändert, die berechneten Abflussbeiwerte sind auch in den benachbarten Bereichen ähnlich. Unschärfen der Berechnungen bzw. der Verortung der Berechnungsfläche können diese nicht hinreichend erklären.

Dennoch muss diese Abweichung nicht unbedingt auf Modellierungsfehlern beruhen. Die Berechnungsversuche erfolgten während einer heißen Trockenperiode. Aufgrund des (modellierten) hohen Tongehaltes der Böden in diesen Bereich (Lt3 nach KA5) und den Beobachtungen bei der Beregnung traten zum Zeitpunkt der Beregnung Trockenrisse auf, die wahrscheinlich eine starke Reduktion des Oberflächenabflusses bewirkten (Systemzustand!). Bei feuchten Bedingungen treten diese nicht oder in geringerem Umfang auf und Abflusswerte im modellierten Bereich sind dann wahrscheinlich. Eine exakte Klärung dieser Frage ist nur durch Nacherhebungen vor Ort möglich.

11.3.1. Methodenvergleich Siedlungsraum

Für das Siedlungsgebiet steht eine viel verwendete Tabelle zur Verfügung, die den Abflussbeiwert in Abhängigkeit von Geländeneigung und Versiegelungsgrad ausweist (Tabelle 11-1; Lecher et al. 2001). Die Ergebnisse aus der Modellierung wurden mit den entsprechenden Tabellenwerten verglichen und die Verteilung der Abweichungen per Histogramm bestimmt (Abbildung 11-9). Eine direkte Vergleichbarkeit ist nur gegeben, wo die in HydroBOD verwendeten Bemessungsniederschläge der angesetzten Regenspende aus der Tabelle nach Lecher entsprechen. Beide Methoden beinhalten Annahmen und Vereinfachungen, sodass nicht klar ist, welche Ergebnisse besser die Realität wiedergeben. Dennoch basieren beide Methoden auf physikalisch nachvollziehbaren Ansätzen und so gibt dieser Vergleich einen guten Einblick in die Belastbarkeit der Ergebnisse im Siedlungsraum.

Es wurde für den Vergleich das Modellergebnis für einen gesättigten Vorfeuchtezustand gewählt und eine Differenz mit dem neigungsabhängigen Abflussbeiwert gebildet. Für den Großteil der Flächen liegen die Abflussbeiwerte aus beiden Methoden in einem vergleichbaren Bereich (Abbildung 11-9, Tabelle 11-1). Das heißt, die Differenzen bewegen sich innerhalb von $\pm 0,1$. Die Bandbreite ist jedoch groß und auch Differenzen von bis zu $\pm 0,8$ treten vor allem in Bereichen mit geringem Versiegelungsgrad (10 %) auf.

Es kann nie ausgeschlossen werden, dass im Zuge der Bautätigkeit gebietsfremde Substrate verwendet wurden oder die Bodenphysik durch Bodenverdichtung, Bau- und Nutzungstätigkeiten verändert wurde. Im Zuge einer Anwendung im Detailmaßstab ist also jedenfalls eine Plausibilitätskontrolle vorzunehmen.

Tabelle 11-1: Abflussbeiwert im Siedlungsgebiet in Abhängigkeit von Neigung und Versiegelungsgrad (aus Lecher et al. 2001).

Versiegelungsgrad (% der Fläche)	Neigungsklasse 1 (< 1 %)	Neigungsklasse 2 (1 – 4 %)	Neigungsklasse 3 (4 – 10 %)	Neigungsklasse 4 (> 10 %)
10	0,19	0,32	0,41	0,50
20	0,27	0,39	0,47	0,55
30	0,36	0,46	0,53	0,61
40	0,44	0,53	0,59	0,66
50	0,52	0,61	0,66	0,71
60	0,60	0,68	0,71	0,76
70	0,69	0,74	0,77	0,81
80	0,77	0,82	0,84	0,86
90	0,86	0,89	0,90	0,92
100	0,94	0,96	0,96	0,97

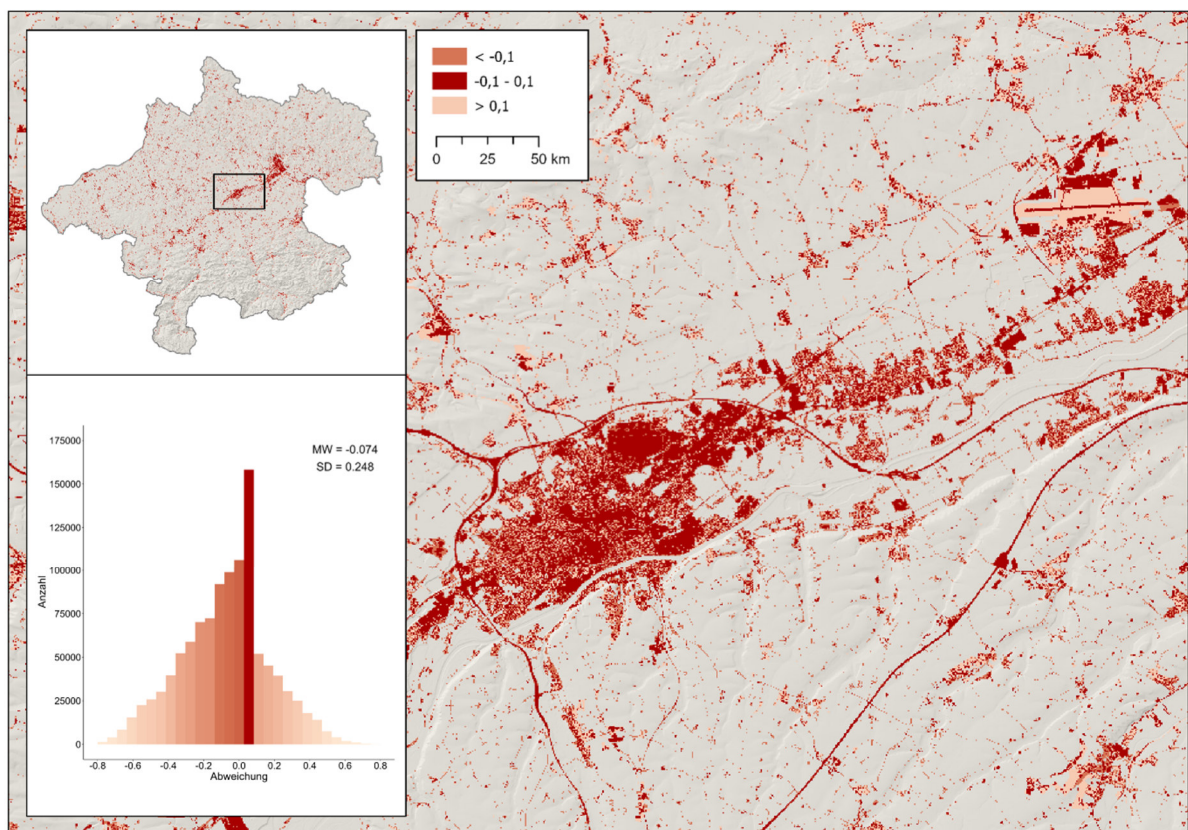


Abbildung 11-9: Vergleich der Abflussbeiwerte für die Landnutzungsklassen im Siedlungsgebiet bei einem gesättigten Vorgeuchteszenario, in Kartenform und als Histogramm (negativer Bereich: Tabellenwerte höher, positiver Bereich: Modellwerte höher).

11.4. Validierung des dominanten Prozesstyps

Die Validierung des dominanten Prozesstyps war nur eingeschränkt möglich, da keine entsprechenden Vergleichsdaten zum effektiven Bodenspeicher und zum Zwischenabfluss zur Verfügung standen. Einzig der Prozesstyp Oberflächenabfluss lässt sich auf Basis der

Beregnungsversuche (mit den unter Kapitel 11.3 angeführten Einschränkungen) beurteilen (Tabelle 11-2).

Dort, wo bei den Beregnungsversuchen über 50 % Oberflächenabfluss auftrat, wurde dieser vom Modell bis auf die Vorfeuchtestufe Mittel auch immer richtig zugeordnet. Allerdings wurden auch rund die Hälfte der Flächen, bei denen im Beregnungsversuch unter 50 % Oberflächenabfluss registriert wurden, dem Prozesstyp Oberflächenabfluss zugeordnet. Das Modell scheint daher dazu zu neigen, diesen Typ tendenziell zu häufig auszuscheiden.

Tabelle 11-2: Übereinstimmung Prozesstyp Beregnung / modelliert (Treffer Oberflächenabfluss > 50 % (J/N) für die sechs modellierten Szenarien

	Mittel	Mittel, verschlämmt	Feucht	Feucht, verschlämmt	Gesättigt	Gesättigt, verschlämmt
Treffer OA Ja %	64%	100%	100%	100%	100%	100%
Summe OA N %	50%	40%	50%	40%	50%	40%
Treffer OA Gesamt	57%	71%	76%	71%	76%	71%

12. Conclusio

Im Projekt HydroBOD OÖ wurde erstmals eine flächendeckende Ausweisung von hydrologischen Bodendaten für das gesamte Landesgebiet Oberösterreichs erarbeitet und in Form von anwendungsgerechten Rasterdatensätzen und Karten bereitgestellt. Die kartierten Kennwerte umfassen eine breite Palette unterschiedlicher Bodeneigenschaften, die eine Beurteilung verschiedener hydrologischer Funktionen in verschiedenen Maßstabsebenen erlauben. Im Zuge der Erstellung wurden die aktuell verfügbaren Datenquellen gesammelt, für die weitere Verwendung beurteilt und aufbereitet und mit gängigen Methoden der Datenverarbeitung prozessiert. Somit liegt nun ein Konvolut aus räumlichen Daten vor, welches die fachgerechte Beantwortung von diversen Fragen aus dem Themenkomplex Bodenwasserhaushalt unterstützen kann.

Das HydroBOD Modell ist ein konzeptionelles Ereignismodell, das die komplexen bodenhydrologischen Zusammenhänge auf Basis verfügbarer oder mit vertretbarem Aufwand generierbarer Datengrundlagen vereinfacht darstellt. Ziel ist eine flächendeckende Ableitung von Oberflächenabflussbeiwerten und dominanten Abflussprozesseinheiten. Als wichtigste Inputparameter dienen die erstellten, hydrologischen Bodenkennwerte (n_{FK} , LK, k_s). Im Modell kann der Vorfeuchtezustand (trocken, mittel, feucht, gesättigt) festgelegt und Verschlammung auf Ackerflächen berücksichtigt werden.

Die Limitierungen der erarbeiteten Datensätze ergeben sich primär aus den verfügbaren Datengrundlagen, die eine Splittung der Datenaufbereitung in vier Bereiche (Siedlungsraum, Landwirtschaft, Wald und waldfreie Hochlagen) zur Generierung der jeweils bestmöglichen Ergebnisse notwendig machte. Im landwirtschaftlich genutzten Bereich bietet die eBOD-Profildatenbank eine wertvolle Datengrundlage, um flächenhafte bodenhydrologische Bodenkennwerte auszuweisen. Zu Bedenken ist, dass auf Ackerflächen Bewuchs und Oberflächenbeschaffenheit im Jahresverlauf stark variieren. Das führt zu Unsicherheiten bei der Ausweisung von Oberflächenrauigkeiten und bei der Ermittlung von Oberflächenabflussbeiwerten bzw. der Ausweisung dominanter Prozesseinheiten. Im Siedlungsbereich sind die hydrologischen Bodenkennwerte mit Vorsicht zu verwenden, da es keine konkreten Informationen zur Bodenbeschaffenheit gibt und man davon ausgehen muss, dass der natürliche Aufbau des Bodens verändert wurde. Das Abflussverhalten wird hier über den Versiegelungsgrad bestimmt, wobei zu beachten ist; je niedriger dieser ist, umso größer die Unsicherheit des Modelloutputs.

Die Datenlage über Waldstandorte war zum Projektzeitpunkt mangelhaft. Es gab keine flächenhaften Informationen zu den Böden und die vorhandenen Datensätze sind ungünstig verteilt und insgesamt. Auf die Fläche Oberösterreichs bezogen, ist die Stanortsdichte zu gering, um daraus qualitativ hochwertige flächenhafte Informationen zu generieren. Auch zum hydrologisch relevanten Auflagehumus oder den Moorstandorten gab es keine belastbaren Informationen. Am schlechtesten ist die Datenlage auf waldfreien Hochlagen.

Weiters fehlen belastbare Zusatzinformationen für den gebirgigen Teil Oberösterreichs (z.B. Hydrogeologie, Karst). Angesichts dieser Limitationen wurde in der Regionalisierung ein Ansatz gewählt, der eine Vielzahl von Umweltvariablen in die Vorhersage miteinbezieht und mittels Machine-Learning-Algorithmen den begrenzten Informationsgehalt bestmöglich nutzt. Teilweise wurden auch Daten aus anderen Bundesländern in die Modellanpassung miteinbezogen, was die Belastbarkeit der Regionalisierung im Bereich Wald/waldfreie Hochlagen erhöht.

Auch die über PTFs abgeleiteten hydrologischen Bodenkennwerte sind in den vier Bearbeitungsgebieten mit unterschiedlicher Ergebnisqualität zu betrachten. Während die Anwendung und Entwicklung von PTFs im internationalen Umfeld vor allem für landwirtschaftliche Böden ausgelegt ist, gibt es für Waldböden in Österreich keine Alternativen, die die geforderten Informationen zu hydrologischen Kennwerten gut abbilden.

Mit abnehmender Größe des Bearbeitungsgebietes gleichen sich Unschärfen und allfällige Fehler in den Unterlagen weniger aus, weswegen zumindest für lokale Anwendungen jedenfalls eine stichprobenartige Überprüfung vor Ort vorzunehmen ist. Diese sollte auch mit Bedacht auf die Szenarienwahl und auf die Aktualität der Unterlagen (insbesondere Nutzungsänderungen im Siedlungsbereich) durchgeführt werden. Die Entscheidung, ob Verschlämmung wahrscheinlich ist oder nicht scheint bei hohen Niederschlagsintensitäten kurzer Dauer wesentlich größeren Einfluss auf die Infiltrationskapazität zu haben als der Grad der Vorbefeuchtung.

Die mittels HydroBOD ermittelten Ergebnisse der Infiltration sind aufgrund unterschiedlicher Eingangsparameter und Erstellungsmethoden nur bedingt mit den mittels Geländeanleitung ermittelten Abflussbeiwerten (nach Markart et al. 2004) vergleichbar.

Es wird explizit darauf hingewiesen, dass die Infiltrationswerte aufgrund des Bearbeitungsmaßstabes und der gegebenen Datengrundlagen als Hinweiskarten zu interpretieren sind. Sie wurden für den Bemessungsniederschlag der Dauerstufe 60 Minuten und einer hundertjährigen Auftretenswahrscheinlichkeit auf Basis der eHYD für jedes Pixel ermittelt. Für andere Niederschlags-Dauerstufen oder Niederschlagsintensitäten (z.B. Erhöhung im Zuge des Klimawandels) sind die Infiltrationswerte anzupassen.

Auffallend bei den Gegenüberstellungen von Beregnungs- und Modellierungsergebnis ist die tendenzielle Überschätzung des Oberflächenabflusses im Waldbereich durch das Modell. Allerdings stehen für Oberösterreich nur wenige Beregnungsergebnisse auf Waldstandorten zur Verfügung. Für Forststraßen und Rückewege sind hohe Abflussbeiwerte zu unterstellen, der bei den Beregnungen in OÖ nicht erfasst wurde. Die von HydroBOD ausgewiesenen Abflussbeiwerte wurden daher nicht modifiziert.

Für die Niederschlags-Abflussmodellierung wird, solange keine anderen Informationen oder Erfahrungswerte vorliegen, die Verwendung des Szenarios „feucht mit Verschlämmung“ im Sinne des realistischen „worst case Szenarios“ vorgeschlagen.

Auf Anregung der Auftraggeber wurde im Anschluss eine Liste der Punkte der Verbesserungspotenziale der vorliegenden Planungsunterlagen aus Sicht des BFW und des BAW erstellt (Kapitel 13).

13. Verbesserungspotenziale

Im Folgenden werden, nach Verbesserungspotenzial gereiht, Punkte sowohl für die Gesamtfläche als auch für einzelne Arbeitsbereiche angeführt, durch die nach Ansicht der Projektersteller Verbesserungen der vorliegenden Kartenunterlagen zu erwarten sind. Für deren Einarbeitung wären die neu hinzugekommenen Datengrundlagen aufzubereiten und die Punkte ab Kapitel 6 neu auszuführen. Die Reihung richtet sich nach bodenhydrologischen Gesichtspunkten zum Zeitpunkt der Berichtslegung, sie beinhaltet weder den Aufwand der Erstellung noch allfälligen Nutzen für andere Bereiche.

Generell ist anzumerken, dass eine Karte veraltet ist, sobald sie veröffentlicht ist. Für die Qualität der darauf aufbauenden Analysen und Produkte wäre also eine laufende Aktualisierung von großem Vorteil, dies könnte durch Erneuerungsprojekte oder im Rahmen von mittel- oder langfristigen Betreuungskooperationen sichergestellt werden.

Alle Bearbeitungsbereiche gemeinsam:

- Ausweisung von Feuchtbereichen, insbesondere Moorflächen, wo keine Informationen aus der eBOD zur Verfügung stehen bzw. Kontrolle der Aktualität in Bereichen mit eBOD, da diese vom Mineralboden meist weitgehend unabhängiges hydrologisches Verhalten zeigen (Wasserspeicher in Torfaufage etc.) und lokal erheblichen Einfluss auf Oberflächenabfluss und Speicherpotenzial haben. Dies ist auch für andere thematische Bereiche (Renaturierung, Biodiversität) interessant. Momentan laufen mehrere Projekte auf Bundesebene. Entsprechende Ergebnisse werden mit Ende 2025 erwartet
- Vertiefte Untersuchungen zu Makroporen; Quantifizierung der Entstehungsprozesse, Anteil und Auswirkung auf Infiltration, gegliedert nach verschiedenen Landnutzungseinheiten
- Beregnungsversuche an ausgewählten (bisher unzureichend abgedeckten) Bereichen zur verbesserten Validierung von Modelloutputs.

Siedlungsraum

- Schnelle Aktualisierung der DKM
- Regelmäßiges Aktualisieren von Fernerkundungsprodukten zum Versiegelungsgrad wie des hier verwendeten Imperviousness High Resolution Layers

Landwirtschaft

- Ausweitung der Bodenzustandsinventur (BZI) um bodenhydrologische Kennwerte und Verfügbarmachen der Ergebnisse für wissenschaftliche Zwecke
- Vergleich der eBOD mit den für Waldbereiche regionalisierten Parametern inkl. Abweichungsanalyse und Evaluierung vor Ort zur Identifizierung von Unschärfen

Wald

- Zusätzliche Bodenprofile mit Laboranalysen zu Bodenart, ks, Corg und Lagerungsdichte. Solche verbesserte Datengrundlage für Regionalisierung der Waldflächen stehen nach Abschluss Forsite II (voraussichtlich Ende 2026) zur Verfügung
- Einfluss der Humusaufgabe auf das Abflussgeschehen (Datengrundlagen, Modellmodifizierung), Kennwerte zu deren Speichervermögen
- Hydrogeologie: Ausweisung von Karstbereichen und Quellhorizonten, da diese das Abflussverhalten besonders in den südlichen Landesteilen stark beeinflussen
- Geologische Karte Maßstab 1: 50.000: Bereinigung der Blattschnitte mit einheitlicher Legende, da sie für Wald- und Hochlagen als Grundlagen für die Substratklassenkarte (Regionalisierung) von Relevanz ist. Verbesserte Datengrundlage für Waldflächen stehen nach Abschluss Forsite II (voraussichtlich Ende 2026) zur Verfügung

Waldfreie Hochlagen

- Zusätzliche Bodenprofile mit Laboranalysen zu hydrologisch relevanten Parametern wie Bodenart, Corg, Lagerungsdichte, Ks
- Spezifische regionale Untersuchungen zum Thema Beweidungseinfluss (Almen – Lagerungsdichte, Makroporen, Ks) – zusätzliche spezifische Geländeaufnahmen
- Hydrogeologie: Ausweisung von Karstbereichen und Quellhorizonten, da diese das Abflussverhalten besonders in den südlichen Landesteilen stark beeinflussen
- Untersuchungen des Abflussverhaltens von Felsflächen in Abhängigkeit von Substrat und Neigung
- Geologische Karte Maßstab 1: 50.000: Bereinigung der Blattschnitte mit einheitlicher Legende, da sie für Wald- und Hochlagen als Grundlagen für die Substratklassenkarte (Regionalisierung) von Relevanz ist. Verbesserte Datengrundlage für Waldflächen stehen nach Abschluss Forsite II (voraussichtlich Ende 2026) zur Verfügung

14. Literaturverzeichnis

- Achleitner S., Huber A., Lumassegger S., Kohl B., Spira I., Weingraber F. (2020): Pilot study Upper Austria, Modeling of pluvial floods in response to heavy precipitation events - Guidance for practitioners, Interreg Central Europe
- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Verbesserte und erweiterte Auflage, Hanover
- Bauerhansl C.; Koukal T.; Schadauer K. (2007): Erste österreichweite Waldkarte. Forstzeitung 12, 26 - 27
- Beven K. (2001): Rainfall-Runoff Modelling. J Wiley & Sons Ltd., Chichester
- Beven K.J., Kirkby M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Science Bulletin. 24 (1): 43–69. doi:10.1080/02626667909491834
- BFW (2010): – eBOD digitale Bodenkarte, Hrsg. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=7066>
- BFW (2013): BFW-Bericht 145-I und 145-II: Projekt BioSoil - Datenband
- BMon (2020): A Cloud-Based System for High-Resolution Soil Moisture Monitoring over Austria, FFG Projektdatenbank, <https://projekte.ffg.at/projekt/3242708>
- Boorman D.B. Hollis J.M. Lilly A. (1995): Report No 126: Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom. Institute of Hydrology. UK
- Bouma J. (1989): Using Soil Survey Data for Quantitative Land Evaluation. In: Stewart, B.A. (Hsg.), Advances in Soil Science, vol 9. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4
- Copernicus Global Land Service (Stand 19.4.2023): <https://land.copernicus.eu/global/products/ssm>
- Cutler R., Edwards T.C., Beard K.H., Cutler A., Hess K.T., Gibson J., Lawler J.J (2007): Random forests for classification in ecology, Ecology, 88(11), S 2783-2792
- D'Amboise C., Neuhauser M., Teich M., Huber A., Kofler A., Perzl F., Fromm R., Kleemayr K., Fischer J.T. (2022): Flow-Py v1.0: a customizable, open-source simulation tool to estimate runout and intensity of gravitational mass flows, EGU, Geosci. Model Dev., 15, 2423–2439
- Darmann F., Schwaighofer I., Kumpan M., Strauss P., Weninger T. (in Vorbereitung): Progressing regional pedotransfer functions for country-wide mapping of hydrological soil properties.
- Di Stefano C., Ferro V., Mirabile S. (2010): Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. – In: Biosystems Engineering 106, 205-215. DOI: 10.1016
- Dorren L.K., Domaas U., Kronholm K. Labiouse V. (2011): Methods for predicting rockfall trajectories and runout zones (No. BOOK_CHAP, pp. 143-173). John Wiley & Sons, ISTE Ltd.

Eder A., Sortier B., Klebinder K., Sturmlechner R., Dorner J., Markart G., Schmid G., Strauss P. (2011): Hydrologische Bodenkenndaten der Böden Niederösterreichs (HydroBOD NÖ). Erster Endbericht. Petzenkirchen, Innsbruck.

eHYD Allgemeine Informationen zur Fachkarte *Bemessungsniederschlag 2020* siehe Dokument [WebGIS-Applikation eHYD](#), zusätzliche fachliche Erläuterungen siehe Dokument [eHYD-Fachkarten: Bemessungsniederschlag 2020](#).

Evans S.G., Hungr O. (1993): The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, Canadian Geotechnical Journal 30(4), 620–636

Ewald A., Hartmeyer I., Keuschnig M., Lang A., Otto J.C. (2019): Fracture dynamics in an unstable, deglaciating headwall, Kitzsteinhorn, Austria. The Cryosphere Discussions, 1-25

Faé G. S., Montes F., Bazilevskaya E., Kemanian R. M. A. A. R. (2019): Making Soil Particle Size Analysis by Laser Diffraction Compatible with Standard Soil Texture Determination Methods. – In: Soil Science Society of America Journal 83, 1244-1252. DOI: 10.2136

Ferro V., Mirabile S. (2009): Comparing particle size distribution analysis by sedimentation and laser diffraction method. – In: Journal of Agricultural Engineering (2), 35-43. DOI: 10.4081

Fisher P., Aumann C., Chia K., O'Halloran N., Chandra S. (2017): Adequacy of laser diffraction for soil particle size analysis. – In: PLoS ONE 12 (5), 1-20. DOI: 10.1371

Gelybô G., Tôth E., Farkas C., Horel Â, Kása I., Bakacsi Z. (2018): Potential impacts of climate change on soil properties, in Agrochemistry and soil science

GeoVille (2018): Copernicus Land Monitoring Service. High Resolution land cover characteristics. Lot1: Imperviousness 2018, Imperviousness Change 2015-2018 and Built-up 2018. In: User Manual, Innsbruck

Hosseinzadehtalaei P., Tabari H., Willems P. (2020): Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe, Journal of Hydrology 590 (2020), 1252495

Huber A., Lumassegger S., Kohl B. Spira Y., Achleitner S. (2021): Modellierung pluvialer Sturzfluten – Anforderungen und Sensitivitäten der 2D-hydraulischen Modellierung, Österr Wasser- und Abfallw 2021, 73:116–133, <https://doi.org/10.1007/s00506-021-00749-1>

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I, to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L., Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32

IPCC (2022): Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts,

M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33

Klebinder K., Bitterlich W., Kohl B., Schiffer M., Pirkl H., Markart G. (2007): Wege zur Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Abfluss bei konvektiven Starkregen für Siedlungsräume des oberösterreichischen Salzkammergutes. Wildbach- und Lawinenverbau – Zeitschrift für Wildbach-, Erosions- und Steinschlagschutz, Jg. 71, H. 156, S. 164 – 173

Klebinder K., Kohl B., Maldet A., Markart G., Sotie, B. (2010): Bewertung und Quantifizierung der Auswirkung von Versiegelungen auf den Oberflächenabfluss. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Innsbruck. Interner Bericht, Eigenverlag.

Klebinder K., Sotier B., Eder A., Strauss P., Markart G., Aigner H., Holzinger G., Krammer C. (2012): Hydrologische Bodenkennwerte und Abflussreaktionstypen für Niederösterreich. Wildbach – und Lawinenverbau, Zell am See, H. 169

Kohl B., Markart G., Pittracher, M., Stepanek, L., Kammerlander J., Walter G., Straka W., Strauhal T., Zangerl C. (2021): PSINOT - Abflussbeiwertkarte Nordtirol, Wildbach- und Lawinenverbau, 188, 62-71

Kohl B. (2011): Das Niederschlags-/ Abflussmodell ZEMOKOST, Diss. Univ. Innsbruck, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften

Kuhn D., Torizin J., Fuchs M., Hermanns R.L., Redfield T.F., Balzer, D. (2021): Back analysis of a coastal cliff failure along the Forkastningsfjellet coastline, Svalbard: Implications for controlling and triggering factors. Geomorphology, 389, p.107850

Lecher K., Lühr H.P., Zanke U.C.E. (Hrsg., 2001): Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 8. völlig neu überarbeitete Auflage. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin

Lied K. (1977): Rockfall problems in Norway. ISMES Publication 90, 51-53

Makó A., Tóth G., Weynants M., Rajkai K., Hermann T., Tóth B. (2017): Pedotransferfunctions for converting laser diffraction particle-size data to conventional values. – In: European Journal of Soil Science 68, 769-782. DOI: 10.1111

Malvern Instruments Ltd. (2013): Malvern Mastersizer 3000 User Manual. <https://www.montana.edu/eal-lres/documents/Mastersizer-3000-user-manual-English-MAN0474-2-1.pdf>

Markart G., Kohl B., Soitier B., Schauer T., Bunza G., Stern R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0), BFW Dokumentation 2004 Vol. 3/2004

Meinshausen N. (2006): Quantile regression forests. Journal of Machine Learning Research 7, 983–999.

Neuhauser M., D'Amboise C., Teich, M., Kofler A., Huber A., Fromm, R., Fischer, J.T. (2021): Flow-Py: routing and stopping of gravitational mass flows (Version 1.0). Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5027275>

ÖROK-Atlas Raumbbeobachtung (2023): Bodenversiegelung in Österreich 2018. Exposé, [61.pdf \(oerok-atlas.at\)](#)

ÖWI (Österreichische Waldinventur): Waldkarte: Stand 2020

<https://www.waldinventur.at/?x=1479335.0185&y=6059700.79511&z=7.72746&r=0&l=1111#/map/1/mWaldkarte/Bundesland/erg9>

Perzl F., Hagen K., Huber A. (2015): Verbesserung der Erfassung der Schutzwaldkulisse für die forstliche Raumplanung - Methodik - Prozessmodellierung Steinschlag. Projektbericht, Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), 41

Proske H., Bauer B. (2013). [MoNOE - Modellierung der Sturzprozesse. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt](#) – 100: 87 - 92.

Puhlmann H., Von Wilpert K. (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden, Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, Heft 12, S. 61–71

Riley S. J., DeGloria S. D., Elliot R. (1999): A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity, Intermountain Journal of Sciences, vol. 5, No. 1-4, pp.23-27

Salinas-Melgoza M.A., Skutsch M., Lovett J.C. (2018): [Predicting aboveground forest biomass with topographic variables in human-impacted tropical dry forest landscapes](#). Ecosphere 9(1):e02063. 10.1002/ecs2.2063

Schneider W., Nelhiebel P., Aust G., Wandl M., Danneberg O.H. (2001): Die landwirtschaftliche Bodenkartierung in Österreich. In: Bodenaufnahme in Österreich, Mitteilungen der Österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft, H. 62, S. 39-67

Steinbichler M.G., Reitner J.M., Lotter M., Steinbichler A., (2019): Begriffskataloge der Geologischen Landesaufnahme für Quartär und Massenbewegungen in Österreich. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 159; 5-49, Wien

Smith G. (2020): HRL Imperviousness in Degree 2018 Validation Report. - GMES Initial Operations / Copernicus Land monitoring services – Validation of products, France

Smith R.E., Pralange J.Y. (1978): A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research 14, 3, S 533-538

Sotier B., Klebinder K., Bauer T., Markart G., Strauss P. (2017): Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreich – HydroBOD-NÖ, zweite Projektphase, Ergänzungsbericht (unveröffentlicht)

Stenitzer E. (1988): SIMWASSER – ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitt. der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt 31

Strand G.-H. (2022): Accuracy of the Copernicus High-Resolution Layer Imperviousness Density (HRL IMD) Assessed by Point Sampling within Pixels. Remote Sensing 14(15), 3589.

Teepe R., Dilling H., Beese F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, S. 111-11

Van Looy K., Bouma J., Herbst M., Koestel J., Minasny B., Mishra U., Montzka C., Nemes A., Pachepsky Y.A., Padarian J., Schaap m.G., Tóth B., Verhoef A., Vanderborght J., van der Ploeg M.J., Weihermüller L., Zacharias S., Zhang Y., Vereecken H. (2017). Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives. *Reviews of Geophysics* 55, 1199-1256.

Weiss A. (2001): [Topographic Position and Landforms Analysis](#), Poster Presentation, ESRI Users Conference, San Diego, CA

Woolhiser D.A., Smith R.E. Goodrich D.C. (1990): KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, ARS-77

Zahnt N., Eder M., Habersack H. (2017): Herausforderungen durch pluviale Überflutungen – Grundlagen, Schäden und Lösungsansätze, *Österr Wasser- und Abfallwirtschaft*, <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0451-7>

Zeitfogel H., Feigl M., Schulz K. (2022): Österreichweite Regionalisierung bodenhydraulischer Eigenschaften, *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 74, 166-178

Anhang 1: Landnutzung (Volltext)

Anhang 1 liegt wegen seines Umfanges als eigenes Dokument (Landnutzung.pdf) bei, in welchem eine detaillierte Dokumentation der Erstellung und Validierung der Landbedeckung gegeben wird.

Anhang 2: Bodenanalyse: genaue Beschreibung

Die bei den Feldaufnahmen gewonnenen Bodenproben wurden am BFW Innsbruck und am BAW-Petzenkirchen labortechnisch analysiert.

Folgende Analyseschritte wurden dabei durchlaufen: Nach dem Eintreffen der Proben wurden diese mehrere Tage bei Raumtemperatur getrocknet (Lufttrocknung) und anschließend auf 2 mm (2000 μm) gesiebt, um die Feinbodenfraktion zu erhalten. Davon wurden 10 g entnommen und für die **Nasssiebung** mit Deionat, Wasserstoffperoxid und Natriumpyrophosphat versetzt. Diese Lösung wurde für 24 h in ein 50°C warmes Wasserbad gestellt (BFW), beziehungsweise 20 min geschüttelt (Vibromischer; BAW). Sobald nach Zugabe von Wasserstoffperoxid keine Rauchentwicklung erfolgte, wurde die Probe mit Wasser auf 0,063 mm (63 μm) gesiebt. Die drei Korngrößen der Sandfraktion (Grob-, Mittel-, Feinsand) wurden in zuvor tarierte Kristallisierschälchen geschwemmt und bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann im Exsikkator gelagert und ausgewogen.

Zur Bestimmung der **Feststoffdichte** wurde eine kleine Menge des gesiebten Feinsandes über Nacht im Trockenschrank bei 105°C getrocknet. Aus diesen Proben wurde nach Trocknung die Feststoffdichte im Gaspyknometer bestimmt. Die Dichte der festen Substanzen aus der Probe ergibt sich aus dem Quotienten aus der Masse und dem Volumen (g/m^3) des Probenmaterials im Probengefäß.

Die Ermittlung der **Organischen Substanz** erfolgt über den Glühverlust (24 h bei 430°C im Muffelofen; BFW) beziehungsweise mittels Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehalts durch Trockenverbrennung bei 1200°C (Elementar TC) abzüglich des anorganischen Kohlenstoffgehaltes, bestimmt nach Scheibler (BAW).

Für die Bestimmung der **Korngrößenverteilung der Schluff- und Tonfraktion** wurde am BFW der Malvern Mastersizer verwendet, welcher auf dem Prinzip der Laserbeugung basiert (messbare Partikelgrößen 0,01 und 3500 μm , Malvern Instruments Ltd. 2013). Aus dem beim Nasssieben durchlaufenden Wasser wurden dabei in einem Erlenmeyerkolben 500-800 ml aufgefangen. Davon wurde die für die Messung im Malvern Mastersizer benötigte Menge (etwa 30 ml) entnommen. Am BAW wurden Schluff- und Tonfraktionen im Sedimentationsverfahren nach ÖNORM L 1061-2 bestimmt.

Zur Bestimmung der **Lagerungsdichte** wurden die lufttrockenen Proben nach sichtbarer Organischer Substanz (Äste, Blätter, Wurzeln), Skelett und Feinboden getrennt. Die einzelnen Komponenten wurden ausgewogen, was Aussagen über die Lagerungsdichte des beprobten Standortes ermöglicht (BFW; Waldböden). Für landwirtschaftliche Böden war diese Prozedur nicht notwendig, die Lagerungsdichte konnte direkt durch Trocknung (105°C, mind. 24 h) der ungestört entnommenen Stechzylinderproben bestimmt werden.

Die **gesättigte Wasserleitfähigkeit** wurde an Stechzylindern im falling-head-Prinzip mittels KSAT (metergroup.com) gemessen und die **Kennwerte des Porensystems** (FK, nFK, PWP) wurden mittels Verdunstungsmethode (HYPROP, metergroup.com) und Taupunkt-Hygrometrie (WP4C, metergroup.com) bestimmt.

Anpassung der Korngrößen an das Messverfahren

Im Vergleich zu auf Sedimentation beruhenden Methoden zur Bestimmung der Korngröße wird mittels Laserbeugung ein deutlich geringerer Tonanteil gemessen. Es ist anzunehmen, dass die Sedimentationsverfahren den Tonanteil überschätzen, während Laserbeugungsverfahren ihn unterschätzen (Fisher et al. 2017). Grund dafür ist unter anderem die Kornform, die von der idealen Kugel abweicht und je nach Methode unterschiedliche Durchmesser gemessen werden. So basieren die mittels Sedimentation gemessenen Durchmesser auf dem Stoke'schen Gesetz, während der mittels Laserbeugung gemessene Durchmesser über das erzeugte Streuungsmuster bestimmt wird (Faé et al. 2019).

Aufgrund dessen ist es gängige Praxis, für die mittels Laserbeugung bestimmten Korngrößenfraktionen eine angepasste Ton-Schluff-Grenze heranzuziehen. Dazu finden sich in der Literatur unterschiedliche Werte, die beeinflusst sind von Art der Vorbehandlung und Analyse, sowie den Charakteristika der analysierten Bodenarten (Di Stefano et al. 2010, Ferro and Mirabile 2009, Fisher et al. 2017, Makó et al. 2017). Um den für die untersuchten Bodenproben besten Wert ausfindig zu machen, wurde die Verteilung der Bodenarten bei verschiedenen Ton-Schluff-Grenzen untereinander und auch mit den Bodenarten aus der Fingerprobe verglichen (Abbildung A2-1).

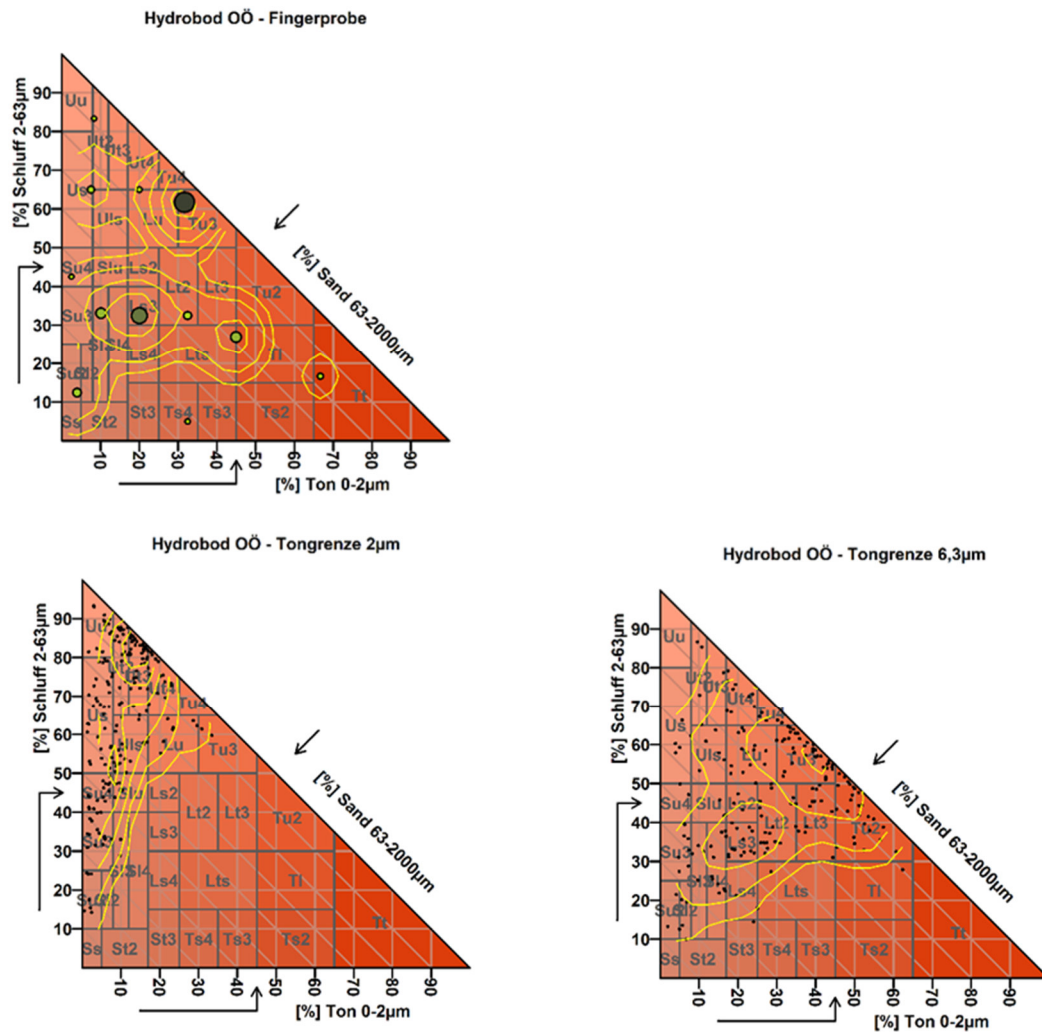


Abbildung A2-1: Vergleich: Verteilung der Bodenarten (Laboranalysen) bei Ton-Schluff-Grenze 2 µm, 6,3 µm und Fingerprobe (Feldansprache)

Darauf basierend wurde die Tongrenze auf 6,3µm festgesetzt, sämtliche als Feinschluff gemessenen Korngrößen demnach der Tonfraktion zugerechnet (Tabelle A2-1).

Tabelle A2-1: angewendete Verschiebung der Korngrößenfraktionen des Feinbodens für die Laserbeugungsmethode

	Verwendete Korngrößengrenzen mit Laserbeugung (Malvern Mastersizer 3000)	Verwendete Korngrößengrenzen mit Laserbeugung (Malvern Mastersizer 3000)
Ton	< 0,2 µm	Ton
	0,2 - 0,63 µm	
	0,63 - 2 µm	
Schluff	2 - 6,3 µm	Schluff
	6,3 – 20 µm	
	20 – 63 µm	
Sand	63 – 200 µm	Sand
	200 – 630 µm	
	630 – 2000 µm	

Anhang 3

Diskussion: PTF's für Wald anhand der PTF von Teepe

Teepe et al. (2003) liefern sowohl kontinuierliche PTF (Regressionsgleichung) als auch klassifizierte PTF (Tabellen). Letztere verwenden zusätzlich eine Korrektur der abgeleiteten Werte über den C-Gehalt in Kombination mit der Bodenart, wobei hohe C-Gehalte einen Zuschlag zur LK und nFK bewirken. Im Rahmen des Projekts wurden zu Testzwecken sowohl die kontinuierlichen als auch die klassifizierten PTF angewendet. Zusätzlich wurde auch noch eine Version der klassifizierten PTF getestet, bei der keine Corg-Zuschläge eingerechnet wurden.

Zusammengefasst sind dies drei Versionen der PTF nach Teepe et al. (2003), die auf die regionalisierten Walddaten (Flächendaten) angewendet wurden:

1. Teepe kontinuierlich
2. Teepe klassifiziert mit Corg-Zuschlägen
3. Teepe klassifiziert ohne Corg-Zuschläge

Die abgeleiteten Werte waren jeweils LK, nFK und PWP. Das Gesamtporenvolumen wurde durch Addition dieser Parameter ($GPV = LK + nFK + PWP$) ermittelt. Dadurch ergaben sich allerdings unrealistisch hohe Werte für das GPV (größtenteils $> 90 \%$).

Durch die Feldaufnahmen und anschließende Laborauswertung standen für die im Rahmen von HydroBOD OÖ aufgenommenen Punkte Messwerte der pF-Kurven zur Verfügung, aus denen für die Aufnahmepunkte Vergleichswerte abgeleitet werden konnten, welche zur Validierung der PTF im Wald herangezogen wurden. Messwerte standen nur für die ersten beiden Tiefenstufen (0-20 cm und 20-50 cm) zur Verfügung.

Die klassifizierte PTF nach Teepe et al. (2003) zeigte im Vergleich zu den Laborwerten eine durchwegs zu hohe nFK. Auch die kontinuierlichen PTF überschätzen die nFK größtenteils, nur für die höchsten gemessenen nFK findet eine Unterschätzung statt. Dadurch waren die abgeleiteten GPV durchwegs zu hoch, mitunter lagen die Werte $> 100 \%$!.

Wie Abbildung A3-1 bis Abbildung A3-3 verdeutlichen, bilden sowohl die kontinuierliche als auch die klassifizierte PTF nach Teepe et al. (2003) die gemessenen Werte nicht zufriedenstellend ab.

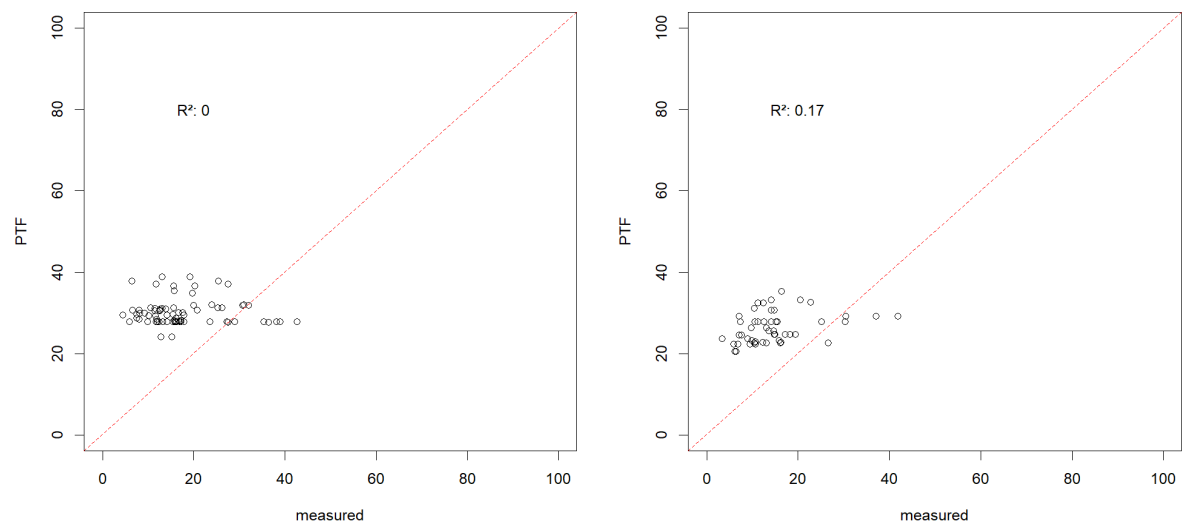


Abbildung A3-1: nutzbare Feldkapazität nach Teepe et al. (2003) - klassifizierte PTF mit C-Zuschlägen; links TS 1 (0-20 cm), rechts TS2 (20-50 cm)

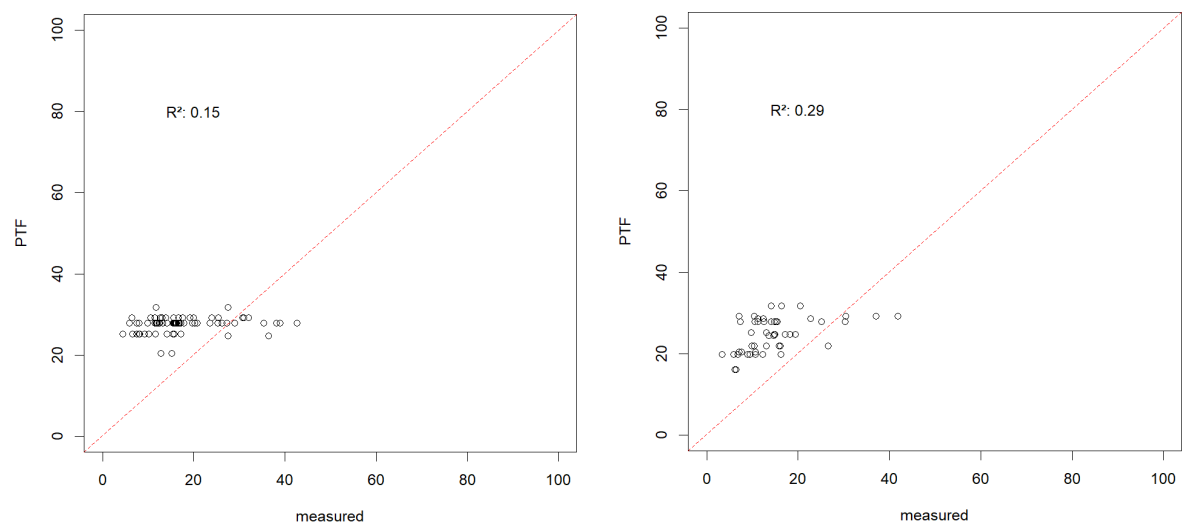


Abbildung A3-2: nutzbare Feldkapazität nach Teepe et al. (2003) - klassifizierte PTF ohne C-Zuschläge; links TS 1 (0-20 cm), rechts TS2 (20-50 cm)

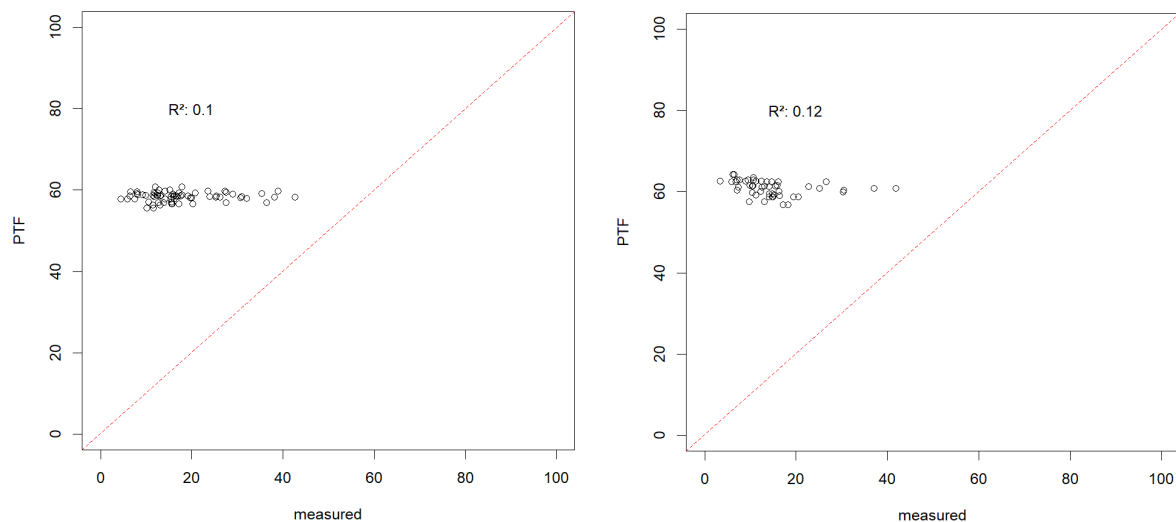


Abbildung A3-3: nutzbare Feldkapazität nach Teepe et al. (2003) – Regressionsgleichung; links TS 1 (0-20 cm), rechts TS2 (20-50 cm)

Ähnliche Probleme traten bereits in HydroBOD NÖ II (Sotier et al. 2017) auf und konnten auch in HydroBOD OÖ nicht zufriedenstellend gelöst werden. Für Waldflächen in Oberösterreich wurden keine geeigneten Wald-PTF gefunden.

Obwohl die im Zuge dieses Projektes neu entwickelten IKT-PTF für landwirtschaftliche Flächen deutliche Verbesserungen gegenüber der PTF ergab, konnten auch sie nicht für die Waldflächen eingesetzt werden, da der gewählte Random-Forest-Ansatz nur im Wertebereich vorhersagen kann, der durch die Eingangsdaten zu den einzelnen Parametern abgedeckt wird. Da in den verwendeten landwirtschaftlichen Bodendaten kaum Elemente mit hohem Kohlenstoffgehalt vorhanden waren, ist eine Extrapolation auf die diesbezüglich stark unterschiedlichen Waldböden nicht möglich.

Anhang 4: Regionalisierung

Input

Ergänzung resampling der 10 m Daten auf 30 m: wichtig ist die explizite Angabe eines Nodata Wertes des Eingangsrasters (-srcnodata).

```
gdalwarp -s_srs EPSG:32633 -t_srs EPSG:32633 -dstnodata -9999.0 -tr  
30.0 30.0 -r mode -te 388131.5 5161133.5 589511.5 5298053.5 -te_srs  
EPSG:32633 -ot Float32 -of GTiff -srcnodata -9999 infile.tif  
outfile.tif
```