

Schlussbericht

Begleitforschung zum Pilotprojekt *max.moor*

Anwendung des Kompensationsansatzes *max.moor* zur Wiedervernässung des

Gross Moos im Schwändital, GL



Projektbearbeitung: Lena Gubler, wissenschaftliche Mitarbeiterin WSL

Projektbetreuung: Irmi Seidl, Leitung Forschungsabteilung Wirtschaft- und Sozialwissenschaften, WSL

Dezember 2020

Im Auftrag des BAFU, Vertrags-Nr.: 16.0147.PJ / R314-1602

Zusammenfassung

Entwässerte Torfböden emittieren CO₂, da der mikrobielle Abbau, der durch die Sauerstoffzufuhr ermöglicht wird, das akkumulierte organische Material zersetzt. Eine Wiedervernässung des Torfbodens unterbindet diese Emission. Diese Emissionsreduktion, die bei einer Wiedervernässung von Hochmooren stattfindet, kann zur CO₂-Kompensation genutzt werden. Dazu muss die stattfindende Reduktion quantifiziert werden. Der Ansatz *max.moor* erlaubt eine Abschätzung der eingesparten Tonnen CO₂. Dieser Ansatz kam erstmals bei der Wiedervernässung des Gross Moos im Schwändital in Glarus im Oktober 2019 zum Einsatz. Das Projekt wurde mit Kompensationsgeldern teilfinanziert. Um die vom Ansatz *max.moor* benutzten Annahmen und Berechnungen zu verifizieren, wurde die Wiedervernässung wissenschaftlich begleitet. Es wurden zwei Jahre vor und ein Jahr nach der Renaturierung der Wasserstand mittels 25 Pegeln gemessen sowie an 12 Standorten Kohlenstoffmessungen vorgenommen. Dadurch wurde der *max.moor*-Ansatz auf seine standortspezifische Eignung getestet, sowie die Datenlage zum Kohlenstoffspeicher von Schweizer Hochmooren verbessert. Der Kohlenstoffgehalt der obersten Torfschicht von 50 cm ist im Gross Moos vergleichsweise gering, da der Torf flachmoorartige Eigenschaften aufweist, der Kohlenstoffvorrat hingegen liegt dank der hohen Lagerungsdichte vergleichsweise hoch. Die von *max.moor* verwendeten Mittelwerte werden durch die Messungen im Gross Moos bestätigt. Die Messung des Wasserstandes erwies sich als sehr schwierig, da die komplexe Hydrologie des Gross Moos, ein Durchströmungsmoor, es nur mit Vorsicht erlaubt, von einer Punktmessung auf einen flächigen Wasserspiegel zu schliessen. Die Wirkung der Wiedervernässungsmassnahmen konnte aber nachgewiesen und die Fläche, welche von der Wiedervernässung profitierte, konnte auf 3,8 ha ermittelt werden. Es wurde ausserdem versucht mit Radarinterferometrie den Wiedervernässungseffekt anhand des sich ausdehnenden Torfkörpers zu ermitteln, was wegen mangelnder Kohärenz des Untergrundes der Vergleichsperioden aber nicht gelang. Die pauschalen Annahmen auf welchen der Ansatz *max.moor* beruht, konnten insgesamt bestätigt werden, sowohl die verwendeten Mittelwerte, als auch der pragmatische Ansatz. Ergänzt wird der Ansatz mit einer Einschätzung der Verdichtung der obersten Torfschicht der *max.moor*-Moore: bei sehr unverdichteten Standorten sollte die Berechnung entsprechend geringeren Lagerungsdichten angepasst werden. Weiter wird ein zusätzlicher Methanpuffer vorgeschlagen, zur Berücksichtigung der andauernden Methanemissionen auf wiedervernässten Standorten.

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1 Einleitung: Klima, Moore und der <i>max.moor</i> -Ansatz	6
1.1 Das Gross Moos im Schwändital: Hydrologische Einordnung und Zustand des Moores	7
1.2 Regenerierungsmassnahmen 2019	9
1.3 Das Gross Moos als <i>max.moor</i> -Projekt	10
2 Das Gross Moos als Kohlenstoffspeicher	11
2.1 Einleitung	11
2.2 Methode	12
2.2.1 Feldarbeit der Kohlenstoffbeprobung.....	12
2.2.2 Probenpräparation	13
2.2.3 Berechnung der Lagerungsdichte	13
2.3 Resultate.....	14
2.3.1 Lagerungsdichte.....	14
2.3.2 Kohlenstoffvorrat	16
2.4 Diskussion Kohlenstoffgehalt, Kohlenstoffvorrat und Lagerungsdichte	17
2.5 Methanemission	18
2.6 Schlussfolgerungen für die <i>max.moor</i> -Berechnungen	19
2.6.1 Kohlenstoffgehalt, Lagerungsdichte und Kohlenstoffvorrat	19
2.6.2 Methanpuffer	20
3 Das Gross Moos als Wasserspeicher	20
3.1 Einleitung.....	20
3.2 Methode	22
3.2.1 Wasserstandmessung.....	22
3.2.2 Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Haude.....	25
3.2.3 Radarinterferometrie zur Messung der Quellwirkung	26
3.3 Schwierigkeiten und Unsicherheiten der Wasserstandmessungen	30
3.3.1 Wasserstand in heterogenem Torfkörper	30
3.3.2 Wasserstand abhängig von Pegelstandort	30
3.3.3 Anpassung der Kontrollwerte der Datenlogger.....	30
3.4 Resultate der Wasserstandmessungen	31
3.4.1 Messlinien Pegelmessungen 2018-2020	31
3.4.1 Vergleich mittlerer Wasserstände über die ganze Messperiode	31
3.4.3 Wasserstanddifferenzen der einzelnen Standorte.....	33
3.4.4 Evapotranspiration	36
3.4.5 Wasserstand im Winterhalbjahr.....	37
3.5 Auswirkung der Wiedervernässung.....	39

4	Schlussfolgerung für den Kompensationsansatz <i>max.moor</i>	40
4.1	Emissionsreduktion im Gross Moos	40
4.2	Zielerreichung und Ausblick	43
5	Literaturnachweise	45
6	Anhang.....	47
1	Pegelstände pro Teilgebiet 2018/2019/2020.....	47
2	Berechnung der potentiellen Evapotranspiration.....	52
3	Bilddokumentation Beprobung Gross Moos 6.6.18	53
4	Beratungs-, Informationstätigkeit und Präsentationen <i>max.moor</i> 2019-2020.....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Sensitivität der Kohlenstoffvorräte in Abhängigkeit unterschiedlicher Lagerungsdichten.....	19
Tabelle 2:	Standortbeschreibung der Pegelrohre inkl. Rohrlänge ab Terrain.....	24
Tabelle 3:	Anpassung der Kontrollwerte	30
Tabelle 4:	Mittlere Sommerwasserstände inkl. mittlere Maximal- und Minimalpegelstände (in cm, unter bzw. über Flur) (nur Datenlogger)	32
Tabelle 5:	Mittlere Sommerwasserstände inkl. mittlere Maximal- und Minimalpegelstände (in cm, unter bzw. über Flur) (inkl. manueller Messung) (mittlerer Maximalwert/mittlerer Minimalwert) ohne Pegel P7, P24 und im Jahr 2020 P30 und P37.	32
Tabelle 6:	Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 50 cm Torfhorizont.	42
Tabelle 7:	Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 15 cm Torfhorizont	42
Tabelle 8:	Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 1 m Torfschicht	42
Tabelle 9:	HAUDE-Faktoren für eine Auswahl von Pflanzenarten nach HÄCKEL, H. (2016).....	52
Tabelle 10:	Monatssummen Niederschlag und ETp nach Haude.....	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Grabensystem Gross Moos. Kanton Glarus, P. Zopfi	8
Abbildung 2:	Luftbild nach 2010, mit verfülltem Graben 4 (swisstopo.ch).....	9
Abbildung 3:	Äste in den eingestauten Gräben 2020.....	9
Abbildung 4:	Einstauung des Grabens 2. Okt. 2019	10
Abbildung 5:	Übersicht der Wiedervernässungsmassnahmen im Gross Moos (OePlan GmbH 2019).	10
Abbildung 6:	Torfbohrer	12
Abbildung 7:	Bohrstellen zur Kohlenstoffbeprobung innerhalb des Projektperimeters im Gross Moos, 6.6.2018 (Höhenmodell 10 cm aus Swisssalti 3D Relief)	13
Abbildung 8:	Vergleich der Lagerungsdichte zwischen dem oberen 50 cm-Horizont vs. dem unteren 50-300 cm-Horizont innerhalb der drei Grabenabschnitte. Zur Berechnung der mittleren Lagerungsdichte wurden die mineralischen Einschwemmungen in den Profilen nicht berücksichtigt.....	14
Abbildung 9:	Lagerungsdichte der drei 3m-Profile pro Grabenabschnitt (die Ausreisser gehen auf Reste der entfernten mineralischen Einschwemmungen zurück).....	15

Abbildung 11: Kohlenstoffvorrat (kg m^{-3}) gespeichert in den obersten 50 cm unter Flur (12 Messungen) vs. den unteren 50-300 cm unter Flur (3 Messungen).	16
Abbildung 10: Kohlenstoffgehalt (%) der obersten 50 cm unter Flur (12 Messungen) vs. den unteren 50-300 cm unter Flur (3 Messungen).	16
Abbildung 12: Kohlenstoffvorräte in kg m^{-3} der drei 3m-Profile und lineare Trendlinien (mineralische Einschwemmungen wurden nicht berücksichtigt = Auslassungen).	17
Abbildung 13: Kohlenstoffvorräte der drei 3m-Profile im Vergleich inkl. lineare Trendlinien (mineralische Einschwemmungen wurden nicht berücksichtigt = Auslassungen).	17
Abbildung 14: Hydrologisches Einzugsgebiet für die wiedervernässte Teilfläche (Hydro-Consult 2018).....	20
Abbildung 15: Transmissivität ($\text{cm}^3 \text{ s}$) im Gross Moos: die grauen Flächen sind waldfähig (Hydro Consult 2018).....	21
Abbildung 16: Perforieren der PVC-Vollrohre; Abbildung 17: Befestigen der Rohrkappen.....	22
Abbildung 18: Vorlochen, Einmessen und Einlassen der Pegelrohre.....	22
Abbildung 19: 25 Pegelstandorte (Pegel 38 = 24)	23
Abbildung 20: Einlassen der Sonde und deren Kalibrierung	23
Abbildung 21: Manuelles Ablesen des Wasserstandes und Datentransfer	24
Abbildung 22: a) Hohe Kohärenz der Aufnahmen bei felsigem Untergrund (höchste Kohärenz =1: weiss), b) keine Kohärenz (kein Signal) bei wachsender Vegetation (keine Kohärenz=0: schwarz).	27
Abbildung 23: Oberflächenveränderung (Band 2) beobachtet mit dem ESA ENVISAT ASAR C-Band Radar aufgrund eines Erdbebens (26.12.2003 in Bam, Iran): jeweils ein Farbverlauf entspricht einer Phasendifferenz der halben Wellenlänge ($0-360^\circ$ resp. $-\pi$ bis π entsprechen insgesamt 2.8 cm im Falle eines C-Band-Sensors).	27
Abbildung 24: Kein Kohärenzsignal (Band 3) im Schwändital Vergleichsperiode Juli in den Jahren 2019 und 2020 (Tierberg südlich zu erkennen mit hoher Kohärenz).....	28
Abbildung 25: Pürgschachermoor inkl. Wasserstandspegel	28
Abbildung 26: Pegel 3 und 11 während der Wiedervernässung.....	29
Abbildung 27: Ascending-1 31.08-06.09; Abbildung 28: Ascending-2 06.09-12.09.....	29
Abbildung 29: Descending-1 29.08-04.09; Abbildung 30: Descending-2 04.09-10.09.....	29
Abbildung 31: Schlenken-Bulten Strukturen im wiedervernässten Moor im Mai 2020	30
Abbildung 32: Mittlere Pegelstände inkl. manuell ausgelesener Pegel 2018-2020.....	33
Abbildung 33: Differenzen der Monatsmittel August-Oktober der Wasserstände (cm) und der Niederschlagssumme (l m^{-2}) 2020 im Vergleich zu 2018 (Lücken beruhen auf fehlenden Messdaten im Monat August 2018).....	33
Abbildung 34: Differenzen der Monatsmittel Januar-Oktober der Wasserstände (nur Datenlogger) (cm) und der Niederschlagssumme (l m^{-2}) 2020 im Vergleich zu 2019 (Die Wiedervernässung erfolgte anfangs Oktober 2019).	34
Abbildung 35: Pegelstandsdifferenzen der Monate Mai-September 2020 im Vergleich zu 2019 pro Teilfläche (inkl. manuelle Messungen).	35
Abbildung 36: Potentielle Evapotranspiration nach Haude und Tagestemperatur Aug. 2018- Okt. 2020.....	36
Abbildung 37: Wasserüberschüsse Niederschlag-Evapotranspiration 2018-2020 (Daten siehe Anhang 2)...	37

Abbildung 38: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 18 und 19 in den Jahren 2018-2019.....	38
Abbildung 39: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 4, 18 und 19 in den Jahren 2019-2020.....	38
Abbildung 40: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 4, 18 und 19 in den Jahren 2019-2020 und einsetzende Evapotranspiration (nach Haude) im Frühling 2020.....	38
Abbildung 43: Laich im wiedervernässten Moor.....	39
Abbildung 42: Sich verfärbende Jungfichte, Sept. 2020.....	39
Abbildung 44: Sich ausbreitender Bärlapp, Sept. 2020.....	39
Abbildung 41: Absterbende Rottannen, Sept. 2020.....	39
Abbildung 45: Zuwachsende offene Wasserflächen und Ausbreitung einer Sphagnumdecke.	39
Abbildung 46: Graben 2 an nördlichster, tiefster Stelle: erodierender Torfhang vor der Wiedervernässung und Wasserstand nach der Wiedervernässung.....	40
Abbildung 48: Frisch eingestauter Grabenabschnitt mit entfernter Vegetationsschicht an den Rändern.....	40
Abbildung 47: Treibhausgasbilanzen nach Moortyp und Art der Bewirtschaftung.....	40
Abbildung 49: Perimeter der wiedervernässten Fläche.	41
Abbildung 50-52: Pegelstände (cm) westlich Graben 1	47
Abbildung 53-55: Pegelstände (cm) zwischen Graben 1 und 2.....	48
Abbildung 56-58: Pegelstände (cm) zwischen Graben 2 und 3.....	49
Abbildung 59-61: Pegelstände (cm) zwischen Graben 3 und 4.....	50
Abbildung 62: Pegelganglinien (cm) über ganze Messperiode 2018-2020 (unkorrigierte Werte, vgl. Kap. 3.3.3).....	51

1 Einleitung: Klima, Moore und der *max.moor*-Ansatz

Der Sommer 2018 war bezüglich Trockenheit und Temperatur ein Rekordjahr. Seit den ersten Wetteraufzeichnungen 1864 ist es das bislang wärmste Jahr in der Schweiz (CH2018). Dies hat für die Moore entsprechende Konsequenzen: Wegen anhaltender Trockenheit sinkt der Wasserspiegel, so dass Sauerstoff in tiefe Torfschichten eindringen kann und einen Torfabbau ermöglicht. Zusätzlich beschleunigen wärmere Temperaturen die mikrobielle Zersetzung des durchlüfteten Torfs (Laggoun-Défarage 2018). Da KlimaexpertInnen davon ausgehen, dass das Rekordjahr 2018 bereits in 40 Jahren der Durchschnitt sein wird, also jedes zweite Jahr mit noch höheren Temperaturen zu rechnen ist (CH2018), muss auch von einer nicht-linearen Zersetzungsrate des Torfs ausgegangen werden. Es ist davon auszugehen, dass der Torf von drainierten Mooren in Zukunft schneller abgebaut wird, als bislang gemessen wurde. Entsprechend werden auch die Emissionen zunehmen. Dieses positive Feedback ist nur zu durchbrechen mit einer erfolgreichen Renaturierung und Vernässung der Moore.

Intakte Moore, welche den Wasserspiegel auch während längeren Trockenperioden oberflächennah halten können, erfüllen verschiedene relevante Ökosystemdienstleistungen. Nebst der Speicherung von organischem Kohlenstoff wirkt sich das Wasserspeichervermögen der Hochmoore zweifach positiv aus, erstens schwächen die Moore dadurch die Hochwasserspitzen ab, zweitens stellen sie dem Umland für längere Zeit Wasser zur Verfügung. Im Wechsel von einem glazialen hin zu einem pluvialen Niederschlagsregime im Zuge des Klimawandels wird die Wasserspeicherfunktion intakter Moore für den Wasserhaushalt ganzer Regionen demzufolge sehr viel bedeutender.

Diese Zukunftsaussichten unterstreichen die Relevanz der Moore in einem wärmeren Klima und legen es nahe, uns mit diesen beschädigten Ökosystemen zu beschäftigen und sie möglichst rasch von einer CO₂-Quelle in einen permanenten CO₂-Speicher und, wenn möglich, in eine CO₂-Senke zurückzuführen.

Der Ansatz *max.moor* setzt hier an. Die entwickelte Methode zur Quantifizierung der durch eine Wiedervernässung eingesparten Tonnen CO₂ ermöglicht es, (unvermeidbare) CO₂-Emissionen zugunsten der Hochmoorrenaturierung zu kompensieren (Gubler 2020). Durch diese zusätzliche Finanzierungsmöglichkeit von Wiedervernässungen von Hochmooren sollen diese in der Schweiz beschleunigt werden. Zudem sensibilisiert die Kompensationsmöglichkeit die breite Bevölkerung über das Thema der CO₂-Emissionen aus organischen Böden sowie die verschiedenen weiteren Funktionen von Hochmooren. Es muss denn auch angemerkt werden, dass Kompensationen nur bis 2050 stattfinden werden, denn sämtliche Emittenten müssen bis dahin ihre Emissionen auf netto-null gesenkt haben (Schweizerischer Bundesrat 2021). Was bedeutet, dass ab 2050 nur noch die Senkenleistung der Torfakkumulation bzw. der CO₂-Bindung intakter Moore zum Ausgleich der verbleibenden nationalen Emissionen von Interesse wäre. Ihr quantitativer Umfang ist in der Schweiz allerdings gering. Die Torfakkumulation, wie sie in wachsenden Mooren stattfindet, wird zur Berechnung des Einsparpotentials in *max.moor* hingegen nicht angerechnet (Gubler 2020).

Der Ansatz *max.moor* stützt sich in seinen Berechnungen, angesichts ungenügender Datenlage in der Schweiz, auf Mittelwerte aus internationalen Studien. Dieses Projekt verfolgt somit zwei Ziele:

1. Eine wissenschaftliche Begleitung der Renaturierung des Gross Moos, die mit der erstmaligen Umsetzung des Kompensationsstandards *max.moor* Pilotcharakter hat. Die Forschungsarbeiten sind auf eine Verifizierung und eine standorttypische Präzisierung des Standards ausgerichtet.
2. Eine Verbesserung der Datengrundlage zur Abschätzung des Kohlenstoffspeichers und vermeidbarer Emissionen aus Schweizer Hochmooren.

1.1 Das Gross Moos im Schwändital: Hydrologische Einordnung und Zustand des Moores

Das Gross Moos liegt im hinteren Schwändital, 11 km von Näfels entfernt, auf 1250 m.ü.M, in der ehemaligen Gemeinde Oberurnen im Kanton Glarus. Seit Annahme der Rothenturminitiative 1987 steht das 18 Hektar grosse Hochmoor unter nationalem Schutz. Es wurde als Objekt Nr. 245 in das Bundesinventar der Hoch- und Übergangsmoore aufgenommen (Hochmoorverordnung 1991). Es weist gemäss Bundesinventar keine Primärflächen auf, was auf die starke Beweidung zurückzuführen ist, welche jedoch 1993 als erste Schutzmassnahmen eingestellt wurde. Trittschäden sind auf freien Torfflächen, welche teilweise mit Bärlapp bewachsen sind, bis heute ersichtlich. Die Kantone sind gemäss Hochmoorverordnung nicht nur für den Schutz der sensiblen Biotope zuständig, sondern haben die Aufgabe *„bestehende Beeinträchtigungen von Objekten bei jeder sich bietenden Gelegenheit soweit als möglich rückgängig [zu machen]“*.

Das Gross Moos wurde Ende des vorletzten Jahrhunderts zur Gewinnung von landwirtschaftlich nutzbarer Fläche, hauptsächlich Weidefläche, entwässert. Glücklicherweise wurden die Hauptentwässerungsgräben in Nord-Süd-Richtung angelegt. Hydrologisch gesehen ist das Gross Moos ein Durchströmungsmoor mit Wasserzufuhr vom Fusse des Tierbergs südlich des Moores. Die Fliessrichtung des Wassers verläuft also parallel zu den tiefen Hauptentwässerungsgräben, welche somit nicht den ganzen Torfkörper zu entwässern vermochten. Auch die weniger tief angelegten Saugergräben (Seitengräben) in West-Ost-Richtung vermochten nicht den ganzen Torfkörper tiefgründig zu entwässern, sodass der Hochmoorcharakter erhalten blieb. Dennoch haben die damaligen Meliorationsmassnahmen das Moor stark geschädigt, sodass die Grundwasserkuppe weit unterhalb der Oberfläche liegt. Dies ist auch anhand der zahlreichen Bäume (Rottannen, Föhren und Birken) zu erkennen, welche heute auf dem Moor wachsen. Dichte Baumbestände sind entlang den Gräben zu finden, Jungbäume haben sich über das ganze Moor verteilt angesiedelt. Durch die Durchwurzelung dringt Sauerstoff tief in den Torf ein und erlaubt eine Torfzehrung in tieferen Lagen. Hydrologische Modellrechnungen haben ergeben, dass beinahe auf der ganzen Moorfläche die Bedingungen für Baumwuchs gegeben sind (siehe Abbildung 15, Hydro-Consult 2018; detaillierte Beschreibung des Torfkörpers siehe Kap. 2.1, detaillierte Beschreibung der Hydrologie siehe Kap. 3.1).

Exkurs: Geologie und Topographie des Schwänditales aus Grünig und Steiner (1995, S. 18/19):

«Das Schwändital ist ein vom Gletscher überformtes Trogtal, eingebettet zwischen den Bergketten von Chöpfenberg (1'896 m) - Brüggler (1'711 m) - Wageten (1'763 m) - Fridlispliz (1'624 m) - Gugger (1'250 m) im Norden und Tierberg (1'889 m) - Bärenspliz (1'831 m) - Boggenberg (1'236 m) - Eggberg (1'100 m) im Süden. Es ist ungefähr 5 km lang, maximal 500 m breit und fällt in mehreren Stufen von der Passhöhe der Scheidegg (1'431 m) im Westen bis zur Linie zwischen Gugger und Eggberg im Osten auf 1'050 m ab.

Geologisch setzt sich die Bergkette im Norden aus verschiedenen wasserdurchlässigen Kalken zusammen, im Süden hingegen treten wasserstauende Mergel- und Flyschschichten zutage, die eine Voraussetzung für die verhältnismässig intensive Vermoorung dieser Talseite sind. Eine weitere günstige Voraussetzung für die Moorbildung ist das Klima. Es zeichnet sich durch häufige Nordstaulagen und infolgedessen hohe Niederschläge aus.

Der Talboden selbst ist von Moränen und Bergsturzmaterial überprägt. Entwässert wird das gesamte Tal vom Brändbach, der unter der Scheidegg entspringt und in den nur periodisch gefüllten Haslensee mündet, der seine Entstehung einem Schuttstrom verdankt. Im oberen Schwändital war ein Bergsturz vom Bärenspliz, der den Brändbach aufstaute, Anlass für die Bildung eines Sees bzw. eines fast 1 km langen und bis zu 300 m breiten Alluvialbodens. Dieser Boden vertorfte und entwickelte sich schliesslich zum Gross Moos.»



Abbildung 1: Grabensystem Gross Moos. Kanton Glarus, P. Zopfi

Nebst der Gefahr der Verwallung wegen zu trockenen Bedingungen im Moor, stellt die Erosion, die entlang der tiefen Hauptgräben stattfindet, ein grosses Problem dar. Der Zufluss des Brändbachs, welcher von südöstlicher Seite ins Moor eintritt, hat dieses ursprünglich langsam unter- und oberirdisch durchflossen. Dieser Bach wurde durch die Drainage in den Hauptentwässerungsgraben umgeleitet, welcher dadurch laufend erodiert wird. Dieser Graben hatte bis vor der Wiedervernässung stellenweise eine Tiefe von >3,5m erreicht.

Verglichen mit anderen drainierten Hochmooren hat das Gross Moos gute Aussichten auf eine erfolgreiche Renaturierung und zwar, erstens, weil kein Torfabbau stattgefunden hat. Demzufolge gibt es keine Torfstichkanten oder isolierte Torfkörper. Zweitens, weil das Lokalklima und die hohe Niederschlagsmenge im Schwändital das Torfwachstum sehr begünstigen. Es besteht also die begründete Hoffnung auf die Wiederherstellung eines wachsenden Hochmoors, sind die Drainagegräben erst einmal geschlossen.

Im Jahr 1999 wurde eine erste Renaturierungsmassnahme durchgeführt. Ein Graben wurde mit Spundwänden aufgestaut und mit Sägemehl aufgefüllt (WSL 2001). Die Auswirkungen dieser Wiedervernässung waren wie erwartet positiv, was an Wasserständen und Vegetation nachgewiesen wurde (Küchler et al. 2018). Davon profitiert hat eine Fläche von ungefähr 0,5 ha in der Mitte des Moors (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Luftbild nach 2010, mit verfülltem Graben 4 (swisstopo.ch)

1.2 Regenerierungsmassnahmen 2019

Im Jahr 2019 wurde die Einstauung der Hauptgräben 1-3 im westlichen Teil des Hochmoors vorgenommen (siehe Abbildung 5). Hydrologische Gutachten und Analysen wurden von der Firma Hydro-Consult in Dresden und von Philippe Grosvernier, Lin'eco erstellt, die Projektplanung und -leitung wurde anschliessend von der Firma OePlan GmbH übernommen. Nach der Projektierung der Regenerierung der Gräben 2 und 3 konnte im Verlauf des Planungsprozesses, dank zusätzlicher Finanzierung durch das Klimakompensationsprojekt *max.moor* und den kostengünstigeren beschlossenen Massnahmen, auch der Graben 1 in die Projektierung aufgenommen werden.

Um die Gräben aufzufüllen, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Torfentnahme vor Ort geprüft, denn der Zufahrtsweg ist zu lange und nur mit einem Maximalgewicht von 9t befahrbar, was ein Hinführen von gebietsfremdem Torf unter verhältnismässigem Aufwand verunmöglicht hätte. Die Eingriffe in die Umgebung (Abtorfung des bewaldeten Hügels südlich des Moors zur Torfgewinnung), welche zur vollständigen Verfüllung der tiefen Gräben nötig wären, wurde sowohl von externen Planungsbüros als



Abbildung 3: Äste in den eingestauten Gräben 2020

auch vom kantonalen Planungsbeauftragten abgelehnt, da der nötige Eingriff unverhältnismässig gross ausgefallen wäre. Auch die Option von Sägemehl wurde wegen des abgelegenen Standorts verworfen, da die benötigten Mengen ungleich höher gewesen wären als bei der ersten Grabenverfüllung von vor 10 Jahren, da das Grabenvolumen der drei zu füllenden Gräben mit ca. 3'300 m³ deutlich höher lag (Hydroconsult 2018).

Somit wurde beschlossen, die Gräben nicht aufzufüllen, sondern mit zahlreichen, quer gelegten Spundwänden aufzustauen (Abbildung 4), wobei der Unterschied des Wasserniveaus zwischen den einzelnen Einstauungen bei 25 cm gehalten werden soll (siehe Abbildung 5). Die offenen Wasserflächen wurden mit Ästen belegt werden, worauf sich Bärlapp und Sphagnen rasch ansiedeln können (siehe Abbildung 3). Durch diese Massnahme wird das natürliche Zuwachsen der offenen Wasserflächen beschleunigt.

Diese Massnahme wird sowohl in den Haupt- als auch in gewissen Seitengräben durchgeführt. Durch die Einstauung der Gräben 1-3 werden 3,8 ha wiedervernässt (siehe Kapitel 4). Somit ist der ganze

westliche Teil des Moores, inkl. nicht drainierte Fläche westlich des Grabens 1 bis und mit Graben 4 (1. Etappe 1999) wiedervernässt, was einer Gesamtfläche von ca. 9,5 ha entspricht (siehe Abbildung 1). Die Wiedervernässung des östlichen Teils des Hochmoors ab Graben 4 muss in einer späteren Etappe erfolgen.

die genaue Menge an gespeichertem Kohlenstoffvorrat und somit an verhinderten CO₂-Emissionen bestimmt werden. Zweitens wurde der Wasserstand vor und nach der Wiedervernässung gemessen. Dadurch konnte zum Einen die Entwässerungstiefe bzw. die Wasserstanddifferenz vor und nach der Renaturierung bestimmt werden, zum Andern wurde auch die Ausdehnung des Wiedervernässungseffekts zu ermitteln versucht.

Das Wiedervernässungsprojekt im Gross Moos eignet sich insofern als Kompensationsprojekt, da es sich mit der Einstauung der drei Entwässerungsgräben um ein vergleichsweise grosses Renaturierungsprojekt handelt und demzufolge eine ausgedehnte Fläche betrifft, wodurch grosse Mengen an Kohlenstoff dauerhaft gebunden werden können. Die mächtigen Torfvorkommen im Gross Moos (stellenweise >6m) unterstreichen die Relevanz des Projektes aus klimarelevanter Perspektive. Auch wenn mit dem Ansatz *max.moor* nur die obersten 50 cm Torf betrachtet werden, wurde der ganze Torfkörper darunter geschützt und vor zukünftiger Torfzersetzung und Erosion bewahrt. Die guten Aussichten auf eine erfolgreiche Renaturierung hin zu einem wachsenden Hochmoor war ein weiterer positiver Faktor bei diesem Renaturierungsprojekt.

Schwierigkeiten bereitete hingegen die komplizierte Hydrologie des Hochmoors. Die unterschiedlichen Torfstrukturen, die von einer heterogenen Entstehungsgeschichte des Moors herrühren, sowie die verschiedenen lehmigen Einschwemmungen, welche in unterschiedlichen Profiltiefen zu finden sind, machten es schwierig, generell gültige Aussagen über den Wasserspiegel für den gesamten Torfkörper zu machen, respektive müssen solche Aussagen mit entsprechender Vorsicht interpretiert werden (siehe Kapitel 3.1).

Weiter ist zu beachten, dass die Massnahmen sowohl der Wiedervernässung als vor allem auch dem Erosionsschutz dienen, da bisher grosse Mengen an Torf aus den Gräben ausgeschwemmt wurden. Das Moor insgesamt war vor den Massnahmen 1999 resp. 2019 vergleichsweise nicht stark degradiert bzw. ausgetrocknet dank des enormen Wasserrückhaltevermögens der einzelnen, von den Gräben durchzogenen Torfkörper. Dies bedeutet, dass die Wasserstände bereits vor der Renaturierungsmassnahmen vergleichsweise hoch lagen. Baut sich der Torf jedoch weiter ab, was ohne wiedervernässende Massnahmen der Fall gewesen wäre, wäre zu erwarten gewesen, dass der Wasserspiegel nicht relativ ansteigt, sondern entsprechend der Grabenerosion sinkt. Da die Gräben zwischen 1.5 und >3.5 m tief waren, lassen sich die beim *max.moor*-Ansatz betrachteten obersten 50 cm als „die von der Entwässerung am stärksten betroffene Schicht“ gut begründen.

2 Das Gross Moos als Kohlenstoffspeicher

2.1 Einleitung

Die Fläche, welche von der Wiedervernässung 2019 profitierte, erstreckt sich über eine Fläche von 3,8 ha. Die Untergrundtopografie ist geneigt Richtung Süd-Nord, mit einer Torfmächtigkeit am südlichen Rand bei knapp einem Meter und am nördlichen Rand bei 5 Metern (Hydro-Consult 2018). Die Torfbeschaffenheit ist entsprechend der Entstehungsgeschichte des Moors sehr heterogen, insgesamt kann der Torf als Übergangsmoortorf bezeichnet werden (Grosvernier 2017). Die Bohrkerne der Beprobung am 6.6.2018 wiesen hingegen auch häufig Horizonte mit faserigem flachmoorartigem Torf auf bis in eine Tiefe von ca. 1m. In einem Bohrkern konnten in dieser Tiefe sowohl Schilfknoten als auch Fieberkleesamen gefunden werden, was einer typischen Flachmoorvegetation entspricht. Darunter wird der Torf braun-rötlichbraun und die Konsistenz weist auf stark zersetzte Shpagnen hin (siehe Anhang 3, Bilddokumentation Beprobung 6.6.2018). Zudem fanden sich über das ganze Moor verteilt lehmige Einschwemmungen in unterschiedlichen Tiefen (siehe auch Kapitel 3).

Gemäss Datierungen von Torfproben aus ähnlich mächtigen Hochmooren im Schweizer Jura dürfte das Alter der untersten Torfschichten mehr als 10'000 Jahre betragen (Gubler 2009). Gemäss den gemessenen 44 Profiltiefen der Firma OePlan GmbH, welche für die Planung und Umsetzung der Wiedervernässungsmassnahmen im Gross Moos verantwortlich war, beträgt die durchschnittliche Torftiefe entlang der Gräben der Projektfläche 3,5 m (eigene Berechnung gemäss OePlan GmbH 2019). Für eine Fläche von 3,8 ha ergibt sich dadurch ein Torfvolumen von rund 133'000 m³. Dies dürfte hingegen noch leicht unterschätzt sein, da (i) die Profile jeweils entlang der Gräben gemessen wurden und somit die Wölbungen des Torfkörpers zwischen den Gräben nicht berücksichtigt werden und (ii) die tiefgründige nördliche Projektfläche breiter ist als die flachgründige im südlichen Teil.

2.2 Methode

2.2.1 Feldarbeit der Kohlenstoffbeprobung

Die Proben wurden mit einem Torfbohrer gestochen, welcher die Probe seitlich aus dem Torf schneidet (Abbildung 6). Der Torfbohrer besitzt ein 50 cm langes Stahlgehäuse, welches vorne in einer Spitze zusammenläuft, die ein gutes Eindringen in den Torfkörper ermöglicht. Das halbrunde Gehäuse besitzt einen Durchmesser von 5,2 cm und ist mit einer beweglichen Klappe versehen. Das Volumen der Kammer beträgt somit 530 cm³. Der eine Rand des Gehäuses ist scharf geschliffen. Um den Bohrer beliebig tief in den Boden einzulassen, werden am oberen Ende Verlängerungsstangen befestigt. Der Torfbohrer wird mit geschlossener Klappe in den Torfboden eingestochen und um 180° gedreht. Die scharfe Kante des Bohrgehäuses schneidet das Torfmaterial seitlich aus dem Boden. Somit ist sichergestellt, dass es sich um unverdichtetes Material handelt, welches vom Einstich des Bohrers nicht beeinflusst wurde. Die bewegliche Klappe, welche die Drehbewegung des Bohrers nicht mitmacht, schliesst sich nach der 180° Drehung; die Halbschale ist mit Torf gefüllt. Um das Material aus dem Bohrer zu entnehmen, wird die Klappe geöffnet. Durch die entgegengesetzte Drehbewegung wird das Probematerial herausgedreht und liegt dann auf der Oberfläche der Metallklappe (Gubler 2009).



Angaben zum verwendeten Torfbohrer:

Länge: 50 cm

Durchmesser: 5,2 cm

Volumen: 530 cm³

Abbildung 6: Torfbohrer (Bilder Gubler, 2009)

Sämtliche Bohrstandorte liegen im Einflussperimeter der geplanten Wiedervernässung jeweils auf Bulten oder in bultigem Gelände. Die Bohrstandorte wurden festgelegt, als noch nicht geplant war, Graben 1 ebenfalls einzustauen, deshalb wurde der Torfkörper westlich vom Graben 1 nicht beprobt. Es wurden drei Transekte gebohrt; westlich des Grabens 2 (G2), zwischen den Gräben 2 und 3 (GM) und östlich des Grabens 3 (G3). Die G2 und G3 umgebenden Torfkörper sind von drei resp. zwei Saugergräben durchbrochen (vergleiche Abbildung 7). Es wurde entsprechend von jedem Teilkörper eine Probe entnommen (G3_1 und G3_2 ohne Trennung durch Saugergraben). Die Proben 1-3 entlang der drei Transekte wurden als Mischproben der obersten 50 cm entnommen, wobei die Probe jeweils unterhalb der lebenden Moosschicht angesetzt wurde. Bei den drei Bohrlöchern mit der Nummerierung 4 wurden jeweils 3m-Bohrkerne entnommen.

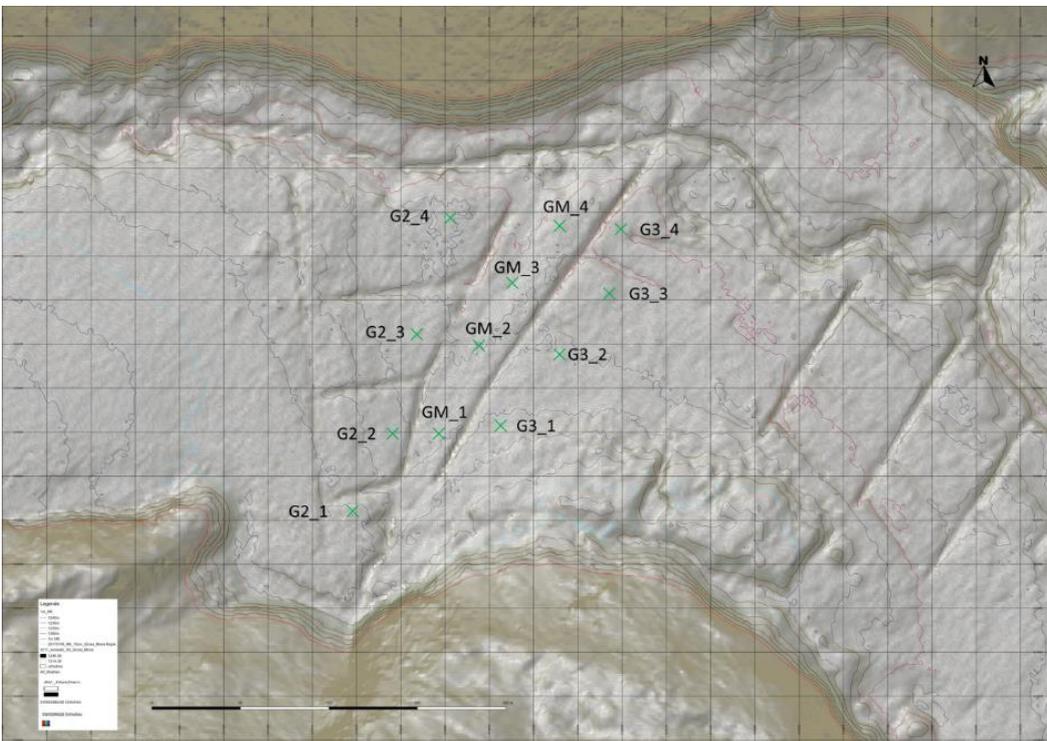


Abbildung 7: Bohrstellen zur Kohlenstoffbeprobung innerhalb des Projektperimeters im Gross Moos, 6.6.2018 (Höhenmodell 10 cm aus Swissalti 3D Relief)

2.2.2 Probenpräparation

Die 3m-Bohrkerne wurde anschliessend in 10 cm Segmente geschnitten und zusammen mit den Mischproben, in Plastiksäcken verpackt, in einem Kühlraum von 4°C, zusammen mit den 50 cm-Mischproben, gelagert, eingewogen und in einem Trockenschrank bei 105°C während mindestens 96 h getrocknet. Das Trockengewicht wurde erneut eingewogen, um daraus die Lagerungsdichte zu bestimmen. Danach wurden die Proben mittels Mörser und Sieb für das Mahlen präpariert, wobei die mineralischen Einschwemmungen möglichst vollständig entfernt wurden. Die Proben bestanden folglich aus rein organischem Material, anorganischer Kohlenstoff konnte somit ausgeschlossen werden. Mit einer Labormühle (Retsch MM400) wurden die Proben anschliessend gemahlen. Für die Elementaranalyse wurden 4 (+-0,2) mg der Torfproben eingewogen und mittels Elementaranalysators gemessen. Die Kohlenstoff-Analyse wurden im Zentrallabor der WSL durchgeführt. Sie wurden doppelt geführt, d.h. zweimal eingewogen, um jeweils eine Probe zweimal zu messen, um Ausreisser zu erkennen.

2.2.3 Berechnung der Lagerungsdichte

Zuerst wurde die Lagerungsdichte anhand des Volumens des Torfbohrers und des Trockengewichts der Probe ermittelt. Die mineralischen Einschwemmungen wurden dabei nicht berücksichtigt, um alleine die Lagerungsdichte des Torfes zu bestimmen. Damit konnte anschliessend der Kohlenstoffvorrat der Probe berechnet werden. Der prozentuale Kohlenstoffanteil wurde mittels Elementaranalyse gemessen.

$$OC = \frac{OC_{rel}}{100} * D$$

Wobei:

OC = Organischer Kohlenstoffvorrat (g cm⁻³)

OC_{rel} = Organischer Kohlenstoffgehalt (Elementaranalyse in %)

D = Lagerungsdichte (g cm⁻³)

Der Kohlenstoffvorrat wurde danach in CO₂-Äquivalente (eq) umgerechnet (im Verhältnis 44:12) und auf die Einheit t/ha (bei 50 cm Tiefe) aufgerechnet.

2.3 Resultate

2.3.1 Lagerungsdichte

Die mittlere Lagerungsdichte über alle Proben gerechnet liegt bei 0.121 g cm^{-3} . Dies ist, verglichen mit national und international vergleichbaren Studien (Gubler 2020), sehr hoch. Werden die obersten 50 cm mit den darunterliegenden Torfschichten verglichen, so ist die Verdichtung, welche durch die Entwässerung und die landwirtschaftliche Nutzung zustande kam, erkennbar (Abbildung 8). Im oberen 50 cm-Horizont, welcher am meisten von der Entwässerung betroffen ist, beträgt die Dichte im Durchschnitt 0.131 g cm^{-3} (± 0.041) (12 Bohrstandorte), während die mittlere Dichte im ungestörten Unterboden bei 0.11 g cm^{-3} (± 0.028) (3 Bohrstandorte) liegt. Diese Tatsache fällt umso mehr ins Gewicht, wenn bedacht wird, dass sich dies in einem ungestörten Moor genau umgekehrt verhält: Der stärker zersetzte Unterboden weist in der Regel eine höhere Lagerungsdichte auf, als der noch unzersetzte Oberboden. Diese Beobachtung gilt jedoch nur, wenn sämtliche Proben in die Betrachtung einbezogen werden, sprich, wenn die Mischproben von 50 cm Tiefe der drei Transekte verglichen werden mit den 3 Bohrungen von 3 m Tiefe. Werden hingegen nur die drei Tiefenbohrungen betrachtet, kann innerhalb der Profile keine Abnahme der Dichte festgestellt werden (Abbildung 9). Im Gegenteil zeigt sich in zwei der drei Profile eine sehr konstante Dichte mit Ausnahmen einiger Ausreisser, welche von mineralischen Einschwemmungen herrühren (und welche für die Berechnung des Kohlenstoffgehalts nicht verwendet wurden).

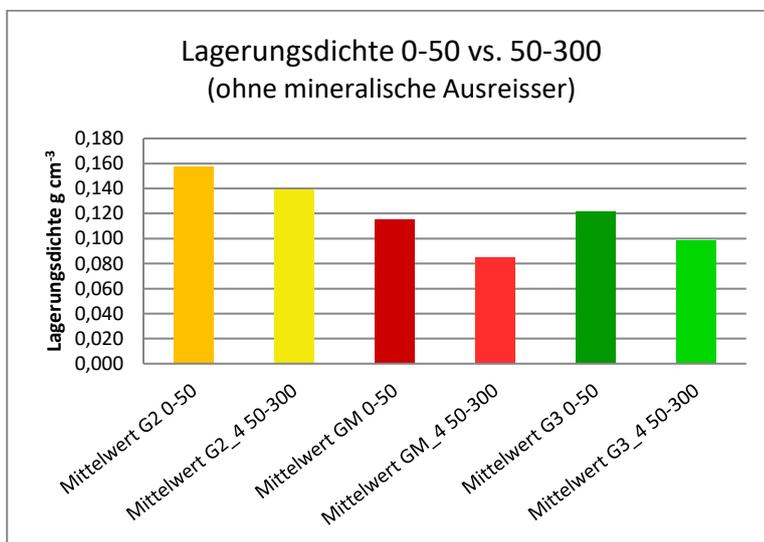


Abbildung 8: Vergleich der Lagerungsdichte zwischen dem oberen 50 cm-Horizont vs. dem unteren 50-300 cm-Horizont innerhalb der drei Grabenabschnitte. Zur Berechnung der mittleren Lagerungsdichte wurden die mineralischen Einschwemmungen in den Profilen nicht berücksichtigt.

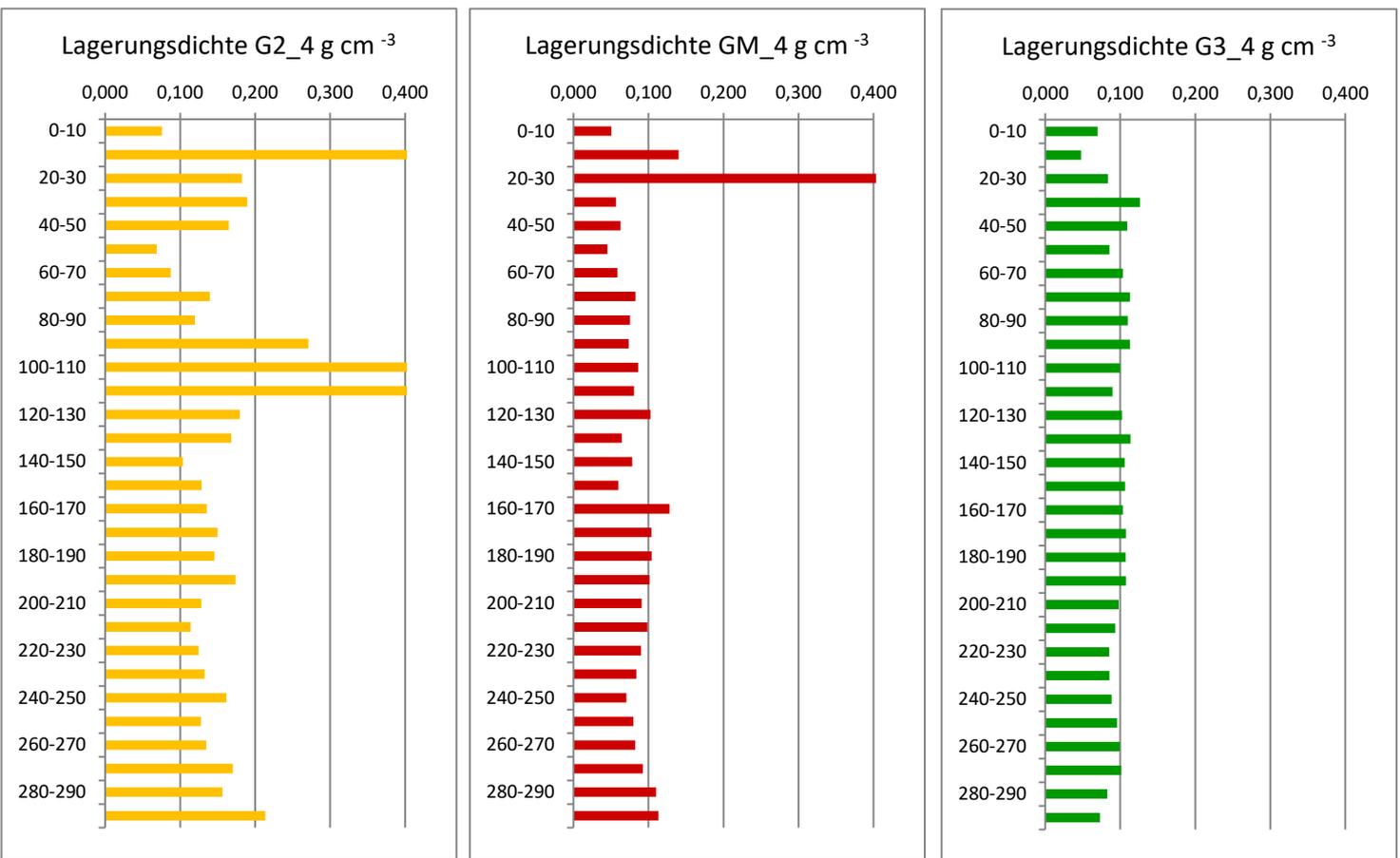


Abbildung 9: Lagerungsdichte der drei 3m-Profile pro Grabenabschnitt (die Ausreisser gehen auf Reste der entfernten mineralischen Einschwemmungen zurück).

Die mineralischen Einschwemmungen sind deutlich ersichtlich, sie wurden zur Berechnung von Mittelwerten eliminiert, um den Wert der Torfdichte nicht zu verfälschen. Ihr Ursprung ist schwer herzuleiten. Wegen der vollständigen Abwesenheit von Steinchen im gesamten Moor vermuten Experten, die Einschwemmungen könnten von Quellwasser stammen, welche unterhalb des südlichen Steilhangs des Tierbergs austreten (Persönliche Kommunikation mit Ph. Grosvernier, Juli 2017). Dies würde auch die jeweils unterschiedliche Lage der Schwemmschicht(en) an verschiedenen Bohrstandorten erklären. Oder aber das Moor war zu verschiedenen Zeiten überflutet und unterschiedliche Vegetationseinheiten sind anschliessend an den verschiedenen Standorten unterschiedlich schnell gewachsen.

Der Torf westlich des Grabens 2 weist die höchste Lagerungsdichte auf mit einem Mittelwert von 0.152 g cm^{-3} (Mischproben 0-50cm) und 0.134 g cm^{-3} (G2_4 50-300 cm; vgl. Abbildung 8). Das Gelände ist gegen Osten geneigt, der Torf wird durch den tiefen Graben 2 entwässert. Westlich ist der Torf durch Graben 1 von dem etwas höher gelegenen Torfkörper getrennt, welcher sich ohne Entwässerungsgräben in relativ stabilem Zustand befindet. Die geringste Dichte weist der Torf zwischen den Gräben 2 und 3 auf, da wo früher der alte Bachlauf verlief (Mittelwert von 0.111 g cm^{-3} (Mischproben 0-50cm) und 0.081 g cm^{-3} (GM_4 50-300 cm). Trotz der Nähe zu den beiden Gräben, scheint hier der Torf weniger verdichtet zu sein als westlich und östlich der beiden Hauptgräben. Im Torfkörper östlich des Grabens 3, welcher durch zwei Seitengräben hin zu Graben 3 entwässert wird, liegt die durchschnittliche Dichte mit Werten von 0.117 g cm^{-3} (Mischproben 0-50cm) und 0.095 g cm^{-3} (G3_4 50-300 cm), nur geringfügig über derjenigen des mittleren Torfkörpers. Beide Flächen sind nur leicht geneigt in nördlicher Richtung, was auch die Fliessrichtung des Durchflusswassers bestimmt.

2.3.2 Kohlenstoffvorrat

In einem ungestörten Hochmoor ist eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff mit zunehmender Tiefe zu erwarten, da sich mit zunehmendem Alter des Torfes dessen Chemismus ändert. Während die Zellulose in jüngerem Torf dominiert, welche zu 44% aus Kohlenstoff besteht ($C_6H_{10}O_5$), findet in Jahrhunderte altem Torf eine relative Ligninanreicherung statt mit deutlich höherem C-Anteil, der sich langsamer zersetzt. Der Kohlenstoffgehalt der gemessenen Proben bestätigt dieses Bild mit Mittelwerten von 43.7% (+/- 3.96) Kohlenstoffanteil im Horizont von 0-50 cm und 48.9% (+/- 4.15) Kohlenstoffanteil in den tieferen Schichten (50-300cm) (siehe Abbildung 10). Der Kohlenstoffvorrat zeigt jedoch ein anderes Bild. Mit $56.43 \text{ kg C m}^{-3}$ (+/- 9.27) in den oberen 50 cm weist der oberflächennahe Torf mehr Kohlenstoff auf als die unteren Schichten mit $53.03 \text{ kg C m}^{-3}$ (+/- 15.96) (siehe Abbildung 11). Nur bei den Messungen westlich des Grabens 2 weisen die unteren Schichten ebenfalls mehr OC auf, als die oberflächennahen. Wie schon bei der Analyse der Lagerungsdichte gilt dies nur, wenn die Mischproben (9 Probestandorte) zu den 3m-Profilen hinzugenommen werden. Werden ausschliesslich die drei Profile betrachtet, zeigt der Kohlenstoffvorrat eine Zunahme mit der Tiefe (Abbildungen 12 und 13).

Im Vergleich der drei beprobten Torfkörper (G2, GM und G3) weist G2 die höchsten Kohlenstoffvorräte auf (jeweils arithmetisches Mittel der drei Mischproben sowie der obersten 50 cm der 3m-Bohrkerne), was aus der höheren Lagerungsdichte hervorgeht (wobei die Ausreisser, welche durch Reste von mineralischen Einschwemmungen zustande kamen, nicht einberechnet wurden). Am geringsten ist der Kohlenstoffvorrat zwischen den zwei Gräben (GM).

G2: $62,35 \text{ OC kg m}^{-3}$

GM: $50,50 \text{ OC kg m}^{-3}$

G3: $56,44 \text{ OC kg m}^{-3}$

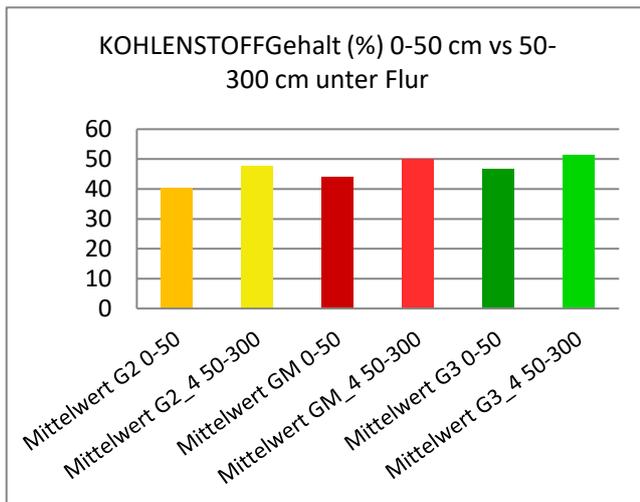


Abbildung 10: Kohlenstoffgehalt (%) der obersten 50 cm unter Flur (12 Messungen) vs. den unteren 50-300 cm unter Flur (3 Messungen).

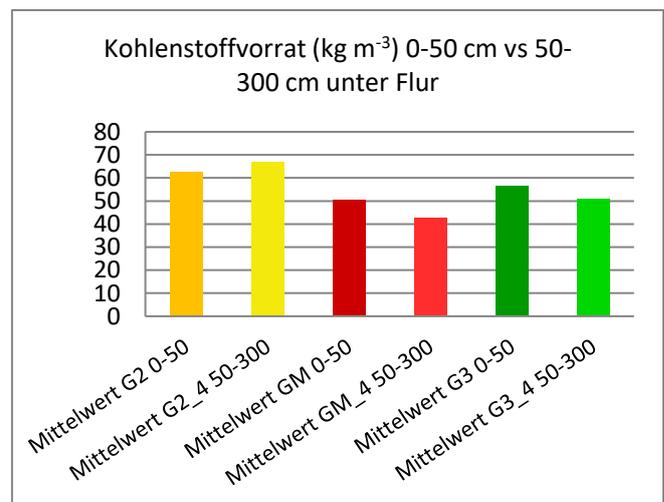


Abbildung 11: Kohlenstoffvorrat (kg m^{-3}) gespeichert in den obersten 50 cm unter Flur (12 Messungen) vs. den unteren 50-300 cm unter Flur (3 Messungen).

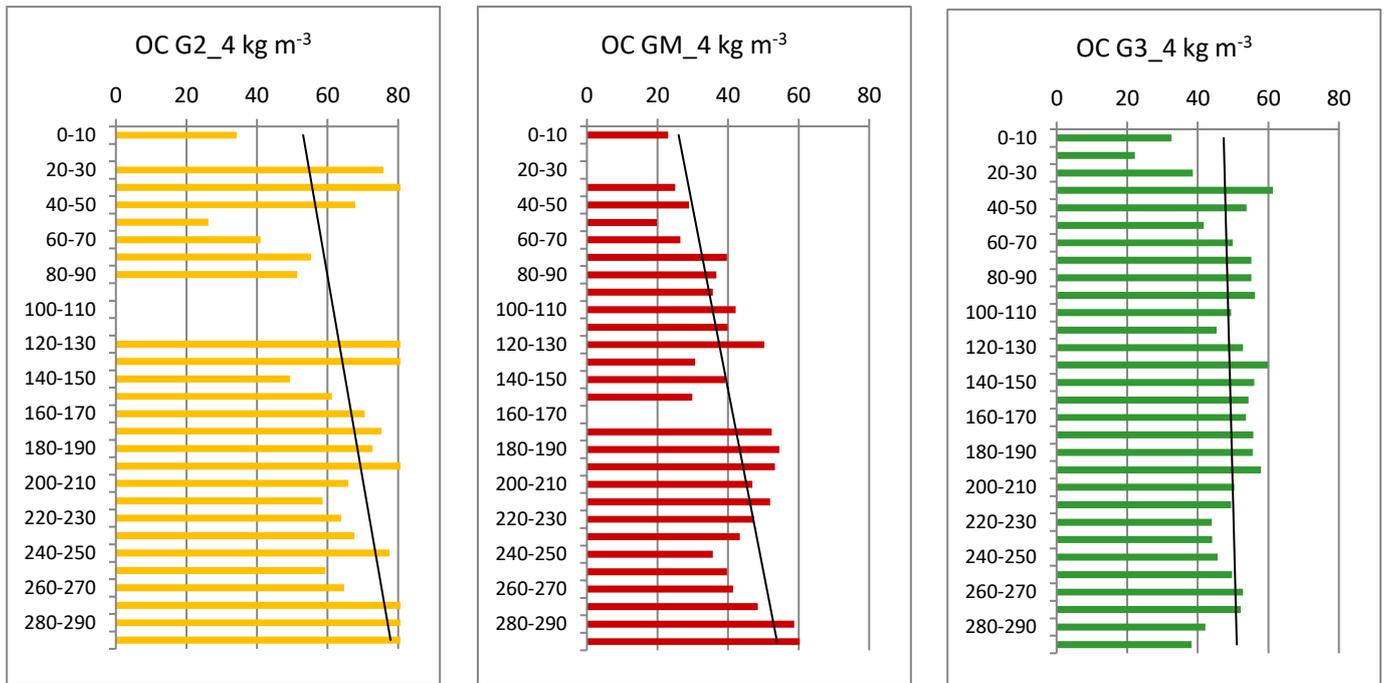


Abbildung 12: Kohlenstoffvorräte in kg m^{-3} der drei 3m-Profile und lineare Trendlinien (mineralische Einschwemmungen wurden nicht berücksichtigt = Auslassungen).

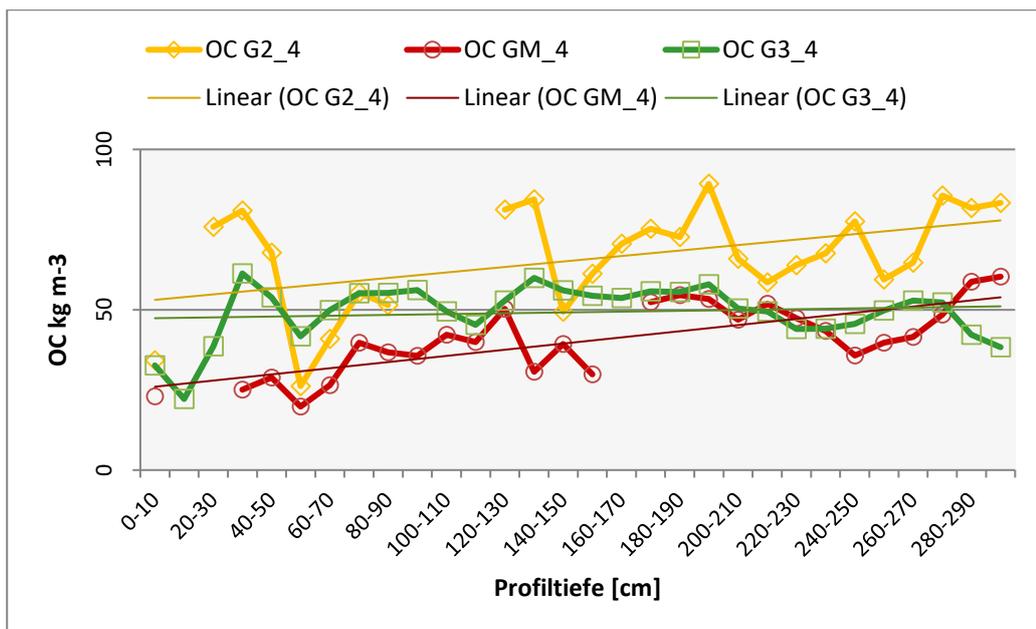


Abbildung 13: Kohlenstoffvorräte der drei 3m-Profile im Vergleich inkl. lineare Trendlinien (mineralische Einschwemmungen wurden nicht berücksichtigt = Auslassungen).

2.4 Diskussion Kohlenstoffgehalt, Kohlenstoffvorrat und Lagerungsdichte

Der Kohlenstoffgehalt ist im Vergleich mit ähnlichen Messungen in anderen Schweizer Hochmooren tendenziell niedrig, es wurden 2009 auf vier verschiedenen Hochmoorstandorten in der Deutschschweiz Werte zwischen 51.5% – 53% gemessen (0-2m unter Flur) (Gubler 2009). Dies liegt möglicherweise daran, dass im Gross Moos der oberflächennahe Torf bereits stark abgebaut ist; diese These könnte die Zunahme der Kohlenstoffvorräte ab ca. 1 m unter Flur untermauern. Die Zunahme unter 1m kann aber auch auf die oben beschriebene natürliche relative Anreicherung von Kohlenstoff in älterem Torf zurückgeführt werden. Eine andere plausible Erklärung liegt darin, dass der Torf bis in eine Tiefe von ca. 1 m kein reiner Hochmoortorf ist, sondern eine flachmoorartige, stark faserige Struktur aufweist (siehe Anhang 3), der

teilweise sogar Schilfknoten enthält. Der Kohlenstoffgehalt von faserigem Flachmoortorf liegt in der Regel niedriger als derjenige von reinem Sphagnum-Torf. Messungen auf einem Flachmoorstandort im Kanton Graubünden mit Kohlenstoff-Werten zwischen 27% und 49% untermauern diese Vermutung (Abderhalden 2020, Gubler 2018).

Ab ungefähr 1 m Tiefe ist in allen drei Profilen des Gross Moos dunkelbrauner Hochmoortorf vorhanden. Dies legt die Vermutung nahe, dass das Gross Moos zeitweise flachmoorartige Charakteristika aufwies, was wiederum die These der Überschwemmungen als Begründung für die lehmigen Einschwemmungen stärken würde. Es ist anzumerken, dass die Kohlenstoffproben jeweils auf Bulten entnommen wurden. Bultorf kann sich markant unterscheiden von Schlenkentorf, da sich die Vegetationszusammensetzungen der beiden Kleinsthabitate beträchtlich unterscheiden und sich über Jahrhunderte an demselben Ort gebildet haben. Auf der Bulte, welche zeitweise durchlüftet ist, können sich andere Pflanzengesellschaften ansiedeln als in der immer wassergesättigten Schlenke. Schilf gehört hingegen weder zur typischen Bulten-, noch Schlenkenvegetation, sondern zur Flachmoorvegetation.

Da sich der Kohlenstoffvorrat in grossem Masse von der Lagerungsdichte ableitet, macht eine gemeinsame Diskussion der beiden Parameter Sinn. Die Lagerungsdichte der oberen 50 cm Torfschicht liegt mit 0.131 g cm^{-3} (± 0.041) höher als diejenige der darunter liegenden älteren Torfschichten von 0.11 g cm^{-3} (± 0.028). Wie schon erwähnt gilt dies jedoch nur, wenn die 12 Transektbohrungen mit den drei 3m-Profilen verglichen wird. Werden nur die Profile verglichen, zeigt sich in 2 der 3 Profilen ein konstanteres Bild. Die zwei Profile GM_4 und G3_4 weisen geringe Dichten auf im oberen Horizont (0.057 g cm^{-3} und 0.087 g cm^{-3}). Nur das Profil G2_4 bestätigt das Gesamtergebnis des tendenziell verdichteten oberflächennahen Horizonts mit 0.153 g cm^{-3} verglichen mit dem darunterliegenden Torfkörper mit 0.139 g cm^{-3} . Das muss damit begründet werden, dass die zwei Profilbohrungen GM_4 und G3_4 an weniger verdichteten Standorten entnommen wurden.

Der leicht geneigte Torf westlich des Grabens 2 (G2) weist durchgehend die höchste Dichte und somit den grössten Kohlenstoffvorrat auf. Dies kann mit der Neigung und somit der starken Entwässerung durch den Graben 2 erklärt werden. Die geringste Lagerungsdichte und somit die niedrigsten Kohlenstoffvorräte weist der Torf zwischen Graben 2 und 3 auf, wo früher der Bach verlief. Es konnte jedoch kein deutlicher Unterschied festgestellt werden zwischen Probeentnahmen aus dem ehemaligen Bachbett (welches noch deutlich ersichtlich ist) und von dessen Rand.

Im Allgemeinen liegt die gemessene Lagerungsdichte, verglichen mit Werten von Lagerungsdichten aus den obersten 50 cm-Horizonte anderer Schweizer Hochmoore (von $0,07\text{-}0,11 \text{ g cm}^{-3}$) (Gubler 2009), tendenziell hoch, was mit der langjährigen Entwässerung und starker Beweidung zu erklären ist. Auf der anderen Seite weisen extensiv genutzte Flachmoore höhere Lagerungsdichten von $0,176 \text{ g cm}^{-3}$ (Abderhalden 2020) und $0,218$ (Gubler 2018) auf.

Das arithmetische Mittel des Kohlenstoffvorrats von $56.43 \text{ kg OC m}^{-3}$ (± 9.27), welches in den oberen 50 cm gemessen wurden, entspricht den Werten von internationalen Studien, welche für die Entwicklung des *max.moor*-Ansatzes gebraucht wurden (Grundlagenpapier, Gubler 2020 verwendeter Mittelwert 56 kg OC m^{-3}). Werden die Messergebnisse mit den vier oben genannten Schweizer Hochmooren verglichen, liegt der Kohlenstoffvorrat im Gross Moos eher hoch – nur ein Hochmoor weist mit $60.46 \text{ kg OC m}^{-3}$ höhere Vorräte auf, die andern drei liegen mit $32.9\text{-}39.2 \text{ kg OC m}^{-3}$ deutlich darunter, was mit der erwähnten geringeren Lagerungsdichte erklärt werden kann (Gubler 2009).

2.5 Methanemission

Ein intaktes Moor emittiert CH_4 , welches bei der Zersetzung von organischem Material unter anaeroben Bedingungen zustande kommt (Turetsky et al., 2014). Auch ein drainiertes Moor kann CH_4 ausstossen,

wenn es stehendes Wasser in den Entwässerungsgräben führt. Und schliesslich weist auch ein wiedervernässtes Moor jährliche Methanemissionen auf. Zudem kommt es häufig direkt nach einer Wiedervernässung zu einem vorübergehenden Anstieg der Methanemissionen (Methanpeak) (Vanselow-Algan et al. 2015). Der Methanpeak wird durch einen Überstau verstärkt, bei welchem überstautes Pflanzenmaterial vergärt wird. Die anfänglich hohen Methanemissionen pendeln sich nach einigen Jahren auf ein konstantes Niveau ein. Wilson et al. (2016) weisen durchschnittliche Methanemissionen von 2.04 t CO₂-eq ha⁻¹ a⁻¹ in drainierten Mooren nach (nährstoffarmes Grassland in der temperierten Zone) und 4.09 t CO₂-eq ha⁻¹ a⁻¹ in wiedervernässten Mooren (Wilson 2016; IPCC 2014). Unter Berücksichtigung eines langfristigen Senke-Effekts von -1.22 t CO₂-eq ha⁻¹ a⁻¹ wird wiedervernässten Mooren ein Global Warming Potential (GWP) von 3.78 t CO₂-eq ha⁻¹ a⁻¹ attestiert.

2.6 Schlussfolgerungen für die *max.moor*-Berechnungen

2.6.1 Kohlenstoffgehalt, Lagerungsdichte und Kohlenstoffvorrat

Das arithmetische Mittel des Kohlenstoffgehalts der oberen 50cm Torfschicht liegt mit 43,7% am unteren Rand vergleichbarer Messwerte internationaler und schweizerischen Studien, was auf den faserigen, flachmoorartigen Torf der oberen Schicht zurückgeführt werden kann. Die vergleichsweise hohe Lagerungsdichte hat zur Folge, dass der Kohlenstoffvorrat hingegen durchaus vergleichbar ist mit ähnlichen Messungen aus Schweizer Hochmooren. Der Wert von 56 kg OC m⁻³, welcher für die Berechnung der CO₂-Einsparungsleistung bei *max.moor*-Projekten angewandt wird, ist somit gerechtfertigt, da es sich bei *max.moor*-Projekten immer um entwässerte, meist um ehemals landwirtschaftliche genutzte Flächen handelt, bei denen von einer starken Verdichtung ausgegangen werden kann. Handelt es sich um Sphagnumtorf, dürfte der Kohlenstoffgehalt zudem tendenziell höher liegen, womit auch Standorte mit geringeren Lagerungsdichten 56 kg OC m⁻³ aufweisen dürften.

Wird am Gross Moos der Kohlenstoffvorrat vergleichshalber mittels des Kohlenstoffgehalts des faserigen Übergangsmoortorfs mit 43,7% sowie den geringen Lagerungsdichten der von Gubler (2009) beprobten naturnäheren Hochmoorstandorte (im Mittel 0,086 g cm⁻³) errechnet, ergibt sich ein markant tieferer Vorrat von 38,1 kg OC m⁻³. Wird der Kohlenstoffvorrat hingegen berechnet mit der durchschnittlichen Dichte zweier extensiv genutzter Flachmoore (im Mittel 0,197 g cm⁻³), ergeben sich entsprechend höhere Werte von 86,1 kg OC m⁻³. Wird das arithmetische Mittel der Kohlenstoffvorräte der einzelnen beprobten Teilgebiete (G2, GM und G3) berechnet und entsprechend ihrer Ausdehnung gewichtet, ergeben sich leicht höhere Werte, da das Teilgebiet G2 mit der höchsten Lagerungsdichte die grösste Fläche aufweist. Hingegen können so die Kohlenstoffvorräte überschätzt werden (siehe Kapitel 4).

Ist ein Standort also naturnah, wenig verdichtet und weist stark faserigen Torf auf, so muss die Berechnung der Einsparungsleistung auf geringeren Kohlenstoffvorräten basieren. In diesen Fällen werden standortspezifische Messungen der Lagerungsdichte empfohlen, so im Falle von Flachmooren. Handelt es sich bei den Standorten um drainierte, verdichtete Flächen (durch ehemalige Beweidung, landwirtschaftliche Nutzung oder Torfabbau), kann die Berechnung der Einsparungsleistung auf den von *max.moor* verwendeten Kohlenstoffvorräte-Mittelwerten erfolgen. Es braucht somit eine Beschreibung und Einschätzung der Torfsituation hinsichtlich der Verdichtung.

Tabelle 1: Sensitivität der Kohlenstoffvorräte in Abhängigkeit unterschiedlicher Lagerungsdichten.

Kohlenstoffvorrat mit Dichte von 0,131 g cm ⁻³ (Gross Moos)	Kohlenstoffvorrat mit Dichte von 0,086 g cm ⁻³ (vier wenig verdichtete CH-Hochmoore)	Kohlenstoffvorrat mit Dichte von 0,197 g cm ⁻³ (zwei extensiv genutzte CH-Flachmoore)
kg OC m ⁻³	kg OC m ⁻³	kg OC m ⁻³
56,4	38,1	86,1

2.6.2 Methanpuffer

Die durch die Wiedervernässungsmassnahmen aufgestauten Gräben (siehe Kapitel 1.2) stellen offene Wasserflächen dar, welche Methan emittieren können (siehe Kapitel 2.5). Bestehen die Grabenwände aus nacktem Torf (da beim Einbau der Spundwände die Vegetationsschicht teils aus den Gräben entfernt wurde), dürfte die Methanbildung geringer ausfallen, da weniger Pflanzenmaterial vergärt wird (siehe Abbildung 48). Auch kann gegebenenfalls der negative Effekt von kleinflächigen Überstausituationen, wie dies im Falle der eingestauten Gräben der Fall ist, durch die grossflächige Reduktion der Emissionen auf den nicht überstauten Bereichen der Fläche überkompensiert werden (Drösler et al. 2012). Da der Methanpeak stark abhängig ist von Überstausituationen, sind verschiedene Massnahmen zur Wiedervernässung unterschiedlich zu beurteilen: Weist das Moor in drainiertem Zustand bereits Gräben mit stehendem Gewässer auf, welche bei einer Wiedervernässung verfüllt werden, dürfte der relative Methanpeak gering ausfallen; Wird das Moor aufgestaut ohne Grabenverfüllung dürfte der Methanpeak deutlich höher sein. Wird dabei pflanzliches Material überstaut (z.B: an den Seitenrändern der Gräben), welches dann vergärt, dürfte dies den Methanpeak zusätzlich erhöhen. Dem Methanpeak wird mit dem Projektpuffer Rechnung getragen (siehe Gubler 2020).

Hingegen wird vorgeschlagen, einen zusätzlichen Methanpuffer für die anhaltenden Methanemissionen auf wiedervernässten Hochmooren von 15% der gesamten Einsparungsleistung einzuberechnen, um das mittlere GWP von $3.78 \text{ t CO}_2\text{-eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ von vernässten Standorte über eine Laufzeit von 50 Jahre zu berücksichtigen.

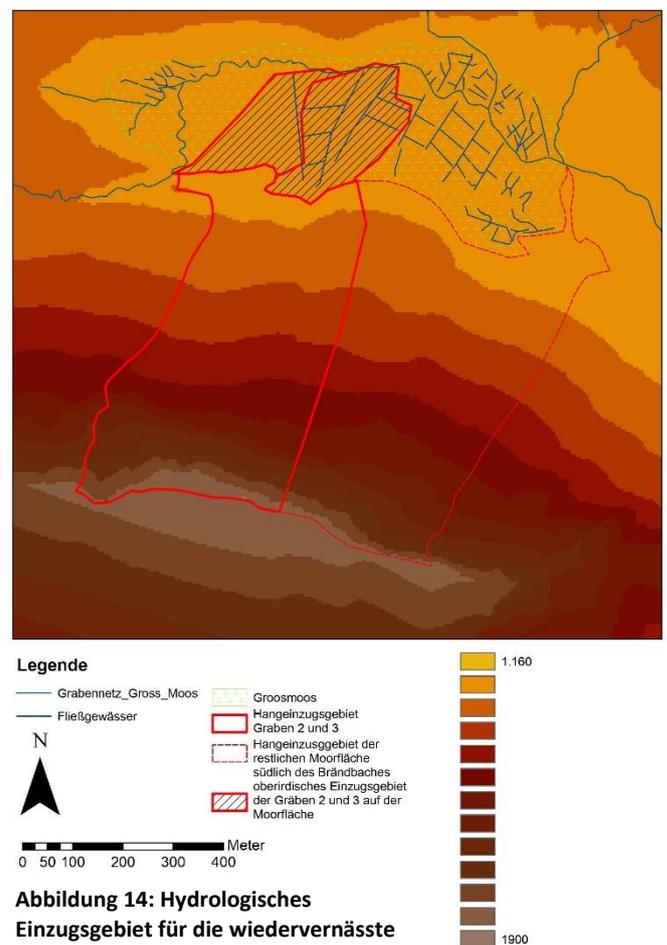
3 Das Gross Moos als Wasserspeicher

3.1 Einleitung

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Hydrologie des Gross Moos sehr heterogen. Das Moor wird von Hangwasser aus dem südlich gelegenen Schuttkegel des Tierbergs durchströmt (siehe Abbildung 14). Im südwestlichen Teil wird dieses Hangwasser von einem Moränenhügel konzentriert und ursprünglich als Bach unter- und oberirdisch durch das Moor geleitet. Im drainierten Zustand floss dieser Bach im Hauptdrainagegraben und bewirkte dadurch stetige Tiefenerosion.

Nördlich des Moors verläuft der Brändbach. Der 2 Meter hohe nördliche Moorrind zum Brändbach hin ist relativ ungestört und weist eine typische Moorrindvegetation auf (persönliche Kommunikation A. Grünig, Juli 2017). Hydrologisch betrachtet bildet der Moorrind eine Art undurchlässiges „Schild“, welches das Ausfliessen des Moores unterbindet (Grosvernier 2017).

Am südlichen Rand liegt zwischen dem mineralischen Schutthang des Tierbergs und dem Moor ein ca. 4 Meter hoher bewaldeter Wall, welcher durchgehend aus Torf besteht und von lehmigen Schichten durchzogen ist. Eine Hypothese



zur Entstehung des Moors ist, dass dieser Torfhügel ursprünglich ein Quellmoor gewesen sein könnte, was auch die unterschiedlich tief liegenden lehmigen Einschwemmungen begründen würde. Die Annahme, es könne sich um ein Quellmoor handeln ist auch daher naheliegend, als dass am Fusse eines Schutthanges wie ihn die nördliche Seite des Tierberges darstellt, Wasserquellen sehr wahrscheinlich sind.

Eine andere Hypothese ist, dass sich der Torfhügel erst nachträglich, unter Druck des Schutthanges aufgewölbt hat und der Ursprung derselbe ist wie derjenige der flachen Moorfläche. Dagegen spricht jedoch, dass zwischen dem Torfhügel und dem Schutt bzw. dem mineralischen Berghang ein Graben verläuft. Direktes Einwirken der Schutthalde auf die Moortopologie ist daher nicht ersichtlich.

Weiter ist zu erwähnen, dass das ganze Moor von lehmigen Einschwemmungen durchzogen ist, die in unterschiedlicher Tiefe anzutreffen sind. Es wird davon ausgegangen, dass keine zusammenhängenden Stauschichten vorhanden sind, welche die Pegelmessungen durch oberflächennahes stehendes Wasser und tiefere trockene Bereiche verfälschen könnten. Ob diese Einschwemmungen ebenfalls von dem ursprünglichen Quellmoor oder von überstauten Perioden herrühren, ist unklar. Sicher handelt es sich dabei nicht um Überflutungen von Hangwasser, da im ganzen Moor keinerlei Steine zu finden sind.

Die Transmissivität (Durchfluss pro Zeiteinheit) ist im ganzen Untersuchungsgebiet relativ hoch, was eine hohe Waldfähigkeit nahelegt (siehe Abbildung 15).

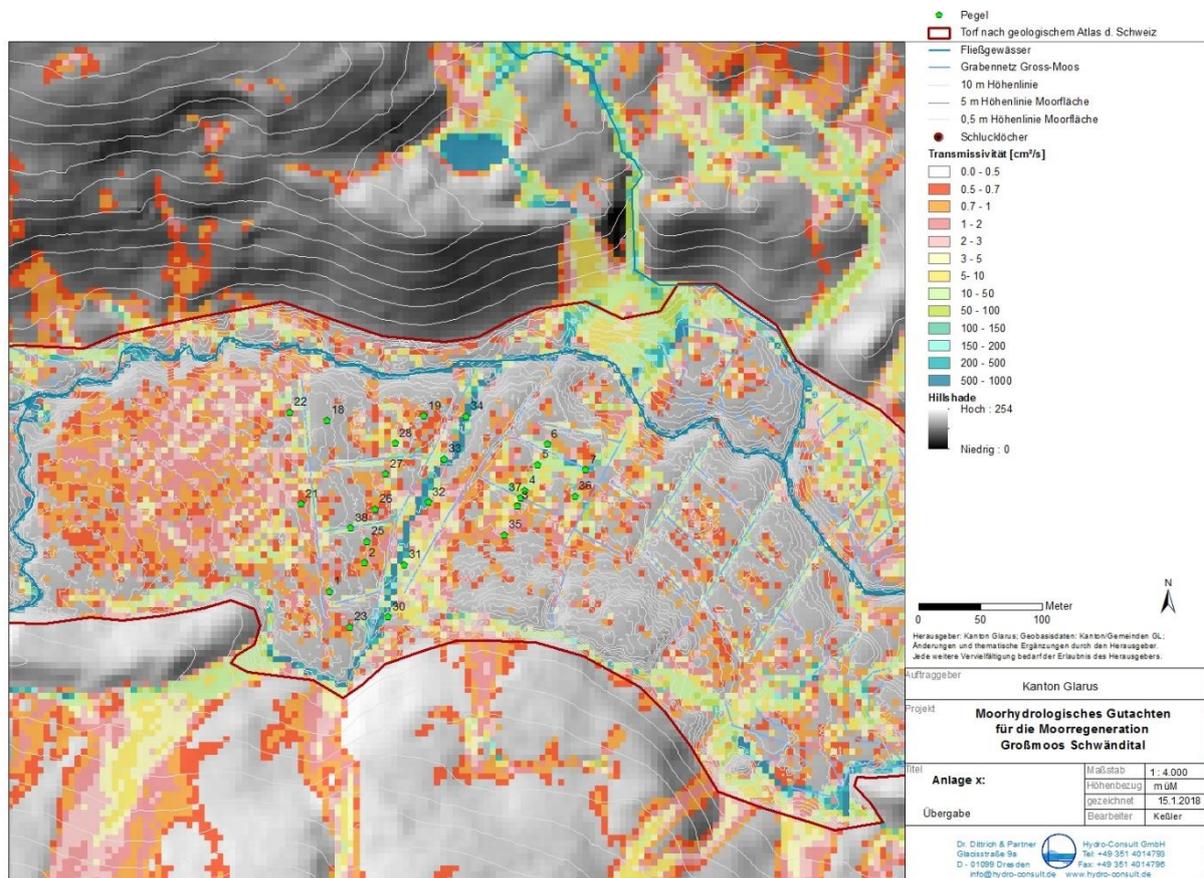


Abbildung 15: Transmissivität (cm² s) im Gross Moos: die grauen Flächen sind waldfähig (Hydro Consult 2018).

Der westliche Teil des Moores wurde nicht drainiert und wölbt sich hochmoortypisch leicht über die Umgebungstopografie. Die Fläche zwischen Graben 1 und 2 ist gegen Osten geneigt und von Saugergräben des Grabens 2 durchzogen und entsprechend stark entwässert. Zwischen Graben 2 und 3 verlief das ursprüngliche Bachbett. Die Fläche ist gebietsweise von Rottannen bewaldet. Die Neigung ist geringer und verläuft nur in nördlicher Richtung. Die Fläche zwischen Graben 3 und (gefülltem) Graben 4 ist flach und

wird von Saugergräben des Grabens 3 entwässert. In den Seitengräben befindet sich zeitweise stehendes Wasser.

3.2 Methode

3.2.1 Wasserstandmessung

Zur Messung des Wasserstandes wurden 25 Pegelrohre in 1.5 Meter Tiefe in den Torfboden eingelassen. Da die Standardpegelrohre von Eijkelkamp nicht mehr geliefert werden, musste auf normale PVC-Rohre ausgewichen werden. Diese 2 Meter langen Rohre wurden mit einem 3er Bohrer im Abstand von 5 cm im unteren Meter perforiert jeweils auf 4 Seiten des Rohrs in versetztem Abstand (Abbildung 16).



Abbildung 16: Perforieren der PVC-Vollrohre



Abbildung 17: Befestigen der Rohrkappen

Um die Verschlammung der Rohre zu verhindern, wurden die Rohre vor Einlass in den Torf mit einem Filterstrumpf umwickelt, welcher mit einem Isolierklebeband am Rohr befestigt wurde. Am unteren Ende wurde die Rohrkappe ebenfalls mit Isolierklebeband befestigt um sicher zu stellen, dass diese beim Entfernen des Rohrs aus dem Torf nicht zurückbleibt (Abbildung 17).

Zur Rohrinstallation wurde zuerst mittels eines Stichels ein Loch vorgebohrt. Nach dem Einmessen der Koordinaten wurde dann das Pegelrohr eingelassen mit Hilfe eines Schlegels (Abbildung 18).



Abbildung 18: Vorlochen, Einmessen und Einlassen der Pegelrohre

Es wurden drei Transekte parallel zu den Gräben 2 und 3 gelegt, je östlich von Graben 3, in der Mitte, wo sich der alte Bachlauf befindet und westlich von Graben 2. Zudem wurden zwei Pegel westlich des Grabens 1 installiert, um allfällige Pegelanstiege, die durch die Einstauung des Grabens 1 auftreten, zu registrieren. Weiter wird die östliche Ausdehnung mit Pegel 36 erfasst, welcher auf der Grenze zum Einflussgebiet des bereits aufgestauten Grabens 4 liegt. Pegel 7, 24 und 37 wurden in den Seitengräben installiert, um den Wasserstand dieser Saugergräben zu erfassen (Pegel 7 mittels Sonde auch im Winter). Wo möglich, wurden

die Pegel in Schlenken installiert, welche natürlicherweise wassergesättigt sein sollten. In Bulten findet eine natürliche Wasserschwankung von 10-20 cm statt. Im Transekt westlich des Grabens 2 fehlt die typische Bulten-Schlenken-Landschaft. Die Pegel des Transekts zwischen den Gräben 2 und 3 wurden teilweise im ehemaligen Bachverlauf teilweise an dessen Rand installiert (siehe Abbildung 19).

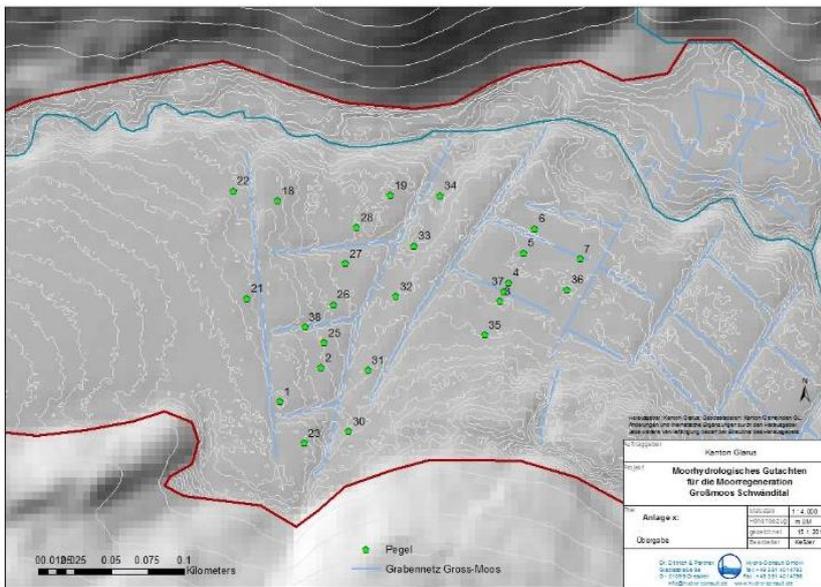


Abbildung 19: 25 Pegelstandorte (Pegel 38 = 24)

Die Pegelrohre 2, 4, 22, 34 wurden am 7. August 2018 mit Sonden (Datensammler Typ 575-II) versehen. Die Pegelrohre 1, 3, 5, 6, 7, 18, 19 und 36 wurden am 24. September 2018 vom Kanton Glarus mit weiteren 8 Sonden versehen (welche hier in der Auswertung ebenfalls berücksichtigt werden). Da die Kabel der ersten vier Sonden ca. 4 cm zu lang waren, wurde mittels Kabelbinder eine Schlaufe angefertigt. Die resultierende Kabellänge wurde notiert. Abschliessend wurde die Sonde auf die Rohroberkante kalibriert (Abbildung 20). Die Spezialverschlusskappe verhindert das Entfernen der Sonden durch Dritte. Am 26. November 2018 wurden die Sonden auf Meereshöhe umkalibriert. Die genaue Höhe wurde von der Geometerfirma GEO DATA Glarus AG eingemessen. Während von August bis November 2018 also die relative Wasserstandhöhe gemessen wurde, wurde ab dem 26. November 2018 die absolute Wasserstandhöhe gemessen. Die tägliche Messung wurde auf 7:00 Uhr morgens terminiert um den Einfluss der Evapotranspiration gering zu halten. Nebst der Wasserstandsmessung wurde jeweils die Wassertemperatur in Sondentiefe (1,5 m unter Flur) gemessen.



Abbildung 20: Einlassen der Sonde und deren Kalibrierung

Das manuelle Ablesen erfolgte anfänglich mittels eines kleineren Röhrchens, welches bei anhaltendem Reinblasen in das Pegelrohr eingefügt wurde (Abbildung 21). Sobald Luftblasen hörbar waren, war die Wasseroberfläche erreicht und der Pegelstand konnte abgelesen werden. Ab Oktober 2018 wurde die

Röhrchenmethode durch ein Lichtlot ersetzt. Der gemessene Methodenfehler zwischen Lichtlot und Röhrchen liegt unter 0.5 cm.



Abbildung 21: Manuelles Ablesen des Wasserstandes und Datentransfer

Die Standorte der Pegel und deren Beschaffenheit ist zentral für die Interpretation der Messwerte. Vor allem, ob sie sich in einer Schlenke oder auf einer Bulle befinden. Die Standorte sind in Tabelle 2 beschrieben. Oft waren in dem degradierten Gelände die Schlenken-Buldenformen nicht mehr klar ausgebildet. Das Gelände v.a. im geneigten Gebiet zwischen Graben 1 und 2 war geprägt von trockenen Höckern und teils noch ersichtlichen Trittschäden und Flachmoorvegetation. Diese Umgebung wird mit «bultig» umschrieben, da es sich nicht um eigentlich Bulden handelt, sondern vielmehr um eine durch Degradation entstandene höckrige Oberfläche.

Die Rohre sanken über die Zeit im Torf ein: zum Einen drückte die teils meterhohe Schneedecke im Winter die Pegelrohre tiefer in den Torf ein (jene Pegelrohre, welche in weichem Schlenkenuntergrund angebracht worden sind, waren denn auch stärker von dem Einsinken betroffen), zum Andern ist es möglich, dass der erhöhte Wasserstand nach den Wiedervernässungsmassnahmen im Oktober 2019 den ausgetrockneten Torf hat quellen lassen, die Rohre durch eingedrungenes Material in die Löcher im unteren Viertel im Torf «verankert» sind und sie somit dieser neuen Mooratmung nicht folgten.

Um die Pegelmessung relativ zur Terrainoberfläche zu messen, müssen die Rohrlängen deshalb jährlich mit dem entsprechenden Korrekturfaktor korrigiert werden. Ob die Pegelstände relativ zur absoluten Höhe über Meer konstant bleiben, kommt auf den schwer messbaren Quelleffekt nach der Wiedervernässung an.

Die Pegelrohre waren bei Abschluss dieses Berichts noch im Gelände installiert – die automatischen Pegelmessungen (Sonden) werden vom Kanton Glarus zur Erfolgskontrolle weitergeführt.

Tabelle 2: Standortbeschreibung der Pegelrohre inkl. Rohrlänge ab Terrain.

Pegelnummer	Standortbeschaffenheit	Rohrhöhe über Terrain 2018	Rohrhöhe über Terrain 2019	Rohrhöhe über Terrain 2020
1	Bultig, trocken, Trittschäden	50	50	48
2	Bultig, trocken, Trittschäden	50	48	43
3	In Schlenke	50	43	42
4	In Schlenke	50	37	35
5	In Schlenke	50	34	33
6	In Schlenke	50	40	32
7	In Seitengraben 3b	50	20	Unter Wasser, nicht mehr zugänglich
18	Auf Bulle	50	49	46
19	Auf Bulle	50	49	47
21	In Schlenke	41	40	41

22	Auf Bulte	50	50	48
23	Bultig, trocken	45	45	44
24	In Seitengraben 2b	39	39	Wurde im Zuge der Einstauung entfernt
25	Bultig	40	40	40
26	Auf Bulte	43	42	41
27	In Schlenke	41	39	40
28	In Schlenke	41	38	32
30	Auf Rand des alten Bachlaufs	43	43	Wurde im Zuge der Einstauung entfernt
31	Auf Rand des alten Bachlaufs	43	42	36
32	Auf Rand des alten Bachlaufs	50	50	47
33	Im alten Bachlauf	40	39	Im Bachbett: nur teilweise zugänglich
34	Im alten Bachlauf	50	50	45
35	In Schlenke	39	39	36
36	Am Schlenkenrand	50	50	48
37	in Graben 3a	40	40	Unter Wasser, nicht mehr zugänglich

3.2.2 Berechnung der potentiellen Evapotranspiration nach Haude

Der Wasserhaushalt eines Gebiets berechnet sich aus Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und der Änderung des Wasserspeichers.

$$P = ETp + R + \Delta S$$

P = Niederschlag („precipitation“)

ETp = potentielle Verdunstung („evapotranspiration“)

R = Abfluss („runoff“)

ΔS = Änderung des Wasserspeichers („storage change“)

Die Wetterdaten der Wetterstation Obersee (995 m.ü.M.) südlich des Tierbergs wurde für die Zeitperiode August 2018 bis Oktober 2020 von der Meteogroup Schweiz zur Verfügung gestellt. Um eine vollständige Wasserbilanz zu berechnen, fehlen Daten zum Abfluss aus dem Moor vor und nach der Wiedervernässung. Wird davon ausgegangen, dass nach der Wiedervernässung der Abfluss des Niederschlags grösstenteils unterbunden werden konnte – mit Ausnahme des natürlichen Ausflusses des durchströmenden Baches - kann mittels der Evapotranspiration eine stark vereinfachte Wasserbilanz berechnet werden. Die Evapotranspiration wurde nach Haude (1955) mittels mittlerem Sättigungsdampfdruck, mittlerer Tagestemperatur und dem empirischen Haude Faktor berechnet (ETH 2018).

$$ETp = f * (e_s(T) - e)$$

Wobei:

ETp: mittlere potentielle Evapotranspiration (mm/hPa)

F: Haude Faktor für einzelne Monate und Vegetation (mm/hPa) (siehe Anhang 2)

($e_s - e$): Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf in hPa

$$(e_s - e) = e_s(T) * \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

Wobei:

T: aktuelle Temperatur

$e_s(T)$: Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T

RH: relative Luftfeuchte

Die auf diese Weise berechnete potentielle Evapotranspiration sollte unter folgenden Vorbehalten in die Interpretation der Ergebnisse einfließen: (i) sowohl die Luftfeuchte als auch die Tagestemperatur stammen von der Klimastation Obersee und wurden nicht direkt vor Ort gemessen, (ii) der empirische Haude Faktor liefert gute Ergebnisse für mitteleuropäische Standorte, entspricht aber nicht den klimatischen und vegetativen Bedingungen in den Schweizer Alpen auf 1200 m.ü.M. Zudem wird (iii) die ETp bei hoher Luftfeuchte tendenziell unterschätzt¹.

3.2.3 Radarinterferometrie zur Messung der Quellwirkung

Das Acrotelm, also die lebende oder jüngst abgestorbene Sphagnumschicht, weist eine sehr viel höhere hydraulische Leitfähigkeit auf als das stärker verdichtete Katotelm. Dadurch wirkt das Acrotelm wie ein Schutzschild für den darunterliegenden Torfkörper: bei Starkniederschlag wird das übermäßige Ansteigen des Wasserspiegels verhindert, indem das überschüssige Wasser mittels höherer Leitfähigkeit im Acrotelm seitlich abgeleitet wird, so dass der Oberflächenabfluss derart verlangsamt wird, dass keine Erosion stattfindet. Bei Trockenheit hingegen verhindern die dichteren unteren Schichten einen seitlichen Abfluss: die Kapillaren zur poröseren Acrotelmschicht reißen ab, sodass eine allzu starke Evapotranspiration unterbunden wird. Dieser Effekt kann durch eine in die Tiefe gehende Durchwurzelung einer nicht hochmoortypischen Vegetation gestört werden (Grünig und Steiner 1995).

Diese Reaktion des Acrotelms auf Niederschlag und Trockenheit geht mit einer Quellwirkung einher, welche als Mooratmung bezeichnet wird. Wird Torf entwässert, findet durch das reduzierte Porenvolumen eine Sackung statt. Die hydraulische Leitfähigkeit wird reduziert. Der komprimierte Torf der oberen Schichten drückt auf die unteren Schichten, was das Katotelm zusätzlich verdichtet. Wird ein Moor wiedervernässt, steigt das Porenvolumen langsam wieder. Zuerst füllen sich durch eine Wiedervernässung die bestehenden Spalten des ausgetrockneten Torfs. Wie lange es dauert, bis sich ein naturnahes Porenvolumen einstellt, ist nicht klar und kommt auf die Degradation und Beschaffenheit des Torfs an.

Im Fall des Gross Moos ist zu erwarten, dass die Quellwirkung direkt nach der Wiedervernässung einsetzt: das Moor hat zwar eine lange Entwässerungsgeschichte, wurde aber nicht zum Torfabbau genutzt, was bedeutet, dass die einzelnen Torfkörper zwischen den Gräben zwar verdichtet, nicht aber zerschnitten sind. Durch das Einstauen der Gräben konnte somit der Wasserpegel über die ganze Fläche angehoben werden. Hinzu kommen die günstigen klimatischen Bedingungen des Schwänditals mit einem vergleichsweise hohen mittleren Jahresniederschlag. Ob die Quellwirkung des Moores bereits ein Jahr nach der Wiedervernässung ersichtlich ist, soll mittels Radarinterferometrie ermittelt werden. Dazu werden Satellitendaten (Sentine1) verwendet und das Moorgebiet während der Periode August 2018 mit der entsprechenden Periode im Jahr 2020 verglichen.

Aus der Phasenverschiebung zwischen zwei oder mehr Radardatensätzen können bereits kleine Oberflächenveränderungen im Zentimeterbereich festgestellt werden. Dabei wird die Differenz der Phasen von den durch den Radarsensor empfangenen Wellen vor und nach der Oberflächenveränderung gemessen.

¹ https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/063226/index.php.de
abgerufen am 1.12.2020

Die Untersuchungsfrage lautet demzufolge:

Ist die Ausdehnung des Torfkörpers durch die Quellwirkung des Porenvolumens nach einer Wiedervernässung eines Moores mittels Radarinterferometrie feststellbar?

3.2.3.1 Methode Radarinterferometrie

Bearbeitung des Kapitels durch Marius Rüeschi, Technischer Mitarbeiter, Landschaftsdynamik und Fernerkundung, WSL

Um dieser Frage anhand des Beispiels Gross Moos, GL nachzugehen, wurden die Sentinel-1 (ESA-Mission mit C-band-Sensor an Bord) Radardaten der Jahre 2020 mit jenen aus dem Jahr 2018 und 2019 verglichen. Als Vergleichsperiode wurde der Monat Juli gewählt, da dieser in allen Jahren der niederschlagärmste war und grosse Niederschlagsereignisse mit verfälschender Wirkung ausgeschlossen werden konnten (mit maximalen Tagesniederschlagssummen von einmaligen 40 mm (im Jahr 2020; Meteo-Station Obersee).

Um dem möglichen Radarschatten des Tierbergs, der südlich des Moores gelegen ist, auszuweichen wurde die absteigende Umlaufbahn (*Descending* DES) des Satelliten verwendet, welche mit 5° Abweichung zur Nord-Süd-Richtung verläuft. Da das Schwändital gegen Südosten hin öffnet, versprechen die Aufnahmen aus dieser Geometrie das Tal gut abzudecken. Die räumliche Auflösung der Radardaten entspricht 20 m.

Voraussetzung für einen zeitlichen Vergleich der Fläche ist eine grosse Ähnlichkeit der Aufnahmen bezüglich Oberflächenstruktur, was durch die Kohärenz (Band 3) geschätzt wird. Veränderungen, z.B. bedingt durch Vegetationswachstum aber auch Vegetationsbewegung durch Wind können die Kohärenz beeinträchtigen. Bei einer gegebenen hohen Kohärenz wird eine Veränderung der Erdoberfläche anhand der Phasendifferenz (Band 2) ersichtlich.

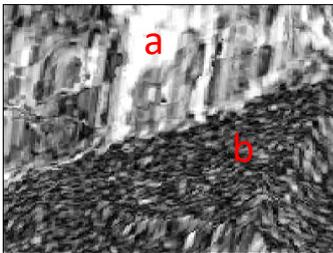


Abbildung 22: a) Hohe Kohärenz der Aufnahmen bei felsigem Untergrund (höchste Kohärenz =1: weiss), b) keine Kohärenz (kein Signal) bei wachsender Vegetation (keine Kohärenz=0: schwarz).

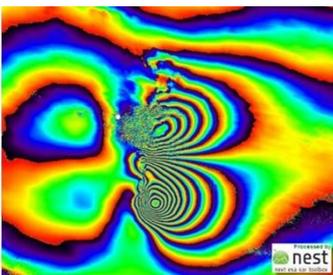


Abbildung 23: Oberflächenveränderung (Band 2) beobachtet mit dem ESA ENVISAT ASAR C-Band Radar aufgrund eines Erdbebens (26.12.2003 in Bam, Iran¹): jeweils ein Farbverlauf entspricht einer Phasendifferenz der halben Wellenlänge (0-360° resp. -π bis π entsprechen insgesamt 2.8 cm im Falle eines C-Band-Sensors).

3.2.3.2 Resultat und Diskussion

Die Ähnlichkeit der Oberfläche in den beiden Vergleichszeiträumen (Juli 2020 vs. Juli 2018 und vs. Juli 2019) ist nicht genügend hoch für die Fläche des Moores resultierend in tiefer Kohärenz (siehe Abbildung 24). Ohne hohe Kohärenz-Werte (> 0.6) ist es nicht möglich, eine Oberflächenverschiebung zuverlässig zu messen.

Mögliche Gründe für die fehlende Kohärenz sind (i) die unterschiedliche Vegetation (andere Vegetationshöhe, entfernte Bäume), (ii) die Terrainveränderungen, die im Zuge der Grabeneinstauung unternommen wurden (Errichtung von Spundwänden und Torfwällen), (iii) die geringe Grösse der untersuchten Fläche von ca. 3,5 ha sowie die lange Zeitspanne zwischen den Vergleichszeiträumen.

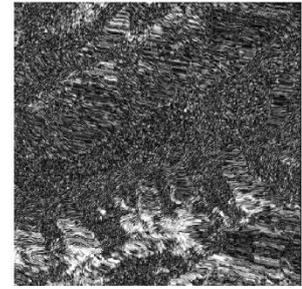


Abbildung 24: Kein Kohärenzsignal (Band 3) im Schwändital Vergleichsperiode Juli in den Jahren 2019 und 2020 (Tierberg südlich zu erkennen mit hoher Kohärenz)

Ein weiterer Versuch zur Anwendung der Interferometrie wurde deshalb im Pürgschachermoor (AT) (Abbildung 25) für den Zeitraum der Wiedervernässung (Abbildung 26) unternommen. Dies ist erstens grösser als die wiedervernässte Fläche im Gross Moos, zweitens wurde als zeitliche Differenz max. eine Woche gewählt, um höhere Kohärenzwerte zu erhalten. Die Interferogramme (Abbildungen 27-30) zeigen die Oberflächenbewegung im Zentimeterbereich (Spannbreite von einer halben Wellenlänge ($\pi/2$): blau sind positive (max. +0.7 cm), gelb neutrale und rot negative Werte (max. -0.7 cm)). Zur Überprüfung wurde die Differenz im Interferogramm zwischen den beiden Geometrien (descending MINUS ascending) gerechnet und zwar für beide Zeitfenster (t1) beim Übergang von August zu September (descending: 29.08. - 04.09., ascending: 31.08. - 06.09.) und für das Zeitfenster (t2) im September (descending: 04.09. - 10.09., ascending: 06.09. - 12.09.). Das Resultat zeigt eine konstante Differenz über dem Moor. Dies ist ein Hinweis, dass in beiden Geometrien die gleiche Bewegung mit dem Radar gemessen wird. Um welche Bewegung es sich dabei handelt ist nicht abschliessend klar. Die Vermutung liegt nahe, dass dies eine Ausdehnung der Oberfläche abbildet, auch könnte aber die Bewegung des Wassertandes unter der Oberfläche das Signal beeinflussen. Um die Vermutung zu bestätigen, wären wiederholte geometrische Höhenmessungen vor und nach der Wiedervernässung nötig.



Abbildung 25: Pürgschachermoor inkl. Wasserstandspegel

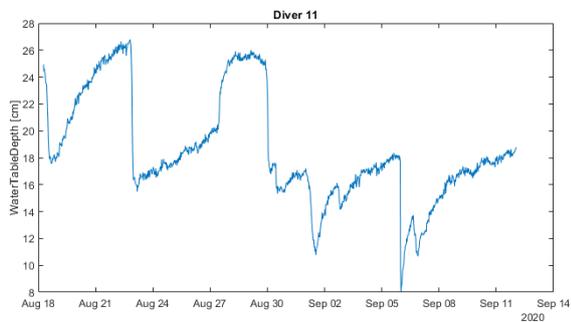
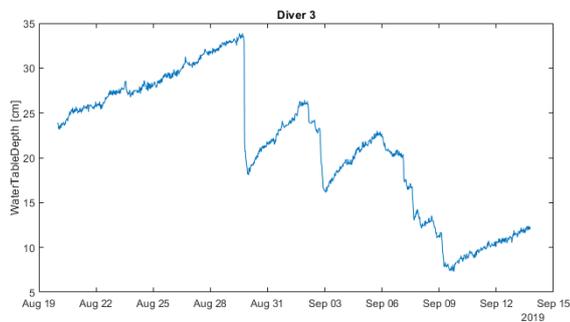


Abbildung 26: Pegel 3 und 11 während der Wiedervernässung

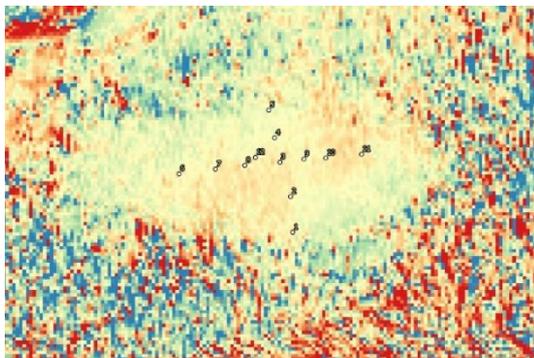


Abbildung 27: Ascending-1 31.08-06.09

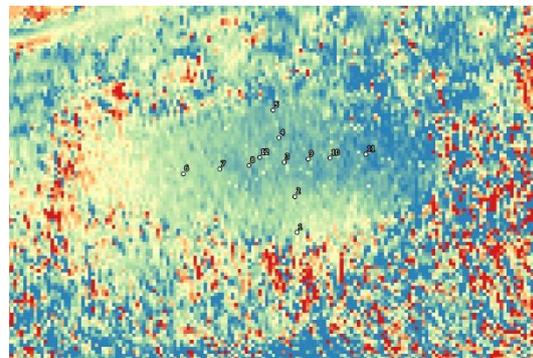


Abbildung 28: Ascending-2 06.09-12.09

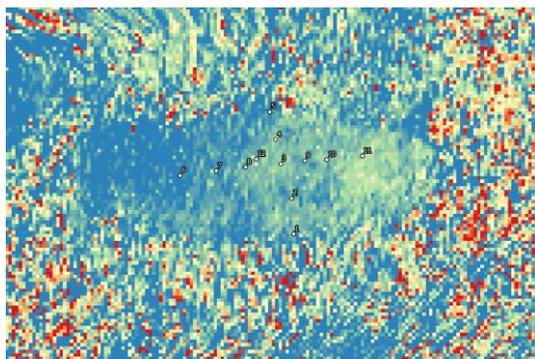


Abbildung 29: Descending-1 29.08-04.09

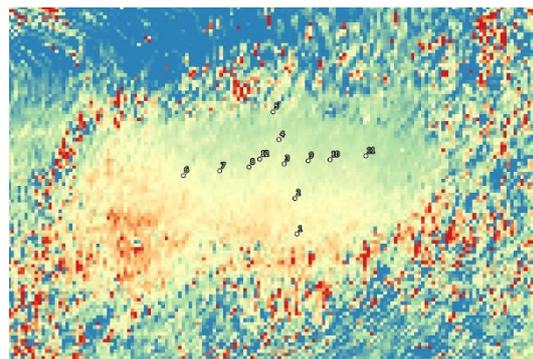


Abbildung 30: Descending-2 04.09-10.09

Exkurs: Projekt Fernerkundung-Klimamodellierung (KliMoBay):

Im Rahmen des Projektes KliMoBay werden an der Ludwig-Maximilian Universität in München ähnliche Methoden getestet. Mittels Interferometrie werden verschiedene Ansätze verfolgt: Für naturnahe Standorte wurde mit Persistent Scatterer Interferometrie (StaMPS) prozessiert, was über kurze Zeiträume gute Resultate lieferte, bei längeren Zeiträumen fehlte die Kohärenz hingegen ebenfalls. Die zeitlichen Verläufe wurden mit einem Datensatz des DLR prozessierten Datensatz verglichen (eine Kombination aus PSI und distributed scatterers (DS)), wo dank der DS eine bessere Abdeckung auch über längere Zeiträume generiert werden kann. Dabei werden Wasserstand- und Oberflächenbewegung für naturnahe Moore den PS- und PS/DS-Daten gegenübergestellt. Dabei gibt es Übereinstimmungen, aber teils auch Abweichungen. Für Moorböden unter Wald oder landwirtschaftlicher Nutzung wird gerade eine dritte Methode (SBAS) getestet (persönliche Mitteilung v. Huber Garcia, Mai 2021).

Publikationen dazu erscheinen in naher Zukunft. <https://www.klimobay.de/fernerkundung-klimamodellierung>

3.3 Schwierigkeiten und Unsicherheiten der Wasserstandmessungen

3.3.1 Wasserstand in heterogenem Torfkörper

Wasserstandmessungen in einem Torfkörper können Hinweise liefern auf das Verhalten des Wasserspiegels, sind aber mit einigen Schwierigkeiten und Unsicherheiten behaftet. Gerade bei einem heterogenen, verdichteten Torfkörper, wie er im Gross Moos anzutreffen ist, und wo sich der Wasserstand innerhalb kleinräumiger Distanzen stark unterscheiden kann, ist es heikel, von Punktmessungen auf die gesamte Fläche zu schliessen. In homogenem Torf wölbt sich der Wasserstand zwischen den Entwässerungsgräben, sodass in der Mitte zwischen den Gräben der Wasserstand am höchsten liegt. Die Höhendifferenz zwischen Entwässerungstiefe der Gräben und höchstem Wasserstand zwischen den Gräben ist massgebend von der Torfbeschaffenheit abhängig. Die lehmigen Einschwemmungen, welche in vielen Teilen des Gross Moos anzutreffen sind, können diese Wölbung hingegen stören, den Wasserstand in Teilgebieten tiefer halten oder gar tiefere Torfschichten von oberflächennahem Wasser (Niederschlag oder Einstau) abschirmen. Da die Einschwemmungen in unterschiedlichen Tiefen gemessen wurden, wird nicht von durchgängigen Schichten ausgegangen und ein grossflächiger Schicht-Effekt, welcher tiefere Torfschichten hydrologisch gänzlich von oberen trennt, wird somit ausgeschlossen. Lokale Störeffekte sind aber nicht auszuschliessen.

3.3.2 Wasserstand abhängig von Pegelstandort

Wie bereits erwähnt, beeinflusst der Pegelstandort die gemessene Wasserstandtiefe. Während eine Schlenke nach einem Niederschlagsereignis rasch wassergesättigt ist und der Wasserstand somit über der Terrainoberfläche steht, ist ein Bultstandort selten bis zur Oberfläche wassergesättigt (vergleiche Abbildung 31). Ein Wasserstand oberhalb der Oberfläche in einer Schlenke bedeutet demzufolge genau so wenig einen Überstau, wie ein Wasserstand bei einem Bultstandort, der 10 cm unter Terrainoberfläche liegt, einen Drainageeffekt bedeuten muss. Die genaue Bestimmung der Terrainoberfläche ist eine weitere Unschärfe, welche die Messergebnisse beeinflussen kann. Wo die lebende Moosschicht in Torf übergeht, ist oft nicht trennscharf auszumachen und lässt einen Spielraum von +/- 2 bis 3 cm.



Abbildung 31: Schlenken-Bulten Strukturen im wiedervernässten Moor im Mai 2020

3.3.3 Anpassung der Kontrollwerte der Datenlogger

Der Kontrollwert einiger Datenlogger musste nach erstmaliger Kalibrierung nachträglich angepasst werden, da der Kontrollwert zu stark von der manuellen Überprüfung abwich. Folgende Kontrollwerte wurden angepasst (in cm):

Tabelle 3: Anpassung der Kontrollwerte

Pegel	24.10.2018	26.11.2018	20.8.2019	20.10.2020
1	+8,10			
2	+7,28			
18		+7,65		
19		+8,14		

22			+12,09	
34				+11,00

Betrug die Anpassung des Kontrollwertes >10 cm wurde die Messreihe der Vormonate jeweils 2 cm pro Monate angepasst. Diese Korrekturen betreffen Pegel 22 und 34. Da nicht festgestellt werden konnte, wann sich der Messfehler einstellte, erschien dies als pragmatische Lösung.

3.4 Resultate der Wasserstandmessungen

3.4.1 Messlinien Pegelmessungen 2018-2020

Bei der Betrachtung der Pegelganglinien fällt die starke Sensitivität jener Pegel auf Niederschlagsereignisse auf, welche in Schlenken oder im (ehemaligen) Bachlauf standen (siehe Anhang 1, Abbildung 62). Pegel 37 ist im Seitengraben (Sauger des Grabens 3) platziert und reagiert sehr stark auf Niederschlagsereignisse. Schliesslich befand sich dieser Pegel ab Mitte April 2019 wohl mehrheitlich unter Wasser; es ist davon auszugehen, dass dadurch ein Messfehler entstand. Der Wasserstand im Graben dürfte ebenso auf Niederschläge reagieren, wie die umliegenden Schlenken. Am 20.10.2019 konnte der Pegel 37 ein letztes Mal ausgelesen werden, danach wurde er wegen gestiegenem Pegel unzugänglich.

Weiter fallen vor allem Pegel 22, 18, 19 und 1 auf, welche im Gegensatz zu den anderen Messungen sehr schwach auf die Niederschlagsereignisse reagieren. Diese Pegel befinden sich im Teilgebiet westlich des Graben 1 (Pegel 22) und im geneigten, stark verdichteten Teilgebiet zwischen Graben 1 und 2 (Pegel 1, 18 und 19). Die Messungen deuten darauf hin, dass die hydraulische Leitfähigkeit in diesem Gebiet schon stark reduziert ist und die Pegel nur verzögert und abgeflacht auf Wasserzu- oder -abfluss reagieren. Die Pegel liegen in (Pegel 1 und 18) oder am Rande (Pegel 22 und 19) einer Zone mit einer Transmissivität von $0-5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (siehe Abbildung 15). Nebst der geringeren Transmissivität ist es aber auch denkbar, dass die Messungen der Pegel 1, 18, 19 und 22 von einem Lehmhorizont gestört werden und ihre Trägheit nicht alleine der geringen hydraulischen Leitfähigkeit zugeschrieben werden kann.

Die starke Senkung des Wasserstandes nach der Schneeschmelze wird im Kapitel 3.4.5 diskutiert.

3.4.1 Vergleich mittlerer Wasserstände über die ganze Messperiode

Beim Vergleich der arithmetischen Mittel der Pegelstände über die Vegetationsperioden muss beachtet werden, dass im Jahr 2018 nicht die ganze Saison gemessen wurde, sondern nur die Monate August bis November und bei gewissen Pegeln sogar nur September bis November. Die erste Messung anfangs August 2018 erfasst die extrem trockenen Verhältnisse und den entsprechend tiefen Wasserstand nach der langen Trockenperiode im Juli 2018, in welcher die Hangwassereinträge zum Erliegen gekommen sein dürften (-135cm Pegelstand des Pegels 35, welcher direkt vom Hangwasser beeinflusst ist). Im Jahr 2019 sind die Monatsmittel bis Ende September erfasst, da die Grabeneinstauung anfangs Oktober 2019 erfolgte. Im Jahr 2020 wurden die Monatsmittel von April bis zur letzten Messung am 20. Oktober berücksichtigt (siehe Abbildung 32).

Über die gesamte Messperiode weisen die Pegel westlich Graben 1 die tiefsten Wasserstände auf, was erstaunen mag, sind die Pegel doch am Rand einer Fläche installiert, die gegen Westen hin keine Drainagegräben aufweist. Offenbar vermochte Graben 1 die angrenzende Fläche stark zu entwässern. Anzumerken ist, dass die Pegel installiert wurden, bevor der Graben 1 in die Projektplanung aufgenommen wurde. Der Fläche wurde deshalb wenig Interesse beigemessen und nur 2 Pegel installiert (einen Datenlogger und einen manuellen Pegel). Die Mittelwerte stammen somit aus nur 2 Messpunkten.

Die beiden Teilflächen zwischen den beiden Hauptgräben (zwischen Graben 1 und 2 sowie zwischen 2 und 3) weisen ähnlich tiefe Wasserstände auf. Beide werden stark von dem tiefen und aktiven Graben 2 entwässert.

Die Teilfläche östlich des Grabens 3 weist die geringste Drainagetiefe auf. Zum einen grenzt die Teilfläche östlich an den ehemaligen Graben 4, welcher im Jahr 2000 aufgefüllt wurde, und somit grenzt es an ein Teilgebiet mit bereits gestiegenen Feuchtigkeitswerten; zum andern wurden die Pegel in dieser Fläche vermehrt in Schlenken gesetzt, wo generell höhere Wasserstände zu erwarten sind (siehe Kapitel 3.3.2).

Insgesamt belegt der hohe mittlere Wasserstand im Sommer 2020 (-3,58 cm unter Flur) gegenüber den Mittelwerten von 2018 (-23,45 cm unter Flur) und 2019 (-9,71 cm unter Flur) den Wiedervernässungseffekt deutlich. Da es sich bei den Messwerten um Punktmessungen handelt, spielen bei der Interpretation der absoluten Messwerte die Standorte der Pegelrohre eine zentrale Rolle; die Extrapolation der Punktmessungen auf die ganze Fläche ist gerade wegen der starken Heterogenität des Geländes und des Torfkörpers mit den zahlreichen mineralischen Einschwemmungen mit Unsicherheiten behaftet (siehe Kapitel 3.3.1). Diagramme der Pegelverläufe der einzelnen Teilflächen über die genannten Perioden sind in Anhang 1 zu finden.

Tabelle 4: Mittlere Sommerwasserstände inkl. mittlere Maximal- und Minimalpegelstände (in cm, unter bzw. über Flur) (nur Datenlogger)

Teilflächen	2018 (Aug.-Nov.)	2019 (Apr.-Sept.)	2020 (Apr.-Okt)
westlich G1	-43,75	-15,15	-7,18
zwischen G1 und G2	-27,29	-12,71	-7,13
zwischen G2 und G3	-29,625	-17,83	-5,11
zwischen G3 und G4	-8,22	-0,20	3,19
Mittelwerte Gesamt	-27,22 (-7,96/-38,29)	-11,47 (-1,01/-17,75)	-4,06 (2,29/ -14,37)

Tabelle 5: Mittlere Sommerwasserstände inkl. mittlere Maximal- und Minimalpegelstände (in cm, unter bzw. über Flur) (inkl. manueller Messung) (mittlerer Maximalwert/mittlerer Minimalwert) ohne Pegel P7, P24 und im Jahr 2020 P30 und P37 und teils P33.

Teilflächen	2018 (Aug.-Nov.)	2019 (Apr.-Sept.)	2020 (Apr.-Okt)
westlich G1	-43,51 (-13,69/-98,73)	-16,25 (-5,41/-23,78)	-6,93 (-0,74/-13,92)
zwischen G1 und G2	-28,7 (-14,23/-95,88)	-13,46 (-4,68/-20,16)	-6,76 (0,12/-13,39)
zwischen G2 und G3	-27,81 (-9,67/-115,83)	-14,87 (-9,58/-20,6)	-2,25 (2,03/-7,08)
zwischen G3 und G4	-8,17 (1,02/-34,81)	-0,33 (9,97/-6,42)	3,33 (11,12/-6,94)
Mittelwerte Gesamt	-23,45 (-7,99/-79,79)	-9,71 (-1,33/-16,09)	-3,58 (2,95/ -11,25)

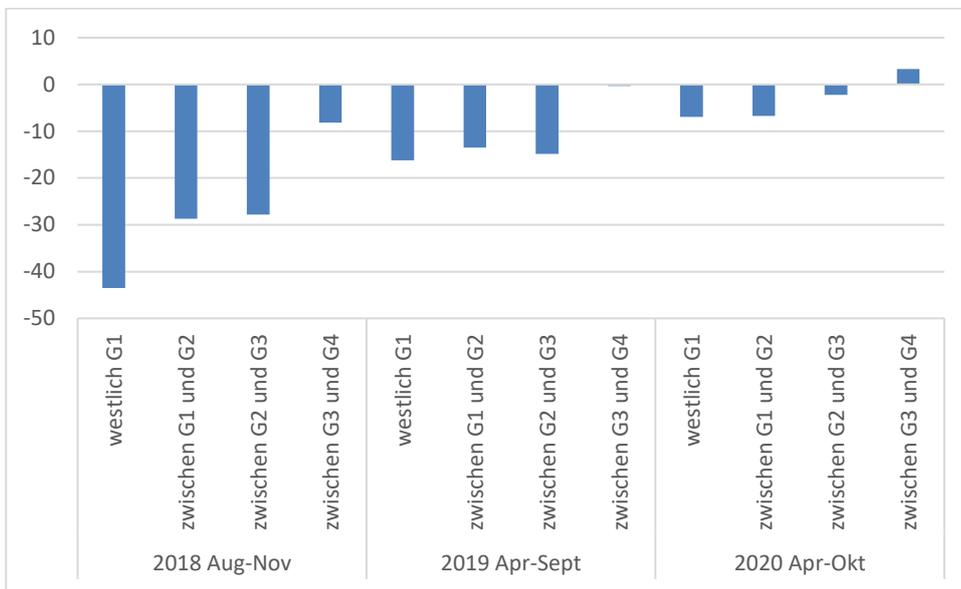


Abbildung 32: Mittlere Pegelstände inkl. manuell ausgelesener Pegel 2018-2020

3.4.3 Wasserstanddifferenzen der einzelnen Standorte

Um den Standorteffekt etwas abzuschwächen, wurde die jeweilige Differenz der Wasserstände der einzelnen Pegelrohre miteinander verglichen (siehe Abbildungen 27 und 28). Beim Vergleich der Jahre 2020 und 2018, ist, unabhängig der Differenz der monatlichen Niederschlagssumme, eine deutliche Pegelerhöhung festzustellen in den bemessenen Monaten August-Oktober. Die Wasserstandserhöhung ist auf allen Teilflächen deutlich ersichtlich. Im Durchschnitt hat sich der Wasserstand relativ zum Jahr 2018 um 15 cm erhöht (siehe Abbildung 33).

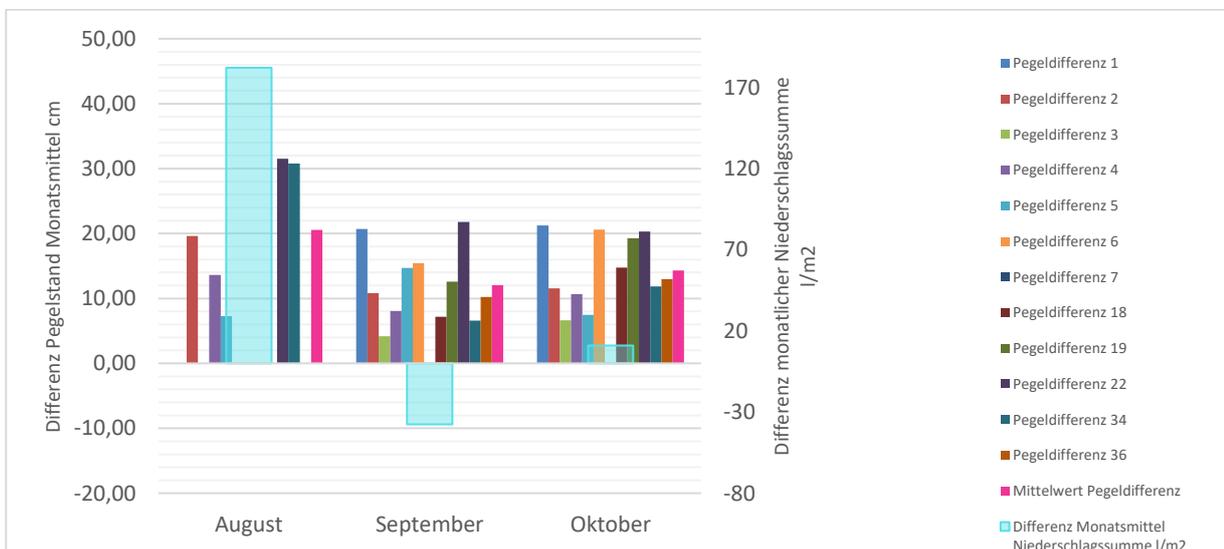


Abbildung 33: Differenzen der Monatsmittel August-Oktober der Wasserstände (cm) und der Niederschlagssumme ($l\ m^{-2}$) 2020 im Vergleich zu 2018 (Lücken beruhen auf fehlenden Messdaten im Monat August 2018).

Weniger ausgeprägt ist die Differenz beim Vergleich der monatlich mittleren Wasserstände der Jahre 2019 und 2020. Hier liegt der Mittelwert über die Monate Jan-Sept bei +5,3 cm. Ab 20. September 2019, mit Hauptarbeiten anfangs Oktober, wurden die Einstauungsmaßnahmen umgesetzt, im Oktober 2019 sind die Wasserstände deshalb schon deutlich angestiegen, die Differenzen entsprechend geringer. Der April 2020 weist geringere Wasserstände auf als im Vorjahr, was mit der geringeren Niederschlagssumme im März und April 2020 zusammenhängt, hingegen korrelieren die Wasserstanddifferenzen der anderen Monate nicht

mit den Differenzen der Monatsniederschläge. Viel eher ist der Effekt im April dem Zeitpunkt der Schneeschmelze zuzuschreiben, die 2020 etwas früher stattfand als im Jahr 2019 und entsprechend die Wasserstände 2019 länger auf hohem Niveau blieben (siehe Kapitel 3.4.5).

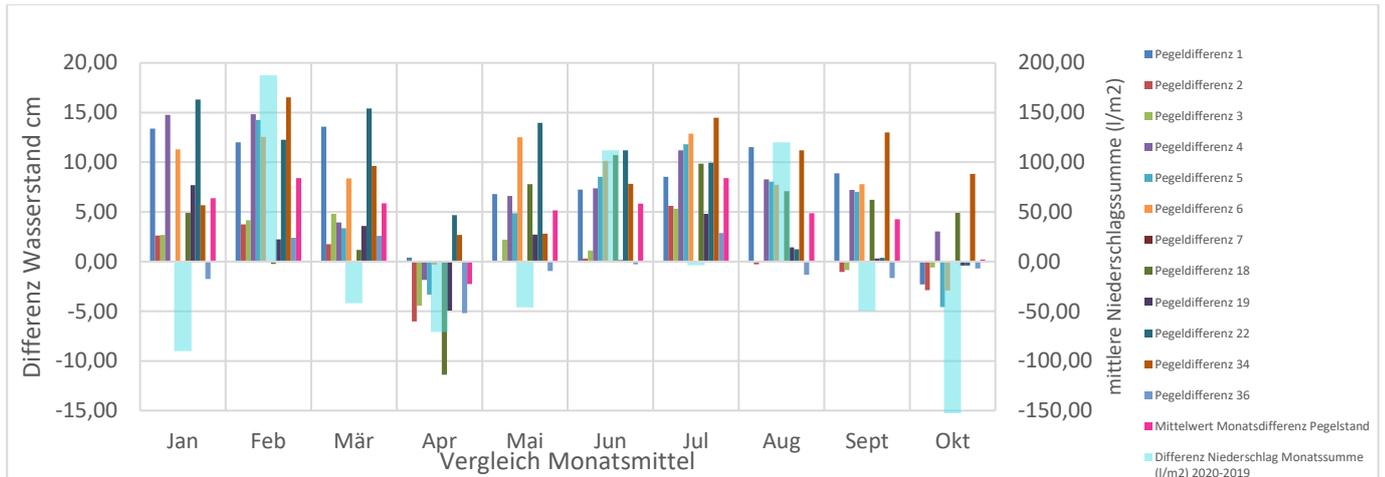


Abbildung 34: Differenzen der Monatsmittel Januar-Oktober der Wasserstände (nur Datenlogger) (cm) und der Niederschlagssumme ($l\ m^{-2}$) 2020 im Vergleich zu 2019 (Die Wiedervernässung erfolgte anfangs Oktober 2019).

Im Folgenden werden die Pegeldifferenzen einzelner Teilflächen für die Monate Mai-September (2019/2020) separat diskutiert:

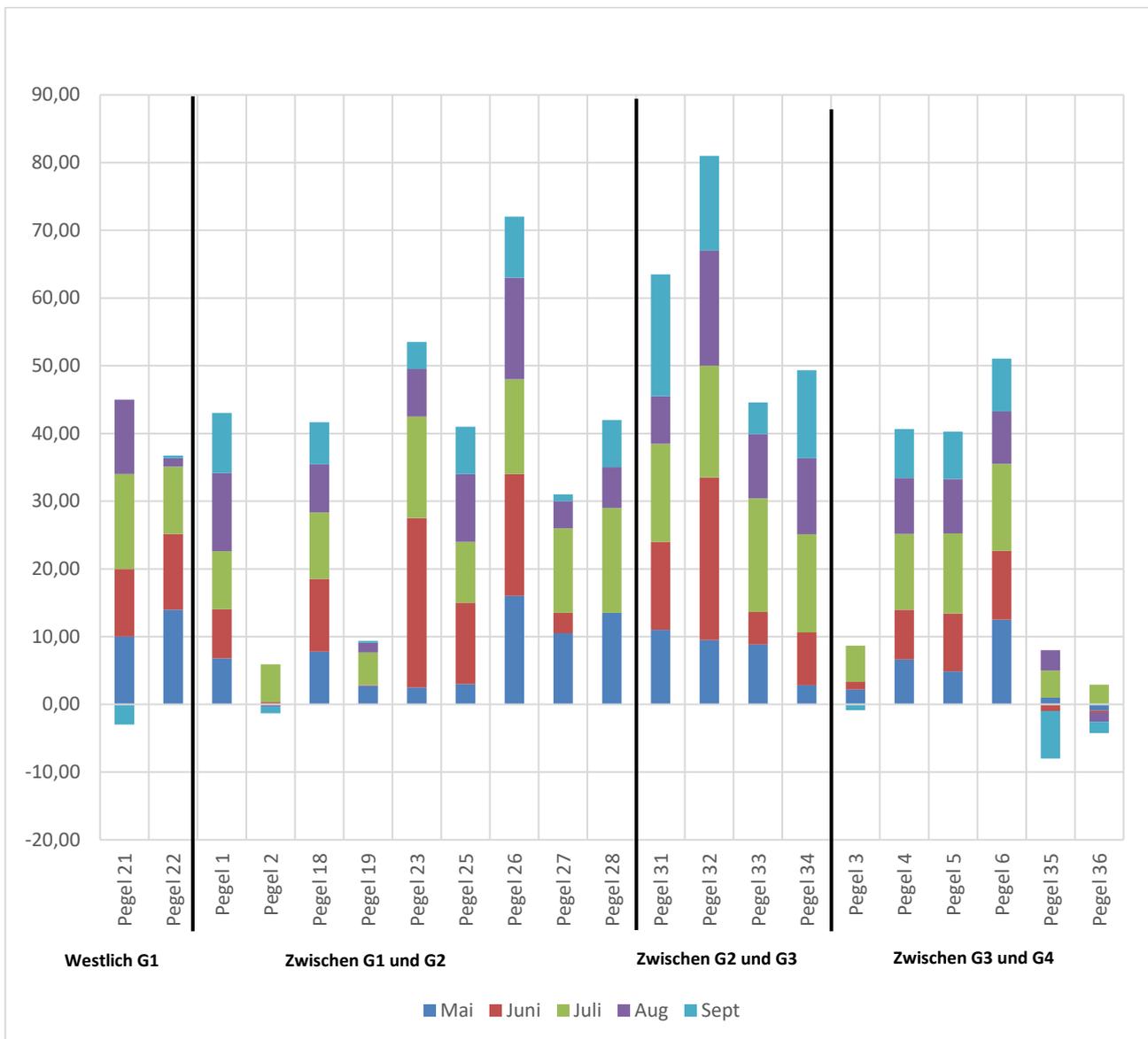


Abbildung 35: Pegelstandsdifferenzen der Monate Mai-September 2020 im Vergleich zu 2019 pro Teilfläche (inkl. manuelle Messungen).

Bei der Interpretation der Abbildung 35 ist wichtig zu beachten, dass die Monatsmittel der manuell gemessenen Pegel lediglich aus 1-2 Messungen bestehen und deshalb die Fehlerwahrscheinlichkeit im Vergleich mit den Mittelwerten der Datenlogger grösser ist. Pegel 7, 24, 30 und 37 waren im Jahr 2020 nicht mehr zugänglich, da sie sich im Falle von 7, 24 und 37 unter Wasser befanden und Pegel 30 bei den Bauarbeiten entfernt wurde.

Generell sind die grössten Differenzen im Juni und Juli festzustellen. Der Juni 2020 weist höhere Monatsniederschläge auf (112 mm mehr) als der Vergleichsmonat im 2019, die Niederschlagssumme im Juli 2020 ist praktisch identisch mit derjenigen im 2019. Woraus geschlossen werden kann, dass die Niederschlagssumme nicht mit der Wasserstanddifferenz korreliert.

Das Teilgebiet zwischen den Gräben 2 und 3 weist die höchsten Wasserstanddifferenzen auf gemäss sowohl den Pegelrohren am Rand des Bachbettes als auch denjenigen im wieder aufgefüllten Bachbett, da sie von beiden Seiten die Einstauungswirkung von Graben 2 und 3 erfahren (und zuvor gegen beide Seiten entwässert wurden). Die geneigte Fläche zwischen Graben 1 und 2 weist ebenfalls eine starke Erhöhung des Wasserstandes auf, mit Ausnahme der Pegel 2 und 19. Der Wasserstandanstieg in der geneigten Fläche zwischen Graben 1 und 2 erstaunt und weist auf das starke Retentionsvermögen des Torfkörpers hin. Weshalb die zwei Pegel 2 und 19 weniger stark auf die Einstauung reagieren, ist nicht abschliessend klar,

gerade der Pegel 19 liegt in der Nähe der tiefsten eingestauten Stelle des Hauptgrabens 2, von welchem Pegel 28 (manuell), welcher nur wenige Meter von 19 entfernt gesetzt ist, stark beeinflusst wird. Allenfalls spielen hier lehmige Einschwemmungen eine Rolle, welche die Wasserstände an gewissen Stellen tief halten, was gemäss Bohrprofilen (Standort G2_4) durchaus plausibel ist (siehe Anhang 3 Bilddokumentation Bohrprofile).

Eine deutliche Erhöhung des Wasserstands ist auch im Teilgebiet westlich des Grabens 1 festzustellen: somit hat auch der Teil der vermeintlich noch ungestörten Fläche westlich des ersten Entwässerungsgrabens stark von der Einstauung profitiert. Wie weit der Wiedervernässungseffekt spürbar ist, kann nicht exakt angegeben werden, er dürfte gemäss Topografie aber noch einige Meter in die Fläche hinein spürbar sein.

Die Teilflächen zwischen dem Graben 3 und (dem 2000 eingestauten) Graben 4 weisen ähnliche Wasserstandanstiege auf wie die restlichen Teilflächen, dies obwohl sich hier die Mehrheit der Pegelstandorte in Schlenken befinden, die bereits 2019 relativ feucht waren. Der geringe Anstieg des Pegels 3 erstaunt, da er sich wie die anderen in einer Schlenke befindet, die sich, nach empirischer Feldkontrolle nicht anders verhält, als die andern. Pegel 35 ist vergleichsweise weit von den eingestauten Haupt- und Seitengräben entfernt, er dürfte vermehrt auch im Einflussgebiet des Hangwassers liegen. Die negative Differenz im September dürfte aber auch daher rühren, dass die Bauarbeiten im hinteren Teil des Grabens 3 bereits Ende September 2019 begannen, was das Monatsmittel September 2019 bereits positiv beeinflusst haben dürfte. Pegel 36 wurde am äussersten Rand des möglichen Einflussgebiets gesetzt, um die Ausdehnung des Einstauungseffekts besser abschätzen zu können. Die geringe Differenz weist daraufhin, dass Pegel 36 nicht mehr im Einflussgebiet der Wiedervernässung liegt. Die Fläche, die von dem Wiedervernässungseffekt profitiert, endet zwischen dem Pegeltransekt 3-35 und dem Pegelstandort 36. Dieser liegt in der bereits wiedervernässten Fläche des gefüllten Grabens 4.

3.4.4 Evapotranspiration

Die potentielle Evapotranspiration (ETp) folgt einem deutlichen saisonalen Verlauf und kommt im Winterhalbjahr zum Erliegen. Zeitgleich mit der Schneeschmelze jeweils im April setzt die ETp ein.

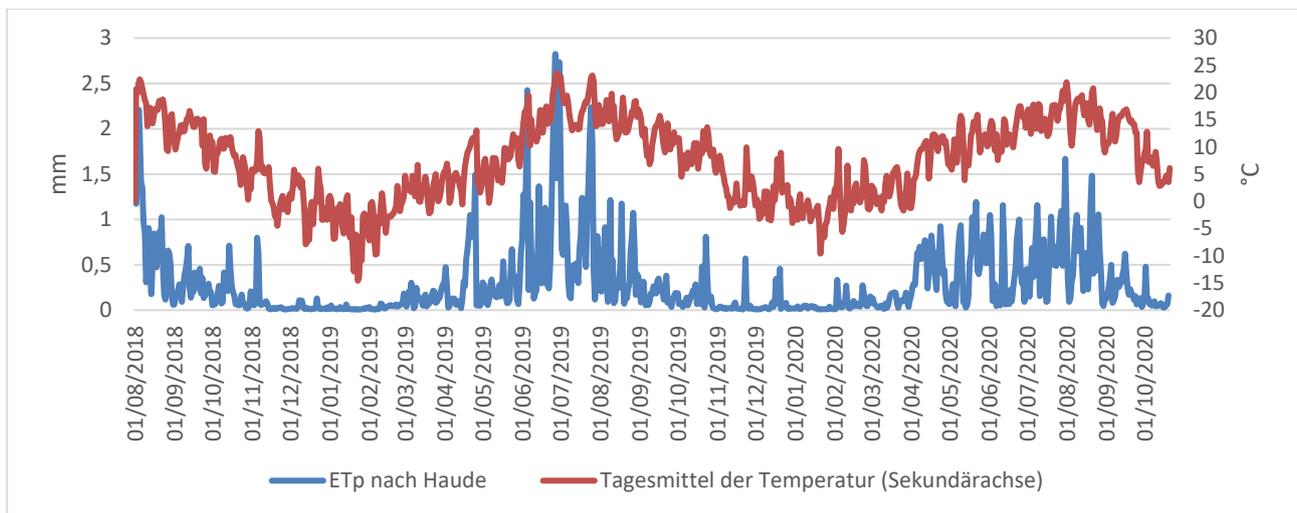


Abbildung 36: Potentielle Evapotranspiration nach Haude und Tagestemperatur Aug. 2018- Okt. 2020

Da die Berechnung der ETp auf einem monatlichen empirischen Faktor basiert, eignet sie sich insbesondere für die Berechnung monatlicher Mittelwerte. Werden die Summen monatlicher Niederschläge mit den entsprechenden Summen der ETp verglichen, ergeben sich folgende Wasserüberschüsse:

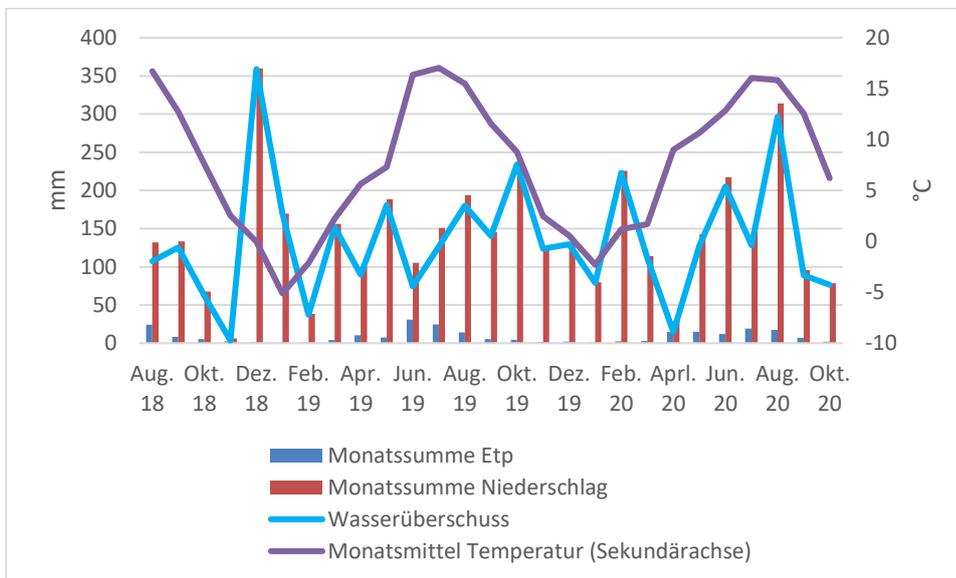


Abbildung 37: Wasserüberschüsse Niederschlag-Evapotranspiration 2018-2020 (Daten siehe Anhang 2)

Der Wasserüberschuss dürfte v.a. 2018-2019 über die Drainagegräben abgeleitet worden sein. Für das Jahr 2020 darf angenommen werden, dass ein Grossteil des Wasserüberschusses im Torfkörper gespeichert wurde. Bei Wasserübersättigung (z.B. bei starkem Niederschlagsereignis) fliesst das überschüssige Wasser oberflächlich ab. Der Bach, der das Moor durchströmt, leitet lediglich das von Süden einflussende konzentrierte Hangwasser ab, das Niederschlagswasser, welches auf die Fläche fällt, dürfte massgebend dort verbleiben.

3.4.5 Wasserstand im Winterhalbjahr

Generell wird angenommen, dass CO₂-Emissionen im drainierten Torf in gemässigten Zonen im Winterhalbjahr, wegen kältebedingt unterbundener mikrobieller Abbauraten, eine marginale Rolle spielen. Eine kanadische Studie aus dem Jahr 2018 misst in entwässerten Mooren hingegen 1 g CO₂eq m⁻² Tag⁻¹ während des Winterhalbjahres (Webster et al. 2018). Expertenannahmen gingen davon aus, dass das Gross Moos im Winterhalbjahr komplett austrocknet, da das Hangwasser des Tierbergs gefroren ist und somit ausbleibt (persönliche Kommunikation A. Grünig 2017). Dies wird hingegen von den Pegelständen 2018 und 2019 widerlegt.

Das Schwändital ist ein äusserst niederschlagsreicher Ort, dies gilt auch für Winterniederschläge (Niederschlagssumme Station Obersee November-März 2018/2019: 730 mm; November-März 2019/2020: 676 mm). Entsprechend mächtig ist die Schneedecke, die auf den Datenloggern liegt. Die Messwerte lassen die Vermutung zu, dass der interne Druckausgleich des Datenloggers unter solchen Bedingungen gestört wird. Hingegen fehlt dazu ein sprunghaftes An- und Absteigen der Messwerte (persönliche Kommunikation mit Hersteller R. Schreck, Nov. 2020). Geht man davon aus, dass die Messwerte im Winterhalbjahr stimmen, ist das Moor unter der Schneedecke beinahe oberflächennah wassergesättigt, was erstaunt, da der laterale Wasserzufluss durch Gefrieren unterbunden ist. Eventuell stammt das Wasser unter der Schneedecke von bodennaher Schneeschmelze, was gemäss den, von den Sonden gemessenen Bodenwassertemperaturen durchaus plausibel ist (siehe Abbildung 39). Das Wasser wird im Moor gespeichert. Dies galt auch bereits für den drainierten Zustand (siehe Abbildung 38). Gleichzeitig mit der Schneeschmelze im April läuft das Wasser aus dem Torf ab. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass der von Experten vermutete Effekt des Austrocknens bedingt durch gefrorenes Hangwasser nur vorübergehend während der Schneeschmelze eintritt, da dann auch die bodennahe Schneeschmelze unter der Schneedecke ausbleibt. Dieser Effekt ist auch nach der Renaturierung im Jahr 2020 festzustellen (siehe Abbildung 39: die Pegel 18 und 19 wurden als Beispiele gewählt, da durch ihr Verlauf der Effekt besonders gut ersichtlich ist: zur Verdeutlichung wurde Pegel 4 angefügt, der bei einem hohen Wasserstand in einer

Schlenke, denselben Effekt aufweist) und zwar in allen berücksichtigten Teilflächen des Moores. Der entwässernde Einfluss der Schneeschmelze wird durch einsetzendes Pflanzenwachstum und entsprechend durch die Evapotranspiration unterstützt (siehe Abbildung 40).

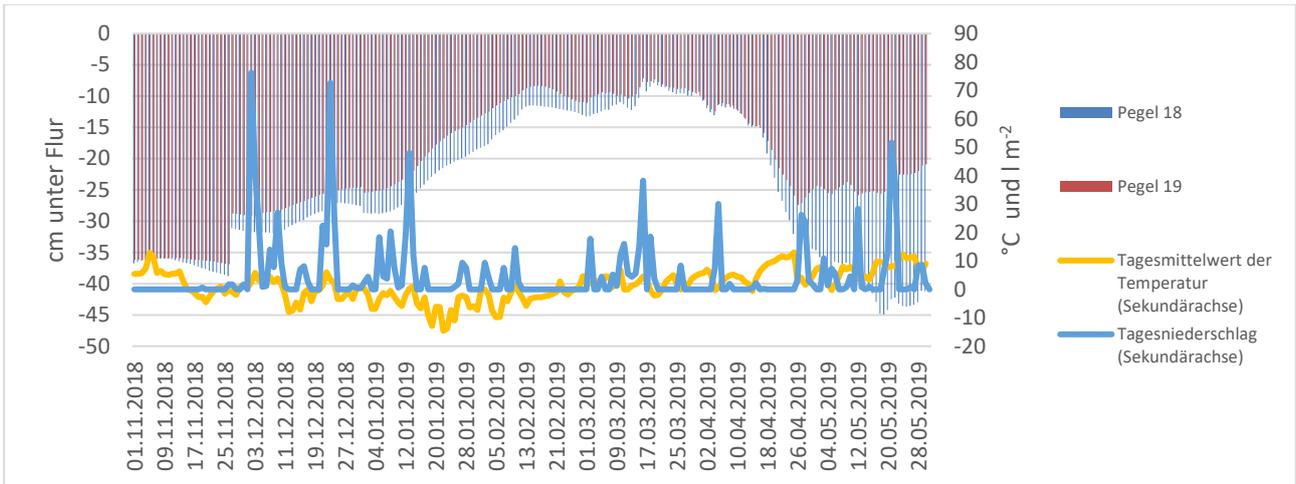


Abbildung 38: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 18 und 19 in den Jahren 2018-2019.

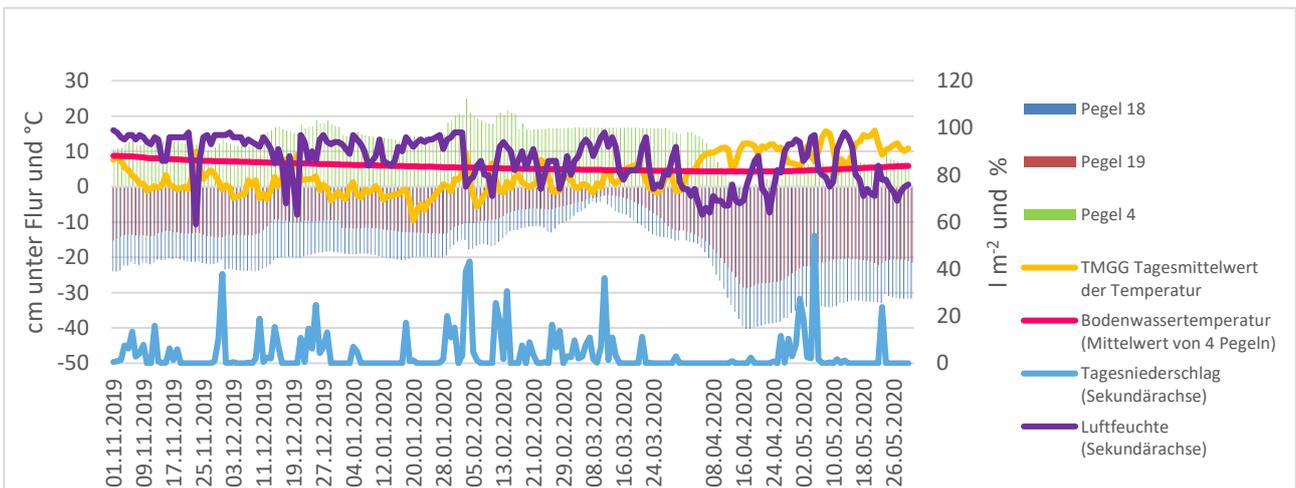


Abbildung 39: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 4, 18 und 19 in den Jahren 2019-2020.

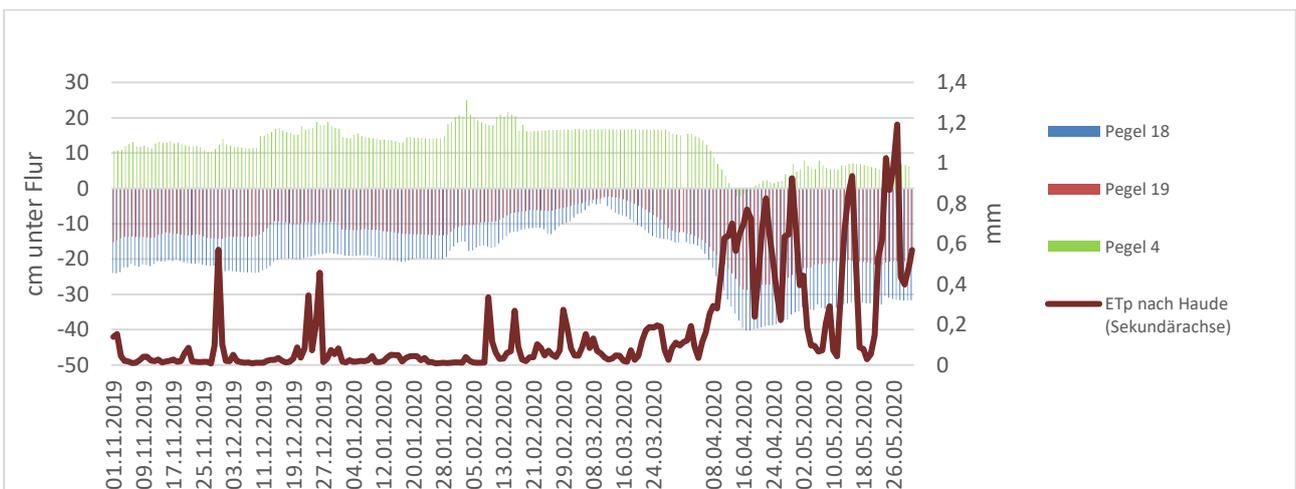


Abbildung 40: Beispiel des Schneeschmelzeffekts anhand Pegelmessungen 4, 18 und 19 in den Jahren 2019-2020 und einsetzende Evapotranspiration (nach Haude) im Frühjahr 2020.

Gemäss hohem Wasserstand und tiefen Temperaturen sind keine Emissionen im Winterhalbjahr zu erwarten. Der kritischste Punkt ist während der Schneeschmelze, wenn das Moor schneefrei, die Nordhänge des Tierbergs aber noch gefroren sind. Die Dauer der tiefen Wasserstände ist abhängig von der Temperatur: sind diese hoch, sind höhere Abbauraten zu erwarten, das Auffüllen des Moores dauert aber nicht lange, da das Hangwasser bald aufgetaut ist; sind die Temperaturen tief, dauert es länger, bis wieder genug Wasser in das Moor fliesst, die Abbauraten sind aber ebenfalls geringer.

3.5 Auswirkung der Wiedervernässung

Der deutliche Wasserstandanstieg seit Oktober 2019 belegt die erwartete Vernässungswirkung der Einstauung der drei Gräben im Gross Moos. Nebst den Pegelmessungen, welche mit genannten Unsicherheiten behaftet sind, verweisen auch die bereits braun verfärbten, abgestorbenen Fichten auf den dauerhaften Wasseranstieg. Die Ausbreitung der Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*) und des Bärlapps (*Lycopodium*), das Auftreten des schmalblättrigen Sonnentaus (*Drosera angustifolia*) sowie die dichte Sphagnumdecke im September 2020 sind erste Hinweise auf die Erholung und Ausbreitung der hochmoortypischen Vegetation und somit der andauernden Feuchtezunahme (Abbildungen 42 bis 45).



Abbildung 41: Absterbende Rottannen, Sept. 2020



Abbildung 42: Sich verfärbende Jungfichte, Sept. 2020



Abbildung 43: Laich im wiedervernässten Moor



Abbildung 44: Sich ausbreitender Bärlapp, Sept. 2020



Abbildung 45: Zuwachsende offene Wasserflächen und Ausbreitung einer Sphagnumdecke.

Nebst dem Wasserstandanstieg wurde auch die Erosion, die hauptsächlich im Graben 2 stark vorangeschritten war, gänzlich unterbunden (siehe Abbildung 46). Der Bach wurde in sein natürliches, mäandrierendes Bachbett zurückgeleitet und fliesst östlich des Graben 2 in den Brändbach.

Die Bauarbeiten und deren erwartete Wirkung wurden im Sommer 2020 von der Bauleitung und Kanton kontrolliert. Infolge wurde der südliche Zufluss, der bei starken Niederschlägen, den Graben 2 alimentierte, mit einer Ableitung entlang der Hangkante abgeschwächt. Zudem ist eine Ausbesserung des Lehmpropfens am nördlichen Ende des Grabens 2 geplant um möglicher weiterer Erosion vorzubeugen.

Die Pegel (manuelle und Sonden) bleiben weiterhin installiert und es ist eine Erfolgskontrolle seitens des Kantons geplant, die über die nächsten 2 Jahre fortgeführt werden soll.



Abbildung 46: Graben 2 an nördlichster, tiefster Stelle: erodierender Torfhang vor der Wiedervernässung und Wasserstand nach der Wiedervernässung.

4 Schlussfolgerung für den Kompensationsansatz *max.moor*

4.1 Emissionsreduktion im Gross Moos

Der Wasserstand hat sich bereits ein Jahr nach der Einstauung der Gräben einem naturnahen Niveau angenähert. Im Teilbereich zwischen Graben 3 und 4 lagen die Mittelwerte 2019 vermeintlich bereits auf einem naturnahen Niveau (wobei in Schlenken gemessen wurde, welche in natürlichem Zustand keine negativen Wasserstände aufweisen), die restlichen Teilgebiete allerdings sind deutlich unterhalb dieser Werte (siehe Kap. 3.4.1). Erst nach der Einstauung steigen die Wasserstände sämtlicher Pegel auf ein naturnahes Niveau mit entsprechend geringen bis negativen Emissionsfaktoren an, wie exemplarisch anhand der Daten in Abbildung 47 ersichtlich ist. (Alle seither publizierten Daten stützen diese grundsätzliche Abhängigkeit der THG-Emissionen vom Wasserstand) (NABU, 2012; vergleiche Abbildung 41). Die Schlenken sind dauerhaft wassergesättigt, die Bulten teilweise durchlüftet, teils gesättigt.

	Niedermoor	Hochmoor	Wasserstand cm
	Tonnen CO ₂ -Äquivalente pro Hektar und Jahr		
Acker	33,8 (14,2 bis 50,0 [1])	keine Daten	-70 (-29 bis -102)
Grünland intensiv/mittel	30,9 (21,3 bis 10,7 [5])	28,3 [1]	-19 (-39 bis -98)
Grünland extensiv trocken	22,5 (19,5 bis 30,9 [4])	20,1 [1]	-29 (-14 bis -39)
Grünland extensiv nass	10,3 (5,8 bis 16,3 [4])	2,1 (0 bis 4,4 [2])	-11 (6 bis -25)
Hochmoor trocken		9,6 (5,3 bis 12,1 [3])	-18 (-9 bis -25)
Naturnah/Renaturiert	3,3 (-1,3 bis 11,9 [5])	0,1 (-1,8 bis 2,9 [3])	-10 (-7 bis -14)
Überstau	28,3 (10,6 bis 71,7 [4])	8,3 (6,1 bis 10,4 [2])	14 (-8 bis 36)

Abbildung 47: Treibhausgasbilanzen nach Moortyp und Art der Bewirtschaftung (Mittelwerte (Minimum bis Maximum [Anzahl der Testgebiete]), nach Drösler et al. 2011, aus NABU 2012, S. 12.



Abbildung 48: Frisch eingestauter Grabenabschnitt mit entfernter Vegetationsschicht an den Rändern

Der Wiedervernässungseffekt der Renaturierungsmassnahmen 2019 geht am westlichen Rand des Perimeters über die Pegelstandorte hinaus, der östlichste Pegelstandort wurde hingegen kaum von der Wiedervernässung beeinflusst: der östliche Rand der wiedervernässten Fläche liegt also weiter westlich. Südlich beginnt der wiedervernässte Perimeter vor den jeweiligen Grabenanfängen und endet nördlich beim natürlichen Moorrund, resp. den Lehmpfropfen, mit welchen die Gräben am nördlichen Ausfluss geschlossen wurden. Entsprechend dieser Auswertung liegt die Fläche, die von der Wiedervernässung 2019 profitiert, im Perimeter von Abbildung 49, was 3,8 ha entspricht:

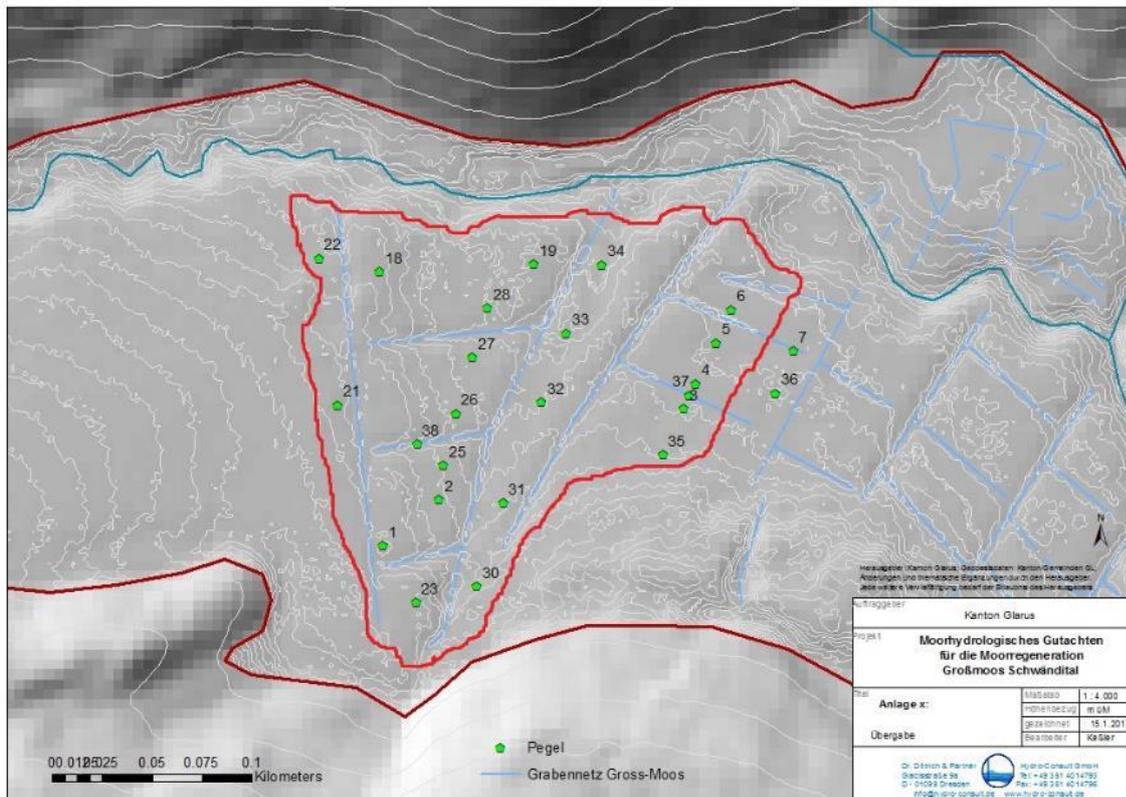


Abbildung 49: Perimeter der wiedervernässten Fläche.

Mit dem im wiedervernässten Bereich gemessenen mittleren Kohlenstoffvorrat von $56.43 \text{ kg OC m}^{-3}$ über die gesamte Fläche, ergibt dies nach dem *max.moor*-Ansatz (50 cm Torfhorizont; Gubler 2020) eine gesamte Emissionsreduktion von $3'931 \text{ t CO}_2 \text{ eq.}$. Wird das Potential pro bemessenes Teilgebiet berechnet, ergibt sich eine Emissionsreduktion von $4'062 \text{ t CO}_2 \text{ eq.}$: bei einem Teilgebiet G2 von rund 2 ha mit einem Kohlenstoffvorrat von $62,35 \text{ kg C m}^{-3}$, Teilgebiet GM von 0,8 ha mit einem Kohlenstoffvorrat von $50,5 \text{ kg C m}^{-3}$ und dem Teilgebiet G3 von 1 ha mit einem Kohlenstoffvorrat von $56,44 \text{ kg C m}^{-3}$. Da westlich des Grabens 1 keine Kohlenstoffmessungen vorgenommen wurden (weil es ursprünglich nicht zur projektierten Wiedervernässungsfläche gehörte), wird diese Fläche dem Teilgebiet G2 angerechnet. Es ist daher möglich, dass dieser 2. Ansatz die Emissionsreduktion überschätzt, da die Lagerungsdichte westlich des Grabens 1 nicht derjenigen, der geeigneten Fläche im Gebiet G2 entsprechen muss. Im Folgenden wird deshalb der erste Wert von $3'931 \text{ t CO}_2 \text{ eq.}$ verwendet.

Diese und weitere Messungen (Abderhalden 2020, Gubler 2020, Gubler 2018) haben die starke Sensitivität der Kohlenstoffvorräte gegenüber der Lagerungsdichte verdeutlicht. Bereits kleine Änderungen der Lagerungsdichte erhöhen resp. senken den Kohlenstoffvorrat massgebend und somit die *max.moor*-Emissionsreduktion der entsprechenden Fläche. Eine Einschätzung der Verdichtung der obersten Torfschicht (in Abhängigkeit der Entwässerungsdauer, ehemaligen landwirtschaftlichen Nutzung) ist demzufolge ebenso wichtig, wie die Analyse der Torfbeschaffenheit (Ausgangsmaterial, Mächtigkeit). Diese sollte zukünftig als Kriterium in die Beurteilung von *max.moor*-Projekten einfließen: Nebst dem Nachweis der Torfmächtigkeit von $>50 \text{ cm}$ und der Abschätzung der wiedervernässten Fläche, sollte eine Einschätzung der Verdichtung (und somit der Lagerungsdichte) der oberen Torfschicht erfolgen. In den allermeisten Fällen wird diese hoch sein, da es sich bei *max.moor*-Projekten um drainierte ehemals genutzte Standorte handelt. Auf sehr naturnahen, unverdichteten Standorten hingegen, sollten standortspezifische Messungen der Lagerungsdichte durchgeführt werden (siehe Kapitel 2.5).

Entsprechend der angestellten Überlegungen im Kapitel 2.5 zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte in Abhängigkeit unterschiedlicher Lagerungsdichten ergibt sich eine Spannbreite von folgenden Einsparungsleistungen (Tabelle 6):

Tabelle 6: Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 50 cm Torfhorizont.

Einsparungsleistung berechnet mit gemessener Dichte 0,131 g cm ⁻³ (=56,43 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit <i>max.moor</i> -Mittelwert (=56 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit Einheitsdichte ² 0,1 g cm ⁻³ (=47,3 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von vier wenig verdichteten CH-Standorten 0,086 g cm ⁻³ (=38,1 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von zwei extensiv genutzten CH-Flachmooren 0,197 g cm ⁻³ (=86,1 kg OC m ⁻³)
t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq
3'931,29	3'901,35	3'295,23	2'654,30	5'998,30

Würde die Einsparungsleistung auf den tatsächlich drainierten Horizont beschränkt resp. auf die tatsächliche Wasserstandserhöhung von 15 cm (Wasserstanddifferenz 2020 – 2018), und würden damit die fortschreitende Erosion und mögliche zukünftige Wasserstandsenkungen nicht berücksichtigt, würde sich die Einsparungsleistung deutlich verringern (Tabelle 7):

Tabelle 7: Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 15 cm Torfhorizont

Einsparungsleistung berechnet mit gemessener Dichte 0,131 g cm ⁻³ (56,43 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit <i>max.moor</i> -Mittelwert (56 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit Einheitsdichte 0,1 g cm ⁻³ (=47,3 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von 4 wenig verdichteten CH-Standorten 0,086 g cm ⁻³ (=38,1 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von 2 extensiv genutzten CH-Flachmooren 0,197 g cm ⁻³ (=86,1 kg OC m ⁻³)
t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq
1'179,40	1'170,40	988,57	796,29	1799,50

Wird die Erosion entlang der Gräben und ihre zukünftige Wirkung hingegen stärker gewichtet und wird den tiefen Wasserständen, wie sie im Sommer 2018 gemessen wurden, mehr Rechnung getragen, könnte das von einer Durchlüftung betroffene Torfvolumen rasch ansteigen und die entsprechende Torfschicht bis auf 1 m unter Flur in die Berechnung einbezogen werden. Hinsichtlich der zukünftig häufiger auftretenden langen Trockenperioden im Sommerhalbjahr (NCCS 2018), muss vermehrt mit Situationen wie im Sommer 2018 gerechnet werden. Die berechnete Waldfähigkeit sowie das tatsächliche Vorkommen von Baumbeständen auf dem Moor, welche mit ihrer Durchwurzelung zu einer verstärkten und tieferreichenderen Durchlüftung beitragen, stützt diese Überlegung (Tabelle 8).

Tabelle 8: Unterschiedliche THG-Einsparungsleistungen gemäss verschiedenen Berechnungen der Kohlenstoffvorräte der wiedervernässten Fläche von 3,8 ha und berücksichtigten 1 m Torfschicht

Einsparungsleistung berechnet mit gemessener Dichte 0,131 g cm ⁻³ (56,43 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit <i>max.moor</i> -Mittelwert (56 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit Einheitsdichte 0,1 g cm ⁻³ (=47,3 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von 4 wenig verdichteten CH-Standorten 0,086 g cm ⁻³ (38,1 kg OC m ⁻³)	Einsparungsleistung berechnet mit gemittelter Dichte von 2 extensiv genutzten CH-Flachmooren 0,197 g cm ⁻³ (=86,1 kg OC m ⁻³)
t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq	t CO ₂ eq
7862,58	7802,67	6590,47	5308,60	11'996,60

² Einheitsdichte von 0,1 g m⁻³, wie sie im IPCC 2014 verwendet wird (S. 2.40).

Die in den obenstehenden Tabellen gezeigten Spannbreiten verdeutlichen die starke Sensitivität der Einsparungsleistung je nach Annahmen bezüglich Lagerungsdichte des Torfkörpers und Vernässungstiefe (d.h. der Torfmächtigkeit, über die sich eine Massnahme auswirkt). Dabei stellen die Daten eine repräsentative Breite möglicher Annahmen bezüglich unterschiedlicher Lagerungsdichten sowie berücksichtigten Torfhorizonte dar. Die 3'901,35 t CO₂ eq, welche sich mit dem *max.moor*-Ansatz berechnen, liegen im mittleren Spektrum dieser Spannbreite möglicher Einsparungsleistungen. Somit kann die Gültigkeit des vom *max.moor*-Standard verwendeten Mittelwerts von 56 kg Kohlenstoffvorrat m⁻³ im Gross Moos bestätigt werden.

Die grosse Heterogenität des Wasserstands der einzelnen Pegelstandorte, verdeutlicht das Problem der Verallgemeinerung der Aussagen und der Verwendung von Mittelwerten innerhalb und zwischen verschiedenen Standorten. Jeder Moorstandort hat spezielle Eigenschaften, die einen direkter Vergleich erschweren. Das Gross Moos ist ein Durchströmungsmoor, welches von lehmigen Einschwemmungen durchzogen ist, was die Aussagekraft von Punktmessungen über einen mittleren Wasserspiegel, stark herabsetzt. Während im Gross Moos, gegeben durch die Topographie und den Bachlauf, die Erosion der Gräben (v.a. G2) eines der Hauptprobleme darstellte – da dadurch nicht nur Torf ausgeschwemmt wird, sondern der Wasserstand der angrenzenden Torfkörper laufend gesenkt wurde - , sind es an einem anderen Standort alte Torfstichkanten oder Verbuschung, die den Wasserstand massgebend beeinflussen und entsprechende Massnahmen erfordern. Diese Heterogenität von Wasserständen in Abhängigkeit von ehemaliger Nutzung, Moorgenese, hydrologischer Moortyp, Topographie und Störungen innerhalb des Torfkörpers spricht für den pragmatischen Ansatz, nicht die Entwässerungstiefe als Basis zur Berechnung der verhinderten CO₂-Emissionen zu verwenden (oftmals auch nur eine grobe Annäherung), sondern pauschal die oberste Schicht von 50 cm zu berücksichtigen, in der Annahme, dass diese ohne Wiedervernässung zukünftig zersetzt wird.

Auch der Kohlenstoffvorrat variiert zwischen den Messstandorten. Die Messungen liegen im Bereich bestehender Daten aus früheren Kohlenstoffmessungen in Schweizer Hoch- und Flachmooren. Unter den diskutierten Vorbehalten bezüglich der Lagerungsdichte und der Torfbeschaffenheit (Kap. 2.5) sowie des Methanpeaks in Abhängigkeit der durchgeführten Wiedervernässungsmassnahmen (Kap. 4.1), darf der von *max.moor* angenommene Mittelwert zur Berechnung der vermiedenen CO₂-Emissionen als Annäherungsgrösse verwendet werden.

4.2 Zielerreichung und Ausblick

Die zwei Projektziele konnten wie folgt erreicht werden:

1. Ziel: Eine wissenschaftliche Begleitung der Renaturierung des Gross Moos, die mit der erstmaligen Umsetzung des Kompensationsstandards *max.moor* Pilotcharakter hat. Die Forschungsarbeiten sind auf eine Verifizierung und eine standorttypische Präzisierung des Standards ausgerichtet.

Dazu wurde zum einen der Kohlenstoffvorrat des von der Wiedervernässung profitierenden Torfkörpers gemessen und zum anderen anhand von 25 Pegeln, davon 12 automatische Sonden, der Wasserstand vor und nach der Wiedervernässung gemessen. Dadurch konnte (i) überprüft werden, ob der von *max.moor* verwendete mittlere Kohlenstoffvorrat zur Berechnung der vermiedenen CO₂-Emissionen auf den Standort Gross Moos anwendbar ist und (ii) ob die ursprüngliche Schätzung der von einer Wiedervernässung profitierenden Fläche mit der tatsächlich wiedervernässten Fläche übereinstimmt. Gleichzeitig konnte (iii) die eigentliche Wirkung der Massnahmen überprüft werden. Und (iv) konnte der pauschale Ansatz zur Abschätzung von durch eine Wiedervernässung vermiedenen CO₂-Emissionen mit einigen Ergänzungen bestätigt werden.

- (i) Der Kohlenstoffvorrat in den obersten 50 cm Torfschicht beträgt gemittelt über alle 12 Messstandorte hinweg $56,43 \text{ kg m}^{-3}$ ($50,50\text{-}62,35 \text{ kg m}^{-3}$), was dem von *max.moor* verwendeten Mittelwert von 56 kg m^{-3} ziemlich genau entspricht. Die von *max.moor* angewandte Methode zur Berechnung des Kohlenstoffvorrats kann demzufolge im Gross Moos angewandt werden (Kapitel 2.5).
- (ii) Die wiedervernässte Fläche ist nördlich und südlich von der Topografie, resp. von der letzten Grabenaufstauung begrenzt. Östlich konnte die Ausdehnung der Wiedervernässung ungefähr ermittelt werden, diese reicht nicht so weit östlich, wie ursprünglich gedacht. Westlich wurde das Projekt durch eine zusätzliche Grabeneinstauung erweitert und die Ausdehnung der Vernässungsfläche entsprechend vergrößert. Generell muss festgestellt werden, dass die Punktmessungen mittels Pegel lediglich eine Annäherung an einen flächigen Wasserspiegel darstellen: die Hydrologie des Gross Moos ist durch Einschwemmungen, Verdichtungen und Topografie sehr komplex (Kapitel 3.4).
- (iii) Der Anstieg des Wasserstandes nach der Grabeneinstauung konnte deutlich nachgewiesen werden. Dem relativ hohen Wasserstand, der bereits im drainierten Zustand vorherrschte, ist zu verdanken, dass sich das Moor nach einer langen Nutzungsgeschichte noch immer in vergleichsweise gutem Zustand befand. Nebst dem Anstieg des mittleren Wasserstandes können zukünftig sehr tiefe Wasserstände bedingt durch lange Trockenperioden (wie im Sommer 2018) vermieden und die Grabenerosion gestoppt sowie die Hochmoor atypische Vegetation (z.B. die *Molinia*- und Jungfichtenbestände) verringert werden (Kapitel 3.4 und 3.5).
- (iv) Die genannten Schwierigkeiten der Wasserstandsmessung sowie die spezielle hydrologische Situation des Gross Moos als Durchströmungsmoor, bestätigen die Annahme, dass die flächige Wasserstandstiefe eine nicht leicht messbare oder ableitbare Grösse (z.B. von der Grabentiefe) ist, die sich als gut übertragbare Berechnungsgrundlage eignet. Der pragmatische Ansatz die obersten 50 cm als pauschale Berechnungsgrundlage zu verwenden, erweist sich als zielführend. Zur standortspezifischen Abschätzung der vermeidbaren Emissionen aus Schweizer Hochmooren sollen zukünftig nebst der Mindest-Torfmächtigkeit und der Ausdehnung der Wiedervernässungsfläche auch eine Einschätzung bezüglich der Verdichtung des Torfbodens und bei sehr unverdichteten Standorten eine Messung der Lagerungsdichte durchgeführt werden. Zudem soll der *max.moor*-Standard mit einem zusätzlichen Methanpuffer von 15% zur Berücksichtigung der verbleibenden Methanemissionen im wiedervernässten Standort ergänzt werden.

2. Ziel: Eine Verbesserung der Datengrundlage zur Abschätzung des Kohlenstoffspeichers und vermeidbarer Emissionen aus Schweizer Hochmooren.

Mit der Messung des Kohlenstoffgehalts (40,48-46,58 %), der Lagerungsdichte ($0,111\text{-}0,152 \text{ g m}^{-3}$) sowie des Kohlenstoffvorrats ($50,50\text{-}62,35 \text{ kg m}^{-3}$) konnte die Datenlage zur Abschätzung des Kohlenstoffspeichers in Schweizer Hochmooren erstmals mit einem Standort über 1000 m.ü.M. ergänzt werden. Die Resultate liegen in einem vergleichbaren Bereich mit anderen Kohlenstoffmessungen in drainierten Schweizer Hoch- und Flachmooren: die Kohlenstoffgehalte sind im Vergleich relativ niedrig, hingegen resultiert aus der gemessenen Lagerungsdichte im oberen Horizont ein hoher Kohlenstoffvorrat.

5 Literaturnachweise

- Abderhalden, B. (2020), *Palü Lunga, Flachmoor bei Ramosch, Unterengadin. Einschätzung des Klimapotentials nach Standard max.moor* - Probeentnahme, Laboranalyse und Berechnung. Fundaziun Pro Terra Engiadina.
- CH2018 (2018), CH2018 – *Climate Scenarios for Switzerland*, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.
- Drösler, M., Schaller, L., Kantelhardt, J. et al. (2012), Beitrag von Moorschutz und -revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. *Natur und Landschaft*. 87. Jahrgang, Heft 2.
- ETH (2018), IP Umweltbeobachtungen, Versuch E, Hydrologie. Zusatzskript. Zürich.
- Grosvernier, Ph. (2017), Überlegungen und Vorschläge zu den Vorarbeiten zu einem Regenerationsprojekt für das Hochmoor Nr. 245 Gross Moos im Schwändital (GL) gemäß Feldbegehung vom 7.7.2017, Lin'Eco. (unveröffentlicht).
- Grünig, A., Steiner, G.M. (1995), Gross Moos im Schwändital, Bericht 25.8.1995, WSL, Birmensdorf.
- Gubler, L. (2009), *Kohlenstoffverlust aus entwässerten Schweizer Hochmooren*. Masterarbeit. Bern.
- Gubler, L. (2018), Einschätzung des Klimapotentials nach Standard *max.moor*. Flachmoor bei Bos-cha im Unterengadin. Im Auftrag von myclimate. (Unveröffentlicht).
- Gubler, L. (2020), Klimaschutz durch Hochmoorschutz - CO₂-Kompensation durch Hochmoorrenaturierung in der Schweiz. 2. Auflage. Zürich. <https://www.wsl.ch/de/projekte/klimaschutz-durch-hochmoorschutz-1.html>, abgerufen am 27.4.2021
- Häckel, H. (2016), *Meteorologie*, 8. überarbeitete Auflage, Ulmer-Verlag.
- Hydro-Consult (2018), *Moorhydrologisches Gutachten für die Moorregeneration Gross Moos Schwändital*. Redigierte Fassung vom 16.2.2018. Dresden.
- IPCC (2014), 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraiishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. Published: IPCC, Switzerland.
- Küchler, M., Küchler, H., Bergamini, A., Bedolla, A., Ecker, K., Feldmeyer-Christe, E., Graf, U., Holderegger, R. (2018), *Moore der Schweiz. Zustand, Entwicklung, Regeneration*. Bristol-Schriftenreihe 55, 1. Auflage 2018. Haupt Verlag.
- Laggoun-Déferge, F., Gilbert, D., Buttler, A. et al. (2008), *Effects of experimental warming on carbon sink function of a temperate pristine mire: the PEATWARM project*. International Peat Society Congress, Tullamore: Ireland.
- NABU (Hrsg.) (2012), *Klimaschutz natürlich! Die Bedeutung von Mooren für Natur und Klima*. Berlin.
- NCCS, National Center for Climate Services (2018). *CH2018 – Climate Scenarios of Switzerland: Technical Report*. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/technical-report.html>

OePlan GmbH (2019), Plan: Querprofile Gräben Baueingabe. Massstab 1:500. / Plan: Situation Baueingabe. Massstab 1:1'000. Altstätten.

Schweizerischer Bundesrat (2021), Langfristige Klimastrategie der Schweiz. Bern.

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html> abgerufen am 05.05.2021

Tiemeyer, B. et al. (2016), High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*. 22, 4134–4149.

Turetsky, MR., Kotowska, A., Bubier, J. et al. (2014), A synthesis of methane emissions from 71 northern, temperate, and subtropical wetlands. *Global Change Biology*, 20, 2183–2197.

Vanselow-Algan, M., Schmidt, SR., Greven, M., Fiencke, C., Kutzbach, L., Pfeiffer, EM. (2015), High methane emissions dominated annual greenhouse gas balances 30 years after bog rewetting. *Biogeosciences*, 12, 4361–4371.

Webster, K. L., Bhatti, J.S., Thompson, D.K., Nelson, S.A., Shaw, C.H., Bona, K.A., Hayne, S.L., Kurz, W.A. (2018), Spatially-integrated estimates of net ecosystem exchange and methane fluxes from Canadian peatlands. *Carbon Balance Manage.* 13:16

Wilson et al. (2016), Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, Volume 17, Article 04, 1–28.

WSL (2001), *Endbericht zur Projektstudie Gross Moos im Schwändital 2001*. Birmensdorf. (unveröffentlicht)

Rechtliche Grundlage:

SR 451.32 Verordnung über den Schutz der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung (Hochmoorverordnung) vom 21. Januar 1991 (Stand am 1. November 2017)

6 Anhang

1 Pegelstände pro Teilgebiet 2018/2019/2020

Detaillierte Angaben zu den einzelnen Pegeln finden sich in Tabelle 2.

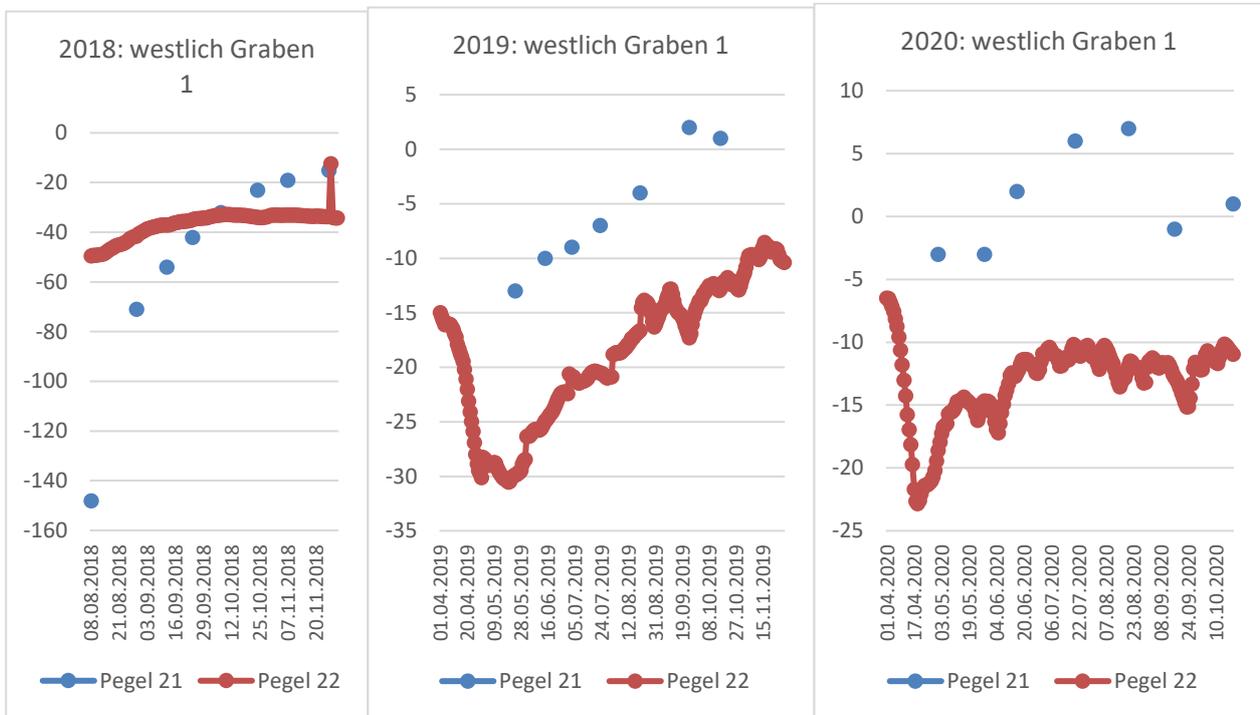


Abbildung 50-52: Pegelstände (cm) westlich Graben 1

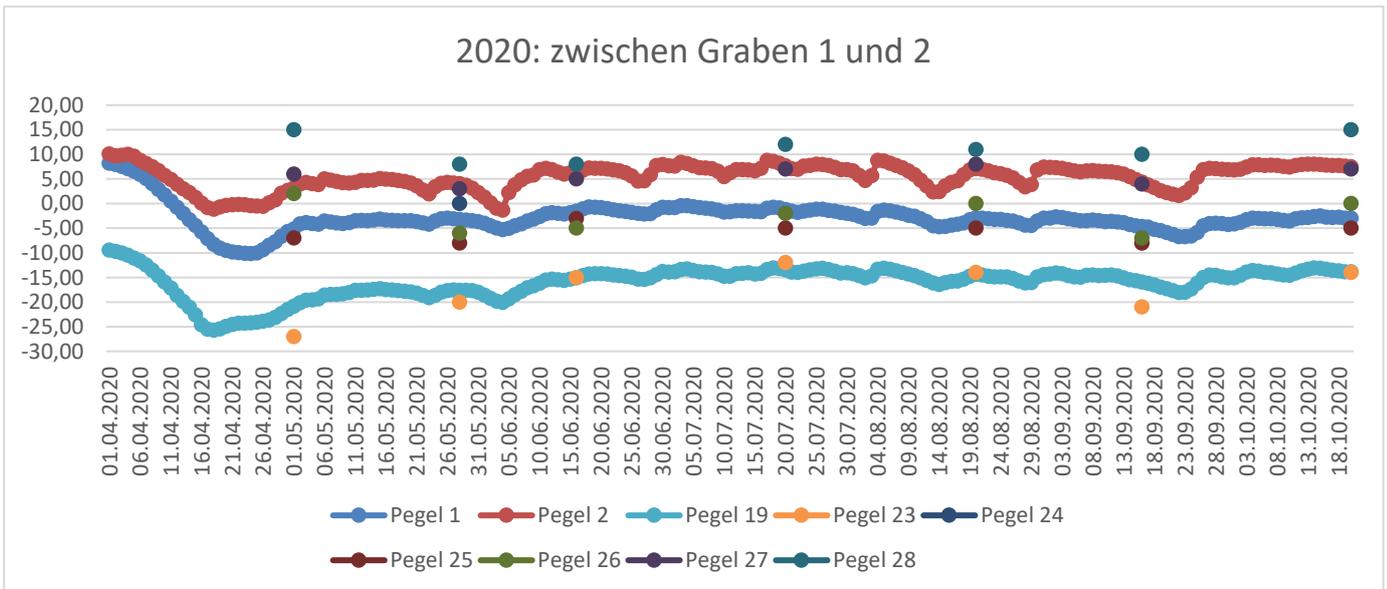
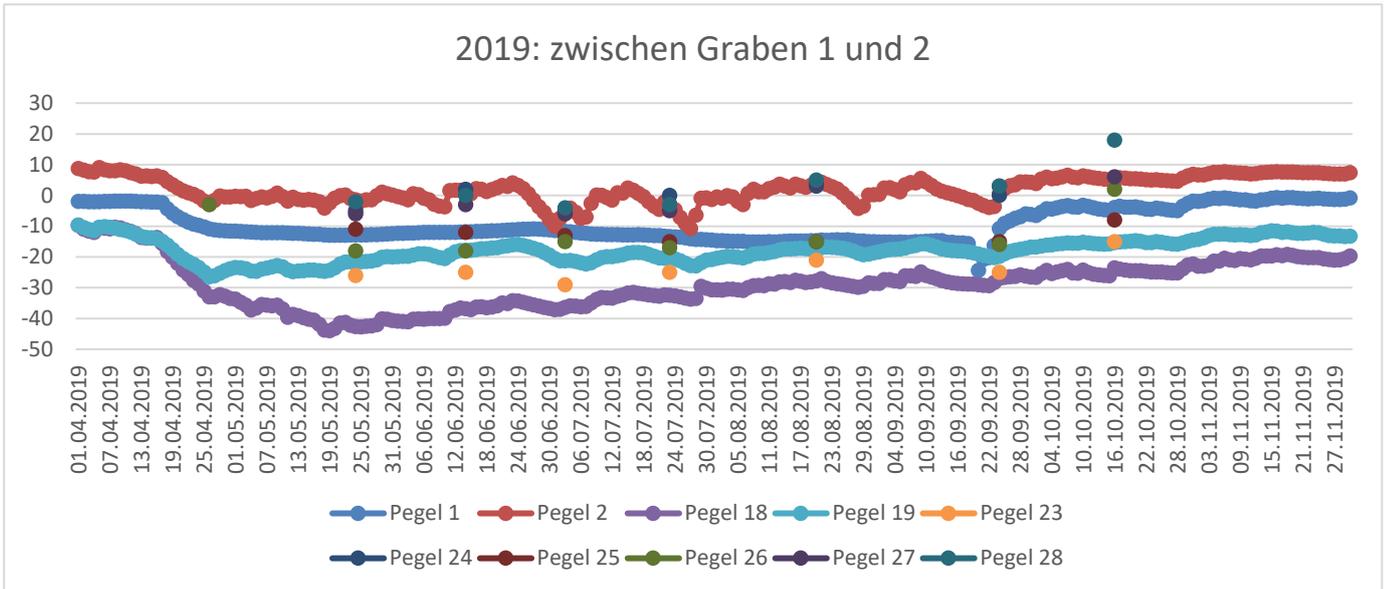
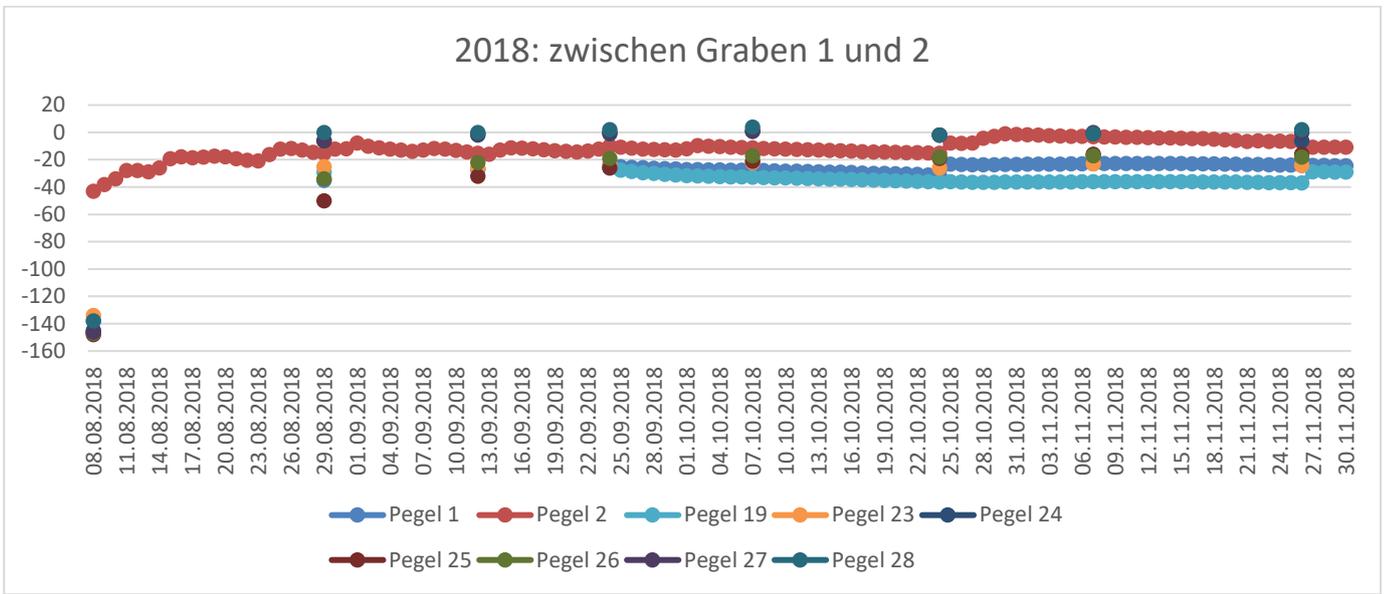


Abbildung 53-55: Pegelstände (cm) zwischen Graben 1 und 2

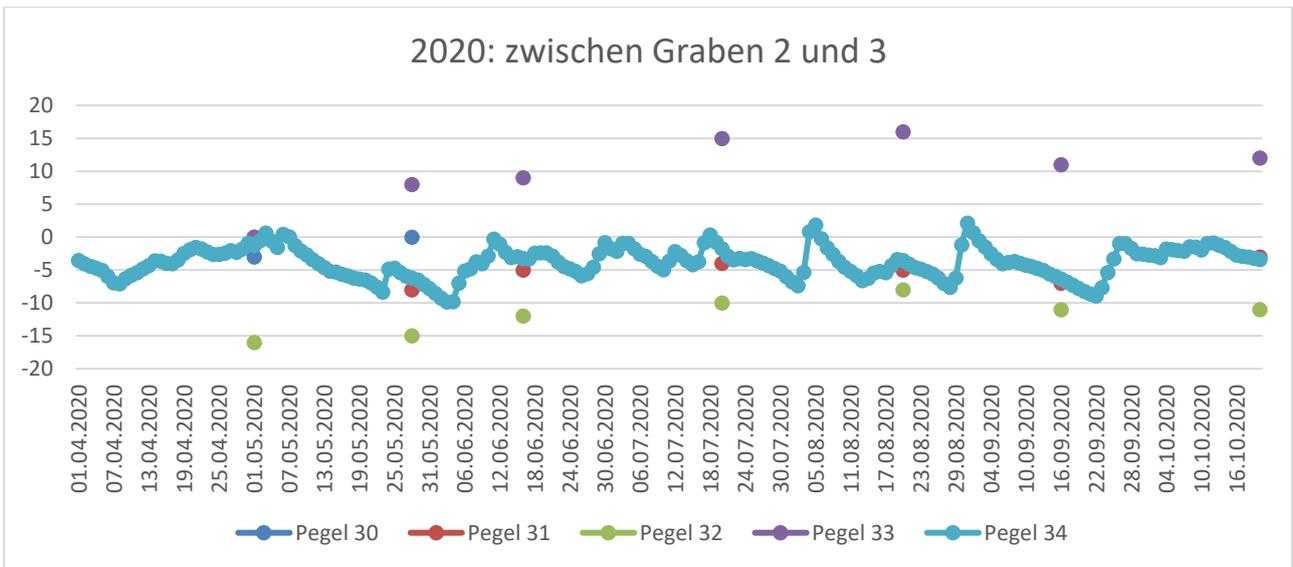
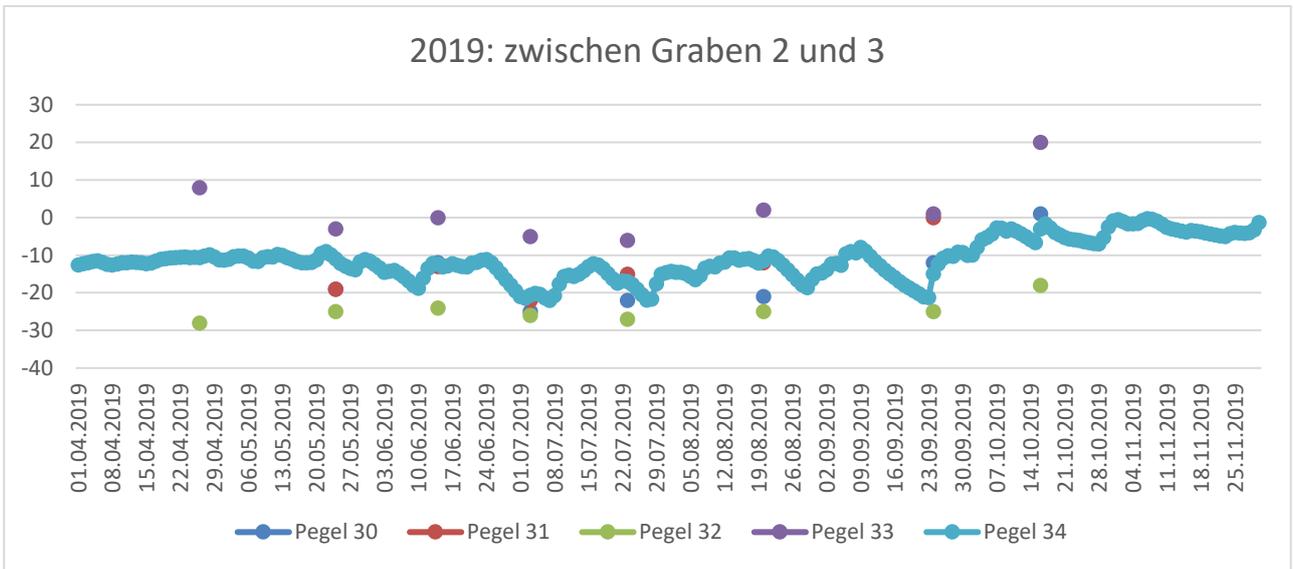
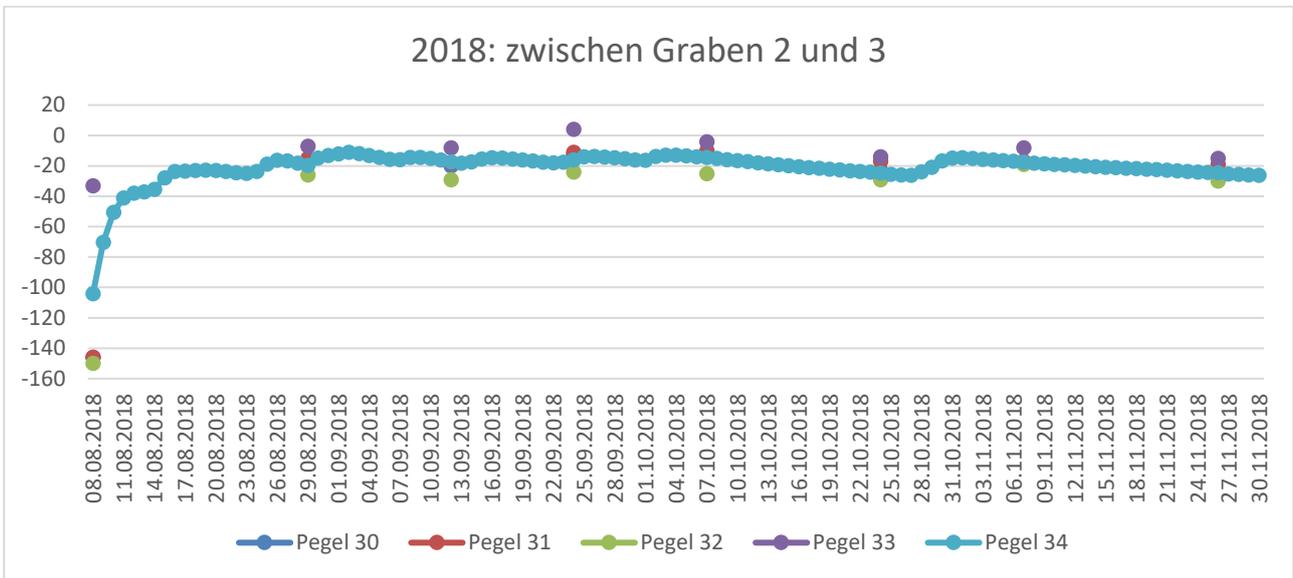
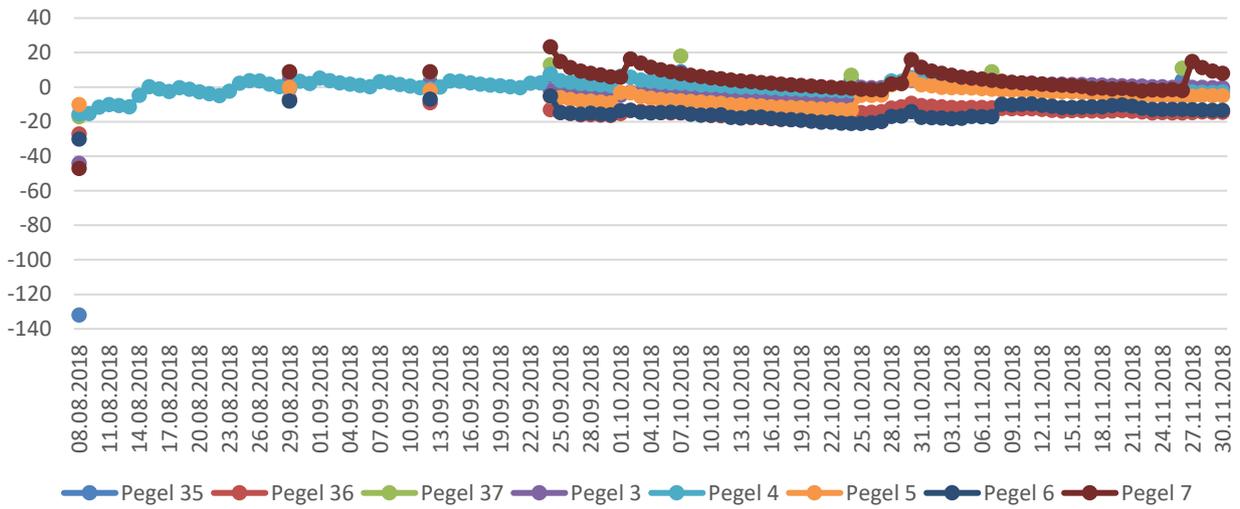
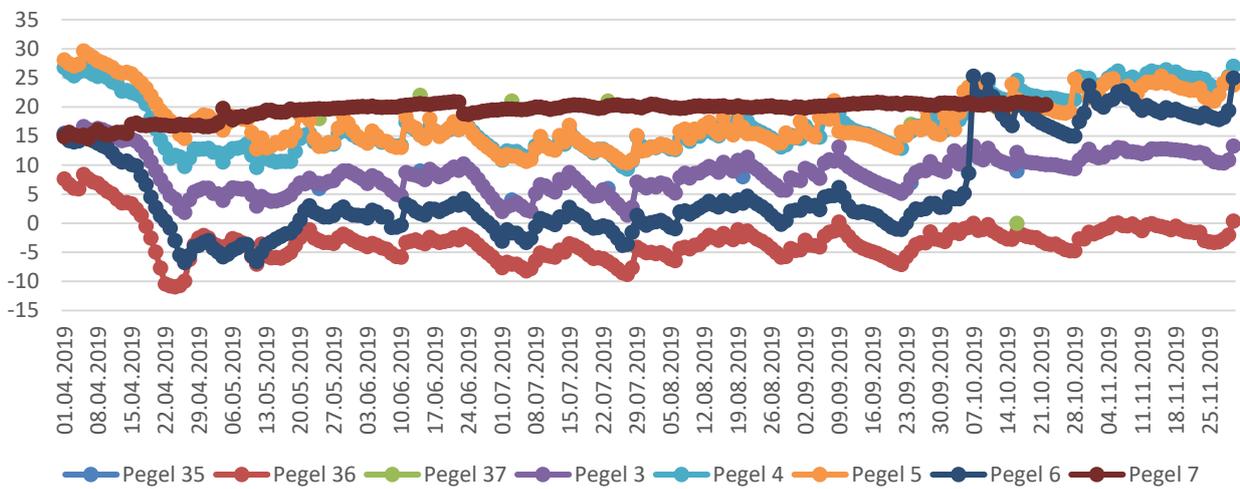


Abbildung 56-58: Pegelstände (cm) zwischen Graben 2 und 3

2018: Zwischen Graben 3 und 4



2019: zwischen Graben 3 und 4



2020: zwischen Graben 3 und 4

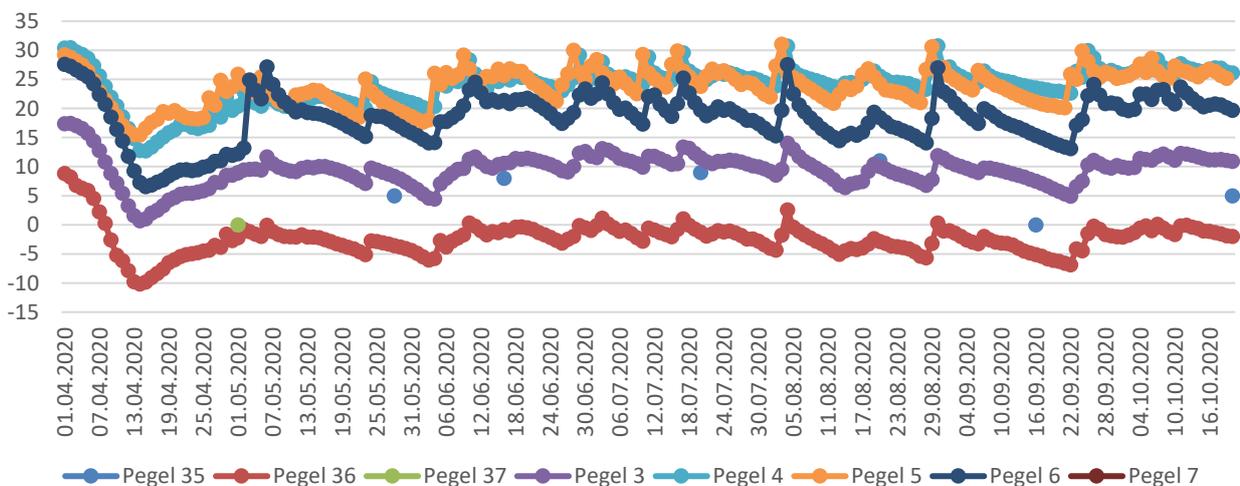


Abbildung 59-61: Pegelstände (cm) zwischen Graben 3 und 4

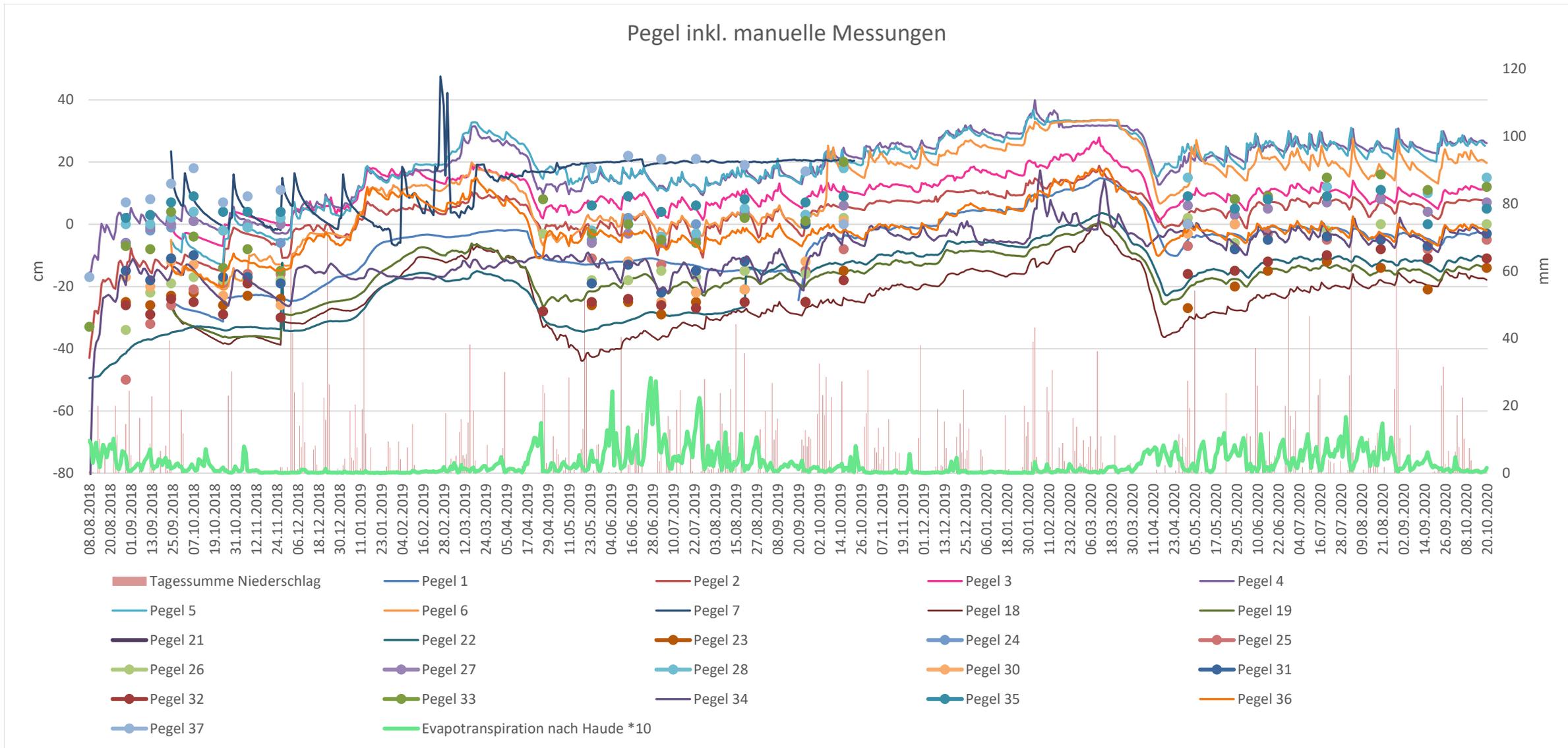


Abbildung 62: Pegelganglinien (cm) über ganze Messperiode 2018-2020 (unkorrigierte Werte, vgl. Kap. 3.3.3).

2 Berechnung der potentiellen Evapotranspiration

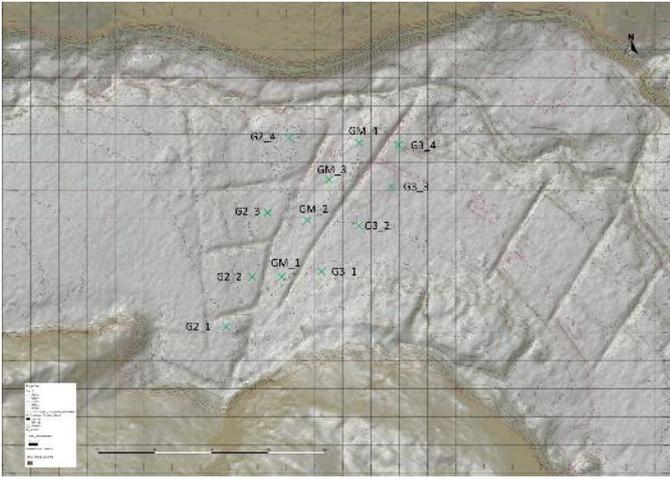
Tabelle 9: HAUDE-Faktoren für eine Auswahl von Pflanzenarten nach HÄCKEL, H. (2016): Meteorologie, 8. Aufl., Ulmer-Verlag, S.85.

Monat	Wiese	Rasen	Mais	Buche	Fichte
Januar	0,20	0,20	0,11	0,01	0,08
Februar	0,20	0,20	0,11	0,00	0,04
März	0,25	0,23	0,11	0,04	0,14
April	0,29	0,24	0,17	0,10	0,35
Mai	0,29	0,29	0,21	0,23	0,39
Juni	0,28	0,29	0,24	0,28	0,34
Juli	0,26	0,28	0,25	0,32	0,31
August	0,25	0,26	0,26	0,26	0,25
September	0,23	0,23	0,21	0,17	0,20
Oktober	0,22	0,20	0,18	0,10	0,13
November	0,20	0,20	0,11	0,01	0,07
Dezember	0,20	0,20	0,11	0,00	0,05

Tabelle 10: Monatssummen Niederschlag und ETp nach Haude

Monat	Monatssumme ETp nach Haude (mm)	Monatssumme Niederschlag (mm)	Wasserüberschuss (mm)
Aug. 18	24,29	131,80	107,51
Sept. 18	8,20	133,40	125,20
Okt. 18	5,14	67,40	62,26
Nov. 18	2,58	6,00	3,42
Dez. 18	0,97	359,80	358,83
Jan. 19	0,55	169,80	169,25
Feb. 19	1,21	38,20	36,99
Mär. 19	4,18	156,20	152,02
Apr. 19	10,30	100,20	89,90
Mai 19	7,52	188,60	181,08
Jun. 19	30,84	105,20	74,36
Jul. 19	24,41	150,80	126,39
Aug. 19	13,89	194,00	180,11
Sept. 19	5,25	145,40	140,15
Okt. 19	4,62	238,60	233,98
Nov. 19	1,43	125,20	123,77
Dez. 19	1,88	131,40	129,52
Jan. 20	0,76	79,60	78,84
Feb. 20	2,55	225,60	223,05
Mär. 20	2,82	114,20	111,38
Apr. 20	14,80	29,40	14,60
Mai 20	14,75	142,40	127,65
Jun. 20	11,85	217,20	205,35
Jul. 20	18,93	147,20	128,27
Aug. 20	17,41	314,00	296,59
Sept. 20	6,79	95,80	89,01
Okt. 20	1,93	78,40	76,47

3 Bilddokumentation Beprobung Gross Moos 6.6.18



G2_1:



G2_2:



G2_3:



G2_4:



GM_1:



GM_2:



GM_3:

Foto vergessen

GM_4:



G3_1:



G3_2:



G3_3:



G3_4:



4 Beratungs-, Informationstätigkeit und Präsentationen *max.moor* 2019-2020

Beratung:

- Interview mit COWI, Ecologic and the Institute for European Environmental Policy (IEEP) zur Studie: Results Based Carbon Farming schemes for peatlands (2020)
- WWF Freshwater: Mitigationpotential von Gewässerlebensräumen
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Hochschule für Wirtschaft und Umwelt, Institut für Landschaft und Umwelt zusammen mit der Flächenagentur Baden-Württemberg GmbH: Beratung zur Entwicklung einer Plattform für die freiwillige CO₂-Kompensation mit Schwerpunkt auf Wiedervernässung von Mooren (2021)
- ArmaSuisse: CO₂-Abschätzungen im Wald und Moor des VBS (2021)

Präsentation-Information:

- Regionaltagung mutterkuh.ch: Mittelland West (Bern Mittelland/Deutschfreiburg) am 05.02.2020
- BAFU-Exkursion Moorlandschaften 02.10.2020
- Forum Früherkennung Biodiversität und Landwirtschaft 03.11.2020
- Generalversammlung IG-Pfäffikersee (Corona-bedingt verschoben)
- Tagung Innovationsprojekt Umgang mit drainierten Böden; AG, BE, ZH
- Fachaustausch Moore BAFU (2018)
- Umgang Glaubenberg: Austauschsitzung Armasuisse, Kt. LU, ProNatura, BAFU
- Information/Kontakt: Carbontrading Renaud Bettin, FR; Arnoud de Vries Milieufederatie, NL

Medien:

- Trend SRF-Radio Wirtschaftsmagazin
- Une Seule Planète: RTS-télévision (Januar und April 2019)
- Schweiz aktuell (6.12.2017)

Publikationen, die den *max.moor*-Standard aufgreifen:

- UBA, (2019), Designing an International Peatland Carbon Standard: Criteria, Best Practices and Opportunities - Final report. CLIMATE CHANGE 42/2019. Dessau-Roßlau.
- UBA, (2018), Ratgeber: Freiwillige CO₂-Kompensation durch Klimaschutzprojekte. Dessau-Roßlau.