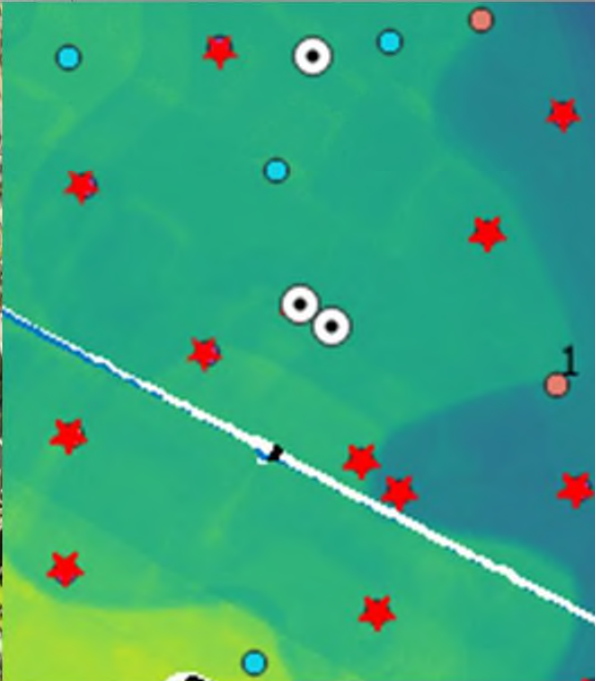


AMT FÜR UMWELT
FÜRSTENTUM LIECHTENSTEIN

Erfassung der potentiellen CO₂-Einsparleistung des Ruggeller Riet



Vaduz, 11. August 2021

Auftraggeber

Amt für Umwelt

Projektleitung

Dr. Heike Summer, Amt für Umwelt, Stabsstelle Internationales und Klima



Erfassung der potentiellen CO₂- Einsparleistung des Ruggeller Riet

Stefan Oechslin, Lukas Tomaselli, Madlene Nussbaum, Franziska Büeler, Stéphane Burgos

Berner Fachhochschule

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL
Abteilung Agronomie, Gruppe Bodennutzung und Bodenschutz
Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen

OePlan GmbH

Bahnhofstrasse 15a, CH-9450 Altstätten

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Zusammenfassung	4
2 Zweck	5
3 Ausgangslage	5
3.1 Zielfläche	5
3.2 Überblick Vorgehen	6
4 Feldarbeiten	6
4.1 Profilgruben	6
4.2 Bohrungen	9
4.2.1 Beprobungsplan	9
4.2.2 Ansprache und Probenahme im Feld	9
5 Laborarbeiten	10
6 Ableitung der Zielgrößen	10
6.1 Pedotransferfunktion	10
6.2 Menge an Corg in den Bodenhorizonten	11
6.3 Exponierter Corg-Vorrat in den Bohrungen und Profilgruben	12
7 Räumliche Vorhersage von Bodeneigenschaften	13
7.1 Prinzip	13
7.2 Zielgrößen	13
7.3 Karten	14
8 Berechnung der potentiellen CO ₂ -Einsparleistung	15
8.1 Schätzung der Gesamtmenge	15
8.2 Alternative Schätzung	15
8.3 Kohlenstofffixierung	15
9 Abschliessende Anmerkungen	16
9.1 Tiefe des permanent gesättigten Bereiches	16
9.2 Unterschiedlicher Ansatz gegenüber Hochmooren	16
9.3 Bodendaten	16
9.4 Weitere Flächen	16
9.5 Bewertung des Zustandes des Ruggeller Riet	16
10 Literatur	17
I. Pedotransferfunktion	18
I.1 Korrelationsmatrix	18
I.2 Statistik Transferfunktion Lagerungsdichte	18
II. Random Forest	19
I.3 Validierungsplots	19
I.4 Variable Importance	20
III. Karte des potentiell emittierbaren Corg	21

Titelbild: Oben, getrocknete Zylinderproben geordnet nach ihrem Gehalt an Corg, ansteigend von links nach rechts. Unten links, Torfmoos im Gebiet Evimeder. Unten rechts, Ausschnitt aus einer modellierten Karte mit Aufnahme-punkten.

Glossar

Digital Soil Mapping	Herstellung von Bodeneigenschaftskarten mittels GIS.
FAL24+	Schweizer Bodenkartierstandard basierend auf AfU Kt. SO (2017) und Brunner et. al (1997).
Lagerungsdichte	Dichte des trockenen Bodens [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]. In mineralischen Böden zwischen 0.9 und $1.9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, in organischen Böden zwischen 0.2 und $0.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
KLABS	Schweizer Bodensystematik (Brunner et. al, 2002).
Organischer Kohlenstoff	Kohlenstoff in toter organischer Bodensubstanz (=Corg).
Organische Bodenhorizonte	Bodenhorizonte mit mindestens 15% Corg. Durch den nicht vollständigen Abbau von Biomasse in wassergesättigtem Bereich entstanden.
Organischer Boden	Boden mit mindestens 40 cm organischen Bodenhorizonten in den obersten 80 cm.
Oxidativer Bereich	Bereich des Bodens, der zumindest in der Vegetationsperiode meistens nicht wassergesättigt ist.
Pedotransferfunktion	Ermitteln von Zusammenhängen zwischen Bodeneigenschaften und Übertragung dieser auf neue Bodendaten.
PNG	Pflanzennutzbare Gründigkeit. Mass zur Bewertung eines Bodens nach FAL24+.
r-Horizont	Reduzierter Bodenhorizont, über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt.
Variable Importance	Wichtigkeit einer Umweltvariabel in einem Modell.
Zersetigungsgrad	10 Stufige Skala zur Beschaffenheit von Torfen (10 = keine Fasern, 1= kein zersetztes Material).
Zielgrösse	Grösse, die mit einem Modell räumlich vorhergesagt werden soll.

1 Zusammenfassung

In diesem Bericht wird aufgezeigt welche Menge an CO₂ im Ruggeller Riet, an der nördlichen Spitze des Fürstentum Liechtenstein, im gegenwärtigen Zustand potentiell freigesetzt werden kann. Beim Ruggeller Riet handelt es sich um ein künstlich entwässertes Flachmoor, das grösstenteils unter Naturschutz steht und extensiv landwirtschaftlich genutzt wird. Die Böden sind in einem dynamischen System aus Überflutungen und verschiedenen Arten der Moorbildung entstanden. Sie sind folglich sehr variabel, enthalten eine Vielzahl von unterschiedlichen Schichten und unterscheiden sich je nach Lage im Gelände sehr stark. Um die Variation abzubilden wurden die Böden mit 167 Handbohrungen sowie 5 Profilgruben beprobt.

Zur Abschätzung der Menge an potentiell freisetzbarem CO₂ wird die Menge an vorhandenem organischem Kohlenstoff (Corg) benötigt. Dazu muss die Dichte des Bodens (Lagerungsdichte) beprobt werden sowie der Anteil an Corg im Boden gemessen werden. Weiter muss erfasst werden ab welcher Tiefe der Boden über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt ist, denn nur bei Kontakt mit Luftsauerstoff wird der Corg durch Bodenlebewesen zu CO₂ veratmet und in die Atmosphäre freigesetzt.

Um die sehr unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Schichten im Boden zu erfassen wurden die Böden schichtweise beprobt. So wurden insgesamt 156 Schichten an 50 Standorten zur Bestimmung des Corg Gehaltes entnommen und die Lagerungsdichte mit 100 ml Stechzylindern in 52 Schichten an 19 Standorten bestimmt. An allen Standorten wurde jeweils eine bodenkundliche Ansprache vorgenommen. Es wurde unter anderem die Tiefe der wassergesättigten Bedingungen abgeschätzt und der Anteil an organischer Substanz in jeder Bodenschicht geschätzt.

Mithilfe einer hergeleiteten mathematischen Funktion wurde aus den verschiedenen aufgenommenen Bodeneigenschaften und den gemessenen Werten die Lagerungsdichte für alle Horizonte aller Probestandorte errechnet.

Um die Gesamtmenge an potentiell freisetzbarem CO₂ zu berechnen, wurden die Werte der Punktaufnahmen in die Fläche gerechnet. Dazu wurde ein Algorithmus des maschinellen Lernens verwendet. Dieser wurde mit vorhandenen Geodaten gespiessen, namentlich ein Höhenmodell, eine Vegetationskartierung und vorhandene Bodenkarten. Der Algorithmus vergleicht die Eigenschaften dieser Geodaten an den Punktaufnahmen mit den Eigenschaften an unbeprobten Orten und errechnet so deren Eigenschaften. So konnte eine Karte errechnet werden, die aufzeigt wieviel Corg im aeroben Bodenbereich in jedem Kartenpixel vorhanden ist. Je nach Lage im Gelände, Stärke der Entwässerung und Anteil an mineralischen Schichten zeigen sich beträchtliche Unterschiede. Die gewählte Methode kann mit der hohen Variation gut umgehen und die potentielle CO₂-Einsparleistungen räumlich sehr detailliert abbilden.

Die Menge an potentiell freisetzbarem Corg jedes einzelnen Pixels wurde addiert und in CO₂ umgerechnet, was eine Gesamtmenge von **95'000 t CO₂** (± 4300) ergab. Diese Menge an CO₂ wird im gegenwärtigen Zustand in Zukunft in die Atmosphäre entweichen. Eine vollständige Wiedervernässung des Ruggeller Riets würde dies verhindern, je früher dies geschieht, desto mehr CO₂ würde dabei im Ruggeller Riet gebunden bleiben.

2 Zweck

Die Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL Zollikofen wurde durch das Amt für Umwelt der Liechtensteinischen Landesverwaltung beauftragt, die potentielle CO₂-Einsparleistung durch eine Wiedervernässung des Ruggeller Riets abzuschätzen. In diesem Bericht wird aufgezeigt, wie gross diese potenzielle CO₂-Einsparleistung ist und wie deren Grösse hergeleitet wurde.

3 Ausgangslage

3.1 Zielfläche

Das Ruggeller Riet ist Flachmoor im Norden der Gemeinden Ruggell und Schellenberg, es steht seit 1978 unter Naturschutz und wird als Streuland sowie extensives Wiesland genutzt. Die Zielfläche des Projektes umfasst die 86 ha des Naturschutzgebietes. Das Gebiet wird durch Gräben drainiert, die nach Westen in den Spiersbach entwässern. Die lokalen Böden sind geprägt durch die historische Überflutungsdynamik des Rheins, der Akkumulation organischer Substanz unter wassergesättigten Bedingungen sowie dem Materialeintrag vom Eschnerberg und der Ill.

Durch die Rheinregulierung und die Verbauung der Ill findet kein oberflächlicher Sedimenteintrag mehr statt. Weiter hat die künstliche Drainage zur Folge, dass sich die Akkumulierung organischer Substanz in einen fortlaufenden Abbau umgekehrt hat. Anthropogene Eingriffe haben die lokalen Bodenbildungsprozesse somit gestoppt und teils umgekehrt. In der Vergangenheit wurde im Gebiet Torf gestochen, insbesondere im östlichen Teil wurde dadurch der Bodenaufbau bedeutend verändert.

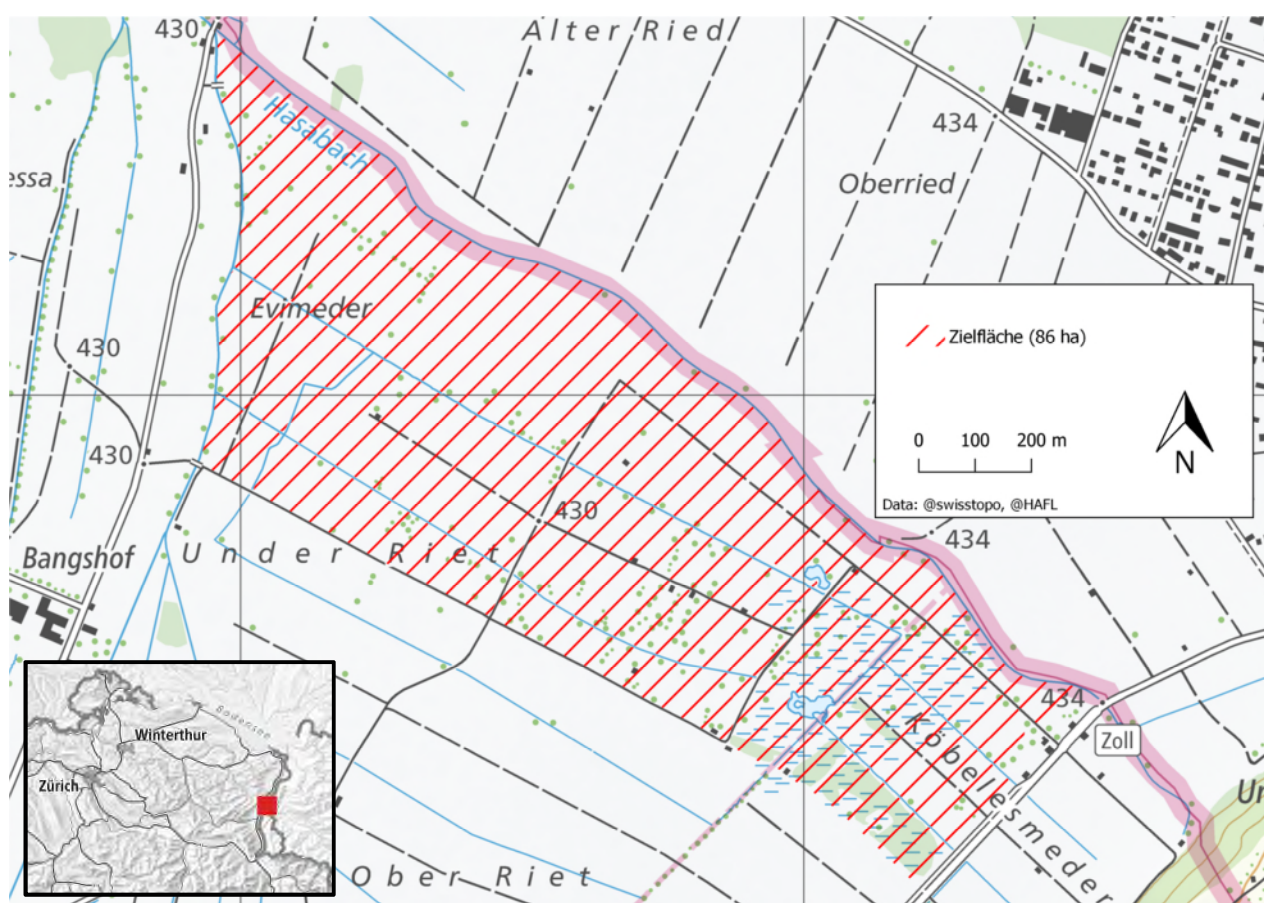


Abbildung 1 : Die Zielfläche umfasst das Naturschutzgebiet Ruggeller Riet in den Gemeinden Ruggell und Schellenberg. In der Minimap die Lage des Ruggeller Riet in Liechtenstein.

3.2 Überblick Vorgehen

Um die potentielle CO₂-Einsparleistung durch die Wiedervernässung des Ruggeller Riets abzuschätzen, muss quantifiziert werden, welche Menge an organischem Kohlenstoff (Corg) im gegenwärtigen Zustand oxidativen Bedingungen ausgesetzt ist oder in naher Zukunft ausgesetzt werden wird.

In ähnlichen Projekten in Hochmooren wurde bis anhin meist bis 50 cm Tiefe mit einem Torfbohrer beprobt und anschliessend der Corg-Gehalt sowie die Lagerungsdichte der Gesamtprobe gemessen (Gubler & Seidl, 2020).

Durch die Heterogenität des Ruggeller Riet, ist diese Methode in ihrer Aussagekraft etwas beschränkt. Erstens ist die Tiefe des permanent vernässten Bereiches, in dem der Corg konserviert wird, sehr variabel, ein pauschaler Ansatz von 50 cm würde hier einem grossen Teil der Fläche nicht gerecht. Zweitens müsste eine sehr hohe Beprobungsdichte angestrebt werden, um die räumliche Variation abzubilden. Und drittens wird durch eine Mischbeprobung der doch sehr verschiedenen vorhandenen Schichten und Horizonte eine Interpretation schwierig.

In diesem Projekt wurden diese Probleme mit klassischen pedologischen Methoden sowie Digital Soil Mapping gelöst.

Punktaufnahmen an Bohrungen und Profilgruben wurden jeweils pedologisch nach Schweizer Kartierstandard (FAL24+) angesprochen. Einige Horizonte wurden beprobt, um den Corg-Gehalt und die Lagerungsdichte zu bestimmen. Mittels einer Pedotransferfunktion wurde aus den im Feld aufgenommenen Eigenschaften die Lagerungsdichte für alle Horizonte hergeleitet (siehe 6.1).

Als vertikale Untergrenze für die Berechnungen, diente der Bereich, in dem über das ganze Jahr hinweg wassergesättigte Bedingungen herrschen und somit mit keiner aeroben Zersetzung des Corg zu rechnen ist. Diese Tiefe wurde über den obersten Horizont mit reduktiven Merkmalen ermittelt (r-Horizont), dabei handelt es sich um einen Bodenhorizont nach Schweizer Bodensystematik (Brunner et. al, 2002), der über den grössten Teil des Jahres wassergesättigt ist (siehe 6.3).

Aus dem so generierten Punktdatensatz wurde mittels vorhandener Geodaten eine räumliche Vorhersage der potentiellen CO₂-Einsparleistung für 1 m² grosse Pixel errechnet. So kann lagegenau nachvollzogen werden wo wieviel Potential besteht.

4 Feldarbeiten

4.1 Profilgruben

Um die Eigenschaften der lokalen Böden besser abzuschätzen wurde ein Prospektionstag durchgeführt. Am 02. September 2020 wurden insgesamt 19 Bohrungen mit einem Hohlmeissel bis 2 Meter Tiefe im und um das Gebiet gemacht. Aufgrund dieser Bohrungen wurde das Gebiet in fünf Straten mit erwarteten ähnlichen Bodeneigenschaften unterteilt und im Dezember 2020 fünf Profilgruben ausgehoben.

Die Profilgruben wurden jeweils pedologisch nach Schweizer Kartierstandard (FAL24+) angesprochen, zusätzliche wurden Kenngrössen aufgenommen, welche die spezifischen Eigenschaften organischer Böden charakterisieren.

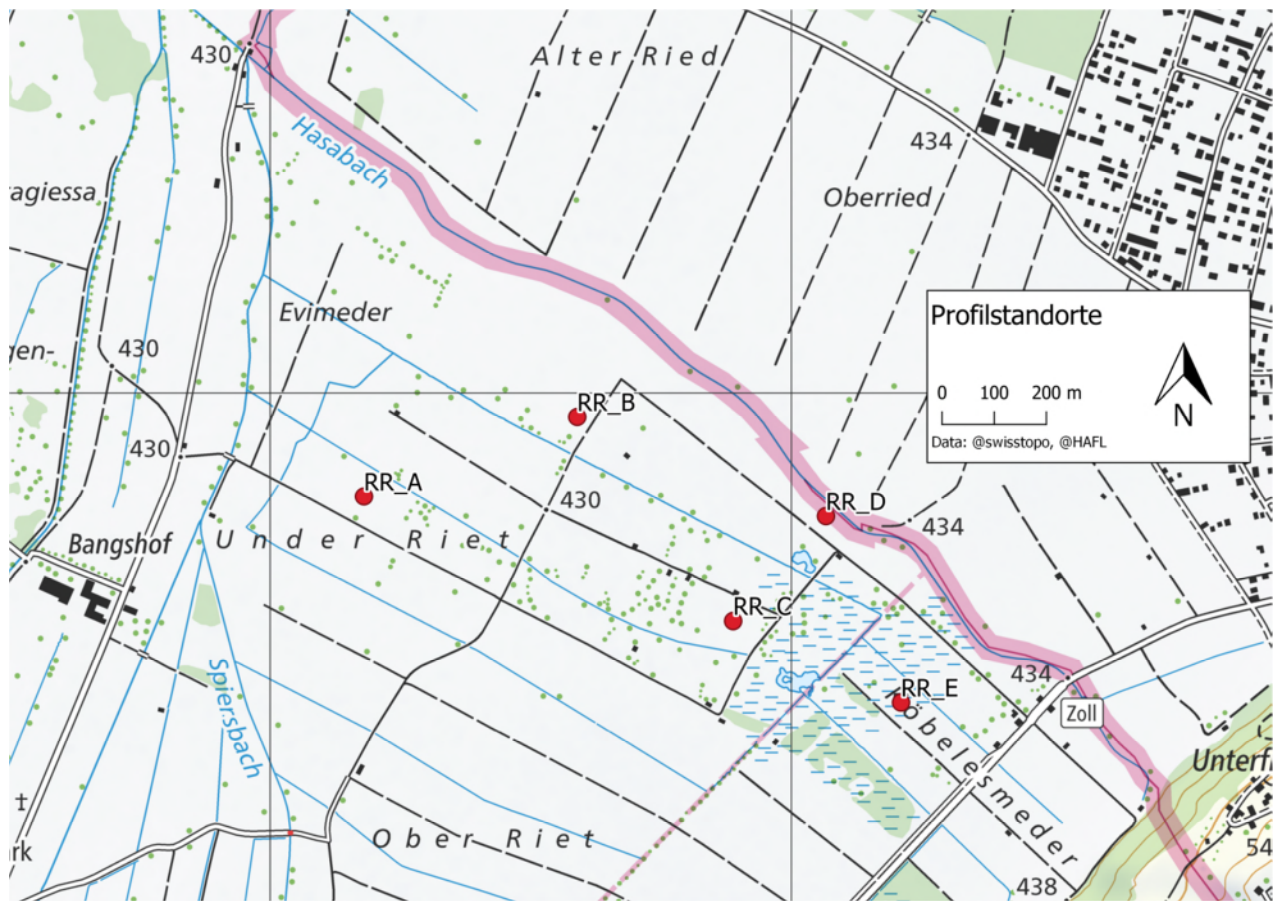


Abbildung 2 : Standorte der fünf Profilgruben

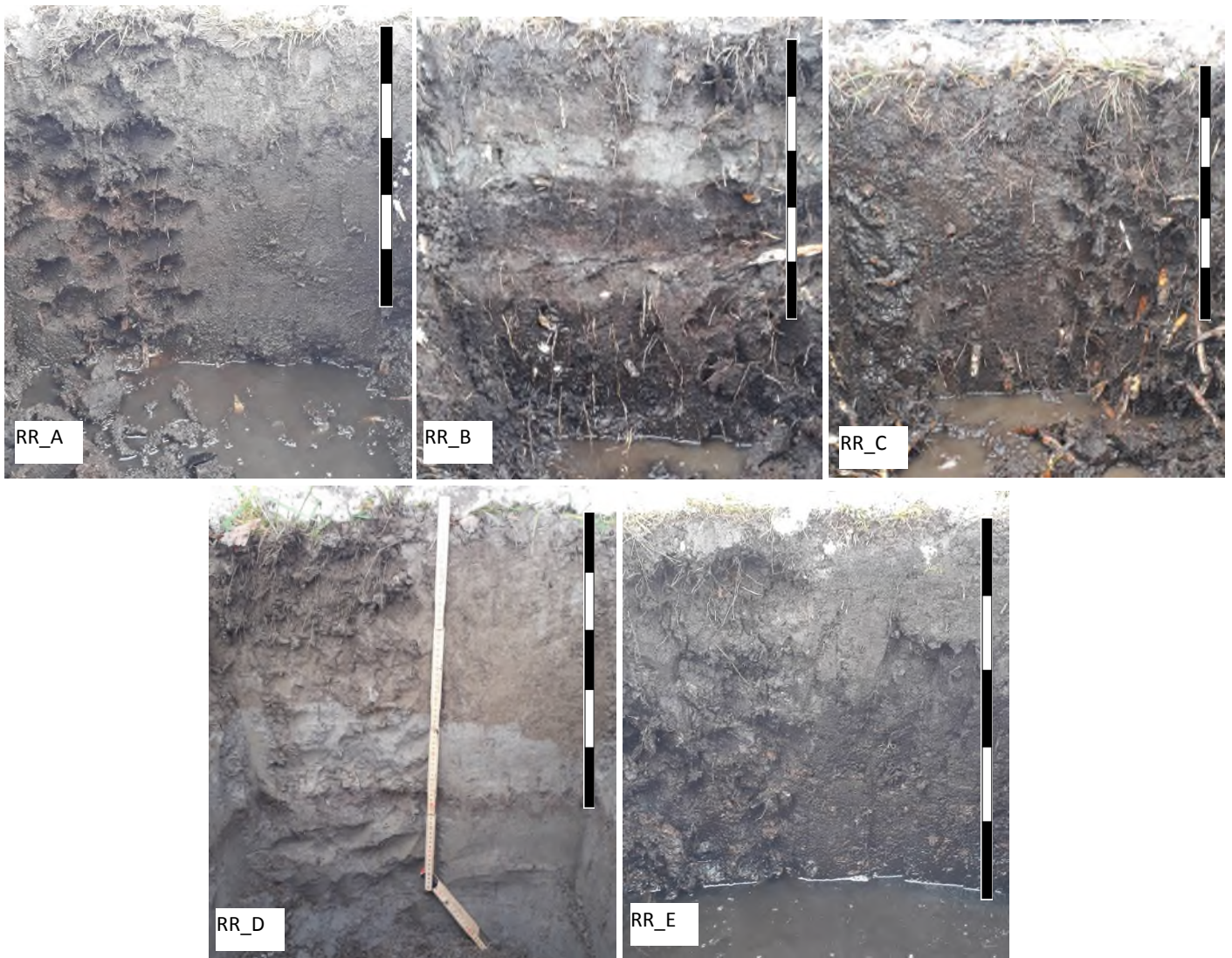


Abbildung 3: Profilwände.

RR_A: Ein in der Vergangenheit intensiv genutzter Boden mit einem hohen Anteil an alluvialen Einmischungen im Oberboden über konserviertem Seggen- und Schilftorf. Solche Böden sind im Gebiet 'Under Riet' anzutreffen.

RR_B: Profil mit teils mächtigen Bändern an alluvialem Schluff aus Überschwemmungen durch den Rhein. Diese hellen Bänder weisen hohe Gehalte an Corg (2-15%) auf, da Pflanzen während oder nach den Überschwemmungsereignissen ins Substrat hineingewachsen sind und konserviert wurden. Im Oberboden hat sich durch vergangene Abbauprozesse Schluff akkumuliert, der Gehalt an Corg ist dementsprechend etwas tiefer.

RR_C: Profil mit hohem Anteil an Corg bereits im Oberboden, der r-Horizont ist hier sehr hoch und hat den darunterliegenden Schilftorf gut konserviert.

RR_D: Typischer alluvialer Bodenaufbau wie er entlang des Hasabachs anzutreffen ist. Es sind nur leicht erhöhte Corg-Werte festzustellen. Diese mineralischen Böden überlagern teils organische Substrate, auch bei diesem Profil wurde in einer Tiefe von 150 cm noch organische Horizonte gefunden. Bei einer solch mächtigen Überdeckung sind jedoch keine CO₂-Emissionen zu erwarten.

RR_E: Profil in einem ehemaligen Torfstich. Der Oberboden ist anthropogen überprägt und besteht aus einer Mischung von mineralischem Abraum aus dem Torfabbau und teils nur mässig zersetztem Torf.

4.2 Bohrungen

4.2.1 Beprobungsplan

Die für die Profilgrubenwahl gebildeten Straten (Teilflächen) wurden mithilfe des Höhenmodells swis-sALTI3D weiter unterteilt in verschiedene Geländeformen. Innerhalb dieser Substrate wurde basierend auf deren Grösse eine gewisse Anzahl von Beprobungspunkten zufällig verteilt (stratifizierte Zufallsstichprobe). So wurde ein Beprobungsplan erstellt, der die lokalen Variationen in den Bodeneigenschaften gut abbilden sollte. Es wurden insgesamt 167 Punkte beprobt, denn es hat sich gezeigt, dass Beprobungsdichten von ca. 2 Bohrungen/ha für solche Fragestellungen genügen um die räumliche Variabilität abzubilden.

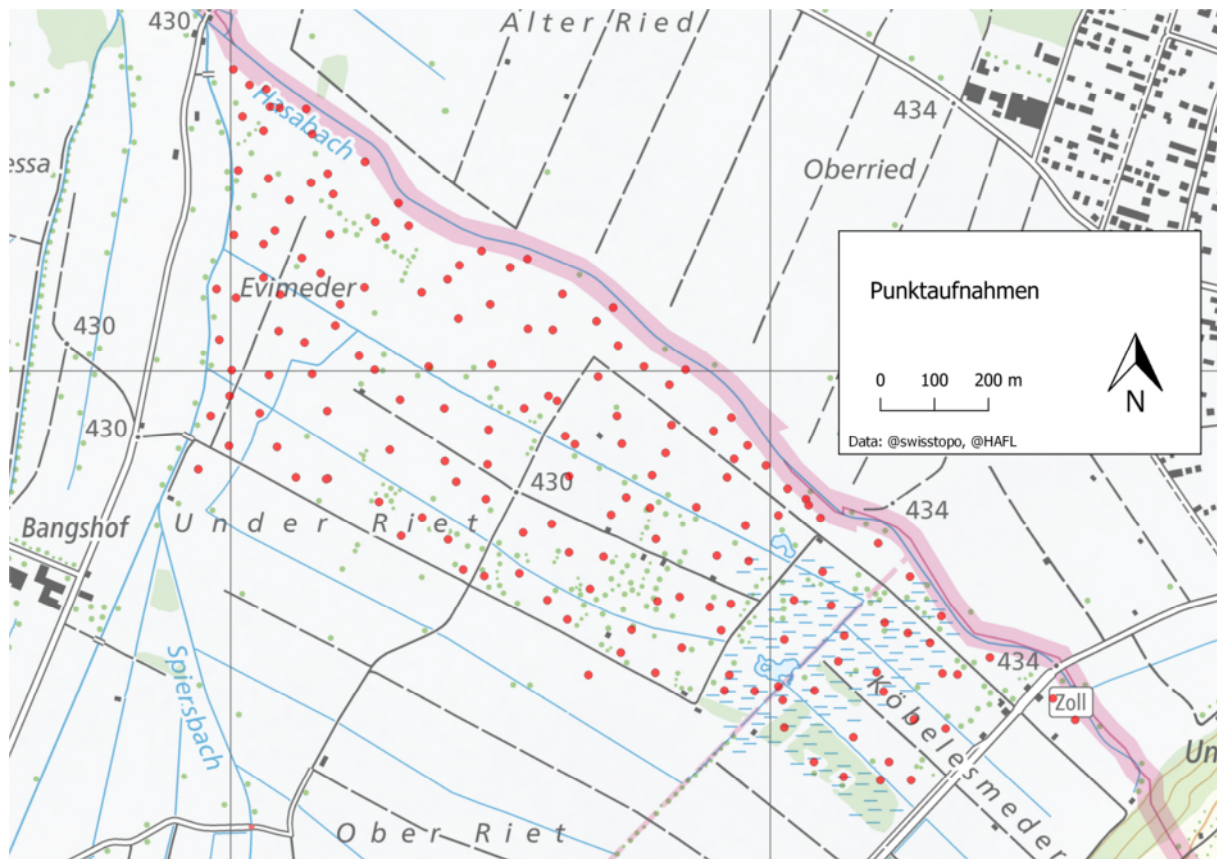


Abbildung 3 : Punktaufnahmen im Zielgebiet.

4.2.2 Ansprache und Probenahme im Feld

Es wurde jeweils mit einem Hohlmeissel bis mindestens in den obersten r-Horizont gestochen. Meist wurde jedoch bis in eine Tiefe von 1 bis 2 Meter gestochen. Wenn der Oberboden ausgetrocknet und mineralisch war, wurden die obersten paar Dezimeter mit einem Holländerbohrer angebohrt.

Die Bohrungen wurden pedologisch angesprochen und in Horizonte unterteilt. Pro Horizont wurden folgende Parameter aufgenommen:

Tiefe, Ausgangsmaterial, Kalkklasse, Corg, Zersetzungsgrad nach von Post, Körnung, Kies, PNG-Abzugsfaktoren, Feuchtigkeit, Horizontbezeichnung nach FAL 24+, Zustand Corg, O₂-Mangel, Gefügezustand.

Nicht alle diese Angaben sind für das Projekt von Bedeutung, für eine zukünftige Nutzung der Punktdaten können sie aber von Interesse sein.

Für die Bestimmung der Lagerungsdichte wurden an 14 zufällig ausgewählten Bohrungsstandorten Zylinderproben entnommen. Dabei wurden jeweils drei 100 ml Zylindern in zwei bis drei Horizonten entnommen. Ein Zylinder aus dem ersten Horizont unter dem Wurzelfilz, sowie ein Zylinder aus dem letzten Horizont über dem r-Horizont. Wenn nur ein Horizont über dem r-Horizont vorhanden war, wurde dieser sowie der erste r-Horizont beprobt. Bei den Profilgruben wurden jeweils drei Horizonte beprobt.

Weiter wurden an 45 Bohrungsstandorten Proben für die Laborbestimmung des Corg-Gehaltes entnommen. Es wurden jeweils drei Horizonte beprobt. Wenn möglich alle 'prägenden' Horizonte über dem r-Horizont, falls weniger als drei über dem r-Horizont lagen, wurde dieser mitbeprobt. An den Profilgruben wurden jeweils Laborproben aus vier oder falls vorhanden fünf Horizonten entnommen.



Abbildung 4: Links, 100 ml Zylinder mit organischem Boden. Rechts, Bohrung ausgelegt in Känel

5 Laborarbeiten

Die Proben wurden gemäss Standard getrocknet, gebrochen und gesiebt. Die Ermittlung des Corg-Gehaltes wurde mittels Rock-Eval-Pyrolyse sowie mittels des Glühverlustverfahrens vorgenommen. Da mit der Glühverlustmethode der Gehalt an organischer Substanz gemessen wird und erst daraus der Corg-Gehalt errechnet wird, diente diese Methode nur der Qualitätssicherung und wurde nur bei rund einem Dutzend Proben als Zweitmethode verwendet.

Die Zylinderproben wurden bis zum Trockengewicht getrocknet und anschliessend gewogen. Aus dem Gewicht und dem bekannten Zylindervolumen lässt sich so die Lagerungsdichte ermitteln.

6 Ableitung der Zielgrössen

6.1 Pedotransferfunktion

Die Lagerungsdichte aller Horizonte wurde von den 156 Zylindern aus 19 Standorten, hergeleitet. Zuerst wurde überprüft welche im Feld angesprochenen Parameter die Lagerungsdichte eines Horizontes beeinflussen könnten. Der Corg-Gehalt in Gewichtsprozent, die Tiefe eines Horizontes sowie der Zersetzungsgrad zeigten die höchste Korrelation. Aus diesen drei Grössen wurde mittels eines linearen Regressionsmodells die folgende Formel (sog. Pedotransferfunktion) errechnet, um die Lagerungsdichte zu erklären. Wobei für mineralische Horizonte ein Zersetzungsgrad von 10 angenommen wird und die Tiefe sich jeweils auf die Mitte eines Horizontes bezieht.

$$\text{Lagerungsdichte [g * cm}^{-3}\text{]} = -0.12810 - 0.17846\sqrt{\text{corg}} + 0.07762\sqrt{\text{Tiefe}} + 0.32535\sqrt{\text{Zersetzungsgrad}}$$

Die Lagerungsdichte nimmt demnach bei zunehmendem Corg-Gehalt in Gewichtsprozent ab. Dies ist zu erwarten, da in den organischsten Horizonten Lagerungsdichten um 0.25 g/cm^3 gemessen wurden und in den rein mineralischen Horizonten Werte um 1.4 g/cm^3 auftraten. Weiter nimmt die Lagerungsdichte mit der Tiefe zu, denn in zunehmender Tiefe wird die Bodenstruktur und das Gefüge in den mineralischen

Böden kompakter. In organischen Böden nimmt die Lagerungsdichte mit der Tiefe tendenziell ab, da höhere Corg-Gehalte und tiefer Zersetzungsgrade auftreten.

6.2 Menge an Corg in den Bodenhorizonten

Aus der Lagerungsdichte und dem Corg-Gehalt in Gewichtsprozent wurde pro Horizont für jede Bohrung und jede Profilgrube bestimmt welche Menge Corg pro Bodenvolumen vorhanden ist. In organischen Böden zeigen Horizonte mit etwa 25 Gewichtsprozent Corg und einer hohen Lagerungsdichte die höchste Menge Corg pro Bodenvolumen. In mineralischen Horizonten nimmt die Menge des Corg pro Bodenvolumen mit dem Corg-Gehalt in Gewichtsprozent zu sowie mit der Lagerungsdichte ab (Abbildung 6).

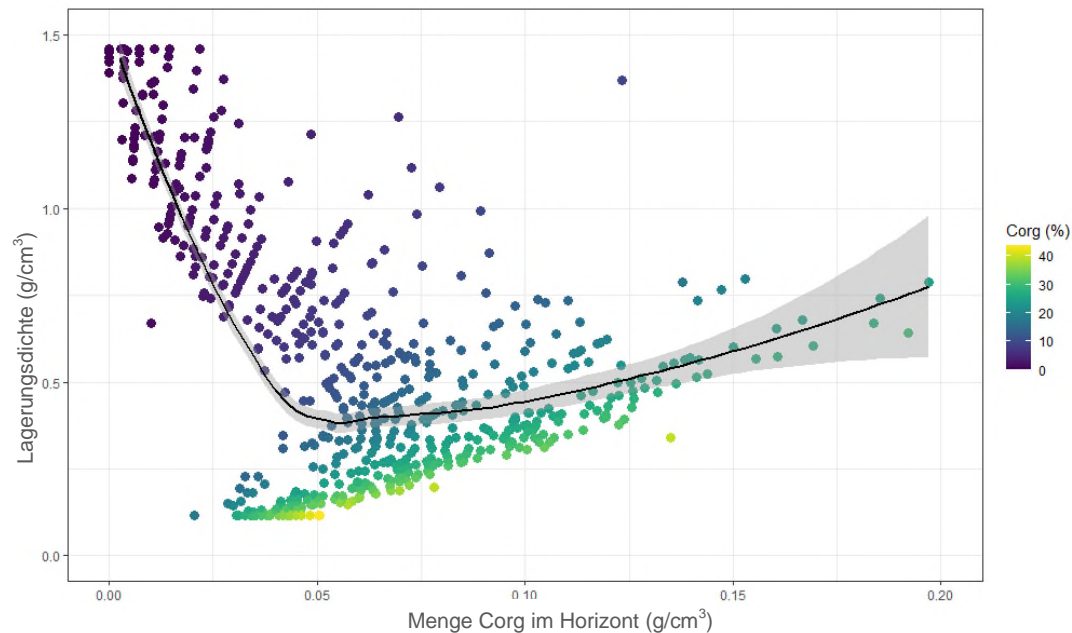


Abbildung 5: Zusammenhang von Lagerungsdichte und Menge Corg pro Bodenvolumen berechnet pro Horizont. Die Färbung zeigt den Gehalt an Corg in Gewichtsprozent an, die dunkelblauen Punkte zeigen mineralische Horizonte, die gelben und grünen zeigen organische Horizonte. Es zeigt sich, dass in mineralischen Horizonten das Gewicht pro Volumen des enthaltenen Corg mit der Lagerungsdichte negativ korreliert ist, dadurch entsteht die abfallende Trendlinie bis 0.05 g/cm^3 Corg. Bei organischen Horizonten ist das Gegenteil der Fall. Hier steigt das Gewicht pro Volumen mit der Lagerungsdichte. Horizonte mit einem sehr hohen Anteil an Corg in Gewichtsprozent haben teils sehr tiefe Menge Corg pro Volumen. Mischhorizonte mit um die 25% Corg und einer hohen Lagerungsdichte haben die höchsten Menge Corg pro Volumen.

6.3 Exponierter Corg-Vorrat in den Bohrungen und Profilgruben

Um die Gesamtmenge an durch aerobe Prozesse potentiell freigesetzbarem Corg in den Bohrungen und Profilgruben zu bestimmen wurde das Gewicht des Corg pro Bodenvolumen der einzelnen Horizonte anhand der Horizontmächtigkeiten addiert.

Dabei wurden alle Horizonte miteinbezogen, die über dem r-Horizont liegen. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass ein r-Horizont im Hochsommer auch entsättigt werden kann und die zukünftige Grundwasserdynamik nicht abzuschätzen ist, wurde der Corg-Gehalt bis 20 cm unter die Obergrenze des obersten r-Horizontes miteingerechnet.

Gesättigte Bedingungen

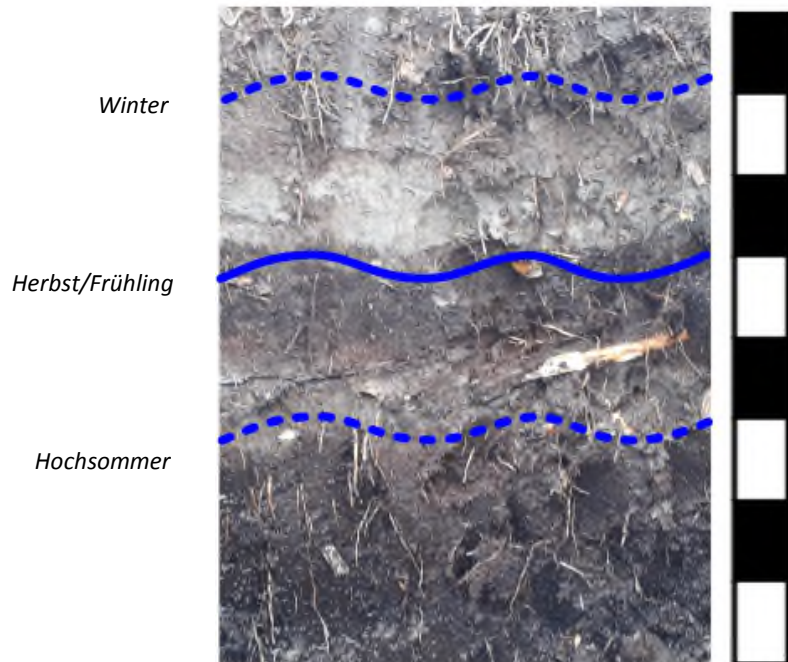


Abbildung 6 : Schematische Darstellung des der Obergrenze der gesättigten Bedingungen im Boden. Im Hochsommer fällt die Obergrenze kurzzeitig bis auf 20 cm unter den normalen Stand vom Frühling und Herbst, wo sich auch die Obergrenze des r-Horizont befindet.

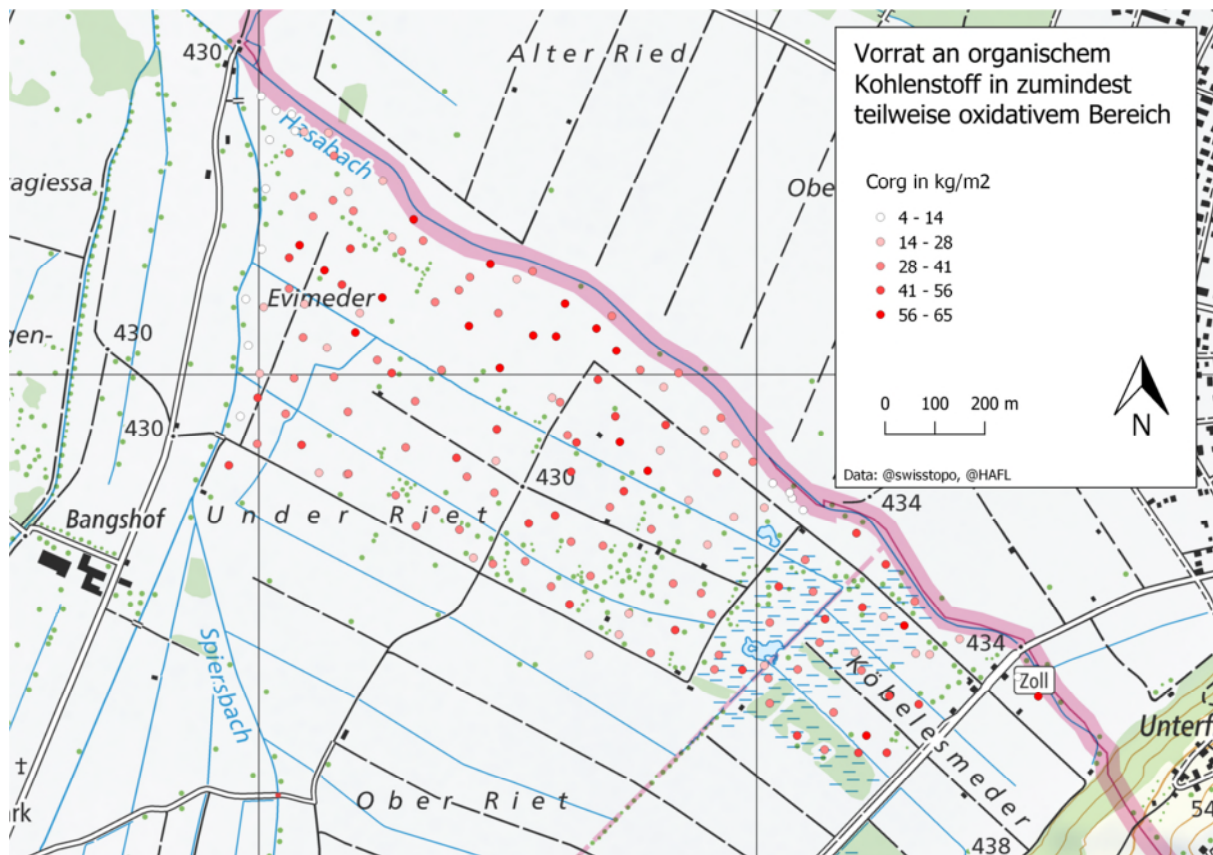


Abbildung 7: Kumulierter Vorrat an Corg an den Standorten, der im gegenwärtigen Zustand potentiell entweichen kann.

7 Räumliche Vorhersage von Bodeneigenschaften

7.1 Prinzip

Um flächendeckende Vorhersage-Karte herzuleiten wurde ein Random Forest-Regressionsverfahren eingesetzt. Es handelt sich dabei um ein Verfahren des maschinellen Lernens, bei welchem zahlreiche Entscheidungsbäume erstellt und kombiniert werden. Dabei werden an den Standorten der Bohrungen und Profilgruben Umweltinformationen zusammengestellt, die die Bodeneigenschaften erklären könnten. Es wurden zwei alte Bodenkarten, eine Vegetationskartierung, die Straten der Konzeptkarte sowie das Höhenmodell swissALTI3D verwendet.

Aus dem Höhenmodell wurden gut zwei Dutzend zusätzliche Terrain-Kenngrößen abgeleitet, wie etwa die Neigung oder Indizes die Informationen über die Wasserakkumulation aufgrund der Lage im Gelände enthalten. Mit dem Random-Forest-Algorithmus werden zwischen den Corg-Vorräten an den Bohrungen und Profilen und den an diesen Standorten herausgelesenen Werten der Geodaten Beziehungen hergestellt. Dabei wählt dieser Algorithmus die wichtigen Geodaten aus und kann auch nicht-lineare Zusammenhänge herstellen. Mit den so gelernten Beziehungen kann für einen nicht beprobten Standort eine Vorhersage zum Corg-Vorrat berechnet werden (wahrscheinlichster Wert für diesen Standort). Werden diese Vorhersagen in regelmässigen Abständen berechnet, entsteht für das ganze Riet eine flächendeckende Vorhersage-Karte.

7.2 Zielgrößen

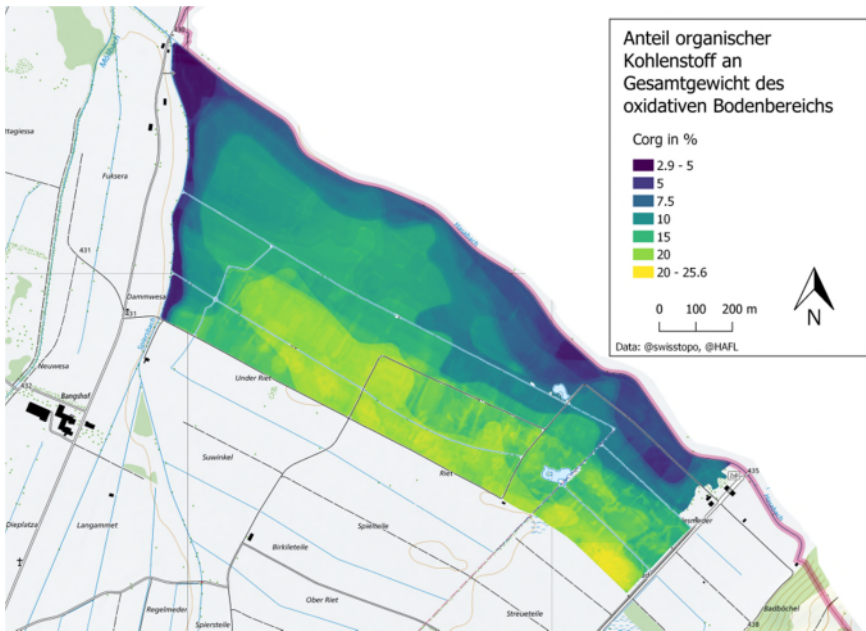
Als Zielgrösse der Modellierung diente der Corg-Vorrat in kg/m^2 im oxidativen Bereich (r-Horizont + 20 cm), der Corg im obersten Bodenhorizont sowie der Anteil Corg am Gesamtgewicht im oxidativen Bodenbereich. Es wurde angenommen, dass aus Flächen mit folgenden Eigenschaften keine CO_2 -Emission zu erwarten ist: < 3% Corg im obersten Horizont und < 7% Corg im oxidativen Bereich.

In der Karte des Corg-Vorrat in kg/m^2 im oxidativen Bereich wurden Bereiche die diese Bedingungen erfüllten weggelassen.

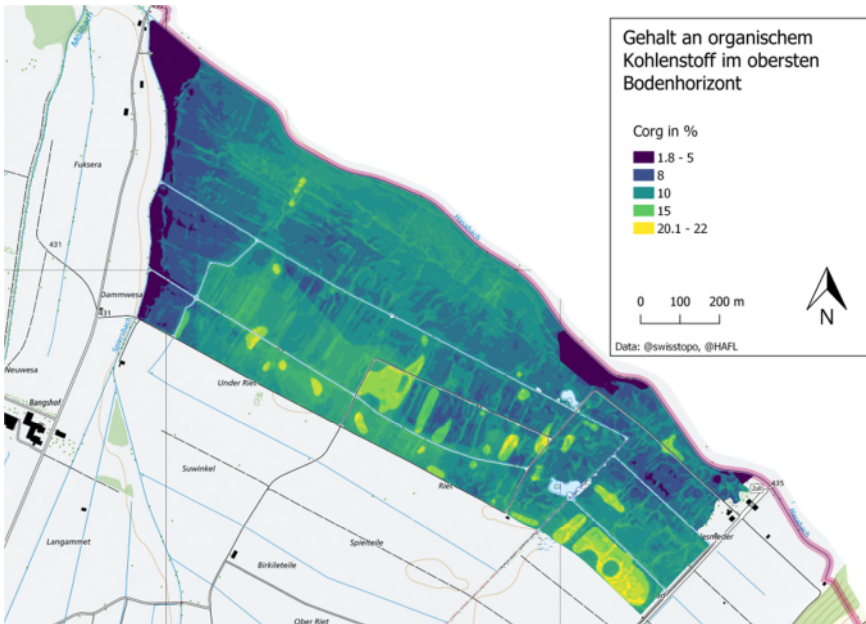
Weiter wurden alle Zielgrößen zusätzlich bis auf 50 cm Tiefe statt auf den r-Horizont modelliert, um am Ende einen Vergleich aufstellen zu können.

7.3 Karten

Nebenstehend sind die modellierten Karten zu sehen. In der oberen Abbildung ist der Anteil an Corg am Gesamtgewicht des Bodens in Prozent zu sehen. Gut sichtbar sind die mineralischen Randbereiche mit wenig Corg in blau entlang des Hasabach und des Spiersbach. Im grünlichen Bereich sind organische Böden mit vielen alluvialen Zwischen- und Deckschichten zu finden. Gegen den südwestlichen Rand des Zielgebietes treten sehr hohe Corg-Gehalte auf, hier fehlen ausgeprägte alluviale Zwischenschichten.



In der mittleren Abbildung ist der Corg im obersten Bodenhorizont zu sehen. In Dunkelblau die Bereiche mit einem mineralischen Oberboden, es zeigt sich ein ähnliches Bild wie in der oberen Abbildung. Durch die Bewirtschaftung, Torfstiche und Meliorationsmassnahmen gestaltete sich eine Modellierung dieses Horizontes schwierig. Die Ergebnisse sind in der Tendenz korrekt, aber die Auflösung von feinen Strukturen täuscht teilweise eine zu hohe Genauigkeit vor.



In der unteren Abbildung ist die Menge an Corg im oxidativen Bereich in kg/m^2 zu sehen. Die Gesamtfläche hat sich von 86 auf 82.7 ha reduziert, da in den weggelassenen Flächen gemäss den oberen beiden Abbildungen keine CO_2 -Emissionen zu erwarten sind. Die höchsten potentiellen Emissionen treten im gelblichen Bereich auf, wo bei einer bereits hohen Lagerungsdichte, hohe Corg Gehalte vorhanden sind. Das quadratische Mittel des Standardfehlers liegt bei $7.7 \text{ kg}/\text{m}^2$ und einem R^2 von 0.65. (Grosse Abbildung in Anhang III).

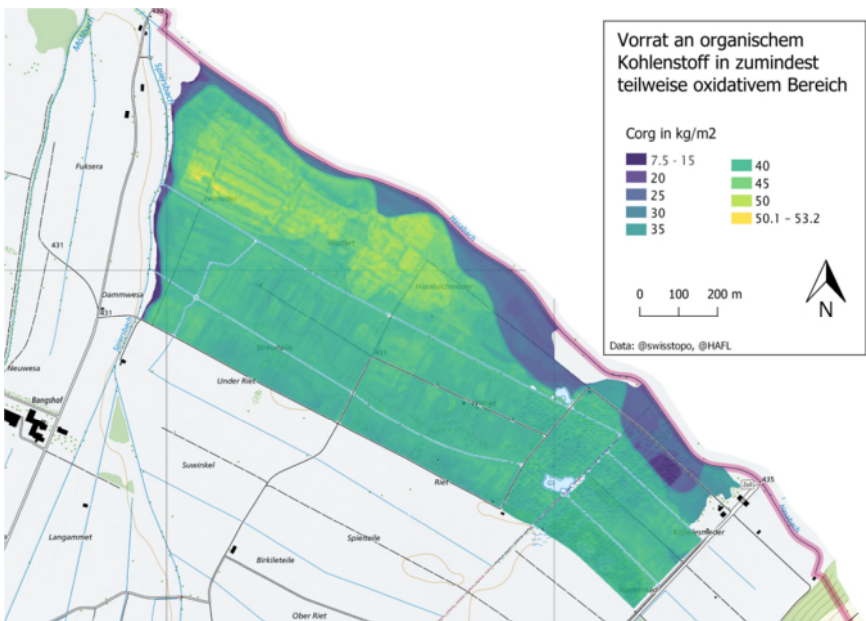


Abbildung 8 : Modellierte Karte von Bodeneigenschaften

8 Berechnung der potentiellen CO₂-Einsparleistung

8.1 Schätzung der Gesamtmenge

Über die 82.7 ha sind insgesamt 32'021'646 kg Corg im oxidativen Bereich vorhanden. Im Schnitt beträgt der Vorrat 38.7 kg/m². Pro Quadratmeter wurden 7.5 kg Corg abgezogen, da ab einem solchen Gehalt mit einem annähernden Corg-Gleichgewicht zu rechnen ist bei dem kein oder nur in geringem Masse CO₂ mehr emittiert (= 31.2 kg/m² Corg).

Das gängige Mass für Referenz-Emissionen ist CO₂ in t. Die 31.2 kg/m² Corg entsprechen 312 t/ha Corg. Das Verhältnis der Molekulargewichte von CO₂ und C beträgt 44/12. Demnach sind 1'144 t/ha potentiell emittierbares CO₂ vorhanden. **Auf die Gesamtfläche gerechnet ergibt dies eine Referenz-Emission von 95'000 t CO₂.**

Der Sicherheitsbereich der Schätzung bewegt sich dabei um eine Abweichung von 4'334 t CO₂ nach oben und unten (85% Vorhersageintervall der modellierten Karte).

8.2 Alternative Schätzung

Für die Berechnung der CO₂-Einsparleistung in Hochmooren nach Gubler & Seidl (2020) wird pauschal eine Tiefe von 50 cm angenommen, unter der Voraussetzung, dass so viel Torf vorhanden ist. Deshalb wurde eine alternative Schätzung mit einer Untergrenze von 50 cm vorgenommen. Dies ist im Ruggeller Riet in der Tiefe fast immer der Fall, jedoch sind die organischen Schichten teilweise nach oben mineralisch überdeckt oder enthalten mineralische Zwischenschichten.

Mit einer solchen Grundlage ergibt sich eine Gesamtmenge von 78'520 t CO₂. Es zeigt sich, dass in einigen sehr vernässten Bereichen so höhere Mengen errechnet werden. In der Mehrheit liegt der r-Horizont aber unter 30 cm Tiefe und folglich werden bei einer pauschalen Grenze von 50 cm geringere Corg-Mengen errechnet.

8.3 Kohlenstofffixierung

Sollte der natürliche Wasserhaushalt annähernd wiederhergestellt werden, wird nicht nur das Entweichen des im Boden vorhandene Corg in die Atmosphäre verhindert, sondern das Gebiet wird zu einer C-Senke. Dazu muss das Gebiet aber über einen Grossteil des Jahres bis nahe an die Terrainoberkante wassergesättigt sein, sodass die vor Ort gebildete Biomasse nicht durch aerobe Prozesse abgebaut werden kann. Ein solches System ist in der Lage jährlich 0.4 bis 1.1 t/ha CO₂ zu fixieren (Dierssen & Dierssen, 2001). Im Ruggeller Riet würden dies etwa 30 bis 90 t CO₂ pro Jahr entsprechen. Durch die Aufgabe von Wegen und das Wegfallen der Kanäle wäre der Wert tendenziell noch etwas höher.

Infolge der Akkumulation von Biomasse wird sich das Gebiet gegenüber den umliegenden Flächen heben, wodurch die oberste Schicht des Moores mit der Zeit immer besser entwässert und die CO₂-Fixierung zum Erliegen kommt. Dieser Prozess ist, bei einem vertikalen Wachstum von wenigen mm pro Jahr, jedoch sehr langsam.

Die gegenüber dem potentiell emittierbaren CO₂ sehr tiefen Werte der potentiellen jährlichen CO₂-Fixierung zeigen deutlich, dass die Sicherung des vorhandenen Corg für eine CO₂-Gesamtbilanz relevanter ist als eine zusätzliche Fixierung.

Eine genauere Quantifizierung der CO₂-Fixierung kann erst nach einem erfolgten Wiedervernässungsprojekt durch Substrat-, Gas- und/oder Höhenmessungen erfolgen.

9 Abschliessende Anmerkungen

9.1 Tiefe des permanent gesättigten Bereiches

Die getroffene Annahme, dass ab einer Tiefe von r-Horizont plus 20 cm ganzjährig gesättigte Bedingungen auftreten, basiert auf Erfahrungswerten. Die Ermittlung des tatsächlichen Übergangs von dauernd gesättigt zum sogenannten oxidativen Bereich ist jedoch eine zentrale Grösse in der Ermittlung des potentiellen CO₂ Einsparpotentials. Um diese Grenze genauere bestimmen zu können, wäre es daher hilfreich Grundwasserstandsmessungen mit Piezometern über mindestens einen ganzen Jahresverlauf vorzunehmen.

9.2 Unterschiedlicher Ansatz gegenüber Hochmooren

Es hat sich gezeigt, dass im Ruggeller Riet auf kleinem Raum eine erhebliche Variation von Corg-Mengen vorhanden ist. Im Gegensatz zu Hochmooren traten hier verschiedene ineinander wirkende bodenbildenden Faktoren auf. Alluviale und torfbildenden Prozesse haben feine und ineinander verzahnte Strukturen und ausgeprägte Schichtungen hinterlassen. Die unterschiedliche Entwässerungsstärke, die landwirtschaftliche Nutzung und grössere Eingriffe wie Torfstiche und Materialeintrag haben die Bodeneigenschaften im Gebiet weiter ausdifferenziert. Die gewählte Methode kann mit dieser Variation umgehen und die potentielle CO₂-Einsparleistungen räumlich sehr detailliert abbilden.

9.3 Bodendaten

Der Informationsgehalt der generierten Bodendaten geht über die im Projekt benötigten Parameter hinaus. Die Punktinformationen wurden in der Datenbank soildat.ch gespeichert und können für zukünftige Bodenkartierungsprojekte von Nutzen sein.

9.4 Weitere Flächen

Es hat sich gezeigt, dass im angrenzenden intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiet grosse Mengen an Corg vorhanden sind. Hier würde weiteres Potential für CO₂-Einsparleistungen bestehen. Insbesondere da dieses momentan intensiver bewirtschaftet und tiefgründiger drainiert wird. Bei einer allfälligen Massnahme muss bedacht werden, dass eine Erhöhung des Grundwasserspiegels im Bereich des Naturschutzgebietes auch den Wasserhaushalt der angrenzenden Flächen beeinflussen wird.

9.5 Bewertung des Zustandes des Ruggeller Riet

Dieser Bericht zeigt auf, welche Mengen an CO₂ im Ruggeller Riet im gegenwärtigen Zustand in die Atmosphäre entweichen könnte. Die Bodeneigenschaften zeigen deutlich, dass die Bedingungen unter denen, das Substrat gebildet wurden, nicht mehr gegeben sind. Ein Grossteil der Fläche zeigt einen für ein solch extensiv genutztes Gebiet zu erwartenden Wasserhaushalt, wenn auch stellenweise erstaunlich tiefliegende r-Horizont Obergrenzen vorliegen.

Die gegenwärtigen CO₂-Emissionen werden beträchtlich sein. Eine genauere Quantifizierung der jährlichen CO₂-Emissionen kann aber nur durch Substrat-, Gas- und/oder Höhenmessungen erfolgen. Die Ableitung von Handlungsempfehlungen ist nicht mehr Teil dieses Berichtes. Es wird abschliessend vermerkt werden, dass eine vollständige Wiedervernässung des Ruggeller Riets die Emission von 95'000 t CO₂ verhindern würde und dass je früher eine solche Massnahme umgesetzt wird, desto mehr CO₂ gebunden wird.

10 Literatur

- AfU Kt. SO (2017): Bodenkartierung Kt. SO, Projekthandbuch Teil III, Kartiermethodik (Kartiermethode FAL24+), unveröffentlicht, 40 S.
- 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 J, Jäggi F, Nievergelt J, Peyer K (1997): Kartieranleitung. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (FAL), Zürich Reckenholz, 175 S.
- Breiman L (2001): Random Forests. In *Machine Learning* 45, pp. 5–32.
- Dierssen K, Dierssen B (2001): Moore. Ökosysteme Mitteleuropas aus geobotanischer Sicht. Ulmer, Stuttgart
- 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.
- ELF, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope - Boden- und Substratuntersuchungen zur Düngeberatung, unveröffentlicht. Forschungsanstalten Agroscope ART und ACW, Zürich und Changins.
- Grimm R, Behrens T, Märker M, Elsenbeer H (2008): Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis. In *Geoderma* 146 (1-2), pp. 102–113.
- Gubler L, Seidl I (2020): Klimaschutz durch Hochmoorschutz. CO₂-Kompensation durch Hochmoorrenaturierung in der Schweiz. Klärung grundlegender Fragen und Vorschlag für einen regionalen Kompensationsstandard für Hochmoorprojekte auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt in der Schweiz. max.moor. WSL, Birmensdorf.
- Höper, H (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. In *TELMA* 37, pp. 85-116.
- KA5, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland, Hannover
- Nussbaum M, Papritz A, Baltensweiler A, Walthert, L (2014): Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging. In *Geoscientific Model Development* 7 (3), pp. 1197–1210.
- Nussbaum M (2017): Digital Soil Mapping for Switzerland Evaluation of statistical approaches and mapping of soil properties
- Oechslin S, Nussbaum M, Tatti D, Kellermann L, Burgos S (2019): Bodenkartierung St. Galler Rheintal. Zwischenbericht August bis Dezember 2018. HAFL, Zollikofen.
- RENAT AG (2018): Vegetationskartierung Ruggeller Riet 2018. RENAT, Vaduz.
- TGL 23 400/04, 1985. Aufnahme landwirtschaftlich genutzter Standorte. Moorstandorte. Verlag für Standardisierung, Leipzig.

I. Pedotransferfunktion

I.1 Korrelationsmatrix

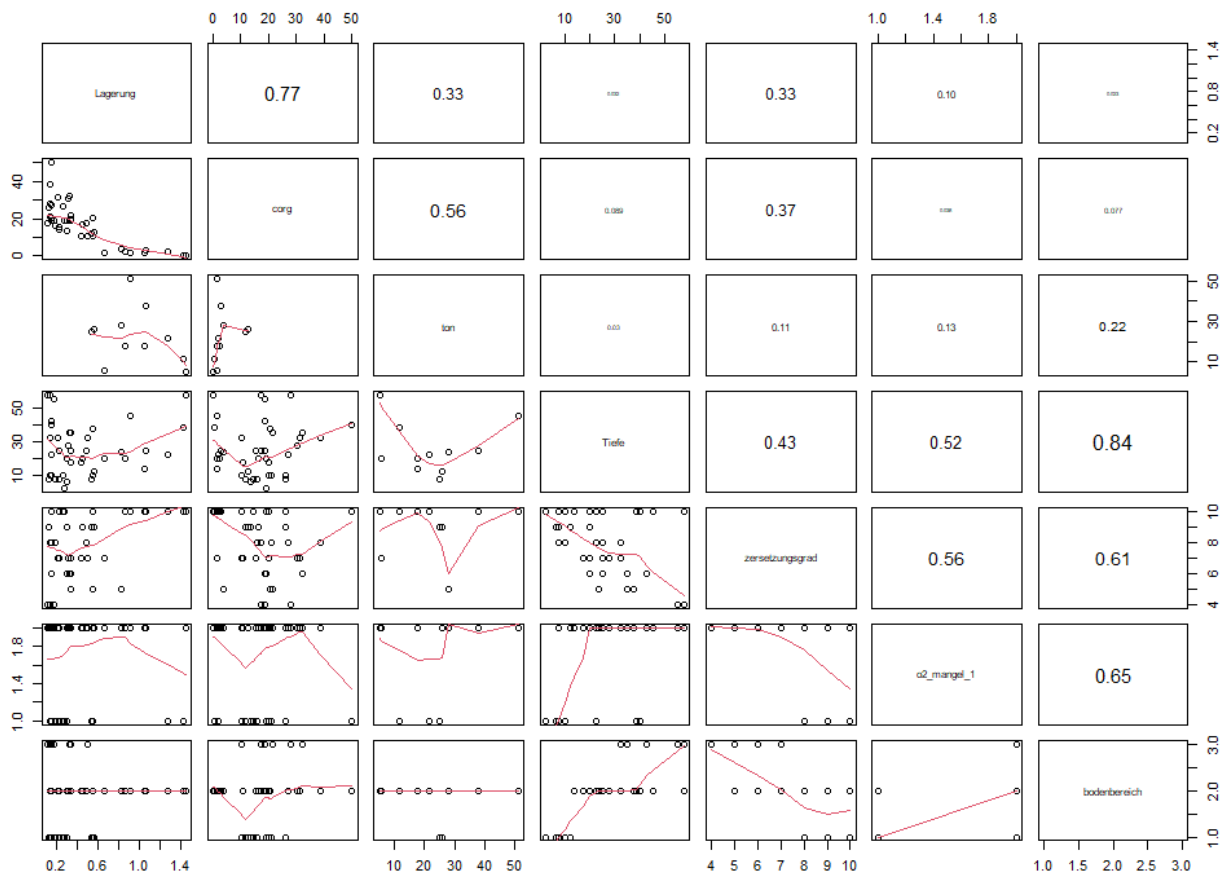


Abbildung 9: Korrelationsmatrix (oberhalb der Diagonale) und Matrix der paarweisen Scatterplots (unterhalb der Diagonale). Der Tongehalt zeigt zwar eine hohe Korrelation mit der Dichte. Wurde aber nicht verwendet da die meisten Horizonte aufgrund des hohen Corg-Gehaltes keine Körnungsschätzung hatten.

I.2 Statistik Transferfunktion Lagerungsdichte

Residuen:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.29404	0.09311	0.02188	0.08689	0.29371

Koeffizienten:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0.1281	0.34693	-0.369	0.714106
sqrt(corg)	-0.17846	0.01775	-10.055	5.36e-12 ***
sqrt(Tiefe)	0.07762	0.02022	3.838	0.000483 ***
sqrt(zersetzung)	0.32535	0.0899	3.619	0.000901 ***

Signifikanzniveaus: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

Multiple R-squared: 0.8383, Adjusted R-squared: 0.8248

Kreuzvalidierung

me	mede	rmse	made	R2	robR2	crps
-0.0002	0.0399	0.164	0.1553	0.7977	0.8082	0.0941

II. Random Forest

I.3 Validierungsplots

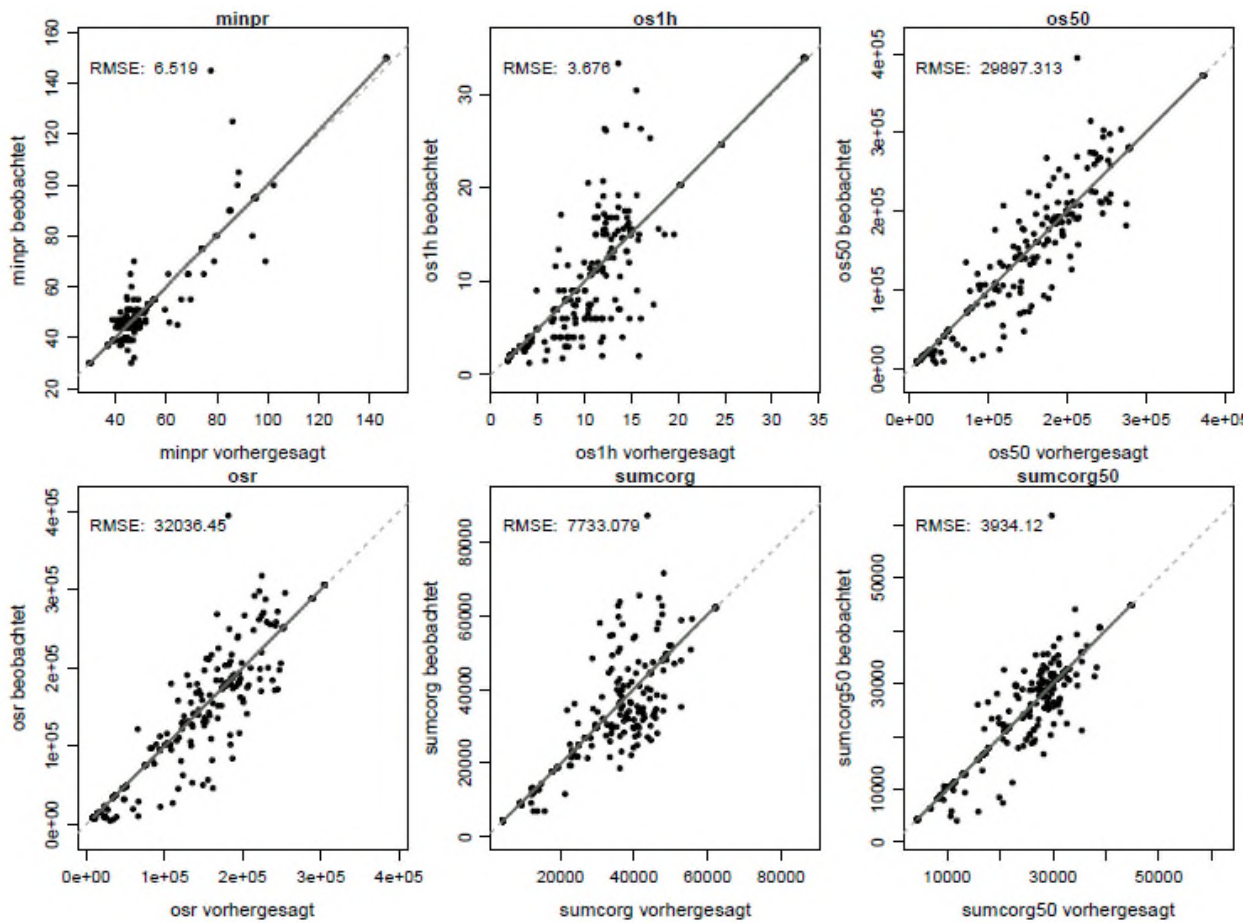


Abbildung 10: Interne Validierungen des out-of-bag errors der Random Forest Modelle. Von oben links, nach unten rechts: minpr = Tiefe r-Horizont, os1h = Corg im obersten Horizont, os50 = \emptyset Corg in % bis 50 cm/(1000), os50 = \emptyset Corg in % bis r-Horizont +20 cm (1000), sumcorg = Menge an Corg in g/cm^2 bis r-Horizont +20 cm (1000), Menge an Corg in g/cm^2 bis 50 cm (1000).

I.4 Variable Importance

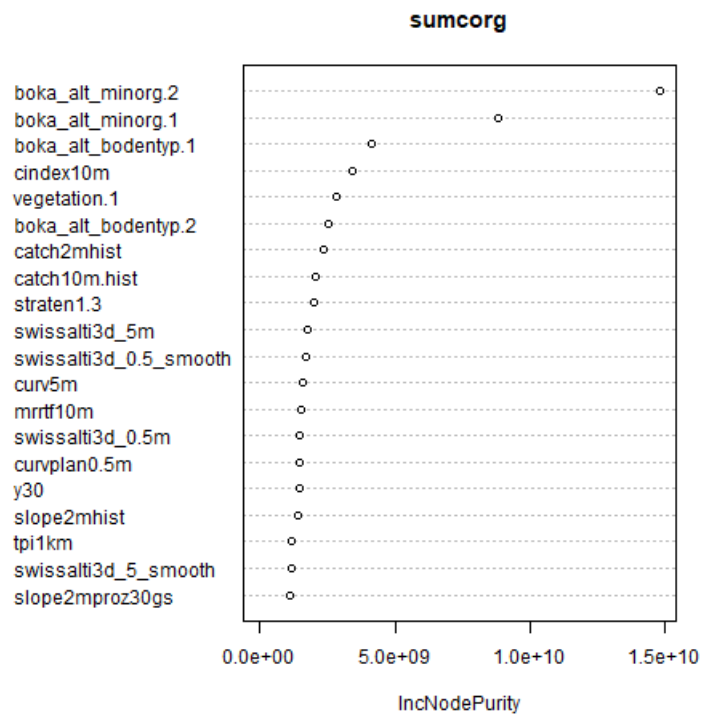
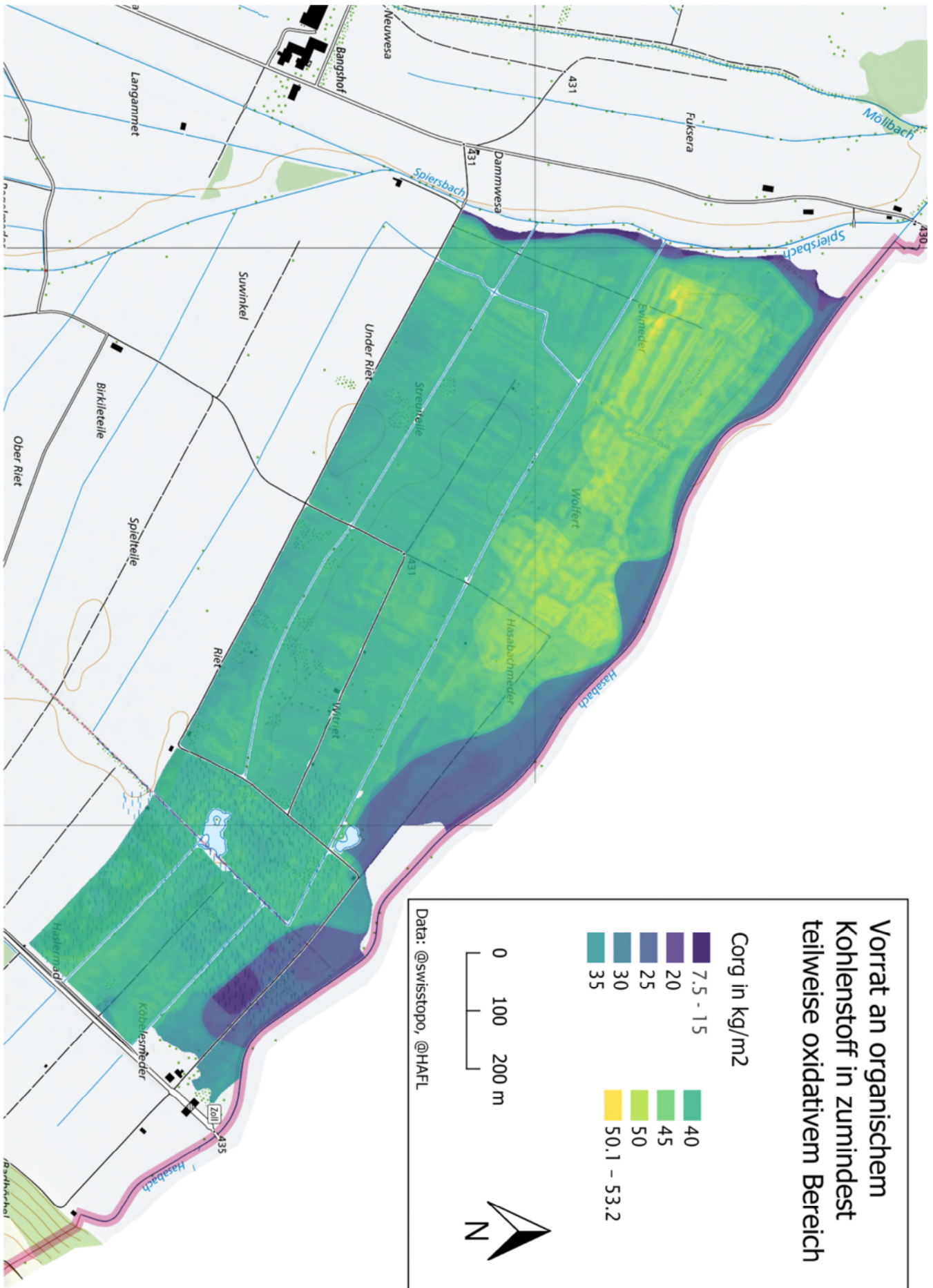


Abbildung 11 : Zeigt die Variable Importance des Modelles für die Menge an Corg in g/cm^2 . Sie bildet ab, wie stark die 20 wichtigsten Umweltvariablen in die Modellierung miteingeflossen sind. Man sieht, dass die alte Bodenkarte in den ersten drei Rängen vertreten ist, es folgt eine Ableitung aus dem Höhenmodell (cindex10m) und ein Stratum der Vegetationskartierung.

III. Karte des potentiell emittierbaren Corg



Amt für Umwelt

Gerberweg 5
9490 Vaduz
T +423 236 64 00
F +423 236 64 11
info.au@llv.li

www.au.llv.li