

# Bodenkartierung St. Galler Rheintal

Schlussbericht

**Berner Fachhochschule**

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL  
Abteilung Agronomie, Gruppe Bodennutzung und Bodenschutz



**Version:** 1.0

**Datum:** 28.01.2022

**Autoren:** Stefan Oechslin, Stéphane Burgos, Madlene Nussbaum

**Ausführung:** Berner Fachhochschule BFH. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL. Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz.  
Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen

**Auftraggeber:** Verein St. Galler Rheintal  
Alte Landstrasse 106, CH-9445 Rebstein

# Inhaltsverzeichnis

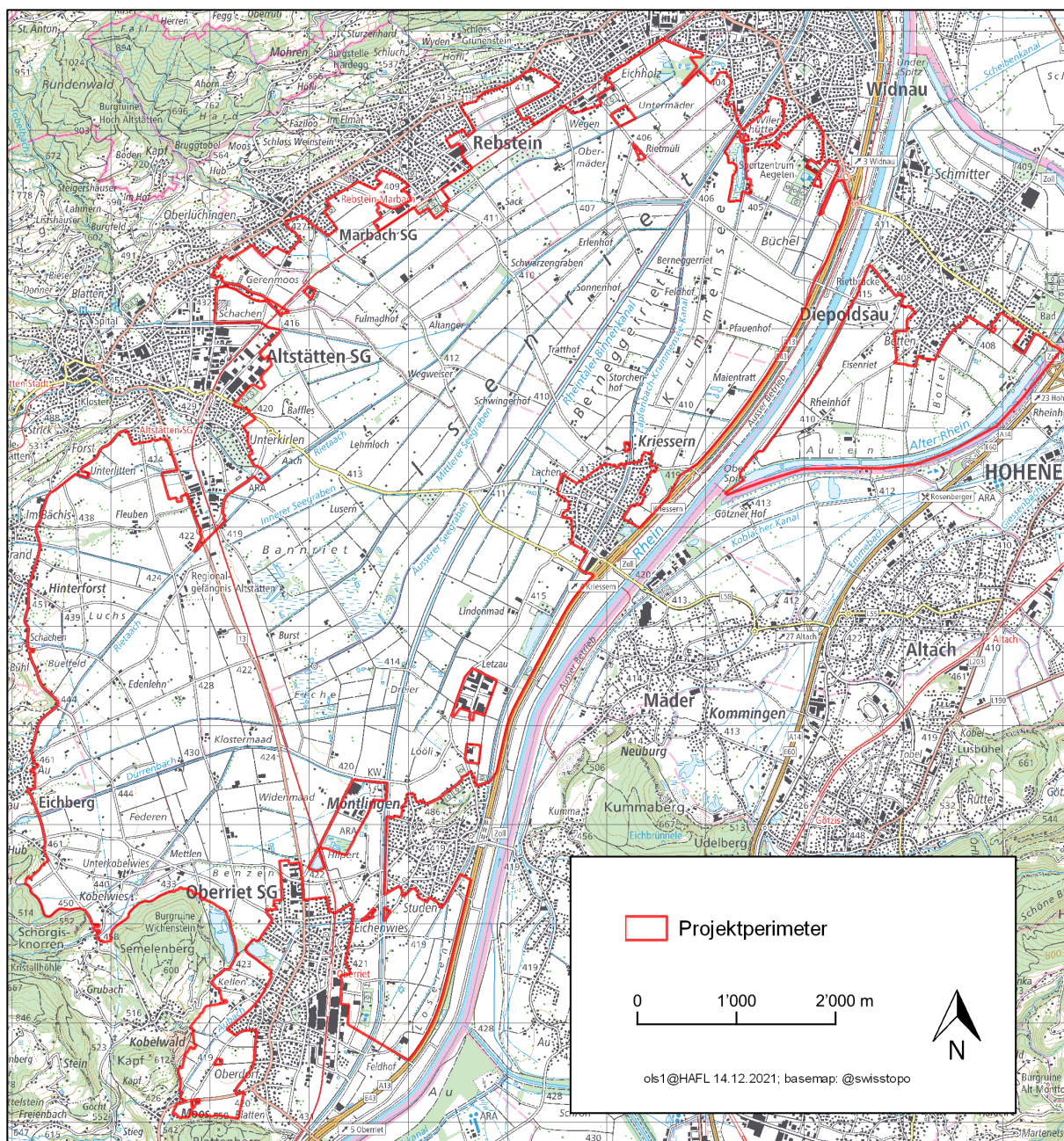
1	Ausgangslage	5
1.1	Hintergrund	5
1.2	Projekteinbettung	5
1.3	Ziele	5
2	Konzept der Kartenerstellung	6
3	Grundlagendaten	8
3.1	Projektperimeter	8
3.1.1	Ursprünglicher Perimeter	8
3.1.2	Angepasster Perimeter	8
3.2	Übersicht der Grundlagendaten	8
3.3	Ableitungen	9
4	Feldarbeiten	10
4.1	Orientierung	10
4.2	Datenerfassung	10
4.3	Beprobungsplan	11
4.3.1	Zu beprobende Fläche	11
4.3.2	Bohrungsstandorte	11
4.3.3	Profilgrubenwahl	13
4.4	Übersicht aller Aufnahmen	14
4.5	Bohrungen	15
4.5.1	Handbohrungen	15
4.5.2	Maschinelle Bohrungen	16
4.6	Profilgruben	17
4.6.1	Profilgrubenübersicht	17
4.6.2	Profilgrubenansprache	18
4.7	Konzeptkarte	19
5	Bodeneigenschaften	20
5.1	Ausgangsmaterial und Horizontierung	20
5.2	Organische Substanz	22
5.2.1	Methode	22
5.2.2	Ergebnisse	22
5.3	Feinerdekörnung	25
5.3.1	Methode	25
5.3.2	Ergebnisse	25
5.4	Zersetzungsgrad	28
5.4.1	Bestimmung im Feld	28
5.4.2	Bestimmung im Labor	29
5.5	Torfarten	30
5.6	Gefüge	31
5.7	Vernässungsmerkmale	32
5.7.1	Allgemein	32
5.7.2	In Torfhorizonten	32
5.7.3	In mineralischen Horizonten	33
5.7.4	Ergebnisse	34
5.8	pH-Wert	35
5.9	Lagerungsdichte	36
5.10	Fasergehalt	36
5.11	Torfhorizonte	36
5.12	Konventionen in der Ansprache	36
5.13	Anthropogen beeinflusste Böden	37
5.14	Schichtung	38
6	Pilotbetriebe	40
6.1	Analyse von Pilotbetrieben	40
6.2	Auswahl der Betriebe	40

6.3	Befragung	41
6.4	Klassierung der Parzellen	41
6.5	Einfluss der Kulturen auf die Bodeneigenschaften	42
7	Modellierung	44
7.1	Prinzip	44
7.2	Datenaufbereitung	45
7.2.1	Erklärende Grössen	45
7.2.2	Zielgrössen	45
7.3	Synthetische Bohrungen	46
7.4	Gewichtung	46
7.5	Validierung	46
7.6	Mehrstufige Modellierung	48
7.7	Karten	49
7.7.1	Organische Substanz	49
7.7.1.1	Organische Substanz im Oberboden	49
7.7.1.2	Organische Substanz im Unterboden	49
7.7.1.3	Organische Substanz im Untergrund	49
7.7.2	Feinerdekörnung	52
7.7.2.1	Feinerdekörnung im Oberboden	52
7.7.2.2	Feinerdekörnung im Unterboden	54
7.7.2.3	Feinerdekörnung im Untergrund	55
7.7.3	Vernässungsmerkmale	56
7.7.4	Zersetzungsgrad	57
7.7.5	PNG	58
7.8	Ergebnisse der Validierung	59
8	Kombinierte Bodeneigenschaften	60
8.1	Prinzip	60
8.2	Synthetische Bodentypen	60
8.3	Bewertungsmatrix	62
8.3.1	Prinzip	62
8.3.2	Problembereiche	62
8.3.3	Massnahmen	63
8.3.4	Grenzen möglicher Massnahmen	63
8.3.5	Anthropogenität	64
8.3.6	Gesamtbewertung	64
8.4	Karten	65
8.4.1	Einige Beispiele von Darstellungen und Ableitungen für Grössen aus der FAL24+	65
8.4.2	Synthetische Bodentypen	67
8.4.3	Problembereiche	69
8.4.3.1	Sackungspotential	69
8.4.3.2	Feinerde	70
8.4.3.3	Vernässung	71
8.4.4	Massnahmen	72
8.4.5	Grenzen möglicher Massnahmen	74
8.4.6	Anthropogenität	75
8.5	Gesamtbewertung	76
8.5.1	Karte der Gesamtbewertung	76
8.5.2	Wichtige Anmerkungen zur Gesamtbewertung	77
8.5.3	Beispiele der Gesamtbewertung	78
8.5.4	Hinweise zur Anwendung der Gesamtbewertung in der Praxis	79
9	Ausblick	81
10	Literaturverzeichnis	83

## Abkürzungen und Begriffe

Alluvial	Ablagerungen aus Fliessgewässer-Sedimenten → bildet das Ausgangsmaterial Alluvium aus dem der Bodentyp Fluvisol entsteht.
BoKa 72/76	Bestehende Bodenkarte im Perimeter aus den Jahren 1972-76.
Boxplot	Diagramm, dass Verteilung mit Median, Quartilen und Extremwerten anzeigt.
Erklärende Grösse	Daten die Informationen über eine Zielgrösse enthalten und zur Erstellung eines statistischen Modelles verwendet werden können.
FAL24	Schweizer Kartieranleitung für Landwirtschaftsböden (Brunner et al. 1997).
FAL24+	Unter anderem durch Kanton SO aktualisierte Version der FAL24 (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn (FABO SO) 2017).
FFF	Fruchtfolgefläche.
gg-Horizont	Bodenhorizont mit periodischer Vernässung. Zeigt Rostflecken.
Histogramm	Diagramm der Häufigkeitsverteilung.
Horizont und Schicht	Ein Horizont bezeichnet einen Bereich im Boden, der aufgrund seiner Eigenschaften von darüber- und darunterliegenden Bereichen unterschieden werden kann. Schicht bezeichnet dasselbe aber in Bereichen, in denen keine Bodenbildung stattgefunden hat, z. B. alluviale Schichten im Untergrund.
KLABS	Klassifikation der Böden der Schweiz (Brunner et al. 2002).
Lagerungsdichte	Dichte der trockenen Feinerde [ $g \cdot cm^{-3}$ ].
Limnisch	Ablagerungsprozess in stehenden Süssgewässern.
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche.
Modellierung	In diesem Bericht: Erstellung eines Modells mit klassischen statistischen Methoden oder maschinellem Lernen mit dem Ziel Vorhersagen zu berechnen, basierend auf Korrelationen zwischen Zielgrösse und erklärenden Grössen.
NEK	Nutzungseignungsklasse. Mass für die Eignung eines Bodens für Kulturarten.
Organischer Boden	Boden mit mindestens 40 cm organischen Bodenhorizonten in den obersten 80 cm.
Organisches Substrat	Bodensubstrat mit mindestens 30 % OS. Durch den nicht vollständigen Abbau von Biomasse in wassergesättigtem Bereich entstanden.
Organomineralisches Substrat	Substrat mit 10 - < 30 % OS. Übergangsform mineralisches und organisches Substrat. Im Oberboden als anmoorig bezeichnet.
OS	Tote organische Bodensubstanz. Umgangssprachlich «Humus».
PNG	Pflanzennutzbare Gründigkeit. Mass für das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen eines Bodens. Grundlage für die NEK.
r-Horizont	Reduzierter Bodenhorizont, über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt.
Substrat	Aus Ausgangsmaterial entstandene feste Bodensubstanz.
Zersetigungsgrad	10-stufige Skala zur Beschreibung der Zersetzung von Torfen (10 = keine Fasern, komplett zersetztes Material, 1 = nur Fasern, kein zersetztes Material).
Zielgrösse	Eigenschaft, die mithilfe eines statistischen Modells mit erklärenden Grössen in Bezug gesetzt und wofür Vorhersagen z. B. als Karte berechnet werden.

# Übersichtskarte



# Zweck

Hierbei handelt es sich um den Schlussbericht des Bodenkartierungsprojekts im St. Galler Rheintal, das die Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der Berner Fachhochschule (BFH) seit Sommer 2018 im Auftrag des Vereins St. Galler Rheintal bearbeitet hat.

## 1 Ausgangslage

### 1.1 Hintergrund

Die Ebene des St. Galler Rheintals zwischen Oberriet und Widnau war bis vor ca. 15'000 Jahren vom Rheingletscher bedeckt. Als sich dieser zurückgezogen hatte, trat der ausgedehnte Ur-Bodensee an seine Stelle. Durch Sedimentation verlandete die Ebene und es bildeten sich Feuchtgebiete in denen sich organische Substanz (OS) akkumulierte teils im Wechsel mit längeren Überschwemmungsereignissen und -Perioden. Dieser ca. 10'000 Jahre andauernde Prozesse wurden durch wasserbauliche Massnahmen ab Mitte des 19. Jahrhunderts verlangsamt und schliesslich gestoppt. Die Rheinregulierung, die Binnengewässerkorrekturen und später die Melioration optimierten den Wasserhaushalt in der Ebene für die landwirtschaftliche Produktion. Aus vernässten, periodisch überschwemmten Böden wurde fruchtbares Land, das sich zum Teil ackerbaulich nutzen lässt.

Kommen organische Böden jedoch in Kontakt mit Luftsauerstoff setzt deren Mineralisierung ein und der Kohlenstoff entweicht dabei in die Atmosphäre. Zusätzlicher tritt ein Volumenverlust durch Setzung und Schrumpfung der ehemals vom Wasser gestützten Bodenmatrix ein. Im St. Galler Rheintal findet durch die künstliche Drainage eine solche fortlaufende flächige Sackung der Terrainoberfläche statt, was die Fruchtbarkeit des Bodens gefährdet.

### 1.2 Projekteinbettung

Im Zusammenhang mit dem Projekt Rhesi (Rhein – Erholung und Sicherheit) wird Material aus Rheinsedimenten anfallen, das für Bodenverbesserungsmassnahmen eingesetzt werden könnte. Um die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu gewährleisten, müssen solche Massnahmen lokal angepasst und auf einer soliden Datengrundlage durchgeführt werden. Die bestehende Bodeninformation ist ungenügend, es handelt sich dabei im Wesentlichen um eine Bodenkarte aus den Jahren 1972/76 (BoKa 72/76). Deren Inhalt ist teils lückenhaft und allgemein gehalten. Weiter ist die Beschreibung von anthropogenen, alluvialen und insbesondere organischen Böden nicht sehr detailliert, diese Bodentypen sind jedoch zentral für die Bewertung der Böden im Rheintal.

In der Schweiz wird in der gegenwärtigen Praxis für Bodenkartierungen der Standard FAL24+ (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn (FABO SO) 2017) verwendet. Gegenüber der Kartierung in den 70er Jahren (Brunner et al. 1997) ergeben sich mit dieser Methode einige Verbesserungen in der Durchführung von Bodenkartierungen und des Informationsgehaltes von Bodenkarten. Der FAL24+-Standard ist jedoch nur bedingt für grosse Flächen und Massstäbe geeignet, weiter weist er immer noch grosse Lücke in Bezug auf die wichtigsten Bodentypen im Rheintal auf (Halbmoore, Fluvisole, Auffüllungen). Auch bietet die FAL24+ keine Ableitungsmethoden für nutzerorientierte Karten, welche für Empfehlungen zu Aufwertungsmöglichkeiten von organischen Böden wichtig wären.

### 1.3 Ziele

Für die organischen Böden im Projektperimeter soll Bodeninformation erhoben werden und in Karten so aufbereitet werden, dass die im Rheintal relevanten Problemstellungen beantwortet werden können. Das Resultat soll aufzeigen, wo gegenwärtig und zukünftig Probleme in der Bodenfruchtbarkeit bestehen. Weiter soll die Bodeninformation so interpretiert werden, dass sie eine Entscheidungsgrundlage zur langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und der Bewirtschaftung des Wasserhaushaltes bildet. Um diese Ziele zu erreichen und den speziellen lokalen Gegebenheiten gerecht zu werden, wird die gegenwärtige Bodenkartierungsmethodik innerhalb des Projektes weiterentwickelt und angepasst.

## 2 Konzept der Kartenerstellung

Der Kern des gewählten Vorgehens bildet die Modellierung von Bodeneigenschaften mit geostatistischen Verfahren. Dazu werden Felddaten wie Bohrungen und Profilgruben (Punktdaten) benötigt, die dann mittels Geodaten, die über den ganzen Perimeter vorhanden sind, in die Fläche gerechnet werden können. Das gewählte Vorgehen in diesem Projekt folgt einem iterativen Prozess, das heisst die räumliche Vorhersage wird mit dem jeweiligen Datenstand durchgearbeitet und erstellt. Wenn die Karten der Bodeneigenschaften die gewünschte Qualität noch nicht erreichten, wurden weitere Bodendaten erhoben und die räumliche Vorhersage mit diesen wiederholt.

Die Grundlage für die Beprobung und Modellierung bilden die Grundlagendaten. Dabei handelt es sich um räumliche Daten, die Informationen zu den Bodeneigenschaften oder zur Bodenbildung in sich tragen. Z. B. ist für den Wasserhaushalt eines Bodens entscheidend, ob er auf einer Senke oder einer Kuppe liegt, weshalb aus dem Höhenmodell eine Karte abgeleitet wurde, die die Lage im Gelände aufzeigt. Die Grundlagendaten werden in Kapitel 3 beschrieben.

Der Prozess der Generierung von Bodeninformation an Punktaufnahmen ist in Kapitel 4 beschrieben. Dieser umfasst die Orientierung im Feld, die Datenerfassung, die Erstellung eines Beprobungsplans und die Datenablage und Übersicht.

Aus den Felddaten werden in einem ersten Verarbeitungsschritt Bodeneigenschaften abgeleitet. Aus Horizontinformationen werden Eigenschaften errechnet, die für die gesamte Punktaufnahme gelten, z. B. die Obergrenze des r-Horizontes. Diese abgeleiteten Eigenschaften dienen als Zielgrössen für die statistischen Modelle. Je nach Fragestellung können diese Karten der Bodeneigenschaften direkt als Anwendungskarten verwendet werden, z. B. die Karte der PNG. Eine Übersicht der im Perimeter erfassten Bodeneigenschaften findet sich in Kapitel 5.

An das Projekt gekoppelt ist jeweils die Entwicklung und Festlegung der Methodik im Feld, Labor und der rechnerischen Verfahren sowie die Definition der einzelnen Parameter, die aufgenommen und untersucht werden. So wird z. B. im Verlauf des Projektes festgesetzt und getestet wie die Variation der vorhandenen Böden mit einer hinreichenden Genauigkeit im Feld beschrieben werden können und welche Labormethoden dabei helfen. Da die Methodenentwicklung laufend über alle Teile des Projektes stattfand, finden sich in allen Kapiteln des Berichtes Aspekte davon. Im Bereich der Methodenentwicklung wurde zudem eine Bewirtschafterbefragung auf Pilotbetrieben durchgeführt. Dabei sollte aus der Analyse von ausgewählten landwirtschaftlichen Betrieben herausgelesen werden können, wie sich verschiedene Bewirtschaftungsweisen auf die lokalen Böden auswirken. Die Pilotbetriebe werden in Kapitel 6 beschrieben.

Die Verarbeitungsschritte und die Modellierung an sich, mit der die generierte Bodeninformation an den Punktaufnahmen durch die Grundlagendaten zu flächigen Karten der Bodeneigenschaften verarbeitet wurde, findet sich in Kapitel 7.

In Kapitel 8 wird aufgezeigt wie durch die Kombination der modellierten Bodeneigenschaftskarten und einer darauffolgenden Bewertung, eingegrenzt werden kann wo Bodenverbesserungsmassnahmen priorisiert werden könnten. Dazu werden in einem ersten Schritt die Bodeneigenschaftskarten kombiniert und synthetische Bodentypen daraus abgeleitet. Dabei handelt es sich um Ausprägungen bestimmter Eigenschaften, die für die Fragestellung relevant sein können. Z. B. wo und wieviel OS kommt im sackungsrelevanten Bereich des Bodens vor oder welche Feinerdekorung (Gesamtheit von Ton, Schluff und Sand) hat der Oberboden. Jedem dieser synthetischen Bodentypen wird für die Problembereiche Vernässung, Feinerde und Sackungspotential ein Wert zugewiesen. Weiter erhielt jeder synthetische Bodentyp eine Bewertung der Auswirkungen einer Bodenverbesserungsmassnahme, diese umfasste die mögliche Schüttmächtigkeit, mögliche Verdichtungen, die Nachfolgebewirtschaftung sowie die Nachhaltigkeit der Minderung der Sackungsrate. Die einzelnen Faktoren auf der Problem- und Massnahmen-seite wurden am Ende aufsummiert und eine Karte erstellt mit Klassen, die angeben wo eine Bodenverbesserungsmassnahme wie sinnvoll ist.



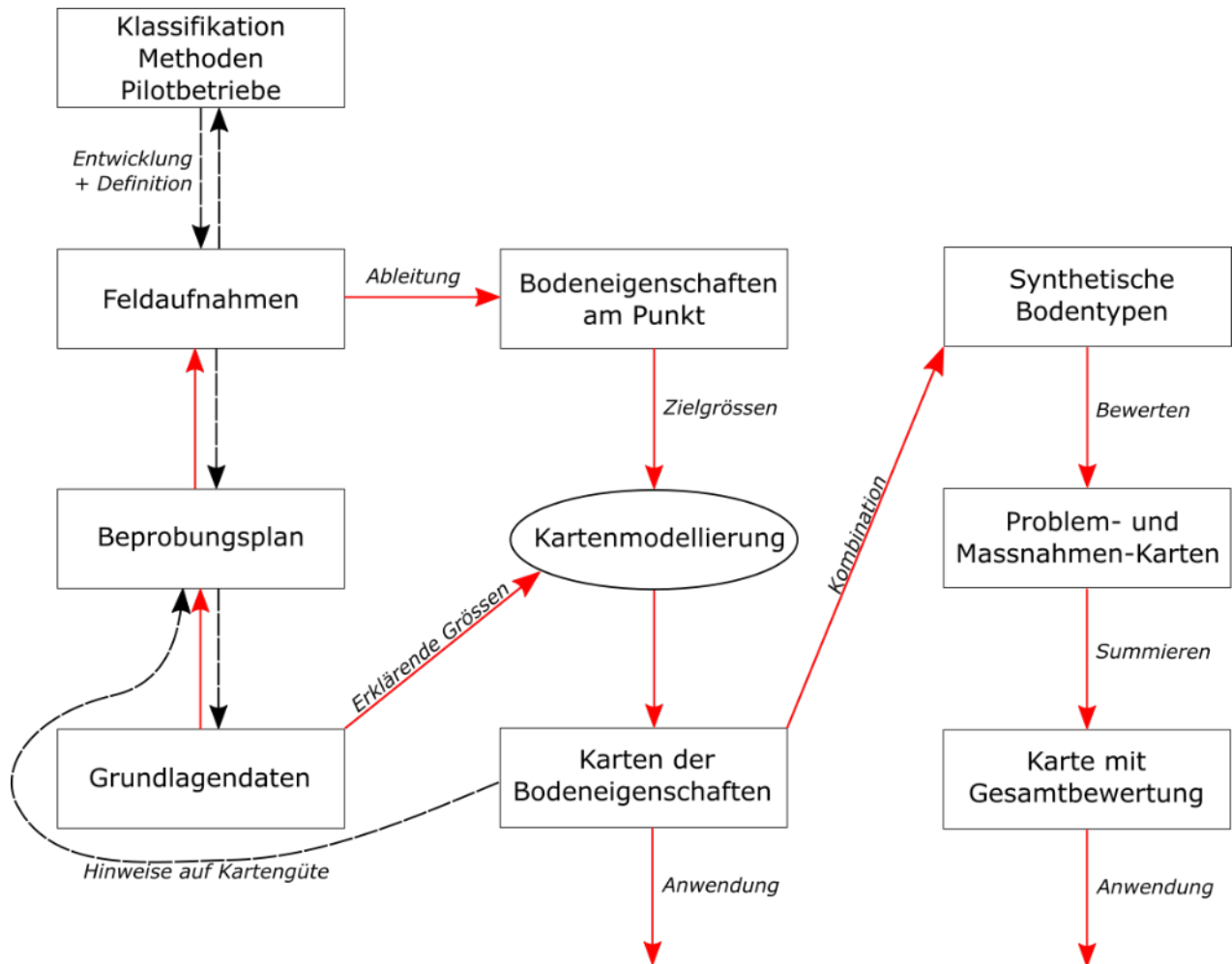


Abbildung 1: Ablaufdiagramm des Vorgehens im Projekt. Rote Pfeile zeigen den Ablauf zur Erstellung der Bodenkarten auf direktem Weg, wenn sämtliche Begleitarbeiten abgeschlossen sind. Die Begleitarbeiten sind mit schwarzen Pfeilen dargestellt. Sie zeigen die parallel zur Kartierung laufende Methodenentwicklung im Feld und Labor, sowie die Bewirtschafterbefragung auf den Pilotbetrieben. Weiter ist der iterative Prozess, der wiederholenden Modellierungen dargestellt. Im Laufe des Projektes wurden Karten der Bodeneigenschaften modelliert, diese zeigten jeweils wo die Vorhersagen noch nicht eine ausreichende Qualität haben. In diesen Gebieten wurde dann entsprechend dichter beprobt. Die modellierten Bodeneigenschaften wurden dann zu synthetischen Bodentypen kombiniert und diesen jeweils eine Bewertung in Problem- und Massnahmen-Kategorien zugewiesen. Durch ein Aufsummieren der einzelnen Bewertungen wurde am Ende eine Gesamtbewertung gebildet. In Rechtecken sind jeweils Zwischenergebnisse dargestellt, die Modellierung ist als Kreis dargestellt da es sich hier um einen Prozess handelt.

## 3 Grundlegendaten

### 3.1 Projektperimeter

#### 3.1.1 Ursprünglicher Perimeter

Im Projekt sollen alle landwirtschaftlich genutzten organischen Böden in der Rheinebene zwischen Oberriet im Süden und Heerbrugg im Norden kartiert werden. Dazu wurde zu Beginn ein Perimeter umrissen, der diese Böden umfassen sollte. Innerhalb dieses Perimeters wurden die ganze LN als Zielfläche der Kartierung definiert.

Die Grenzen wurden aufgrund der BoKa 72/76 sowie 35 Probebohrungen festgelegt. Wo eine natürliche Begrenzung wie ein Waldrand als Grenze fehlten, wurde der Umriss so gewählt, dass die Bodenkarten-Einheiten (Polygone) der BoKa 72/76 mit organischen Attributen von mindestens einem mineralischen Polygon umschlossen waren. Der Perimeter umfasste insgesamt 4080 ha LN, wovon bei ca. 2000 ha erwartet wurde, dass mindestens eine organische Schicht vorhanden ist.

#### 3.1.2 Angepasster Perimeter

Im Verlaufe des Projektes konnte der Perimeter mithilfe der neu erhobenen Bodendaten genauer abgegrenzt und auf die organischen Böden zugeschnitten werden. Die Fläche nördlich von Diepoldsau wurde ausgeschlossen, da dort keine organischen Schichten zu erwarten sind. Dagegen wurde die LN zwischen dem Blattenberg und Wichenstein westlich von Oberriet in den Perimeter aufgenommen da dort Böden mit erhöhten organischen Gehalten vorhanden sind. Weiter wurden grössere Bauprojekte wie die Deponie Felbenmaad zwischen Montlingen und Oberriet ausgeschlossen. Im Bannriet wurden die nicht bewaldeten Naturschutzflächen hinzugefügt, um die räumliche Dynamik der bodenbildenden Faktoren besser erfassen zu können. Genauso wurden Flächen mit Schrebergärten in die Zielfläche aufgenommen. Der Zielperimeter umfasste schlussendlich 4'852 ha, wovon 3'823 zur effektiv zu kartierenden Zielfläche gehören. Die rund 1'000 ha, die ausgeschlossen wurden, bestehen hauptsächlich in absteigender Reihenfolge aus Verkehrsflächen, Gewässern, Gebäuden und Wald.

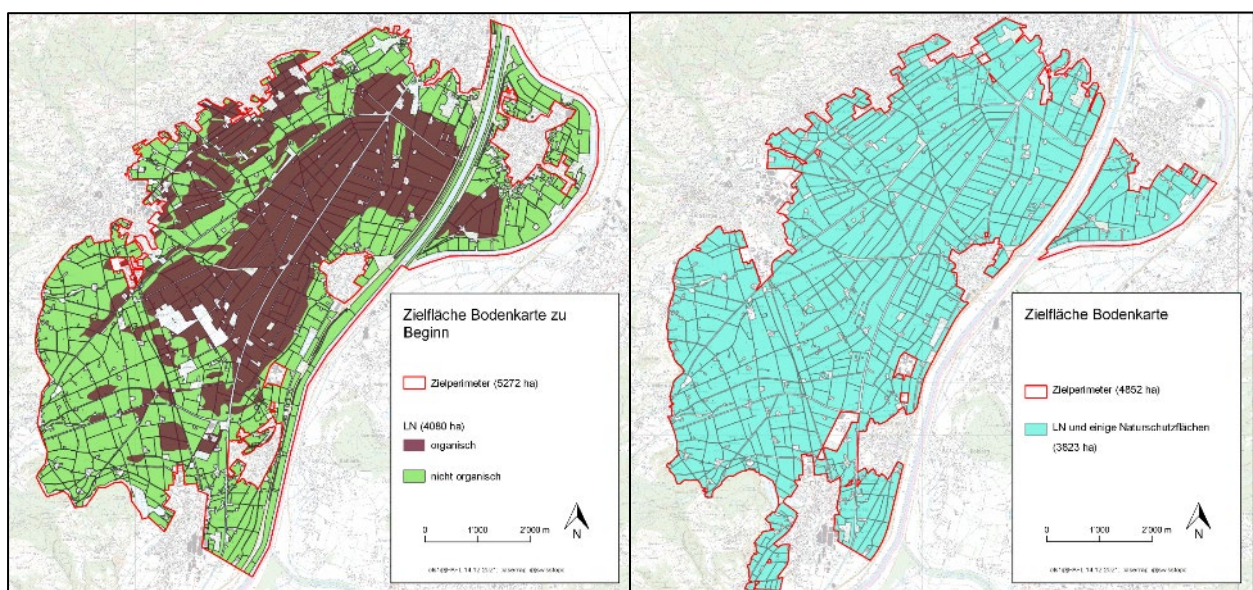


Abbildung 2: Links: Ursprünglicher Perimeter mit Einteilung gemäss BoKa 72/76 in organische und mineralische Böden. Rechts: Definitiver Perimeter mit Zielfläche in türkis.

### 3.2 Übersicht der Grundlegendaten

Für verschiedene Arbeitsschritte im Projekt ist es zentral räumliche Daten des Perimeters zur Verfügung zu haben. Diese werden für die Punkt- und Profilgrubenwahl, die Orientierung im Feld oder die Bewirtschaftersinformation genutzt und dienen insbesondere für die Modellierung als erklärende Grössen. Eine Auflistung der genutzten Geodaten findet sich in Anhang I.1.

### 3.3 Ableitungen

Für die jeweiligen Arbeitsschritte wurden Ableitungen aus den Grundlegendaten erstellt. Aus allen verfügbaren Quellen wurden anthropogene Objekte extrahiert. Im Allgemeinen handelt es sich um Böden denen Material zugeführt, entnommen oder deren Bodenhorizonte umgeschichtet wurden, sie sind nicht natürlich gewachsen und damit nicht mehr repräsentativ für ihre Umgebung und müssen für die Auswahl der Bohrungen und Profilgruben sowie in den Modellen speziell berücksichtigt werden. Voraussetzung für eine Aufnahme in das Inventar ist, dass ein Objekt sicher vorhanden ist. Als Kriterien dienen dabei eine verlässliche Karte, die das Objekt zweifelsfrei lokalisieren lässt (auf wenige m) oder bei unsichereren Quellen, die Bestätigung durch eine zweite Quelle (z. B. Höhenmodell + altes Luftbild). Aus den Siegfriedkarten wurden Gewässer und anthropogene Strukturen automatisiert extrahiert. Insgesamt wurden 560 Objekte identifiziert.

Um die Eigenschaften der heutigen Böden zu erfassen, sollten die Datengrundlagen die Situation von heute abbilden, aber auch die Situation, welche zur Zeit der Hauptbodenbildungsphase vorherrschte. Deshalb wurde das Höhenmodell (swissAL3D) angepasst indem anthropogene Objekte herausgerechnet wurden. Als Grundlage dazu dienen bestehende Infrastrukturen wie Strassen oder die Zuglinie. Diese wurden nach Art und Grösse ihres Einflusses auf die Umgebung (Abschätzung für Böschungen, Dämme) bewertet und rechnerisch im Höhenmodell eingeebnet (lokale Glättung).

Aus dem originalen und dem geglätteten Höhenmodell wurden verschiedene Terrain-Ableitungen berechnet. Dabei handelt es sich um Ergebnisse von rechnerischen Verfahren, die vorher verborgene Gegebenheiten sichtbar machen und mittels numerischen Werten (Index) weiterverwendet werden können. Abbildung 3 zeigt als Beispiel einen Index zur Hervorhebung von Nassstellen (Moore et al. 1993) sowie zur Hervorhebung der Flächen, wo sich erodiertes Material ansammelt(e) (Gallant & Dowling, 2003). Insgesamt wurde ein Dutzend Indizes in verschiedenen Ausführungen erstellt. In Modellierungen von Bodeneigenschaften stellen diese häufig wichtige erklärende Grössen dar.

Weiter wurden aus Orthophotos automatisiert sowie manuell die Bodenfarbe extrahiert und je nach Helligkeitswert und Farbsättigung unterscheiden. Auch diese Datensätze dienen als erklärende Grösse in der Modellierung.

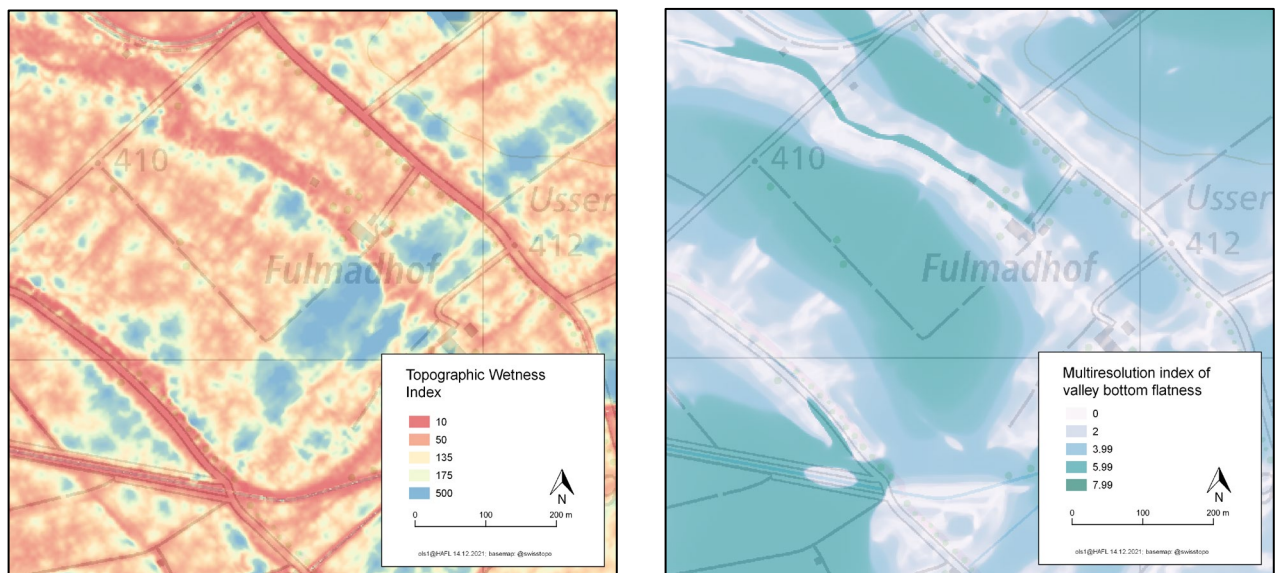


Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Gebiet Fulmad in Marbach mit Feuchteindex (links) (Topographic Wetness Index) welcher mithilfe der Neigung und der Grösse des Einzugsgebietes anzeigt wo aufgrund des Reliefs Nassstellen (blau) zu erwarten sind. Die Erosionsakkumulation (rechts) (Multiresolution index of valley bottom flatness) zeigt je dunkelgrüner desto ausgeprägter ist die Akkumulation von Material, wenn dieses in höher gelegenen Gebieten weggespült wird, die Erosionslagen sind weiss eingezeichnet.

## 4 Feldarbeiten

### 4.1 Orientierung

Zur Orientierung im Feld wurde die Applikation QField verwendet. Dabei handelt es sich um eine für mobile Geräte angepasste Version des Open Source GIS-Programmes QGIS. QField ermöglicht es auf einem Android-Gerät räumliche Daten anzuschauen, zu erstellen und zu verändern. Sämtliche für die Feldaufnahmen relevanten Geodaten wurden in die Applikation geladen und standen so bei der Feldarbeit zur Verfügung. Weiter wurden räumliche Informationen direkt in QField erfasst. So wurden Punktaufnahmen verortet, Flächen mit bestimmten Bodeneigenschaften eingezeichnet oder auch Auffüllungen oder andere anthropogene Einflüsse eingegrenzt.

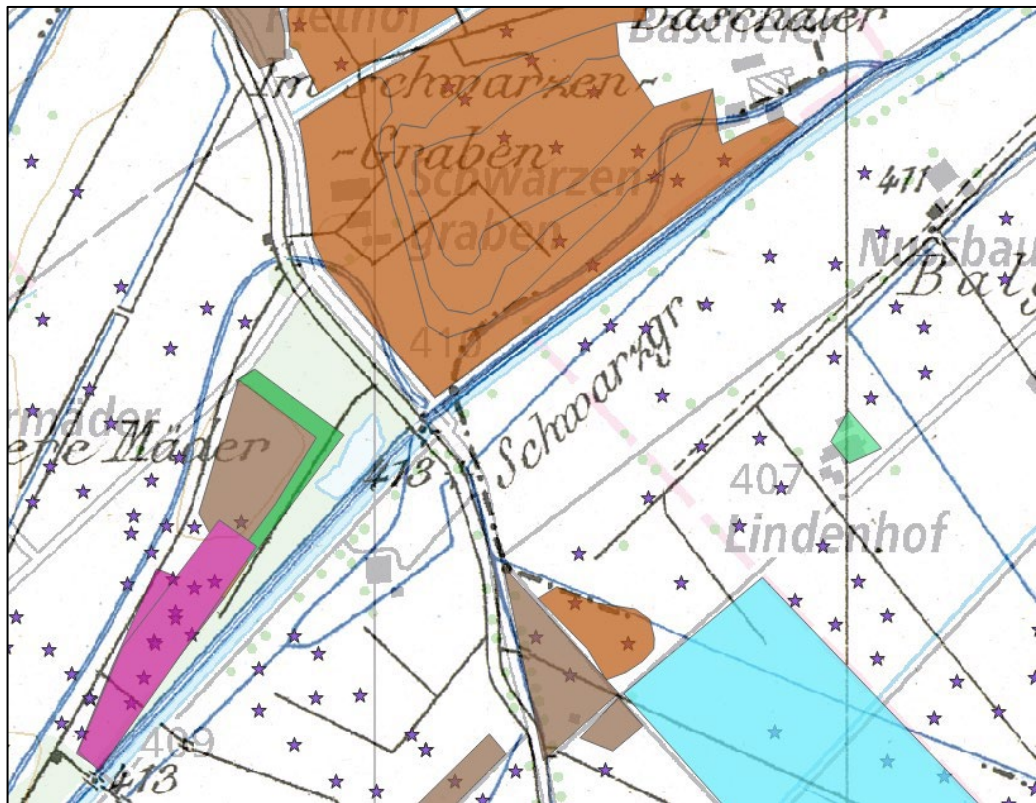


Abbildung 4: Ausschnitt aus einer Feldkarte wie sie im Feldtablet oder -smartphone angezeigt wurde. Zu sehen sind Punktaufnahmen als blaue Sterne sowie Polygone, die flächig aufgenommene Bodeneigenschaften nach Kategorie farblich getrennt anzeigen. Im Hintergrund sind die aktuelle Landeskarte 1:10'000 sowie die Siegfriedkarte von 1915 übereinandergelegt. Hintergrundkarte: swisstopo

### 4.2 Datenerfassung

Die aufgenommenen Bodendaten wurden im Feld jeweils in tabellenbasierten Aufnahmeblättern eingetragen (Beispiel siehe Anhang I.2). Anschliessend wurden die Aufnahmeblätter in eine MS Access-Datenbank übertragen. Deren Struktur bildet die Vorgängerversion der gegenwärtig vom Kompetenzzentrum Boden (KOBO) betriebenen Web-Applikation «Soildat» zur Erfassung von Bodendaten. In die Datenbank dieser Applikation können die Daten aus der Access-Datenbank aufgrund des gleichen Datenmodells übertragen werden. Nach Projektabschluss liegen die Bodendaten aus Feld und Labor im Soildat vor und können über eine Schnittstelle ins Nationales Bodeninformationssystem (NABODAT) importiert werden.

Die Datenbank basiert auf einer dreistufigen Hierarchie. Auf der ersten Stufe wird ein Standort eingetragen, also ein Ort im Raum mit bestimmten Koordinaten. Für jeden Standort werden Beobachtungen erfasst, also Punktaufnahmen z. B. Bohrungen. Für jede Punktaufnahme werden dann die Bodenhorizonte einzeln aufgenommen. Mit der digitalen Erfassung aller erhobenen Standorte sowie aller Horizonte können die im Feld aufgenommenen Daten möglichst roh abgespeichert werden und es ist kein Zusammenfassen zu Klassen notwendig. Spätere Anwendungen können die Feldaufnahmen in ihrer Rohform verwenden.

## 4.3 Beprobungsplan

### 4.3.1 Zu beprobende Fläche

Zur Festlegung der zu beprobenden Fläche (Fläche in der Punktaufnahmen gemacht werden können) wurden aus der Zielfläche die unterirdischen Leitungsbauten sowie belastete Standorte ausgeschnitten. Um Drainagen und Telefonleitungen wurde ein Sicherheitsabstand (Puffer-Distanz) von 3 m und um die restlichen Leitungen ein Puffer von 10 m gesetzt. In diesem Bereich wurden keine Punktaufnahmen geplant. Zum einen um eine Gefährdung der Infrastrukturen und der Kartierperson zu vermeiden und zum anderen um weniger Standorte zu beproben deren Aufbau durch Grabungsarbeiten anthropogen verändert sind.

### 4.3.2 Bohrungsstandorte

Um die Variation im Perimeter zu erfassen, musste sichergestellt werden, dass sämtlichen relevanten Elemente mit einer genügenden Dichte angesprochen werden. Um die Auswahl der Bohrungsstandorte festzulegen, wurden verschiedene Vorgehen genutzt. In einem Ersten Schritt wurde jedes Polygon der BoKa 72/76 in seinem Schwerpunkt angesprochen, dadurch wurden Punktdaten aus Bohrungen an 230 Standorten gesammelt.

Um ein besseres Verständnis für die Abfolgen der Bodentypen zu entwickeln, wurden danach vier Transektbeprobungen (Beprobung entlang einer möglichst geraden Linie) durchgeführt. Auf einer Linie wurden nah voneinander Bohrungen aufgenommen, um Grenzen und Übergänge in den Bodeneigenschaften zu finden. Die Standorte wurden aufgrund der ersten 230 Bohrungen und der Konzeptkarte so gewählt, dass die wichtigsten Übergänge von organischen zu mineralischen Böden abgebildet werden konnten. Folgende Transekte wurden angelegt:

- Gebiet Kellermad-Müligüetli repräsentativ für die natürliche Überschüttungen des organischen Bodens mit Sedimenten aus den Appenzeller Alpen durch die Rietaach,
- Edenlehn-Bannriet, repräsentativ für die langsam auslaufende Überdeckung mit Sedimenten aus den Appenzeller Alpen durch den breiten Schwemmfächer zwischen Altstätten und Oberriet,
- Bagersee-Bannriet, repräsentativ für den abrupten Übergang von organischen Böden zu alluvialem Schluff und Sand gegen die Bänke des Rheins hin,
- Krumensee-Widnau, repräsentativ für den langsamen Übergang von Murde zu alluvialen Rheinsedimenten im Norden und Osten.

Zwei Gebiete zwischen Marbach und Altstätten mit jeweils 100 ha LN respektive ein Gebiet im Krumensee mit 400 ha wurden mit einem stratifizierten Zufallsstichprobenplan beprobt. Hier wurden die Standorte der Bohrungspunkte mittels einer geostatistischen Analyse festgelegt. Die Polygone der Konzeptkarte wurden aufgrund des Höhenmodells und der daraus abgeleiteten Karten weiter unterteilt. So entstanden Flächen, sogenannte Straten, von denen angenommen wird, dass die darin enthaltenen Böden ungefähr gleiche Eigenschaften aufweisen. Für jede Fläche wurde festgelegt, wie dicht diese beprobt werden soll. Im Normalfall wurde in dieser Phase eine Bohrung pro Hektar gewählt. Je nach erwarteter Variation und organischem Anteil wurde dieser Wert nach oben oder unten angepasst. So entstanden Pläne für die gewählten Teile des Perimeters, die zeigen wo Punktaufnahmen gemacht werden sollen und für welche Fläche eine solche Aufnahme repräsentativ sein sollte.

Die Festsetzung der Standorte für Bohrungen im restlichen Gebiet erfolgte gutachtlich aufgrund der gesammelten Gebietskenntnisse und vorhandenen Geodaten. Je nach Datenlage, Varianz der Bodeneigenschaften und Relief wurde nach Raster oder nach Grenzlinien und Extrema kartiert.

Im Laufe des Projektes wurden fortlaufend Karten modelliert, welche für ein regelmässiges Raster für jede Zielgrösse den Wert zeigen, welcher aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Felderhebungen am wahrscheinlichsten ist. Zusätzlich können für jede Zielgrösse Karten der Modellunsicherheit ausgegeben werden (Meinshausen 2006). Die Modelle können je nach Stärke der Beziehung zwischen Zielgrösse und der erklärenden Grössen, die erklärenden Grössen unterschiedliche kombinieren und gewichten und damit sehr unterschiedliche Ergebnisse errechnen. Die Modellunsicherheit für jeden Pixel gibt an, welcher Wertebereich mit gewisser Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist (Konfidenzintervall der Vorhersage). Im Projekt wurde mit einem Konfidenzniveau von 80 % gearbeitet (untere Grenze: mindestens zu erwartender Wert, 10 %-Quantil; obere Grenze maximal zu erwartender Wert, 90 %-Quantil). Eine Karte zeigt beispielsweise für die OS im Oberboden, dass ein Pixel mit 80 % Sicherheit einen OS-Gehalt zwischen 5 und 9 % OS hat. Aus der Spannweite des Intervalls kann nun geschlossen werden, dass am besagten Pixel die Vorhersagen des OS-Gehalts im Oberboden um 4 Prozentpunkte schwanken.

Um die Modell-Unsicherheiten zu beurteilen, wurden drei wichtige Zielgrößen gewählt: OS im Oberboden, Obergrenze des r-Horizontes und Tongehalt in den ersten 90 cm. Die Größen wurden jeweils normalisiert, sprich der kleinste Wert in 0 und der höchste Wert in 1 umgewandelt, und dann miteinander addiert. Daraus entstand eine Karte eines Index für die Unsicherheit der Vorhersagen, durch die Gebiete ausgeschieden werden konnten, in denen die Modelle Vorhersagen der Zielgrößen nicht sicher berechnen konnten. Diese Gebiete wurden in der weiteren Feldkampagne entsprechend dichter beprobt. Einige Gebiete wurden durch dieses Vorgehen bis zu vier Mal besucht, um die Punktdichte zu erhöhen und die Modell-Unsicherheit zu senken, andere wurden nur einmal besucht.

Für die kritische Überprüfung der Vorhersage-Karten wurde ebenfalls ein stratifizierter Zufallsstichprobenplan verwendet. Hier wurde jedoch nicht aufgrund des Höhenmodells und der Konzeptkarte stratifiziert, sondern aufgrund der BoKa 72/76. Diese Bohrungen wurden in keinem Rechen-Schritt der Kartenerstellung verwendet.

### 4.3.3 Profilgrubenwahl

Nicht alle Bodeneigenschaften sind in einer Bohrung klar ersichtlich, denn diese liefert jeweils nur ein Schnitt von wenigen cm Durchmesser durch den Boden. Es ist deshalb notwendig, dass grössere Aufschlüsse des Bodens beobachtet werden, dies wird in einer Bodenkartierung anhand von Profilgruben gemacht.

Die Profilgrubenstandorte wurden mittels einer statistischen Gruppierung (Clustering) ermittelt. Eine solche Analyse zeigt auf ob Gemeinsamkeiten zwischen Punktdaten bestehen und ermöglicht diese zu gruppieren. Um Gemeinsamkeiten zu finden wurden einzelne Eigenschaften gewählt, die eine starke Aussagerichtung haben. Zum Beispiel hilft die Tiefe des ersten organischen Horizontes zur Unterscheidung von mineralischen und verschieden mächtig überdeckten organischen Böden. Durch die richtige Kombination verschiedener Eigenschaften liessen sich die vorhandenen Punktdaten so zu künstlichen Bodenfamilien kombinieren. Sie zeigen Böden an, die sich in den Hauptkomponenten ähneln also gemeinsame Eigenschaften haben, die sie signifikant von allen anderen Punktdaten abheben. Diese künstlichen Bodenfamilien unterscheiden sich insofern von herkömmlichen Bodentypen, als dass die Abgrenzung automatisiert und unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen verschiedener Eigenschaften geschieht.

Es wurden 15 Bodenfamilien gebildet, für jede Bodenfamilie wurden die Mittelwerte der Bodenkenngrössen bestimmt und die beiden Bohr-Standorte mit Werten am nächsten zu diesen Mittelwerten für Bodenprofilgruben ausgewählt. Dieses Vorgehen wurde im Verlauf des Projektes mehrmals wiederholt, wenn neue Punktdaten zur Verfügung standen. So wurden zusätzliche und immer ausgeprägtere Bodenfamilien errechnet.

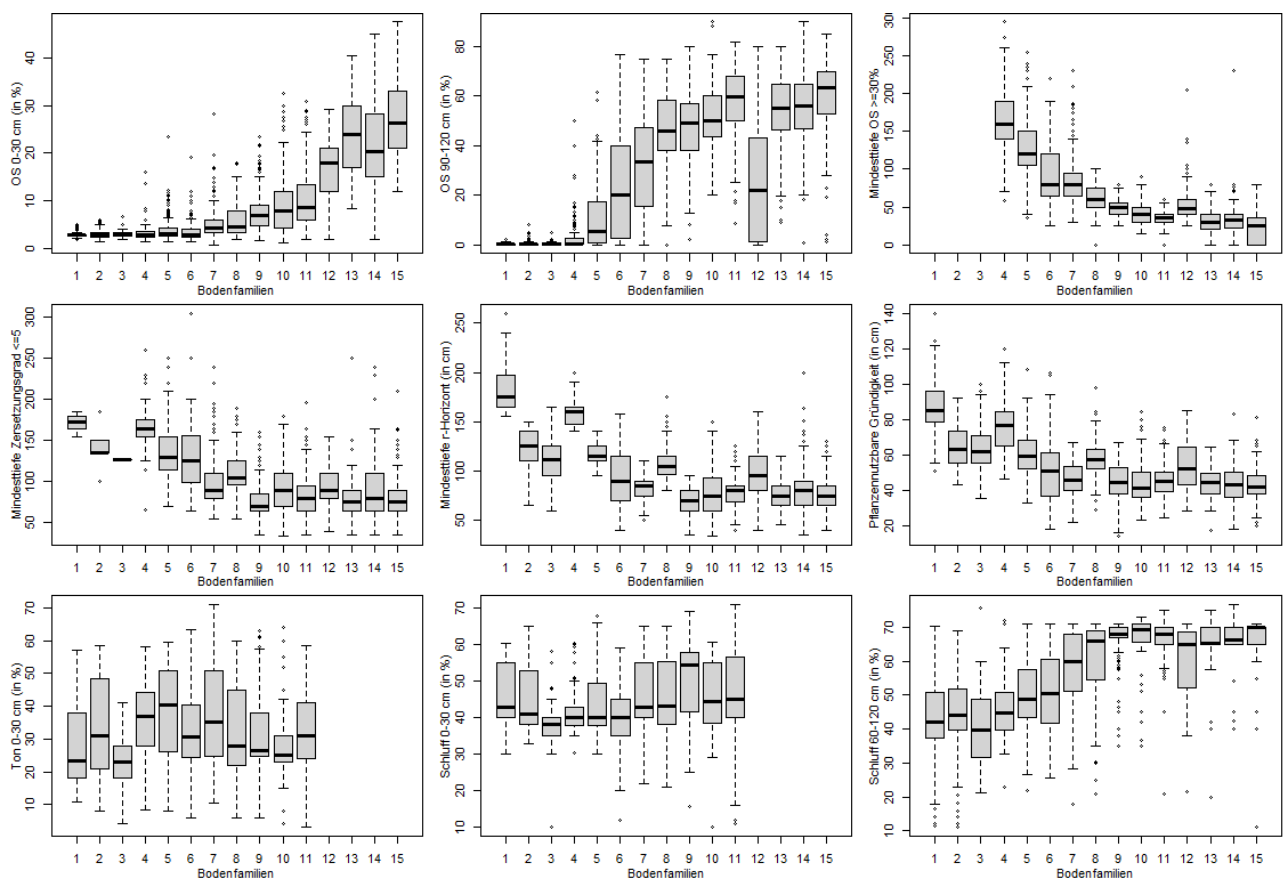


Abbildung 5: Neun Bodeneigenschaften und ihre Verteilung in den 15 gebildeten Bodenfamilien. Bei den ersten drei Bodenfamilien handelt es sich um mineralische Böden, die keine organischen Schichten enthalten. Sie unterscheiden sich in ihrer Feinerdekorung und Gründigkeit. Die Bodenfamilie 4 zeigt Böden mit vereinzelt organischen Schichten. In Bodenfamilien 5 bis 10 gruppieren sich verschieden mächtig mineralisch überdeckte organische Böden. Bodenfamilie 11 enthält organische Böden mit stark mineralisierten Oberböden. Die Bodenfamilie 12 zeigt eher flachgründige organische Böden. Die Bodenfamilien 13 bis 15 enthalten sehr organische Böden mit unterschiedlich Mächtigen alluvialen Zwischenschichten.

#### 4.4 Übersicht aller Aufnahmen

Das iterative Vorgehen führte insgesamt zu bodenkundlichen Aufnahmen an 2'772 Standorten. Davon entfallen 46 auf Profilgruben und 810 auf maschinelle Bohrungen, wovon an 150 Standorten die Bohrung nur mittels Fotos dokumentiert wurde. Die restlichen Aufnahmen wurden mit Handbohrgeräten gestochen. Die Beprobungsdichte lag in Gebieten mit einer hohen räumlichen Variation der Bodeneigenschaften oder erhöhten organischen Gehalten bei etwa einer Bohrung pro Hektar, ansonsten bei etwa 0.4 Bohrungen/ha. Pro Bohrung wurden durchschnittlich 7 Bodenhorizonte aufgenommen, insgesamt wurden 20'251 Bodenhorizonte aufgenommen. Die Profilgrubendichte konnte im Vergleich zu klassischen Bodenkartierungen tief gehalten werden, da die Daten jeder Bohrung erfasst und gespeichert wurden und im Perimeter so gut wie kein Skelett vorhanden ist, dass Bohrungen in ihrer Tiefe behindern würde.

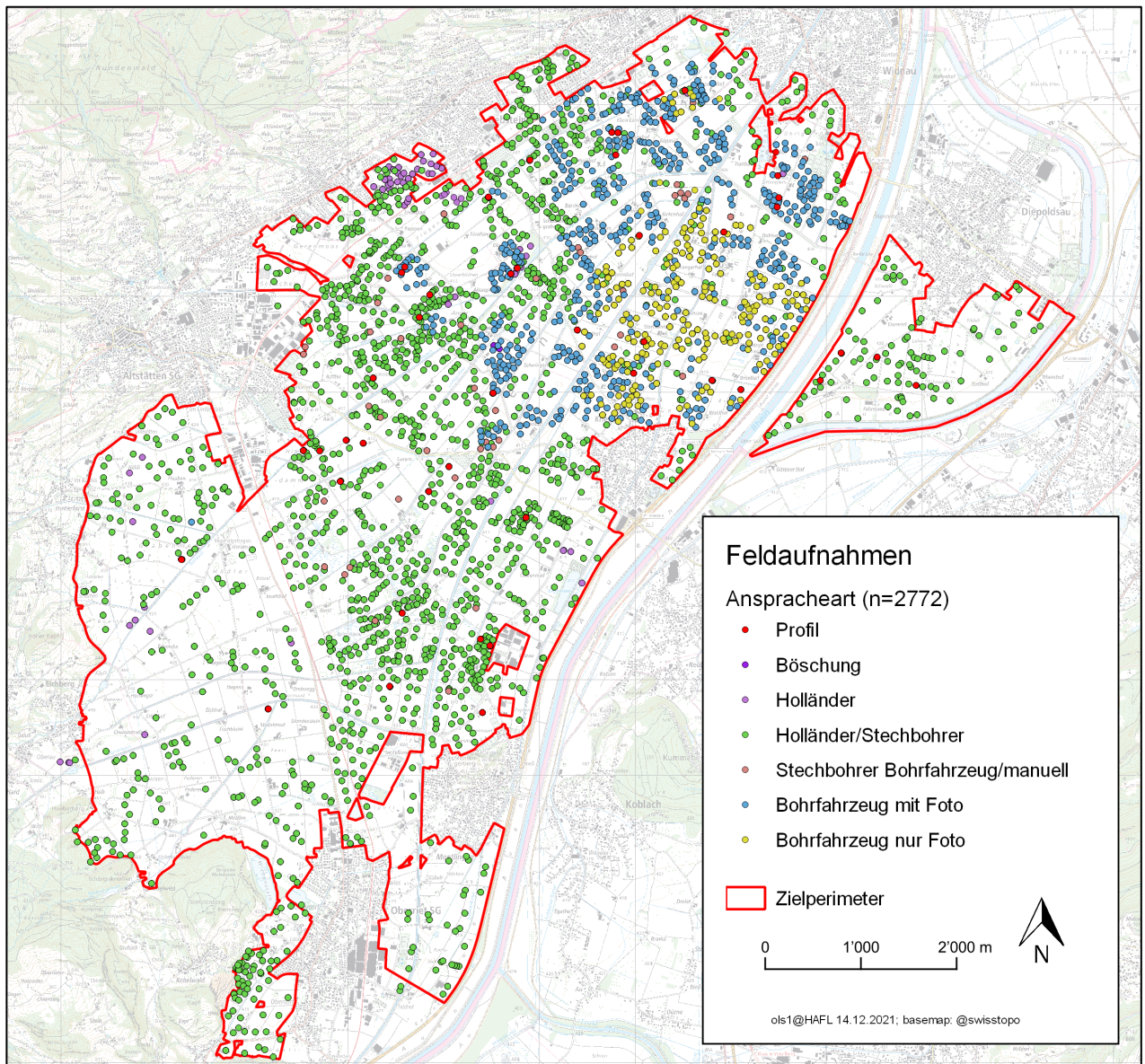


Abbildung 6: Übersicht aller Bohrungen des Projektes mit Angabe des Bohrungstyps.



## 4.5 Bohrungen

Jede Bohrung und deren Horizonte mit ihren Eigenschaften wurden erfasst. Die alluviale Ablagerung der Böden führte zu einer feinen Abfolge von Schichten von teilweise nur wenigen Zentimetern. Es wurden nur Bodenhorizonte und Schichten aufgenommen deren Mächtigkeit mindestens 5 cm beträgt. In organischen und organomineralischen Horizonten sollte bis mindestens 2 m gebohrt werden, in mineralischen Böden bis mindestens 5 cm unter die Obergrenze des r-Horizontes. Die meisten aufgenommenen Parameter wurden der FAL24+ entnommen, ergänzt durch einige zusätzlichen Parameter. Die Angaben erfolgen wo möglich in numerischen und nicht in Klassen.

Folgende Parameter wurden jeweils pro Punktaufnahme aufgenommen:

- Koordinaten
- Landschaftselement
- Kleinrelief
- Geländeform
- Vegetation
- Gesamt-PNG
- R-, G- und I-Untertypen

Folgende Parameter wurden jeweils pro Horizont aufgenommen:

- Ausgangsmaterial
- Kalkgehalt in 5 Klassen
- OS in %
- Zersetzungsgrad in 10 Klassen\*
- Technogenes Substrat\*
- Ton in %
- Schluff in %
- Kies in %
- Feuchtigkeit in 4 Klassen\*
- PNG-Faktor
- Zugehörigkeit zu Oberboden, Unterboden oder Untergrund\*
- Horizontbezeichnung inklusive Kleinbuchstaben
- Torfart\*

\*Ergänzungen zu FAL24+

### 4.5.1 Handbohrungen

Bei Bohrungen von Hand wurde im Oberboden jeweils ein Holländerbohrer verwendet. In mineralischen Böden wurde in gg-Horizonten unterhalb von verdichteten Horizonten anschliessend der Stechbohrer eingesetzt. In organischen Horizonten konnte der Stechbohrer meist bereits unter dem Oberboden eingesetzt werden.



Abbildung 7: Handbohrer. Von oben nach unten. Holländerbohrer, Verlängerung, Stechbohrergriff, Stechbohrer.

#### 4.5.2 Maschinelle Bohrungen

Zur effizienten Beprobung wurde ein Bohrgerät eingesetzt. Dieses wurde von der HAFL mit Partnern entwickelt, um speditiv Bohrungen für die Generierung von Bodeninformation stechen zu können. Auf einem Anhänger ist eine Wintex MCL3 aufgebaut, dabei handelt es sich um einen hydraulischen Bodenprobenstecher mit einem 2 m langen Bohrstock. Der Anhänger wird bei der Feldarbeit von einem Traktor gezogen. Der Bohrstock wird mit einem Druck von 120 bar über einen Schlagkopf in den Boden gehämmert. Am Ende des Schlagvorganges wird die Probe durch vertikales Drehen um die Achse des Bohrstockes vom Boden abgeschnitten und der Bohrstock über ein Kettengetriebe aus dem Boden entnommen. Anschliessend wird das Bohrgestänge horizontal auf den Anhänger abgelegt. In dieser Position wird der Bohrstock bodenkundlich angesprochen und von der parallel zum Bohrgestänge auf einer Schiene angebrachten Kamera erfasst.

Die Bohrkadenz wurde mit diesem Vorgehen stark erhöht, eine Person konnte nun in einer Arbeitswoche über 150 Punktaufnahmen im Feld generieren. Durch die grosse Schlagkraft und die grösstenteils skelettfreien Böden konnten im Perimeter fast bei allen Einstichen bis 2 m Tiefe kontinuierliche Bohrkernentnommen werden. Einzig in sehr trockenen Oberbodenhorizonten zerbröselte das Bodensubstrat teilweise und verblieb nicht im Bohrstock. Auch bei Böden mit über 55 % Ton gelangte der Bodenprobenstecher im zweiten m an seine Grenzen.



Abbildung 8: Bohrgerät mit aufgerichtetem Bohrgestänge und eingehängter 2 m Bohrstock. In der Mitte des Anhängers ist die parallel dazu verlaufende Schiene zu sehen, auf dieser fährt die metallene Kamerabox den abgelegten Bohrstock ab. Rechts die Steuerung der Hydraulik das Stromaggregat.

Pro Bohrung werden je 20 Nahinfrarot- respektive RGB-Bilder aufgenommen. Die Steuerung, Auslösung und Speicherung erfolgt über ein eigens dafür entwickeltes Interface auf einem Feldlaptop. In den 150 Bohrungen, die nur photographisch und nicht bodenkundlich angesprochen wurden, wurde die Horizontierung mittels maschinellen Lernens automatisiert vorgenommen. In weiteren Bohrungen wurde die Horizontierung bodenkundlich nur zusammengefasst angesprochen und mittels der automatisierten Horizontzuweisung die Aufteilung verfeinert. Der Ablauf dieses Prozesses ist in Anhang I.3 aufgeführt.

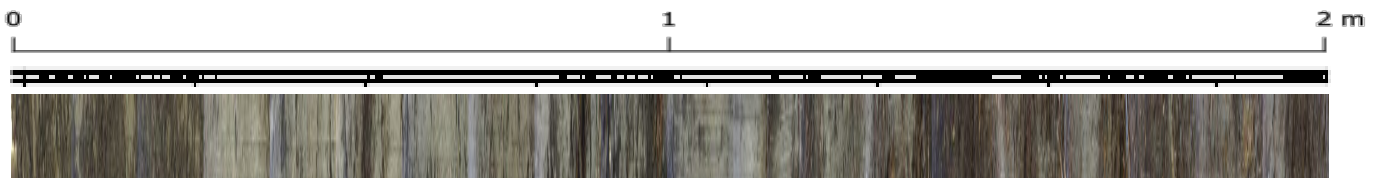


Abbildung 9: Bildkomposit eines Bohrstockes aus dem Gebiet Krummensee zwischen Kriessern und Widnau. Die Terrainoberkante befindet sich an der linken Seite des Bohrstockes, das untere Ende liegt in einer Tiefe von 2 m. Gut sichtbar ist die feine Horizontierung aus grauem alluvialen Schluff und dunklen braunen bis schwarzen organischen Schichten. Eine bodenkundliche horizontweise Ansprache ist hier sehr aufwendig, selbst wenn man sich auf Horizonte mit einer Mächtigkeit von mindestens 5 cm beschränkt, verbleiben noch weit über 10 Horizonte. Über dem Bildkomposit ist das Resultat der durch maschinelles Lernen erzeugten automatisierten Horizontierung abgebildet. Die schwarzen Abschnitte zeigen organische Horizonte, die weissen zeigen mineralische Horizonte. Die feine Horizontierung wird erkannt und vereinfacht wiedergegeben.

## 4.6 Profilgruben

### 4.6.1 Profilgrubenübersicht

Insgesamt wurden 46 Profilgruben pedologisch angesprochen. Wovon 32 aus der statistischen Gruppierung hervorgingen. Die restlichen Profilgrubenstandorte wurden gutachtlich festgelegt. Mit den Profilgruben wurde die Variation der Bodeneigenschaften im Perimeter gut abgedeckt, denn in den Bohrungen kamen keine von den Profilgruben signifikant abweichenden Böden zutage.

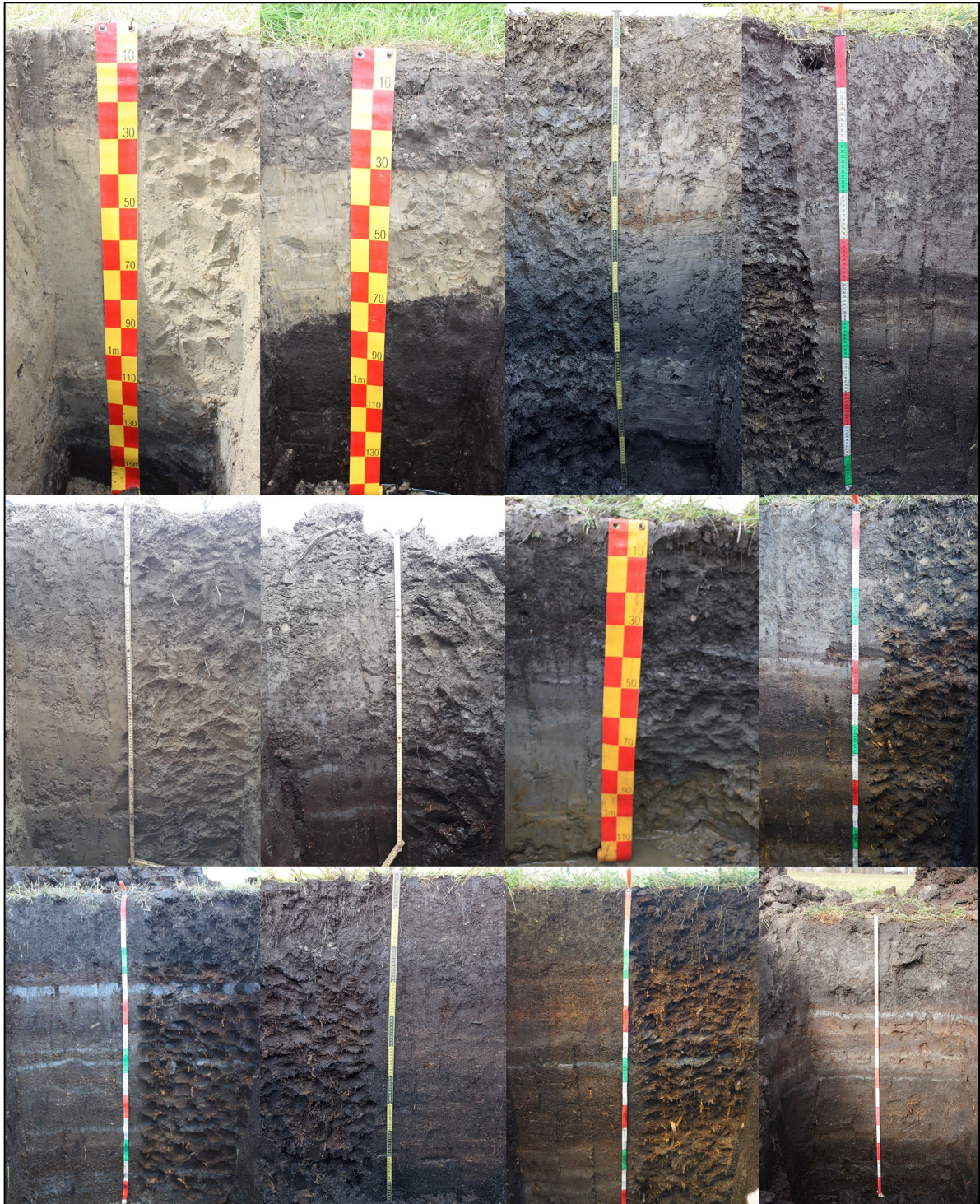


Abbildung 10: Auswahl einiger exemplarischer Profilgruben. Die obere Reihe zeigt von links: Eine mineralische Überdeckung von 120 cm im ehemaligen Lauf der Rietaach; eine geringmächtigere Überdeckung mit Tongehalten weit über 50 %; eine mächtige Überdeckung bestehend aus Wechsellagen von schluffigen Rheinsedimenten, anmoorigem Material und tonigen Sedimenten aus den Appenzeller Alpen; eine Überdeckung mit gräulichem schluffigen Rheinsediment. Die mittlere Reihe zeigt von links: Ein rein mineralisches Alluvium; eine anthropogene Überschüttung auf natürlicher alluvialer Überdeckung, einen flachtorfigen Boden, Torstichabraum auf organischem Boden. Die untere Reihe zeigt organische Böden mit verschieden stark ausgeprägten alluvialen Zwischenschichten.

#### 4.6.2 Profilgrubenansprache

Die Profilgruben wurden jeweils von mehreren Bodenkundlerinnen zusammen angesprochen, um eine genügend hohe Qualität zu gewährleisten. Durch Zusammenarbeit mit dem Projekt 'Revision der Bodenklassifikation und der Bodenkartieranleitung der Schweiz' (Rev. KLABS/KA) konnten führende Expertinnen aus der Schweiz und Deutschland bei den Profilansprachen beigezogen werden.

Pro Profilgrube wurden mindestens fünf Horizonte für Laboranalysen beprobt. Die Ansprache erfolgte nach demselben Prinzip wie bei den Bohrungen, es wurden jedoch einige zusätzliche Parameter erfasst.

Folgende Parameter wurden jeweils pro Profilgrube zusätzlich aufgenommen:

- Wasserhaushaltsgruppe
- Bodentyp
- Vollständige Untertypen
- NEK

Folgende Parameter wurden jeweils pro Horizont zusätzlich aufgenommen:

- Steine in %
- Gesteinstyp\*
- Porosität\*
- Gefügeform und Grösse
- Bewurzelung\*
- Wurmtätigkeit\*
- Ernterückstände
- Horizontübergänge\*
- Munsellfarbe der Matrix sowie der Flecken/Fasern

\*Diese Parameter werden in einer FAL24+-Kartierung in der Profilskizze dargestellt.

Folgende Parameter wurden für die Proben jeweils im Labor gemessen, vorausgesetzt die Substrateigenschaften lagen innerhalb des Toleranzbereichs der jeweiligen Analysemethoden. Ein genauerer Beschreibung der verwendeten Methoden findet sich in Abschnitt 5:

- Organische Substanz in %
- Tonanteil an der Feinerdekörnung in %
- Schluffanteil an der Feinerdekörnung in %
- Sandanteil an der Feinerdekörnung in %
- pH (CaCl<sub>2</sub>)

Folgende Parameter wurden bei einem Teil der Proben im Labor gemessen:

- Fein-/Grobschluff; Fein-/Mittel-/Grobsand in %
- Fasergehalt in %
- Pyrophosphatindex
- Eisengehalt in %
- Lagerungsdichte in g/cm<sup>3</sup>

#### 4.7 Konzeptkarte

Im Laufe des Projektes wurde laufend an einer Konzeptkarte gearbeitet. Zuerst wurden aufgrund der vorhandenen Geodaten Gebiete grob voneinander abgegrenzt in denen einheitliche Bodeneigenschaften zu erwarten sind. Weiter wurden Gebiete ausgeschieden, deren Eigenschaften unsicher oder sehr variabel sind. Aufgrund der Feldaufnahmen wurden diese Gebiete laufend verfeinert und weiter voneinander abgegrenzt. Am Ende liegen nun 120 einzelne Einheiten (Polygone) vor. Diese beinhalten einen Beschreibungstext, sowie die Attribute Feinerdekörnung, Wasserhaushalt und vorherrschende Bodenbildung. Diese Stratifizierung diente in einem ersten Schritt als Grundlage, um weitere Punktaufnahmen festzulegen und in einem zweiten Schritt als erklärende Grösse in der Modellierung. Eine solche Konzeptkarte ist sehr hilfreich um diffuse Grenzen und Vermutungen, die nicht genau auf einen Punkt quantifizierbar sind, in die Modellierung miteinzubringen.

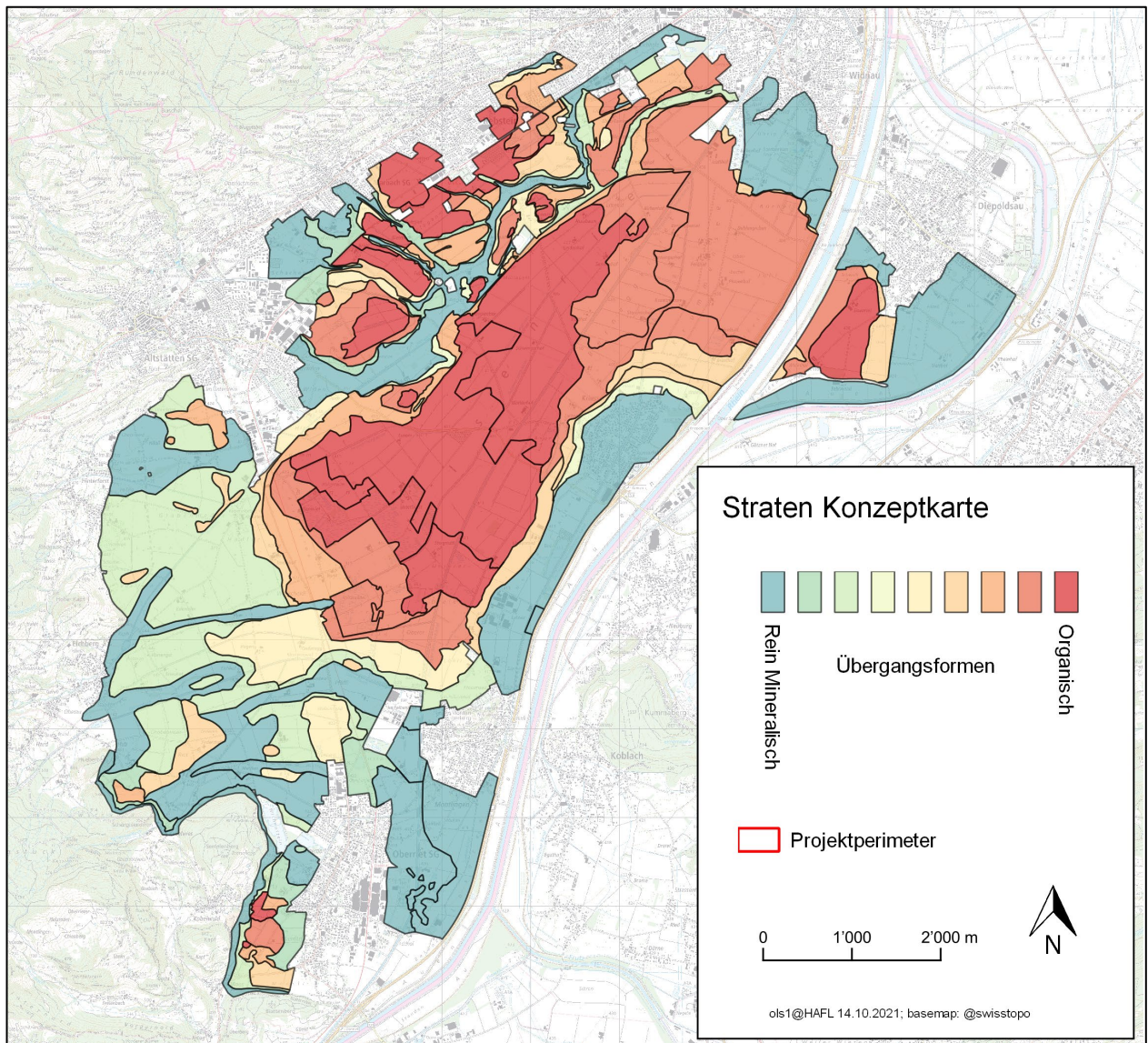


Abbildung 11: Übersicht der 120 Polygone der Konzeptkarte. Die einzelnen Polygone sind nach ihrer Bodenbildung gefärbt. In Rot rein organische Böden, in Gelb und Orange Böden, die sowohl aus alluvialem wie auch organischem Ausgangsmaterial bestehen. In Blau Böden ohne organisches Ausgangsmaterial. Gut sichtbar ist die feine Strukturierung im Gebiet der alten Rietaach, hier finden sich sehr diverse Bodeneigenschaften auf engem Raum. Gegen den Rhein hin werden die Polygone grösser, hier verlaufen Wechsel in den Bodeneigenschaften über weitere Distanzen.

## 5 Bodeneigenschaften

### 5.1 Ausgangsmaterial und Horizontierung

Das Ausgangsmaterial für die Böden im Perimeter stammt aus alluvialen Ablagerungen des Rheins und der Seitenbäche aus den Appenzeller Alpen, limnischen Sedimenten aus Hinterlandseen, Torfsubstraten sowie anthropogen eingebrachtem Material.

Um die Bodenbildungsprozesse nachvollziehen zu können und die Beprobung effizient gestalten zu können, ist es wichtig zu wissen wo welches Ausgangsmaterial vorhanden ist. In eindeutigen Fällen wie alluvial geschichteten Böden mit geringer OS oder dunklen faserigen Torfböden ist dies einfacher. Sind jedoch mehrere Ausgangsmaterialen übereinandergeschichtet oder gar ineinander gelagert wird die Beschreibung anspruchsvoller.

Im Perimeter finden sich gräuliche mineralisch erscheinende Böden mit OS Gehalten im Oberboden von 5 – 10 %. In tieferen Schichten sind sie jeweils durchsetzt mit abgestorbenen Pflanzenfasern und wechseln sich oft in feinen Bändern mit dunklen Torfschichten ab. Auch in den Böden mit dunklen Oberböden und OS-Gehalten über 20 % finden sich einzelne graue Bänder. Diese Wechsellagen widerspiegeln die frühere Ablagerungsdynamik aus Wechseln von torfbildenden Phasen und kurzen bis langandauernden Flachwasserperioden und Überflutungsereignissen. Für dieses Ausgangsmaterial wurde die Bezeichnung «Mudde» eingeführt. Diese stammt aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung Deutschlands und beschreibt organische oder mit OS durchsetzte limnische Sedimente (KA5 2005). Die Definition in der KA5 deckt sich nicht vollumfänglich mit der Ablagerungsgeschichte des Ausgangsmaterial im Perimeter, denn in Deutschland wird unter Mudde ein Ausgangsmaterial verstanden, in das die OS durch Sedimentation abgelagert wurde, im Perimeter hat sich die OS aber hauptsächlich durch an Ort gewachsene Pflanzen akkumuliert. Als synonym für Mudde wurde teils auch die Kombination von Alluvium und Torf verwendet (AL/TO oder TO/AL je nach dominantem Anteil).

Die Übergänge zwischen alluvialen und limnischen Ablagerungsprozessen waren in der natürlichen Dynamik des Rheins fließend, es kam wohl wiederholt zur Bildung von grossen stehenden seichten Gewässern. Was sich in Schichten mit mineralischer Matrix, die mit Schilf durchwachsen ist, widerspiegelt. Inwiefern in diesen Gewässern noch eine Fließbewegung stattfand, ist schwierig zu beurteilen. Das limnische und alluviale Ausgangsmaterial wurde in der Folge zum Ausgangsmaterial Alluvium (AL) zusammengefasst. Das in der FAL24+ verfügbare Ausgangsmaterial Seebodenlehm (SL) wurde nur für eindeutig limnische Sedimente vergeben.



Abbildung 12: Vergleich und Übergang von Mudde und Torf an drei verschiedenen Bodenprofilgruben. Links die typische Erscheinungsform der Mudde im Berneggerriet. In einer Matrix aus lehmigem Schluff finden sich unzersetzte Fasern von Schilf und Seggen. Die graue Matrix enthält knapp 5 % OS, die Fasern miteingerechnet knapp unter 30 % OS. In der Mitte sind Wechsellagen aus grauen Muddebändern und bräunlichen Torflagen abgebildet. Die Muddebänder sind jeweils wenige cm mächtig. Anderenorts finden sich auch Abfolgen mit Mächtigkeiten von jeweils einigen dm. Rechts ein Torf mit einem OS-Gehalt über 70 %. Die Matrix ist braun und verfärbt sich bei Kontakt mit Sauerstoff nach wenigen Minuten schwarz, die mineralische Komponente ist in der Farbe nicht mehr sichtbar.

In den flachtorfigen Gebieten um Balgach und beim Oberdorf in Oberriet finden sich auf wenigen ha auch geringmächtige Lagen von Seekreide.

Aus dem Ausgangsmaterial geht das Bodensubstrat hervor. Dabei handelt es sich um die Bestandteile des Bodens im gegenwärtigen Zustand. Hier hat sich gezeigt, dass ein Substrat, das aus Mudde hervorgegangen ist bis etwa 10 % OS in seinen Eigenschaften stark einem mineralischen Substrat ähnelt. So ist die mineralische Komponente stark dominant in der Gefügebildung und der Abbau der OS durch Mineralisierung meist nur noch sehr schwach. Ab 10 % OS zeigen sich bereits Ansätze von organischen Gefügeformen im Oberboden, auch ist die Farbe in Horizonten mit stark zersetzter OS deutlich schwärzlich. Das Substrat wurde in drei Klassen unterschieden:

0 - <10 % OS = mineralisch; 10 - < 30 % OS = organomineralisch; ≥30 % OS = organisch.

Die Horizontbezeichnung folgte der Einteilung des Ausgangsmaterial und der Substrate. Zwischen den in der FAL24+ definierten mineralischen C Horizonten (mineralischer Untergrund) und organischen T-Horizonten (Torfhorizont) wurden, mittels der Kombination von C und T sowie eckiger und geschwungener Klammern, abgestufte Übergangshorizonte eingeführt. So wurden z. B. reine T-Horizonte nur vergeben, wenn kein Graustich in der Matrix auszumachen war.

*Tabelle 1: Zur Beschreibung der Übergänge von Mudde zu Torf wurde die unterstehende Systematik für das Projekt entwickelt. Anhand von Farbe (Value, Chroma), OS-Gehalt und Gewicht können die Horizonte so eingeordnet werden. (TO=Torf; AL=Alluvium; SL=Seebodenlehm; MU=Mudde). Zu beachten ist, dass in der deutschschweizer Bodenkunde der zweite Horizontgrossbuchstabe dominant ist.*

Horizont-Symbol	Horizontbezeichnung	Ausgangsmaterial
<b>T</b>	≥30% OS; Value ≤3; Chroma ≤2 (Matrix); Lagerungsdichte ≤0.4 g/cm <sup>3</sup> (≤0.6 g/cm <sup>3</sup> für H10)	TO
<b>[C]T</b>	Graue Bänder (<5cm) in T-Horizont	TO
<b>CT</b>	≥30% OS; Value ≥3, Lagerungsdichte >0.4 g/cm <sup>3</sup>	AL/TO oder MU
<b>TC</b>	10 - 30% OS; (Value ≥4(5)), Torf in mineralischer Matrix	TO/AL oder MU
<b>(T)C</b>	5 - 10% OS, Torf in mineralischer Matrix	TO/AL oder MU
<b>[T]C</b>	<5% OS; T-Bänder (<5cm) oder unzersetzte OS in C-Horizont	AL oder SL
<b>C</b>	<5% OS, Keine unzersetzte OS; Lagerungsdichte >0.9 g/cm <sup>3</sup>	AL oder SL
<b>C oder B</b>	Abgebaute OS/Muscheln oder angeschwemmte OS	MU
<b>A</b>	<30% OS; OB mit mineralischem Gefüge,	MU
<b>A</b>	<30% OS; OB mit organischem Gefüge,	TO

## 5.2 Organische Substanz

### 5.2.1 Methode

Bei allen 306 entnommenen Proben wurde die organische Substanz bestimmt. Als Referenz wurde die Glühverlustmethode verwendet (DIN 18128). Bei Proben mit einem geschätzten Gehalt von weniger als 20 % OS wurde zusätzlich die FAL24-Standardmethode mit Kaliumdichromat (ELF 1996) verwendet, diese wurde im Verlauf des Projektes durch die Trockenveraschung ersetzt (DIN EN 15936; DIN 19539). Diese liefert verlässlichere Resultate für Proben mit höheren organischen Gehalten und ist einfacher und unter Einsatz weniger Chemikalien durchzuführen.

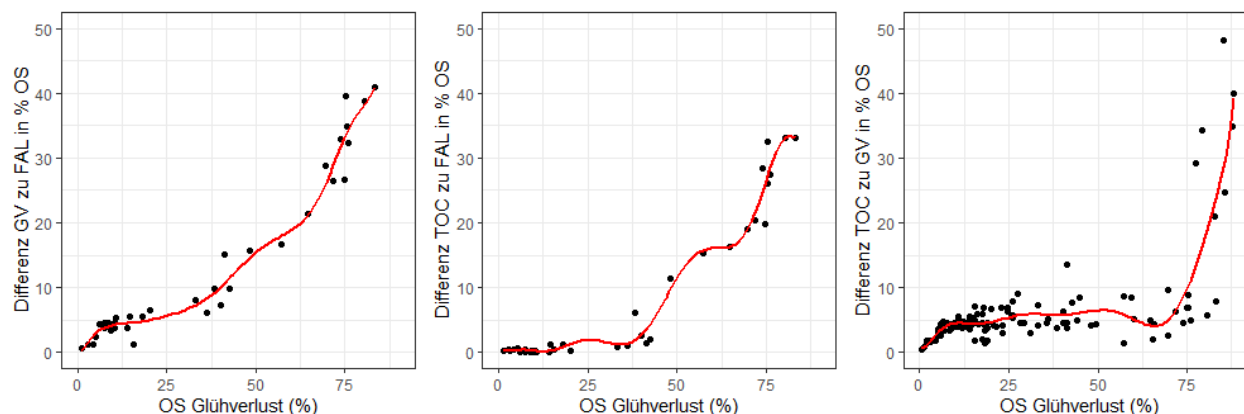


Abbildung 13: Abweichungen der Messwerte der Glühverlustmethode (GV) von der FAL24-Standardmethode (FAL), der Trockenveraschung (TOC) sowie der TOC- gegenüber der FAL-Methode auf der Y-Achse. Auf der X-Achse die Messwerte der OS durch die Glühverlustmethode abgebildet in Prozentpunkten.

GV und FAL zeigen durchs Band sehr hohe Abweichungen, schon bei Gehalten von wenigen Prozent sind die Unterschiede im Prozentbereich.

TOC und FAL sind bis etwa 15 % OS sehr ähnlich, bis 30 % OS liegen die Unterschiede jeweils bei wenigen Prozent. Darüber liefert die FAL-Methode massiv tiefere Ergebnisse.

TOC und GV zeigen bei geringen Gehalten eine Ähnliche Abweichung wie GV und FAL. Die Abweichung bleibt aber bis etwa 70 % OS stabil. Darüber zeigt die GV-Methode massiv höhere Werte.

Um über den gesamten Wertebereich verlässliche OS-Werte zu erhalten, wurde je nach OS-Gehalt eine andere Methode für die Auswertung verwendet. Bei tiefen Gehalten wurde von der Glühverlust-Methode Abstand genommen, da diese einen höheren Schwankungsbereich hat und in kalkhaltigen Böden, durch die Verbrennung von  $\text{CaCO}_3$ -Kohlenstoff, die OS überschätzt.

Tabelle 2: Übersicht der Wertebereiche der verwendeten Methoden:

OS Gehalt Glühverlust	Methode
0 - <10 %	Trockenveraschung oder wenn nicht vorhanden die FAL-24-Methode mit Umrechnungsfaktor 1.725
10 - < 25 %	Trockenveraschung oder wenn nicht vorhanden die FAL-24-Methode mit Umrechnungsfaktor 2
> 25 %	Mittelwert von Trockenveraschung mit Umrechnungsfaktor 2 und Glühverlust, oder Glühverlust *0.9

### 5.2.2 Ergebnisse

Die Oberböden im Perimeter zeigen nur in Ausnahmefällen über 30 % OS. Die dunklen Oberböden enthalten meist zwischen 20 und 30 % OS. In den gräulichen Muddeoberböden finden sich um 10 % OS. Die alluvialen Oberböden enthalten zwischen 3 und 10 % OS. Dunkle scheinbar rein organische Horizonte mit schwach zersetztem Torf beinhalten typischerweise 55 bis 75 % OS. Ab etwa 45 % OS ist von Auge keine Graufärbung durch mineralisches Material mehr erkennbar. Auch in mehreren m Tiefe finden sich in scheinbar rein mineralischen Horizonten oft noch einige Prozent OS, teils zersetzt in der Matrix, teils als einzelne Pflanzenfasern. Die für eine Klassierung als Moorboden notwendigen 85 % Rückstand nach Glühverlust wurden nur in 2 Fällen erreicht. Bei den vorliegenden organischen Böden handelt es sich demnach um Halbmoorböden. Zu beachten ist dabei, dass die Bezeichnung Halbmoor eine Eigenheit der FAL24+ ist und damit Flachmoor- oder Niedermoorböden gemeint sind. Es handelt sich dabei also um Moorböden im umgangssprachlichen Sinne.



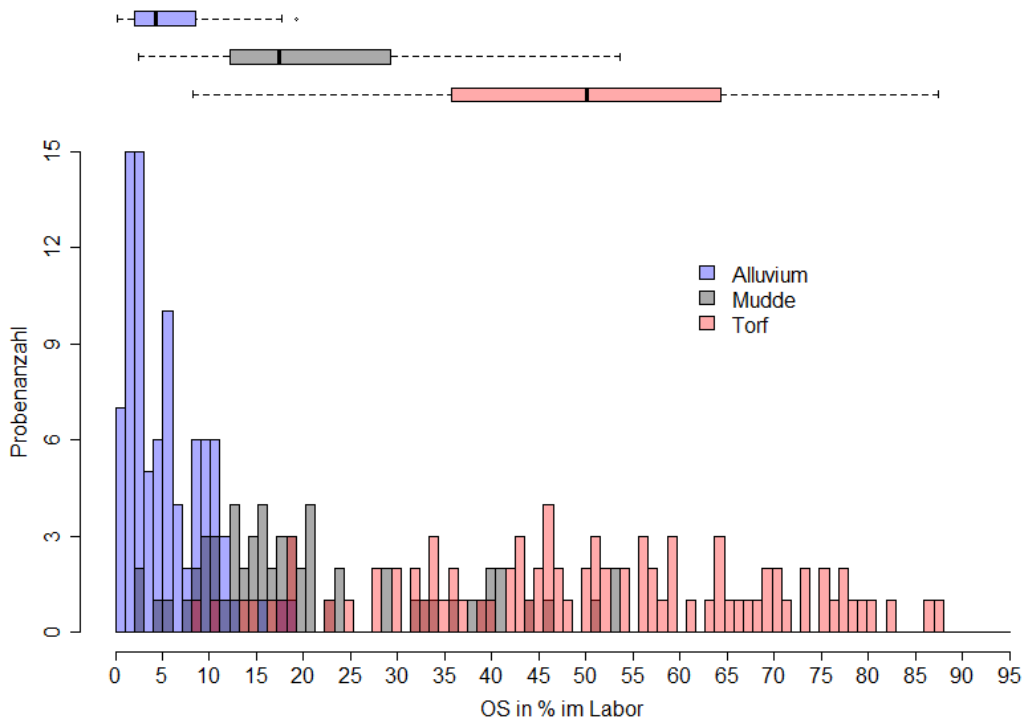


Abbildung 14: Histogramme und Boxplots der im Labor gemessenen (n = 306) OS-Gehalte.

Messwertstatistik:

Gesamt: Minimum 0.2; Median 15.9; Durchschnitt 25.6; Maximum 87.4

Alluvium: Minimum 0.2; Median 2.1; Durchschnitt 5.4; Maximum 19.2

Mudde: Minimum 2.4; Median 17.4; Durchschnitt 21.5; Maximum 53.6

Torf: Minimum 8.3; Median 50.0; Durchschnitt 49.85; Maximum 87.4

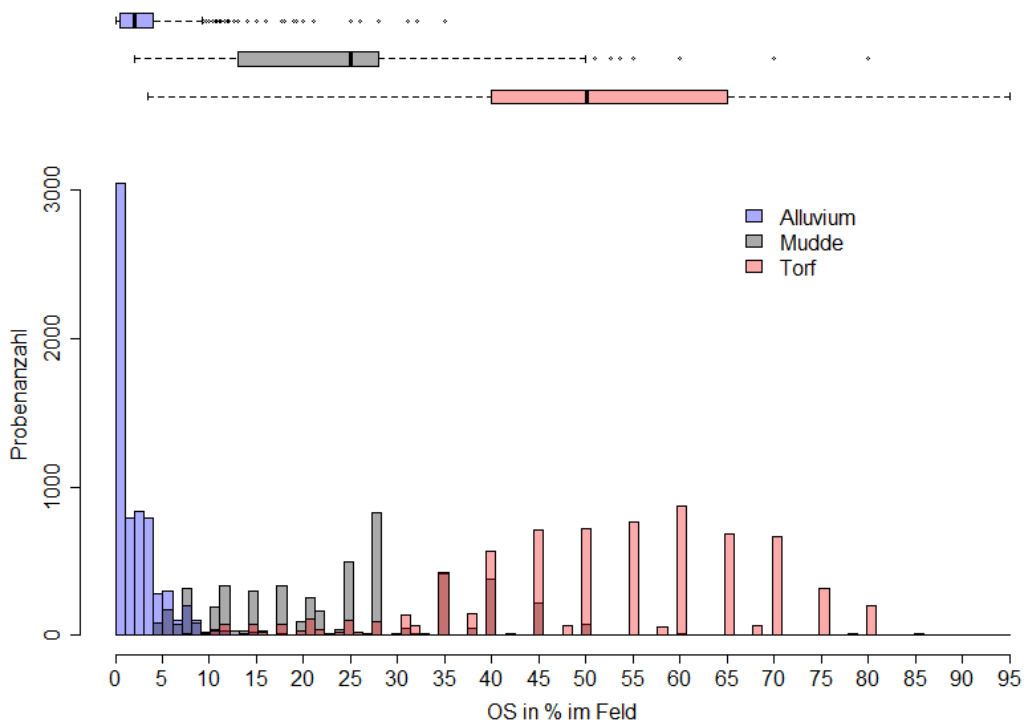


Abbildung 15: Histogramme und Boxplots der im Feld geschätzten OS-Gehalte (n = 20'239). Im Feld wurden öfters 0 % geschätzt, da es sich dabei um tieferliegende Schichten handelt, die nicht relevant für den gegenwärtigen Bodenzustand sind und deswegen nicht beprobt wurden. In Bereichen über 30% OS erfolgte die Schätzung meist in 5 % Schritten.

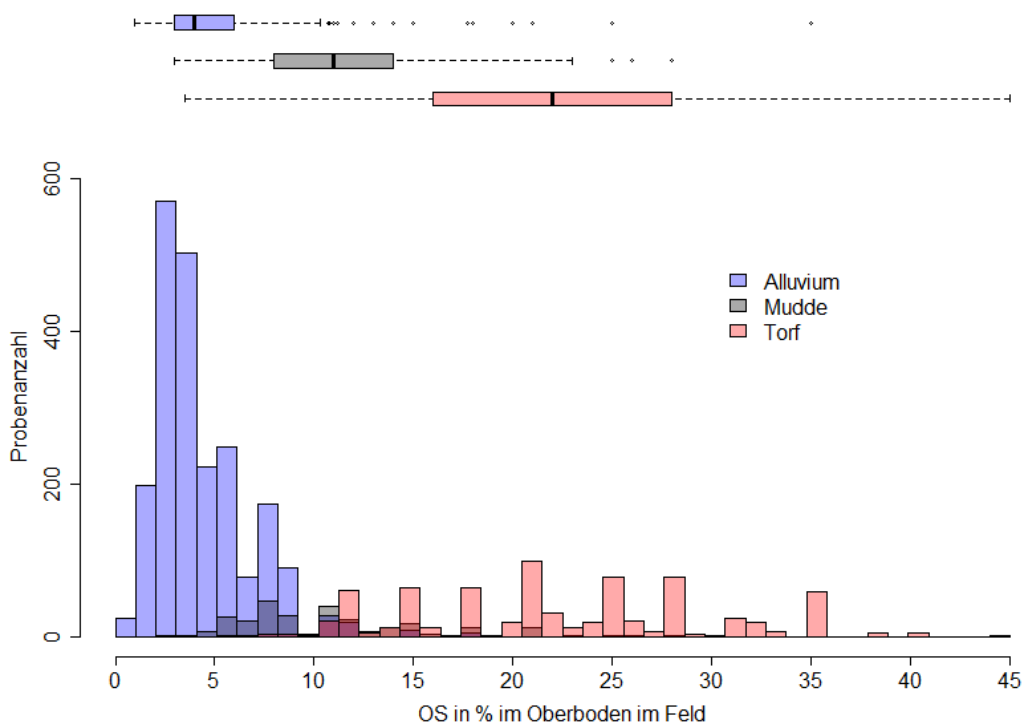
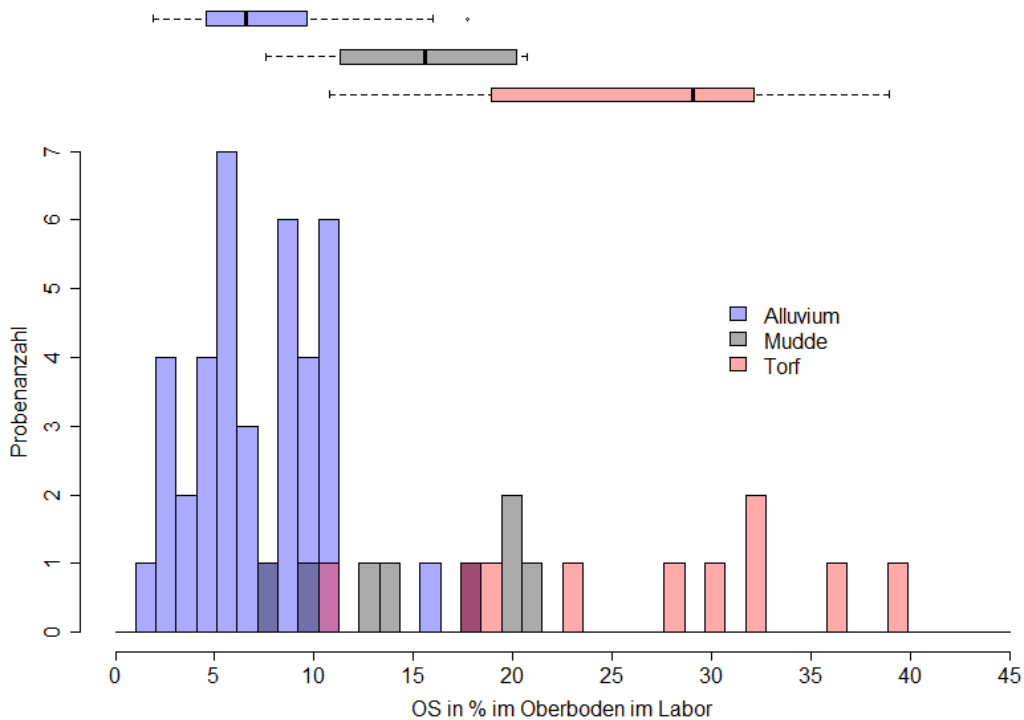
Messwertstatistik:

Gesamt: Minimum 0.0; Median 21.0; Durchschnitt 26.1; Maximum 95.0

Alluvium: Minimum 0.0; Median 2.0; Durchschnitt 2.5; Maximum 35.0

Mudde: Minimum 2.0; Median 25.0; Durchschnitt 23.55; Maximum 80.0

Torf: Minimum 3.5; Median 50.0; Durchschnitt 51.0; Maximum 95.0



## 5.3 Feinerdekörnung

### 5.3.1 Methode

Die Feinerdekörnung von 142 Proben wurde im Labor mittels der Agroscope Referenzmethode «Bestimmung der Körnung in der Feinerde» bestimmt (Agroscope 2020a). Dabei werden die Korngrößenfraktionen mittels Suspension bestimmt. Für Proben mit einem Zersetzungsgrad über 7 wurde unter 15 % OS die Feinerdekörnung ermittelt, bei weniger zersetzten Proben lag diese Grenze bei 25 %. Bei höheren OS-Gehalten hat die Labormethode eine zu hohe Schwankung gezeigt. Im Feld wurde die Feinerdekörnung mittels Fühlprobe ebenfalls bis unter 15 % OS immer bestimmt. Bei höheren OS-Gehalten wurde je nach Zersetzungsgrad bis zu einem OS-Gehalt von 45 % die Feinerdekörnung geschätzt, mit abnehmender Genauigkeit bei höheren Gehalten.

### 5.3.2 Ergebnisse

Im Perimeter kommen nur in wenigen Bereichen, die sonst in der Schweiz häufigen, Feinerdekörnungen mit etwa 15 bis 25 % Ton und 30 bis 40 % Schluff vor. Lehmige Böden sind somit stark untervertreten vielmehr dominieren sehr einseitige Korngrößenverteilungen. Dies ist typisch für alluvial oder limnisch abgelagerte Sedimente, die je nach Strömungsverhältnissen gleichförmige Körner sedimentieren. Als Extremwerte wurden jeweils 75 % Ton und 83 % Schluff gemessen, dies sind aussergewöhnlich hohe Werte. Gegen den Rhein hin tendieren die Sedimente in Richtung Schluff (Hauptbodenart A). Hier finden sich meist in etwas grösseren Tiefen auch sandige Schichten. In begrenztem Umfang treten die Sand-schichten teils bereits unter der Pflugsohle auf. Gegen die Talhänge hin dominiert der Ton (Hauptbodenart B), hier gibt es auch vereinzelt Abschnitte mit einer ausgeglichenen lehmigen Feinerdekörnung (Hauptbodenart C).

Die Hauptbodenart A findet sich oft in einer feinen Abfolge mit Torfhorizonten, und bildet die Matrix der Mudde im Perimeter. Die Hauptbodenarten B und C finden sich nur in Ausnahmefällen in Wechsel-lagen mit Torf oder als Ausgangsmaterial für Mudde. Vielmehr bilden sie dm bis einige m mächtige Auflagen auf dem Torf oder seltener auch die Unterlage von flachtorfigen Substraten.

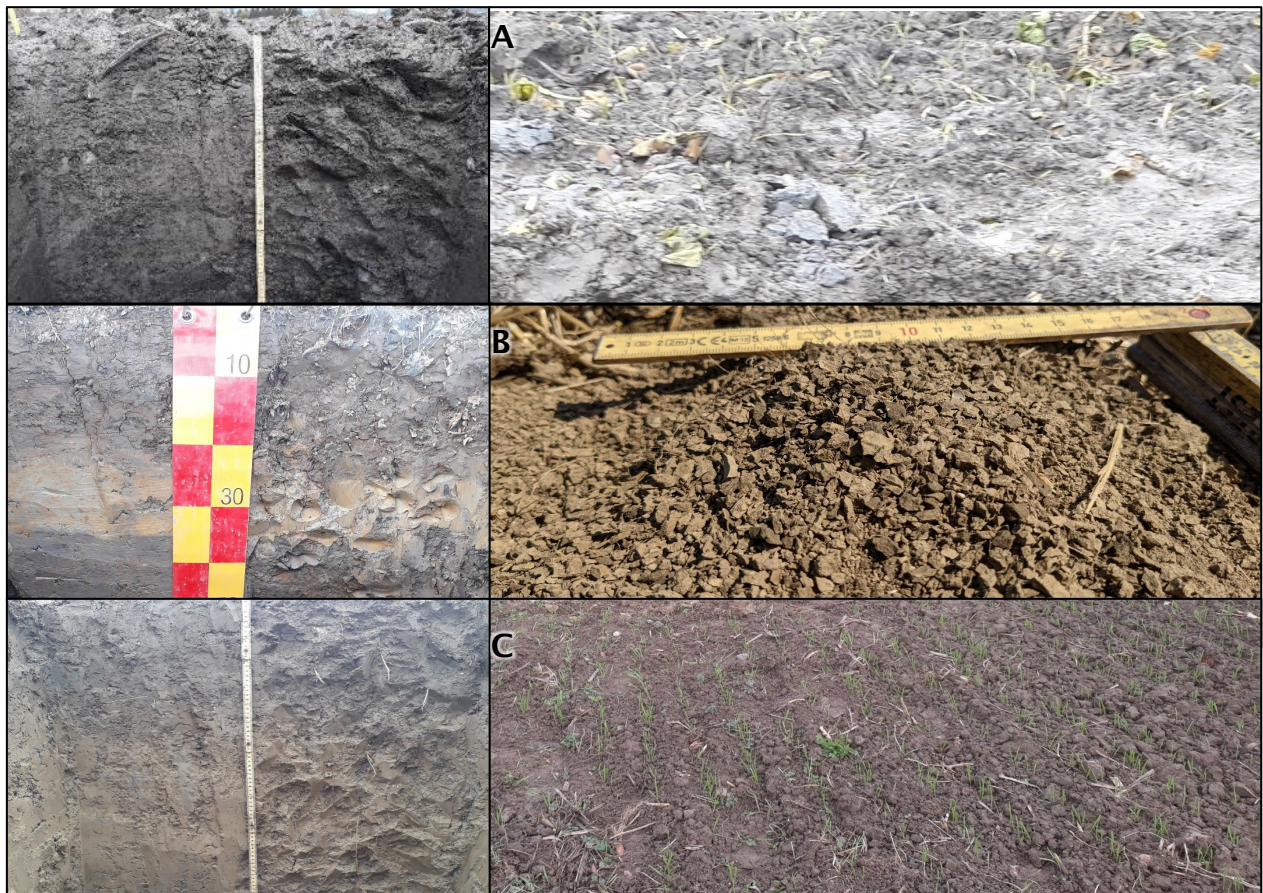


Abbildung 18: Die drei Hauptbodenarten im Perimeter. Profilansicht des Unterbodens links und Erscheinungsform des Oberbodens auf Äckern rechts. Rheinsediment (oben), erste Sedimentgruppe aus den Appenzeller Alpen (mitte), zweite Sedimentgruppe aus den Appenzeller Alpen (unten).

Auch innerhalb der Körnungsklassen ist die Korngrößenverteilung sehr einseitig. So wurden in 20 Proben die Anteile von Grob-, Mittel-, Feinsand sowie Grob- und Feinschluff ermittelt. Dabei zeigte sich, dass oft weit über 50 % der Körner in einer dieser Unterfraktionen liegen. Wenn man bedenkt, dass zum Beispiel Feinschluff nur den engen Bereich von Korngrößen von 0.002 bis 0.0063 mm umfasst, weist das auf ein sehr homogenes Substrat hin. Bei Proben mit weniger als 10 % Sand lag der Anteil der Ton- und Feinschluff-Fraktion bei über 85 %. Die Sedimente setzten sich demnach fast ausschliesslich aus einem engen Band von Korngrößen kleiner 0.002 mm zusammen. Eine Übersicht zu den Körnungsmessungen und -schätzungen sind in Anhang I.4 zu finden.

Wenn die Böden mit Hauptbodenart A geackert oder bei Nässe beweidet werden kann die Struktur des Bodens im Oberboden zerstört werden und es bleibt eine fragile Masse zurück. In sandigen Böden kann dies ebenfalls passieren, bei schluffigen Böden ist die strukturlose Masse im Oberboden jedoch feinkörniger und haftet zusammen. Durch Regentropfen können die verblieben Aggregate zerschlagen werden und es bildet sich ein undurchlässiger Film an der Bodenoberfläche. In der Folge Verschlämmen die Böden, dadurch wird die Infiltration von Wasser gehemmt und das Eindringen von Wurzeln erschwert. In der Folge bleibt bei grösseren Regenereignissen oft Wasser auf den Parzellen liegen.

Böden der Hauptbodenart B bilden bei Beweidung, Bearbeitung und Befahren unter nicht optimalen Bedingungen im Oberboden durch den hohen Tonanteil rasch wieder ein stabiles Gefüge. Hingegen tritt im Unterboden oft eine ausgeprägte Verdichtung ein, die auch Jahre nach einem Ereignis noch markante Staunässe verursacht.

Tabelle 3: Übersicht der Eigenschaften der drei Hauptbodenarten.

	<b>Hauptbodenarten A = Schluff</b>	<b>Hauptbodenarten B = Ton</b>	<b>Hauptbodenarten C = Lehm</b>
<b>Ton</b>	(10) 20 - 30 %	> 40 %	15 - 30 (40) %
<b>Schluff</b>	(50) 60 - 75 %	(20) 40 - 50 %	(20) 30 - 40 %
<b>Sand</b>	< 15 %	< 15 %	20 - 50 %
<b>Farbe</b>	Hellgrau	Hellbraun	Braun
<b>Kalkhaltig</b>	Oft, wenn keine organischen Lagen	Ja	Ja
<b>Schichtung</b>	Oft in feinen Wechsellagen mit organischen Schichten	Meist massive Schichten über einem Meter	Meist massive Schichten über mehrere Meter
<b>Schwundrisse</b>	Schwach	Sehr ausgeprägt	Schwach
<b>Boden-pH (CaCl<sub>2</sub>)</b>	Hoch (meist > 7), wenn keine organischen Lagen	Mittel (Meist 6.5 - 7)	Hoch (meist > 7)
<b>Skelett</b>	0 %	0%	0 - 20%
<b>Häufig dominierender Wasserhaushalt</b>	Grund- und teils Stauwasser	Stauwasser und teils Grundwasser	Normal durchlässig und teils Grundwasser
<b>Verschlämmung</b>	Sehr anfällig	anfällig	Wenig anfällig
<b>Verdichtung</b>	anfällig	Sehr anfällig	Wenig anfällig

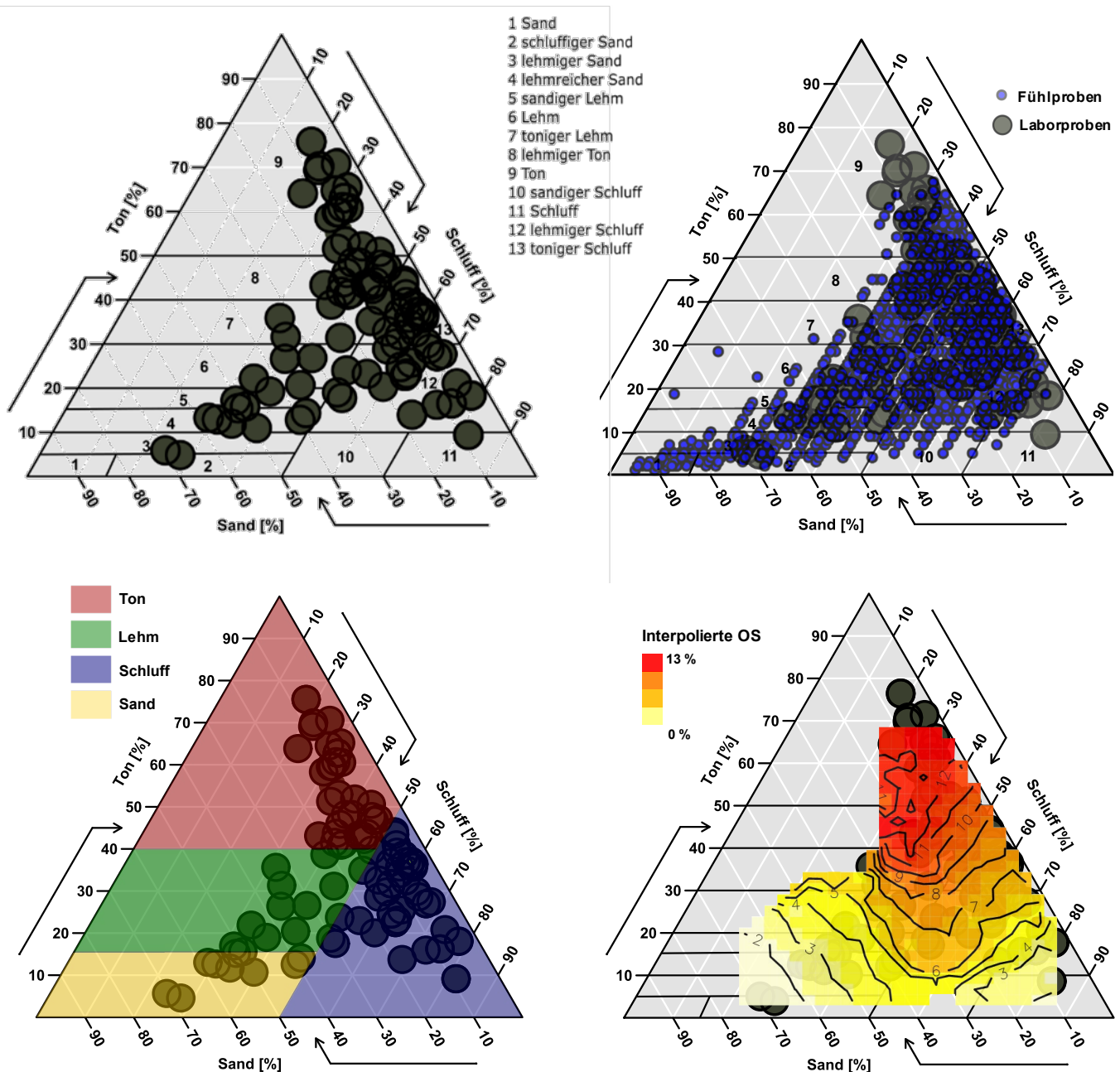


Abbildung 19: Oben links: Körnungsdreieck nach FAL 24+ mit den im Projekt gemessenen Feinerdekornungen. Es zeigt sich, dass ein Grossteil der Messungen Sandgehalte zwischen 0 und 20 % aufweist. Dabei handelt es sich um Sedimente mit sehr einseitiger Korngrössenverteilung. Je nach Herkunft tendieren sie eher ins schluffige oder tonige. Ein Schwerpunkt liegt in den Körnungsklasse 13 (toniger Schluff) und 12 (lehmiger Schluff), diese Proben bilden die Hauptbodenart A. Eine weitere Ballung von Messwerten liegt in den Körnungsklassen 8 (lehmiger Ton) und 9 (Ton), dabei handelt es sich um Sedimente der Rietaach und anderer Seitenbäche aus den Appenzeller Alpen, diese Proben bilden die Hauptbodenart B. Die Ballung der Messwerte in der Körnungsklasse 4 und 5 zeigt die Hauptbodenart C.

Oben rechts: Der Vergleich mit den Fühlproben zeigt eine gute Übereinstimmung, ausser bei Extremkörnungen. Es ist sehr schwer im Feld noch zwischen z. B. 65 und 75 % Ton zu unterscheiden.

Unten links: Gleiche Darstellung mit vereinfachten Körnungsklassen, gut sichtbar auch hier die Messwertelücke innerhalb der Lehme.

Unten rechts: Mittels inverser Distanzgewichtung ist der Gehalt an organischer Substanz der jeweiligen Körnungsprobe bis zu den Extremwerten interpoliert worden. Je roter desto höher der Gehalt an organischer Substanz einer typischen Probe mit dieser Feinerdekornung. Es zeigt sich sehr deutlich, dass der Tongehalt positiv mit der organischen Substanz korreliert ist.

## 5.4 Zersetzungsgrad

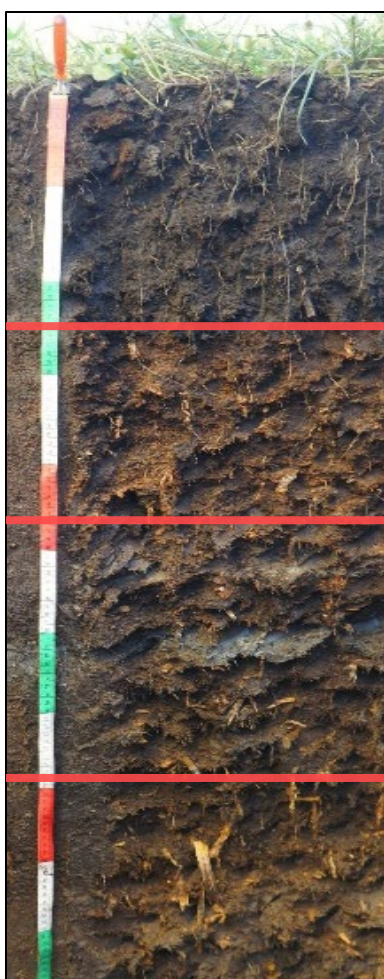
### 5.4.1 Bestimmung im Feld

Die OS in organischen Böden stammt in der Regel aus einer Anreicherung unter wassergesättigten Bedingungen an. Das heisst die abgestorbene OS wird nicht wie bei einem herkömmlichen Boden von Organismen zersetzt, sondern an Ort und Stelle konserviert. Je nach Ausprägung der Wassersättigung werden so Pflanzenreste in ihrer Gestalt mehr oder weniger deutlich erhalten. Werden solche Böden künstlich entwässert, beginnen sich diese Pflanzenreste zu zersetzen. Im Perimeter findet sich typischerweise vollständig zersetzte OS an der Oberfläche und eine abnehmende Zersetzung mit der Tiefe. Durch unterschiedliche Ablagerungsbedingungen können aber auch in grösseren Tiefen stark zersetzte Torfe auftreten. So bildet sich zum Beispiel Schilftorf auch unter Bedingungen, die einen Teil des Jahres zur Austrocknung neigen, dementsprechend sind in solchen Horizonten die Pflanzenfasern schon bei ihrer Ablagerung stärker zersetzt.

Der Zustand der Torfzersetzung kann mit Zersetzungsgraden beschrieben werden (Post und Granlund 1926). Dabei handelt es sich um eine Skala die vor bald hundert Jahren für die Torfgewinnung entwickelt wurde und weltweit in der Beschreibung von Torfen eingesetzt wird (KA5 2005; Baize und Girard 2009; United States Department of Agriculture 2014). Sie Skala besteht aus 10 Stufen, die von Substraten, die vollständig aus Pflanzenfasern bestehen (H1) bis zu vollständig zersetzten Substraten (H10) reicht.

Für die Bestimmung des Zersetzungsgrades wird eine eiergrosse Probe in der Faust zerquetscht und anhand der Farbe des herausgedrückten Bodenwassers, der Konsistenz des Rückstandes und des durch die Finger gedrückten Materials der Zersetzungsgrad bestimmt. Aufgrund des hohen mineralischen Anteils in den Muddeböden im Perimeter konnte die Methode oft so nicht angewandt werden. Die grauen Schluffteilchen färben das Bodenwasser heller und erhöhen die Breiartigkeit des Substrates. Deswegen wurde meist auf die alternative Ansprache über das Abschätzen des Anteiles an erkennbaren Pflanzenstrukturen ohne Quetschen gesetzt.

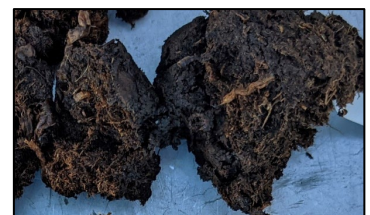
#### Typische Zersetzungsgrade stark organischer Böden im Isenriet.



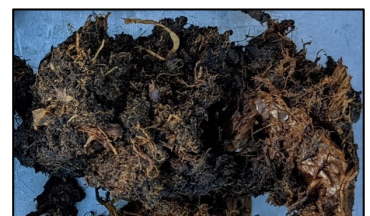
Vor vier Jahren letztmals gepflügter Oberboden. Keine Pflanzenstrukturen sichtbar → **Zersetzungsgrad 10**



Leicht verdichteter Unterboden. Wechselnasse Zone, Abbau der organischen Substanz dadurch gehemmt. Zu 66 % aus strukturierten Pflanzenresten bestehend → **Zersetzungsgrad 6**



Untergrund aus Abfolge von Mude und Torfschichten. Oft wassergesättigt, Abbau der organischen Substanz stark gehemmt. Nahezu ausschliesslich aus strukturierten Pflanzenresten. → **Zersetzungsgrad 5**



Dauerhaft gesättigter Bereich. Kein oder nur in Extremsituationen stattfindender Abbau organischer Substanz. Neben den mineralischen Bestandteilen nur strukturierte Pflanzenreste. → **Zersetzungsgrad 4**



## 5.4.2 Bestimmung im Labor

Da der Zersetzungsgrad eine zentrale Kenngrösse für die Charakterisierung eines organischen Bodenhorizonts darstellt, ist es wichtig diesen verlässlich quantifizieren zu können. Um die Feldschätzung der Zersetzungsgrade mit ihrer subjektiven Komponente durch reproduzierbare Werte zu untermauern, wird demnach eine Labormethode benötigt. Dazu wurde der Pyrophosphatindex (P-Index) verwendet (Kaila 1956). Dabei werden die Proben in Pyrophosphat gelöst und die Absorption des Filtrats bei einer Wellenlänge von 550 nm mittels Spektralphotometer bestimmt. Der Messwert multipliziert mit 100 ergibt dann den P-Index, der mit dem Zersetzungsgrad korreliert.

Das Prinzip beruht darauf, dass in unzersetztem Torf viel Fulvosäure vorhanden ist, die in Lösung gelb erscheint, in stärker zersetztem Torf dagegen dominieren Huminsäuren mit bräunlicher oder gar schwarzer Färbung.



Abbildung 20: Messkolben mit Filtrat. In den Filterpapieren befinden sich die in Pyrophosphat gelösten Proben. Gut erkennbar ist die unterschiedliche Färbung des Filtrats von gelb über braun bis schwarz.

Bei 116 Proben wurde der P-Index bestimmt. Es zeigte sich, dass bei Proben mit einem hohen mineralischen Anteil und einem gleichzeitig tiefen Zersetzungsgrad die Resultate schwer zu interpretieren sind. Das graue Substrat scheint die Ergebnisse stark zu verfälschen. Die Methode ist demnach nur geeignet für Proben mit einem OS-Gehalt über 45% bei Substraten mit einem Zersetzungsgrad  $\leq 7$ . Bei höheren Zersetzungsgraden liegt die Grenze etwa bei 20 % OS. 65 Proben erfüllten diese Bedingungen.

Ein P-Index von über 30 weist auf stark zersetzte Torfe (Zersetzungsgrad 8-10) hin. Die weniger zersetzten Torfe liessen sich im Projekt nicht weiter unterscheiden. Die in der Literatur teils aufgeführte Grenze von 15 für unzersetzte Torfe liess sich nicht reproduzieren. Insgesamt diente die Methode der Orientierung, durch die Wechsellagen und die für organische Böden eher tiefen OS-Gehalte im Perimeter, hat sie aber eine limitierte Aussagekraft.

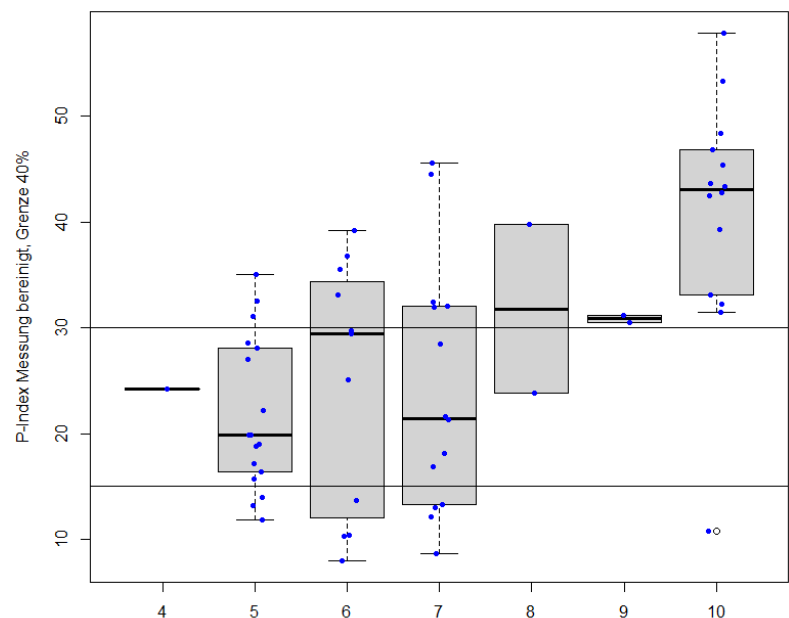


Abbildung 21: Vergleich der gemessenen P-Index-Werte mit den im Feld bestimmten Zersetzungsgraden. Die horizontalen Linien bei 30 und 15 zeigen die bei Kaila (1969) aufgeführten Grenzen von Stark und wenig zersetzten Torfen.

Gut sichtbar ist die Zweiteilung der Messwerte in eine Gruppe mit stark zersetzten Torfen (Zersetzungsgrad 9 und 10) und weniger zersetzten Torfen (Zersetzungsgrade 4 bis 7).

## 5.5 Torfarten

Die OS in Torf- und Muddehorizonten wurde nach ihrer Erscheinungsform unterschieden. In wenig zersetzten Substraten wurde die botanische Zusammensetzung angesprochen, in stärker zersetzten Substraten, wo Pflanzenbestandteile nicht mehr eindeutig identifiziert werden können, wurde die Art der Aggregation aufgenommen. Als Grundlage dafür diente eine DIN-ähnliche Norm aus der ehemaligen DDR (TGL 23 400/04 1985). Diese Unterscheidung war in der Kartierung wichtig, denn die verschiedenen Torfarten unterscheiden sich in ihrem Gehalt an OS und beeinflussen den Wasserhaushalt eines Bodens. So können horizontale Schilfstängel die vertikale Porosität fördern, bei Druck hingegen neigen sie zur Bildung eines plattigen Gefüges.



Tabelle 4: Übersicht der Torfartengruppen und Torfarten nach TGL. Die im Perimeter angesprochenen Symbole sind rot umrandet.

Torfartengruppe	Symbol	Torfart	Symbol
Holztorf	h-h	Kiefernbruchtorf (Pinus)	h-hk
		Birkenbruchtorf (Betula)	h-hi
		Erlenbruchtorf (Alnus)	h-he
		Reisertorf (Ericacea)	h-hr
Moostorf	h-m	Bleichmoostorf (Sphagnum)	h-mb
		Laubmosstorf (Bryales)	h-ml
Riedtorf	h-r	Wollgrastorf (Eriophorum)	h-rw
		Beisentorf (Scheuchzeria)	h-rb
		Grobseggentorf (Magnocarex)	h-rsg
		Feinseggentorf (Parvocarex)	h-rsf
		Salzwiesentorf (Juncus)	h-rf
		Schneidentorf (Cladium)	h-rc
		Schilftorf (Phragmites)	h-rp
Amorpher Torf	h-a	Stark zersetzter Torf	h-az
		Vererdeter Torf	h-av
		Vermulmter Torf	h-am
		Aggregierter Torf	h-aa



Abbildung 22: Beispiele verschiedener Torfarten. Oben: Vermulmter Torf. Dabei handelt es sich um einen Oberbodenhorizont, der durch Bewirtschaftung und Entwässerung stark degradiert ist. Das Substrat besteht aus einer feinkrümeligen Matrix mit Teilchen kleiner als 1 mm. Bei Austrocknung nehmen die Teilchen hydrophobe Eigenschaften an und neigen zu starker Staubbildung. Links Mitte: Vererdeter Torf. Oberbodenhorizont mit Krümelgefüge, ähnelt einer Gartenerde. Durch weniger Bodenbearbeitung und/oder einen höheren mineralischen Gehalt hat sich eine stabilere Struktur erhalten. Unten links: Schilftorf. In brauner stark abgebauter Matrix sind Schilfrhizome zu sehen. Unten rechts: Ausschnitt aus Bohrungen des Bohrfahrzeuges. Die braune Matrix A und E besteht aus Feinseggentorf, darin finden sich häufig Fieberkleesamen (F). Am Übergang zu einem Muddehorizont (D) findet sich Schilftorf, der in die darunterliegende Mudde hineinwächst. Häufig ist Feinseggentorf von Grobseggentorf (B) durchsetzt.



## 5.6 Gefüge

Das Gefüge wurde in mineralischen Böden nach FAL24+ angesprochen. In Böden mit hohen organischen Gehalten mussten einige Anpassungen vorgenommen werden. Die für Torfhorizonte vorgesehenen Gefügeformen schwammig, filzig und blättrig erwiesen sich als wenig zielführend. Am Anfang des Projektes hatte sich gezeigt, dass je nach Hintergrund und Zeitpunkt einer Kartierung die Definitionen dieser drei Gefügeformen sehr unterschiedlich war und ist. Teilweise wird damit eher die Torfart oder der Zersetzungsgrad, teilweise eher der Wasserhaushalt oder die Degradierung beschrieben.

Deshalb haben wir uns entschieden für die organischen Gefügeformen möglichst die mineralischen Gefüge nach FAL24+ zu verwenden. So mussten auch keine neuen von NABODAT abweichenden Legeneinträge geschaffen werden.

Im Oberboden wurde für vermulmte Substrate meist ein Einzelkorn-Gefüge als dominantes Gefüge gewählt und ein Krümelgefüge als subdominantes Gefüge. In vererdeten Horizonten meist ein dominantes Krümelgefüge mit Subpolyedern als subdominantes Gefüge. Im unteren Teil des Oberbodens oder im Unterboden bis zum r-Horizont folgte meist eine Abfolge von Subpolyedern über Polyeder bis zu einem Gefüge aus vertikalen Rissen, die als Prismen angesprochen wurden. Bei stark organischen Böden mit geringem mineralischem Anteil wird Torfsubstrat mit einem mittleren Zersetzungsgrad im Unterboden mechanisch zu horizontalen Schichten verpresst, hier wurde jeweils ein Plattengefüge vergeben. Unterhalb der Obergrenze des r-Horizontes wurden Schichten mit Ausgangsmaterial Torf jeweils als filzig angesprochen. Bei einem Ausgangsmaterial Mudde wurde jeweils die Gefügeform Kohärent angefügt, je nach Ausprägung als dominantes oder subdominantes Gefüge.

### Beispiel organischer Gefüge in einer Spatenprobe in einem stark drainierten Boden



Vermulmter Torf in den obersten 15 cm. Der Spaten wurde im Hochsommer genommen, durch Austrocknung hat sich ein pulvriges **Einzelkorn Gefüge mit einzelnen Subpolyedern** gebildet. Diese meist kleiner als 1 mm grossen organischen Körnchen fühlen sich scharfkantig an.

Im Unterboden findet sich ein viel gröberes Gefüge aus **Polyedern** mit Grössen zwischen 1 und 4 cm sowie subdominant **Subpolyeder** mit einer Grösse zwischen 0.2 und 2 cm.

Im zum Untergrund vermittelnden Unterbodenhorizont sind Pflanzenfasern noch deutlich zu erkennen. Es sind grosse **Polyeder** mit Grössen zwischen 5 und 12 cm zu erkennen. Die Oberflächen der Aggregate glänzen jeweils deutlich durch Huminsäurebeläge. Gegen unten schliessen **Prismen** an.

Pedogen unveränderter Torf. Schichtung horizontal ohne vertikale Risse, teils aus Ablagerung aber auch durch mechanische Auflast. Kein Sekundärgefüge, daher als **filzig** angesprochen. Subdominant **Plattengefüge**.

## 5.7 Vernässungsmerkmale

### 5.7.1 Allgemein

Für die Quantifizierung des Sackungspotential ist entscheidend ab welcher Tiefe ein Boden permanent vernässt ist. In der FAL24+ wird für Horizonte, die über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt sind, die Bezeichnung r-Horizonte verwendet. Die Vernässung wird dabei durch den Grundwasserspiegel und den darüber liegenden, durch kapillaren Aufstieg, gesättigten Bereich verursacht. In vielen mineralischen Böden kann ein solcher Horizont an seiner grauen Färbung und der Abwesenheit von Rostflecken identifiziert werden, denn unter wassergesättigten Bedingungen liegt Eisen in reduzierter grauer Form als Fe(II) vor. In weniger häufig wassergesättigten Horizonten findet sich in Poren oder im Gefüge Luftsauerstoff. Bei Kontakt mit Sauerstoff oxidiert Fe(II) zu rötlichem Fe(III), in der grauen Matrix sind dadurch Rostflecken zu sehen. Horizonte mit ausgeprägten Rostflecken werden als gg-Horizonte beschrieben. Horizonte mit schwach ausgeprägten Rostflecken werden als g-Horizonte beschrieben.

### 5.7.2 In Torfhorizonten

In organischen Böden funktioniert diese Ansprache nicht. Die unzersetzten Pflanzenreste wie auch die sehr dunkle Matrix zeigen keine Graufärbung bei reduzierten Bedingungen.

Im Projekt wurden daher an die lokalen Bedingungen angepasste Definitionen eines r-Horizontes verwendet. Bei dauerhafter Vernässung werden Fasern konserviert, über den Zersetzungsgrad kann dadurch der r-Horizont abgeleitet werden. Die lokalen Schilf- und Seggentorfe zeigen in der Ablagerung oft einen maximalen Zersetzungsgrad von 5. Weiter hat sich gezeigt, dass in Horizonten, die etwa eine Vernässung eines mineralischen gg-Horizontes aufweisen, selten Zersetzungsgrade über 7 auftreten.

Wenn Torf seit seiner Ablagerung zwischenzeitlich oxidativen Prozessen ausgesetzt wurde und heute wieder reduziert ist, kann er auch stärker zersetzt sein. Auch der umgekehrte Fall tritt auf, insbesondere durch den Unterhalt oder die Tieferlegung von Drainagen können Torfe mit einem Zersetzungsgrad unter 6 auch über dem r-Horizont liegen. In solchen Fällen muss die Schichtung und der Wasserhaushalt interpretiert werden, anhand von nahen Bohrungen oder angrenzenden Horizonten wird dann eine Zuordnung vorgenommen.

Die Abgrenzung von g-Horizonten anhand von pedogenen Merkmalen in Torf ist noch weniger eindeutig. Es wurde jeweils oberhalb von gg-Horizonten in Bereichen mit einem Zersetzungsgrad zwischen 8 und 10 eine schwache Vernässung angenommen und ein g-Horizont vergeben. Hierbei muss aber immer der Gesamteindruck einer Bohrung und eines Standortes in Betracht gezogen werden.

In den meisten Böden im Perimeter nimmt der Zersetzungsgrad mit der Tiefe ab, der Wasserhaushalt kann über die Färbung und den Zersetzungsgrad der Fasern hergeleitet werden. Unter oxidativen Bedingungen verfärben sich die Fasern rot, unter reduzierten Bedingungen zeigen sie meist eine gelbe Färbung.



Abbildung 23: Ausschnitt aus seiner Handbohrung am Übergang von oxidativen zu reduktiven Bedingungen. Die Obergrenze des r-Horizontes liegt bei etwa 75 cm Tiefe unter Terrain und ist mit einem Holzstäbchen markiert. Darunter sind die Fasern gelblich gefärbt, darüber rötlich.

### 5.7.3 In mineralischen Horizonten

In den aus den Appenzeller Alpen stammenden Lehm- und Ton-Sedimenten ist die Ansprache von Vernässungsmerkmalen meist eindeutig. Die Böden aus vom Rhein abgelagerten Sedimenten hingegen sind aufgrund der Mineralogie auch unter oxidativen Bedingungen grau. Auch sind Rostflecken oft nicht oder nur sehr schwach zu sehen. Durch den meist hohen Kalkgehalt ist Eisen weniger löslich, weiter enthalten die Sedimente an sich bereits wenig Eisen.

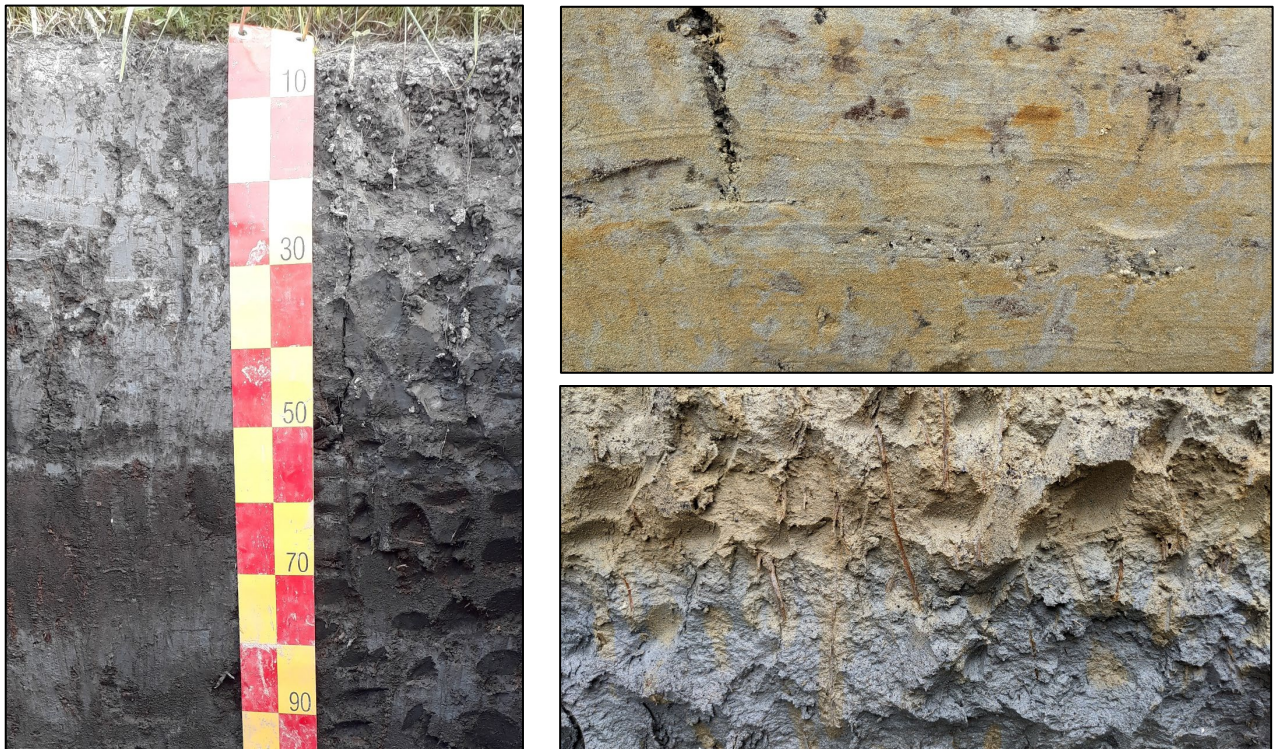


Abbildung 24: Links Bodenprofil mit schluffigen Rheinsedimenten auf organisch-mineralischen Wechsellagen. Das Profil zeigt aufgrund der Mineralogie bis an die Oberfläche eine hellgraue Färbung. Es sind trotz Vernässung keine Rostflecken zu sehen. Die Bestimmung anhand der üblichen Merkmale ist somit erschwert.

Rechts: Ausschnitte aus Profilgruben aus Sedimenten aus den Appenzeller Alpen. Oben: Staunässe mit starker Rostfleckung. Unten: Übergang zu reduktiven Bedingungen und damit einhergehende Graufärbung des ansonsten braunen Substrates, entlang der Wurzelgänge wird Luftsauerstoff in den Boden gebracht, wodurch dort das Substrat lokal oxidiert.

Um die Obergrenze der reduktiven Bedingungen in Torfsubstraten und Rheinsedimenten zu finden, wurden drei verschiedene Indikator-Flüssigkeiten getestet. 1,10-Phenanthrolin Monohydrat sowie  $\alpha,\alpha$ -Dipyridyl in einmolarem Ammoniumacetat respektive 10 %-iger Essigsäure (Berthier et al. 2014; Childs 1981). Diese Indikatoren färben eine Probe rot, wenn reduziertes Eisen vorhanden ist. Es hat sich gezeigt, dass Dipyridyl in Ammoniumacetat mit der Definition des r-Horizontes übereinstimmende Resultate zeigt. Das heisst, dass der Indikator in etwa derselben Tiefe anschlägt, in der auch der r-Horizont vermutet wird. In der Tendenz sind die Indikatoren etwas konservativer als die Feldschätzung, sie geben erst einige cm unter der vermuteten Obergrenze des r-Horizontes an. Dipyridyl in Essigsäure ist für die Verhältnisse im Perimeter weniger geeignet, da es bei Kontakt mit



Abbildung 25: Ausschnitt aus einer Handbohrung. Das Holzstäbchen markiert die Obergrenze des r-Horizontes bei 135 cm Tiefe. Darunter färbt der Indikator die Probe rot, darüber bleibt er farblos. Dies passt zum visuellen Eindruck, denn oberhalb 135 cm sind leichte Rostflecken zu sehen, darunter ist die Graufärbung intensiver.

kalkhaltigem Substrat ebenfalls in Rot umschlägt. Phenanthrolin dagegen hat oft erst bei sehr nassen Bedingungen angeschlagen. In Torfsubstraten ist das Erkennen der Rotfärbung des Indikators teils erschwert, da einige Torfsubstrate bereits eine rötliche Färbung haben, der Kontrast zur schwarzen Matrix oft gering ist und da einige Substrate zu wenig reduziertes Eisen enthalten. In Ausnahmefällen schlagen die Indikatoren auch in alluvialen Sedimenten nicht an.

Nach der Testphase wurde  $\alpha,\alpha$ -Dipyridyl in einmolarem Ammoniumacetat im weiteren Verlauf des Projektes produktiv verwendet. Mittels dieser Methode konnte die Obergrenze des r-Horizontes an mehr Standorten verlässlich bestimmt werden. Eine Übersicht der Resultate findet sich in Anhang I.5.

### 5.7.4 Ergebnisse

Die Obergrenze des reduzierten Bereiches wird im grössten Teil des Perimeters von der Einbautiefe der Drainagen bestimmt. Durch den kapillaren Aufstieg des Bodenwassers findet sich die Obergrenze des r-Horizontes in mineralischen Böden 20 bis 30 cm über der Drainage. In organischen Böden ist der kapillare Aufstieg etwas stärker und die reduzierten Bedingungen reichen weiter hinauf. 81 % der Punktaufnahmen, zeigten zumindest schwach grundnasse Verhältnisse. Sehr stark grundnasse Verhältnisse mit einem r-Horizont in maximal 30 cm Tiefe treten nur bei einer Bohrung auf.

Das Vorkommen eines gg-Horizonte mit zeitweiser Vernässung ist etwas enger verteilt, denn auch viele gut drainierte Böden weisen eine Stauschicht mit Vernässungsmerkmalen im Unterboden auf. In 77% der Punktaufnahmen tritt ein gg-Horizont vor 60 cm Tiefe auf und in 42 % der Punktaufnahmen bereits vor 40 cm. In 40 % der Punktaufnahmen verursacht Staunässe einen gg-Horizont.

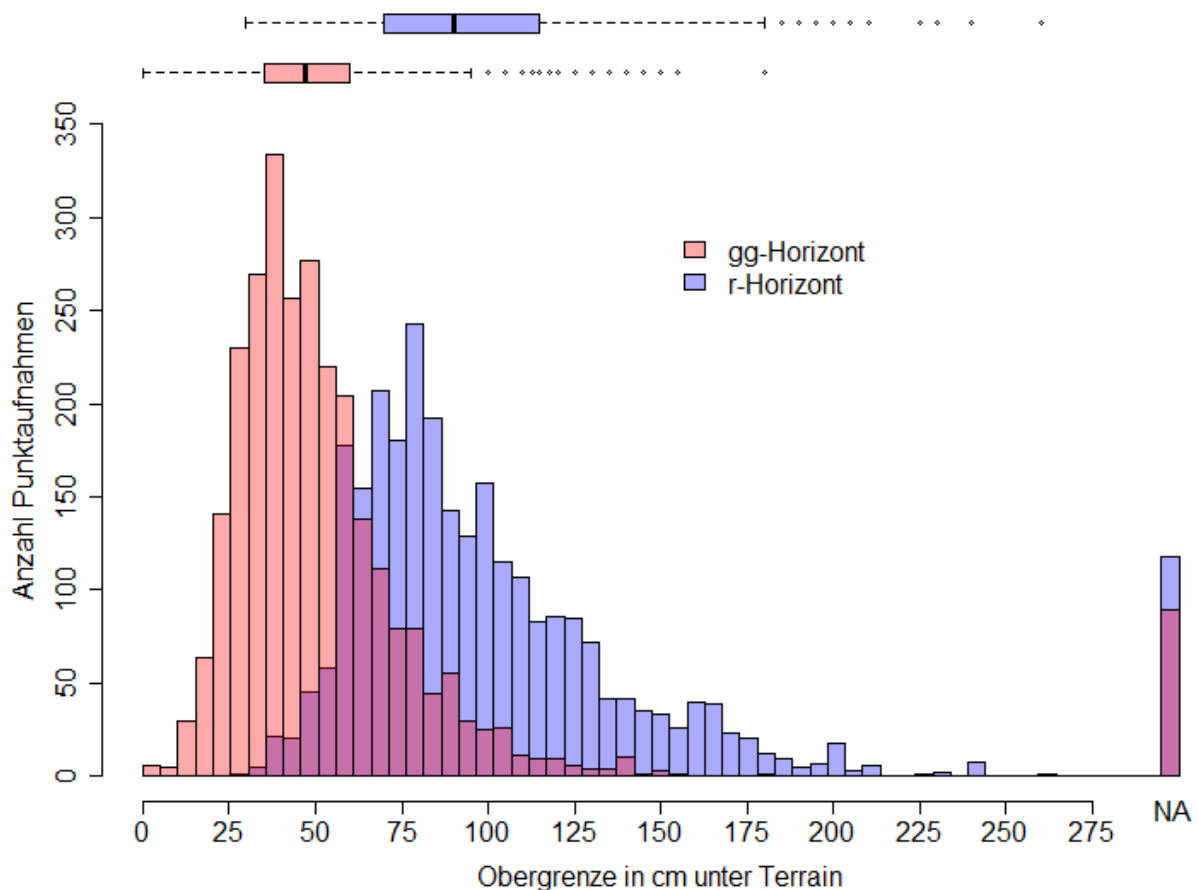


Abbildung 26: Verteilung der Tiefe der Obergrenzen der gg- respektive r-Horizonte in allen Punktaufnahmen (n=2'772) in 5 cm Klassen. Die Minimaltiefe des gg-Horizontes liegt bei 0 cm, das Maximum bei 180 cm, der Median bei 47 cm. In 89 Fällen wurde kein gg-Horizont angesprochen (NA).

Die Minimaltiefe des r-Horizontes liegt bei 30 cm, das Maximum bei 260 cm, der Median bei 90 cm. In 118 Fällen wurde kein r-Horizont angesprochen (NA).

## 5.8 pH-Wert

Der pH-Wert in  $\text{CaCl}_2$  wurde im Labor nach der Agroscope Referenzmethode bestimmt (Agroscope 2020b).

Die Böden im Perimeter decken das ganze Spektrum der FAL24+-Säuregrade von alkalisch bis sehr stark sauer ab. Im Schnitt sind sie schwach sauer. Substrat aus alluvialem Ausgangsmaterial ist meist basischer und hat einen durchschnittlichen Säuregrad zwischen schwach sauer und neutral. Substrat aus organischem Ausgangsmaterial ist im Durchschnitt sauer, hier kommen keine Messungen mit mehr als pH 6.7 vor. Sie sind demnach alle entkarbonatisiert. Der pH in Substraten aus dem Ausgangsmaterial Mudde liegt im Schnitt zwischen Torf und Alluvium. In den alluvialen Böden ist der pH im Oberboden tendenziell etwas tiefer als in Unterboden und Untergrund. In diesen Oberböden hat durch die fortschreitende Bodenbildung bereits eine zumindest teilweise Entkarbonatisierung stattgefunden. In Böden aus Torf und Mudde nimmt der pH dagegen mit der Tiefe meist ab. Die höheren Werte im Oberboden sind durch die Bewirtschaftung und damit einhergehende Kalkung und das Einbringen von Material zu erklären.

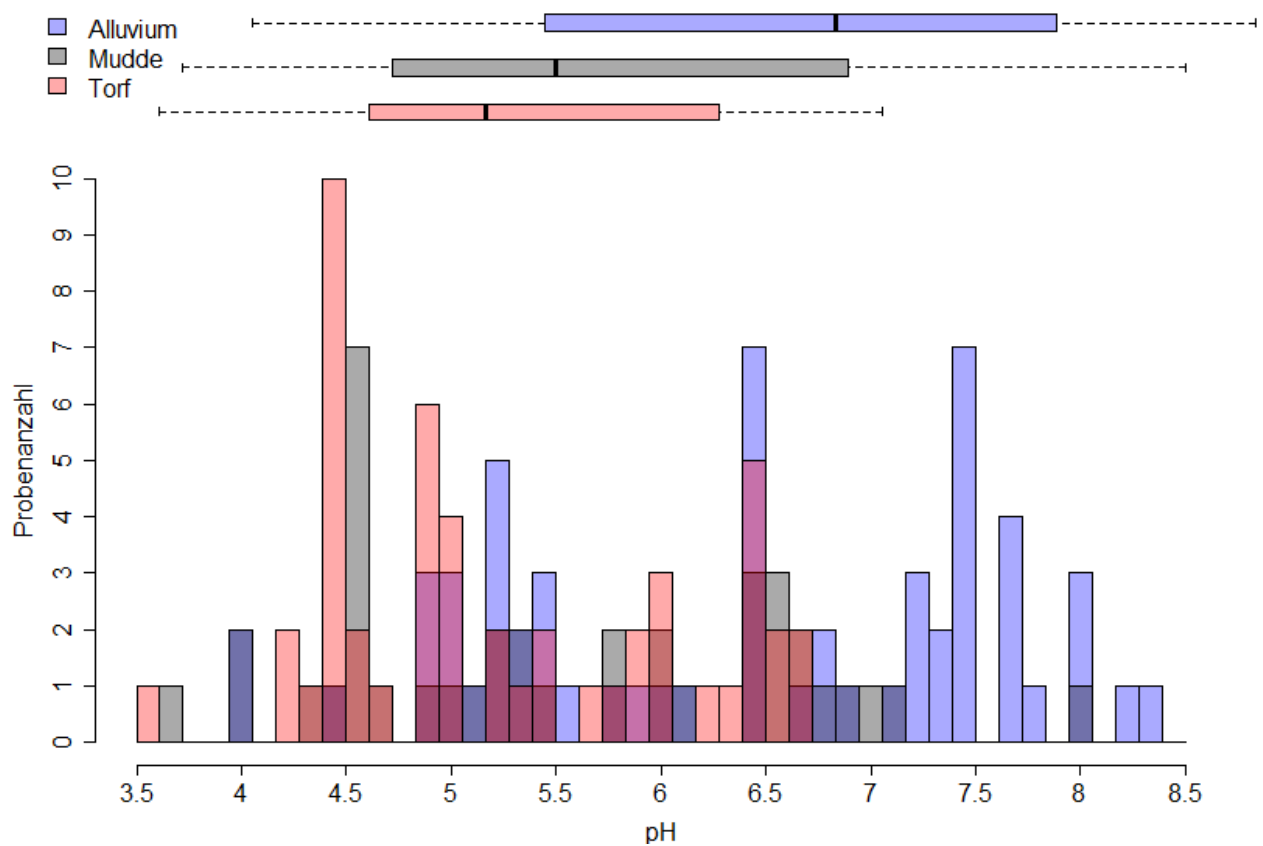


Abbildung 27: Verteilung der im Labor gemessenen pH-Werte ( $\text{CaCl}_2$ ) aufgeteilt nach dem Ausgangsmaterials (n=98). Gut sichtbar, ist die Häufung von Werten um pH 7 bei Proben mit Ausgangsmaterial Alluvium. Die Messwerte mit organischem Ausgangsmaterial häufen sich dagegen im pH-Bereich 4.5 bis 5.

Messwertstatistik:

Gesamt: Minimum 3.6; Median 5.8; Durchschnitt 5.6; Maximum 8.3

Alluvium: Minimum 4; Median 6.5; Durchschnitt 6.4; Maximum 8.3

Mudde: Minimum 3.7; Median 5.3; Durchschnitt 5.6; Maximum 8

Torf: Minimum 3.6; Median 5; Durchschnitt 5.3; Maximum 7.7

## 5.9 Lagerungsdichte

In 15 Horizonten wurden jeweils drei 100 ml-Stechzylinder entnommen, um die Lagerungsdichte des Bodens zu bestimmen. In Oberbodenhorizonten organischer Böden wurden jeweils Werte um  $0.4 \text{ g/cm}^3$  gemessen. Pedogen unveränderte Torfhorizonte mit wenig mineralischen Einmischungen zeigten typischerweise eine Dichte von  $0.25 \text{ g/cm}^3$ . In Mudden mit um 30 % OS wurde im Unterboden Schnitt eine Dichte von  $0.8 \text{ g/cm}^3$  gemessen. In alluvialen Böden ergab sich eine Dichte im Unterboden von um  $1.4 \text{ g/cm}^3$ .

Aus der Dichte und dem OS-Gehalt kann die Gesamtmenge an Kohlenstoff im Boden errechnet werden. Es hat sich gezeigt, dass in Muddehorizonten aufgrund der hohen Dichte teils höhere Kohlenstoffgehalte vorhanden sind als in reinen Torfhorizonten. Auffällig ist auch, dass organisches Substrat unter mächtigen natürlich abgelagerten mineralischen Schichten nicht zusammengedrückt wurde und keine erhöhte Dichte aufweist.

## 5.10 Fasergehalt

In einigen Klassifikationen wird der Fasergehalt als Kriterium zur Beschreibung von organischen Bodenhorizonten verwendet (United States Department of Agriculture 2014; Baize und Girard 2009). Dabei wird im Feld angegeben welcher Anteil des Substrates aus erkennbaren Fasern besteht. Es gibt auch einige simple oder anspruchsvollere Labormethoden, um den Fasergehalt zu ermitteln. Im Projekt wurde die Nasssiebung mittels turbulenter Strömung in einem Siebturm angewandt (Lévesque und Dinel 1977). Es zeigte sich, dass der Aufwand für die Methode sehr gross ist und die Aussagekraft für Torfe mit einem Zersetzungsgrad  $\geq 6$  und/oder Substrate mit hohem mineralischem Anteil gering ist. Die Methode wurde demnach nach einigen Versuchen nicht mehr systematisch angewandt.

## 5.11 Torfhorizonte

In einem Teil der Profilgruben wurden zusätzlich zur erweiterten Horizontierung nach FAL24+, die organischen Haupthorizonte nach deutscher Kartieranleitung (KA5 2005) angesprochen. Diese orientieren sich am Gefüge (Hv, Hm, Ha) oder wenn nicht vorhanden am Wasserhaushalt (Hw, Hr). Diese Systematik erscheint uns sehr zielführend, da sie Dynamik in Torfböden gut abbildet und beim Verständnis der laufenden Prozesse hilft. Zum Beispiel zu Eruierung des Bereiches in dem gegenwärtig eine Torfsackung stattfindet.

Tabelle 5: Übersicht der im Projekt aus der KA5 entnommenen Horizontsymbole für Torfböden.

Torfvererdungshorizont	Hv	Oberbodenhorizont mit «vererdetem» krümeligem bis feinpolyedrischem Gefüge.
Torfvermulmungshorizont	Hm	Oberbodenhorizont mit «vermulmtem» pulvrigen Gefüge.
Torfbröckelhorizont	Ha	Unterbodenhorizont mit Absonderungsgefüge (Polyeder bis Prismen).
Torfschrumpfungshorizont	Ht	Übergang zum Untergrund, bestehend aus Prismen, die gegen unten nicht horizontal gebrochen sind.
Wechselnasser Torfhorizont	Hw	Im Schwankungsbereich des Grund- Stauwassers. Etwa analog zum gg-Horizont nach FAL24+.
Reduzierter Torfhorizont	Hr	Ständig unterhalb des Grundwasserspiegels liegend. Etwa analog des r-Horizont nach FAL24+.

## 5.12 Konventionen in der Ansprache

Um die im Perimeter vorhandenen Besonderheiten besser ansprechen zu können, wurden ein paar weitere Ergänzungen und Änderungen zur FAL24+ vorgenommen. Diese sind im Folgenden aufgelistet.

- Aufgefüllte Horizonte werden mit dem Präfix **ya** (anthropogen) und **yn** (natürlich) unterschieden, falls der Ursprung unsicher ist, wird nur **y** verwendet.
- Bei anthropogen zugeführtem Material wird als Ausgangsmaterial **X** verwendet.
- Die Suffixe **I**, **f** und **h** sind an den Zersetzungsgrad gekoppelt und werden folgendermassen vergeben: Th = H8 - 10; Tf = H 6 - 7; TI = H1 - 5.
- Tiefgepflügte Horizonte werden mit einem **p**-Präfix versehen.

- Grenze **UB-UG** definiert über "ökologische Funktion" → Unterste Wurzel, Wurmgang, Gefüge
- Klammern in der Beschreibung von Vernässungsmerkmalen werden möglichst vermieden. Z. B. (g).

### 5.13 Anthropogen beeinflusste Böden

Je nach Definition ist ein Grossteil der Böden im Perimeter anthropogen. Durch die Drainage haben sich die Bodenbildungsbedingungen und die Eigenschaften der Böden massgeblich verändert. Der Untertyp PM für anthropogen beeinflusst wurde jedoch nur vergeben, wenn die Horizontierung über eine herkömmliche Pflugsohle hinaus gestört war, z. B. wenn tiefgepflügt wurde oder ein ehemaliger Graben mit lokalem Material aufgefüllt wurde. Der Bodentyp X für Auffüllung wurde ab mindestens 40 cm anthropogen eingebrachtem Material in den obersten 80 cm vergeben. An insgesamt 320 Punktaufnahmen wurden anthropogene Horizonte beschrieben, ihre Mächtigkeit betrug pro Standort durchschnittlich 55 cm und reichte in einigen Fällen bis über 200 cm.

Auf organischen und organomineralischen Böden ist sehr häufig entlang der Bewirtschaftungswege mineralisches Material eingebracht, um die Sackungsunterschiede der Parzellen gegenüber den Wegen auszugleichen. Die Qualität und die Menge des Materials variieren dabei sehr stark. Oft sind als Erhöhungen mit Skelettanteil aufgegebene Wege und Kanäle auszumachen.

Anthropogenes Material wurde jeweils aufgrund des Kalkgehaltes, des Skelettanteils, des OS-Gehaltes, der Feinerdekörnung oder der Farbe identifiziert. So ist mit Ausnahme einiger Schotterbänke nahe des Rheins und einiger Kiesbändern in den ehemaligen Bachläufen rund um die Rietaach das Ausgangsmaterial im Perimeter von Natur aus fast skelettfrei. Kies und Steine sind daher Indikatoren für anthropogen eingebrachtes Material.



Abbildung 28: Beispiel anthropogener Materialzufuhr im Perimeter. Oben links: Einbringen von mineralischem Material und Mist auf den ersten Dutzend Metern entlang des Bewirtschaftungsweges. Oben rechts: Leichte Erhöhung und hoher Skelettanteil als Relikt eines ehemaligen Weges auf einem organischen Boden. Unten links: Auffüllung einer lokalen Senke bei einer Birke. Unten rechts: Grossflächige bewilligte Bodenverbesserung.

## 5.14 Schichtung

Die Schichtung, Lage und Verzahnung des alluvialen und organischen Ausgangsmaterial sind sehr zentral für die Bodeneigenschaften im Perimeter und in der Ausprägung sehr aussergewöhnlich für die Schweiz, weswegen kurz darauf eingegangen werden soll.

Die Schichtabfolge im Perimeter ist im südlichen und westlichen Bereich geprägt von alluvialen Sediment aus dem Appenzeller Alpen, das in Mächtigkeiten von wenigen dm bis mehreren m den unterliegenden Torf-Mudde-Körper überdeckt. Im Isenriet fehlt eine Überdeckung vollständig, im östlichen Bereich besteht die Überdeckung aus alluvialen Rheinsediment. Der Torf-Mudde-Körper zeigt alluviale Zwischenschichten verschiedenster Mächtigkeit, während sie im Isenriet teils erst in mehreren m Tiefe auftreten, sind im östlichen Bereich organische Schichten ohne starke mineralische Komponente selten. Auffällig ist, dass auch bei mehreren m Auflage, das unterliegende Substrat mit hohem OS-Gehalt nicht verdichtet ist. Dies spricht für eine langsame und stetige Ablagerung unter mehrheitlich wassergesättigten Bedingungen. Im Westen sind die braunen tonigen oder lehmigen Sedimente der Appenzeller Alpen teilweise auch von schluffigem Rheinsediment, mit sehr schwacher organischer Komponente, unterlegt.

Zur Mächtigkeit der organischen und organomineralischen Schichten kann kein abschliessendes Fazit gezogen werden, denn die Basis des Torf-Mudde-Körpers wurde bei den Standardbohrungen, die mindestens bis 2 m und im Durchschnitt bis 2.35 m Tiefe reichten, selten erbohrt. Einzig in einem sehr begrenzten Gebiet um Balgach sind flachtorfige Böden vorhanden. Im Schwemmfächer zwischen Altstätten und Oberriet gibt es Bereiche in denen nur schwach ausgeprägte Lagen mit erhöhten OS-Gehalten vorhanden sind. Aus verschiedensten geologischen Sondierungen lässt sich entnehmen, dass der Torf-Mudde-Körper im Isenriet maximal bis etwa 15 m Tiefe reicht, über den Perimeter verteilt reicht er meist zwischen 5 und 10 m Tiefe und läuft gegen Norden in geringe Mächtigkeiten aus. Wobei häufig und insbesondere gegen den Rhein hin eine Zunahme der alluvialen Komponente mit der Tiefe zu beobachten ist. Es ist also ein aussergewöhnlich mächtiger Vorrat an Substrat mit erhöhter OS vorhanden. Die ältesten datierten Torfschichten im Perimeter, die sich in der Literatur fanden, stammen aus 14.2 m Tiefe und zeigen ein Alter von knapp 10'000 Jahren, das dortige Substrat zeigt sehr wenige alluviale Zwischenschichten, die Torfbildungsrate betrug demnach zwischen 1 und 2 mm/Jahr (Eberle 1987).

Die Übergänge zwischen organischen und mineralischen Böden sind demnach meist nicht scharf und von einer Unterlagerung sowie Durchsetzung geprägt. Dies wird an den beiden Transekten (Punktaufnahmen entlang einer Linie) auf der folgenden Seite kurz veranschaulicht.



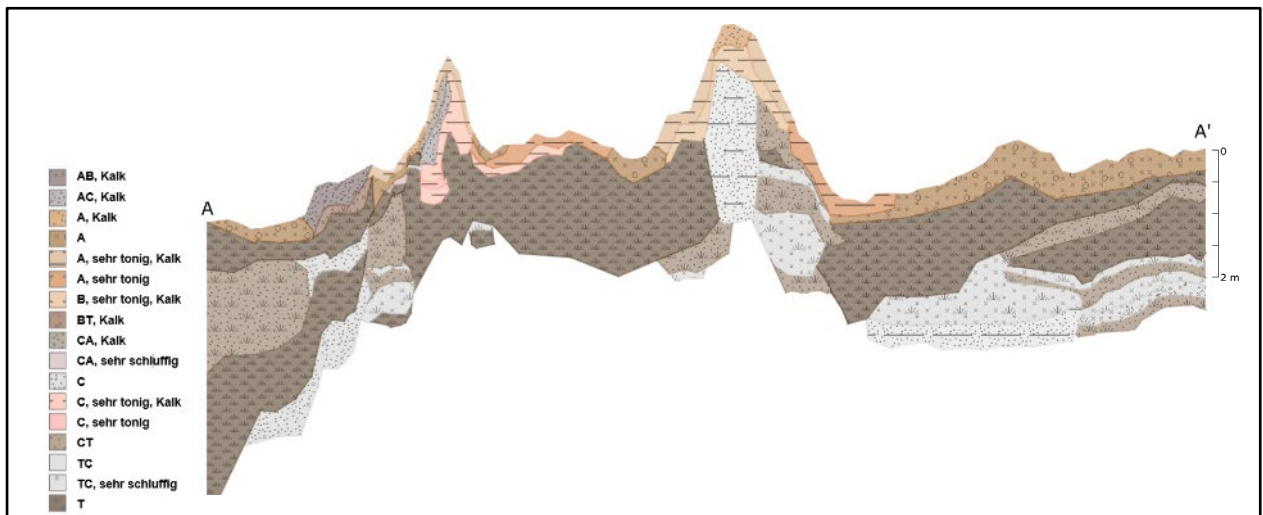


Abbildung 30: Transekt von der Kellermad beim Bahnhof Rebstein-Marbach über die Rietaach bis ins Isenriet bei Müligüetli. Der Ausschnitt ist 100-fach überhöht, um die feine Schichtung besser abbilden zu können. Am Ende wie auch am Anfang des Transektes sind tieftorfige Halbmoorböden vorhanden. Auf der Seite A liegt eine Abfolge von mehreren dm mächtigem Torf (T) und Torf-Horizonten mit alluvialen Zwischenschichten (CT) vor. Auf der Seite A' ist die Schichtung feiner. Gut sichtbar als Erhebungen sind ehemalige Flussläufe der Rietaach. Dort hat sich mineralisches Material verschiedenster Art abgelagert. Teils sehr tonig, teils kalkhaltig und in grösseren Tiefen auch schluffig. Unter den mineralischen Ablagerungen konnte meist noch Torf erbohrt werden, es wird angenommen, dass dieser über den Ganzen Transekt innerhalb weniger m zum Vorschein kommt.

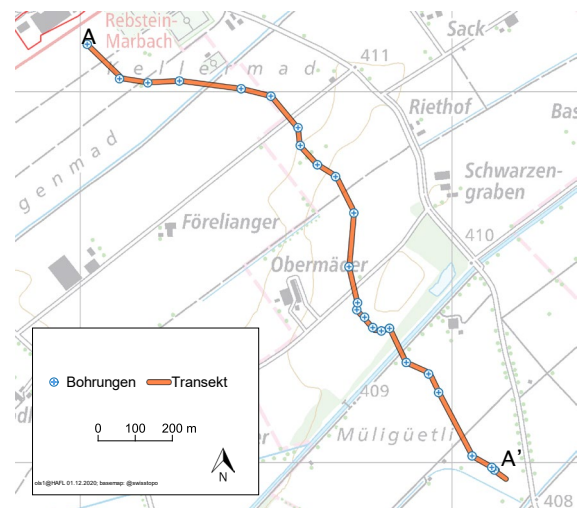


Abbildung 29: Tansekt im Übergang von organischen zu mineralischen Böden vom Edenlehn bei Eichberg ins Bannriet. 75-fach überhöht. Die Mächtigkeit der mineralischen Horizonte Ah, B und Bh verringert sich über eine Strecke von über einem Kilometer von fast einem Meter bis der Transekt im Bannriet ins Halbmoor über geht. Ein Mudde-Horizont (TIC) bestehend aus alluvialen Schluff des Rheins und organischer Substanz aus Verlandungsvegetation zieht sich über den ganzen Transekt und weist auf die Präsenz eines seichten Gewässers über einen längeren Zeitraum hin.

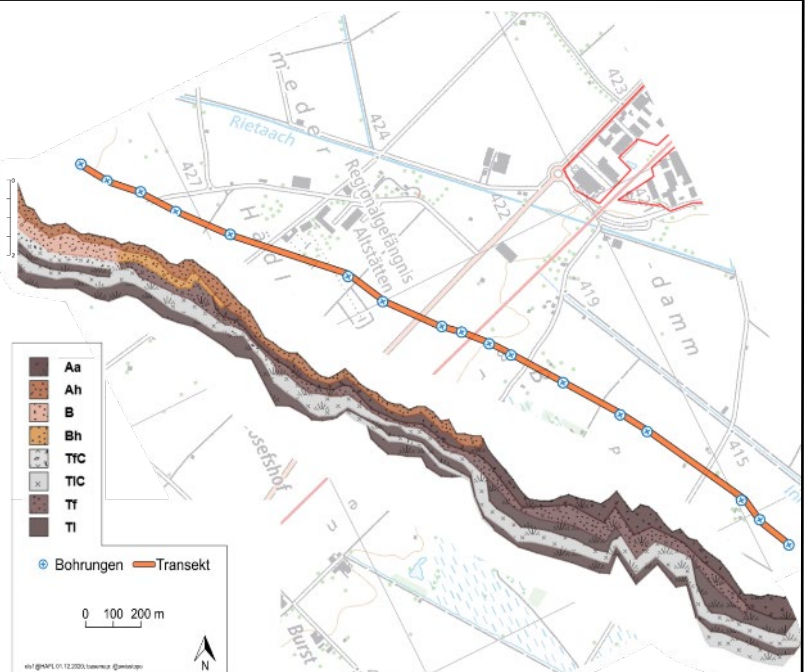


Abbildung 31: Zwei Transekte an den Übergängen von mineralischen zu organischen Böden.

## 6 Pilotbetriebe

### 6.1 Analyse von Pilotbetrieben

Die Bodeneigenschaften im Perimeter sind durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung geprägt. Drainagen, Auffüllungen, Bodenbearbeitung und Kulturen verändern den Bodenaufbau lokal nachhaltig. Um diese Einflüsse in die Modellierung miteinfließen zu lassen, wurden sieben Pilotbetriebe gewählt, deren Parzellen genauer analysiert wurden. Im Umkehrschluss soll dieses Vorgehen zeigen, welche Anbaumethoden in Zukunft wo nachhaltig betrieben werden können und sollen.

Um den Einfluss der diversen Bewirtschaftungsarten im Perimeter auf den Boden abzuschätzen, wurden folgende Parameter durch Bewirtschafterbefragungen parzellenweise erhoben: Kultur (inklusive Zwischenfrucht), Einsatz organischen Düngers, Ertrag, Maschineneinsatz (jeweiliger Bodendruck, Bodenbearbeitung). Weiter sollte abgefragt werden, wie die Landwirte ihre Parzellen beurteilen und wo sie Problemstellen oder besondere Bodeneigenschaften verorten.

### 6.2 Auswahl der Betriebe

Die Pilotbetriebe wurden so gewählt, dass ihre Betriebsstrukturen repräsentativ für die landwirtschaftlichen Betriebe im Perimeter sind. Weiter sollten sie über den ganzen Perimeter verteilt sein und die Variation der Bodeneigenschaften abdecken.

Grundlage für die Auswertung ist eine Zusammenstellung des Landwirtschaftsamts St. Gallen. In dieser ist aufgelistet, welche Kulturen jeder Betrieb im Perimeter im Jahr 2017 angebaut hatte, gruppiert nach den Codes der landwirtschaftlichen Flächenerhebung des Bundesamt für Landwirtschaft BLW.

Anhand dieser Daten wurde eine statistische Gruppierung durchgeführt. Diese soll aufzeigen, ob Gruppen von Betrieben ein ähnliches Anbauprofil haben. Dieselbe Methode wurde für die Wahl der Profilgruppen genutzt (Absatz 0).

Es zeigte sich, dass drei Betriebsstrukturen sich deutlich voneinander unterscheiden. Die erste Gruppe bilden Kleinstbetriebe ohne Ackerbau, meist Nebenerwerbsbetriebe. Die zweite Gruppe besteht aus Betrieben mit einer Fruchtfolge aus Grünland, Mais und im kleinen Umfang weiteren Kulturen wie Weizen. Die dritte Gruppe umfasst Betriebe mit weniger Grünland- und Maisanteil und einem stärkeren Fokus auf Gemüse und teilweise Kartoffelanbau.

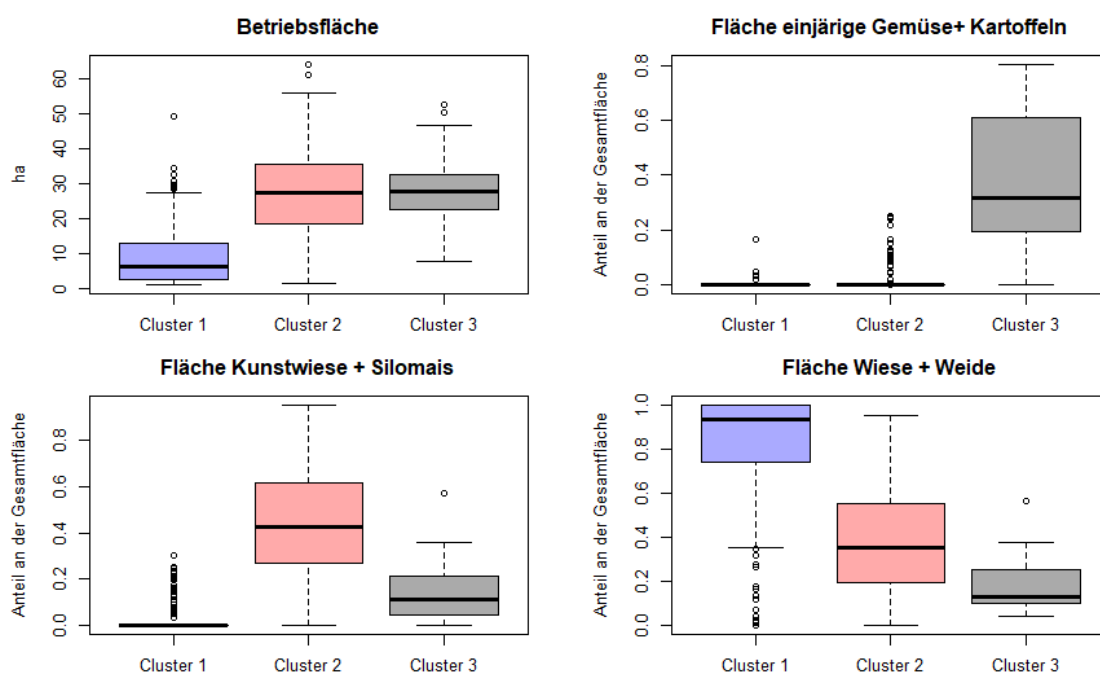


Abbildung 32: Boxplots der Betriebsgruppen (Cluster) und ihrer jeweiligen Eigenschaften.

Da der Fokus auf Haupterwerbsbetrieben lag, wurde die erste Gruppe ausgeklammert und aus den beiden verbleibenden Gruppen je zwei Betriebe gewählt, die die Gruppen möglichst gut repräsentieren. Gewählt wurden Betriebe deren Flächenanteilen der in der statistischen Gruppierung relevanten Kulturen möglichst nahe am Mittelwert der jeweiligen Gruppe lag. Weiter wurden pro Gruppe ein bis zwei Betriebe gewählt, die in ihrer Struktur etwas am Rand der Gruppen liegen und somit speziellere Strukturen aufweisen.

### 6.3 Befragung

Für die Aufnahme der Bewirtschaftungsarten der Böden in den Pilotbetrieben wurden Tabellen angelegt. In einer ersten Tabelle wurde die Kultur, der Ertrag und der Einsatz von organischem Dünger je Parzelle in den Jahren 2014 bis 2019 erfasst. In einer zweiten Tabelle wurde erfasst, welche Maschinen für welche Kultur verwendet wurden und welche bodenrelevanten Eigenschaften diese haben. Auf einer Karte wurden zudem Besonderheiten auf den bewirtschafteten Parzellen eingetragen. Die Befragung wurde vor Ort mithilfe des Landwirtschaftlichen Zentrums St. Gallen in Salez (LZSG) durchgeführt.

### 6.4 Klassierung der Parzellen

Insgesamt wurden 451 Parzellen erfasst. Bachböschungen, Hecken und Wegränder wurden ausgeklammert, wodurch 428 Parzellen in der Auswertung verblieben.

Aus den einzelnen Angaben zu Kulturen, Maschineneinsätzen und organischen Düngern wurden Klassen gebildet, z. B. Grünland mit Umbruch alle 4 Jahre, mittlerem Ertrag, mittlerem Eintrag organischen Düngers und unterdurchschnittlicher mechanischer Belastung. Mit diesen Klassen wurde wiederum eine statistische Gruppierung durchgeführt. Es zeigte sich, dass die vielen Parameter sich teilweise aufhoben und eine Klassierung erst stark zusammengefasst Sinn machte. Es bildeten sich dabei 5 Hauptgruppen heraus:

- A = Extensive Wiesen und Weiden bis hin zu extensiveren Kunstwiesen und Ackerkulturen
- B = Extensive bis mittel intensive Kunstwiesen und Ackerkulturen
- C = Kunstwiesen und Ackerkulturen mit bodenschonendem Maschineneinsatz
- D = Intensive Kunstwiesen und Ackerkulturen
- E = Gemüseanbau oder intensive Kunstwiesen und Ackerkulturen mit Gemüseanbau

Die wichtigsten Einflussfaktoren waren dabei die Kulturen und die Intensität der Bodenbearbeitung.

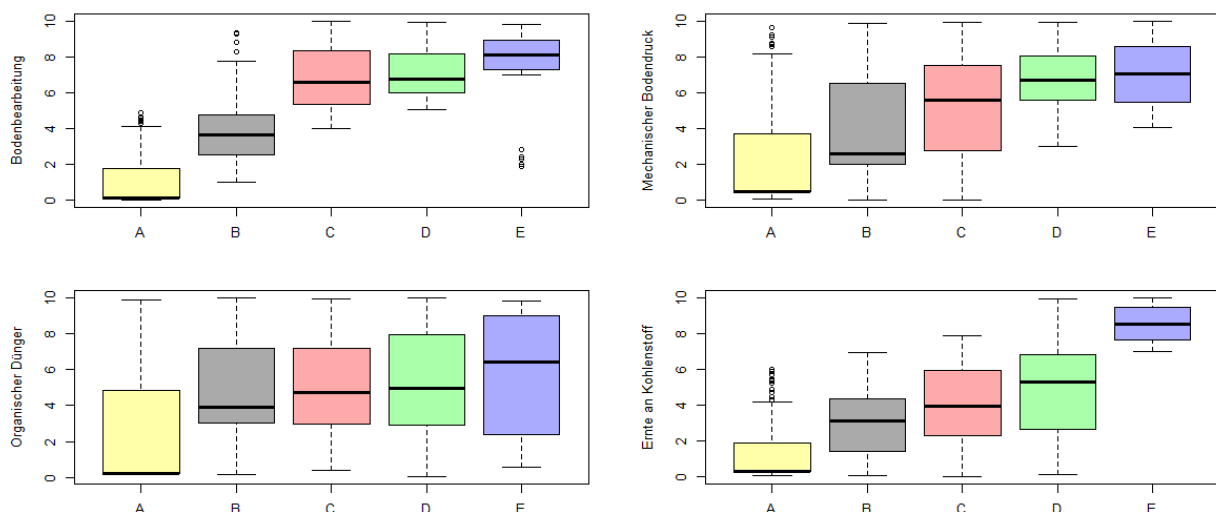


Abbildung 33: Überblick der fünf Kulturtypen (A-E). Die Skala auf der y-Achse gibt jeweils einen Index an, mit 0 = nichts und 10 = viel. In der oberen Reihe die physikalischen Parameter, wie stark der Boden bearbeitet wird und wie stark die Bewirtschaftung physikalischen Druck auf den Boden ausübt. In der unteren Reihe sind Input sowie Output im Kohlenstoffkreislauf abgebildet.

Die klassierten Flächen der Pilotbetriebe bilden eine erklärende Grösse für die Modellierung. Sie können so helfen Bodeneigenschaften für Böden ausserhalb der Pilotbetriebe genauer zu berechnen.

## 6.5 Einfluss der Kulturen auf die Bodeneigenschaften

Um zu analysieren, wie sich die Bewirtschaftungsarten auf die Bodeneigenschaften auswirken, wurden Bohrungen innerhalb der jeweiligen Hauptgruppen mit Bohrungen ausserhalb verglichen. Dazu wurden einerseits die Parzellen innerhalb der Pilotbetriebe verwendet, andererseits wurden angrenzende Parzellen aufgrund eines Augenscheins den Hauptgruppen zugewiesen.

Weiter wurde geprüft, ob die Parzellen je nach Bewirtschaftungsart eine andere Sackungsrate zeigen. Typischerweise zeigen die Parzellen in gesackten Böden am Rand eine Steigung gegen die Bewirtschaftungswege hin. Die Wege haben aufgrund des festen Aufbaus, der nicht vorhandenen Bodenbearbeitung und dem Einbringen von ortsfremdem Material eine tiefere Sackungsrate. Bei benachbarten Parzellen sollte diese Form gleich ausgeprägt sein. Um dies zu überprüfen, wurde der topographische-Positions-Index (TPI) verwendet, dieser klassiert Landschaftsformen mit einem Höhenmodell aufgrund der Höhen an einem Punkt und der mittleren Höhe dessen Umgebung. Die gesackten Parzellen werden dabei als flache Mulde klassiert. Die Stärke der Sackung gegenüber Wegen wird dabei von einem Faktor zwischen 0 (keine) und 1 (starke Höhendifferenz) ausgedrückt. Wenn sich die Sackungsraten zweier angrenzenden Flächen stark unterscheiden, sollte auch die Ausprägung der jeweiligen Muldenausbildung unterschiedlich stark sein.

Es wurden keine signifikanten Unterschiede der Bodeneigenschaften zwischen den Hauptgruppen der Bewirtschaftungsarten gefunden. Auch der Vergleich mittels TPI zeigte nur Unterschiede innerhalb des Unsicherheitsbereichs der Methode. Im Allgemeinen zeigt sich aber eine Tendenz zu einem grösseren Terrainverlust und einem geringeren OS-Gehalt bei intensiverer Bodenbearbeitung und/oder einer intensiveren Fruchtfolge.

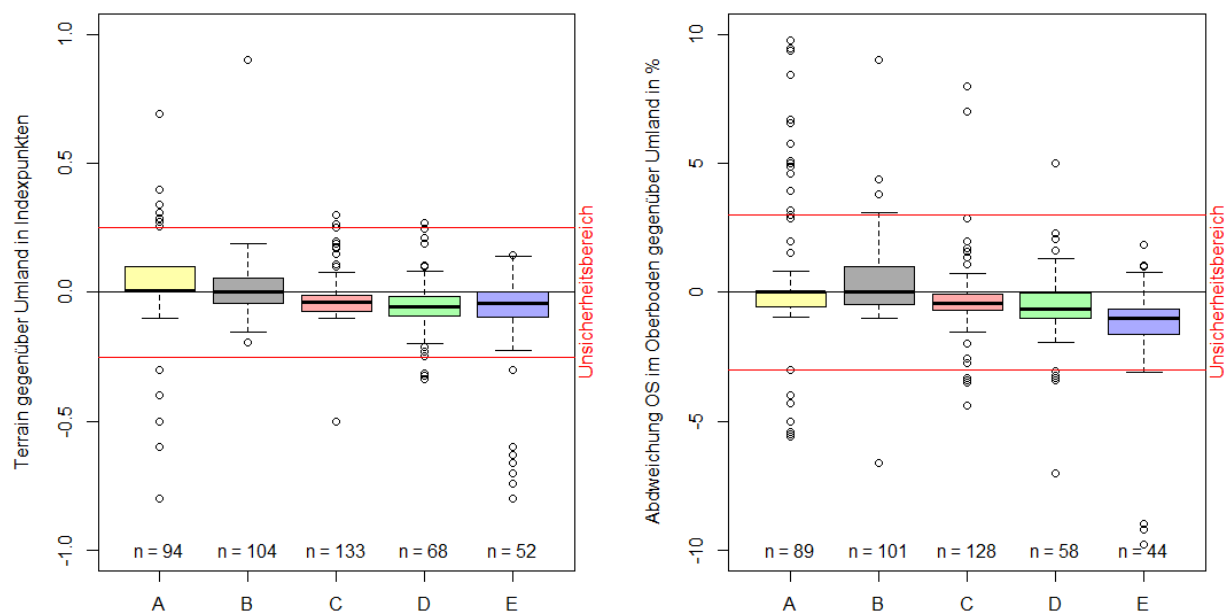


Abbildung 34: Die fünf Kulturtypen auf der x-Achse (A-E). Links: Boxplots der Ergebnisse der Analyse des TPI, eine Abweichung unter null zeigt eine ausgeprägtere Sackung als in den Nachbarparzellen an, eine Abweichung über null zeigt eine geringere Sackung an. Der Bereich innerhalb der roten Linie zeigt den Unsicherheitsbereich zwischen -0.25 und 0.25 Indexpunkten. Schwankungen innerhalb dieses Bereiches sind zu wenig ausgeprägt, als dass daraus Rückschlüsse auf die Sackungsrate gemacht werden könnten. Da keines der Quartile über diese Linien herausragt ist von keinem signifikanten Effekt auszugehen, auch wenn von A nach E ein Trend zu zunehmender Sackung auszumachen ist. Rechts dieselbe Abbildung mit einem Vergleich der Parzellen aufgrund der OS im Oberboden aus Feldschätzungen von Punktaufnahmen. Negative Werte zeigen einen geringeren OS-Gehalt als bei Nachbarparzellen. Auch hier ist ein Trend ersichtlich mit abnehmendem OS-Gehalt bei zunehmender Bewirtschaftungsintensität. Aber auch hier sind die Unterschiede nicht signifikant da aufgrund der Unsicherheit der Feldschätzungen ein Unsicherheitsbereich von 3 % OS gesetzt wurde. Stark anthropogene Bohrungen wurden aussortiert, es bleibt aber immer noch anzumerken, dass in den Kulturtypen C bis E tendenziell mehr standortfremdes Material eingebracht wurde und somit auch der OS-Gehalt sinkt.

Die Art der Bewirtschaftung scheint nur eine untergeordnete Rolle bezüglich der sackungsrelevanten Bodeneigenschaften zu spielen. Die Landwirte haben ihre Bewirtschaftung aufgrund der jeweiligen Gegebenheiten bereits stark standortgerecht angepasst. Es kann auch vermutet werden, dass sich

Unterschiede in den Daten nicht ablesen lassen, da nur der Zeitraum von fünf Jahren angeschaut wurde und die Bewirtschaftung in den Jahrzehnten davor auf vielen Parzellen anders gestaltet war.

Der Hauptfaktor bezüglich des Wasserhaushaltes, der Sackungsrate und dem Abbau von organischer Substanz im Oberboden bildet die Drainagetiefe. Da diese selten auf die Kulturen angepasst ist, sind oft auch sehr extensive Parzellen ähnlich stark drainiert wie intensiver genutzte. Der Einfluss der Bodenbearbeitung und der Ernte auf die Sackung und Degradierung der organischen Böden im Perimeter ist dadurch meist zweitrangig. Eine weitere Anpassung der Bewirtschaftungsart ohne Einbezug der Drainagetiefen ist deswegen nicht zielführend. Dies deckt sich mit Erkenntnissen aus anderen Untersuchungen (Carlson et al. 2015; Evans et al. 2019; Hoyt et al. 2020; Höper 2007).



Abbildung 35: Die landwirtschaftliche Praxis im Perimeter orientiert sich in den meisten Fällen an den Limitationen der lokalen Böden. So werden z. B. Hackfrüchte nur selten in stark organischen Böden angebaut oder Böden mit hohen Tongehalten erst nach längeren Trockenperioden befahren. Die obenstehenden Abbildungen zeigen aber, dass es auch zu Situationen kommt, die sich nachteilig auf die Bodenfruchtbarkeit auswirken. Links oben: Heraufgepflügter Torf mit einem mittleren Zersetzungsgrad, dieser ist nun ungeschützt der Atmosphäre ausgesetzt und wird, insbesondere bei Trockenheit, in kurzer Zeit zu stark zersetztem Torf abgebaut. In der Konsequenz erhöht sich die Sackungsrate. Weiter weist das Klumpengefüge auf eine Bodenbearbeitung in zu nassem Zustand hin. Oben rechts: In einem Oberboden mit etwa 20 % OS ist auf einer Nassstelle die Ansaat nicht aufgelaufen. Die Nassstelle hat sich durch das Befahren in zu nassem Zustand akzentuiert. Der Boden ist bis zur nächsten Ansaat ungeschützt, durch Schwindrisse dringt vermehrt Luftsauerstoff in die Tiefe und die Sackungsrate wird erhöht. Unten: In einem Salatfeld wurde der Boden bei zu hoher Saugspannung befahren, in den Fahrspuren kommt es in der Folge zu einer Verdichtung und Wasser bleibt an der Oberfläche liegen. Die schluffigen Böden aus Rheinsedimenten neigen zu solcher oberflächlichen Staunässe, denn ihr Gefüge ist nach der Bodenbearbeitung oft durch Verschlammung geschwächt.

# 7 Modellierung

## 7.1 Prinzip

In einer Kartierung nach FAL24+ macht die Kartierperson die Transferleistung vom Punkt in die Fläche, indem sie anhand der zur Verfügung stehenden Informationen ein Gedankenmodell erarbeitet und anhand dessen Einheiten mit möglichst homogenen Bodeneigenschaften (Polygone) zeichnet. Dieses Vorgehen haben wir dahingehend abgeändert, dass dieses Gedankenmodell nicht mehr präzise ausformuliert werden muss und dass nur noch eine allgemeine Konzeptkarte erstellt wird. Die Bodeneigenschaften (Zielgrößen) werden dann durch maschinelles Lernen von den Punktaufnahmen durch die vorhandenen Geodaten (erklärende Größen) in die Fläche gerechnet.

Als Methode für die räumliche Vorhersage wurde der Random Forest-Algorithmus gewählt (Breiman 2001), da dieser eine einfache Handhabung bietet und in anderen Bodenkartierungsprojekten auch im Ausland gute Resultate lieferte. Andere statistische Methoden wie Kriging mit Trendmodell, Cubist oder Support Vector Machine wurden ebenfalls geprüft, zeigten aber keine besseren statistischen Kennwerte und unplausiblere Kartenbilder.

Random Forest ist ein Algorithmus, der auf Klassifikations- und Regressionsbäumen aufbaut. Der Datensatz wird fortlaufend zweigeteilt (rekursives Partitionieren) bis nur noch eine kleine Anzahl Datenpunkte (node size) übrigbleiben. Bei jedem Schritt wird eine Auswahl an erklärenden Größen geprüft und die beste erklärende Grösse für die Aufteilung der Daten gewählt. Bei Random Forest werden zahlreiche solcher Bäume kombiniert und für die Vorhersage verwendet. Es wird also für jede Zielgrösse an jeder Punktaufnahme geprüft, welche Kombination von erklärenden Größen die Zielgrösse am besten erklären könnte. Ein wichtiges Mass zur Interpretation eines solchen Modelles ist dabei die Wichtigkeit der erklärenden Größen. Diese gibt an, welche erklärende Grösse wie stark im jeweiligen Modell verwendet wurde. Die Anzahl der erklärenden Größen wurde durch schrittweises Verwerfen der am wenigsten wichtigen Größen reduziert. Anschliessend wurden korrelierte erklärende Größen zusätzlich entfernt (Dekorrelation). So wurde verhindert dass z. B. Ableitungen aus dem Höhenmodell wiederholt dieselbe Information ins Modell einbringen und so andere Informationen zu wenig Beachtung finden (Hertzog 2017). Um die Wahl der erklärenden Größen weiter zu verbessern wurde der Boruta-Algorithmus angewandt. Dabei werden alle erklärenden Größen zufällig durcheinandergemischt und für diesen Schritt ebenfalls dem Modell hinzugefügt. Beibehalten werden nur erklärende Größen, die eine höhere Wichtigkeit zeigen als die zufällig gemischten Variablen (Kursa und Rudnicki 2010).

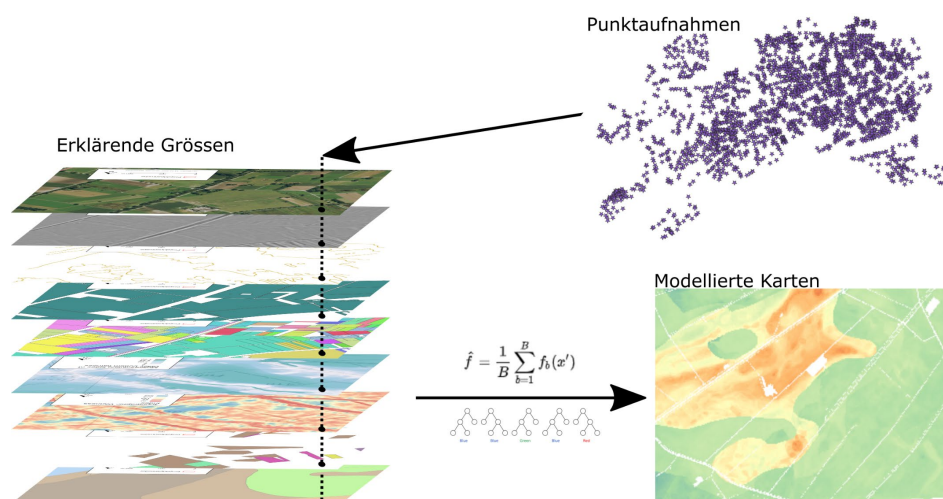


Abbildung 36: Prinzip der Modellierung einer Bodeneigenschaftskarte. An Punktaufnahmen ist eine Zielgrösse vorhanden (z. B. OS in 0-30 cm). Im Perimeter sind räumliche Daten vorhanden, die Informationen über die gesamte Fläche enthalten (z. B. die Neigung). Mit diesen räumlichen Daten wird versucht, die Eigenschaften der Zielgrösse in der Fläche erklären, sie heissen deshalb erklärende Größen. Den Punkten werden die Pixelwerte der erklärenden Größen angehängt. Für jede Punktaufnahme sind nun die Werte der einzelnen erklärenden Größen bekannt. Der Random Forest-Algorithmus, dargestellt durch die Formel einer wiederholenden Regression und den Entscheidungsbäumen, sucht nun Kombination und Reihenfolgen der erklärenden Größen, welche die Zielgrösse am besten erklären können. Anhand eines solchen Modelles können anschliessend die Werte der Zielgrösse für alle Pixel des Perimeters vorausgesagt werden, indem die erklärenden Größen flächig über den gesamten Perimeter eingespiessen werden und der Mittelwert aller Punktbeobachtungen, die unter gleichen Landschaftsbedingungen beobachtet wurden, berechnet wird.

## 7.2 Datenaufbereitung

### 7.2.1 Erklärende Grössen

Alle vorhandenen Geodaten, die Informationen zur Bodenbildung oder zu Bodeneigenschaften enthalten wurden für die Modellierung aufbereitet. Eine Auflistung der verwendeten erklärenden Grössen ist in *Anhang Tabelle 2* zu finden. Die Geodaten wurden aufgearbeitet, sodass sie dasselbe Koordinatensystem (neue Schweizer Koordinaten, LV95), dieselbe Pixelgrösse (5x5m) sowie dieselbe Ausdehnung haben. Weiter wurden für Grössen, die Klassen beinhalten z. B. verschiedenen Arten der Anthropogenität, die Übergänge geglättet. Aus Linien, die in Vektordaten gezeichnet wurden, wurden fließende Übergänge generiert, um die in der Realität graduellen Übergänge besser abzubilden oder dem Unsicherheitsbereich jeder Linienziehung gerecht zu werden. Der Radius der jeweiligen Glättung wurde von der Genauigkeit der Geodaten bestimmt, z. B. wurde die BoKa 72/76 mit Übergängen von 50 m geglättet, die grösseren Auffüllungen mit 10 m.

Die Pixelgrösse von 5x5 m wurde gewählt, da sie den Genauigkeitsansprüchen des Projektes entspricht. Ein grösserer Massstab hätte in einem detaillierteren Kartenbild resultiert, die Gefahr bestünde aber, dass Kleinstformen überinterpretiert werden könnten.

Es hat sich gezeigt, dass die BoKa 72/76 jeweils eine grosse Wichtigkeit in den Voraussagen hatte. Wenn die BoKa 72/76 nicht verwendet wurde, zeigte sich ein sehr ähnliches Kartenbild. Dies weist darauf hin, dass sich die Bodenkundlichen Fachpersonen damals stark an den Geländeformen orientiert hatten. Um keine Artefakte und sprunghaften Übergänge aus den teils grossmassstäblich gutachtlich gezogenen Polyongrenzen zu übernehmen, wurde die BoKa 72/76 für die schlussendliche Modellierungen nicht verwendet.

### 7.2.2 Zielgrössen

Zielgrössen sind Bodeneigenschaften, die mittels geostatistischer Verfahren modelliert werden. Es sind also Eigenschaften, die sich aus den Punktdaten ableiten lassen und für den ganzen Perimeter berechnet werden.

Die Horizontinformationen der Punktaufnahmen wurden aufgrund der Labordaten angepasst. Das heisst, die Feldaufnahmen wurden durch Laborwerte ersetzt und die jeweiligen Punktaufnahmen mit Labordaten einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und allfällige Unstimmigkeiten verbessert.

Aus den horizontweise aufgenommenen Punktaufnahmen wurden pro Standort Bodeneigenschaften abgeleitet, diese bilden die Zielgrössen der Modellierung. Z. B. wurde der OS-Gehalt in den ersten 30 cm berechnet, dabei wurden alle Horizonte anteilmässig berücksichtigt, die oberhalb von 30 cm beginnen, enden oder ganz oberhalb davon liegen. Anschliessend wurden die OS-Werte jedes cm zwischen 0 und 31 addiert und durch 30 geteilt. Um die ausgeprägten Schichtungen abzubilden, wurden die Zielgrössen der OS und der Korngrössen in vier Bodentiefen von je 30 cm bis 120 cm Tiefe unterscheiden. Um mögliche Sackungsprozesse abzubilden, wurden für die OS zusätzlich Zielgrössen bis zur Obergrenze des r-Horizontes gewählt.

Für die OS in den ersten 30 cm wurde zusätzlich noch für Flächen mit unter 10 % OS eine separate Zielgrösse gewählt, da hier die Genauigkeitsansprüche höher sind. Ein Unterschied von 2 % OS bei 25 % OS im Oberboden ist nicht so relevant wie ein Unterschied von 2 % OS bei 4 % OS im Oberboden. Der Zersetzungsgrad wurde mit zwei Zielgrössen modelliert. Jeweils die Obergrenze des Zersetzungsgrades 5 und 7, diese repräsentieren im Perimeter meist die Grenze der starken Torfzersetzung respektive der Torfkonservierung.

Die Zielgrössen wurden so gewählt, dass daraus synthetische Bodentypen abgeleitet werden konnten, weiter wurden einige Zielgrössen modelliert, die als Solitär für Kartenprodukte verwendet werden können, z. B. die PNG.

Für die PNG bestehen zwei Zielgrössen: Einerseits wurde die PNG aus den von den Kartierpersonen angegebenen Faktoren summiert oder wenn vorhanden die PNG pro Punktaufnahme übernommen, andererseits wurde die PNG aus standardisierten Faktoren für Horizonteigenschaften hergeleitet, z. B. Gewichtung von 0.66 für ein g-Horizont ohne andere Einschränkungen.

Tabelle 6: Übersicht der modellierten Zielgrössen. Die Farben zeigen Gruppen von Eigenschaften. In hellgrün Eigenschaften, die vom OS-Gehalt abgeleitet wurden. Grün zeigt Eigenschaften, die mit dem Zersetzungsgrad zusammenhängen. In orange Zielgrössen verschiedener Korngrössen in verschiedenen Tiefen. Sand wurde jeweils aus Schluff und Ton angeleitet, die zwei modellierten Sandkarten dienen der Plausibilitätsprüfung. In gelb die PNG. In blau Grössen, die den Wasserhaushalt betreffen. In grau die Mächtigkeit der anthropogenen Horizonte

OS % 0-30 cm Tiefe	Mindesttiefe Zersetzungsgrad $\leq 5$
OS % 0-60 cm Tiefe	Mindesttiefe zersetzungsgrad $\leq 7$
OS % 0-90 cm Tiefe	Ton 0-30 cm Tiefe
OS 30-120 cm Tiefe	Ton 30-60 cm Tiefe
OS % 30-60 cm Tiefe	Ton 0-60 cm Tiefe
OS % 60-90 cm Tiefe	Ton 0-90 cm Tiefe
OS % 90-120 cm Tiefe	Ton 60-120 cm Tiefe
OS % 30 cm Tiefe – r-Horizont	Schluff 0-30 cm Tiefe
OS % 60 cm Tiefe – r-Horizont	Schluff 30-60 cm Tiefe
Mächtigkeit OS<45% bis r-Horizont	Schluff 0-60 cm Tiefe
Mächtigkeit OS $\geq$ 30% bis r-Horizont	Schluff 0-90 cm Tiefe
Mächtigkeit OS $\geq$ 10% bis r-Horizont	Schluff 60-120 cm Tiefe
Mächtigkeit OS<5% bis r-Horizont	Sand 0-30 cm Tiefe
OS % 0-30 cm Tiefe, wenn OS<10	PNG
Mindesttiefe OS $\geq$ 30%	Tiefe oberster r-Horizont
Mindesttiefe OS $\geq$ 10%	Tiefe oberster gg-Horizont
OS $\geq$ 30% bis 80 cm Tiefe	Mächtigkeit anthropogene Horizonte

### 7.3 Synthetische Bohrungen

Bei Vorliegen der modellierten Karten zeigte sich an einigen Stellen ein unplausibles Ergebnis. Um diese Gebiete zu korrigieren, wurden 21 Bohrungen kopiert und an den problematischen Stellen eingesetzt, damit die Modelle diese Zonen besser vorhersagen können. Als Vorlagen wurden Punktaufnahmen gewählt, die aufgrund der Einschätzungen aus den Gebietskenntnissen ähnliche Eigenschaften haben, wie in den unplausibel modellierten Bereichen zu erwarten wären. So wurde die Gesamtzahl der Punktaufnahmen von 2'772 auf 2'793 erhöht.

### 7.4 Gewichtung

Je nach Qualität der Daten wurden die Punktaufnahmen für die Modellierungen verschieden gewichtet, das heisst sie flossen aufgrund ihrer Qualität verschieden stark in die Modelle ein. Profilaufnahmen und Bohrungen mit Labordaten wurden doppelt gewichtet. Aufnahmen aus dem Vorprojekt und aus der Übersichtsbeprobung der Schwerpunkte der BoKa 72/76 wurden nur halb gewichtet. Alle anderen Bohrungen wurden einfach gewichtet.

### 7.5 Validierung

Um die Güte von modellierten Karten kritisch zu überprüfen, wurde eine Validierung durchgeführt. Dabei wurden einzelne Punktaufnahmen, sogenannte Validierungspunkte, auf die modellierten Karten gelegt und verglichen wie weit diese effektiv beobachteten Validierungspunkte mit den Karten übereinstimmen. Die Validierungspunkte wurden in keinem Schritt der Modellierung verwendet. Damit die Validierungspunkte eine unverzerrte Schätzung der mittleren Abweichung der Karten von der Realität ermöglichen, wurde im Projekt ein stratifizierter Zufallsstichprobenplan erstellt, wie er in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wird. So wurden 201 Punktaufnahmen unabhängig vom restlichen Datensatz generiert; das Vorgehen wird deswegen auch als unabhängige Validierung bezeichnet. Die Validierungspunkte bestehen aus 198 Handbohrungen, einer synthetischen Bohrung sowie zwei Bodenprofilgruben.



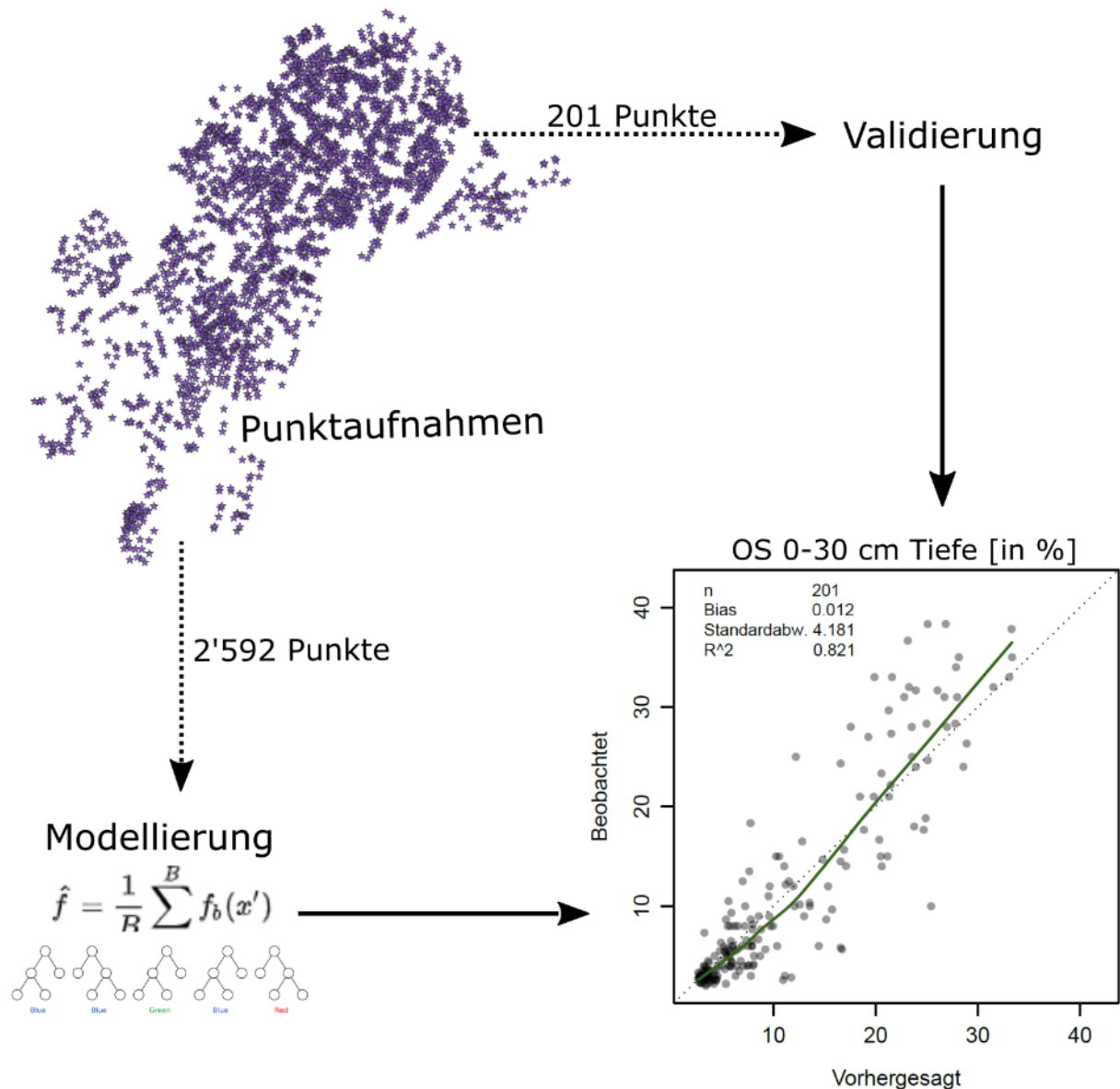


Abbildung 37: Prinzip der Validierung. Aus der Gesamtzahl der Punktaufnahmen werden typischerweise etwa 10 – 20 % der Daten entfernt. Mit dem restlichen Datensatz wird für jede Zielgrösse ein Modell erstellt und mittels der erklärenden Grössen Karten der Zielgrössen errechnet. Im Projekt wurden aus insgesamt 2'793 Punktaufnahmen 201 eigens für die Validierung erhoben. Der Graph unten rechts zeigt als Beispiel die Validierungsstatistik für die OS in 0 – 30 cm Tiefe. Auf der x-Achse sind die vorhergesagten Werte der modellierten Karte abgebildet. Auf der y-Achse finden sich die Werte, die in den Validierungsbohrungen aufgenommen wurden. Bei einer exakten Übereinstimmung würden alle Punkte auf der gestrichelten 1:1-Geraden liegen. Im abgebildeten Fall gruppieren sie sich um die Linie herum, auch ist ein klarer Trend auszumachen. Dies wird auch durch die grüne Glättungskurve bestätigt, diese folgt mehrheitlich der 1:1-Geraden. Oben Links in der Grafik sind die Validierungsstatistiken abgegeben. «n» zeigt die Anzahl der abgebildeten Punkte. Der «Bias» gibt an, ob die Vorhersagen eine systematische Verzerrung aufweisen, also im Schnitt zu hoch (positiver Bias) oder zu tief (negativer Bias) liegen. In diesem Fall ist der Bias fast null und eine systematische Unter- oder Überschätzung des OS-Gehalts liegt nicht vor. Die «Standardabweichung» gibt an, wie genau die OS vom Modell ausgegeben wird, d. h. wie stark die Punkte in beide Richtungen um die 1:1-Gerade verstreut sind. In diesem Fall sind es 4.2 % OS Genauigkeit nach oben und unten. Das «R<sup>2</sup>» bezeichnet das Bestimmtheitsmass. Dieses kombiniert den Bias und die Standardabweichung und gibt über alle Modelle vergleichbar an, wie viel der Streuung der Validierungsdaten vom Modell erklärt werden können, also wie gut die Validierungspunkte ins Modell passen. Im abgebildeten Fall liegt R<sup>2</sup> bei 0.821, es werden also 82.1 % der Streuung vom Modell erklärt. Würde die Karte überall den Mittelwert zeigen, wäre R<sup>2</sup> = 0; in einem perfekten Modell liegt R<sup>2</sup> = 1. Bei Werten über 0.5 kann man von einem mittleren Resultat sprechen, ein R<sup>2</sup> ≥ 0.7 ist gut und eines über 0.8 sehr gut.

## 7.6 Mehrstufige Modellierung

Der Random Forest-Algorithmus erstellt Vorhersagen aus Mittelwerten von effektiv beobachteten Punktdaten. Wenn eine Zielgrösse nun viele Nullwerte aufweist (z. B. Mächtigkeit organischer Horizont, 0 cm = keiner vorhanden), ist es für statistische Modelle generell schwierig, diese genau zu «treffen». Bei Random Forest wird durch die Mittelwertbildung häufig ein Wert nahe an null (z. B. 1.2 cm), aber nicht genau null ausgegeben. Auch kann das Modell an den zahlreichen Nullwerten keine Beziehungen zu erklärenden Grössen lernen, da diese sich in keine Richtung verändern. Statistisch handelt es sich nur um einen kleinen Fehler, für die Interpretation ist dies aber unerwünscht. Denn Gebiete, die keinerlei organische Schichten enthalten, sollten auch so kartiert werden.

Um die korrekte Identifikation der Flächen mit Nullwerten zu erreichen, wurde wie für solche Fälle üblich für einige Zielgrössen ein zweistufiges Verfahren verwendet. In einem ersten Schritt wurde ein Modell für zwei Klassen angepasst, welches für jedes Pixel die Wahrscheinlichkeit berechnet, ob es sich um einen Nullwert handeln könnte (null ja/nein). In einem zweiten Schritt wurde nur für die Flächen, wo null unwahrscheinlich ist, die effektive Zielgrösse vorhergesagt. Der beste Schwellenwert, ab welchem null wahrscheinlich ist (z. B. >45 %), wurde mithilfe der Punktbeobachtungen festgelegt. Dies wurde anhand der in Anhang I.7 abgebildeten Grafiken gemacht. Dabei wurde versucht den optimalen Schwellenwert zu treffen, bei dem möglichst wenige Werte, die in der Realität keine Nullwerte haben als null eingestuft werden und gleichzeitig möglichst wenig Werte, die in der Realität Nullwerte haben als nicht-null einzustufen (Vermeiden von Falsch-Positiven oder Falsch-Negativen).

## 7.7 Karten

### 7.7.1 Organische Substanz

#### 7.7.1.1 Organische Substanz im Oberboden

Die modellierten Karten der OS zeigen je nach Tiefe ein unterschiedliches Bild. Im Isenriet erstreckt sich eine zusammenhängende Fläche zwischen Bannriet, Binnenkanal und Rietaach bis fast zu den drei Brücken, die auf etwa 600 ha in den obersten 30 cm über 20 % OS enthält. In einigen Parzellen im zentralen Bereich zwischen den Seegräben finden sich auch Werte über 30 % OS und bis zu 41 % OS. Durch anthropogene Materialzufuhr ist die OS auf vielen Parzellen markant gesenkt worden, dies zeigt sich in der Karte als orange geometrische Formen mit tieferem OS-Gehalt. Gegen Südwesten im Bannriet nimmt die OS stark ab, hier hat sich durch den Torfabbau grossflächig ein anthropogener Oberboden mit etwas über 10 % OS gebildet. In tieferen Lagen besteht er aus anstossender Mudde, die wahrscheinlich aufgrund des tiefen OS und Fasergehalt nicht abgebaut wurde. Höher liegende Parzellen enthalten oft eine beträchtliche mineralische Deckschicht, die zu einem Teil aus mineralischen oder organomineralischen Abraum aus dem Torfabbau stammen.

Weiter südwestlich, etwa ab der Eisenbahnlinie, sind nur noch leicht erhöhte organische Gehalte zu finden. Typischerweise haben die dortigen tonigen Oberböden OS-Gehalte zwischen 3 und 5 %. Zwischen Kriessern und Montlingen ist dieser Übergang von Oberböden mit über 20 % OS zu mineralischen Oberböden viel abrupter und vollzieht sich auf wenigen 100 m, ähnlich ausgeprägt ist der Übergang gegen Nordwesten zum ehemaligen Bachbett der Rietaach hin. In beiden Fällen ist der Übergang zu den Gebieten mit erhöhter OS im Gelände durch ein markantes sackungsbedingtes Gefälle von einigen Metern gut sichtbar. Gegen Nordosten nimmt die OS im Oberboden graduell ab. Von Balgach und über den Rhein bis Diepoldsau finden sich auf etwa 450 ha Oberböden mit um 10 % OS. Nordwestlich hinter dem ehemaligen Verlauf der Rietaach finden sich weitere anmoorige Oberböden, die OS-Gehalte sind meist etwas tiefer als im Isenriet und bewegen sich um 20 %, es gibt aber auch einzelne Flächen mit bis über 30 %. Die anmoorigen Oberböden werden dort wiederholt von mineralischen Böden aus Ablagerungen von Seitenbächen der Rietaach unterbrochen.

#### 7.7.1.2 Organische Substanz im Unterboden

Die Karte der OS von 30 bis 60 cm Tiefe zeigt ein ähnliches Bild wie im Oberboden. Der Bereich mit erhöhten OS-Gehalten ist jedoch ausgedehnter. An die organischen Böden anschliessend gibt es grössere Flächen, die unter einem mineralischen Oberboden organische oder organomineralischen Unterböden aufweisen. Im Kerngebiet im Isenriet sind meist OS-Gehalte zwischen 40 und 60 % zu finden. Auffällig ist der Bereich zwischen Kriessern und Widnau, hier treten flächig Werte knapp unter 30 % OS auf. Es handelt sich dabei um schluffige Mudde-Unterböden. Zwei kleinere Gebiete im Süden des Perimeters mit erhöhten OS-Gehalten am Hangfuss des Schörgisknorren und unterhalb Kobelwald treten in dieser Tiefe deutlicher hervor.

#### 7.7.1.3 Organische Substanz im Untergrund

Auf der Karte der OS von 60 bis 90 cm Tiefe wird ersichtlich, dass in einem grossen Teil des Perimeters unter den mineralischen Böden organisches und organomineralisches Substrat folgt. In der Karte der OS von 90 bis 120 cm Tiefe ist dieses Bild noch ausgeprägter. Gegen Westen finden sich im Gebiet Klostermaad bereits in etwa 50 cm Tiefe OS-Gehalte über 10 %. Die mineralische Überdeckung nimmt gegen Westen etwas zu, ehe sie zum Hangfuss hin wieder abnimmt und unterhalb des Schörgisknorren fast ganz fehlt. Solche geringmächtigen mineralischen Überdeckungen treten in weiteren Flächen westlich der Bahnlinie auf, so entlang der Rietaach, im Feeri oder zwischen Altstätten und Hinterforst.

Im Gegensatz zur Situation im Westen wo die Abgrenzung zwischen mineralischen und organischen sowie organomineralischen Substraten in der Tiefe komplexer ist, wird die Unterscheidung in den restlichen Gebieten eindeutiger. Der ehemalige Verlauf der Rietaach und ihrer Seitenbäche ist in der Tiefe klar als mineralisches Substrat vom meist organischen Substrat des Umlandes abgrenzbar, eine gegenseitige Überprägung von alluvialen und organischen Prozessen, wie sie im Oberboden teilweise noch anzutreffen ist, findet sich in der Tiefe nicht. Wenn organomineralische Schichten vorhanden sind, bestehen sie aus schluffigem Rheinsediment. Die tonigen oder lehmigen Substrate der Seitenbächen und Rietaach sind in der Tiefe nur noch in Ausnahmen und in geringmächtigen Lagen anzutreffen. Auch die Abgrenzung zu den mineralischen Rheinsedimenten im Osten wird mit der Tiefe eindeutiger. Die alluvialen Böden zeigen eine für mineralische Böden typische Abnahme des OS-Gehaltes mit der Tiefe. Werte von 0 % OS treten aufgrund der alluvialen Aufarbeitung des Substrates nur vereinzelt auf. In den organischen und organomineralischen Böden nimmt der OS-Gehalt mit der Tiefe jedoch tendenziell zu. Im

Iserriet finden sich häufig OS-Gehalte um 60 % mit Extremwerten bis 78 %, in den Muddeböden im Krummensee finden sich zwischen 40 und 50 % OS. Einerseits baute sich die OS in diesen Tiefen seit der künstlichen Drainierung weniger stark ab, andererseits ist in der Tiefe das alluviale Material weniger dominant. Dies ist wohl auf die vorgeschichtliche Fließdynamik des Rheins zurückzuführen, denn ab einer Tiefe unter 150 cm nehmen die OS-Gehalte tendenziell wieder ab.

Zwischen Rebstein und Balgach und rund um das Quartier Strimäder findet trotz hohen OS-Gehalten um 20 % im Oberboden eine Abnahme der OS mit der Tiefe statt. Hier finden sich auch etwa 25 ha die einzigen flachtorfigen, antorfigen oder sapro-organischen Böden im Perimeter. Also organische und anmoorige Böden mit Mächtigkeiten unter 90 cm auf einer mineralischen Unterlage. Diese Form der organischen Böden ist in vielen anderen organischen Gebieten der Schweiz die Regel, die fast durchgehend sehr tieftorfigen oder von mineralischen Schichten überdeckten organischen Böden im Rheintal bilden dagegen ein Ausnahmefall.

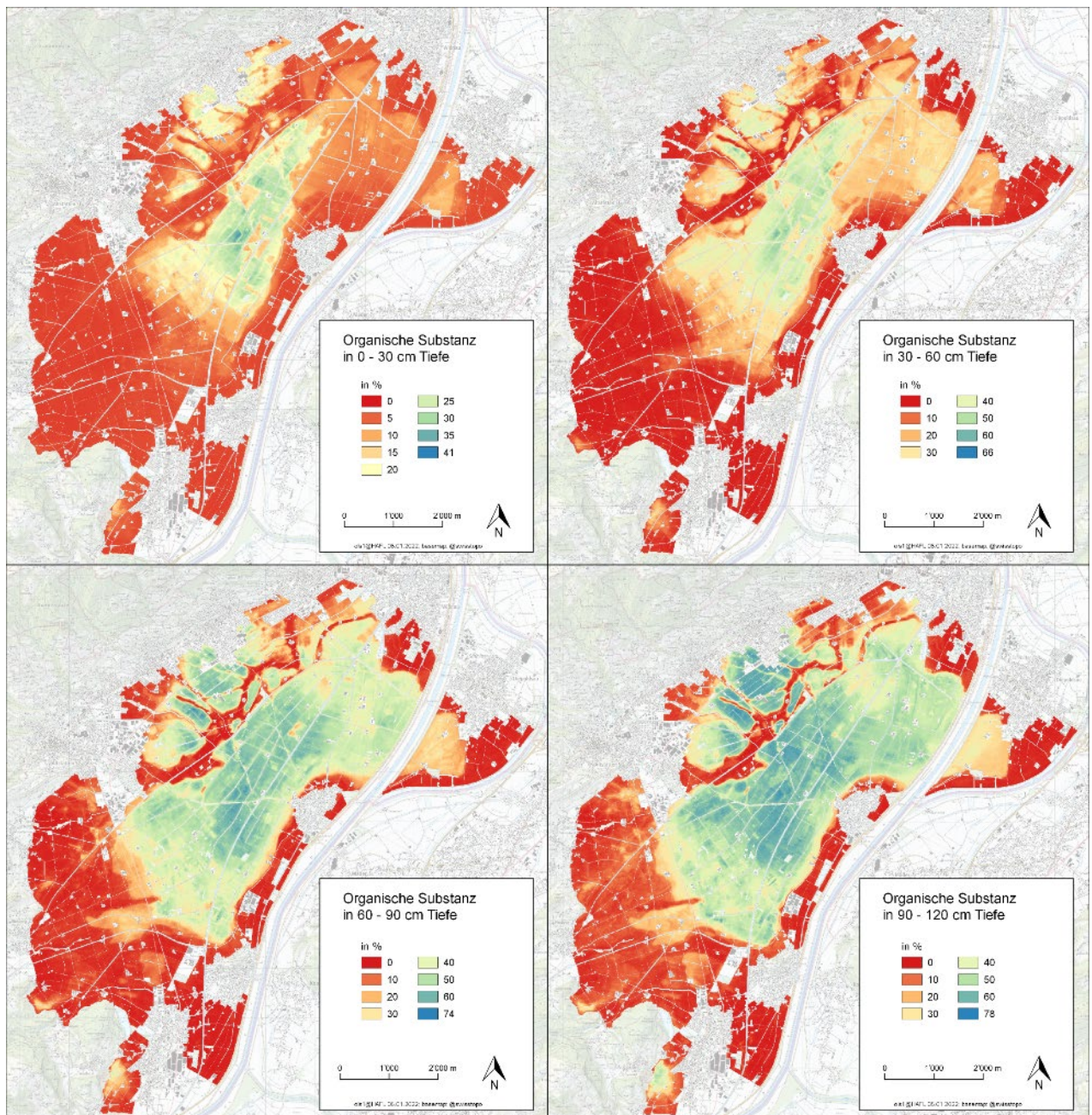


Abbildung 38: OS in vier verschiedenen Bodentiefen. Im Allgemeinen nimmt die OS mit der Tiefe zu. Gut unterscheidbar sind Gebiete ohne organische oder organomineralische Schichten, diese sind rot in allen Abbildungen. Gebiete mit mineralisch überdeckten organischen Schichten sind in den oberen Abbildungen rot und in den unteren grün bis blau. Halbmoorböden sind in allen Abbildungen grün bis blau dargestellt. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

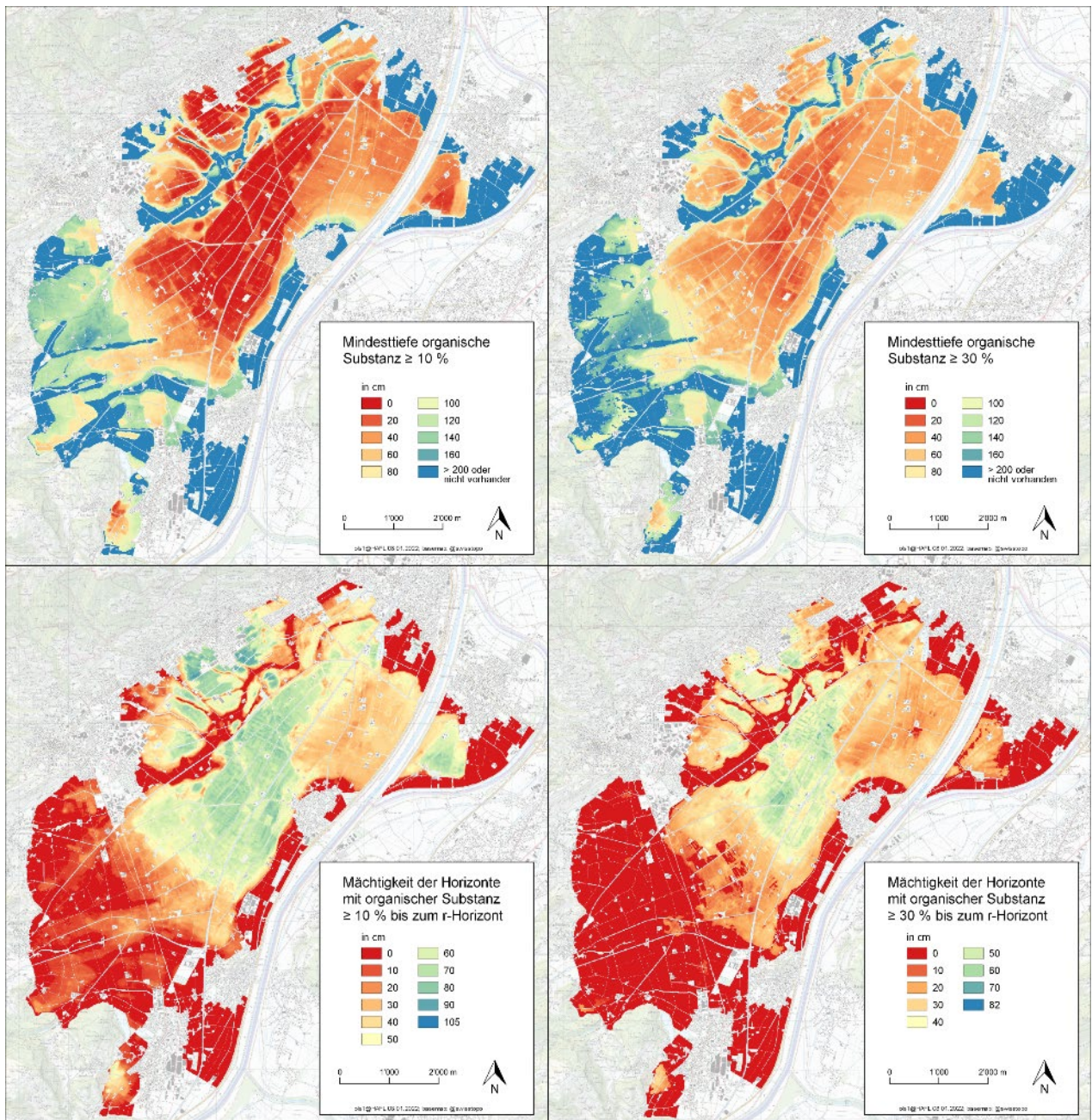


Abbildung 39: Die Karten in der oberen Zeile stellen die Tiefe des obersten Horizontes mit mindestens 10 % OS respektive 30 % OS dar. In blau sind Bereiche dargestellt, die keinerlei organomineralische Horizonte bis 2 m Tiefe enthalten. Auf der Karte der Mindesttiefe des obersten Horizontes mit 10 % OS sind in rot die Gebiete mit mindestens anmoorigen Oberboden zu sehen, in dunkelorange Bereiche, in denen der Oberboden mineralisch überdeckt ist und in hellorange und gelbe Bereiche, die bis in den Unterboden mineralisch überdeckt sind. Grüne Bereiche zeigen mineralische Überdeckungen von mindestens einem Meter. Die Karte der Mindesttiefe des obersten Horizontes mit 30 % OS folgt demselben Prinzip. Es fällt auf, dass die Obergrenzen weiter unten liegen. Böden mit 30 in den obersten 30 cm beschränken sich auf 250 ha. Weiter sind auf etwa 400 ha mit organomineralischen Horizonten keine organischen Horizonte zu finden.

In der unteren Zeile ist die Mächtigkeit der organomineralischen respektive organischen Horizonte bis zur Obergrenze des r-Horizontes zu sehen. Diese Größen zeigen auf, welcher Anteil eines Bodens mit erhöhter OS oxidativen Prozessen ausgesetzt ist. Gut zu sehen ist, dass nur im Kern des Isenriets und in einigen kleineren Flächen nördlich der Rietaach über 50 cm organische Horizonte über dem dauerhaft vernässten Bereich vorkommen. Durch eine Kombination der oberen und unteren Zeile kann rückgeschlossen werden, wieviel OS vorhanden ist und wo diese liegt. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

## 7.7.2 Feinerdekörnung

### 7.7.2.1 Feinerdekörnung im Oberboden

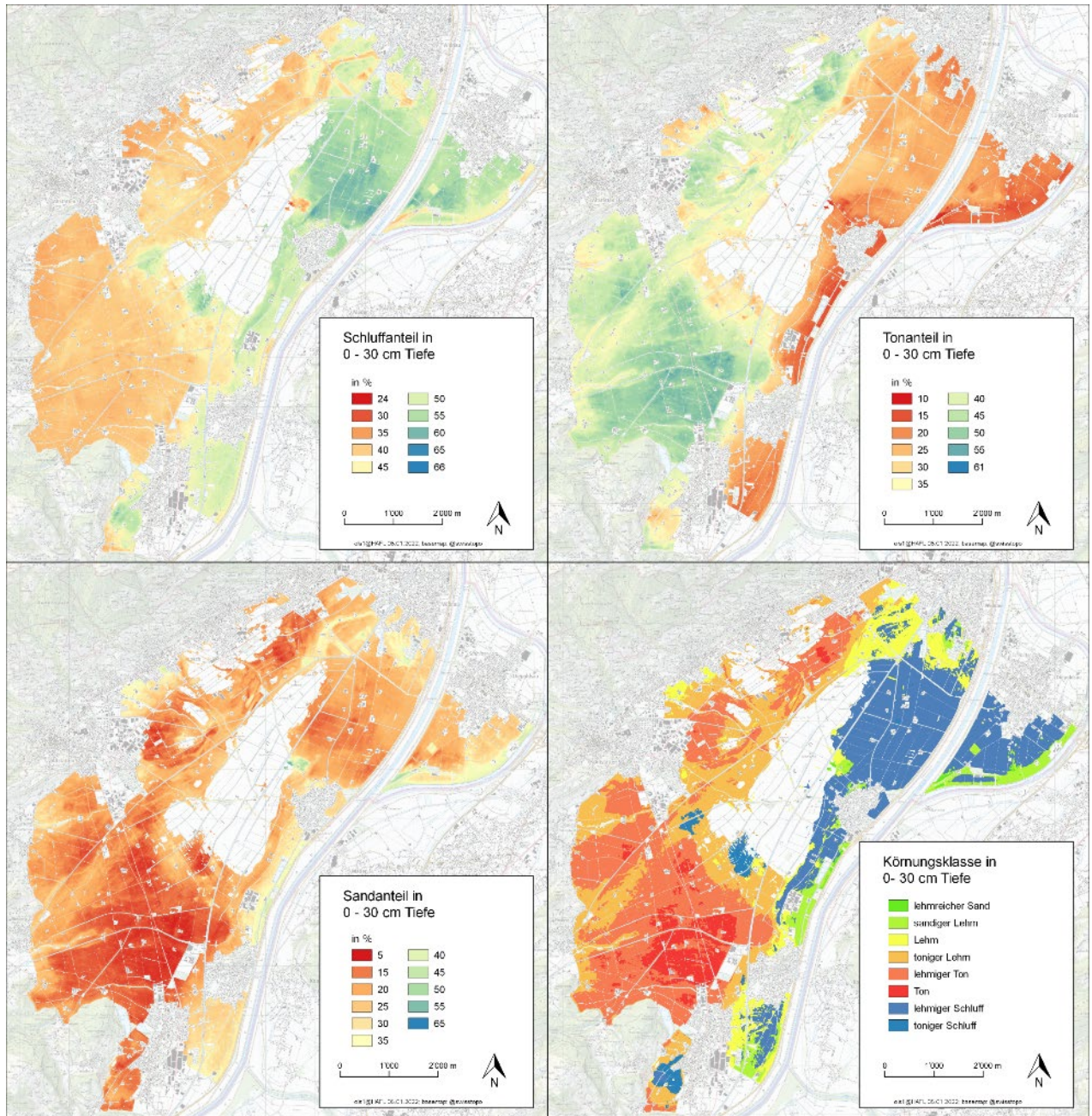


Abbildung 40: Übersicht der Anteile an der Feinerdekörnung der drei Korngrößen Schluff, Ton und Sand sowie der Körnungsklassen nach FAL24+ in einer Tiefe von 0 - 30 cm. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

Die Feinerdekörnung in den obersten 30 cm des Bodens zeigt eine Zweiteilung des Perimeters von Norden nach Süden. Die Bereiche, für die keine Feinerdekörnung modelliert wurden, enthalten zu viel zersetzt OS als das eine Schätzungen im Feld oder Laboranalysen möglich war. Ausser in einigen anthropogenen Auffüllungen und einzelnen Abschnitten nahe des Rheins sind die Sandgehalte im Perimeter aussergewöhnlich tief und die Schluff und oder Tongehalte aussergewöhnlich hoch.

Im Westen findet sich die Hauptbodenarten Ton und Lehm, im Osten die Hauptbodenarten Schluff und Sand. Der Bereich im Westen mit erhöhtem Tongehalt besteht aus Gebieten, die gegenüber dem Isenriet eine zumindest leichte Steigung aufweisen. Diese ist mal abrupt wie im Bereich des alten Verlaufs der Rietaach und mal sanft wie vom Bannriet Richtung Eichberg. Die in diesem Bereich abgelagerten Sedimente aus den umliegenden Erhöhungen unterscheiden sich nach Herkunftsort in ihrer Feinerdekörnung. Sedimente aus den um Altstätten gelegenen Moränen enthalten meist etwas weniger Ton. Die

Sedimente aus den Mergeln und Tonsteinen aus dem Hirschberg und dem Fährnerspitz im Westen sind insbesondere im südlichen Teil sehr tonreich.

Durch das Gefälle werden die Körner vom Hang weg meist etwas sortiert. Am Hangfuss und im Verlauf der ersten paar 100 Meter entlang der rezenten Bachläufe, nachdem sie in die Ebene des Rheintals erreicht haben, geht die Feinerdekörnung meist ins lehmige und der Boden ist teils auch skeletthaltig. Gut sichtbar ist dies entlang des ehemaligen Verlaufs der Rietaach, in deren Oberlauf bei Eichberg knapp über 30 % Ton vorhanden sind, bei Rebstein im Unterlauf die Tongehalte aber teils über 50 % steigen. Auch im westlichen Schwemmfächer zwischen Eichberg und der Eisenbahnlinie treten im oberen Teil noch Tongehalte unter 40 % auf, weiter unten bei abnehmendem Gefälle liegt der Tonanteil verbreitet über 50 %.

Der östliche Teil ist von Rheinsedimenten geprägt. Grundsätzlich haben sich in Senken, die entweder durch die Strömungsdynamik oder auch durch Sackung der Böden entstanden sind, Böden mit der Hauptbodenart Schluff gebildet. Entlang der rezenten Bänke des Rheines dominieren nördlich von Montlingen die Hauptbodenart Sand und südlich davon Sand und Lehm. Nördlich der organomineralischen Böden zeigen die Rheinsedimente Tonanteile von über 20 % im Oberboden, hier hat insbesondere auf der westlichen Seite des Binnenkanals auch in bedingten Massen eine Durchmischung des Substrates aus den Appenzeller Alpen und dem Rhein stattgefunden.

Vereinzelt ist durch das Einbringen von Material die Feinerdekörnung im Oberboden anthropogen verändert worden. Meist weisen die Flächen einen höheren Sandgehalt als umliegende Flächen auf. Weiter konnte die Feinerdekörnung für einige überschüttete Flächen in sonst sehr organischen Bereichen treffend vorhergesagt werden.

### 7.7.2.2 Feinerdekörnung im Unterboden

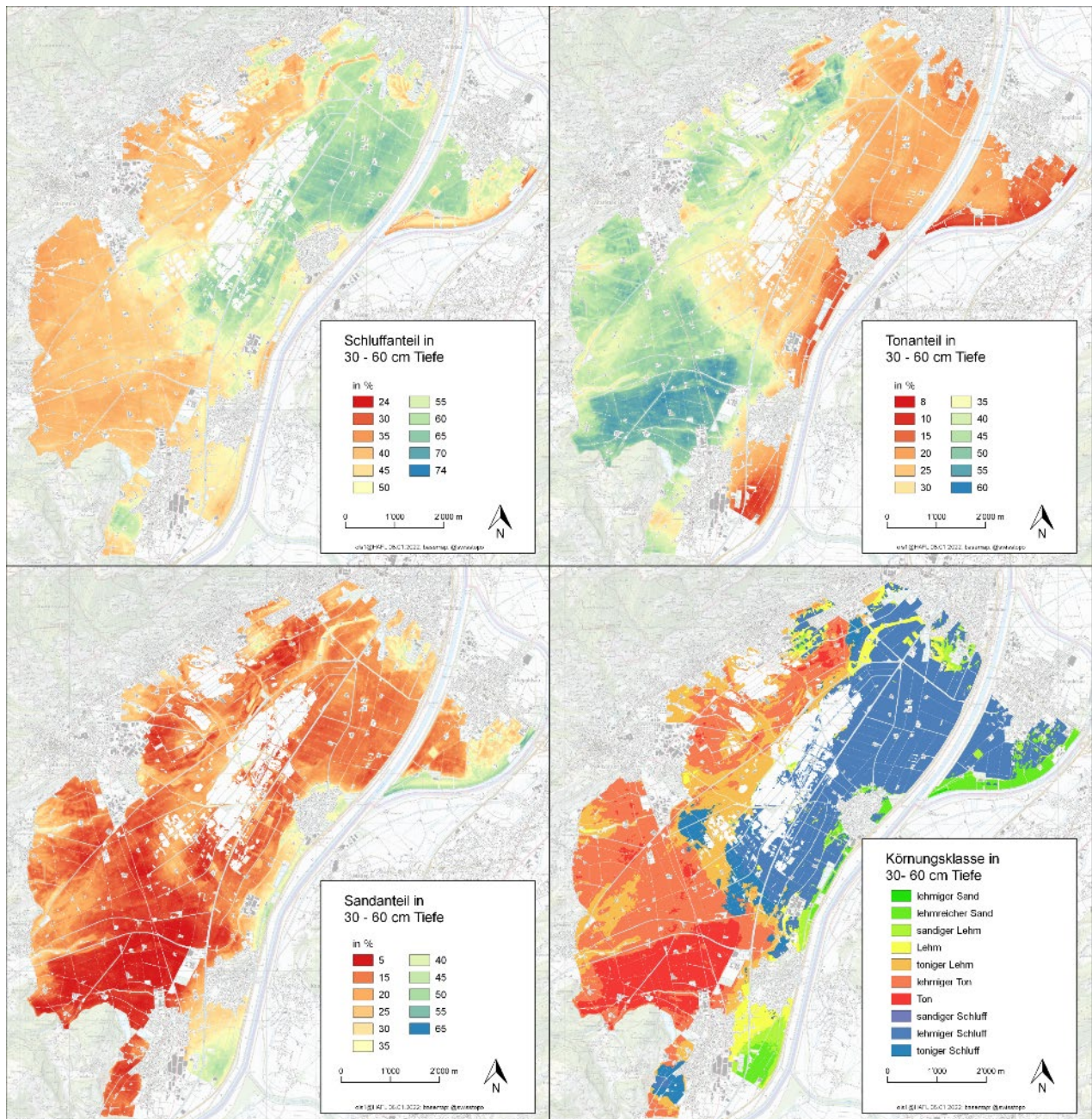


Abbildung 41: Übersicht der Anteile an der Feinerdekörnung der drei Korngrössen Schluff, Ton und Sand sowie der Körnungsklassen nach FAL24+ in einer Tiefe von 30 bis 60 cm. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

In einer Tiefe von 30 bis 60 cm zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Oberboden. Durch die weniger stark ausgeprägte Bodenbildung sind die durch die Ablagerung bedingten Korngrössenverteilungen aber akzentuiert. Das Substrat aus Sedimenten aus den umliegenden Appenzeller Alpen wird toniger und das Substrat aus Rheinsedimenten schluffiger respektive sandiger. Durch die auftretenden organomineralischen und alluvialen Zwischenschichten sowie den verminderten Zersetzungsgrad der OS ist das Gebiet, für das eine Feinerdekörnung modelliert werden konnte, nun grösser.

Entlang der Bänke des Rheines zeigt sich, dass die Senken mit Oberböden der Hauptbodenart Schluff ohne organische und organomineralische Anteile häufig von der Hauptbodenart Sand unterlegt sind, insbesondere südlich von Montlingen und entlang des alten Rheines in Diepoldsau.

Im Norden sind die Oberböden mit Hauptbodenart Lehm von schluffigen Unterböden unterlegt. Der Eintrag von Sedimenten aus den Appenzeller Alpen ist hier nicht mehr vorhanden. Allgemein nehmen in den Rheinsedimenten die Korngrössen gegenüber dem Oberboden zu.



Im Westen im Schwemmfächer zwischen Eichberg und der Eisenbahnlinie, liegt der Tongehalt südlich des Dürrenbachs bis zum Binnenkanal fast durchgehend über 50 %, der Sandgehalt übersteigt selten 15 %. Nördlich des Bachs setzt sich die Korngrössenverteilung aus dem Oberboden fort mit tonigem Lehm gegen den Hang hin und Bereichen mit über 50 % Ton nahe des Bannriets.

In den Bereichen mit organischem und organomineralischem Substrat findet sich fast ausschliesslich die Hauptbodenart Schluff. Zum grössten Teil bestehend aus lehmigem Schluff und gegen Westen im Bannriet auch aus tonigem Schluff.

### 7.7.2.3 Feinerdekörnung im Untergrund

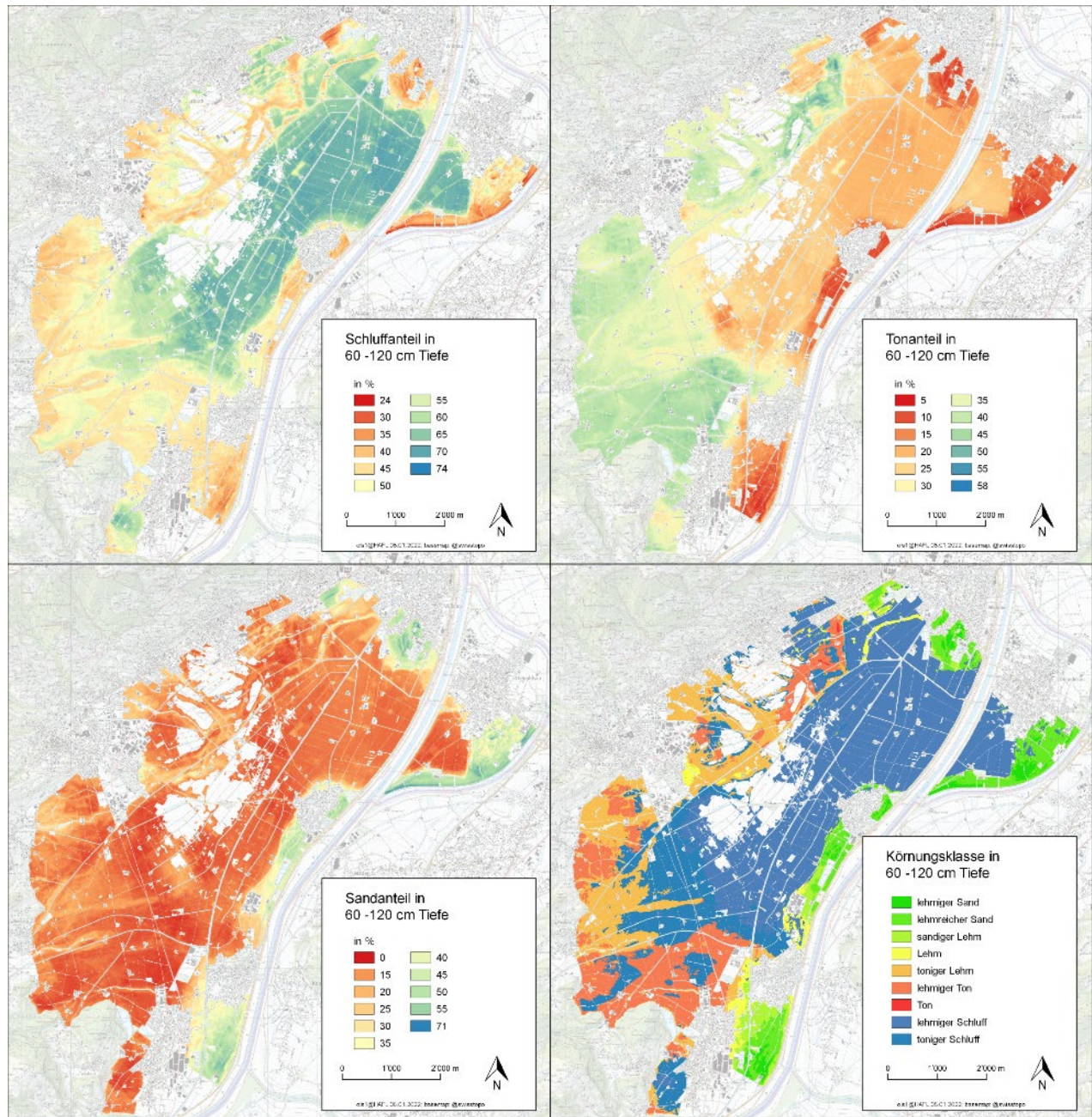


Abbildung 42: Übersicht der Anteile an der Feinerdekörnung der drei drei Korngrössen Schluff, Ton und Sand sowie der Körnungsklassen nach FAL24+ in einer Tiefe von 60 bis 120 cm. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

In einer Tiefe von 60 bis 120 cm setzt sich der Trend zur Dominanz grösserer Korngrössen fort. Entlang der Rheinbänke sind die sandigen Substrate nun durchgehend vom Perimeterrand im Osten bis zu den organomineralischen Bereichen vorhanden. Auch im Norden zeigt sich dasselbe Bild, sobald der Bereich mit erhöhter OS endet, dominiert die Hauptbodenart Sand. Durch die zunehmenden organomineralischen Zwischenschichten, konnte in dieser Tiefe in einem grösseren Teil des Perimeters die Feinerdekörnung modelliert werden. Es zeigt sich auch in dieser Tiefe, dass die Substrate mit erhöhten OS-

Gehalten stark mit der Hauptbodenart Schluff vergesellschaftet sind. Im Westen nehmen die Tongehalte gegenüber dem Unterboden meist markant ab. Unterhalb der tonigen Lagen findet sich in weiten Teilen schluffiges Rheinsediment. In erhöhten Lagen insbesondere zum Hangfuss hin dominieren immer noch tonige und lehmige Sedimente.

### 7.7.3 Vernässungsmerkmale

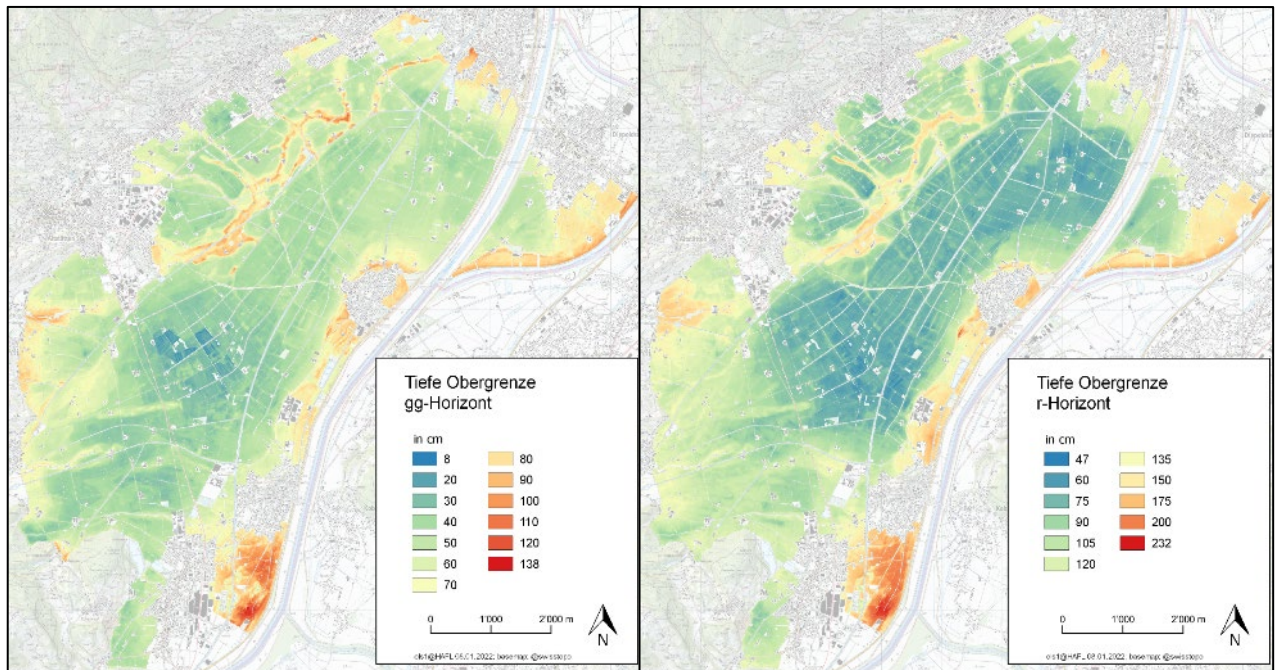


Abbildung 43: Karten der modellierten Obergrenze des obersten gg-Horizontes respektive r-Horizontes. Der r-Horizont beschreibt einen Bodenhorizont, der über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt ist. In weniger häufig wassergesättigten Horizonten sind in der grauen Matrix deutlich Rostflecken zu sehen, solche Horizonte werden als gg-Horizonte bezeichnet. Näheres dazu in Abschnitt 5.7. Zu beachten ist, dass die Farben auf den einzelnen Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

Die Vernässungsmerkmale im Perimeter sind durch die künstliche Wasserbewirtschaftung, insbesondere die Drainage, nivelliert. Das heisst Böden mit ähnlichem Substrat und ähnlicher Geländeform weisen im Perimeter auch einen sehr ähnlichen Wasserhaushalt auf.

Die Obergrenze des gg-Horizontes variiert zwischen 8 und 138 cm Tiefe. Es finden sich aber nur wenige Bereiche im Bannriet in denen die Obergrenze oberhalb 20 cm liegt. Dabei handelt es sich fast ausschliesslich um Naturschutzflächen. In einer etwa kreisrunden Fläche, die das Bannriet umfasst sind durchgehend gg-Horizont Obergrenzen oberhalb 40 cm zu finden. In den organischen und organomineralischen Böden im restlichen Perimeter liegt die Obergrenze je nach lokaler Geländeform und Drainageart zwischen 35 und 55 cm unter Terrain. Diese Vernässungsmerkmale sind meist durch Staunässe verursacht. Anders sieht es bei den mineralischen und mineralisch überdeckten Böden aus Sedimenten der Appenzeller Alpen aus. Im Westen, in den sehr tonigen Böden, liegt die Obergrenze des gg-Horizontes typischerweise um 40 cm. In den Böden mit einer günstigeren Feinerdekorung, führt die vorhandene Staunässe meist zu keinen ausgeprägten gg-Horizonten. Hier wird die Obergrenze des gg-Horizontes wiederum vom Grundwasser bestimmt und liegt typischerweise in 60 bis 75 cm Tiefe. In Kuppenlagen auf den ehemaligen Bachläufen liegen die gg-Horizont-Obergrenzen jeweils in einer Tiefe zwischen 80 und 100 cm. In den mineralischen Bänken aus Rheinsedimenten befindet sich die gg-Obergrenze bei hohem Sandanteil typischerweise zwischen 80 und 110 cm. Bei Schluffgehalten über 50 % nimmt der Stauwassereinfluss zu und die gg-Obergrenze bewegt sich um 70 cm.

Die Obergrenze des r-Horizontes variiert zwischen 47 und 232 cm. Im Bannriet und einigen vernässten Flächen beginnt der r-Horizont oberhalb 70 cm, ansonsten befindet sich die Obergrenze in den organischen und organomineralischen Böden meist bei etwa 70 bis 75 cm. In den mineralischen Böden aus Sedimenten der Appenzeller Alpen liegt die Obergrenze der permanenten Vernässung in Senken und bei hohen Tongehalten zwischen 90 und 110 cm. Bei Tongehalten über 40 % entstehen die ausgeprägten reduktiven Verhältnisse meist durch Haftwasser. Bei günstigerer Feinerdekorung liegt der r-Horizont meist in einer Tiefe unterhalb 120 cm und auf Kuppenlagen meist unterhalb 150 cm Tiefe. In den

mineralischen Bänken aus Rheinsedimenten befindet sich die r-Obergrenze durchgehend unterhalb 120 cm Tiefe, meist etwas unterhalb 150 cm.

### 7.7.4 Zersetzungsgrad

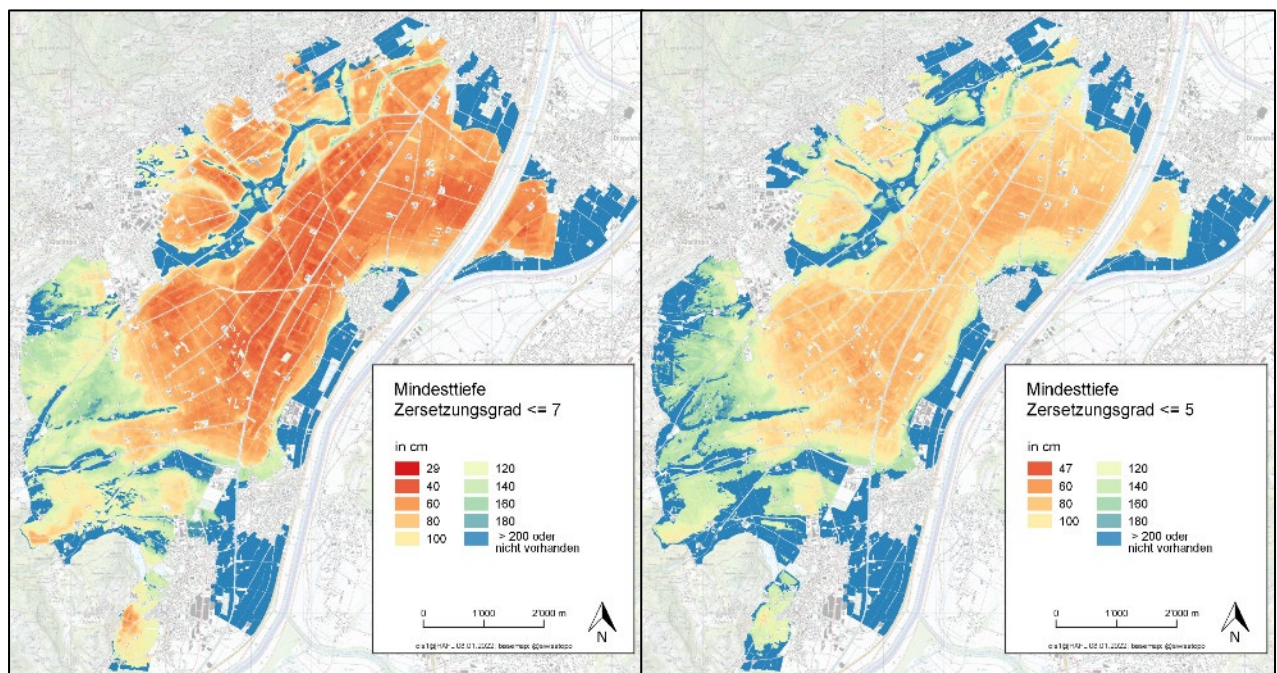


Abbildung 44: Tiefe des ersten Auftretens des Zersetzungsgrades 7 respektive 5 oder tiefer. Zu beachten ist, dass die Farben auf den beiden Karten unterschiedliche Wertebereiche darstellen.

Die modellierten Karten der Mindesttiefe der Zersetzungsgrade 5 und 7 zeigen, in welcher Form die OS vorliegt. In rein mineralischen Böden wurden keine Zersetzungsgrade aufgenommen, hier liegt die OS in abgebauter Form vor.

In den organischen und organomineralischen Böden tritt OS mit einem mittleren Zersetzungsgrad von 7 oder tiefer ab einer Tiefe von 35 bis 55 cm auf. Dabei handelt es sich meist um etwa die Tiefe des gg-Horizonts. In darüberliegenden Schichten wurde die OS durch den Luftsauerstoff bereits stark zersetzt. In mineralisch überdeckten Böden tritt mittel zersetzte OS erst entsprechend tiefer im Boden auf. Auffällig ist, dass Zersetzungsgrade auch in Gebieten vorhergesagt wurden, die keine organomineralische Substrate in den obersten 2 m enthalten, dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Feldaufnahmen, dass auch mineralische Substrate durch die alluviale Ablagerung vereinzelt unzersetzte OS enthalten.

Schwach zersetzte OS mit einem Zersetzungsgrad von 5 oder tiefer tritt im Perimeter frühestens in einer Tiefe von 47 cm auf. Die Grenze korreliert stark mit dem r-Horizont. In ausschliesslich aus mineralischem Substrat bestehenden Böden, sind Bereiche mit schwach zersetzter OS sehr selten. Im flachtorigen Bereich im Norden kommen keine so tiefen Zersetzungsgrade vor, hier liegt die OS meist in stark und teils mittel zersetzter Form vor.

Diese Karte ist insbesondere für die Beurteilung der Drainagetiefe interessant. Wenn in Zukunft die Torfsackung gestoppt oder zumindest stark verlangsamt werden soll, ist es zu vermeiden, dass durch eine tieferlegung der Drainage Substrat mit einem Zersetzungsgrad kleiner oder gleich 5 oxidativen Bedingungen ausgesetzt wird.

## 7.7.5 PNG

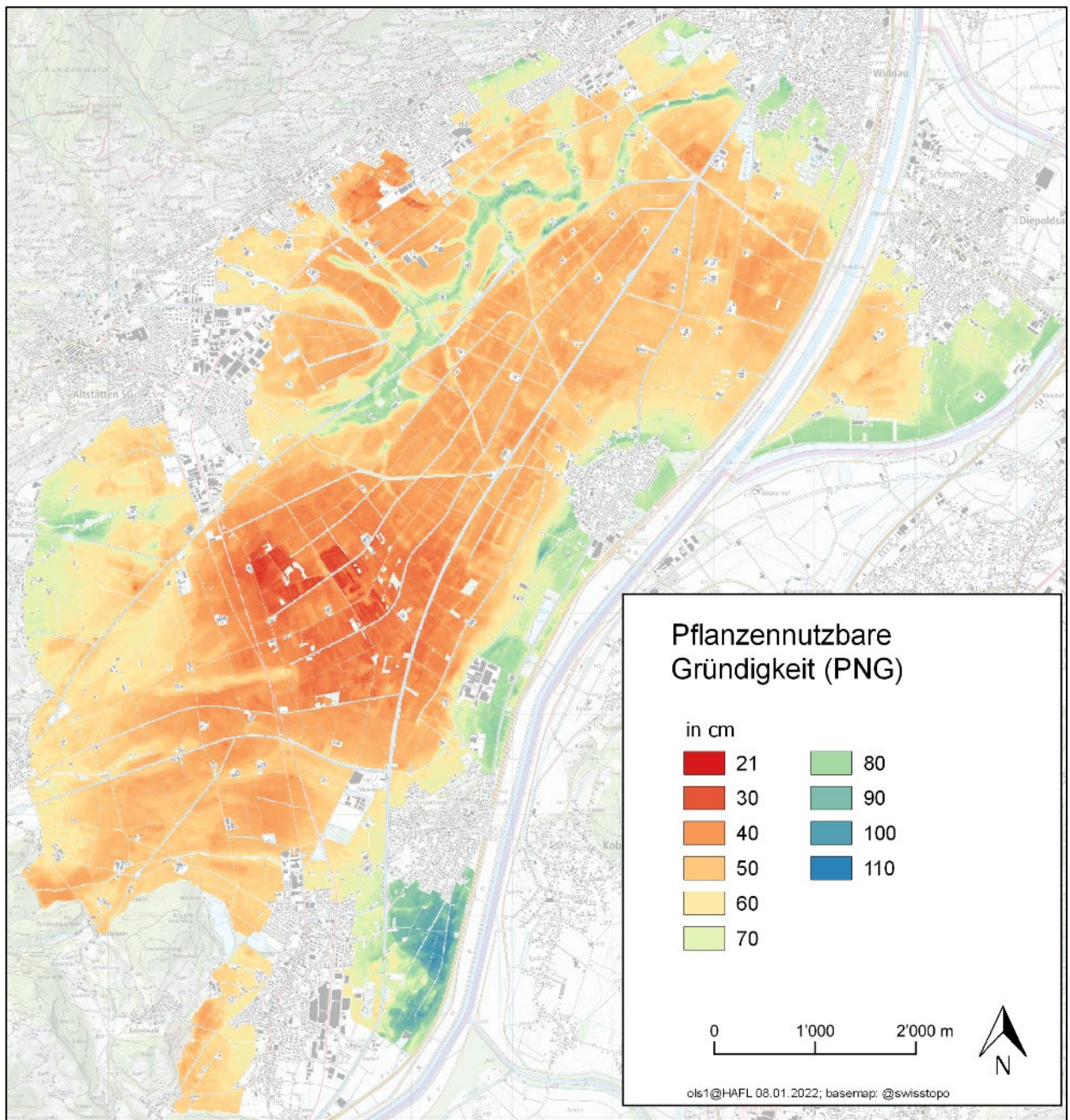


Abbildung 45: Modellierte Karte der Pflanzennutzbaren Gründigkeit hergeleitet aus standardisierten Faktoren.

Die pflanzennutzbare Gründigkeit floss nicht in die Klassierung der synthetischen Bodentypen mit ein, da sie aber eine zentrale Grösse in FAL24+-Kartierungen darstellt, wurde sie modelliert und soll hier aufgeführt werden. Die Modellierung mit den im Feld erhobenen PNG-Faktoren zeigte ein leicht besseres Ergebnis als die Modellierung mit den automatisch aus den Horizonteigenschaften generierten Faktoren. In der Folge wurde der erste Datensatz weiterverwendet.

Entlang der Bänke des Rheins beträgt die PNG typischerweise etwa 80 cm, südlich von Montlingen auch verbreitet über 100 cm. Auf den Ablagerungen der ehemaligen Rietaach und deren Nebenbächen erreicht die PNG bis 90 cm. Im Schwemmfächer zwischen Altstätten und Oberriet liegt die PNG in den lehmigeren Böden meist über 50 cm und oft auch über 60 cm, in den tonigeren Böden vor allem im Süden und in Senken liegt die PNG meist knapp über 40 cm.

Im Bannriet findet sich durchgehend eine PNG von unter 50 cm, häufig auch unter 40 cm. In den organischen Böden mit wenigen organomineralischen Anteilen im Isenriet liegt die PNG verbreitet unter 50, in den organomineralischen Böden meist knapp über 50 cm.

## 7.8 Ergebnisse der Validierung

Die Validierungsstatistiken der unabhängigen Validierung zeigten für drei Zielgrössen ein Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) unter 0.6 und damit ein Ergebnis unterhalb den Genauigkeitsansprüchen des Projektes (siehe *Tabelle 7*). Die Modellierung der OS in den obersten 30 cm in mineralischem Substrat wurde daher nicht mehr weiterverwendet. Die erwartungsgemäss schlechte Vorhersage der anthropogenen Überdeckung ist auf die geringe Datenlage und die chaotischen Muster zurückzuführen. Im Perimeter ist nur ein geringer Anteil der Böden mächtig anthropogen überschüttet. Die Zielgrösse zeigt aber jenseits der Mächtigkeit gut auf, wo anthropogene Überschüttungen vorhanden sind. Die unterdurchschnittliche Vorhersage der Obergrenze des gg-Horizontes ist auf die schwierige Ansprache von Vernässungsmerkmalen in organischen Böden zurückzuführen. Die restlichen Zielgrössen wurden mit einer ausreichenden bis sehr guten Genauigkeit vorhergesagt. Weitere Informationen zur Modellgüte finden sich in Anhang I.10, I.11 und I.12.

*Tabelle 7: Übersicht der modellierten Karten und die dazugehörigen Statistiken der unabhängigen Validierung. Die Farben orientieren sich am Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) der jeweiligen Zielgrössen: Unbefriedigend (orange):  $< 0.5$ ; befriedigend (gelb):  $< 0.6$ ; ausreichend (hellgrün):  $< 0.7$ ; gut (grün):  $< 0.8$ ; sehr gut (dunkelgrün):  $\geq 0.8$ . Lesebeispiel: Die OS in 0-30 cm Tiefe wurde auf 4.2 % OS genau vorhergesagt, dabei wird 83 % der Streuung in den Validierungsdaten vom Modell erklärt.*

Zielgrösse	Standardabweichung, Genauigkeit in Einheit	$R^2$ , Modellgüte (1=Perfekt, 0=Schlecht)
OS 0-30 cm Tiefe (in %)	4.18	0.82
OS 0-60 cm Tiefe (in %)	5.82	0.82
OS 0-90 cm Tiefe (in %)	6.39	0.85
OS 30-120 cm Tiefe (in %)	7.92	0.87
OS 30-60 cm Tiefe (in %)	8.98	0.80
OS 60-90 cm Tiefe (in %)	11.26	0.80
OS 90-120 cm Tiefe (in %)	12.38	0.79
OS 30 cm Tiefe bis r-Horizont (in %)	8.42	0.83
OS 60 cm Tiefe bis r-Horizont (in %)	11.25	0.79
Mächtigkeit OS<45% bis r-Horizont (in cm)	20.25	0.82
Mächtigkeit OS≥30% bis r-Horizont (in cm)	15.22	0.67
Mächtigkeit OS>10% bis r-Horizont (in cm)	17.89	0.73
Mächtigkeit OS<5% bis r-Horizont (in cm)	19.06	0.88
Mächtigkeit OS≥30% bis 80 cm Tiefe (in cm)	11.7	0.76
OS 0-30 cm Tiefe, wenn OS<10% (in %)	1.42	0.49
Mindesttiefe OS≥30% (in cm)	20.31	0.73
Mindesttiefe OS≥10% (in cm)	21.49	0.78
Mindesttiefe Von Post <5 (in cm)	19.96	0.60
Mindesttiefe Von Post <7 (in cm)	19.8	0.65
Ton 0-30 cm Tiefe (in %)	6.90	0.77
Ton 30-60 cm Tiefe (in %)	7.46	0.78
Ton 0-60 cm Tiefe (in %)	6.74	0.79
Ton 0-90 cm Tiefe (in %)	6.20	0.80
Ton 60-120 cm Tiefe (in %)	6.17	0.74
Schluff 0-30 cm Tiefe (in %)	6.13	0.67
Schluff 30-60 cm Tiefe (in %)	7.06	0.69
Schluff 0-60 cm Tiefe (in %)	7.02	0.65
Schluff 0-90 cm Tiefe (in %)	6.70	0.70
Schluff 60-120 cm Tiefe (in %)	8.20	0.66
Sand 0-30 cm Tiefe (in %)	7.93	0.61
PNG (in cm)	9.62	0.72
Tiefe oberster r-Horizont (in cm)	17.76	0.77
Tiefe oberster gg-Horizont (in cm)	15.37	0.52
Mächtigkeit Anthropogenität (in cm)	9.31	0.39

## 8 Kombinierte Bodeneigenschaften

### 8.1 Prinzip

Die bisher aufgezeigten modellierten Karten der Bodeneigenschaften geben Aufschluss über die Eigenschaften der Böden im Perimeter. Im Folgenden werden Ableitungen daraus aufgezeigt und eine Möglichkeit vorgeschlagen, wie daraus eine solide Entscheidungsgrundlage für die Priorisierung möglicher Bodenverbesserungsmassnahmen geschaffen werden kann. Denn das anfallende Material aus dem Projekt Rhesi wird nicht ausreichen, um alle LN mit Bewirtschaftungsdefiziten im Perimeter aufzuwerten. Abgesehen davon, dass dies auch nicht zielführend wäre, da die Böden damit auf ihre Produktionsfunktion reduziert würden. Das vorgeschlagene Vorgehen zielt darauf ab, die gegenwärtige Fruchtbarkeit der Böden im Perimeter möglichst effizient zu erhalten oder zu erhöhen und gleichzeitig negative Nebeneffekte zu reduzieren. Dies ist jeweils an eine Erhöhung der pflanzennutzbaren Gründigkeit gebunden. Es sind auch andere Gewichtungen von Zielen denkbar mit anderen Kombinationen und Bewertungen der Bodeneigenschaftskarten.

### 8.2 Synthetische Bodentypen

Die modellierten Karten zeigen jeweils eine Zielgrösse, also eine Bodeneigenschaft. Um Aussagen über eine zukünftige Nutzung oder Massnahmen treffen zu können, müssen diese Bodeneigenschaften kombiniert und zusammengefasst werden. Fast alle Fragestellungen des Projektes lassen sich dabei über den OS-Gehalt, den Zersetzungsgrad und die Feinerdekörnung in verschiedenen Tiefen sowie den Wasserhaushalt des Bodens klären. Um diese zusammengefassten Eigenschaften zu charakterisieren wurden 45 synthetische Bodentypen basierend auf ihrer Feinerdekörnung und ihrem OS-Gehalt in verschiedenen Tiefen definiert. Weiter wurden diese synthetischen Bodentypen aufgrund ihres Wasserhaushaltes und des Zersetzungsgrades differenziert. Der Begriff synthetisch beschreibt dabei die Tatsache, dass es sich nicht um offizielle Bodentypen aus einer Klassifikation handelt, sondern um Konzepte, die die Arbeitsgrundlage für die Bewertung im Projekt bilden.

Die synthetischen Bodentypen bestehen aus vier Blöcken von je 30 cm von 0 bis 120 cm Tiefe. Im Perimeter ist die Obergrenze des r-Horizontes in Böden mit organischen Horizonten oder Horizonten mit erhöhten organischen Gehalten stets oberhalb dieser Tiefe. Sackungsrelevante Eigenschaften werden also durch dieses Schema abgedeckt.

Die Feinerdekörnung wurde zu den vereinfachten Körnungsklassen zusammengefasst mit Sand (0 - <15% Ton; 0 - <50 % Schluff), Lehm (15 - <40 % Ton; 0 - <50 % Schluff), Ton (40 - 100 % Ton; 0 - <50 % Schluff), Schluff (0 - <50 % Ton, 50 - 100 % Schluff). Dadurch lassen sich die Hauptprobleme der Feinerdekörnung im Perimeter abbilden: In Tonböden Verdichtung und verminderte Infiltration, in Schluffböden Verschlammung und in Sandböden verminderte Gefügebildung. Eine Übersicht der Herleitungsbedingungen aus den modellierten Karten ist in Anhang I.13 zu finden.

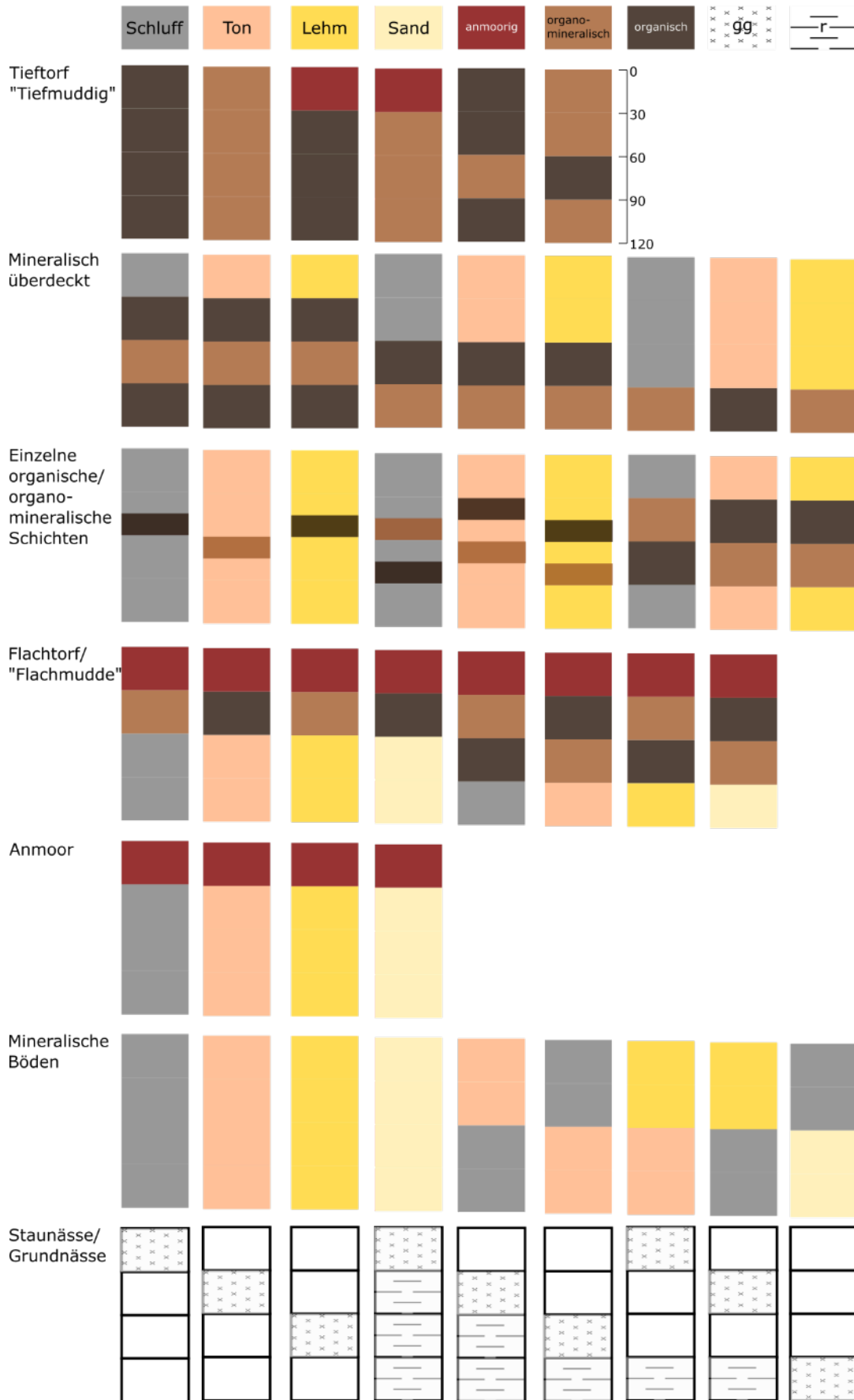


Abbildung 46: Schema der synthetischen Bodentypen. Jeder Block repräsentiert einen vertikalen 30 cm-Abschnitt im Boden. Die Farben repräsentieren die vereinfachten Körnungsklassen sowie die OS-Gehalte. Die Schraffuren zeigen die Lage von gg- und r-Horizonten, diese können mit den verschiedenen Farben kombiniert werden. Es handelt sich dabei um vereinfachte Zusammenfassungen der Varianz im Perimeter, in der Realität sind die Bodenprofile meist um einiges komplexer.

## 8.3 Bewertungsmatrix

### 8.3.1 Prinzip

Die synthetischen Bodentypen wurden hinsichtlich ihrer Probleme für die landwirtschaftliche Nutzung und ihres Sackungspotential bewertet, diese Faktoren bilden die Problemseite der Gesamtbewertung. Auf der Massnahmenseite wurden anhand von drei Begleitfaktoren einer Massnahme sowie der Nachhaltigkeit der Torfkonservierung eine Summe gebildet. Die Gesamtbewertung bildete dann die Differenz zwischen dem vorhandenen Problemdruck und der Möglichkeit einer Lösung und zeigt auf, wie effizient eine Massnahme auf einer Parzelle sein wird. Weiter wurden mögliche Massnahmen zur Bodenverbesserung eingegrenzt (detaillierte Bewertungstabellen in Anhang I.14).

Für jede Problem- und Massnahmenkategorie wurden Werte von 1 bis 5 zugewiesen, respektive 1 bis 6, wenn eine grosse Variation der Ausprägungen vorhanden war. Ein Wert von 1 bezeichnet jeweils ein grosses Problem oder eine ungeeignete Massnahme. Ein Wert von 5 respektive 6 steht für ein nicht Vorhandensein eines Problems oder eine sehr passende Massnahme.

### 8.3.2 Problembereiche



Abbildung 47: Beispiel zweier für den Perimeter typischer, problematischer Oberbodenkörnungen. Links ein Boden mit weit über 50 % Ton im Oberboden. Unterhalb der Pflugschicht hat sich ein Stauhorizont gebildet, der im oberen Bereich rostfleckig ist und in etwa 40 cm Tiefe grau wird. Die Vernässung durch Stauwasser ist stark ausgeprägt. Rechts ein Boden mit weit über 50 % Schluff, dessen Oberboden verschlämmt ist. Das Gefüge ist zu einer strukturarmen Masse zusammengedrückt worden und an der Oberfläche hat sich ein schwer durchlässiger Film gebildet. Die Infiltration von Wasser ist vermindert und die Durchwurzelbarkeit erschwert.



Abbildung 48: Stromleitung im Gebiet Wegscheid westlich der Eisenbahnlinie Altstätten-Oberriet. Gut sichtbar ist die Sackung des Terrains am Fundament im Vordergrund und dem Dohlendeckel rechts hinten. Hier ist das organische Substrat 75 cm mit alluvialem Ton überdeckt, die Sackung ist dadurch gebremst, aber nicht gestoppt. Im Hintergrund ist ein ehemaliger Bachlauf zu sehen, der 2 m über das vordergründige Terrain hinausragt. Die Masten auf dem Rücken zeigen keine Sackungsspuren, hier ist das organische Substrat bereits mit mehr als 2 Meter mineralisch überdeckt.



Die in der Bewertungsmatrix aufgenommenen Problemkategorien umfassten die Feinerde (Bestandteile des Bodens < 2mm) jeweils im Ober- sowie Unterboden, die Stau- sowie Grundnässe sowie die Sackung des Bodens.

Die Bewertungsklassen der Feinerde wurden gemäss Tabelle 9.3b der FAL24 gebildet mit leichten Anpassungen an die lokalen Gegebenheiten. So wurden sehr hohe Sandgehalte weniger abgestraft und sehr hohe Schluffgehalte etwas schlechter bewertet. Denn im Perimeter finden sich Schluffgehalte, die meist weit über 50 % der Feinerdekörnung liegen, die die Klassen toniger Schluff und lehmiger Schluff bilden. Weiter sind hohe Sandgehalte meist unproblematisch da im Perimeter Trockenheit kein zentrales Problem darstellt. Der Feinerde von vemulmtem oder vererdetem Oberböden sowie Unterböden mit organischem Gefüge wurde die tiefste Bewertungsklasse zugewiesen.

Die Vernässung wurde anhand der Obergrenze, der gg- und r-Horizonte bewertet. Sie orientiert sich an den Klassengrenzen der R, I und G Untertypen der FAL 24+.

Die Beurteilung der Sackung erfolgte anhand einer Formel, die die organische Substanz über dem r-Horizont kumulierte. Für mineralische Überdeckungen wurde jeweils pro 30 cm ein Faktor von 0.3 abgezogen. Wenn die Obergrenze des Zersetzungsgrades  $\leq 7$  oberhalb von 70 cm Tiefe lag, wurde pro 10 cm über 70 cm Tiefe ein Faktor von 0.1 dazugerechnet. Böden ohne organomineralische Schichten wurde ein Sackungspotential von 0 zugewiesen. Es deutet einiges darauf hin, dass auch diese Böden bei einer künstlichen Entwässerung sacken, die Raten sind jedoch extrem tief (Leifeld et al. 2019; Schipper et al. 2017). Am Ende wurden alle Werte auf einer Skala von 1 - 6 normalisiert. Die Klassen orientieren sich dabei an erwarteten Sackungsraten wie sie in der Literatur zu finden sind und der Menge an vorhandener OS (Fell et al. 2015; Grzywna 2017; Regan et al. 2019; Schipper und McLeod 2002).

$$OS_{total} * E * F = Sackungspotential$$

$OS_{total}$  = Ø OS – Gehalt in % bis zum r – Horizont  
 E = Faktor mineralische Überdeckung  
 F = Faktor Zersetzungsgrad

### 8.3.3 Massnahmen

Auf der Massnahmenseite wurden mögliche Limitierungen und Probleme während Bodenverbesserungen bewertet. Diese umfassten die Bodenverdichtung, die mögliche Mächtigkeit einer Überschüttung, die nachhaltige Konservierung der OS sowie die Dauer einer stabilen Gefügebildung respektive Nachfolgebewirtschaftung. Die nachhaltige Konservierung der OS umschreibt dabei, wie gut die vorhandene OS nach einer Massnahme vor Zersetzung geschützt wird und ob der Schutz nun höher ist. Die höchsten Werte werden entsprechend in Böden erzielt, die in den oberen 30 - 90 cm wenig OS und darunter viel OS enthalten.

### 8.3.4 Grenzen möglicher Massnahmen

Nun wurden noch Randbedingungen ausgeschieden. Zum einen wurde ausgeschieden in welchen Gebieten Überschüttungen mit welcher Feinerdekörnung überhaupt sinnvoll sind. Dabei soll die momentane Feinerdekörnung einer Parzelle nicht verschlechtert werden, vielmehr sollte nur Material mit einer für die landwirtschaftliche Nutzung besseren oder gleich guten Feinerdekörnung eingebracht werden. Die dafür verwendete Klassierung ist nebenstehender Tabelle zu entnehmen, daraus wird ersichtlich, dass im Allgemeinen die Fruchtbarkeit in Böden mit Körnungsklassen sandiger Lehm und Lehm als am höchsten bewertet wird und in ungleichmässigen Korngrössenverteilungen abnimmt. Es sollte demnach bei einer Überschüttung auf eine Körnung in der Hauptbodenart Lehm hingearbeitet werden.

Als mögliche Massnahmen wurden Überschüttungen mit Sand, Ton, Lehm oder Schluff sowie Tiefspaten ohne Überschüttung geprüft.

Tabelle 8: Bewertung der verschiedenen Feinerdekörnung und organischer Feinerde nach ihrer landwirtschaftlichen Eignung. 6 = sehr hoch; 1 = sehr tief

Feinerde	Körnungs-klasse	Bewertung
Sand	1	3
schluffiger Sand	2	4
lehmiger Sand	3	5
lehmreicher Sand	4	5
sandiger Lehm	5	6
Lehm	6	6
toniger Lehm	7	4
lehmiger Ton	8	2
Ton	9	1
sandiger Schluff	10	3
Schluff	11	2
lehmiger Schluff	12	3
toniger Schluff	13	1
Organisch	-	1

### 8.3.5 Anthropogenität

Natürlich gewachsene Böden müssen geschützt werden, ihre standortgerechte Ausprägung bildet die Grundlage von Ökosystemen und genetischer Vielfalt, die Produktionsfunktion ist dabei nur eine von mehreren Funktionen. In der Folge sollten nur bereits anthropogen irreversibel veränderte Böden überschüttet oder tiefgespatet werden. Durch die wasserbaulichen Massnahmen wurden die Bodenbildungsprozesse und -eigenschaften fast aller Böden im Perimeter nachhaltig und fundamental verändert. In mineralischen Böden ist diese Veränderung jedoch reversibel und weniger umfassend, bei einer Wiedervernässung und einem Wiedereinsetzen alluvialer Ablagerungsprozesse könnten sie bald wieder ihre ursprüngliche Ausprägung erlangen. In organischen Böden ist jedoch ein Teil des Substrates verschwunden, ein weiterer Teil ist in seiner Struktur, Zusammensetzung und seinem Nährstoffhaushalt fundamental verändert. Dabei handelt es sich um eine irreversible anthropogene Veränderung. Es wurde ein Gebiet ausgeschieden, dass mindestens einen Horizont mit über 10 % OS über dem r-Horizont enthält, in diesen Böden ist zumindest ein Teil des Aufbaus durch die wasserbaulichen Massnahmen nachhaltig anthropogen verändert worden. In landwirtschaftlichen Böden ausserhalb dieses Bereiches sollten keine Bodeneingriffe unternommen werden, die über die herkömmliche Bewirtschaftung hinaus gehen, insofern dort keine andere tiefgreifende anthropogene Veränderung stattgefunden hat.

### 8.3.6 Gesamtbewertung

Am Ende wurden die einzelnen Faktoren miteinander nach folgendem Schema verrechnet:

$$\frac{(D * 3 + E + F + G)}{(A * 5 + B + C)} = \text{Gesamtbewertung}$$

*Problemseite:*

*A = Sackungspotential*

*B = Feinerdeproblem*

*C = Vernässungsproblem*

*Massnahmensseite:*

*D = Nachhaltige Konservierung der OS*

*E = Verdichtungsrisiko*

*F = Mögliche Mächtigkeit/Tragfähigkeit*

*G = Gefügebildung/Nachfolgebewirtschaftung*

Die Bewertung wurde am Ende auf eine Skala von 1 bis 6 normalisiert, wobei für nicht-anthropogene Bereiche eine 0 vergeben wurde. Die nachhaltige Konservierung von möglichst viel OS ist das zentrale Element für die Bewahrung der Bodenfruchtbarkeit im Perimeter. Um dem Gerecht zu werden, wurde dieser Faktor in der Gesamtbewertung mit 3 multipliziert. Somit erhält dieser Faktor dasselbe Gewicht wie die Summe der Erschwernisse einer Massnahme. Da das Sackungspotential der zentrale Faktor für die zukünftige Bodenfruchtbarkeit bildet, wurde dieser Faktor bei der Addierung aller Probleme mit 5 multipliziert. Somit ist dieser Faktor mehr als doppelt so stark gewertet wie eine Kombination aus Vernässung und Feinerde. Zu beachten ist, dass eine Massnahme nur durchgeführt werden kann, wenn die Zielfläche für diese als grundsätzlich geeignet ist.

Im Folgenden wird von einem Standardvorgehen ausgegangen, wenn von Überschüttungen die Rede ist. Dabei handelt es sich um das Aufbringen von mineralischem strukturiertem Ober- oder Unterboden-Substrat, dass in den bestehenden Oberboden eingespatet wird und zu einer Terrainerhöhung von maximal 30 cm in gesetztem Zustand führt. Wenn von grösseren Mächtigkeiten die Rede ist, sind damit Überschüttungen mit Abtrag des Ober- und Unterbodens, Einbau von unverschmutztem mineralischem Material und anschliessender Rekultivierung gemeint.

## 8.4 Karten

### 8.4.1 Einige Beispiele von Darstellungen und Ableitungen für Grössen aus der FAL24+

Neben den für die Projektziele benötigten Kombinationen der Bodeneigenschaftskarten sind je nach Fragestellung andere Kombination und Darstellungsarten denkbar. Sei dies durch Einfärben der Bodeneigenschaftskarten in gewünschten Klassen oder durch die rechnerische Kombination mehrerer modellierter Karten. Da gegenwärtig die Darstellung von Bodeninformation gemäss den Vorgaben der FAL24+ in der Schweiz die Norm ist, werden im Folgenden ein paar Beispiele für die Darstellung von Grössen aus dieser aufgeführt.

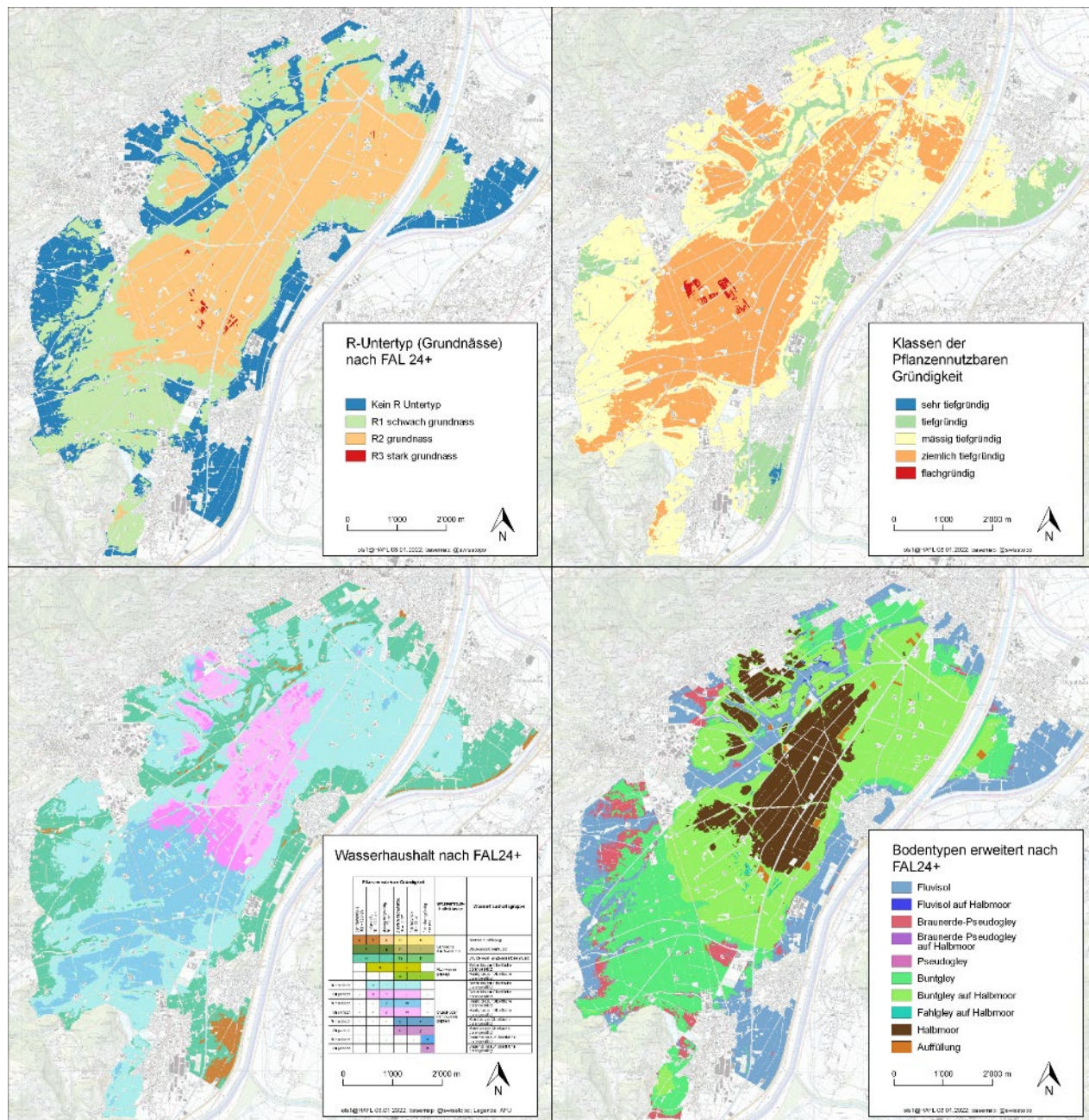


Abbildung 49: Darstellung verschiedener Grössen aus der FAL24+.

Oben links: Modellierter Karte des r-Horizontes eingefärbt in den Klassen des Untertyps «R», dieser zeigt in 5 Klassen an, wie tief der r-Horizont liegt und ist relevant für eine Polygonabgrenzung.

Oben rechts: Modellierter Karte der PNG eingefärbt in in den Gründigkeitsklassen der FAL24+, diese bilden eine der Grundlagen für die Bewertung des Wasserhaushaltes.

Unten links: Karte des Wasserhaushaltes abgeleitet aus den modellierten Karten des r-sowie gg-Horizontes, der PNG und des Anteiles der Horizonte mit OS  $\geq 30\%$  in den ersten 80 cm. Einfärbt nach den Vorgaben der FAL24+, wie auch die Bodeninformation des Kantons St. Gallen auf dem Geoportal.

Unten rechts: Bodentypen nach FAL24+ erweitert durch Doppelnennungen mit «auf». Abgeleitet aus der Kombination verschiedener modellierter Karten von Bodeneigenschaften.

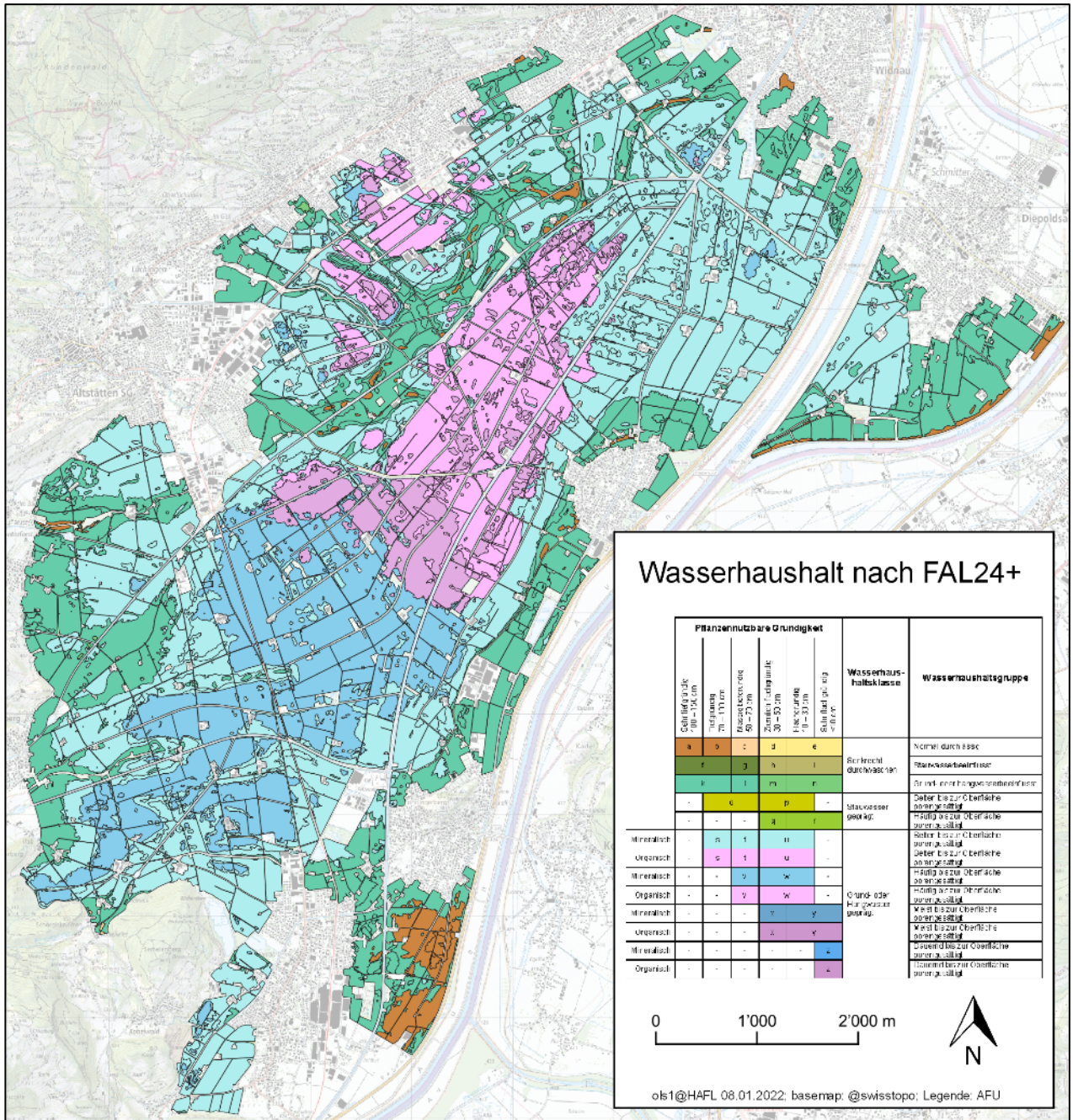


Abbildung 50: Aus Rasterkarten lassen sich Polygonkarten ableiten und somit in eine für Bodeninformation gewohntere Darstellungsart überführen. Abgebildet ist eine Polygonkarte des Wasserhaushaltes eingefärbt nach den Vorgaben der FAL24+, die ursprüngliche Rasterkarte ist in vorhergehender Abbildung 49 zu sehen. Nach der Umwandlung in Polygone wurden deren Ränder etwas abgerundet und alle Objekte kleiner 300 m<sup>2</sup> herausgeglättet. Die Polygone sind jeweils nach Buchstaben des Wasserhaushaltes abgegrenzt, eine weitere Abgrenzung nach den Kriterien der FAL24+ wäre auch möglich, daraus würden jedoch sehr kleine Polygone resultieren. Da streng nach den Vorgaben der FAL24+ klassiert wurde, sind Hinweise auf organische Böden nun auf das Gebiet ohne mineralische Deckschicht beschränkt.

## 8.4.2 Synthetische Bodentypen

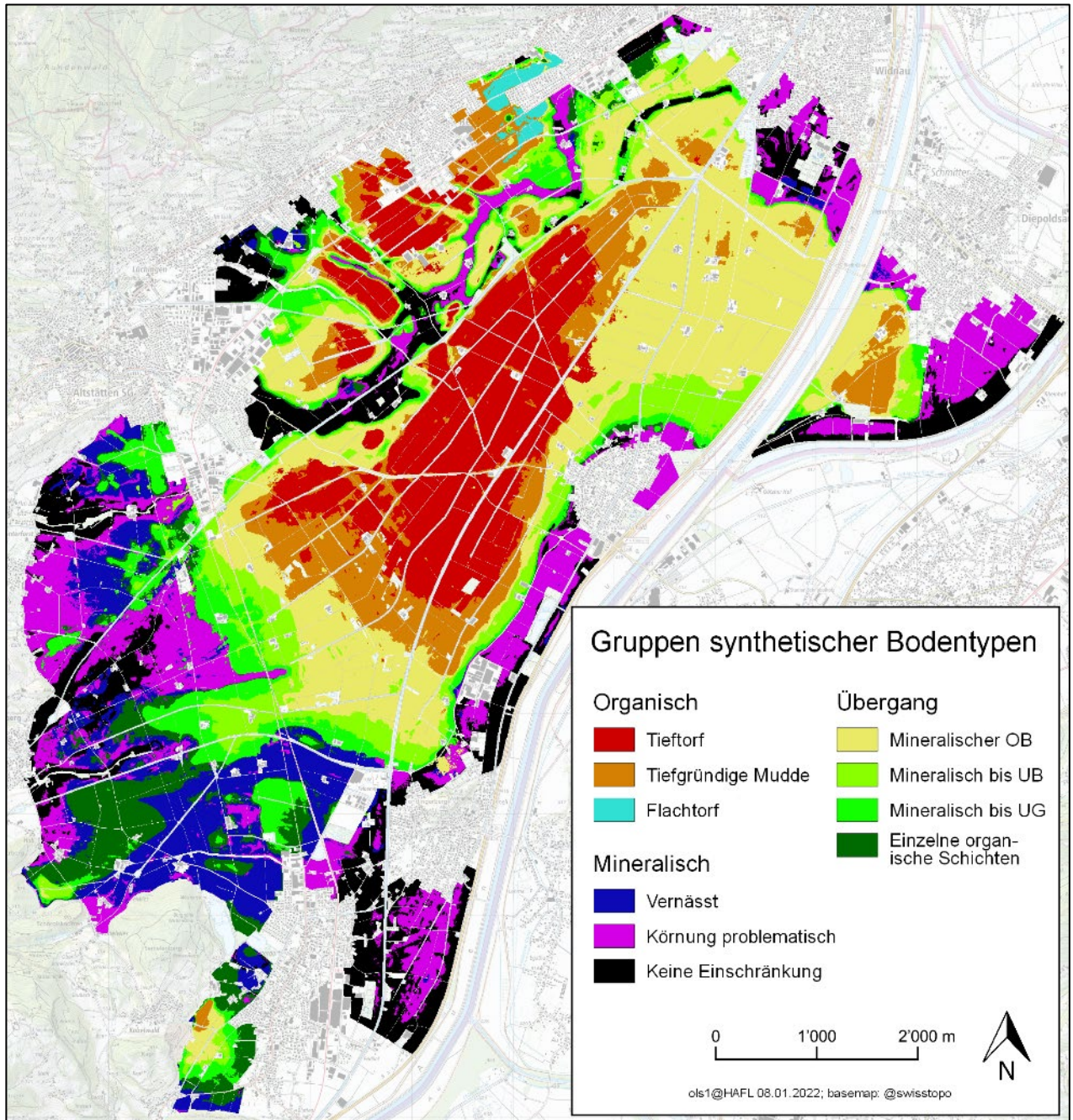


Abbildung 51: Vereinfachte Übersicht der synthetischen Bodentypen.

Im Perimeter kommen alle synthetischen Bodentypen vor. Während einige nur sehr vereinzelt auftreten wie z. B. flachtorfartige Böden, sind andere sehr verbreitet wie z. B. organische Böden mit einer mineralischen Überdeckung im Oberboden.

Die Bänke des Rheines enthalten ausschliesslich mineralische Böden, diese haben etwa zu gleichen Anteilen Nutzungseinschränkungen durch erhöhte Schluffgehalten und keine Einschränkungen durch Feinerdekörnung und Vernässung. Nur auf wenigen ha in Senken im Gebiet Losern stellt die Vernässung das Hauptproblem dar. Von den Bänken in die Ebene sind die mineralischen Böden immer weiter oben organisch oder organomineralisch unterlegt. Dieser Übergang erfolgt im Süden zwischen Montlingen und Kriessern relativ kleinräumig über wenige Dutzend Meter. Im Norden läuft die Überdeckung über hunderte m in die Muddeböden im Berneggerriet und Krummensee aus. Die Muddeböden im Norden wurden grossflächig als mit Schluff überdeckte organische oder organomineralische Böden klassiert. Gegen das Isenriet hin werden die Böden als Mudde klassiert und schliesslich im Isenriet als organische Böden teils mit Mudde-Zwischenschichten klassiert.

In den alluvialen Ablagerungen der Rietach wurde aufgrund des hohen Tongehaltes verbreitet ein Feinerdeproblem klassiert. Nördlich der Rietach finden sich kleinräumigere Strukturen. Im Rebster Sack

wurde eine grössere Fläche als massiv von tonigem Material überdeckt klassiert, nördlich davon folgt eine Fläche mit Flachtorf. Bis Altstätten zieht sich ein Wechsel von organischen und organomineralischen Böden, die wiederholt von mineralischen Ablagerungen von Seitenbächen unterbrochen werden.

Im Schwemmfächer zwischen Altstätten und Obberriet findet sich eine hohe Varianz der synthetischen Bodentypen. Im Norden ist das mineralische Substrat entlang der Rietaach und im Gebiet Gerner organisch unterlegt. Hier verursacht insbesondere der hohe Tongehalt im Unterboden ein Bewirtschaftungsproblem. Die wenige ha umfassenden organischen Böden am Hangfuss des Schörgisknorren sind in der Tiefe mit dem Isenriet verbunden. Ein Band von organomineralischem Substrat zieht sich unter dem Schwemmfächer in über einem Meter Tiefe durch, bis es im Gebiet Klostermaad bis zum Unterboden hinauf tritt. Hier zeigt sich, dass die organischen und organomineralischen Substrate in mehreren Armen, dass mineralische Substrat unterlagern. Nördlich von Oberriet bildet der hohe Tongehalt und die damit verbundene Staunässe das grösste Bewirtschaftungshinderns. In Senken tritt hier die organomineralische Unterlage immer wieder bereits vor 2 m Tiefe auf. Im Süden bei Oberriet Oberdorf zeigt sich, dass sich die dortigen organischen und organomineralischen Substrate ebenfalls in der Tiefe bis zum Siedlungsrand fortsetzen.

## 8.4.3 Problembereiche

### 8.4.3.1 Sackungspotential

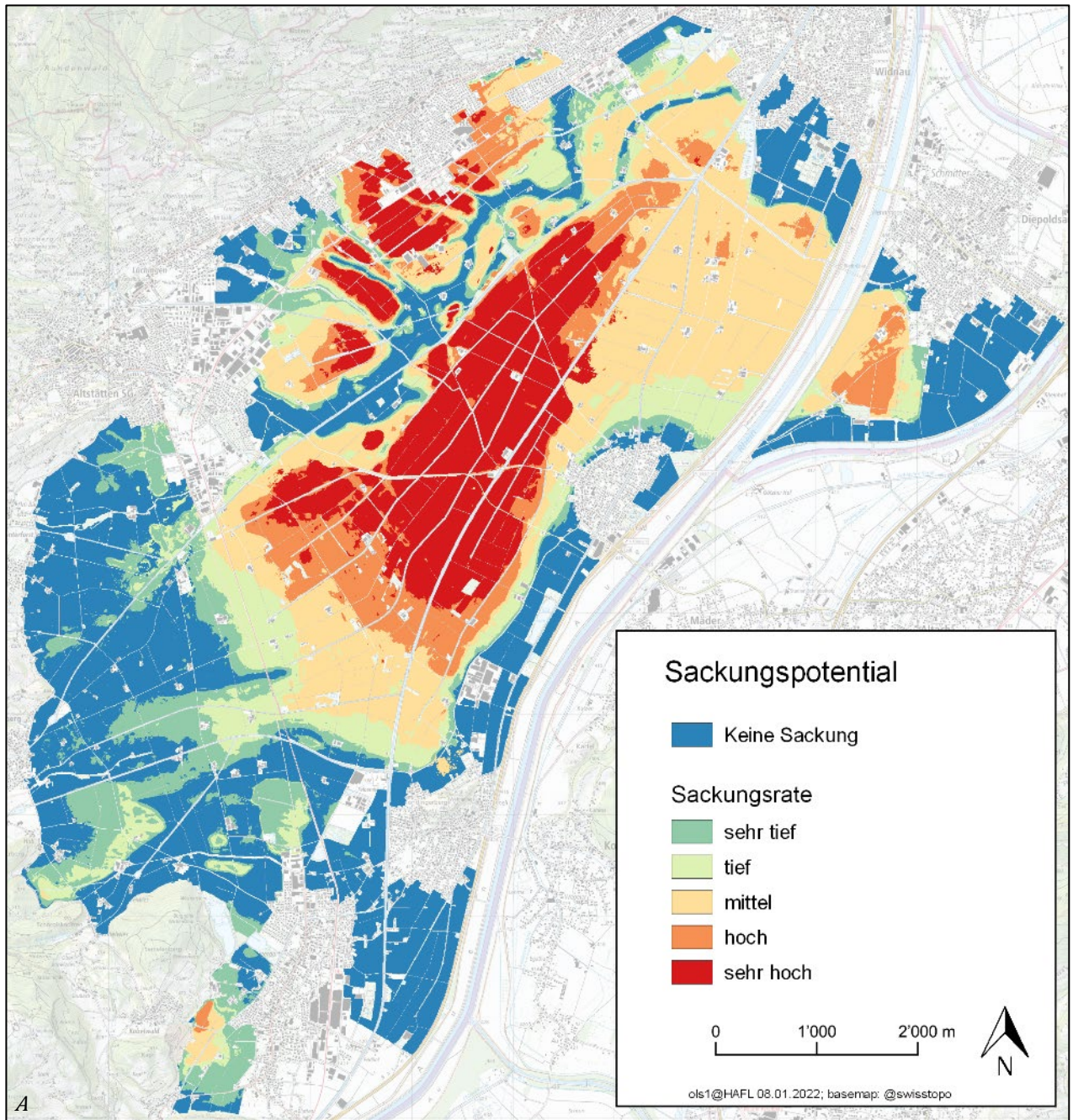


Abbildung 52: Übersicht des Sackungspotential in 6 Klassen. Der Faktor «A» aus der Gesamtbewertung.

Das Sackungspotential ist in den organischen Böden des Isenriets sehr hoch. Hier sind die OS-Gehalte sehr hoch und es ist keine isolierende Deckschicht vorhanden. Der Boden sackt hier mit einer für solche Substrate typischen Rate von um einen cm pro Jahr. Bei Erneuerungen der Drainagen müssen diese entsprechend tiefer eingebaut werden. Aufgrund des hohen OS-Gehaltes folgen auf solche Massnahmen Setzungs- und Schrumpfungsprozesse, die in den ersten paar Folgejahren Sackungsraten von weit über einem cm pro Jahr verursachen. Ähnliche hohe Sackungsraten wurden qualitativ während des Projektes im Niederschlagsarmen und trockenen Sommer 2018 beobachtet.

Gebiete mit einer Dominanz von organomineralischem Material im Ober- und Unterboden wurde eine hohe Sackungsrate zugeschrieben. Hier fehlt zwar ebenfalls eine isolierende Deckschicht, die Gesamtmenge an mineralisierbarer OS ist jedoch tiefer. Auch reagieren diese Böden nicht so extrem auf eine Neudrainage, da sie durch den erhöhten mineralischen Anteil bereits eine erhöhte Dichte haben und die organischen Substanzbestandteile besser voneinander isoliert werden. Es darf aber nicht unterschätzt

werden, dass diese Böden einen grossen Anteil ihrer OS in unzersetzte oder schwach zersetzter Form bis in den UB besitzen. Hier erwarten wir Sackungsraten unter einem halben cm pro Jahr.

Gebiete, die eine mineralische Überdeckung im Oberboden haben, wurde eine mittlere Sackungsrate zugewiesen. Hier sind die Schichten mit hohem OS-Gehalt in bedingtem Masse von der Umgebungsluft getrennt. Insbesondere während der Vegetationsruhe und in niederschlagsreichen Perioden bleibt das Redoxpotential und damit die Mineralisation in Schichten mit hohem OS-Gehalt tief. Hier erwarten wir Sackungsraten von einigen mm pro Jahr. Ebenfalls dieser Klasse zugeordnet wurden flachtorfige und flachmuddige Böden. Hier ist die Sackungsrate etwas höher, aufgrund der kleineren Gesamtmenge an abbaubarer OS ist das Gesamtsackungspotential jedoch kleiner.

Eine tiefe Sackungsrate wurde für Gebiete definiert, die eine mineralische Überdeckung bis in den Unterboden haben oder eine Überdeckung bis 90 cm Tiefe aber darunter OS-Gehalte über 45 %. Diese Böden sacken nur noch wenige mm pro Jahr. Weiter wurden auch mineralische Böden mit einzelnen Horizonten mit über 30 % OS in diese Klasse eingeordnet, bei diesen ist das Gesamtsackungspotential zwar tief, oft liegen diese Horizonte aber weit über dem reduzierten Bereich und werden in den nächsten Jahren mineralisiert.

Ein sehr tiefes Sackungspotential wurde für Gebiete vergeben, die die vorangegangenen Bedingungen nicht erfüllen aber mindestens einen organomineralischen Horizont oberhalb des r-Horizontes besitzen. Es ist somit nur noch mit Sackungen im mm-Bereich zu rechnen. Es sollte aber nicht ausser Acht gelassen werden, dass auch diese Böden oft weiter unten noch organische und organomineralische Schichten mit einer teils erheblichen Mächtigkeit besitzen.

#### 8.4.3.2 Feinerde

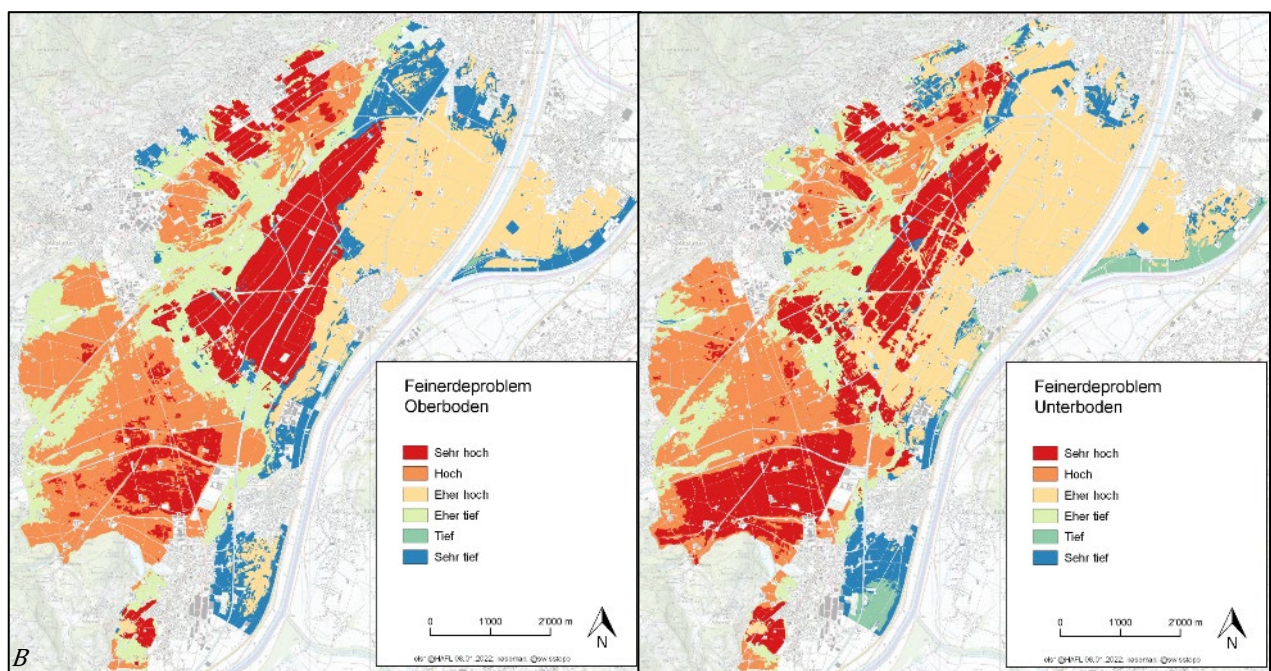


Abbildung 53: Übersicht des Problemdrucks für die Landwirtschaft durch ungünstige Feinerde im Ober- und Unterboden. Entweder aufgrund der Körnung oder eines erhöhten OS-Gehaltes. Der Faktor «B» aus der Gesamtbewertung.

In einem grossen Teil des Perimeters ist eine ungünstige Feinerde im Oberboden vorhanden. Durch die Tongehalte über 50 % wird im südlichen Bereich zwischen Oberriet und Altstätten ein sehr hohes Feinerdeproblem ausgemacht (rot). Der lehmige Ton, der diesen Bereich umgibt und über den ehemaligen Verlauf der Rietaach verursacht ein etwas tieferes Feinerdeproblem (orange). Die hohen Schluffgehalte im Osten verursachen ein eher hohes Feinerdeproblem (gelb). Die Tongehalte zwischen 30 % und 40 % im westlichen Teil des Perimeters werden als eher tiefes Problem (hellgrün) gewertet. Die Lehm Böden sowie die sandigen Lehm Böden werden als problemlos gewertet (blau). Weiter ist in organischen Böden, die ein vermulmtes oder vererdetes Oberbodengefüge aufweisen ebenfalls ein sehr hohes Feinerdeproblem klassiert.

Im Unterboden setzt sich die Bewertung aus dem Oberboden fort. Die Lehm Böden sind etwas weniger vertreten wodurch die Gesamtheit der ungünstigen Feinerden höher ist. Einen leichten Abzug erhalten die lehmigen und lehmreichen Sandböden auf den Rhein-Bänken aufgrund des hohen Sandanteils (dunkelgrün).



### 8.4.3 Vernässung

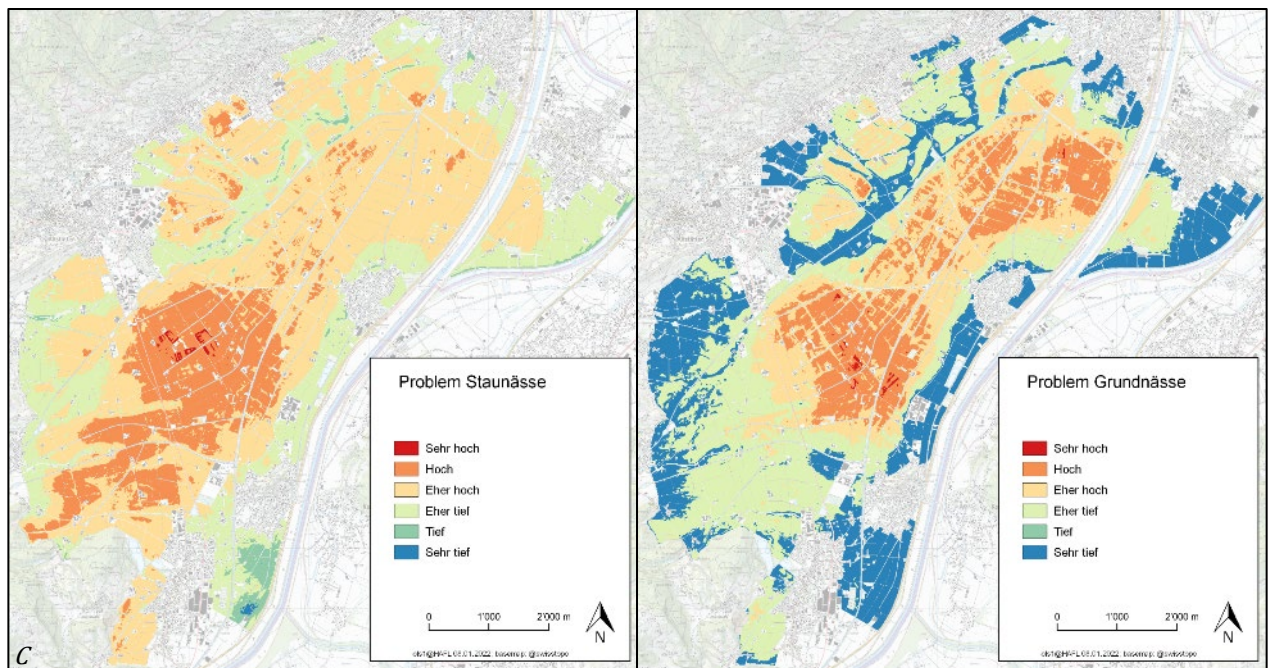


Abbildung 54: Übersicht des Problemdrucks für die Landwirtschaft durch Stau- und Grundnässe. Der Faktor «C» aus der Gesamtbewertung.

Stau- nässe mit einem gg-Horizont oberhalb 20 cm tritt nur innerhalb der extensivierten Flächen des Bannriets auf (rot). Eine etwas näher an der Oberfläche gelegene Obergrenze des Stau- nässe-gg-Horizonts zwischen 20 und 40 cm Tiefe tritt im grösseren Umkreis des Bannriets und in den sehr tonigen Gebieten im südlichen Bereich des Schwemmfächers zwischen Altstätten und Oberriet auf (orange). In den organischen und organomineralischen Böden sowie den meisten Böden mit erhöhten Schluff und Ton gehalten tritt ein eher hohes Stau- nässe-Problem auf (gelb). Im restlichen Perimeter ist nur in einzelnen Randbereichen insbesondere entlang der Bänke des Rheins kein (blau) oder ein schwaches Problem (grün) vorhanden. Die meisten übrigen Bereiche haben einen stauwasserverursachten gg-Horizont in einer Tiefe von 60 bis 90 cm (hellgrün).

Die Grundnässe ist stark von der Lage im Gelände geprägt, so können sich stark grundnassen mit schwach grundnassen Bereichen innerhalb einer kupperten Parzelle auf wenigen Metern abwechseln. Einzelne Flächen in und um das Bannriet fallen in die tiefste Klasse, hier treten r-Horizonte zwischen 30 und 60 cm Tiefe auf (rot). Die organischen und organomineralischen Böden auf der linkseitigen Rheinseite fallen je nach lokaler Ausprägung in die Klasse mit einer r-Horizont-Obergrenze oberhalb 75 cm (orange) oder unterhalb (gelb). Die Gebiete mit einer r-Horizont-Obergrenze zwischen 90 und 120 cm Tiefe sind grün dargestellt. Es handelt sich dabei um Böden in der Ebene, die wohl nur wenig gesackt sind. Es ist noch anzumerken, dass in den sehr tonigen Böden die r-Horizonte vermutlich verbreitet auch durch Haftwasser verursacht werden und als Stauwasser zu werten wären. Da dies Unterscheidung aber schwierig ist und wenig an der Interpretation ändert, wurde die Differenzierung unterlassen.

## 8.4.4 Massnahmen

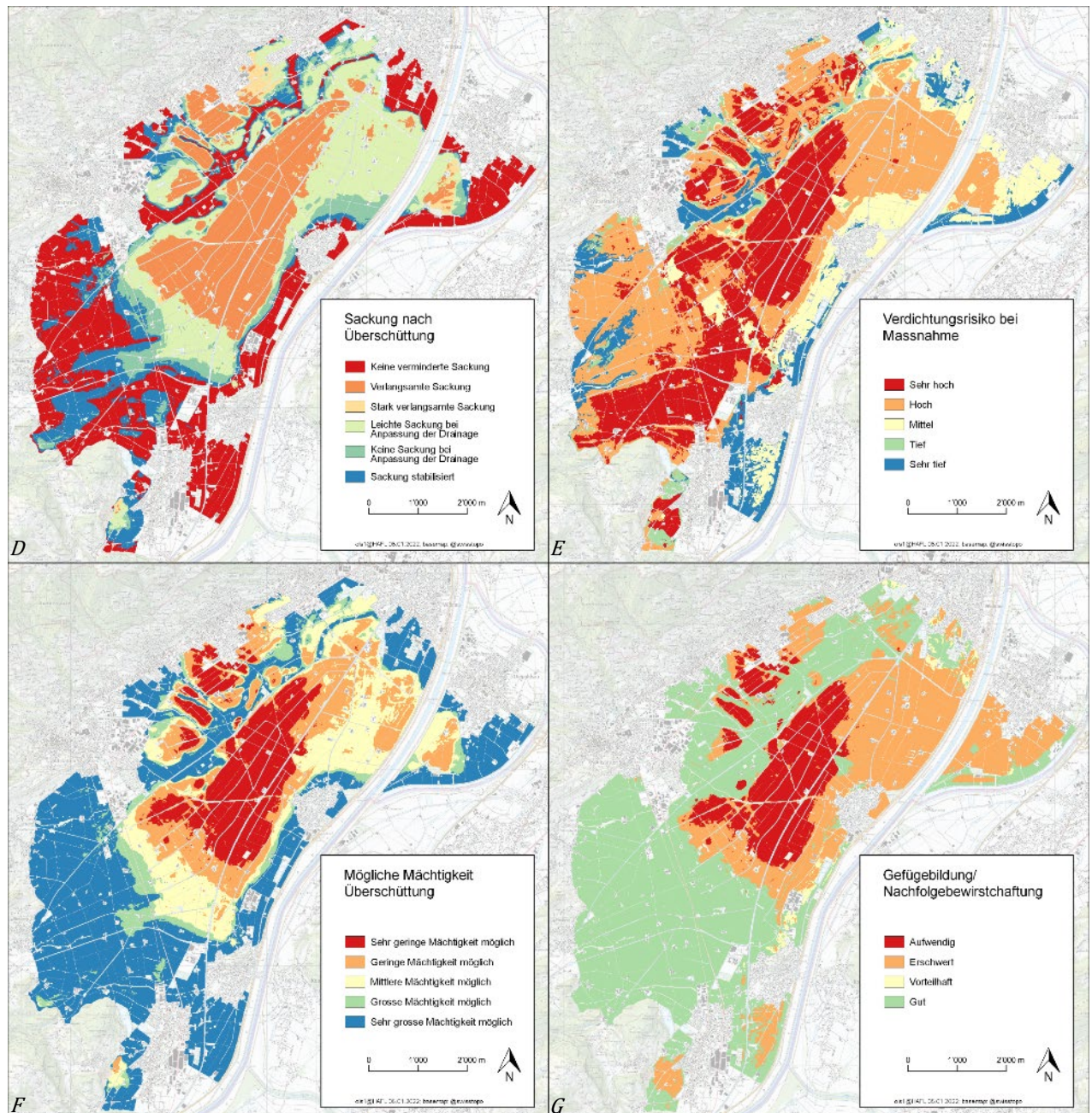


Abbildung 55: Übersicht der in die Bewertungsmatrix miteingeflossenen Begleitfaktoren einer Übersättungsmassnahme. Faktoren D bis G der Gesamtbewertung.

Jedem synthetischen Bodentyp wurden für die vier Begleitfaktoren einer Übersättung ein Wert auf einer 4, 5 oder 6-stufigen Skala zugeschrieben.

Oben links wird gezeigt, wie sich die Sackungsrate nach einer Übersättung mit 30 cm mineralischem Material verändert. In rot sind Bereiche dargestellt, die bereits im gegenwärtigen Zustand keine nennenswerte Sackung aufweisen. In orange sind die stark organischen Böden ohne natürliche Deckschicht eingefärbt, diese werden auch nach einer Übersättung weiter sacken. Die Sackungsrate wird etwas gehemmt und die Terrainverluste einiger Jahre oder Jahrzehnte ausgeglichen. In gelb sind organische und organomineralische Böden eingezeichnet, die durchgehend einen tiefen OS-Gehalt aufweisen und somit durch eine Übersättung eine tiefe Sackungsrate aufweisen. In hellgrün sind organische und organomineralische Böden mit einer mineralischen Deckschicht im Oberboden dargestellt. In diesen könnten nach einer Übersättung durch die Anhebung der Drainagetiefe, bei gleichbleibendem Wasserhaushalt, die Sackungsrate stark minimiert werden. In grün sind Böden dargestellt mit einer mineralischen Deckschicht bis in den Unterboden. In diesen könnten, nach einer Übersättung durch eine Anpassung der Drainagetiefe, die Schichten mit organischen und organomineralischem Substraten dauerhaft unter wassergesättigten Bedingungen gehalten werden. In blau sind Böden dargestellt, deren

Schichten mit erhöhtem OS-Gehalt genügend tief liegen, dass eine Überschüttung mit 30 cm mineralischem Material die gegenwärtige Sackung stoppen würde.

Oben rechts ist das Verdichtungsrisiko bei einer baulichen Bodenaufwertung abgebildet. In organischen Böden ohne Deckschicht wird dieses als sehr hoch eingestuft. Es hat sich gezeigt, dass sich beim Übergang des überschütteten oder eingearbeiteten Materials zum darunterliegenden organischen Substrat häufig Stauschichten bilden, insbesondere wenn schwach oder mittel zersetzte OS vorhanden ist. Für Böden mit Tongehalten im Ober- und/oder Unterboden über 50 % wurde ebenfalls ein sehr hohes Verdichtungsrisiko definiert. Diese trocknen nur schwer ab und ein Einbau von Material unter guten Bedingungen ist daher sehr schwierig. Organische und organomineralische Böden mit einer mineralischen Deckschicht aus Material mit > 50 % Schluff wurde ein hohes Verdichtungsrisiko zugeschrieben. Diese neigen zu Unterbodenverdichtungen, denn das unterliegende Substrat mit hohem OS-Gehalt ist verdichtungsempfindlicher als die Auflage im Oberboden. Die gleiche Wertung erhielten Böden mit Tongehalten über 40 %. Ein mittleres Verdichtungsrisiko erhielten Böden mit über 50 % Schluff im Ober- und/oder Unterboden oder organische und organomineralische Böden deren Oberboden mit einer vorteilhaften Feinerdekörnung (< 50 % Schluff, <40% Ton) bedeckt sind. Ein tiefes Verdichtungsrisiko erhielten Böden mit vorteilhafter Feinerdekörnung und einzelnen organischen Schichten oder bereits vorhandener Staunässe. Ein sehr tiefes Verdichtungsrisiko wurde Böden zugeschrieben, die weder organomineralische oder mineralische Zwischenschichten noch ein Nässe- oder Körnungsproblem aufweisen.

Unten links ist die Schütmächtigkeit einer möglichen Überschüttung abgebildet. Vereinfacht lässt sich sagen, dass je organischer ein Boden ist, desto geringmächtiger sollte dieser in einer Massnahme überschüttet werden. Durch die verminderte Tragfähigkeit neigen Aufschüttungen auf organischen Substraten dazu abzuscheren, das heisst die Böden verlieren ihren Gleichgewichtszustand und in Randbereichen können Teile der Aufschüttung oberirdisch wegbrechen. Wird organisches Substrat zu stark verdichtet, kann es auch durch den unterliegenden Wasserdruck zu lokaler oder grossflächiger Bildung von Mulden und Kuppen kommen und Wasser kann in Nachbarparzellen gedrückt werden. Weiter kann das organische Substrat bei zu grosser Auflast und nassen Bedingungen seitlich wegfließen. Zu guter Letzt wird das organische Substrat von den darüberliegenden Auflast der Überschüttung zusammengedrückt und die Erhöhung der Terrainoberkante somit verringert oder gar negatiert und die darunterliegenden Drainagen beschädigt. Es wurde angenommen, dass wenn keine organischen Schichten bis 120 cm Tiefe mit mehr als 10 cm Mächtigkeit sowie keine organomineralischen Schichten bis 90 cm Tiefe vorhanden sind, der Boden stabil und tragfähig ist (blau eingefärbt). Die Umrechnung der Klassen in Mächtigkeiten kann nur qualitativ erfolgen, da empirische Daten fehlen und die Varianz im Perimeter zu gross ist. Im roten Bereich sollte aber nicht mehr als einige dm in einer Einzelmassnahme eingebracht werden, im blauen Bereich sollte die Tragfähigkeit auch Überschüttungen mit mehreren m Schütmächtigkeit ermöglichen. Es wurde jeweils nicht unterschieden, welche Art des Einbringens des mineralischen Materials bei Überschüttungen gewählt wird. Es wird davon ausgegangen, dass bei geringen Mächtigkeiten das eingebrachte mineralische Material mit dem vorhandenen Oberboden vermischt wird. Bei Schütmächtigkeiten über einigen dm ist auch ein Oberbodenabtrag und unterlegen mit zugeführtem Material vorstellbar.

Unten rechts ist der Aufwand der Nachfolgebewirtschaftung nach einer Überschüttung abgebildet. Diese hängt stark von der Bildung eines stabilen Bodengefüges ab. In organischen Böden ohne Deckschicht wurde die Nachfolgebewirtschaftung als aufwendig (rot) klassiert, denn eingebrachtes mineralisches Material inkorporiert nur langsam mit dem vorhanden organischen Gefüge. In der Nachfolgebewirtschaftung muss dem Rechnung getragen werden und der Boden entsprechend über Jahre ruhen gelassen werden. In organischen Böden mit einem geringeren OS-Gehalt (10-20 %) im Oberboden, die bereits ein mineralisches Gefüge aufweisen, ist die Gefügebildung etwas weniger aufwändig, in diesen Böden wurde die Nachfolgebewirtschaftung als erschwert (orange) klassiert. In Böden mit hohem Schluffanteil findet die Gefügebildung nur langsam statt und es kommt bei zu früher Bodenbearbeitung oder Bodenbearbeitung bei ungünstigen Bedingungen zu Verschlammung des Oberbodens. Böden mit über 50 % Schluff wurde infolgedessen auch eine erschwerte Nachfolgebewirtschaftung zugewiesen. Bei Schluffgehalten über 50 % ausschliesslich im Unterboden wurden die Bedingungen etwas besser eingeschätzt und als vorteilhaft (gelb) bewertet. Den restlichen Böden im Perimeter wurden gute (grün) Bedingungen für eine Gefügebildung zugeschrieben. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass dies nur bei sachgemäsem Umgang der Fall ist. Z. B. zeigen die Böden mit sehr hohen Tongehalten im Westen des Perimeters gute Voraussetzungen für eine baldige Gefügebildung, bei einer zu frühen Bearbeitung oder einem Befahren bei nassen Bedingungen können sie jedoch nachhaltig verdichtet werden.

## 8.4.5 Grenzen möglicher Massnahmen

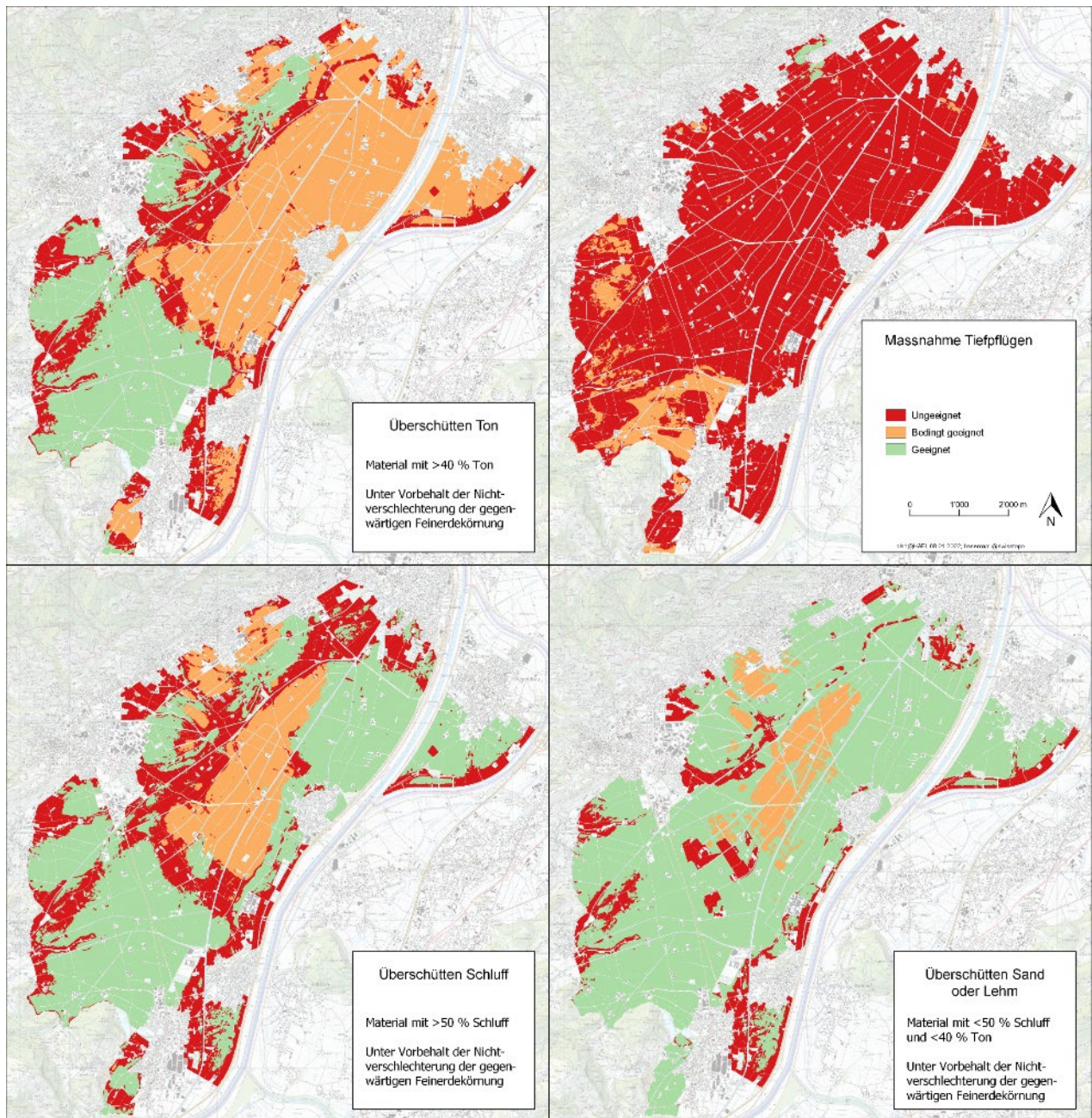


Abbildung 56: Übersicht der Flächen, für die Massnahmen in Fragen kommen könnten. Zu beachten ist dabei, dass nur Flächen als ungeeignet klassiert wurden, die bereits eine vorteilhaftere Feinerdekörnung haben als der abgebildete Schwellenwert oder keinerlei spezielle Nutzungseinschränkungen bestehen. Das zugeführte Material darf die lokale Feinerdekörnung nicht verschlechtern. Z. B. wenn eine Fläche grün eingefärbt ist auf der Tonkarte und der Oberboden 45 % Ton enthält, wird er trotzdem von zugeführtem Material mit einem Tongehalt von 50 % verschlechtert.

In den obigen Abbildungen ist dargestellt, welche Massnahmen wo potenziell eine Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit bringen könnten. Naturschutzflächen sind als ungeeignet klassiert. Tiefpflügen wird nur in den flachtorfigen Böden im Norden empfohlen. Bedingt geeignet ist die Massnahme auch bei Böden mit sehr hohen Tongehalten im Ober- und Unterboden. In den meisten Tonböden ist der Tongehalt jedoch im Unterboden höher und die Massnahme somit ungeeignet. Da das Tiefpflügen im Perimeter nicht vielversprechend scheint, wurde es in den weiteren Überlegungen weggelassen.

Eine Prämisse in der Bewertung von Massnahmen ist, dass die vorhandene Feinerdekörnung nicht verschlechtert wird. In den den Karten ist nur dargestellt, ob ein Boden im Oberboden die gleiche oder eine schlechtere Feinerdekörnung hat wie das Material, das aufgetragen werden soll. Im Einzelfall muss anhand der Körnungskarten überprüft werden, dass das eingebrachte Material keine Verschlechterung der Feinerdekörnung verursacht. Weiter ist zu beachten, dass im Kanton St. Gallen bei Bodenverbesserungen nur Material mit maximal 20 % Ton und 65 % Schluff sowie mindestens 35 % Sand eingebracht

werden darf. Da ein Grossteil der Böden im Perimeter diese Vorgaben heute nicht erfüllt (oft zu viel Ton und zu wenig Sand), könnte auch mit Material mit einer ungünstigeren Feinerdekörnung eine Verbesserung erzielt werden. Dies ist aber an konkreten Projekten zu prüfen. Beispielsweise kann die Feinerdekörnung eines Bodens mit 50 % Ton mittels zugeführten Materials mit 30 % Ton verbessert werden.

#### 8.4.6 Anthropogenität

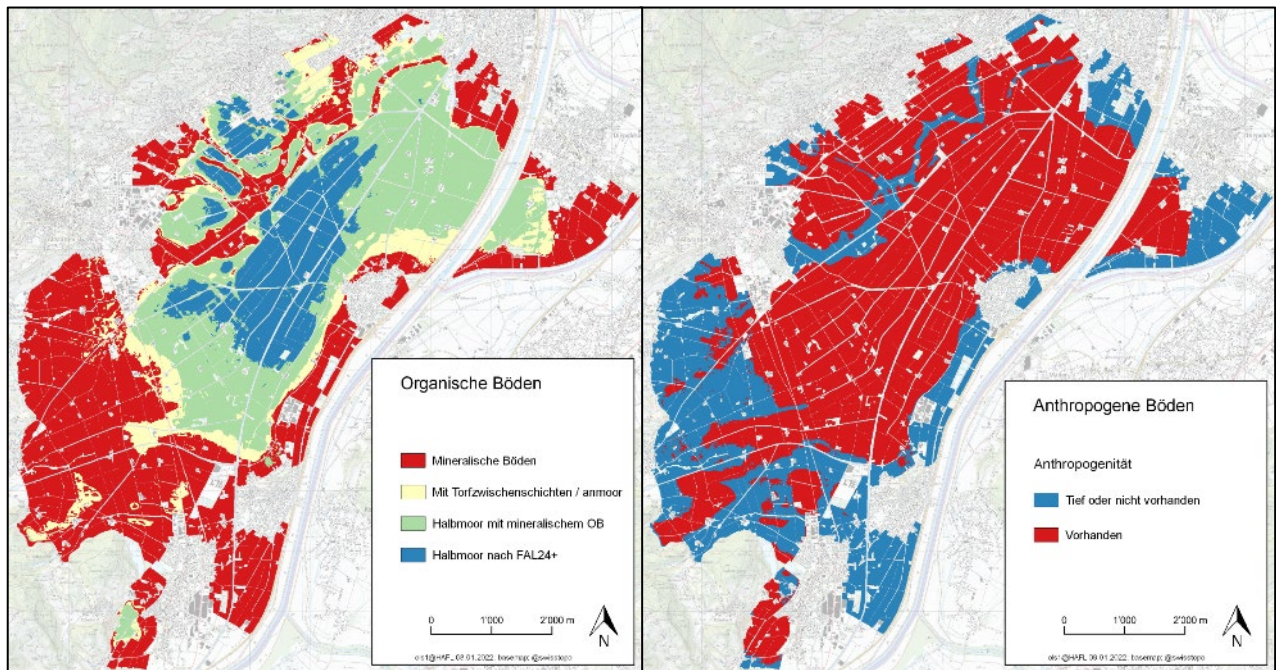


Abbildung 57: Links organische Böden im Perimeter nach verschiedenen Definitionen. Rechts anthropogene Böden.

Wie bereits in Abschnitt 8.3.6 erwähnt wurde, sollen bauliche Massnahmen zur Bodenverbesserung vornehmlich in anthropogen veränderten Böden durchgeführt werden. Bei einer sehr engen Definition von anthropogen veränderten Böden als drainierter organische Böden nach FAL24+ bliebe nur eine Fläche von 540 ha übrig, siehe blaue Fläche Karte oben links. Wie auf dieser Karte ersichtlich ist, sind jedoch auf einer fast doppelt so grossen Fläche (1'040 ha) organische Böden unterhalb eines mineralischen Oberbodens sowie in weiteren 470 ha organische Zwischenschichten oder anmoorige mineralische Böden zu finden. Wie in der Karte des Sackungspotential ersichtlich ist, hat durch Böden mit organomineralischem Substrat auf einer beträchtlich grösseren Fläche eine Sackung stattgefunden.

Die im Projekt festgelegte Definition anthropogener Böden als künstlich drainierte Nassböden, die mindestens eine Schicht mit organischem oder organomineralischem Substrat oberhalb des r-Horizontes aufweisen, umfasst so eher die Gesamtheit der Böden deren Eigenschaften durch Sackung nachhaltig verändert wurden. So sind nun 2'530 ha der Zielfläche als anthropogen klassiert und 1'290 ha natürliche Böden. Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass innerhalb der als natürlich klassiert Böden durchaus Auffüllungen und aufgefüllte Gräben etc. vorhanden sind.

## 8.5 Gesamtbewertung

### 8.5.1 Karte der Gesamtbewertung

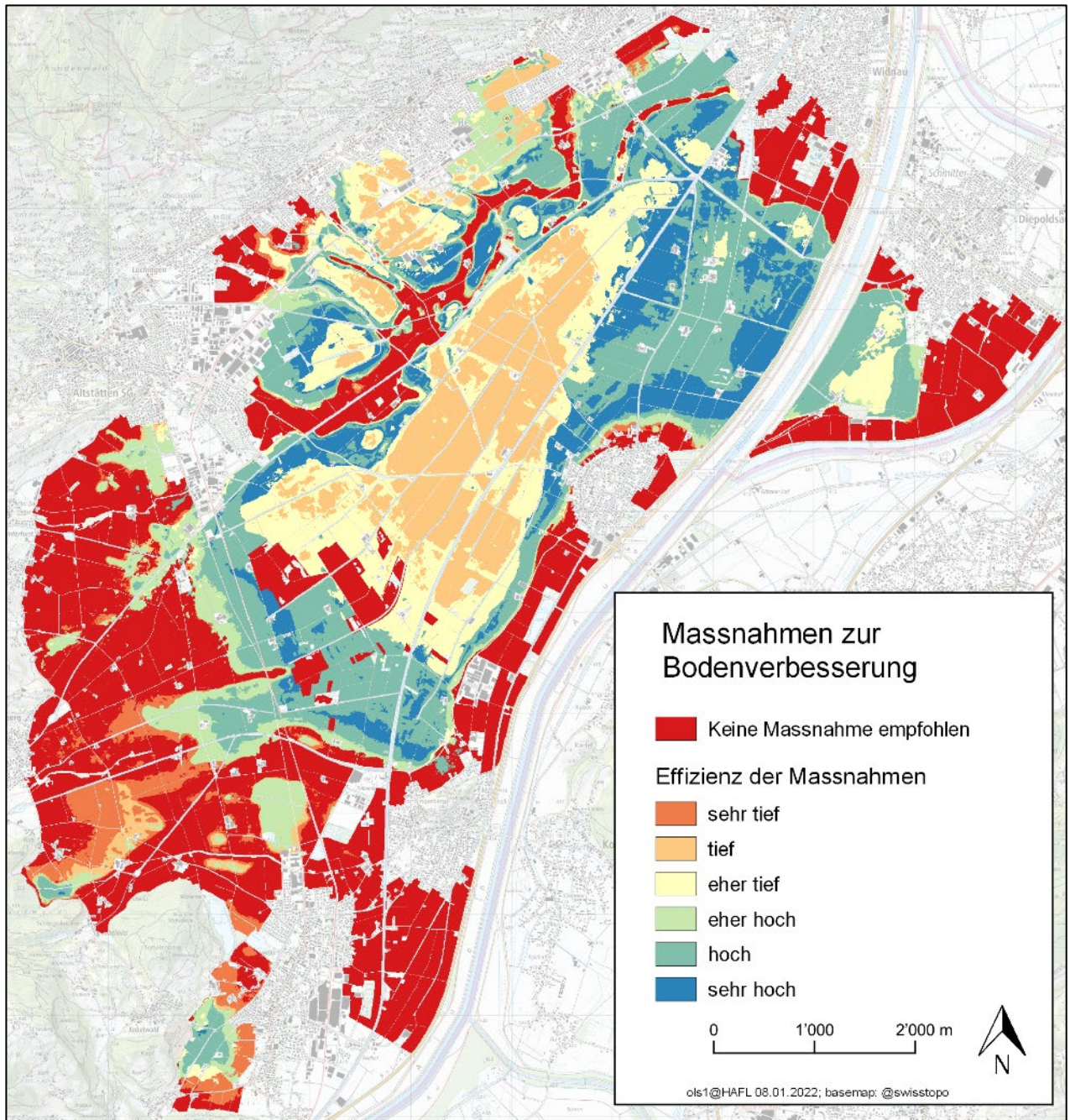


Abbildung 58: Karte des Ergebnisses der Gesamtbewertung eingefärbt in Bewertungsklassen.

In der Gesamtbewertung zeigt ein hoher Wert, in welchen Bereichen der Problemdruck eines oder mehrerer Problembereiche Sackung, Vernässung und Feinerde hoch ist und gleichzeitig eine Massnahme zur Bodenverbesserung diese Probleme nachhaltig lösen kann, während die negativen Nebeneffekte der Massnahme auf den Boden vergleichsweise klein sind. Voraussetzung ist, dass die Massnahme sachgerecht ausgeführt wird. Zu beachten ist dabei, dass auf der Problemseite das Sackungspotential fünf Mal so stark gewertet wird wie Vernässung und Feinerdeprobleme. Auf der Massnamenseite wird die nachhaltige Konservierung der OS drei Mal so hoch gewertet wie die die Nebeneffekte einer Massnahme zur Bodenverbesserung. Da am Ende nur noch Überschüttungen mit mineralischem Material als Massnahme weiterverfolgt wurden, ist dies jeweils die zu wählende Massnahme.

Auf 1'360 ha werden keine Massnahmen empfohlen (rot). Dabei handelt es sich um Böden ohne oder mit einer geringen Anthropogenität sowie um Naturschutzgebiete. Auf 160 ha werden Massnahmen nur eine sehr tiefe Effizienz zugeschrieben (dunkelorange), dabei handelt es sich um Böden mit einzelnen organomineralischen Horizonten, die nur ein minimales Sackungspotential aufweisen. Teilweise ist

jedoch aufgrund eines sehr hohen Tongehaltes das Ertragspotentials beträchtlich eingeschränkt. Auf 420 ha wurde aus sehr diversen Gründen eine tiefe Effizienz festgestellt (hellorange). Auf einem Teil der Flächen ist das Sackungspotential gering, da es sich um flachtorfige und flachmuddige Böden handelt oder nur einzelne organische Schichten vorhanden sind. Zum grössten Teil handelt es sich aber um sehr organische Böden ohne mineralische Deckschicht auf denen aufgrund der verminderten Tragfähigkeit, nur geringmächtige Überschüttungen gemacht werden können. Die Gefahr einer Verdichtung bei einer Massnahme ist hoch, die Gefügebildung ist durch das vererdete und vermulmte Substrat erschwert und die Sackung wird mit einer einzelnen Massnahme nicht gestoppt. Hier ist also der Problemdruck hoch, die Probleme werden durch eine Massnahme aber nicht nachhaltig gelöst, dazu wäre eine Sättigung der Schichten mit erhöhten OS-Gehalte über den grössten Teil des Jahres notwendig. Auf 490 ha wurde eine eher tiefe Massnahmeneffizienz festgestellt (gelb). Es handelt sich mehrheitlich um organische Böden, die einen etwas geringeren OS-Gehalt haben und/oder viele organomineralische Zwischenschichten haben. Die Massnahmenseite wird hier positiver bewertet, denn der Boden ist etwas tragfähiger und die Gefügebildung nach einer Massnahme wohl etwas einfacher. Auf 270 ha wurde eine eher hohe Massnahmeneffizienz festgestellt (hellgrün). Es handelt sich dabei meist um Böden, bei denen organomineralische Schichten bis zum Untergrund überdeckt sind und eine Überschüttung, bei einer Anpassung der Drainagentiefe, die Sackung beenden würde. Gleichzeitig ist der OS-Gehalt eher gering, weshalb die Bewertung nicht besser ausfiel. In dieselbe Klasse fallen Böden mit durchgehenden OS-Gehalten im tiefen organomineralischen Bereich. 760 ha wurde eine hohe Massnahmeneffizienz attestiert (dunkelgrün). Dabei handelt es sich hauptsächlich um Böden aus Wechsellagen zwischen organischem und organomineralischem Substrat, wobei organomineralische Substrate dominieren, mit einer mineralischen Deckschicht im Ober- und teils auch Unterboden. Weiter fallen Böden mit mineralischer Überdeckung bis in den Untergrund und organischem Substrat mit hohem OS-Gehalt in diese Klasse. Auf 360 ha wurde eine sehr hohe Massnahmeneffizienz festgestellt (blau). Dabei handelt es sich meist um organische Substrate mit relativ hohem OS-Gehalt und einer mineralischen Deckschicht im Ober- und teils auch Unterboden.

### 8.5.2 Wichtige Anmerkungen zur Gesamtbewertung

Die Karte der Gesamtbewertung zeigt in einem ersten Schritt auf, wo bauliche Massnahmen zur Bodenverbesserung empfohlen werden und wo nicht (rot oder nicht rot). Diese Unterscheidung erfolgt aufgrund der Anthropogenität der Böden. Die Abgrenzung der Anthropogenität kann strenger erfolgen, auch können durchaus Böden im «roten» Bereich überschüttet werden, wenn gute Argumente dafür vorhanden sind und die Behörden dem zustimmen. Die Feinunterteilung in die sechs Effizienzklassen kann als Priorisierung verstanden werden, wenn möglich empfehlen wir zuerst auf Böden mit «sehr hoher Massnahmeneffizienz» Massnahmen zu prüfen. Es können gute Gründe, z. B. Logistik oder Naturschutz, dagegen sprechen diese Flächen zu überschütten, dann sollte die nächsttiefere Klasse geprüft werden, und so weiter.

In einem konkreten Bauprojekt dient die generierte Bodeninformation und so auch die Karte der Gesamtbewertung als Ausgangs- und Anhaltspunkt für eine Massnahme. Die Karten sind nicht parzellenscharf und in ihrer Auflösung vergleichbar mit einer klassischen Bodenkarten im Massstab 1:5'000. Eine Verifizierung der Karten mit einer Aufnahme des Ist-Zustandes und eine sachgemässe Ausführung der eigentlichen Massnahme bleiben unerlässlich.

Die in diesem Bericht dargestellte Gesamtbewertungskarte sollte nicht in der vorliegenden Form isoliert verwendet werden. Es können auch andere Bewertungsansätze der verschiedenen Bodeneigenschaften verwendet werden. Weiter geben die Karten im Zusammenspiel oft mehr Information her, zum Beispiel wird mit den OS-, Vernässungs-, Körnungs- und Zersetzungsgrad-Karten ersichtlich, wieso ein Bereich in welche Klasse eingeteilt wurde. Die Karten sind darauf optimiert, in einem GIS betrachtet zu werden, die Darstellung in diesem Bericht dient nur der allgemeinen Veranschaulichung.

Als Resultat der Gesamtbewertung werden Böden mit einer bereits heute bestehenden hohen mineralischen Komponente zur Überschüttung priorisiert. Die Gebiete mit den grössten Problemen, namentlich der hohen Sackungsrate in den sehr organischen Böden, werden eher tief bis tief priorisiert. Dies erscheint auf den ersten Blick etwas widersprüchlich. Die Gesamtwertung zeigt durchaus, dass dort Massnahmen möglich sind, man muss sich einfach bewusst sein, dass ein viel höherer Mitteleinsatz aufgewendet werden muss, um dieselben Ziele zu erreichen, wie auf einer mit einer «sehr hohen Massnahmeneffizienz» bewerteten Parzelle. So muss z. B. eine Parzelle ein Boden mit sehr hohem OS-Gehalt bei gleichbleibendem Drainageregime über viele Jahrzehnte immer wieder geringmächtig überschüttet werden, bis die Sackung nachhaltig gestoppt wird. Dies führt zu erheblich höheren Kosten und der wiederkehrenden Gefahren z. B. einer Verdichtung bei den Massnahmen. Da sich aber auf den stark

organischen Böden mit hoher Sackungsrate die Probleme in Zukunft akzentuieren werden und aufgrund der Tieftorfigkeit kein Ende des Prozesses absehbar ist, wird abgewogen werden müssen, ob hohe Investitionen getätigt werden, um weiter intensiv Landwirtschaft zu betreiben oder ob auf den Flächen die Drainagetiefe erhöht wird oder zumindest bei einer Drainageerneuerung nicht weiter abgesenkt wird und die Bewirtschaftung extensiviert wird.

### 8.5.3 Beispiele der Gesamtbewertung

Die Klassen der Gesamtbewertung bilden Kombinationen von bestimmten Bodeneigenschaften ab, die jeweils durch Schwellenwerte voneinander abgegrenzt sind. Es können jeweils unterschiedliche Kombinationen verschiedener Bodeneigenschaften zur selben Bewertungsklasse führen, dadurch enthalten sie teils sehr unterschiedliche Böden. Es zeigen sich aber für die jeweiligen Bewertungsklassen typischen Erscheinungsformen, die anhand der untenstehenden Beispiele aufgezeigt werden.

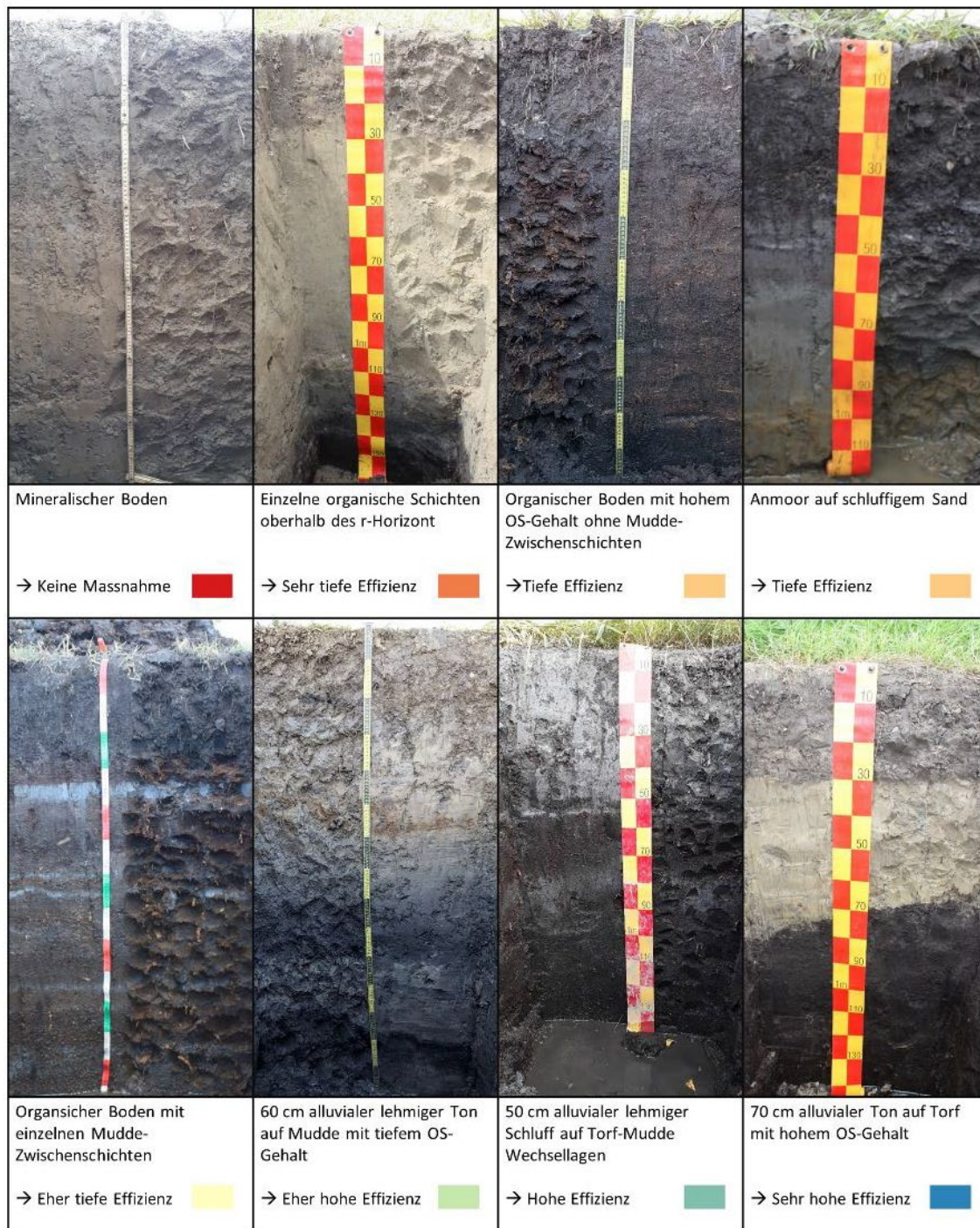


Abbildung 59: Beispiele von Bodenprofilgruben zu den 7 Klassen der Gesamtbewertung. Bei der Klasse «Tiefe Effizienz» wurden zwei Profilgruben abgebildet da sie sehr unterschiedliche Böden umfasst. Im Allgemeinen zeigt sich, dass je höher der OS-Gehalt bis zum ganzjährig wassergesättigten Bereich des Bodens ist und gleichzeitig je ausgeprägter eine mineralische Deckschicht ist desto höher wird die Massnahmeneffizienz eingeschätzt.



### 8.5.4 Hinweise zur Anwendung der Gesamtbewertung in der Praxis

Die Klassen der Gesamtbewertung sind allein aufgrund der Bodeneigenschaften gebildet worden. Andere Faktoren wie die gegenwärtige Bewirtschaftungsintensität, das Alter der Drainagen oder räumliche Aspekte wurden nicht berücksichtigt. So könnten die verkehrstechnische Erschliessung oder die Nähe zu Bauzonen eine Rolle spielen. Böden mit gleichen Eigenschaften und somit der gleichen Gesamtbewertung können auf Grund ihrer Lage unterschiedlich gut geeignet sein für eine Massnahme. So könnten z. B. organische Böden, in einer Senke umgeben von mineralischen Böden mächtiger überschüttet werden als organische Böden in der Ebene, da einige Tragfähigkeits-Probleme wegfallen und keine Nachbarparzellen negativ beeinflusst werden. Siehe dazu folgende Beispiele:

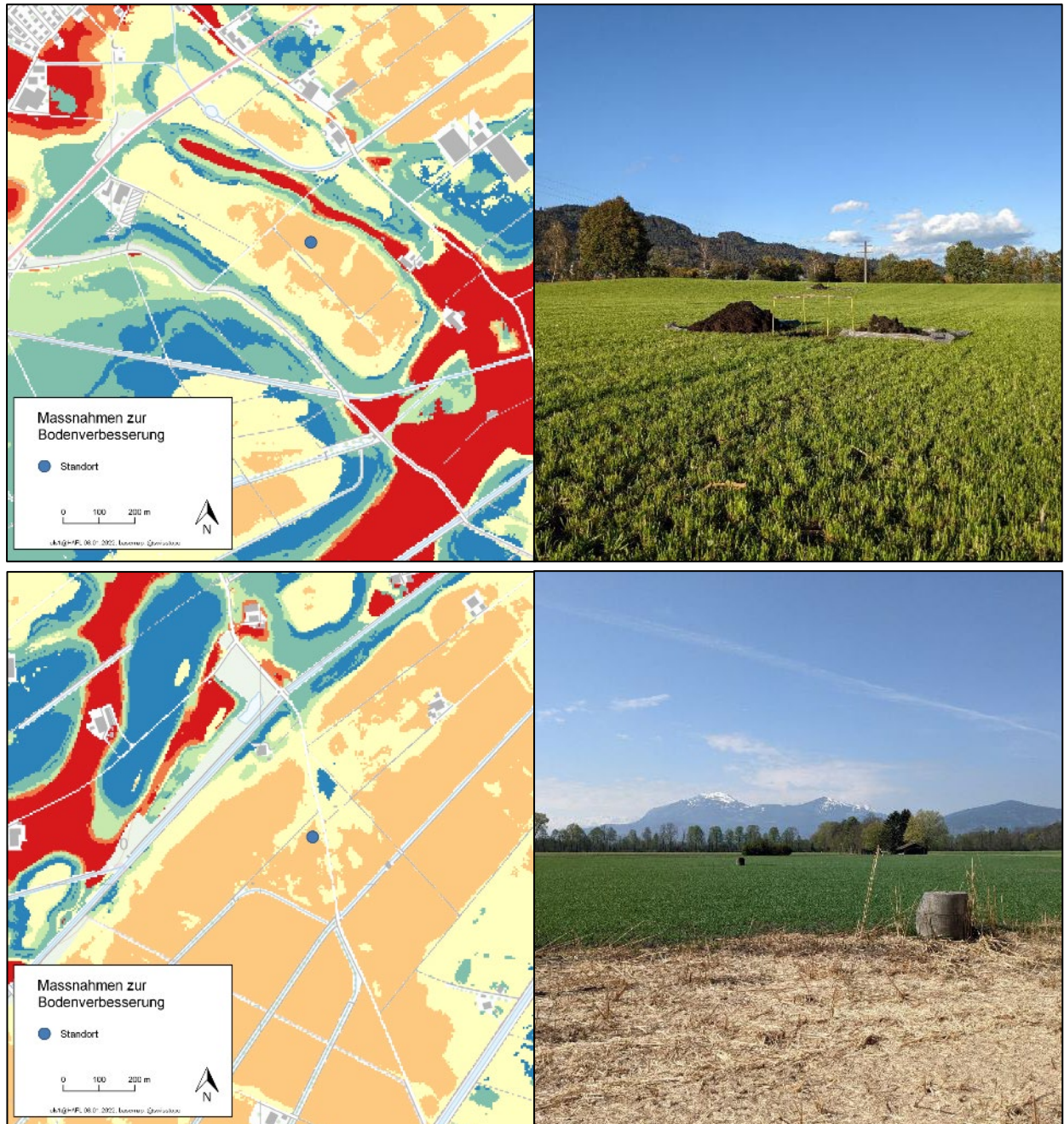


Abbildung 60: Ausschnitte aus der Karte der Gesamtbewertung. Am blauen Punkt wurde jeweils das Bild rechts aufgenommen. Oben ist die Senke bei Fulmad zu sehen. Dabei handelt es sich um einen stark organischen Boden umgeben von mineralischen Erhöhungen ehemaliger Bachläufe, sichtbar in der Karte als gelboranger Bereich umgeben von grün, blau und rot. Auf dem nebenstehenden Foto ist eine dieser Erhöhungen im Hintergrund zu sehen. Unten ist ein Ausschnitt aus dem Isenriet zu sehen. Bis zu Rietaach hin ist das Terrain flach und die Bodeneigenschaften sehr homogen. An beiden Standorten wurde die Massnahmeneffizienz als tief und in etwas vorteilhafteren Bereichen als eher tief bewertet. Aufgrund der Lage wäre es aber vorstellbar im oberen Fall die ganze Landschaftskammer aufzufüllen, da hier kein Grundwasser in Nachbarparzellen gedrückt wird, Drainagen nicht unterbrochen werden und keine Gefahr bestünde, dass die Auffüllung als Ganzes absichert.

Zur Interpretation der Karten ist zu beachten, dass die Einzelnen 5x5 m-Pixel immer in ihrer Grundgesamtheit betrachtet werden sollten. Wenn z. B. eine Parzelle in ihrer Gesamtheit fast nur einen Bewertungswert enthält und ganz wenige andere Werte, dann kann dies auf einen real relevanten Wechsel der Bodeneigenschaften hinweisen, ein wenig bedeutendes Kleinobjekt sein oder eine lokale Überinterpretation der Karte sein. Dies soll anhand des nebenstehenden Beispiels erläutert werden. Abgebildet sind zwei Parzellen im Krumensee, die dortigen Böden liegen hauptsächlich in der Kategorie «hohe Massnahmeneffizienz». Es handelt sich dabei um Muddeböden mit einem mineralischen Oberboden mit etwas über 5 % OS. Gegen Süden wird die mineralische Überdeckung mächtiger, was zur Klassierung «sehr hohe Massnahmeneffizienz» führt. Weiter sind in der Ebene die Bereiche im Osten ebenfalls in der höchsten Klasse, dort sind die mineralischen Böden von Substrat mit einem höheren OS unterlegt. In Parzelle B sind nun 700 m<sup>2</sup> in der Klasse «sehr hoch». Bei einer Überschüttung könnten diese vernachlässigt werden und die ganze Parzelle als eine Einheit der Klasse «hoch» betrachtet werden. Im Idealfall würde man eine oder mehrere Prüfbohrung machen, um zu sehen, ob der Bereich in der Realität wirklich unterschiedlich ist und wie viel Fläche er einnimmt. Auf Parzelle A liegen 3200 m<sup>2</sup> in der Klasse «sehr hoch». Dies ist ebenfalls nur ein geringer Anteil. Da es sich aber um den Beginn eines Übergangs der Bodeneigenschaften handelt, hin zu einem mineralischen Boden, wäre hier eine Berücksichtigung dieses Wechsels der Klassen bei einer Überschüttung eher sinnvoll.

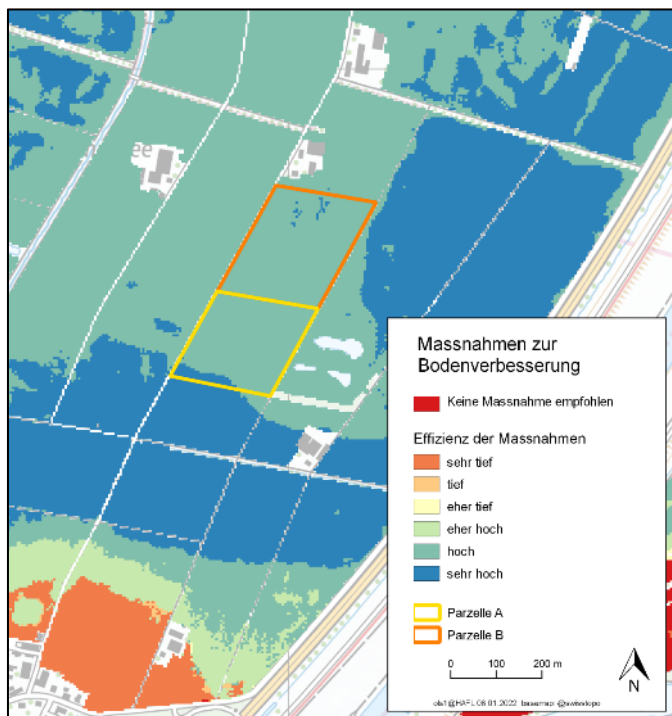


Abbildung 61: Ausschnitte aus der Karte der Gesamtbewertung aus dem Gebiet Krumensee bei Kriessern mit zwei zufällig ausgewählten Parzellen.

In sehr organischen Böden werden bereits überschüttete Flächen in der Gesamtbewertung oft etwas besser bewertet. So fallen Teile des Isenriet aufgrund von aufgebrachtem Material in die Klasse «eher tief» statt «tief». Dies ist gewollt, denn eine wiederholte geringmächtige Überschüttung kann in solchen Böden zielführend sein.

Die Feldaufnahmen haben gezeigt, dass durch wiederholtes Aufbringen von mineralischem Material über einen längeren Zeitraum gute Resultate erzielt werden. Die Gefahr von negativen Nebeneffekten wie Verdichtung sind dabei tiefer als bei einer grösseren Einzelmassnahme auch wird dadurch die Einschränkung durch die Nachfolgebewirtschaftung reduziert. Kleine Schüttmächtigkeiten von wenigen cm könnten in die bestehende Fruchtfolge integriert werden. Das Material aus dem Projekt Rhesi könnte demnach auf Bodenumschlagsplätzen gelagert werden und über einen längeren Zeitraum in kleineren Mengen im Perimeter auf Parzellen in geringen Schüttmächtigkeiten aufgebracht oder eingestreut werden. Dies würde aber einen längeren Zeithorizont von mehreren Jahren bedingen.

## 9 Ausblick

Die generierte Bodeninformationen sind sowohl als flächige Rasterkarten wie auch als Punktaufnahmen vorhanden. Dadurch können diese Information auch für über das Projekt hinausgehende Anwendungen gebraucht werden. Zum Beispiel könnten sie genutzt werden, um das Inventar der FFF zu aktualisieren oder Fragen im Zusammenhang mit dem Ausstoss von Treibhausgasen aus Böden zu klären. Je nach Fragestellung können die Karten direkt genutzt werden oder es sind weitere Ableitungen und Unsicherheitsprüfungen der Modelle notwendig. In Zukunft wird auch zu überlegen sein, welche Kombination von Bodeneigenschaften und welche Ableitungen schweizweit als Entscheidungsgrundlage für Behörden dienen können. Die Entwicklung solcher Rasterkarten ist noch Pionierarbeit, die fortgesetzt werden muss.

Im Projekt wurden Anpassungen und Ausdefinitionen für die Ansprache der Böden im Perimeter geschaffen, diese können genutzt werden, um zukünftig die lokalen Böden bei verschiedensten Fragestellungen homogen und solide zu beschreiben. Dies erlaubt auch eine Erweiterung und Ausdifferenzierung der generierten Bodeninformation mit gleichbleibender Qualität. Bei entsprechender Schulung wird so z.B ermöglicht in einem Bauprojekt in genügender Genauigkeit und Reproduzierbarkeit den Ist-Zustand eines Bodens sowie dessen Eigenschaften einige Jahre nach einer Massnahme zu beschreiben, selbst wenn die Aufnahmen durch verschiedene Personen unabhängig voneinander erfolgen.

Die Karten werden aufgrund von anthropogenen Eingriffen und der anhaltenden Sackung in einigen Jahrzehnten nicht mehr aktuell sein. Mit den vorhandenen Rohdaten können sie mit einem vergleichbar kleinen Aufwand aktualisiert werden. Wie dies zum Beispiel für die organischen Böden in den Niederlanden gemacht wurde (Kempen et al. 2009)

Um die Dynamik und den Wasserhaushalt der Böden besser zu verstehen, wäre es nötig mehrere Piezometer in verschiedenen Tiefen zu installieren und über einen längeren Messzeitraum zu betreiben. Insbesondere bei den organischen Böden liessen sich dadurch wichtige Erkenntnisse zum Wasserhaushalt und zur Geschwindigkeit der Zersetzung der OS gewinnen. Die gegenwärtig im Perimeter vorhandenen Grundwassermessstellen reichen dazu nicht aus, denn sie sind in den organischen und organomineralischen Böden nur spärlich vorhanden.

In Zukunft könnte allein durch eine angepasste dynamische Drainagebewirtschaftung die Sackungsrate in grossen Teilen des Perimeters gesenkt werden. In extensiveren Kulturen, während der Vegetationsruhe oder bei Trockenheit wäre es hilfreich, wenn der von den Drainagen bestimmte Grundwasserspiegel in Böden mit hohen OS-Gehalten erhöht werden könnte.

## Danksagung

Das Projekt konnte nur durch den Einsatz Vieler zum Erfolg geführt werden. Es ist nicht möglich, all die Personen namentlich zu nennen, welche sich mit uns ausgetauscht haben und uns in irgendeiner Form zum Nach- und Weiterdenken angeregt haben.

Vielen herzlichen Dank.

Ganz herzlich für ihre Mitarbeit bedanken möchten wir uns bei Anina Schmidhauser, Benedikt Kogler, Bernd Robbert, Dylan Tatti, Franziska Büeler, Jonas Siegrist, Liv Kellermann, Matthias Heeb, Martin Zürer und Team, Nadège Vaucher, Peter Trachsel, Roland Schafflützel und Sophie van Geijtenbeek.

Für die fachliche oder organisatorische Unterstützung bedanken wir uns bei Corinna Rohner, Guido Schmid und Team, Hansjakob Zwingli, Jean-Michel Gobat, Jiri Presler, Jutta Zeitz, Kurt Hollenstein, Laurentiu Constatin, Matthias Kreis, Markus Keel, Markus Mähr, Markus Schatzmann, Rolf Huber, Rolf Künzler und Urs Kost.

Ein besonderer Dank geht an die Landwirte und Landwirtinnen im Rheintal ohne deren Mithilfe und Verständnis das Projekt nicht möglich gewesen wäre. Insbesondere bedanken wir uns bei Daniel Langenegger, Erwin Benz, Stefan Britschgi, Heinz Nüesch-Tanner, Josef Ritter-Hanselmann, Reto Segmüller, Ruedi Graf-Heierli, Simon Lässer und Thomas Fehr.

## 10 Literaturverzeichnis

- Agroscope (2020a): Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. Bestimmung der Körnung in der Feinerde. Zürich: Agroscope.
- Agroscope (2020b): Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope. pH-Wert im Volumenextrakt. Zürich: Agroscope.
- Baize, Denis; Girard, Michel-Claude (2009): *Référentiel pédologique 2008*. Versailles: Éditions Quæ (Collection Savoir-faire). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10694242>, zuletzt geprüft am 21.02.2020.
- Berthier, L; Chaplot, V; Jafferezic, A; Lemercier, B; Racapé, A; Walter, C (2014): Diagnostic in situ de la réduction du fer dans les sols par l'utilisation d'un test de terrain colorimétrique. In: *Étude et Gestion des Sols* 21 (1), S. 51-59.
- Breiman, L. (2001): Random Forests. In: *Machine Learning* 45, S. 5-32.
- Brunner, H.; Nievergelt, J.; Peyer, K.; Weisskopf, P.; Zihlmann, U. (2002): Klassifikation der Böden der Schweiz. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (FAL). Zürich.
- Brunner, Johann; Jäggli, Friedrich; Nievergelt, Jakob; Peyer, Karl (1997): Kartieranleitung. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Zürich Reckenholz: Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (FAL).
- Carlson, Kimberly M.; Goodman, Lael K.; May-Tobin, Calen C. (2015): Modeling relationships between water table depth and peat soil carbon loss in Southeast Asian plantations. In: *Environ. Res. Lett.* 10 (7), S. 74006. DOI: 10.1088/1748-9326/10/7/074006.
- Childs, C. W. (1981): Field tests for ferrous iron and ferric-organic complexes (on exchange sites or in water-soluble forms) in soils. In: *Soil Research* 19 (2), S. 175-180. DOI: 10.1071/SR9810175.
- DIN 18128, 12.2002: DIN 18128 | 2002-12 - Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes.
- DIN 19539, 12.2016: DIN 19539 - Untersuchung von Feststoffen - Temperaturabhängige Differenzierung des Gesamtkohlenstoffs (TOC400, ROC, TIC900).
- DIN EN 15936, 08. 2020: DIN EN 15936 (Entwurf) - Schlamm, behandelter Bioabfall, Boden und Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) mittels trockener Verbrennung.
- Eberle, Markus (1987): Zur Lockergesteinsfüllung des St. Galler und Liechtensteiner Rheintales. In: *Eclogae Geologicae Helveticae* 80.
- ELF (1996): Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope - Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung. Forschungsanstalten Agroscope ART und ACW. Zürich und Changins (1).
- Evans, Chris D.; Williamson, Jennifer M.; Kacaribu, Febrio; Irawan, Denny; Suardiwerianto, Yogi; Hidayat, Muhammad Fikky et al. (2019): Rates and spatial variability of peat subsidence in Acacia plantation and forest landscapes in Sumatra, Indonesia. In: *Geoderma* 338, S. 410-421. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.12.028.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn (FABO SO) (2017): Bodenkartierung Kt. SO, Projekthandbuch Teil III, Kartiermethodik (Kartiermethode FAL24+). 6. ergänzte Ausgabe. Hg. v. Amt für Umwelt des Kantons Solothurn.
- Fell, Holger; Roßkopf, Niko; Bauriegel, Albrecht; Hasch, Bernhard; Schimmelmann, Martina; Zeitz, Jutta (2015): Erstellung einer aktualisierten Moorkarte für das Land Brandenburg. In: *TELMA - Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde* 45, S. 75-104. DOI: 10.23689/figeo-2898.
- Grzywna, Antoni (2017): The degree of peatland subsidence resulting from drainage of land. In: *Environ Earth Sci* 76 (16). DOI: 10.1007/s12665-017-6869-1.
- Hertzog, Marie (2017): Modelling soil attributes with the Random Forest method for the Swiss forest area. Hg. v. ETH Zürich. ETH Zürich. Zürich (Master Thesis), zuletzt geprüft am 10.05.2019.
- Höper, Heinrich (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. In: *Telma* 37, S. 85-116.

- Hoyt, Alison M.; Chaussard, Estelle; Seppalainen, Sandra S.; Harvey, Charles F. (2020): Widespread subsidence and carbon emissions across Southeast Asian peatlands. In: *Nat Geosci* 13 (6), S. 435–440. DOI: 10.1038/s41561-020-0575-4.
- KA5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland.
- Kaila, Armi (1956): Determination of the degree of humification in peat samples. In: *Agricultural and Food Science* 28 (1), S. 18–35.
- Kempen, Bas; Brus, Dick J.; Heuvelink, Gerard B. M.; Stoorvogel, Jetse J. (2009): Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. In: *Geoderma* 151 (3-4), S. 311–326. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.04.023.
- Kursa, Miron B.; Rudnicki, Witold R. (2010): Feature Selection with the Boruta Package. In: *J. Stat. Soft.* 36 (11). DOI: 10.18637/jss.v036.i11.
- Leifeld, J; Vogel, D; Bretscher, D (2019): Treibhausgasemissionen entwässerter Böden. In: *Agroscope Science* (74), zuletzt geprüft am 07.10.2019.
- Lévesque, M.; Diné, H. (1977): Fiber content, particle-size distribution and some related properties of four peat materials in Eastern Canada. In: *Can J Soil Sci* 57 (2), S. 187–195. DOI: 10.4141/cjss77-023.
- Meinshausen, N. (2006): Quantile regression forests. In: *Journal of Machine Learning Research* 7, S. 983–999.
- Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nieslen, G. A.; Peterson, G. A. (1993): Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. In: *Soil Science Society of America Journal* 57 (2), zuletzt geprüft am 20.05.2019.
- Post, L. von; Granlund, L. E. (1926): Södra Sveriges Torvtillgångar. In: *Sveriges geologiska undersökning, Yearbook* 19.2 Series C (335), S. 1–127.
- Regan, S.; Flynn, R.; Gill, L.; Naughton, O.; Johnston, P. (2019): Impacts of Groundwater Drainage on Peatland Subsidence and Its Ecological Implications on an Atlantic Raised Bog. In: *Water Resour Res* 55 (7), S. 6153–6168. DOI: 10.1029/2019WR024937.
- Schipper, L. A.; McLeod, M. (2002): Subsidence rates and carbon loss in peat soils following conversion to pasture in the Waikato Region, New Zealand. In: *Soil Use Manage* 18 (2), S. 91–93. DOI: 10.1079/Sum2001106.
- Schipper, Louis A.; Mudge, Paul L.; Kirschbaum, Miko U. F.; Hedley, Carolyn B.; Golubiewski, Nancy E.; Smaill, Simeon J.; Kelliher, Francis M. (2017): A review of soil carbon change in New Zealand's grazed grasslands. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research; 2016* 60 (2), S. 93–118. DOI: 10.1080/00288233.2017.1284134.
- United States Department of Agriculture (2014): Keys to Soil Taxonomy - Twelfth Edition, 2014. Keys to Soil Taxonomy - Twelfth Edition, 2014, zuletzt aktualisiert am 14.04.2020, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

# I. Anhang

I.1. Grundlagendaten	II
I.2. Aufnahmeblätter	III
I.3. Automatisierte Horizontierung mittels Bildanalyse	VI
I.4. Feinerdekörnung	VII
I.5. Vernässungsmerkmale	IX
I.6. Erklärende Grössen	XI
I.7. Mehrstufige Modellierungen	XIII
I.8. Verteilungsstatistiken einiger modellierter Bodeneigenschaftskarten	XIV
I.9. Liste der modellierten Bodeneigenschaften	XVII
I.10. Unabhängige Validierung der modellierten Bodeneigenschaftskarten	XVIII
I.11. Interne Validierung der modellierten Bodeneigenschaftskarten	XX
I.12. Vorhersageintervall	XXII
I.13. Synthetische Bodentypen	XXIII
I.14. Bewertungsmatrix	XXVI

## I.1. Grundlagendaten

Anhang Tabelle 1: Übersicht der im Projekt verwendeten räumlichen Daten.

<b>Geodaten</b>	<b>Beschrieb</b>
Bodenkarte 72/76	Profil- und Polygondaten
FFF	Fruchtfolgefleichen
Eschmannkarte	Karte aus dem Jahr 1850
Siegfriedkarten	Karten aus den Jahren 1887-1944
Orthophotos	Orthophoto aus den Jahren 2004 - 2018
Landeskarte	Landeskarte in den Massstäben 1:10'000 -1:100'000
Prüfperimeter_Bodenverschiebung	Böden mit Potential zur Pruwertüberschreitung
KbS	Kataster der belasteten Standorte
Drainagen	Lage der Drainageleitungen
Leitungskataster	Strom-, Wasser, Abwasser-, Gas- und Telefonleitungen
Ereigniskataster_Wasser	Ereigniskataster des Kantons zum Prozess Wasser
Grundwasser_Max	Maximale Grundwassermächtigkeit gemäss kantonaler GW-Karte
GW_NW	Grundwasserspiegel am 02/02/2010 bei Niedrigwasser
GW_MW	Grundwasserspiegel am 03/09/2010 bei Mittelwasser
GW_HW	Grundwasserspiegel am 15/06/2016 bei Hochwasser
Amtliche Vermessung	Parzellen inklusive Bodenbedeckung
Sondierbohrungen	Geologische Sondierbohrungen
swissALTI3D	digitales Höhenmodell 0.5m Auflösung
DHM25	digitales Höhenmodell 25m Auflösung
Geologische_Karte_SG	Harmonisierte Geologische Vektordaten Kanton St.Gallen
Geologische_Karte_CH	Geologischer Atlas Blätter Gais, Rorschach, Seantis und St. Margrethen
Bewirtschafterangaben	Bewirtschafterangaben für alle Parzellen im Perimeter
Bodenverbesserungsprojekte	Verortung von Bodenprojekten durch Kanton und Ortsgemeinden
Historische Drainagepläne	Archivpläne mit Probegruben seit ca. 1915
Naturschutzgebiete	Gebiete mit unterschiedlichen Natur- und Landschaftsschutzgraden
Archäologische Fundstätten	Gebiete mit Archäologischen Fundstätten
Gewässernetz	Gewässerkarte 1:10'000
swissTLM3D	Digitales Landschaftsmodell
Sentinel	Wolkenfreie Satellitenbilder
BoKa_Oesterreich	Digitale Bodenkarte Österreichs



## I.2. Aufnahmeblätter

Bodenprofilaufnahme Stechbohrer / Holländer													Beo – ID (*)										
persönliche Punkt ID		X-Koordinaten				Y-Koordinaten				Höhe	Kleinrelief (65)	Landschafts-Element (64)	Neigung %	Geländeform (26)									
		2				1																	
Projekt (2)	Profilart (3)	Kartierer (4)	Datum (5)	Vegetation (61)	Flurbestand (6)	Kalkgrenze (24)	PNG (24)	Notizen															
								Untertypen															
Horizont Nr. (27)	Tiefe von (28)	Tiefe bis (28)	Ausgangsnat. Gesteine (62)	Kalk CaCO <sub>3</sub> (44)	OS-Feld (33)	Zersetzungsgrad (cc)	Ton (1)	Schluff (1)	Kies (41)	Steine (42)	Feuchtigkeit (dd)	PNG-Faktor Vernässung	Oberboden-Unterboden (ff)	PNG-Faktor strukturbedingt	Litho (29.1)	Bodenbildung (29.2)	Horizonte (29)	Zustand org. Subst. (30/1)	O <sub>2</sub> -Mangel (30.2)	Getügelzustand (x, p, ...) (30/3)	Technogenes Substrat (hh)	Notizen: Torfart	
																							1
1																							
2																							
3																							
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							

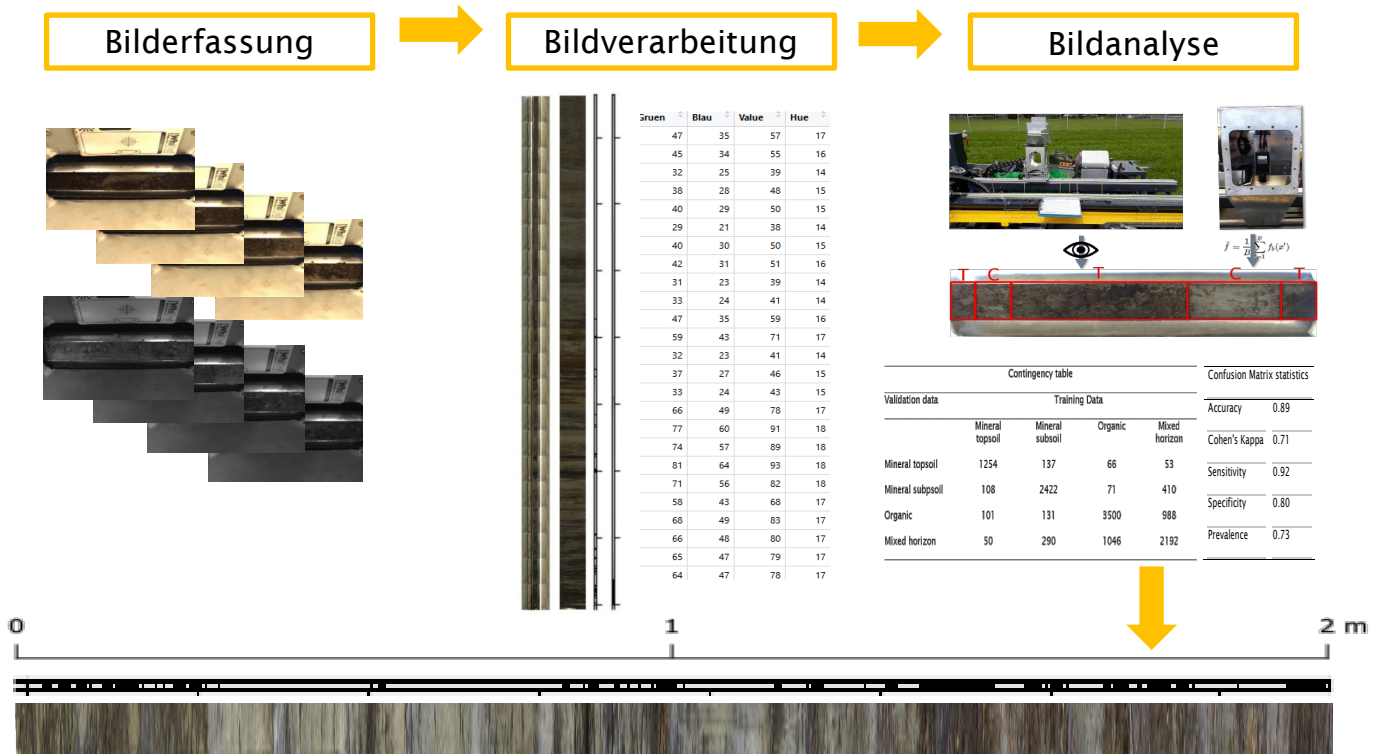
Anhang Abbildung 1: Aufnahmeblatt Bohrung



	Farbe (Munsell) Matrix	Farbe (Munsell) Flecken	Notizen: Min-Anreich. (30/4) Alkalien (30/5)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Anhang Abbildung 3: Aufnahmeblatt Profil. Seite 2.

### I.3. Automatisierte Horizontierung mittels Bildanalyse



Anhang Abbildung 4: Schema der automatisierten Horizontierung mittels Bildanalyse.

#### Bilderfassung:

Auf dem Feldlaptop wird der Bohrung und den dazugehörigen Bildern ein Name zugewiesen, es werden pro Bohrung je 20 Einzelne RGB und Nahinfrarot Bilder erfasst und auf dem Feldlaptop abgespeichert. Als Kamera wird eine JAI AD-1 30GE verwendet.

#### Bildverarbeitung:

Aus den vier Bändern (Rot, Grün, Blau und Nahinfrarot) der Aufnahmen wurden verschiedene Farbräume (HSV, CIELAB, CIE-LCh) und Indizes (RednessRGB, BrightnessRGB, RednessLAB) abgeleitet. Das heisst, es wurden Bänder errechnet, die nicht mehr aus den drei Standardfarben bestehen, sondern aus abstrakteren Kategorien wie Lichtintensität oder Verhältnis von Rot zu Grün. Jedes dieser Bänder lässt sich als Bild darstellen. Solche Bilder sind für das menschliche Auge schwierig zu interpretieren, da sie nicht unserer täglichen Wahrnehmung entsprechen. Mittels computergestützten statistischen Verfahrens können daraus jedoch Eigenschaften herausgelesen werden, die in einem Normalen RGB-Bild verborgen bleiben. Insbesondere wenn eine Vielzahl solcher Bänder kombiniert wird.

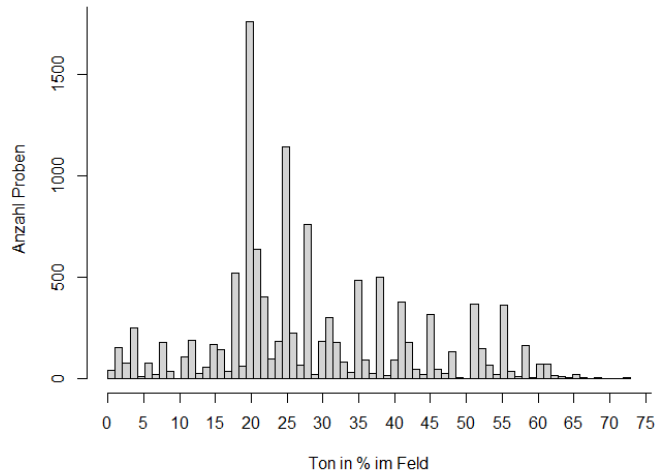
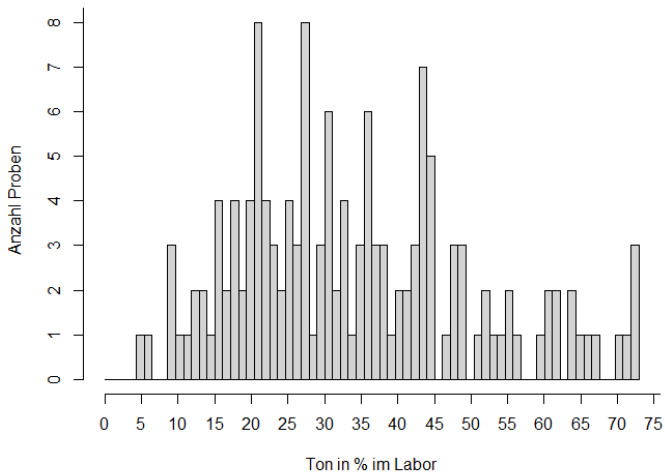
#### Bildanalyse:

Um solche Muster zu erkennen wird im Projekt das Random Forest-Klassifikationsverfahren eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren des maschinellen Lernens. In einem Algorithmus werden Entscheidungsbäume gebildet, die jeden Pixel der Bilder als organisch, organomineralisch (Mudde) oder mineralischer Ober- oder Unterboden einordnen. Es werden dabei eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen basierend auf den verschiedenen Indizes und Farbräumen parallel errechnet. Die endgültige Zuweisung als mineralisch oder organisch erhält ein Pixel dann aus einer Mehrheitsentscheidung über alle Entscheidungsbäume. Anhand eines Teils (die sogenannten Trainingsdaten, ca. 80 % der Daten) der Bohrkern werden so Kriterien festgelegt, die entscheiden, wie ein Pixel zugewiesen wird. Anschliessend werden diese Kriterien auf die restlichen Bilder (die sogenannten Validierungsdaten, ca. 20 % der Daten) angewandt, um zu zeigen, wie gut der Algorithmus klassifiziert. Da in der pedologischen Ansprache nur Horizonte ab einer Mächtigkeit von 5 cm angesprochen werden, werden die Resultate der Bildanalyse am Ende ebenfalls auf diese Auflösung zusammengefasst.

#### Resultate:

Als Resultat werden nun pro Bohrung alle 5 cm auf 2 m, also in insgesamt 40 Abschnitten die Eigenschaften wiedergegeben. Es wird unterschieden zwischen organischen Horizonten, Muddehorizonten, mineralischen Oberbodenhorizonten und Ton oder Schluff Unterboden und Untergrund. Diese Klassierung wurde für insgesamt 29'000 Horizonte vorgenommen die Richtigkeit der Klassifikation lag dabei bei 89 %. Das heisst, in 89 % der Fälle wurden die Horizonte durch das maschinelle Lernen gleich klassifiziert wie in der pedologischen Ansprache.

## I.4. Feinerdekörnung

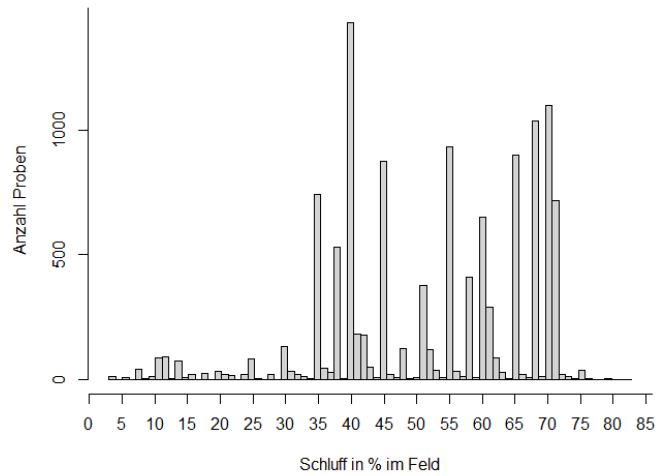
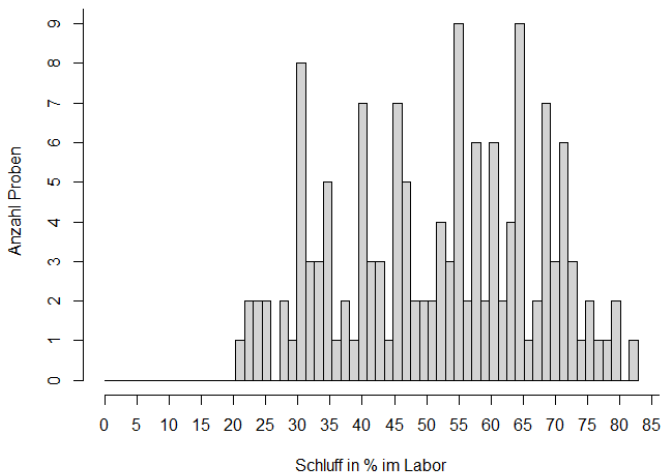


Anhang Abbildung 6: Histogramme der im Labor gemessenen ( $n = 142$ ) und im Feld gemessenen Ton-Gehalte ( $n = 11'883$ ). Die Spitze um 20 % stammt aus den schluffigen Rheinsedimenten. Auffällig ist das geringe Vorkommen von Werten unter 15 % und das langsame Auslaufen gegen hohe Werte hin. Bis weit über 60 % wurde Ton noch häufig geschätzt und gemessen, bei diesen Messwerten handelt es sich um Sedimente aus den Appenzeller Alpen.

Messwertstatistik:

Feld: Minimum 0 %; Median 51 %; Durchschnitt 28 %; Maximum 72 %

Labor: Minimum 4 %; Median 32 %; Durchschnitt 34 %; Maximum 75 %

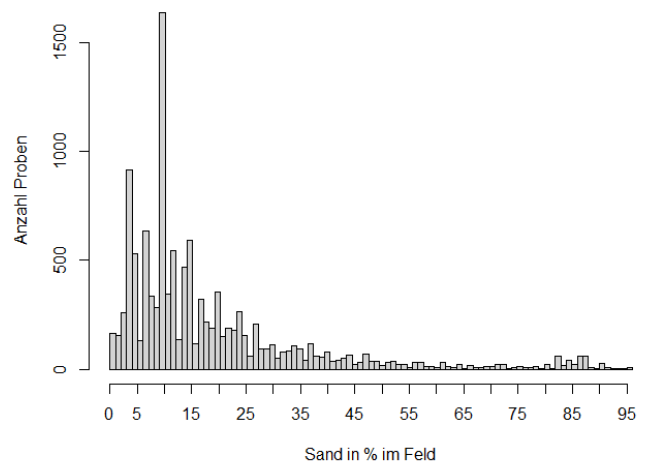
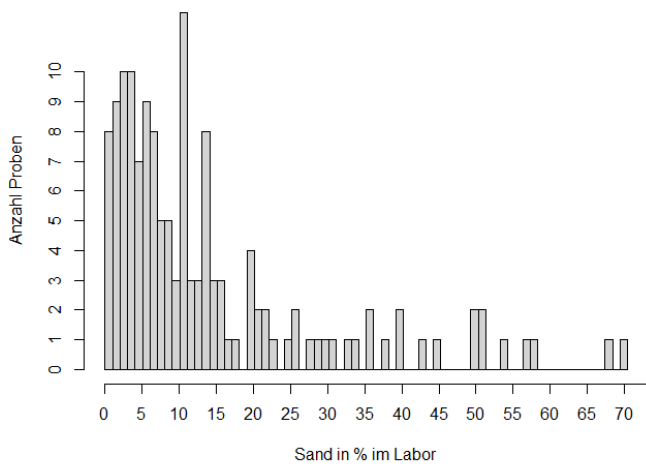


Anhang Abbildung 5: Histogramme der im Labor gemessenen ( $n = 142$ ) und im Feld gemessenen Schluff-Gehalte ( $n = 11'883$ ). Die Verteilung ist eher linksschief mit einer hohen Konsistenz von Werten zwischen 35 % und 72 %. Die Werte über 50 % umfassen die Rheinsedimente, die Werte darunter stammen von Sedimenten aus den Appenzeller Alpen.

Messwertstatistik:

Feld: Minimum 3 %; Median 55 %; Durchschnitt 52 %; Maximum 80 %

Labor: Minimum 22 %; Median 54 %; Durchschnitt 52 %; Maximum 83 %

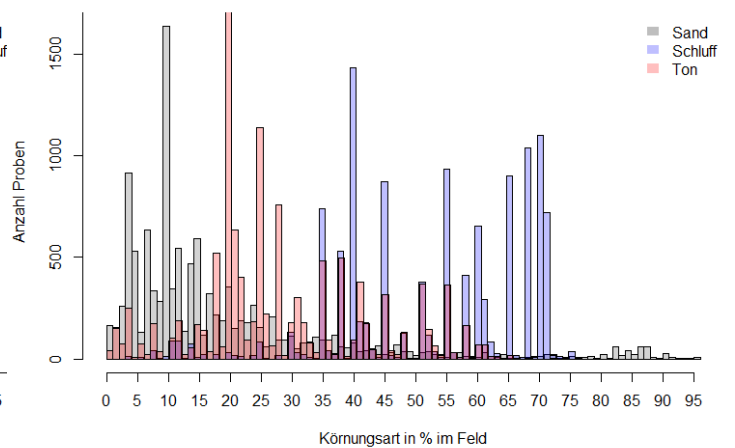
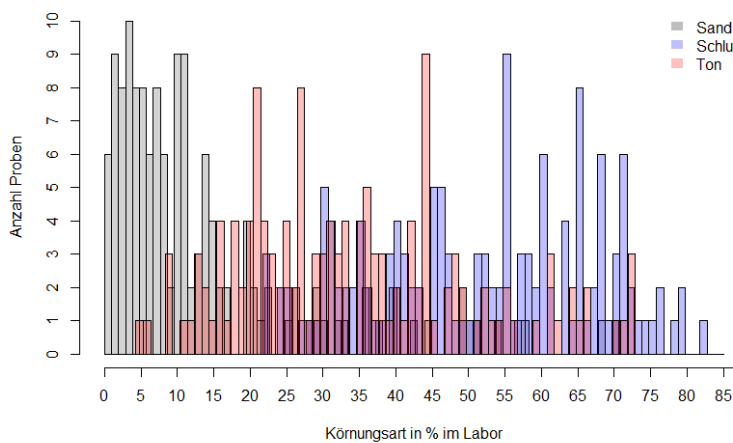


Anhang Abbildung 8: Histogramme der im Labor gemessenen ( $n = 142$ ) und im Feld gemessenen Sand-Gehalte ( $n = 11'883$ ). Gut sichtbar ist der geringe Sandgehalt in den meisten Böden im Perimeter, die Verteilung ist stark rechtschief. Um die 85 % gruppieren sich einige Schätzwerte, bei diesen handelt es sich um Sandbänder nahe des Rheins.

Messwertstatistik:

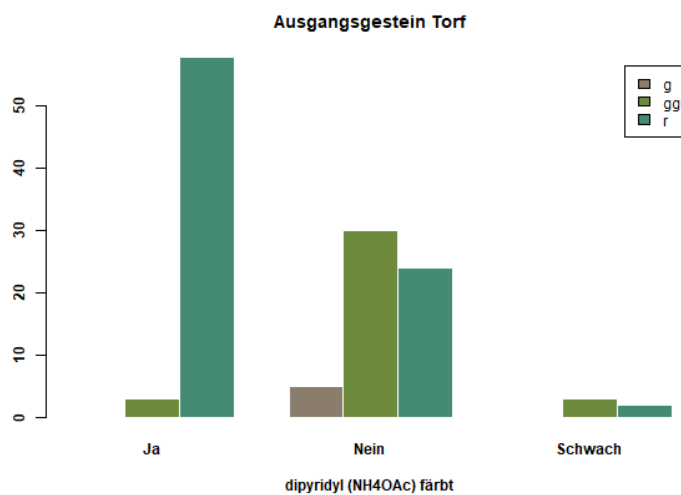
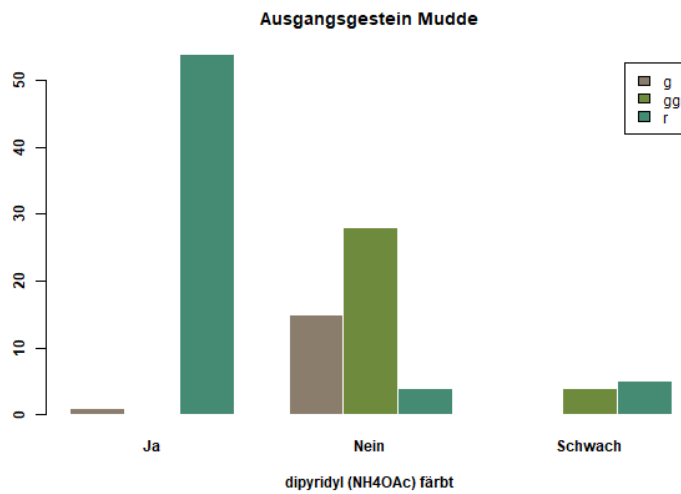
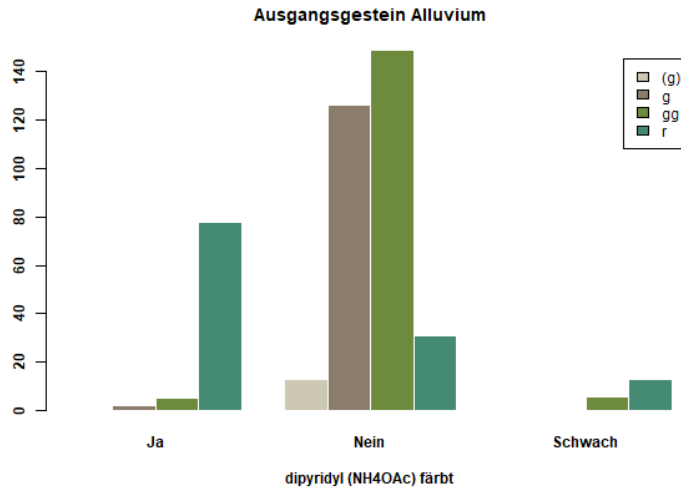
Feld: Minimum 0 %; Median 12 %; Durchschnitt 19 %; Maximum 96 %

Labor: Minimum 0 %; Median 9 %; Durchschnitt 17 %; Maximum 70 %



Anhang Abbildung 7: Zusammenfassung der Histogramme der im Labor gemessenen ( $n = 142$ ) und im Feld gemessenen Korngrößen ( $n = 11'883$ ).

## I.5. Vernässungsmerkmale



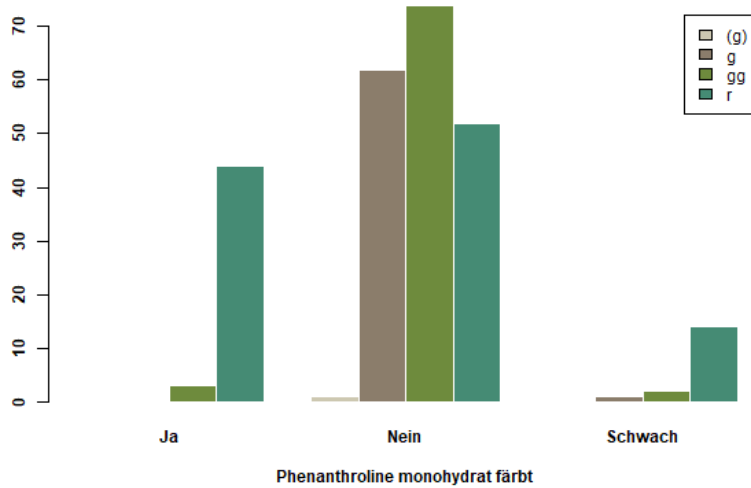
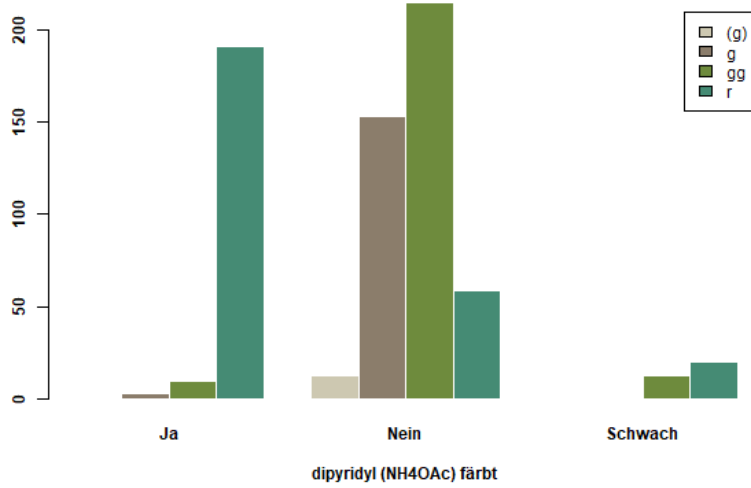
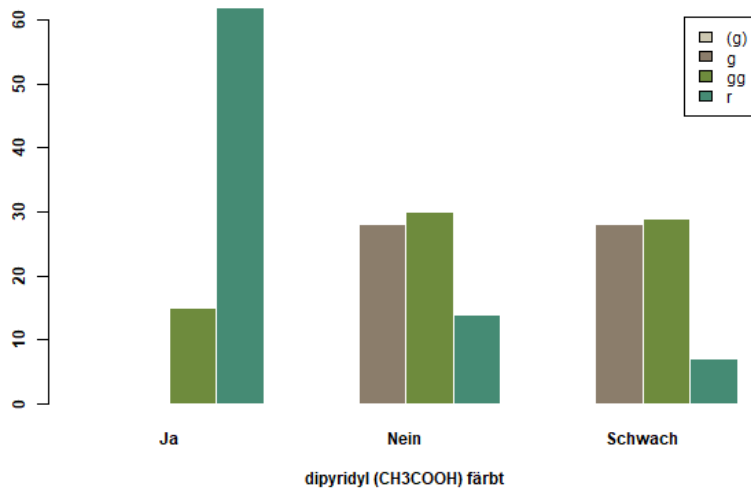
Anhang Abbildung 9: Übersicht der Ergebnisse der Test mit  $\alpha, \alpha$ -Dipyrindyl in einmolarem Ammoniumacetat (NH<sub>4</sub>OAc). Insgesamt wurden 895 Horizonte beprobt.

Dargestellt ist, ob der Indikator eine klare Färbung (Ja), keine Färbung (nein) oder nur eine schwache Färbung gezeigt hat, aufgeteilt nach im Feld angesprochenen Vernässungsmerkmalen. Die Angaben beziehen sich jeweils auf einen Bodenhorizont, deren kumulative Anzahl auf der y-Achse angegeben ist.

In alluvialem Ausgangsmaterial gibt der Indikator fast ausschliesslich in reduzierten Horizonten (r) an. In gut einem Viertel der angesprochenen r-Horizonte kam es zu keiner Reaktion, hier hat der Indikator nicht oder etwas weiter unten umgeschlagen. In Mudde zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei hier der Anteil, der nicht erkannten r-Horizonte etwas tiefer ist.

In Torf schlug der Indikator in einem Drittel der r-Horizonte nicht um. Dies zeigt die Schwierigkeit des Erkennens der roten Farbe im Torfsubstrat.

g- und gg-Horizonte wurden in allen Substraten verlässlich als nicht-reduziert erkannt. Eine Rotfärbung des Indikators lässt also fast immer den Schluss zu, dass reduktive Bedingungen vorherrschen. Bei einem Ausbleiben des Umschlagens ist eine genauere Interpretation notwendig.



Anhang Abbildung 10: Ergebnisse der drei Fe(II)-Indikator Flüssigkeiten.  $\alpha,\alpha$ -Dipyridyl in 10 %-iger Essigsäure zeigt viele Falschpositive, 1,10-Phenanthroline Monohydrat viele Falschnegative.



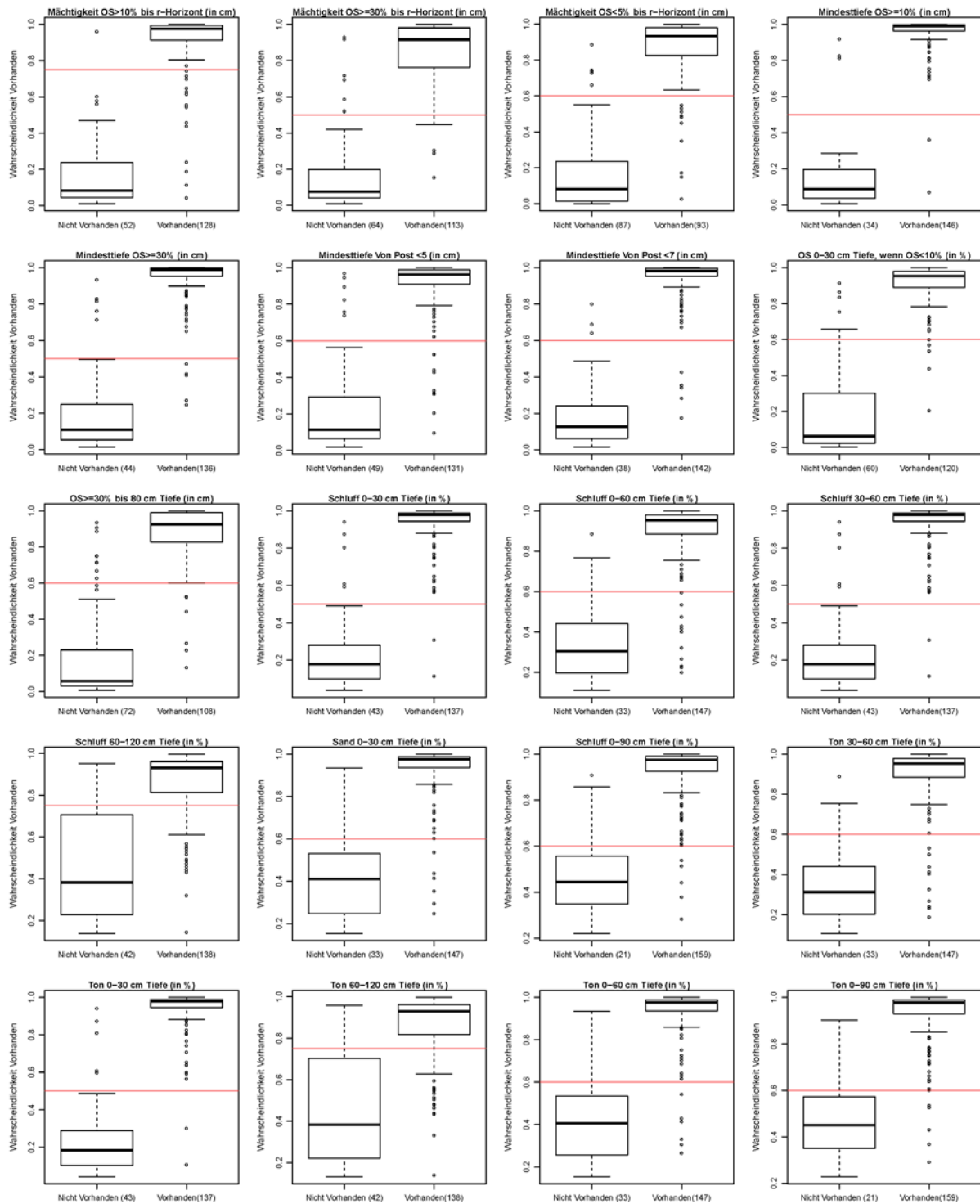
## I.6. Erklärende Grössen

Anhang Tabelle 2: Für Modellierungen verwendete erklärende Grössen.

Variable	Beschrieb	Quelle
Ueberschwemmungsereignisse	Ereigniskataster des Kantons zum Prozess Wasser	EK SG
Anthropogen Abhumusiert	Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene Auffüllung	Abhumusierte Flächen, Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene Gewässer	Ehemalige Gewässer und Kanäle, die anthropogen angelegt oder aufgehoben wurden. Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene KbS	Belastete Standorte. Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene Senken	Anthropogen entstandene Senken, wie Kiesgruben. Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene Torfstiche	Torfstichgebiete. Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Anthropogene Wege	Aufgehobene Wege. Karte der anthropogenen Objekte	Historische Karten; DHM; KbS
Sehr Hell	Sehr helle Bodenfarbe visuell klassiert	Orthophoto
Hell	Helle Bodenfarbe visuell klassiert	Orthophoto
Braun	Braune Bodenfarbe visuell klassiert	Orthophoto
Dunkel	Dunkle Bodenfarbe visuell klassiert	Orthophoto
Abstand zu Drainagen	Drainagekarte	Melioration
Drainagen mit Puffer	Drainagekarte	Melioration
Auffüllung >50 cm	Auffüllungen mit mind 50 cm Mächtigkeit. Polygone aus Feldarbeiten	Feldaufnahmen
Auffüllung>35 cm	Auffüllungen mit 35 - 50 cm Mächtigkeit. Polygone aus Feldarbeiten	Feldaufnahmen
Leitungen	Puffer um Leitungen (10 m, ausser Drainagen und Meteorwasser (3m))	Diverse Katasterführende Stellen
Handgezeichnete Straten	107 Straten aus der Konzeptkarte	Feldaufnahmen
Straten klassiert	Straten aus Konzeptkarte nach OS in 9 Klassen. (1=sehr organisch, 9= rein mineralisch)	Feldaufnahmen
BoKa 72/76 Bodentyp	12 verschiedene Bodentypen der BoKa 72/76	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Verdichtung	Verdichtung in 3 Klassen der BoKa 72/76	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Ton OB	BoKa 72/76 Tongehalt im Oberboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Ton UB	BoKa 72/76 Tongehalt im Unterboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Schluff OB	BoKa 72/76 Schluffgehalt im Oberboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Schluff UB	BoKa 72/76 Schluffgehalt im Unterboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Sand OB	BoKa 72/76 Sandgehalt im Oberboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Sand UB	BoKa 72/76 Sandgehalt im Unterboden in %	BoKa 72/76
BoKa 72/76 Farbcode	BoKa 72/76 Farbcodes nach Kartierlegende	BoKa 72/76
BoKa 72/76 klasiserter Wasserhaushalt	WHG nach Greiner klassifiziert und gerasterte Bodenbedeckungsklassen für Kartierung gruppiert und gerastert 1 = well-drained (I1,I2,G1G3,R1); 2 = moderately well-drained (I3,I4,G4); 3 = poorly drained (G5,G6,R2-R5); 0 = Ausserhalb	BoKa 72/76
BoKa 72/76 whg	Wasserhaushaltsgruppe der BoKa 72/76 in 3 Klassen	BoKa 72/76
BoKa 72/76 whg	Wasserhaushaltsgruppe der BoKa 72/76 in 3 Klassen	BoKa 72/76
FFF	Fruchtfolgefläche aus kantonalem Inventar	FFF-Inventar
Grundwasser Maximalstand	Grundwasser aus hydrologischer Karte	Kanton SG
DEM2m_SExt_smooth	Kleiner Ausschnitt geglättet	SwissALT3D
DEM2m_LExt_smooth	Grosser Ausschnitt geglättet	SwissALT3D
DEM10m_LExt_smooth	Resample auf 10m Pixel grosser Ausschnitt	SwissALT3D
DEM10m_SExt_smooth	Resample auf 10m Pixel kleiner Ausschnitt	SwissALT3D
slope2mproz5gs	Slope 10m, glätten auf 2m, nochmals glätten für glattes Erscheinungsbild bei 2m Auflösung	SwissALT3D
slope2mproz30gs	Slope 10m, stärkeres Glätten, nochmals glätten für glattes Erscheinungsbild bei 2m Auflösung	SwissALT3D
curv2m5gs	Krümmung total auf 10 m, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals glätten	SwissALT3D
curv2m30gs	Krümmung total auf 10 m, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals stärkere glätten	SwissALT3D
cindex10m	Convergence index	SwissALT3D
curvprof2m5gs	Krümmung Profile, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals glätten	SwissALT3D
tpi1km	Topographic Position Index (max Radius 1 km)	SwissALT3D
curvprof2m30gs	Krümmung Profile, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals stärker glätten	SwissALT3D
curvplan2m5gs	Krümmung planar, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals glätten	SwissALT3D
curvplan2m30gs	Krümmung planar, Glätten auf 2 m-Pixel, nochmals stärker glätten	SwissALT3D
tpi100m	Topographic Position Index (max Radius 100 m)	SwissALT3D
tpi500m	Topographic Position Index (max Radius 500 m)	SwissALT3D
vdist-strhard	Sackung gegenüber Strassen mit Hartbelag	SwissTLM3D und SwissALT3D
vdist-gew	Höhe über nächstem Gewässer (Vertikal-Distanz)	SwissTLM3D und SwissALT3D
hdist-gew	Horizontal-Distanz zum nächsten realen Gewässer	SwissTLM3D und SwissALT3D
vdist-rhein	Höhe über Rhein	SwissTLM3D und SwissALT3D
hdist-rhein	Horizontaldistanz zum Rhein	SwissTLM3D und SwissALT3D
TWIsaga10m-hist	TWI historisch, ohne Einfluss von Strassen und aktuellen Kanälen (10 m Auflösung)	SwissALT3D
mrxbf2m	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (2 m Auflösung)	SwissALT3D
mrxbf10m	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (10 m Auflösung)	SwissALT3D
mrrtf2m	Multiresolution Ridge Top Flatness (2 m Auflösung)	SwissALT3D

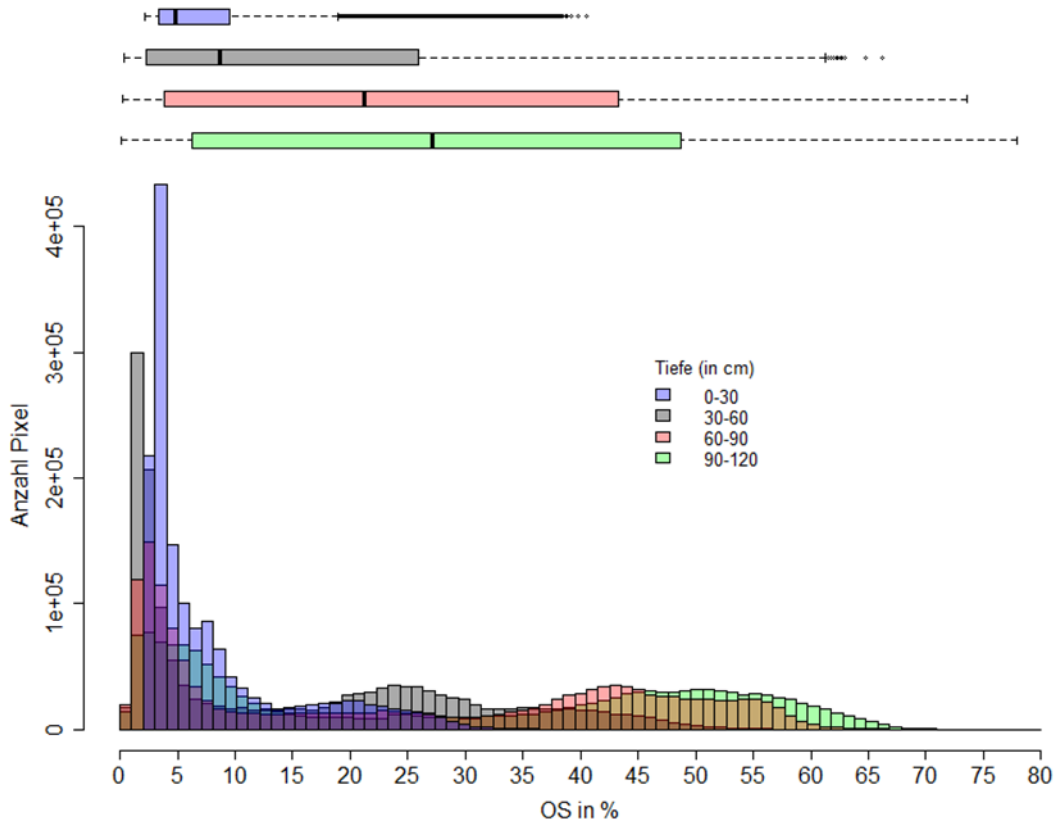
TWlcatchmod10m-hist	TWI historisch, ohne Einfluss von Strassen und aktuellen Kanälen (10 m Auflösung/Objektorientiert)	SwissALT3D
mrrtf10m	Multiresolution Ridge Top Flatness (10 m Auflösung)	SwissALT3D
TWlsaga10m	TWI aktuell, inkl. Einfluss von Strassen und Kanälen (Auflösung 10 m)	SwissALT3D
TWlcatchmod10m	TWI aktuell, inkl. Einfluss von Strassen und Kanälen (Auflösung 10 m/Objektorientiert)	SwissALT3D
TWlsaga2m	TWI aktuell, inkl. Einfluss von Strassen und Kanälen (Auflösung 2 m)	SwissALT3D
TWlcatchmod2m	TWI aktuell, inkl. Einfluss von Strassen und Kanälen (Auflösung 2 m/Objektorientiert)	SwissALT3D
gew-fldist	Overland Flow Distance to Channel Network	SwissALT3D
gew-vfldist	Overland Flow Distance to Channel Network	SwissALT3D
gew-hfldist	Overland Flow Distance to Channel Network	SwissALT3D
vdist-str4m	Sackung gegenüber Strassen bis und mit 4 m breite	SwissTLM3D und SwissALT3D
TWlsaga2m-hist	TWI historisch, ohne Einfluss von Strassen und aktuellen Kanälen (2 m Auflösung)	SwissALT3D
TWlcatchmod2m-hist	TWI historisch, ohne Einfluss von Strassen und aktuellen Kanälen (2 m Auflösung/Objektorientiert)	SwissALT3D
Sättigung Bodenfarbe	S aus HSV der automatisierten Farbklassifikation	Orthophoto
Value Bodenfarbe	V aus HSV der automatisierten Farbklassifikation	Orthophoto
Pilotbetriebe Klasse	Klassen der Bewirtschaftungsarten aus Pilotbetriebsbefragung	Befragung Pilotbetriebe

## I.7. Mehrstufige Modellierungen



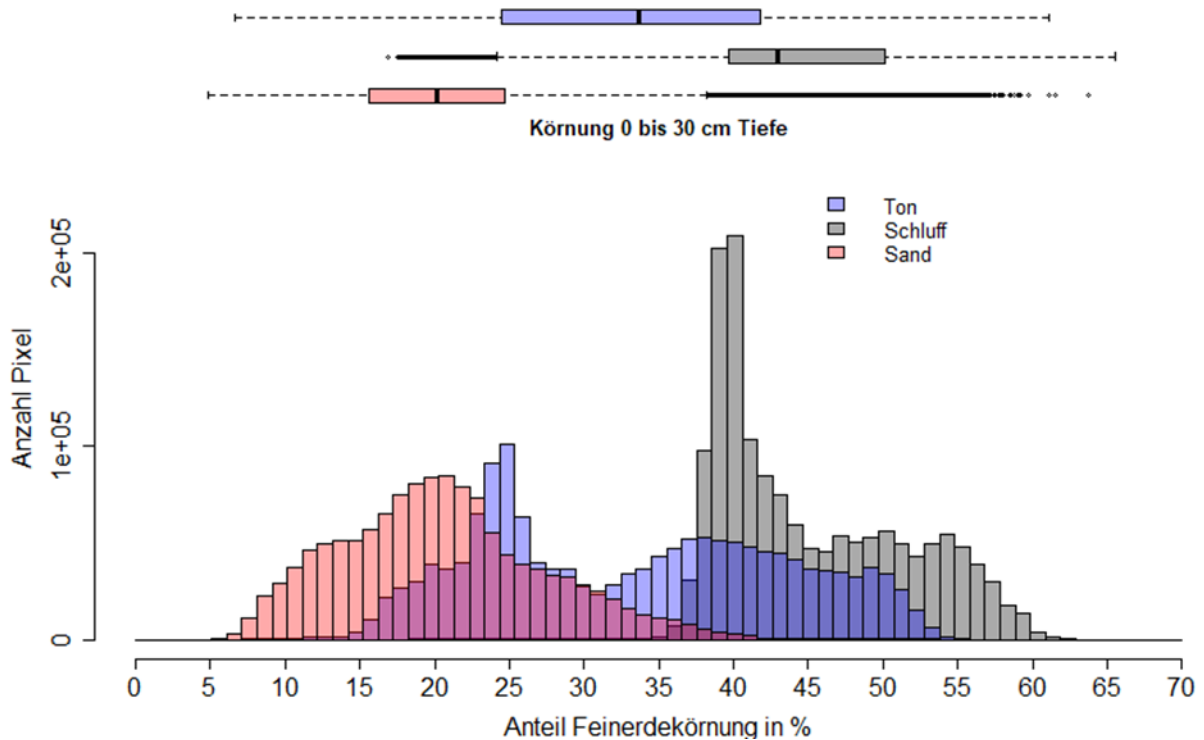
Anhang Abbildung 11: Boxplots der Punktaufnahmen der unabhängigen Validierung. Dargestellt sind jeweils zwei Klassen. «Nicht vorhanden» bezeichnet Punktaufnahmen, bei denen die Zielgrösse nicht berechnet werden kann, da keine Daten dazu vorliegen oder Punktaufnahmen, bei denen die Zielgrösse einen Wert von 0 hat. «Vorhanden» bezeichnet Punktaufnahmen, für die ein Wert modelliert werden kann oder deren Wert über 0 liegt. Die Boxplots zeigen jeweils die Verteilung der Punktaufnahme der beiden Klassen bezogen auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Zielgrösse vorhanden ist. Die rote Linie zeigt den gewählten Schwellenwert. Wenn z. B. eine Zielgrösse berechnet werden soll und zu 80 % sicher sein soll, dass die Zielgrösse in der berechneten Fläche vorhanden ist, wird ein Schnitt durch die Boxplots bei 0.8 gemacht. Wenn wir die unterste Reihe betrachten, führt das dazu, dass beim Ton in einer Tiefe von 0 – 30 cm nur an zwei Bohrungen, bei denen der Tongehalt nicht geschätzt werden kann, Werte berechnet werden. Umgekehrt liegen einige Punkte des «vorhanden» Boxplots unter dem Schwellenwert, hier wird nun fälschlicherweise ein «nicht vorhanden» ausgegeben. In diesem Fall müsste der Schwellenwert etwas nach unten angepasst werden. Konkret lag der gewählte Schwellenwert in diesem Fall bei 0.5. Beim Ton in einer Tiefe von 60 – 120 cm überlappen sich die beiden Kästen stärker, der Fall ist demnach weniger klar, denn im Untergrund ist nicht nur die OS entscheidend, ob eine Feinerdekörnung geschätzt oder gemessen werden kann, sondern es ist auch relevant in welcher Form die OS vorliegt. Hier wurde ein Schwellenwert von 0.75 gewählt.

### I.8. Verteilungsstatistiken einiger modellierter Bodeneigenschaftskarten



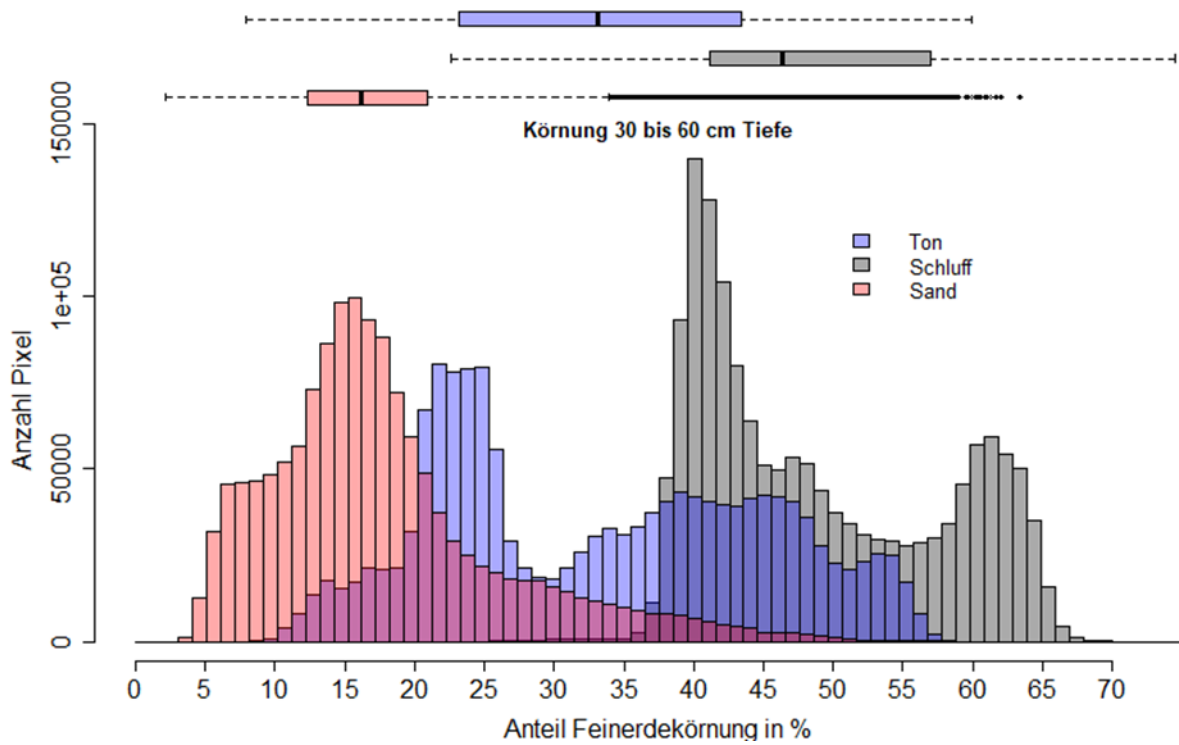
Anhang Abbildung 12: Histogramm der OS-Gehalte in verschiedenen Tiefen.

0 - 30 cm: Minimum 2 %; Median 5 %; Durchschnitt 8 %; Maximum 41 %  
 30 - 60 cm: Minimum 0 %; Median 9 %; Durchschnitt 12 %; Maximum 66 %  
 60 - 90 cm: Minimum 0 %; Median 21 %; Durchschnitt 24 %; Maximum 74 %  
 90 - 120 cm: Minimum 0 %; Median 27 %; Durchschnitt 28 %; Maximum 78 %



Anhang Abbildung 13: Histogramm der Hauptbodenarten im Oberboden.

Ton: Minimum 7 %; Median 34 %; Durchschnitt 33 %; Maximum 61 %  
 Schluff: Minimum 17 %; Median 43 %; Durchschnitt 45 %; Maximum 66 %  
 Sand: Minimum 5 %; Median 20 %; Durchschnitt 21 %; Maximum 64 %

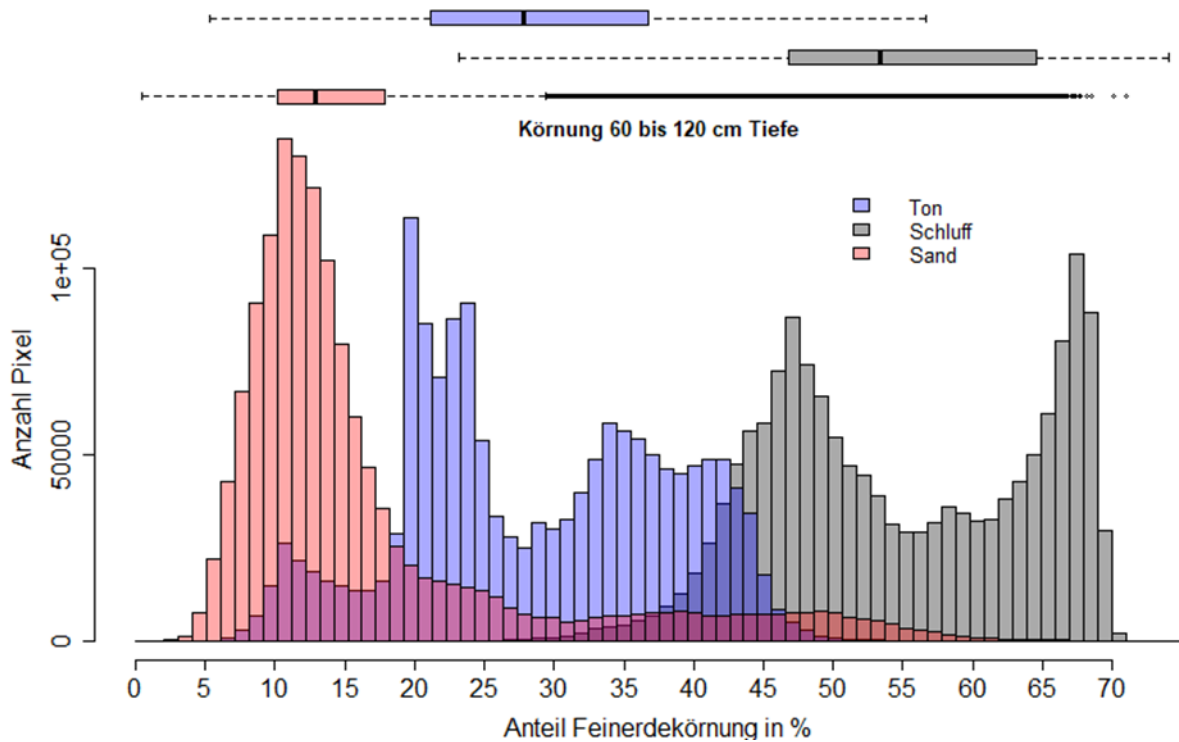


Anhang Abbildung 14: Histogramm der Hauptbodenarten im Unterboden.

Ton: Minimum 8 %; Median 33 %; Durchschnitt 33 %; Maximum 60 %

Schluff: Minimum 23 %; Median 46 %; Durchschnitt 49 %; Maximum 75 %

Sand: Minimum 2 %; Median 16 %; Durchschnitt 18 %; Maximum 63 %

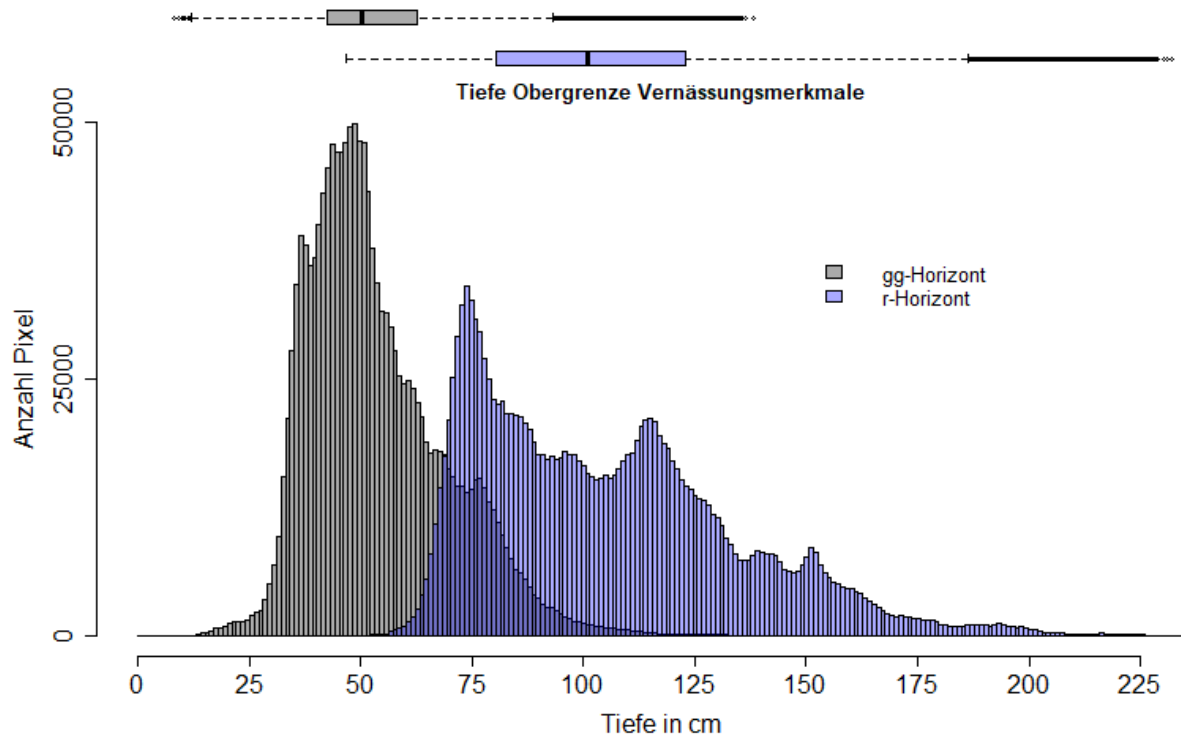


Anhang Abbildung 15: Histogramm der Hauptbodenarten im Untergrund.

Ton: Minimum 5 %; Median 28 %; Durchschnitt 29 %; Maximum 57 %

Schluff: Minimum 23 %; Median 53 %; Durchschnitt 55 %; Maximum 74 %

Sand: Minimum 0 %; Median 13 %; Durchschnitt 17 %; Maximum 71 %



Anhang Abbildung 16: Histogramm der Obergrenzen der Vernässungsmerkmale.

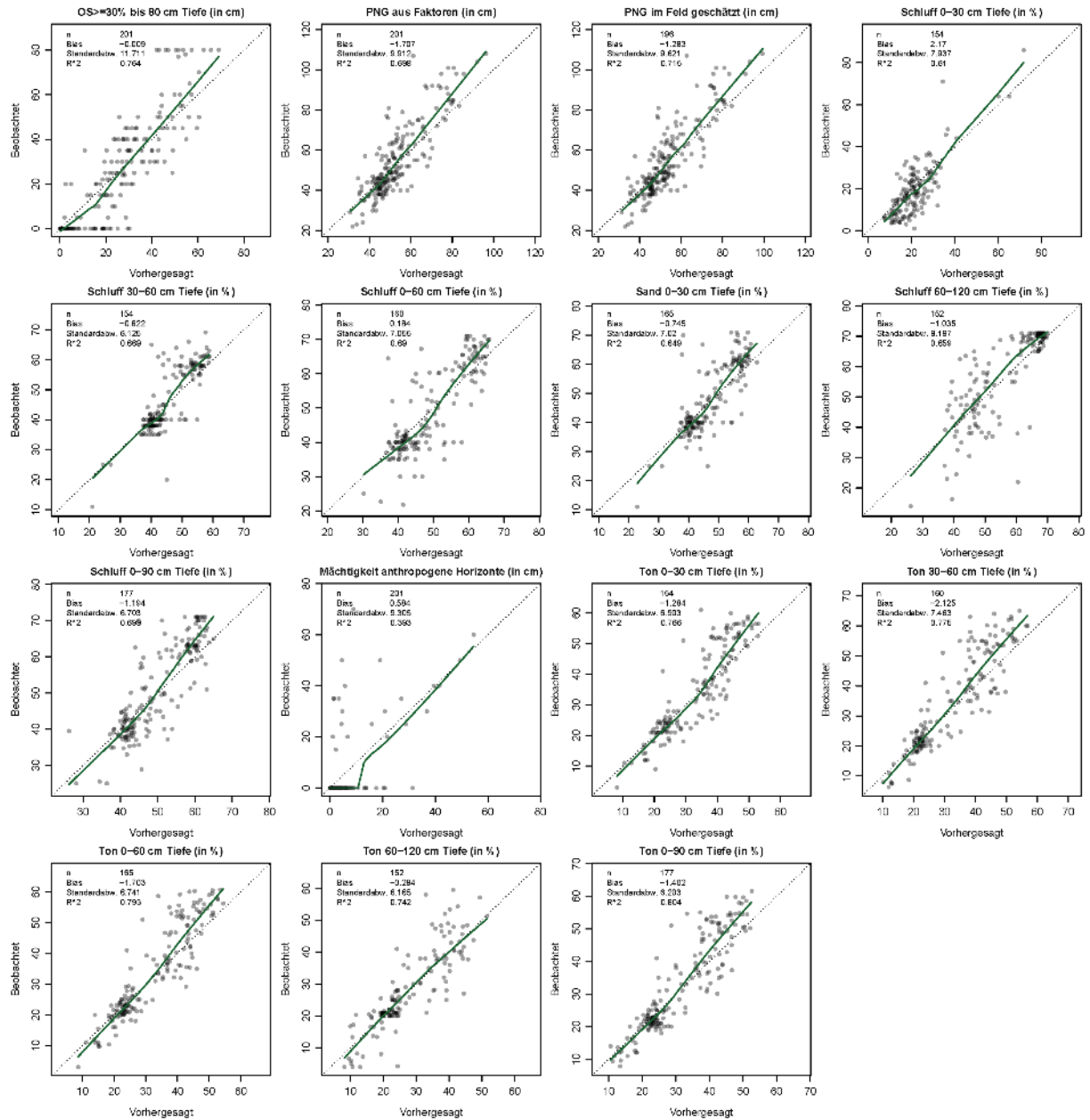
gg-Obergrenze: Minimum 8 cm; Median 50 cm; Durchschnitt 54 cm; Maximum 138 cm

r-Obergrenze: Minimum 47 cm; Median 101 cm; Durchschnitt 105 cm; Maximum 232 cm

## I.9. Liste der modellierten Bodeneigenschaften

OS 0-30 cm Tiefe (in %)
OS 0-60 cm Tiefe (in %)
OS 0-90 cm Tiefe (in %)
OS 30-120 cm Tiefe (in %)
OS 30-60 cm Tiefe (in %)
OS 60-90 cm Tiefe (in %)
OS 90-120 cm Tiefe (in %)
OS 30 cm Tiefe bis r-Horizont (in %)
OS 60 cm Tiefe bis r-Horizont (in %)
Mächtigkeit OS<45% bis r-Horizont (in cm)
Mächtigkeit OS≥30% bis r-Horizont (in cm)
Mächtigkeit OS>10% bis r-Horizont (in cm)
Mächtigkeit OS<5% bis r-Horizont (in cm)
Mächtigkeit OS≥30% bis 80 cm Tiefe (in cm)
OS 0-30 cm Tiefe, wenn OS<10% (in %)
Mindesttiefe OS≥30% (in cm)
Mindesttiefe OS≥10% (in cm)
Mindesttiefe Von Post <5 (in cm)
Mindesttiefe Von Post <7 (in cm)
Ton 0-30 cm Tiefe (in %)
Ton 30-60 cm Tiefe (in %)
Ton 0-60 cm Tiefe (in %)
Ton 0-90 cm Tiefe (in %)
Ton 60-120 cm Tiefe (in %)
Schluff 0-30 cm Tiefe (in %)
Schluff 30-60 cm Tiefe (in %)
Schluff 0-60 cm Tiefe (in %)
Schluff 0-90 cm Tiefe (in %)
Schluff 60-120 cm Tiefe (in %)
Sand 0-30 cm Tiefe (in %)
PNG (in cm)
Tiefe oberster r-Horizont (in cm)
Tiefe oberster gg-Horizont (in cm)
Mächtigkeit Anthropogenität (in cm)

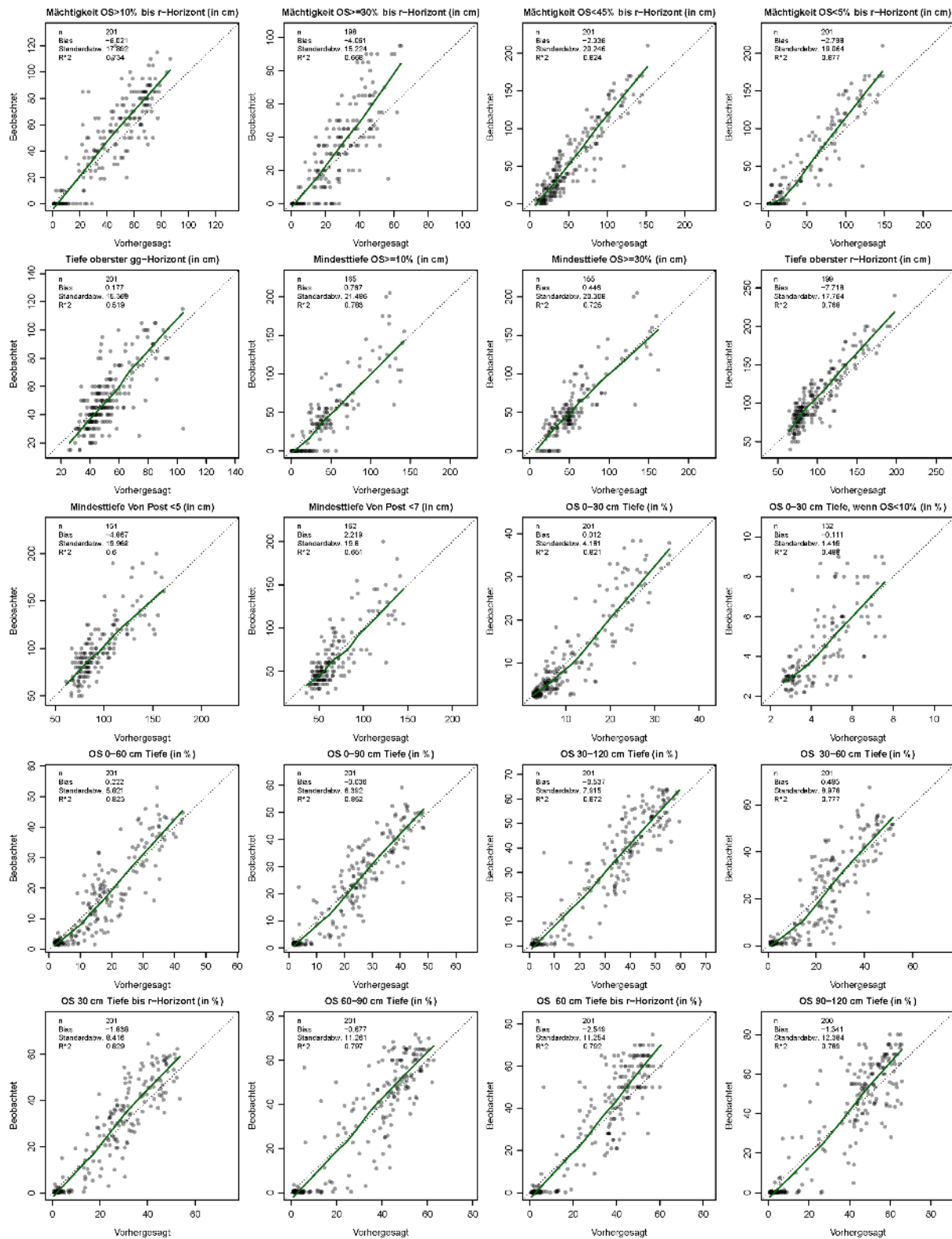
## I.10. Unabhängige Validierung der modellierten Bodeneigenschaftskarten



Anhang Abbildung 17: Validierungsplots der unabhängigen Validierung. Auf der x-Achse sind die vorhergesagten Werte, der modellierten Karten abgebildet. Auf der y-Achse finden sich die Werte, die in den unabhängigen Validierungsbohrungen aufgenommen wurden. Bei einer exakten Übereinstimmung würden alle Punkte auf der gestrichelten 1:1 Geraden liegen. In den meisten Zielgrößen gruppieren sie sich um die Linie herum, auch ist ein klarer Trend auszumachen. Dies wird auch durch die grüne lokal gewichtete Glättungskurve bestätigt, diese folgt im Grossen und Ganzen der 1:1 Geraden. Oben links in der Grafik sind die Validierungsstatistiken abgebildet. «n» zeigt die Anzahl der Punkte. Der «Bias» gibt an, ob eine systematische Verzerrung im Modell zu finden ist, in diesem Fall scheint es eine ganz schwache Unterschätzung des Tongehaltes zu geben. Die «Standartabweichung» gibt an, wie genau ein Wert vom Modell ausgegeben wird. Das «R<sup>2</sup>» bezeichnet das Bestimmtheitsmass, dieses gibt an wie viel der Streuung der Validierungsdaten vom Modell erklärt werden können, also wie gut die Validierungspunkte ins Modell passen. Würde die Karte überall den Mittelwert zeigen, wäre R<sup>2</sup> = 0; in einem perfekten Modell liegt R<sup>2</sup> = 1. Bei Werten über 0.5 kann man von einem mittleren Resultat sprechen, ein R<sup>2</sup> ≥ 0.7 ist gut und eines über 0.8 sehr gut.

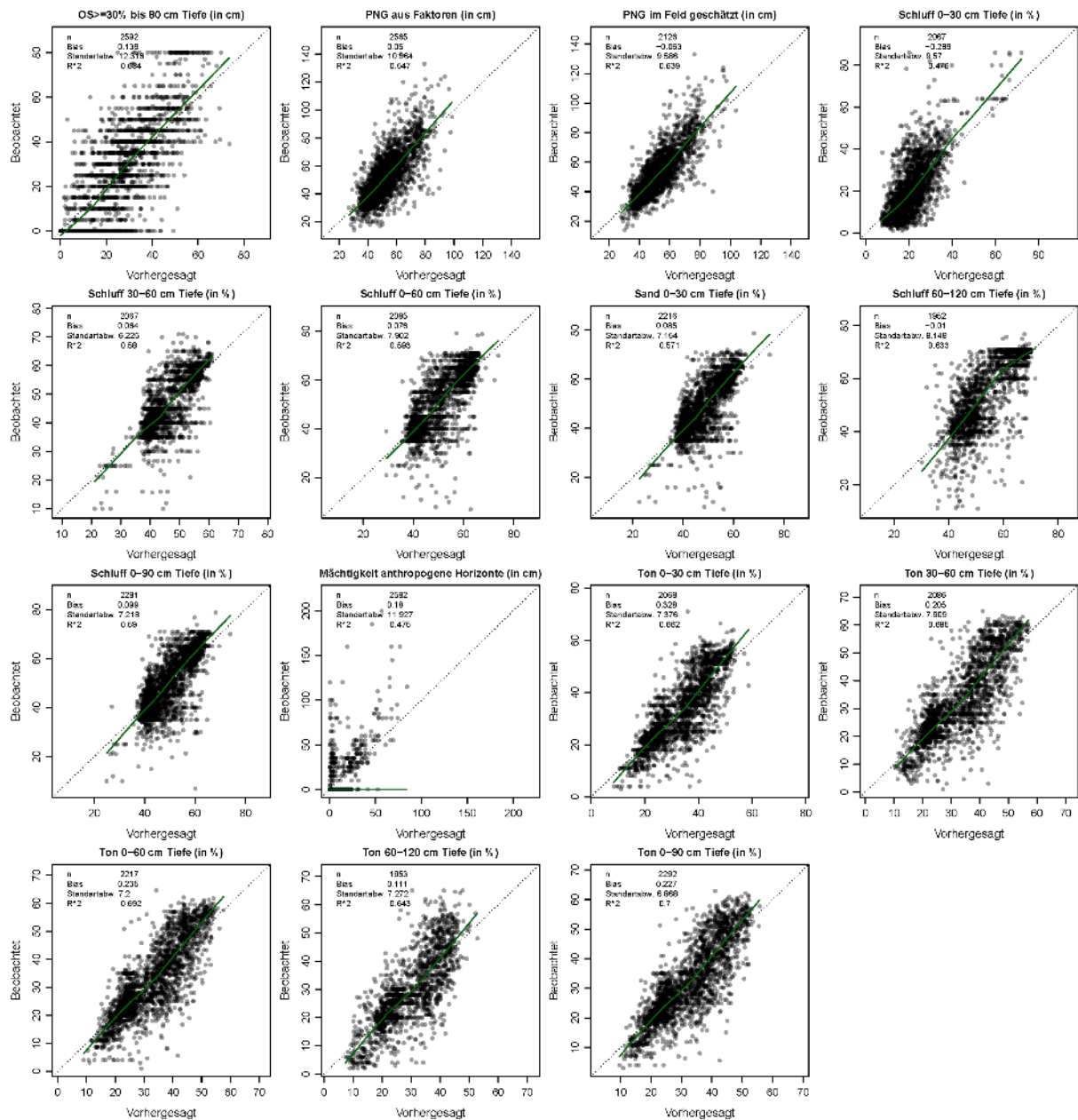
Lesebeispiel: Ganz unten links: In 165 Validierungspunkten (n) wurde der Tongehalt in 0-60 cm Tiefe bestimmt. Die grüne Glättungskurve folgt annähernd der gestrichelten 1:1 Geraden und die Punkte gruppieren sich gut darum herum. Einzig bei hohen Werten in den Validierungsdaten scheint die modellierte Karte oft etwas tiefere Werte errechnet zu haben. Der Bias gibt an, dass das Modell den Tongehalt in der Tendenz um 1.7 Prozentpunkte unterschätzt. Die Standartabweichung von 6.7 zeigt, dass der Tongehalt mit einer Genauigkeit von 6.7 Prozentpunkten nach oben und unten vorausgesagt wird. Ein R<sup>2</sup> zeigt, dass 82.1 % der Streuung in den Tongehalten von 0-60 cm Tiefe vom Modell erklärt.



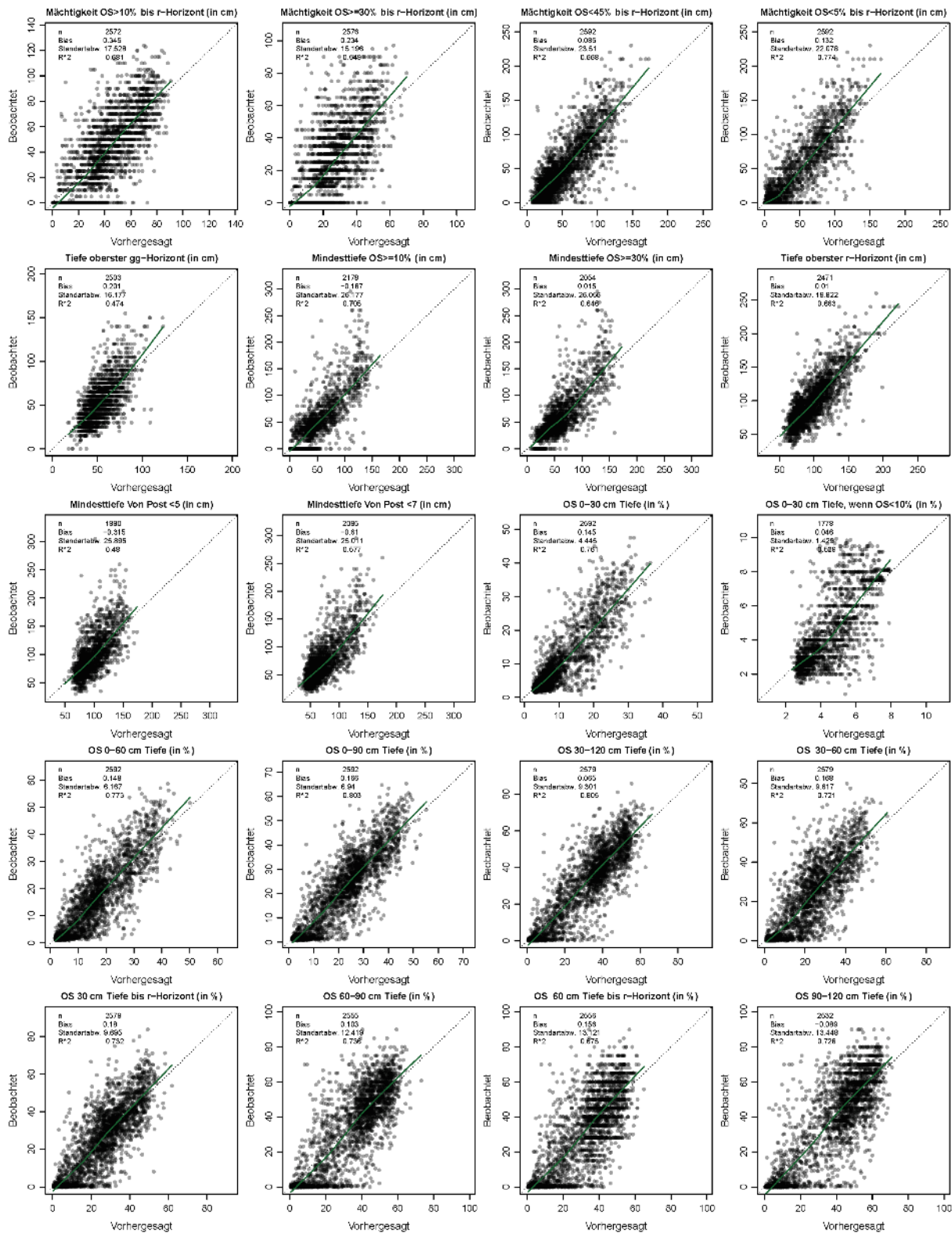


Anhang Abbildung 18: Fortsetzung von Anhang Abbildung 17.

## I.11. Interne Validierung der modellierten Bodeneigenschaftskarten

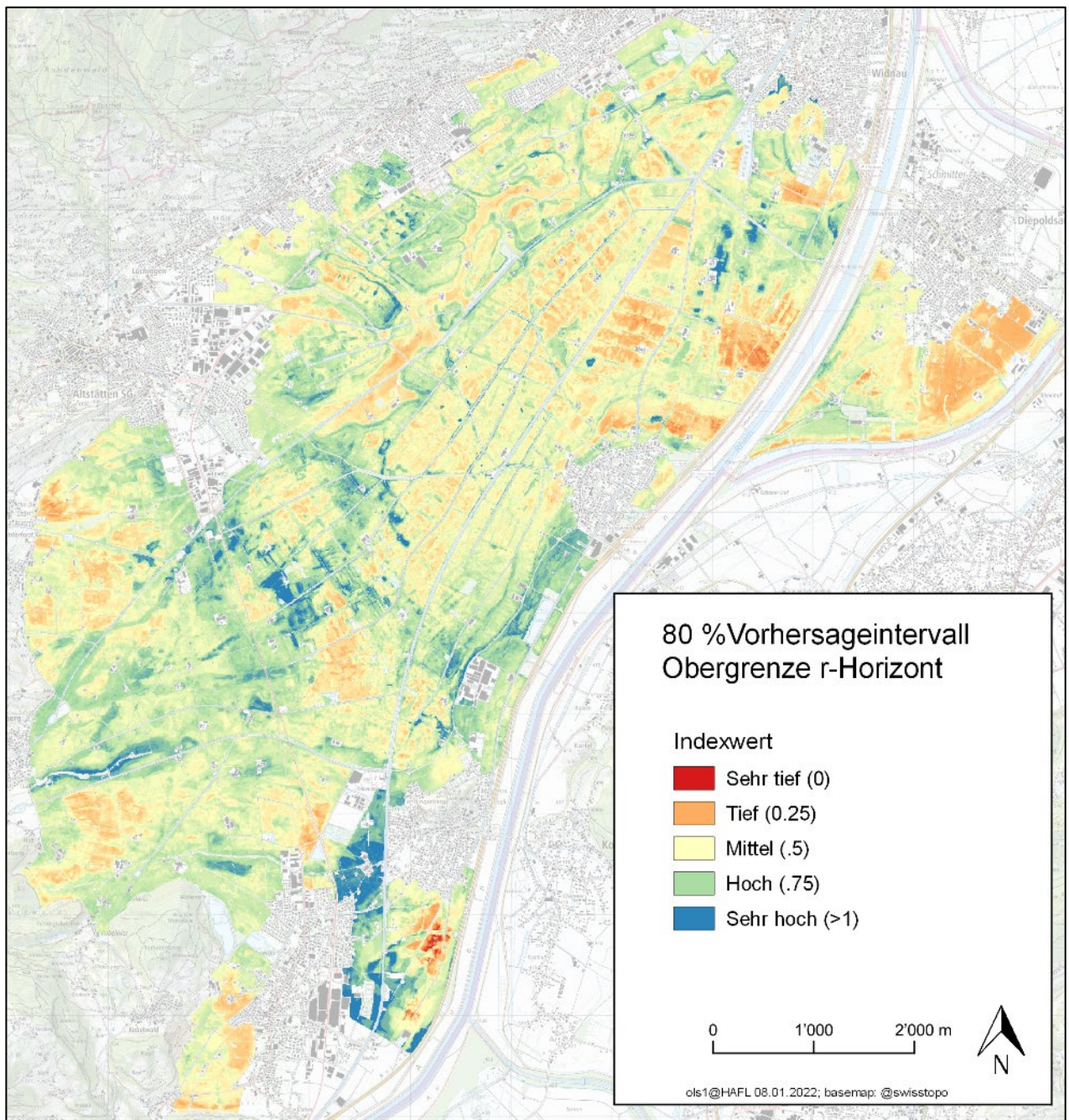


Anhang Abbildung 19: Validierungsplots der modell-internen Validierung des schlussendlichen Modells (out-of-bag). Gleiches Prinzip wie bei der unabhängigen Validierung. Nun sind aber alle in der Modellierung verwendeten Punktaufnahmen dargestellt. Es handelt sich also um eine interne Validierung des Modells mit sich selbst, welche auch für die Auswahl der erklärenden Grössen verwendet wurde. Diese Daten sind der Vollständigkeit halber aufgelistet, die Beurteilung der Güte der Modelle sollte aber anhand der Validierungsstatistiken der unabhängigen Validierung erfolgen.



Anhang Abbildung 20: Fortsetzung von Anhang Abbildung 19.

## I.12. Vorhersageintervall



Anhang Abbildung 21: Beispiel für die Beurteilung der räumlichen Verteilung der Streuung eines statistischen Modells anhand der Zielgrösse der Obergrenze des r-Horizont. Dargestellt ist ein Indexwert, aus der Differenz des 90 %- und 10 %-Quantils der Vorhersagen dividiert durch den Mittelwert der Vorhersagen. Also wie weit liegen die maximal vorausgesagten Werte von den minimal vorausgesagten Werten auseinander, abzüglich der 10 % der höchsten sowie tiefsten Vorhersagen. Ein sehr hoher Indexwert über 1 zeigt an, dass die Vorhersagen dort eine hohe Streuung aufweisen. Mögliche Ursachen sind, dass dort eine sehr hohe Variation im Boden vorhanden ist und/oder die Datenlage zu schlecht ist. Solche Karten wurden im iterativen Modellierungsprozess verwendet, um Gebiete zu identifizieren, die dichter beprobt werden sollten.

### I.13. Synthetische Bodentypen

Fallname	Bedingung 1	Bedingung 2	Bedingung 3	Bedingung 4	Bedingung 5	Bedingung 6
Rein Torf	0-30 cm $\geq \emptyset 20\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 45\%$ OS	<20cm<45% OS			
Mudde, hoher OS	0-30 cm $\geq \emptyset 20\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 25\%$ OS <45%	0cm<5% OS			
Torf, Mudde Zwischenschichten	0-30 cm $\geq \emptyset 20\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 45\%$ OS	$\geq 20\text{cm} < 45\%$ OS			
anmoor über Torf	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}19\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 45\%$ OS	<20cm<45% OS			
anmoor über Mudde	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}19\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 25\%$ OS <45%	0cm<5% OS			
anmoor über Torf Muddezwischschichten	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}19\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 45\%$ OS	$\geq 20\text{cm} < 45\%$ OS			
anmoor über Mudde mit tiefem OS-Gehalt	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}19\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 10\%$ OS <25%	0cm<5% OS			
anmoor über Mudde mit tiefem OS-Gehalt mit rein mineralischen Schichten	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}25\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 10\%$ OS <25%	>0cm<5% OS			
anmoor über Mudde mit rein mineralischen Schichten	0-30 cm $\emptyset 10\text{-}25\%$ OS	30 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 25\%$ OS <45%	>0cm<5% OS			
Tieftorf mit schluffiger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U>50%	30 cm-r-Horizont $\geq \emptyset 30\%$ OS			
Tieftorf mit toniger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	T>40%	30 cm-r-Horizont $\geq \emptyset 30\%$ OS			
Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U<50%	T<40%	30 cm-r-Horizont $\geq \emptyset 30\%$ OS	Oder wenn keine Körnung	
minerischer Tieftorf mit schluffiger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U>50%	30 cm-r-Horizont $\emptyset 10\text{-}29\%$ OS			
minerischer Tieftorf mit toniger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	T>40%	30 cm-r-Horizont $\emptyset 10\text{-}29\%$ OS			
minerischer Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im Oberboden	0-30 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U<50%	T<40%	30 cm-r-Horizont $\emptyset 10\text{-}29\%$ OS		
Tieftorf mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Unterboden	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U>50%	60 cm-90 cmt $\geq \emptyset 30\%$ OS			
Tieftorf mit mächtiger toniger Deckschicht bis Unterboden	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	T>40%	60 cm-90 cmt $\geq \emptyset 30\%$ OS			
Tieftorf mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Unterboden	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U<50%	T<40%	60 cm-90 cmt $\geq \emptyset 30\%$ OS		
Minerlicher Tieftorf mit schluffiger Deckschicht im UB	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U>50%	60 cm-90 cm $10\text{-}29\%$ OS			
Minerlicher Tieftorf mit toniger Deckschicht im UB	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	T>40%	60 cm-90 cm $10\text{-}29\%$ OS			
Minerlicher Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im UB	0-60 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U<50%	T<40%	60 cm-90 cm $10\text{-}29\%$ OS		
Tieftorf mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm $< \emptyset 10\%$ OS	U>50%	90 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 30\%$ OS			
Tieftorf mit mächtiger toniger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm $< \emptyset 10\%$ OS	T>40%	90 cm-120-Horizont $\geq \emptyset 30\%$ OS			

Fallname	Bedingung 1	Bedingung 2	Bedingung 3	Bedingung 4	Bedingung 5	Bedingung 6
Tieftorf mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm <Ø10% OS	U<50%	T<40%	90 cm-120-Horizont ≥Ø30% OS		
Mudde mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm <Ø10% OS	U>50%	90 cm-120-Horizont 13-29% OS			
Mudde mit mächtiger toniger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm <Ø10% OS	T>40%	90 cm-120-Horizont 13-29% OS			
Mudde mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Untergrund	0-90 cm <Ø10% OS	U<50%	T<40%	90 cm-120-Horizont 13-29% OS		
Flachtorf auf Schluff	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø30% OS	U>50%		90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Flachtorf auf Ton	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø30% OS	T>40%		90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Flachtorf auf Lehm	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø30% OS	U<50%	T<40%	90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Flachmudde auf Schluff	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø10% OS	U>50%		90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Flachmudde auf Ton	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø10% OS	T>40%		90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Flachmudde auf Lehm	0-30 cm ≥Ø10% OS	30 -60 cm oder 60 -90 ≥Ø10% OS	U<50%	T<40%	90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Anmoorig auf Schluff	0-30 cm ≥Ø10% OS	U>50%		30 cm-90 <10% OS	90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Anmoorig auf Ton	0-30 cm ≥Ø10% OS	T>40%		30 cm-90 <10% OS	90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Anmoorig auf Lehm	0-30 cm ≥Ø10% OS	U<50%	T<40%	30 cm-90 <10% OS	90 cm - 120 <Ø10% OS	Körnung 60-120
Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Ton	0-30 cm Ø0-10% OS	T>40		minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥10&OS_60_90 <10) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥10)
Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Lehm	0-30 cm Ø0-10% OS	T<40%	U<50%	minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥10&OS_60_90 <10) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥10)
Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Schluff	0-30 cm Ø0-10% OS	U>50%		minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥10&OS_60_90 <10) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥10)
Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Ton	0-30 cm Ø0-10% OS	T>40		minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥30&OS_60_90 <30) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥30)
Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Lehm	0-30 cm Ø0-10% OS	T<40%	U<50%	minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥30&OS_60_90 <30) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥30)
Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Schluff	0-30 cm Ø0-10% OS	U>50%		minPOS_10<120	OS_90_120<13	(OS_30_60≥30&OS_60_90 <30) oder (OS_30_60<10& OS_60_90≥30)
Einzelne Mudde Horizonte in Ton	0-30 cm Ø0-10% OS	T>40	30-60 oder 60-90 mit >10% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <10% OS	minPOS_10<120
Einzelne Mudde Horizonte in Lehm	0-30 cm Ø0-10% OS	T<40%	U<50%	30-60 oder 60-90 mit >10% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <10% OS
Einzelne Mudde Horizonte in Schluff	0-30 cm Ø0-10% OS	U>50%	30-60 oder 60-90 mit >10% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <10% OS	minPOS_10<120
Einzelne organische Horizonte in Ton	0-30 cm Ø0-10% OS	UB T>40	30-60 oder 60-90 mit >30% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <30% OS	minPOS_10<120

Fallname	Bedingung 1	Bedingung 2	Bedingung 3	Bedingung 4	Bedingung 5	Bedingung 6
Einzelne organische Horizonte in Lehm	0-30 cm Ø0-10% OS	T<40%	U<50%	30-60 oder 60-90 mit >30% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <30% OS
Einzelne organische Horizonte in Schluff	0-30 cm Ø0-10% OS	U>50%	30-60 oder 60-90 mit >30% OS	90-120 mit <10%	30-60 oder 60-90 mit <30% OS	minPOS_10<120
Rein mineralischer Boden	0-30 cm Ø0-<10% OS	30-60 cm Ø0-<10% OS	60-90cm Ø0-<10% OS	90-120cm Ø0-<10% OS	30-r cm <Ø10% OS	<5cm>5% OS
Keine gravierende Vernässung; Kein OS Problem; kein Körnungs Problem	T<40%	U<50%	gg>60 cm OR r>90 cm		Rein mineralischer Boden	
Ton Problem OB	T>40%		gg<60 cm OR r<90 cm		Rein mineralischer Boden	
Schluff Problem OB	U>50%		gg>60 cm OR r>90 cm		Rein mineralischer Boden	
Ton Problem UB	T>40%		gg>60 cm OR r>90 cm		Rein mineralischer Boden	
Schluff Problem UB	U>50%		gg>60 cm OR r>90 cm		Rein mineralischer Boden	
Ton, Grundnass	T>40%	r≤90cm			Rein mineralischer Boden	
Schluff, Grundnass	U>50%	r≤90cm			Rein mineralischer Boden	
Lehm, Grundnass	T<40%	r≤90cm	U<50%		Rein mineralischer Boden	
Ton, Staunass	T>40%	r-gg>60	gg_Obergrenze ≤60		Rein mineralischer Boden	
Schluff, Staunass	U>50%	r-gg>60	gg_Obergrenze ≤60		Rein mineralischer Boden	
Lehm, Staunass	T<40%	r-gg>60	gg_Obergrenze ≤60	U<50%	Rein mineralischer Boden	

## I.14. Bewertungsmatrix

Anhang Tabelle 3: Übersicht Klassierung synthetische Bodentypen hohe Werte zeigen einen kleinen Problemdruck, kleine negative Massnahmen-Nebeneffekte und eine tiefe Gesamtbewertung.

Nummer	Fallname	Organische Böden	Anthropogenität	Tiefspaten/Tiefpflügen	Sackungspotential	Mächtigkeit Überschüttung	Effizienz Torfschutz	Verdichtungsrisiko	Gefügebildung	Gesamtbewertung
1	Rein Torf	5	5	1	1	1	1	1	1	2
2	Mudde, hoher OS	5	5	1	1	1	1	2	1	3
3	Torf, Mudde Zwischenschichten	5	5	1	1	1	1	1	1	2
4	anmoor über Torf	5	5	1	1	1	1	1	1	2
5	anmoor über Mudde	4	5	1	2	2	1	2	2	3
6	anmoor über Torf Muddezweischschichten	5	5	1	1	1	1	1	1	3
7	Torf, vielen mineralischen Zwischenschichten	5	5	1	1	2	1	1	1	2
8	anmoor über Mudde mit tiefem OS-Gehalt	3	5	1	2	2	2	2	2	3
9	anmoor über stark mineralischem Torf	5	5	1	3	2	2	2	3	3
10	anmoor über Mudde mit tiefem OS-Gehalt mit rein mineralischen Schichten	3	5	1	2	2	2	2	2	4
11	anmoor über Mudde mit rein mineralischen Schichten	4	5	1	2	2	2	2	2	4
12	Tieftorf mit schluffiger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	2	3	2	3	6
13	Tieftorf mit toniger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	2	3	4	3	6
14	Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	2	3	4	3	6
15	mineralischer Tieftorf mit schluffiger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	3	3	2	3	5
16	mineralischer Tieftorf mit toniger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	3	3	4	3	5
17	mineralischer Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im Oberboden	4	5	1	3	3	3	4	3	5
18	Tieftorf mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Unterboden	3	5	1	4	3	4	2	4	6
19	Tieftorf mit mächtiger toniger Deckschicht bis Unterboden	3	5	1	4	3	4	4	4	6
20	Tieftorf mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Unterboden	3	5	1	4	3	4	4	4	6
21	mineralischerTieftorf mit schluffiger Deckschicht im UB	2	5	1	4	4	4	2	4	5
22	mineralischerTieftorf mit toniger Deckschicht im UB	2	5	1	4	4	4	4	4	5
23	mineralischer Tieftorf mit lehmiger Deckschicht im UB	2	5	1	4	4	4	4	4	5



Nummer	Fallname	Organische Böden	Anthropogenität	Tiefspaten/Tiefpflügen	Sackungspotential	Mächtigkeit Überschüttung	Effizienz Torfschutz	Verdichtungsrisiko	Gefügebildung	Gesamtbewertung
24	Tieftorf mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	4	4	5	2	4	4
25	Tieftorf mit mächtiger toniger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	4	4	5	4	4	5
26	Tieftorf mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	5	4	5	4	5	5
27	Flachtorf auf Schluff	3	5	2	3	2	2	1	3	3
28	Flachtorf auf Ton	3	5	2	3	2	2	1	3	3
29	Flachtorf auf Lehm	3	5	5	3	2	2	1	3	4
30	Flachmudde auf Schluff	3	5	2	3	3	3	2	3	2
31	Flachmudde auf Ton	3	5	2	3	3	3	2	3	2
32	Flachmudde auf Lehm	3	5	5	3	3	3	2	3	3
33	Anmoorig auf Schluff	1	5	3	5	4	4	2	5	2
34	Anmoorig auf Ton	1	5	3	5	4	4	3	5	2
35	Anmoorig auf Lehm	1	5	4	5	4	4	3	5	3
36	Ton, Grundnass	1	1	1	6	5	0	4	6	2
37	Schluff, Grundnass	1	1	1	6	5	0	2	6	1
38	Lehm, Grundnass	1	1	1	6	5	0	4	6	1
39	Ton, Staunass	1	1	4	6	5	0	4	6	2
40	Schluff, Staunass	1	1	4	6	5	0	2	6	1
41	Lehm, Staunass	1	1	4	6	5	0	4	6	0
42	Einzelne Mudde Horizonte in Ton	2	5	1	5	5	5	4	5	3
43	Einzelne Mudde Horizonte in Lehm	2	5	1	5	5	5	4	5	4
44	Einzelne Mudde Horizonte in Schluff	2	5	1	5	5	5	2	5	3
45	Einzelne organische Horizonte in Ton	2	5	1	4	4	4	4	4	4
46	Einzelne organische Horizonte in Lehm	2	5	1	4	4	4	4	4	5
47	Einzelne organische Horizonte in Schluff	2	5	1	4	4	4	2	4	4
48	Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Ton	1	5	1	5	5	5	4	5	1
49	Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Lehm	1	5	1	5	5	5	4	5	1
50	Mudde Zwischenschichten mindestens 10 cm in Schluff	1	5	1	5	5	5	2	5	1
51	Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Ton	2	5	1	4	5	5	4	4	2
52	Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Lehm	2	5	1	4	5	5	4	4	2
53	Torf Zwischenschichten mindestens 10 cm in Schluff	2	5	1	4	5	5	2	4	2
54	Keine gravierende Vernässung; Kein OS Problem; kein Körnungsproblem	1	1	1	6	5	0	5	6	0

Nummer	Fallname	Organische Böden	Anthropogenität	Tiefspaten/Tiefpflügen	Sackungspotential	Mächtigkeit Überschüttung	Effizienz Torfschutz	Verdichtungsrisiko	Gefügebildung	Gesamtbewertung
55	Ton Problem OB	1	1	1	6	5	0	4	6	1
56	Schluff Problem OB	1	1	1	6	5	0	2	6	1
57	Ton Problem UB	1	1	1	6	5	0	4	6	1
58	Schluff Problem UB	1	1	1	6	5	0	3	6	0
59	Mudde mit mächtiger schluffiger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	5	5	5	2	5	4
60	Mudde mit mächtiger toniger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	5	5	5	4	5	4
61	Mudde mit mächtiger lehmiger Deckschicht bis Untergrund	1	5	1	5	5	5	4	5	3

Anhang Tabelle 4: Übersicht Klassierung Feinerde für die Bewertungsmatrix und möglicher Überschüttungen.

Feinerde	Klasse	Bewertung*	Problem	Überschütten Ton	Überschütten Lehm	Überschütten Schluff	Überschütten Sand
Sand	1	3	Sand	Ungünstig	Ja	Nein	Ja
schluffiger Sand	2	4		Ungünstig	Ja	Nein	Ja
lehmiger Sand	3	5	Kein Körnungsproblem	Nein	Wenn andere Limitierung	Nein	Wenn andere Limitierung
lehmreicher Sand	4	5		Nein		Nein	
sandiger Lehm	5	6		Nein		Nein	
Lehm	6	6		Nein		Nein	
toniger Lehm	7	4		Nein		Nein	
lehmiger Ton	8	2	Ton	Ja	Ja	Ja	Ja
Ton	9	1		Ja	Ja	Ja	Ja
sandiger Schluff	10	3	Schluff	Ungünstig	Ja	Ja	Ja
Schluff	11	2		Ungünstig	Ja	Ja	Ja
lehmiger Schluff	12	3		Ungünstig	Ja	Ja	Ja
toniger Schluff	13	1	Schluff oder Ton und Schluff	Ja	Ja	Ja	Ja
Organisch	-	1					

\*Falls Problematik nur im Unterboden jeweils halb gewertet

Anhang Tabelle 5: Übersicht Klassierung Vernässungsmerkmale für die Bewertungsmatrix

Bewertung	Obergrenzen	
	gg	r
6	>120	>120
5	90-120	90-120
4	60-90	75-90
3	40-60	60-75
2	20-40	30-60
1	0-20	0-30