

The background image is a photograph of a natural bog landscape. In the foreground, there is a small, dark, still pond reflecting the sky and surrounding vegetation. To the left of the pond, tall, thin reeds grow densely. The ground is covered with a thick layer of green moss and some dry, yellowish grass. In the background, a line of dark evergreen trees is visible against a clear sky. The overall scene is a typical representation of a wetland or bog environment.

HANGBRÜCHER IM SÜDWESTDEUTSCHEN MITTELGEBIRGE HUNSRÜCK

*Genese, Torfwachstum, Kohlenstoffbilanz und Zukunftschancen
Ergebnisse des MoorWaldBilanz-Projektes*

18

Im Projekt MoorWaldBilanz wurde die Kohlenstoff-Speicherung in den Hunsrück-Hangbrüchern und in den darauf stockenden Moorwäldern in der Region des Nationalparks Hunsrück-Hochwald flächendeckend bilanziert. Diese schützenswerten Quell- und Hangbruchbiotope mit ihren Moorwäldern sind einzigartige Lebensraumtypen im Hunsrück. Jedoch wurden seit dem 19. Jahrhundert in den hochsensiblen Moorwaldflächen systematisch Netze von Entwässerungsgräben angelegt und unterhalten, um diese Standorte für die Holzproduktion, insbesondere für die Fichte, nutzen zu können. Um die typischen Eigenschaften der Hangmoore wiederzugewinnen, müssen sie möglichst schonend und an ökosystemare Prozesse und Kreisläufe angepasst, wiedervernässt und renaturiert werden. Daher wurde im Projekt MoorWaldBilanz der Wasserhaushalt und die Möglichkeit der Kohlenstoffbevorratung von ausgewählten Hangmooren untersucht – auch nach Renaturierungsmaßnahmen. Tritt Hangzugwasser in Quellen oder im sogenannten Return flow an die Oberfläche, entstehen Torfauflagen, wenn die Torfmoose dort dauerhaft vernässt bleiben. In den Hangbrüchern wurden oft nur Torfauflagen bis 10 cm Mächtigkeit festgestellt, seltener 40 cm, im Einzelfall aber auch bis zu 100 cm. Die Torfauflagen passen sich dann in das Mikro-Oberflächenrelief des Geländes ein. Zwischen 70 und 90 % der Kohlenstoffvorräte (0 – 200, maximal 800 t ha⁻¹) befinden sich in der Torfauflage und in den Wurzelbiomassen der aufstockenden Bäume. Nur ein Viertel oder weniger ist im jeweils aufstockenden Moorwald oder im künstlich eingebrachten Fichtenwald gespeichert. Wenn die Torfauflagen bei künstlichen Störungen des Wasserhaushaltes durch z.B. Entwässerungsgräben, Wegebau oder auch bei Kahlschlag durchlüftet werden, mutieren die Hunsrückbrücher von einer Kohlenstoffs Senke zur Kohlenstoffquelle. Zur Unterstützung der Kohlenstoffsinkenfunktion muss der Wasserhaushalt der Hangbrücher so gestaltet werden, dass die Torfauflage permanent vernässt ist und Zersetzeraktivitäten gehemmt werden. Torf-Altersdatierungen lassen darauf schließen, dass Torf nur in den Kältephasen des Holozäns aufgebaut, aber in Wärmephasen wieder abgebaut wurde. Unter Berücksichtigung einer Klimaerwärmung besteht damit die Gefahr, dass die Hangbrücher in Zukunft zurückgehen oder ganz verschwinden werden.

Einleitung

Im Rahmen des vom Waldklimafonds geförderten Forschungsprojektes „MoorWaldBilanz“ wurden in einer Kooperation zwischen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, der Universität Trier, der Universität Würzburg, der Fa. UDATA und dem Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz

hydrologische, pedologische und geobotanische Untersuchungen an ausgewählten Hangbruchstandorten im und im Umfeld des Nationalparks Hunsrück-Hochwald durchgeführt (SCHÜLER et al. 2020). Die Hangbruchstandorte wurden kartiert und mit Messeinrichtungen für ein langfristiges Monitoring versehen. Bislang gab es nur wenige Untersuchungen zu den Hangbrüchern des Hunsrücks, z. B. von REICHERT (1975), LEHMANN (1986),

RUTHSATZ & HOLZ (1997) und RUTHSATZ (1999, 2000). Oft wurde auf die Kartierarbeiten von HOFFMANN (1957) verwiesen, der aber nur ein Konglomerat aus anstehender Staunässe, organischer Auflagenmächtigkeit und Länge der Durchnässungsphase im Hinblick auf die Anbauwürdigkeit der Baumart Fichte klassifiziert hat.

Verschiedene Untersuchungsansätze sollen nun die Genese der Hangbrücher im Hunsrück und ihre wichtige Rolle im Kohlenstoffhaushalt sowie die Bedeutung der Hangbrücher als einzigartigen Lebensraum (SCHÜLER 2012) beleuchten. Gleichzeitig sollen Hinweise für Maßnahmen erarbeitet werden, um den Lebensraum Hangbrücher zu erhalten oder zu fördern.

Geobotanische Untersuchungen und Altersdatierungen

Bei den geobotanischen Untersuchungen wurden die Torfe auf ihre botanische Zusammensetzung analysiert und Altersdatierungen durchgeführt. ^{14}C - und OSL-Altersdatierungen lieferten die entscheidenden Hinweise auf die Ökologie und Genese der Hangbrücher des Hunsrücks. Die ^{14}C - oder Radiokohlenstoffdatierung ist ein Verfahren zur radiometrischen Datierung kohlenstoffhaltiger, insbesondere organischer Materialien. Die OSL (Optisch stimulierte Lumineszenz)-Analyse kann zur Datierung von Sedimenten genutzt werden, indem beim Erhitzen von natürlich

vorkommenden Mineralien, wie z. B. Quarz oder Feldspat, vorher in deren Kristallgitter gespeicherte Energie in Form von Licht abgegeben wird (BALTER 2011). Dabei wird das Ereignis der letzten Belichtung durch Sonnenlicht datiert. Diese Sedimentaltersdatierungen zeigten, dass der mineralische Untergrund zuletzt im frühen bis mittleren Holozän belichtet wurde. Die ältesten Torfreste in den Hangbrüchern wurden mittels der ^{14}C -Altersdatierung auf ein Alter von etwa 3100 Jahren datiert. Überwiegend beläuft sich das Alter der Torfe jedoch nur auf wenige 100 Jahre. KOPF (2019) hat gezeigt, dass das Torfwachstum der Hunsrückbrücher im Zusammenhang mit klimatischen Kältephasen steht. Es darf also davon ausgegangen werden, dass in den Kältephasen des Holozäns Torf aufgebaut und in Wärmephasen wieder abgebaut wurde. Damit unterliegen die Hangbrücher einer Dynamik von Torfauf- und -abbauprozessen, die die Einwirkung von holozänen Klimaschwankungen wiedergeben.

Wasserhaushalt der Hangbrücher

Der Weg des Hangzugwassers und die Einflüsse auf den Bodenwasserhaushalt und damit auf die Wasserversorgung der Hangbrücher wurden durch eine Kombination aus Geoelektrik und geoelektrischem Monitoring, Bodenradar, Rammkernsondierungen sowie GIS-basierter Reliefanalyse von TRAPPE & KNEISEL (2019b) untersucht.

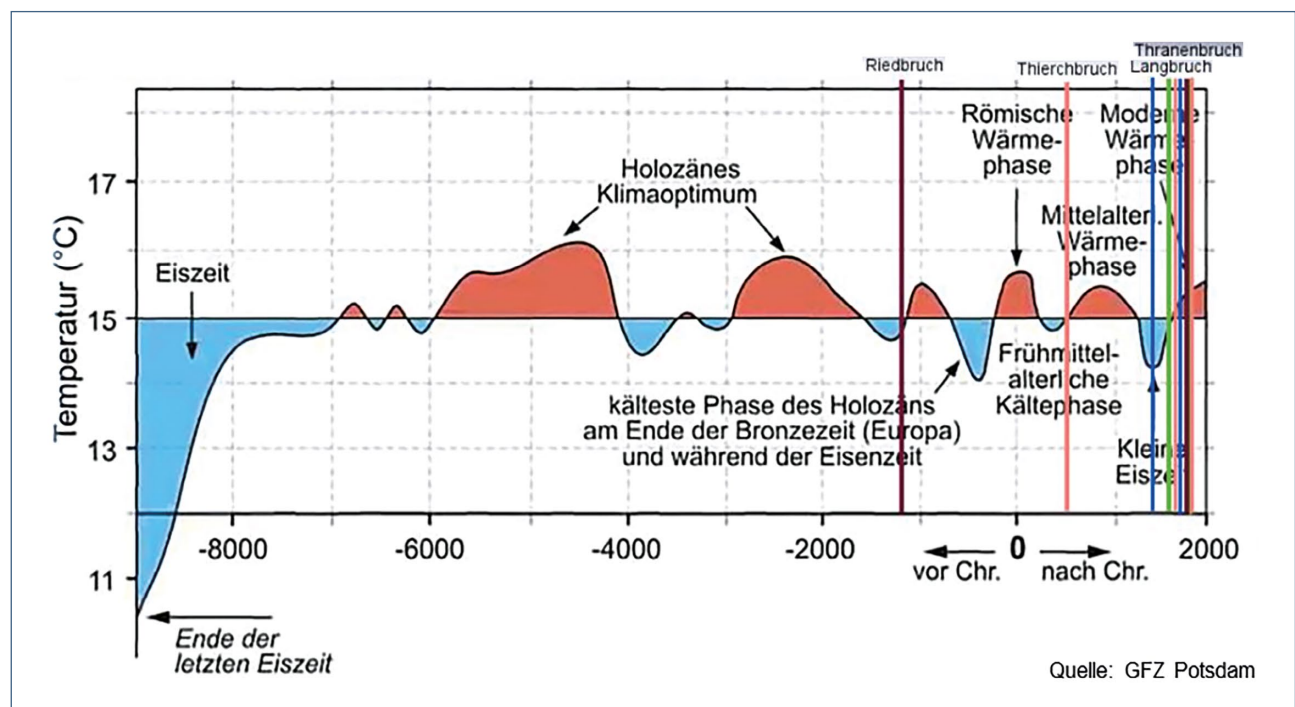


Abbildung 1: Altersdatierung der untersuchten Hangbrücher und Einstufung in das Klimageschehen der letzten 3000 Jahre (Quelle: SCHÜLER et al. 2020)

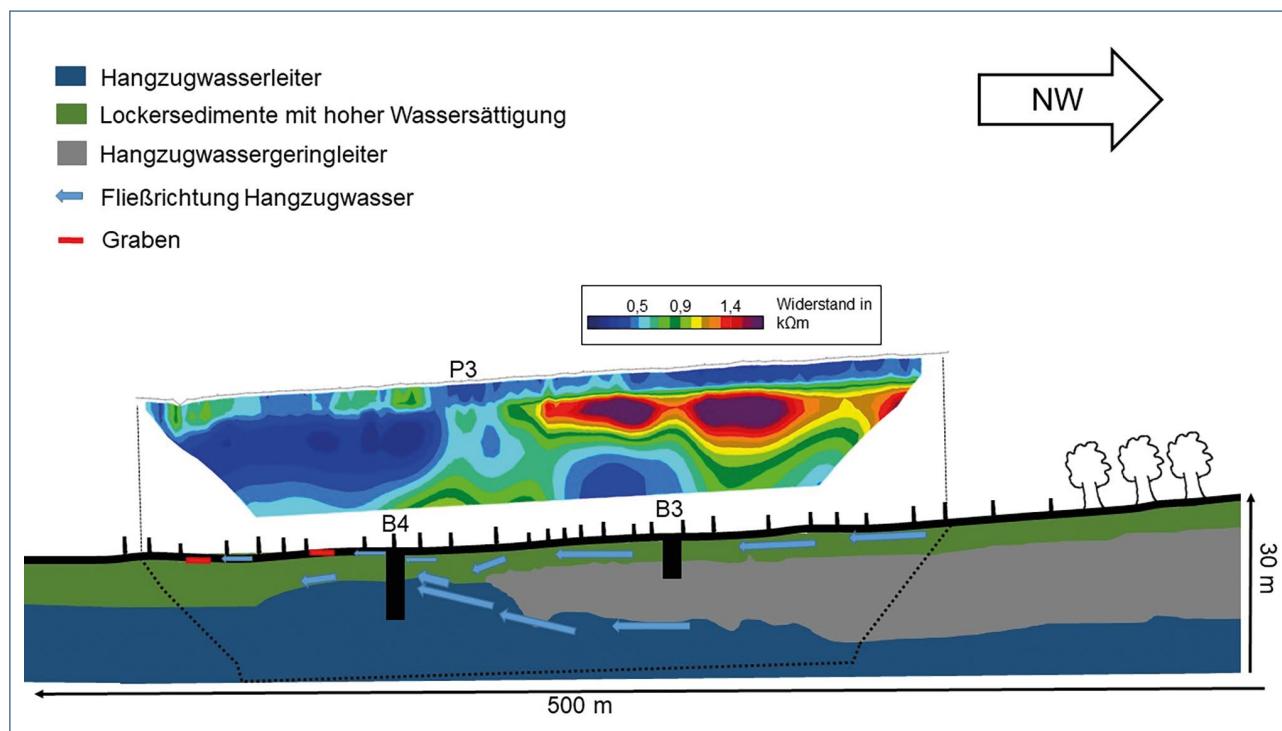


Abbildung 2: Beispiel für die hydrogeologischen Verhältnisse (Quelle: TRAPPE & KNEISEL 2019a)

Mit diesem Multimethoden-Ansatz konnten TRAPPE & KNEISEL (2019b) konzeptionelle Modelle der Hydrogeologie des oberflächennahen Untergrundes ableiten. Demnach fließt das Hangzugwasser im geklüfteten Quarzit, quarziti-schen Schutt oder auch in den periglazialen Deckschichten hangabwärts oberhalb stauender Lagen von ungeklüftetem Quarzit oder von Tonschiefer. Initialpunkte, an denen Torfauf-lagen entstehen können, finden sich beim Austritt des vom Regenwasser gespeisten Hangzugwassers im Bereich von Quellen als auch bei einem Return flow, wenn die sich ansiedelnden Torfmoose aufgrund des Mikroreliefs

der Mineralbodenoberfläche dauerhaft vernässt bleiben.

Hydrologisch sind die Hangbrücher daher den Quell- und von ungespanntem Hangwasser versorgten Durch"fluss"mooren oder Durch"strömungs"mooren zuzuordnen, wobei nach SUCCOW (1988), SUCCOW & JOOSTEN (2001) sowie SUCCOW et al. (2012) letztere mehr durch einen mineralreicheren Grundwasserstrom geprägt sind. SUCCOW hatte dabei jedoch die mesotroph-eutrophen Hangmoore Ostdeutschlands im Blick. Denn auch in den Hangbrüchern des Hunsrücks besitzt das Hangzugwasser Mineralbodenwassercharakter, aber es ist oberflächennah

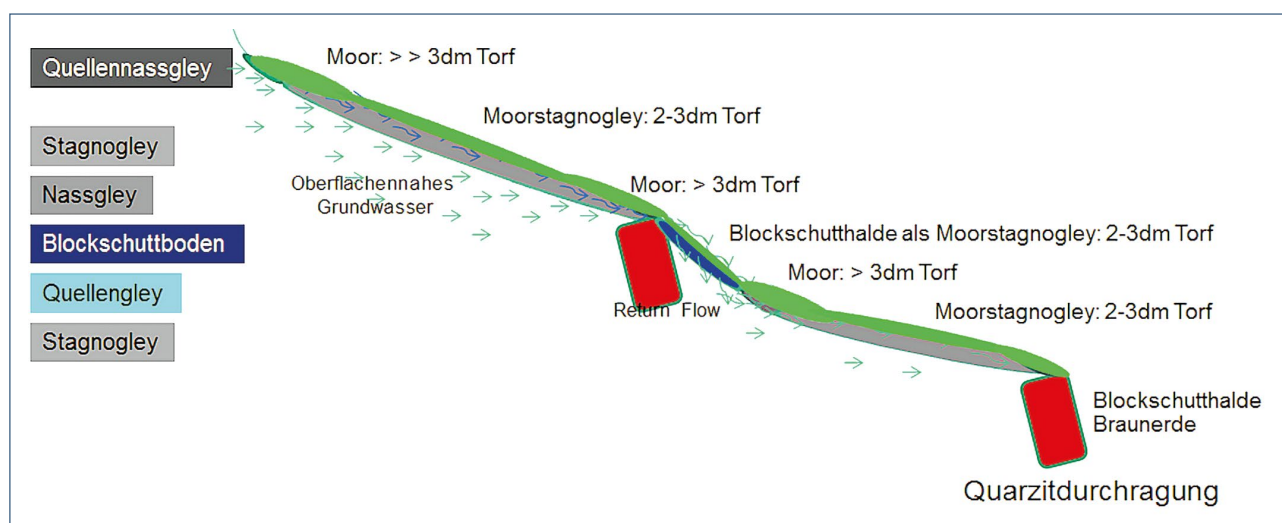


Abbildung 3: Interflow, Quellaustritte und Return flow sind die Voraussetzung zur Entstehung der Hangbrücher

(Quelle: DEHNER & STEINRÜCKEN 2019)

durch den dort anstehenden Hauptgrundwasserleiter, das arme Ausgangsgestein des Taunusquarzits und dessen arme Verwitterungsprodukte, geprägt. Die Hangbrücher entwickelten sich deswegen zu sauren und nährstoffarmen Ökosystemen. Botanisch wie auch bodenkundlich könnten Hangbrücher zwar den oligotrophen Niedermooren mit Übergangsmoortorfen zugeordnet werden, sie sollten jedoch als eigene Kategorie ‚Hangbruch‘ geführt werden.

Bei den hydrologischen Untersuchungen wurden die Wasserstände des ungespannten Grundwassers und die geoökologischen Begleitparameter gemessen, um Hinweise auf die Entstehungs- und Existenzbedingungen der Torfe in den Hangbrüchern zu erhalten (KOPF 2019).

Niederschläge haben einen indirekten Einfluss auf die Hangbrücher. Denn der Interflow, der die Hunsrückbrücher speist, reagiert fast ohne zeitliche Verzögerung auf Niederschlagsereignisse und kann auch innerhalb von wenigen Stunden nach Beendigung des Niederschlagsereignisses wieder deutlich abnehmen.

Bei zusätzlichen starken anthropogenen Störungen des Wasserhaushaltes, wie Entwässerungsgräben, Wegebau mit Wegebegleitgräben und Rohrdurchlässen sowie die flächige Entnahme des aufstockenden Waldbestandes (Entnahme des Verdunstungsschutzes, negative Veränderung des Mikroklimas und verstärkte Einstrahlung), sinkt der freie Wasserspiegel ab, die Torfauflage wird durchlüftet

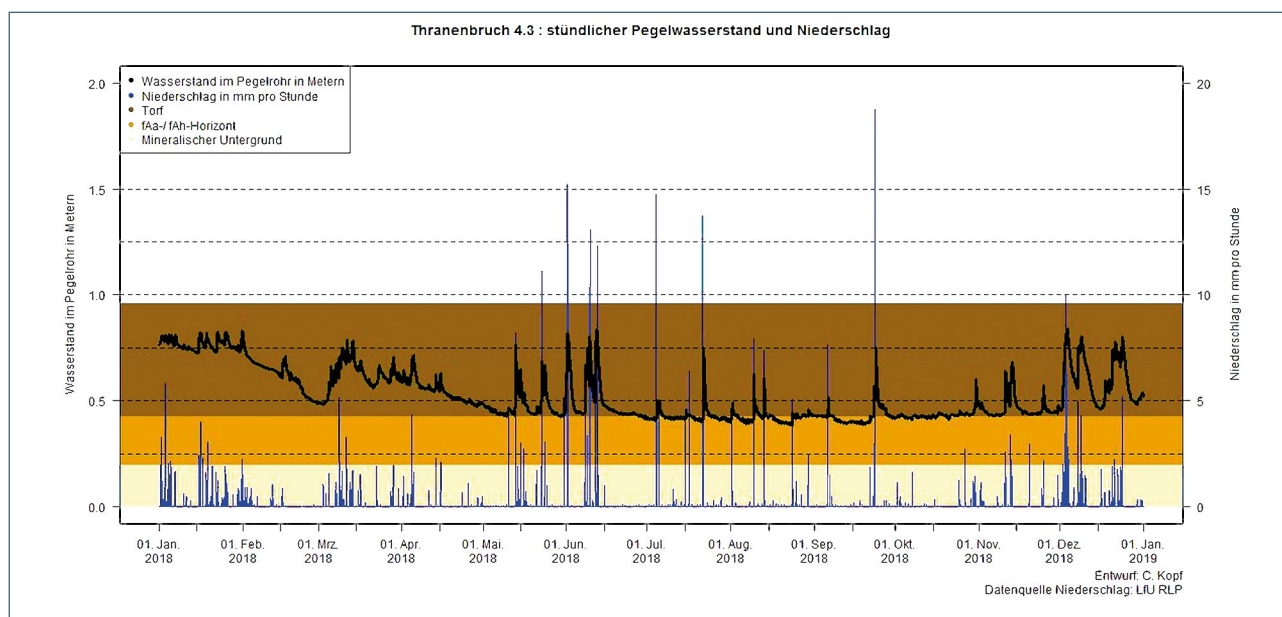


Abbildung 4: Periodische Austrocknung im Thranenbruch (Quelle: KOPF 2019)

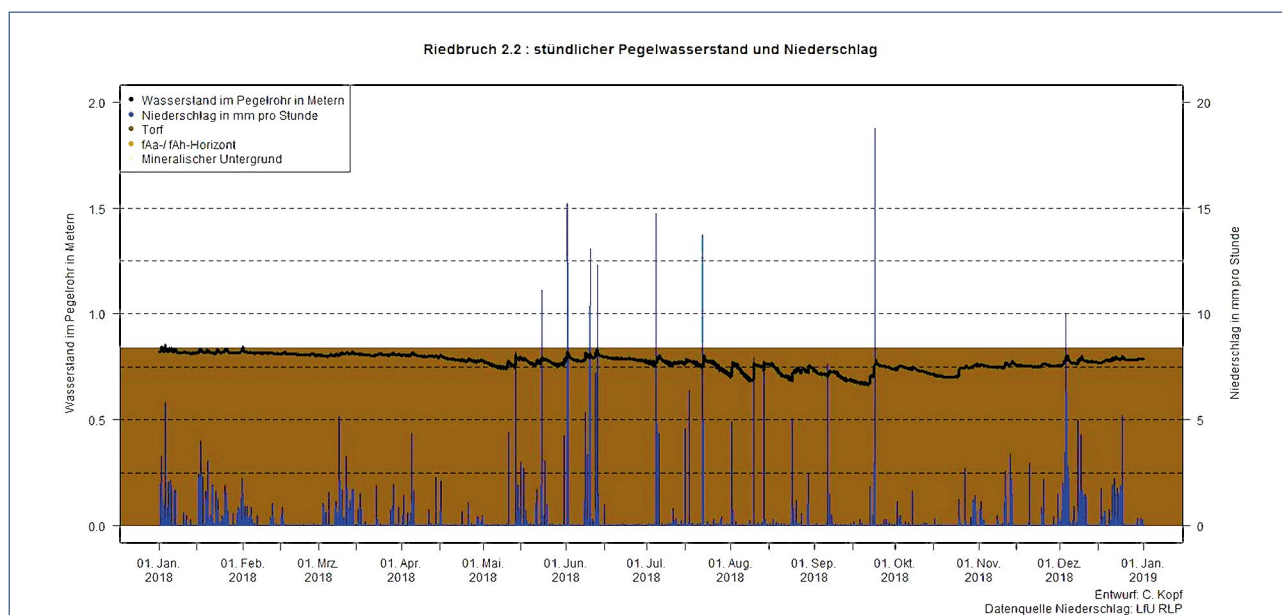


Abbildung 5: Permanente Durchfeuchtung der Torfauflage im Riedbruch (Quelle: KOPF 2019)

und kann periodisch austrocknen (Bsp.: Thranenbruch). Insbesondere, wenn gleichzeitig die Umgebungstemperaturen eine erhöhte biologische Aktivität der Zersetzerorganismen zulassen, wird Torf abgebaut. In diesem Fall entwickeln sich die Hunsrückbrücher von einer Kohlenstoffs Senke zur Kohlenstoffquelle.

KOPF (2019) zeigte aber auch, dass ungespanntes Grundwasser permanent in den obersten Zentimetern der Torfauflage anstehen kann, wenn es das Mikrorelief und die oberflächennahe Wasserführung durch das Bodensubstrat zulassen und wenn die Hangbrücher keine ‚wesentlichen‘ anthropogenen Beeinträchtigungen aufweisen (Bsp.: Kernbereich des Riedbruchs).

Kartierungsergebnisse

HÖLZER & SCHLOSS (2019) haben nachgewiesen, dass an zahlreichen Stellen im Nationalpark Torfmoose zu finden sind, ohne dass sich jedoch überall gleich ein darunterliegender Torfkörper gebildet hätte. Voraussetzung für die Erhaltung und das Wachstum der Torfauflage sind eine permanente Durchfeuchtung und niedrige Temperaturen, so dass biologische Abbauprozesse gehemmt werden und sich Torf akkumulieren kann.

Bei den pedologischen Untersuchungen wurden die Torfmächtigkeiten und die flächenhafte Ausdehnung der Hangbrücher untersucht. In Profilgruben wurden pedologische, geophysikalische und -chemische Bodenparameter erfasst. Die Kartierung von Böden und Torfauflagen ergab eine gute Übersicht über die potenziellen Standorte der Moorbildung in den Hangbrüchern.

Auf engstem Raum entstehen Hangbrücher in einem Mosaik von verschiedenen Bodentypen mit Übergängen von organischen Böden zu hydromorphen, mineralischen Böden.

Die Kartierungsergebnisse beschreiben die Torfmächtigkeiten und belegen die erhebliche Heterogenität der Hangbrücher des Hunsrücks. In Abhängigkeit des kleinstandörtlichen Wasserhaushaltes und der damit verbundenen Torfaufbau- und -abbauprozesse, die wiederum durch die vorherrschenden Klima- und Wetterbedingungen gesteuert wurden, variieren die Torfmächtigkeiten in den Hangbrüchern erheblich. Auf der überwiegenden Fläche in den Hangbrüchern wurden organische Auflagen von maximal nur 10 cm Mächtigkeit festgestellt. Mächtigkeiten der Torfauflagen von mehr als 40 cm sind schon verhältnismäßig selten anzutreffen, im Einzelfall sind die Torfauflagen aber auch bis zu 100 cm mächtig.

IM ÜBERBLICK

- > Die ältesten Torfreste in den Hangbrüchern sind etwa 3100 Jahre alt, überwiegend jedoch nur wenige 100 Jahre
- > Torfauflagen entstehen beim Austritt von Hangzugwasser, wenn Torfmoose dauerhaft vernässt bleiben
- > Die Torfmächtigkeiten variieren von meist nur 10 cm, seltener mehr als 40 cm und im Einzelfall bis zu 100 cm
- > Entsprechend sind auch die Kohlenstoffvorräte sehr heterogen verteilt (meist 0-200 t/ha, vereinzelt bis 800 t/ha)
- > Durch großflächige Nutzung der Hangmoore trocknet die oberste Torfschicht aus und die Torfmoose und typischen Moorpflanzen werden geschädigt
- > Zur Unterstützung der Kohlenstoffsenkenfunktion muss der Wasserhaushalt der Hangbrücher naturnah erhalten werden
- > Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass die Hangbrücher unter den Bedingungen des Klimawandels zurückgehen, wenn nicht gar verschwinden werden

Kleinstandörtlich befinden sich terrestrische und hydromorphe Flächen in unmittelbarer Nachbarschaft, je nach den Fließbahnen des Hangzugwassers. So ist es charakteristisch, dass sich die etwas mächtigeren Torfauflagen entlang der Fließbahnen des Hangzugwassers entwickelt haben. Sie folgen damit dem Mikro-Oberflächenrelief des Geländes, welches durch die Kraft des fließenden Wassers gestaltet wurde. Diese Kraft des fließenden Wassers im Interflow wird auch dadurch dokumentiert, dass unter der organischen Auflage die Hauptlage im mineralischen Boden oft flächig wegerodiert wurde.

Hinzu kommen jedoch auch anthropogene Einflüsse auf das Oberflächenrelief, z. B. durch die Anlage von Drainagegräben. In manchen dieser Gräben haben sich im Laufe der Zeit sogar Torfmoose angesiedelt, ohne weggeschwemmt zu werden.

Diese Erkenntnisse sind wichtig für Maßnahmen zur Erhaltung und Förderung dieser wasserabhängigen Lebensräume, z. B. bei der Wiederherstellung eines naturnahen Wasserhaushaltes durch den Rückbau und den Verschluss von künstlichen Gräben. Sie lassen beurteilen, wann und ob Gräben in potenziellen, aber drainierten Hangmooren verschlossen werden sollen. Damit kann vermieden werden, dass natürliche Prozesse der Torfbildung nicht durch Maßnahmen zur Regulierung des standörtlichen Wasserhaushaltes gestört werden. Ein Grabenverschluss ist nur angezeigt, wenn Gräben zur Tiefenerosion neigen und nicht Teil des natürlichen, reliefbedingten Entwässerungssystems sind.

Kohlenstoffspeicherung in den Hangbrüchern

In den Hangbrüchern weisen die meisten Torfe eine starke Zersetzung mit Zersetzungsgraden von h6-h10 (nach VON POST 1922) auf, die aerobe Bedingungen während der Akkumulation von organischem Material aufgrund des aktuellen oberflächennahen Wasserhaushaltes anzeigen. So geht der zunehmende Zersetzungsgrad immer auch mit einem abnehmenden Gehalt an organi-

scher Substanz einher. Die Kohlenstoffgehalte mit 40 bis 45 % in schwach zersetztem und mit 30 bis 40 % in stärker zersetztem Torfmaterial sind im Vergleich zu anderen Mooren gering (WÜST-GALLEY et al. 2016), aber vergleichbar z. B. zu den organischen Böden aus der Studie von ROSSKOPF et al. (2015) (KRÜGER et al. 2019).

Eine Störung des Wasserhaushaltes in den Hangbrüchern mit nachfolgender Mineralisierung führt zu einer erhöhten Lagerungsdichte der Torfe mit typischen Werten von mehr als $0,15 \text{ g/cm}^3$ (LEIFELD et al. 2011; KRÜGER et al. 2015). Ungestörte Moore weisen dagegen Lagerungsdichten unter $0,10 \text{ g/cm}^3$ auf (MINKKINEN & LAINE 1998; WÜST-GALLEY et al. 2016; LEIFELD et al. 2011; KRÜGER et al. 2016). Diese Beobachtung wird durch ein landesweites Monitoring in Finnland von entwässerten und nicht entwässerten Mooren bestätigt (MINKKINEN & LAINE 1998). Mit den Analyseergebnissen der Kohlenstoffgehalte und den Lagerungsdichten in den einzelnen Torflagen lassen sich in Kombination mit den Kartiierungsergebnissen über die Ausdehnung und Mächtigkeiten der Torfauflagen Kohlenstoffvorräte in den Hangbrüchern berechnen.

Analog zu den kartierten Torfmächtigkeiten sind auch die Kohlenstoffvorräte in den Torfauflagen der Hangbrücher sehr heterogen verteilt. In den Hangbrüchern überwiegen

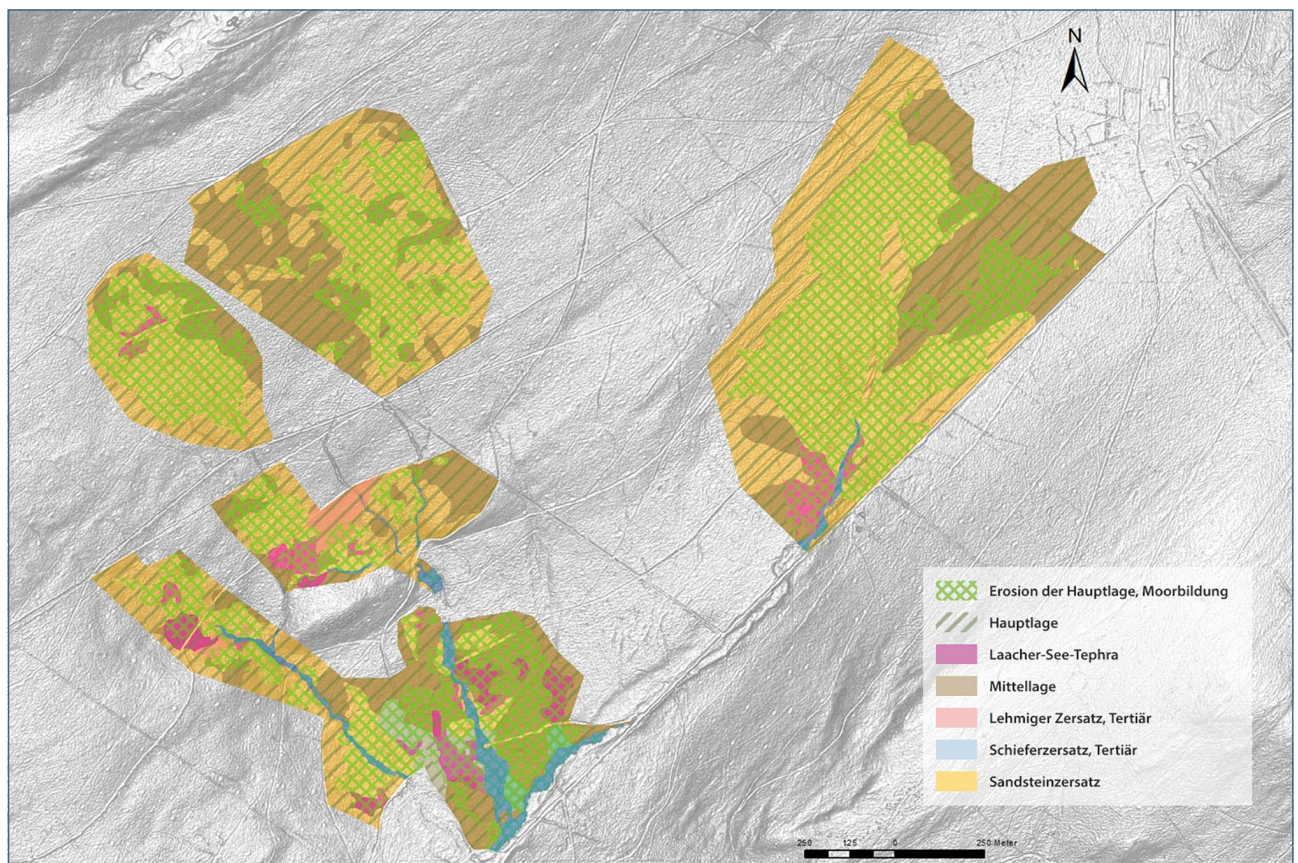


Abbildung 7: Ergebnisse der Bodenkartierung (Quelle: DEHNER & STEINRÜCKEN 2019)

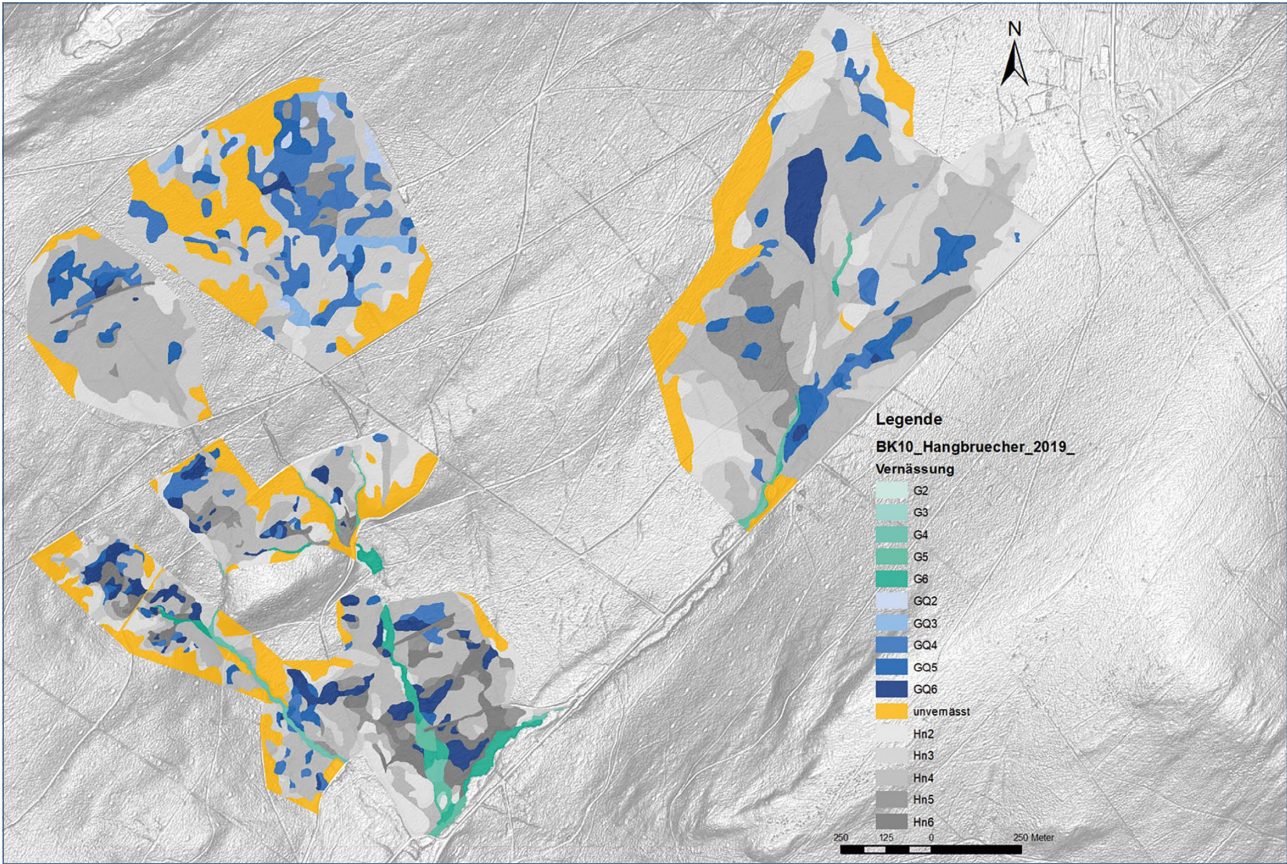


Abbildung 8: Aktuelle Vernässung als Voraussetzung für die Torfbildung und -akkumulation (Quelle: DEHNER & STEINRÜCKEN 2019)

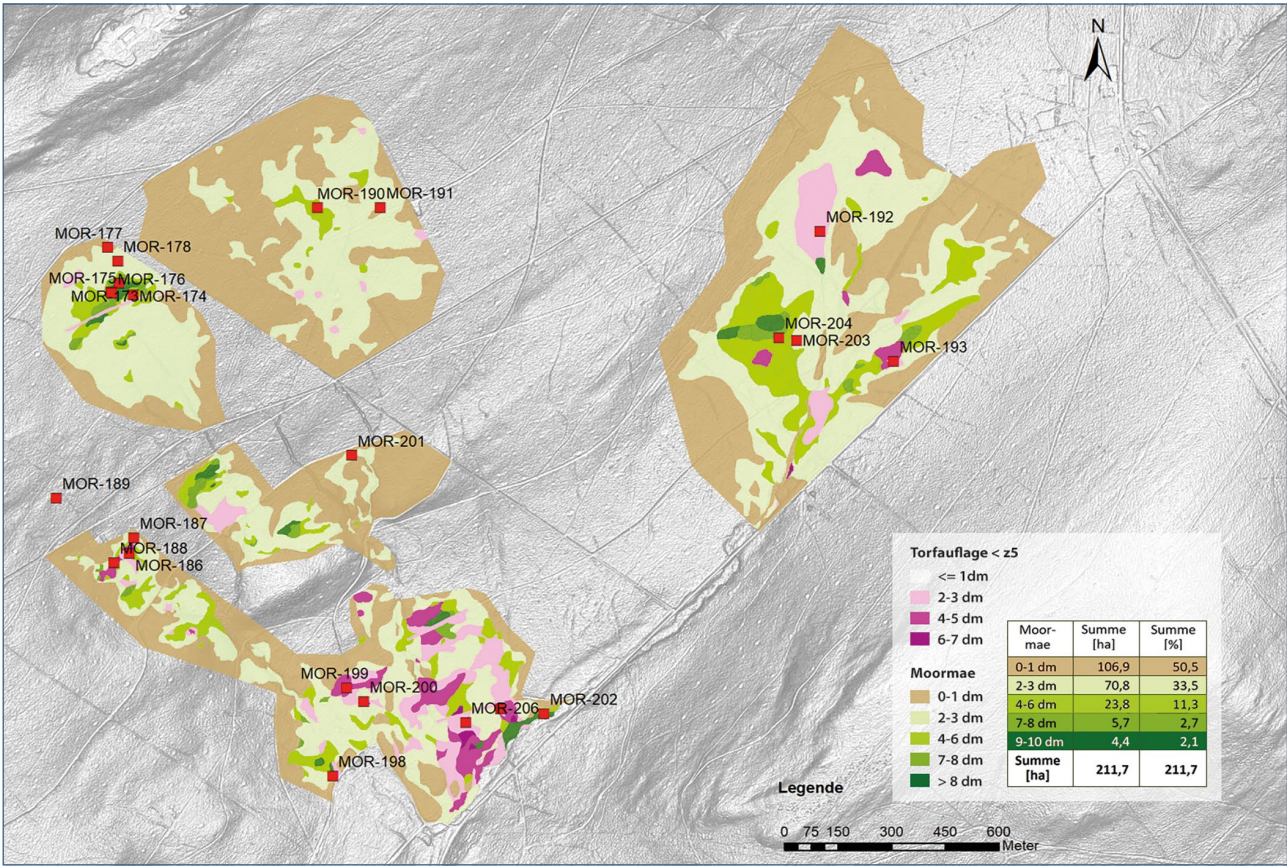


Abbildung 9: Kartierungsergebnisse der Torfmächtigkeiten (Quelle: DEHNER & STEINRÜCKEN 2019)

Flächen mit geringeren Kohlenstoffvorräten zwischen nahezu 0 und 200 t ha⁻¹. Kleinere Teilflächen haben jedoch höhere Kohlenstoffvorräte, vergleichbar zu den von WÜST-GALLEY et al. (2016) untersuchten Mooren in der Schweiz mit durchschnittlich 500 t ha⁻¹. Kleinststandörtlich wurden in den Hangbrüchern des Hunsrücks Kohlenstoffvorräte bis zu 800 t ha⁻¹ berechnet. Im Vergleich dazu steigen in Finnland mit mächtigeren Torfauflagen die Kohlenstoffvorräte sogar über 1000 t ha⁻¹ (MINKKINEN et al. 1999).

Höchste mittlere Kohlenstoffvorräte wurden im naturnahen Riedbruch mit 234 t ha⁻¹ gefunden, während der naturferne mit Fichten bestockte Johannesbruch im Mittel nur 2 t ha⁻¹ Kohlenstoff in der organischen Auflage speichert. Der Johannesbruch wird zwar durch stau-nasse Standorte dominiert, aber wirklich hydromorphe Standortverhältnisse mit Torfauflagen kommen kaum vor.

Um die Auswirkungen möglicher Entfichtungsmaßnahmen auf die Kohlenstoffbilanz abschätzen zu können, wurden die Kohlenstoffvorräte des aufstockenden Fichtenwaldes den Kohlenstoffvorräten in den Torfauf-lagen einschließlich der in den Wurzeln vorhandenen Kohlenstoffvorräte gegenübergestellt.

Die Kohlenstoffvorräte der aufstockenden Fichtenwälder in den Hangbrüchern sind mit durchschnittlich 47 t ha⁻¹ deutlich höher als die von entwässerten Moorwäldern in der borealen Region (MINKKINEN et al. 1999). Naturgemäß variieren die Kohlenstoffvorräte der Waldbestände entsprechend der Baumart, dem Alter, der jeweiligen Bestockungsdichte – insbesondere Blößen mindern den Kohlenstoffvorrat je Hektar erheblich – und der Ertragsklasse. So werden in den Fichten, die in den Hangbrüchern wachsen, stellenweise bis zu 160 t ha⁻¹ Kohlenstoff und mehr gespeichert.

Verschiedene Studien haben gezeigt (OJANEN et al. 2013; MEYER et al. 2013; HOMMELTENBERG et al., 2014), dass Moorwälder trotz Standortentwässerung als rezente Kohlenstoffsinken – im borealen Klimagürtel – fungieren können, wenn die laufende Kohlenstoffspeicherung in einer wachsenden, stabilen Moorwaldgesellschaft eine mögliche periodische Kohlenstofffreisetzung aus der Torfauf-lage kompensieren kann.

Im Thranenbruch, in dem im Zuge der „Renaturierungsmaßnahmen“ die aufstockenden Fichten im Kahlschlag genutzt wurden, betrugen die durchschnittlichen Kohlenstoffbestände der Fichtenwälder ursprünglich 69 t ha⁻¹. Die

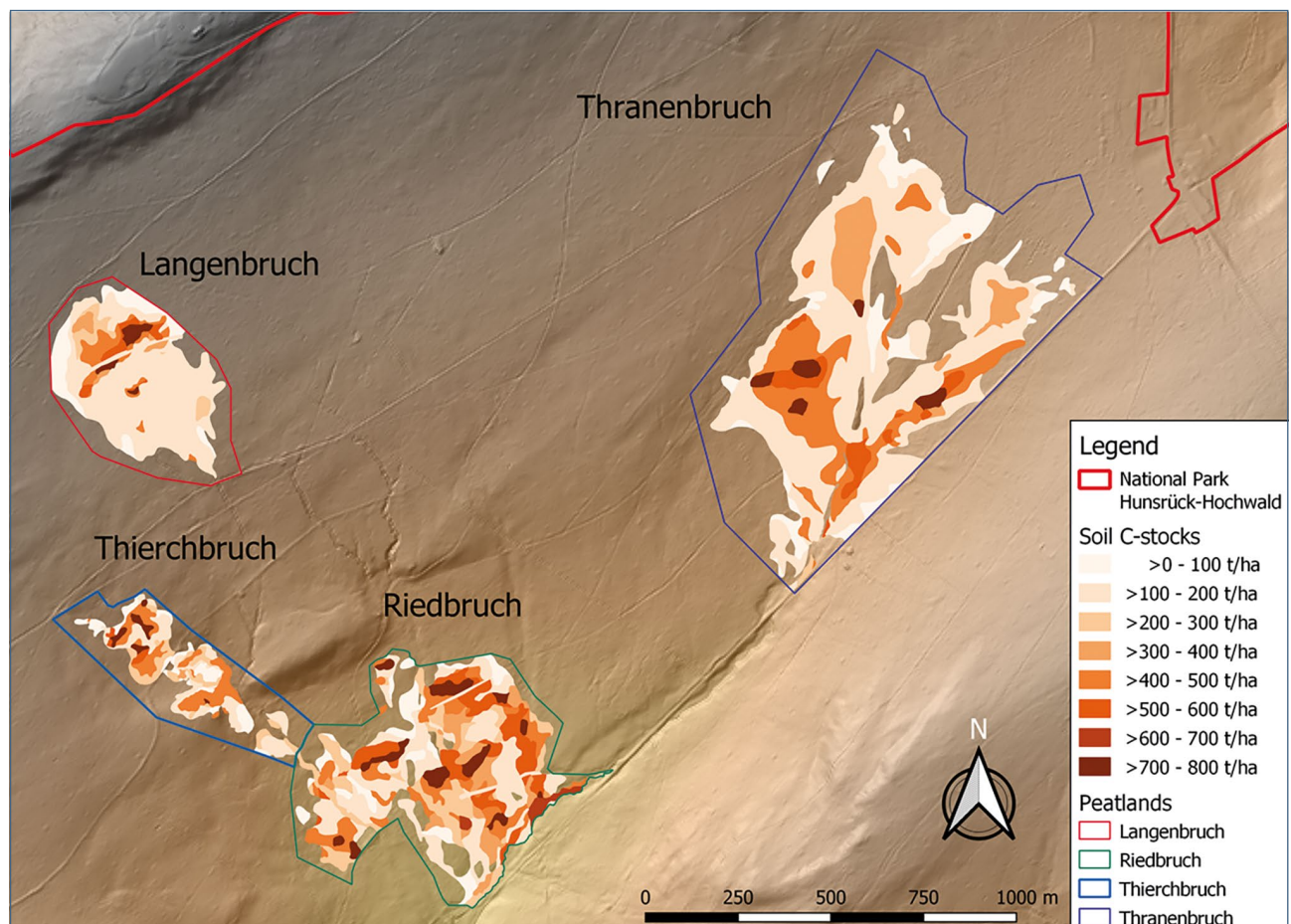


Abbildung 10: Kohlenstoffvorräte in den organischen Auflagen der Hangbrücher des Untersuchungsraumes (Quelle: KRÜGER et al. 2020)

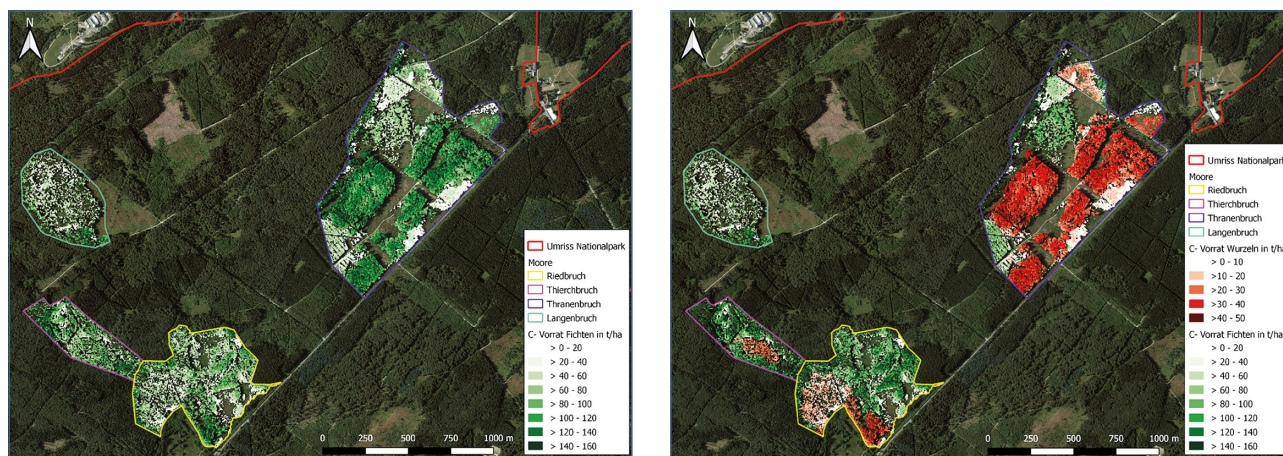


Abbildung 11: Verteilung der Kohlenstoffvorräte der Fichtenflächen in den Hangmooren vor (Grafik links) und nach der Entfichtung (Grafik rechts) (Quelle: KRÜGER et al. 2020)

Fichtennutzung erfolgte hier durch eine Vollbaumernte, so dass auch der Kohlenstoffvorrat, welcher in den Nadeln, im Reisig und in der Rinde gespeichert ist, aus der Fläche exportiert wurde. Nur die Wurzeln der Fichten sind mit ihrem Kohlenstoff in der Fläche verblieben. Der Kohlenstoffvorrat, welcher in den Wurzeln gespeichert ist, kann in älteren Fichtenbeständen 50 t ha^{-1} erreichen, doch auch dieser variiert ähnlich wie beim aufstockenden Fichtenbestand entsprechend dem Alter, der Bestockungsdichte und der Ertragsklasse. Wegen der nassen Standortverhältnisse und der gehemmten Zersetzung von organischer Substanz bleibt dieser Kohlenstoffvorrat der holzigen Wurzelbiomasse jedoch auch nach den Entfichtungsmaßnahmen langfristig im Torf gespeichert (MINKKINEN et al. 2018).

Wird das Stammholz der Fichten einer dauerhaften Nutzung zugeführt, z. B. im Hausbau, so kann zumindest der Kohlenstoff im Stammholz als nachhaltig gebunden angesehen werden, während der Kohlenstoffvorrat in Nadeln, Reisig und Rinde kurzfristig in die Atmosphäre geht (LAINE et al. 1992; MINKKINEN et al. 2002; MÄKIRANTA et al. 2012; OJANEN et al. 2013; SLOAN et al. 2018).

In den untersuchten Hangbrüchern befinden sich trotz aller Heterogenität zwischen 70 und 90 % der Kohlenstoffvorräte in der organischen Auflage (Torf) einschließlich der Wurzelbiomassen. Nur ein Viertel oder weniger des Kohlenstoffes ist im aufstockenden Fichtenbestand gespeichert. Ist ein Hangbruch durch die zurückliegende Fichtenbewirtschaftung und Störung des Wasserhaushaltes jedoch sehr stark degradiert – oder war es nie als Hangmoor ausgebildet –, so werden die Kohlenstoffvorräte diametral zugunsten der aufstockenden Fichtenbestände und zuungunsten des Bodenkohlenstoffvorrates verteilt, wie es das Beispiel des Johannesbruchs mit nur 20 % Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage und in den Wurzeln zeigt.

Ca. 13 % der Fläche des 10.230 ha großen Nationalparks Hunsrück-Hochwald sind potenzielle Hangbruchflächen. In deren Torflagen werden ca. 171.530 t Kohlenstoff gespeichert. Die Hangbrücher des Hunsrücks sind damit neben ihrer Funktion als Kohlenstoffspeicher typische Landschaftsmerkmale des Nationalparks Hunsrück-Hochwald, die einzigartige Lebensräume darstellen.

Tabelle 1: Kohlenstoffvorräte in den Kompartimenten der untersuchten Hangbrücher (verändert nach KRÜGER et al. 2020)

	Fläche [ha]	Kohlenstoffvorrat vor der Entfichtung						Kohlenstoffentzug durch Fichteneinschlag [%]
		Organische Auflage [t/ha]	Wurzelmasse [t/ha]	[%]	Stammholz [t/ha]	Zweige/Nadeln [t/ha]	Gesamt [t/ha]	
Thranenbruch	81	139	11	68	40	29	219	27
Riedbruch	34	234	8	85	30	14	286	4
Thierchbruch	14	125	10	71	37	18	190	4
Langbruch	20	162	4	87	16	7	189	0
Johannesbruch	51	2	7	20	24	11	44	0
Total	200	121	9	73	32	15	177	

Gefährdung der Hangbrücher des Hunsrücks durch Entfichtung

Bei einer großflächigen Nutzung der Fichten im Kahlschlag – wie im Thranenbruch – verändert sich das Mikroklima in den Hangbrüchern in extremer Weise, da die obere Verdunstungsebene oberhalb der Fichtenkronen nun auf die Ebene der Torfmoose reduziert wird. Die Hangbrücher sind häufig wassergesättigt, so dass nun von einer Verdunstung nahe der potenziellen Verdunstung ausgegangen werden muss, welche nur durch atmosphärische Bedingungen, insbesondere durch den Sättigungsdampfdruck in der umgebenden Luft gesteuert wird, während vorher die Spaltöffnungen in den Fichtennadeln entsprechend dem geringer werdenden Wasservorrat in den Böden die aktuelle Verdunstung eingeschränkt haben. Hinzu kommt, dass die Fichtenwurzeln das Verdunstungswasser zumindest teilweise aus mehreren Dezimetern Bodentiefe entnehmen, während im Hangbruch das Wasser unmittelbar aus der Verdunstungsebene stammt, da die Torfmoose keine Wurzeln besitzen und das ungespannte Grundwasser im Idealfall bis an die Oberfläche ansteht. Auch dies verursacht eine Austrocknung der obersten Torfschicht, wie sie KOPF (2019) im Thranenbruch gemessen hat. Selbst eine periodische Austrocknung der Torfauflagen kann bereits die für Hangbrücher typischen Moose und Bodenpflanzen schädigen. Der Grundwasserspiegel in den Hangbrüchern ist der wichtigste Einflussfaktor für die Treibhausgasemissionen. Bei einem Kahlschlag besteht damit die Gefahr, dass zusätzlich zu dem Kohlenstoffexport mit der oberirdischen Fichtenbiomasse – im Thranenbruch immerhin fast 30 % des Gesamtkohlenstoffvorrates – ein Kohlenstoffverlust aus einem gesteigerten Torfabbau hinzuzurechnen ist. Zusätzlich können stärker schwan-

kende Grundwasserstände insbesondere bei der Wiedervernässung der organischen Auflagen zu hohen Lachgas- und Methanemissionen führen. Damit können degradierende Hangbrücher zu Hotspots von Treibhausgasemissionen werden (BASILIKO et al. 2007; JUNGKUNST et al. 2004; KOSKINEN et al. 2016; MOORE et al. 2011; STRACK et al. 2004; TIEMEYER et al. 2016).

Die aktuellen Stoffumsätze, welche von meteorologischen Bedingungen, aber auch von anthropogenen Einflüssen, wie der Entfichtung, gesteuert werden, sind damit ausschlaggebend dafür, ob sich die Hangbrücher zu einer Kohlenstoffsene oder zu einer Kohlenstoffquelle entwickeln (vgl. MÄKIRANTA et al. 2010; RIGNEY et al. 2018). Das Zurücklassen von leicht zersetzlichem Schlagabraum kann die Rate der Kohlenstofffreisetzung durch eine stärkere Zersetzungsrate auch im darunterliegenden Torfboden erhöhen (MÄKIRANTA et al. 2012; OJANEN et al. 2017). Auch KORKIAKOSKI et al. (2019) haben beschleunigte Treibhausgasemissionen als Folge von Kahlschlägen und der Veränderung des Mikroklimas in Mooren identifiziert.

Daher empfehlen RIGNEY et al. (2018), sämtlichen Schlagabraum nach Holzeinschlägen zu entfernen, um die CO₂-Emissionen aus der Zersetzung der Rest-Biomasse zu begrenzen.

Erhaltung und Förderung des Hangbruch-Lebensraumes

Zur Unterstützung der Kohlenstoffsinkenfunktion muss der Wasserhaushalt der Hangbrücher naturnah erhalten werden, so dass die Torfaufgabe nahezu das ganze Jahr permanent vernässt ist und die Zersetzeraktivitäten gehemmt werden. Ist dies nicht der Fall, obwohl das Potenzial einen wertvollen Lebensraum als Hangbruch erwarten lässt, so sollten der Wasserdurchfluss gebremst und lineare Wasserflüsse in der Fläche so verteilt werden,



Abbildung 12: Absterbende und abgestorbene Fichten im nassen Bereich des Riedbruchs (Foto: SCHÜLER)



Abbildung 13: Moorwald mit Moorbirke (*Betula pubescens*) im Gebrannten Bruch (Foto: SCHÜLER)

dass diese Ökosysteme anhaltender mit Wasser versorgt werden. Kann der ungespannte Grundwasserspiegel sogar flächig und dauerhaft angehoben werden, bestehen große Chancen, dass sich eine typische torfbildende Vegetation ansiedeln und ausbreiten kann und dass die Zersetzung der organischen Substanz gebremst wird.

Bei Maßnahmen zur Erhaltung und Unterstützung des Hangbruch-Lebensraumes wird die günstigste Kohlenstoffbilanz dann erreicht, wenn die im Hangbruch wachsenden Bäume belassen werden (vgl. RIGNEY et al. 2018) – unabhängig ob sie der natürlichen Waldgesellschaft angehören oder ob sie Restbestände aus der zurückliegenden Fichtenbewirtschaftung sind. Wenn der Standort zu nass wird und ganzjährig nass bleibt, werden Fichten zunehmend geschwächt und absterben. Langfristig wird sich eine standortangepasste Sukzession, z. B. mit Moorbirke (*Betula pubescens*), einfinden. Diese Sukzession kann sich dann über Jahrzehnte hinweg zu einem Moornwald entwickeln, sofern der Wildbestand dies zulässt.

Der sich entwickelnde Moornwald und die – zwar nur langsam – wachsende Torfauflage speichern den Kohlenstoff, der durch die absterbenden Fichten freigesetzt wird, weil diese Freisetzung nur schleichend vonstattengeht. Die Fichtennadeln und das Feinreisig fallen nur nach und nach zu Boden, da sich der Absterbeprozess der Fichten über Jahrzehnte hinzieht. Die schließlich abgestorbenen Fichten bleiben als Totholzgerüst lange unzersetzt auf der Hangbruchfläche stehen. Die Fichtenzurwurzeln speichern den Kohlenstoff sogar äußerst langfristig, da sie in einer vernässten Torfauflage dauerhaft erhalten bleiben.

Die Holzproduktionsfunktion der vormaligen Fichtenwälder wird damit durch die Ökosystemdienstleistungen Kohlenstoffspeicherung und Erhaltung des typischen Lebensraumes von Moornwäldern abgelöst.

Ausblick

Unsere ersten detaillierten Aufnahmen im Projekt MoorWaldBilanz über die räumliche Verteilung der Bodenkohlenstoffvorräte sollen die Grundlagen von Wiederholungsaufnahmen für weitere Kohlenstoffbilanzen in den Hangbrüchern sein (SCHÜLER et al. 2020). Permanente Messungen zum ungespannten Grundwasserstand gehören ebenfalls in ein solches Monitoring, um frühzeitig Veränderungen ökosystemrelevanter Parameter erkennen zu können.

Es wird empfohlen, die Erkenntnisse aus MoorWaldBilanz in künftige wissenschaftlich begleitete lebensraumerhaltende und -fördernde Maßnahmen in den

Hangbruchflächen einfließen zu lassen.

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Torfauflagen der Hangbrücher immer in kalten klimatischen



DIE AUTOR*INNEN

Prof. Dr. Gebhard Schüler

Leiter der Stabsstelle „Internationale Projekte und Netzwerke“ in der Forschungsanstalt für

Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz.

Apl. Professor an der Universität Trier für „Forst Site Assessment“ und „Nature Conservation“. Gast-Pro-

fessur für „Forest Soil Science“ an der University of Agriculture and Forestry in Ho Chi Minh City/Viet-

nam. Studium der Forstwissenschaft an der Universität Freiburg. Promotion an der Universität Freiburg in

Forstpathologie/Bodenkunde/Waldbau. Habilitation an der Universität Trier in Forstlicher Bodenkunde

und Forsthydrologie;

Dr. Christoph Kopf, Waldnaturschutz, Zentralstelle der Forstverwaltung, Landesforsten Rheinland-Pfalz;

Dr. Jan Paul Krüger, Geowissenschaftler, UDATA GmbH Umwelt & Bildung;

Dr. Markus Dotterweich, Ökologe, UDATA GmbH Umwelt & Bildung;

Angelika Seifert-Schäfer, Diplommathematikerin, UDATA GmbH Umwelt & Bildung;

Prof. Dr. Christof Kneisel, Lehrstuhl für Geographie, Institut für Geographie und Geologie der Universität Würzburg;

Julian Trappe, M.Sc., Institut für Geographie und Geologie der Universität Würzburg;

Dr. Ulrich Dehner, Geologiedirektor, Referatsleiter Boden, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz;

Dr. Ulrich Steinrücken: Soilution Dr. U. Steinrücken und Dr. T. Behrens GbR;

Dr. Johannes Stoffels, Akademischer Rat, Umweltfernerkundung und Geoinformatik, Universität Trier;

Sandra Dotzler, M.Sc., Ehemalige wissenschaftliche Mitarbeiterin Universität Trier, Doktorandin aktuell Vista Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH, München;

Dr. Adam Hölzer;

Dr. Siegfried Schloss

Perioden, wie der Kleinen Eiszeit, gewachsen sind und dass die Torfakkumulation in den Hangbrüchern einem dynamischen Prozess unterliegt, dass also in den Wärmephasen Torf auch wieder abgebaut werden kann. Nach IPCC (2014) wird sich das globale Klima in den nächsten Jahrzehnten erwärmen. Modellrechnungen zeigen für den Hunsrück eine Temperaturzunahme von bis zu 5°C gegenüber dem Bezugszeitraum von 1971 bis 2000. Wenn sich dann noch bei

nahezu unveränderter jährlicher Niederschlagssumme die Niederschlagsverteilung zugunsten weniger, aber stärkerer (Stark-)Niederschläge verändert, sind für die Hangbrücher zukünftig längere (sommerliche) Trockenstressphasen anzunehmen. Daher gibt es eine große Wahrscheinlichkeit, dass die Torfmächtigkeiten und die räumlichen Ausdehnungen der Hangbrücher unter den Bedingungen des Klimawandels zurückgehen, wenn nicht gar verschwinden werden.

Quellen

- BALTER, M. (2011):** New light on ancient samples. In: Science. Band 332, S. 658, doi:10.1126/science.332.6030.658-b.
- BASILIKO, N., BLODAU, C., ROEHM, C., BENGTON, P. & MOORE, T. R. (2007):** Regulation of Decomposition and Methane Dynamics across Natural, Commercially Mined, and Restored Northern Peatlands. – Ecosystems 10, 1148-1165.
- DEHNER, U. & STEINRÜCKEN, U. (2019):** Moorkartierung im Hunsrück. Präsentation beim Abschlusskolloquium des WKF-Projektes MoorWaldbilanz
- HÖLZER, A. (2017):** Kartierung der Verbreitung der Torfmoose in und um den Nationalpark Hunsrück-Hochwald. In: KREH-BÜHL, J., Moore schützen, Denkanstöße 13, S. 24-31.
- HÖLZER, A. & SCHLOSS, S. (2019):** Torfprofile und die Verbreitung der Torfmoose als Erklärung der Geschichte und Funktion der Brücher im Nationalpark Hunsrück-Hochwald, einschließlich Schlussfolgerungen aus Pollenanalysen. Präsentation beim Abschlusskolloquium des WKF-Projektes MoorWaldbilanz.
- HOFFMANN, D. (1957):** Die Brücher des Hochwaldes. Eine Untersuchung über ihre Entstehung, Entwicklungstendenzen und die Möglichkeit der Ausschöpfung ihrer potentiellen Leistungsfähigkeit durch meliorative und waldbauliche Maßnahmen. Mitt. a.d. Forsteinrichtungsamt Koblenz, Nr. 6, 39 S.
- HOMMELTENBERG, J., SCHMID, H. P., DRÖSLER, M. & WERLE, P. (2014):** Can a bog drained for forestry be a stronger carbon sink than a natural bog forest? Biogeosciences, 11(13), 3477-3493.
- IPCC (2014):** Klimaänderung 2014. Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Genf. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- JUNGKUNST, H. F., FIEDLER, S. & STAHR, K. (2004):** N2O emissions of a mature Norway spruce (*Picea abies*) stand in the Black Forest (southwest Germany) as differentiated by the soil pattern. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D7).
- KOPF, CHR. (2019):** Hypothese der Hangbruchgenese im südwestdeutschen Mittelgebirge anhand hydrologischer, pedologischer und geobotanischer Untersuchungen in der Region des Nationalparks Hunsrück-Hochwald. Diss. a.d. Univ. Trier, 81 S. plus Anhang; Mitt. a.d. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 85/20, 75 S. plus Anhang.
- KORKIAKOSKI, M., TUOVINEN, J.-P., PENTTILÄ, T., SARKKOLA, S., OJANEN, P., MINKKINEN, K., RAINNE, J., LAURILA, T. & LOHILA, A. (2019):** Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clearcutting. Biogeosciences, 16, 3703–3723, <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>.
- KOSKINEN, M., MAANAVILJA, L., NIEMINEN, M., MINKKINEN, K. & TUUTTILA, E.-S. (2016):** High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. - Mires and Peat, 17, Article 02, 1-13.
- KRÜGER, J. P., ALEWELL, C., MINKKINEN, K., SZIDAT, S. & LEIFELD, J. (2016):** Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profile-based methods. Forest ecology and management, 381, 29-36.
- KRÜGER, J.P., DOTTERWEICH, M., SEIFERT-SCHÄFER, A., HOFFMANN, S. & SCHERZER J. (2019):** MoorWaldBilanz - Kohlenstoffvorräte der Hangmoore -. Präsentation beim Abschlusskolloquium des WKF-Projektes MoorWaldbilanz.
- KRÜGER, J. P., DOTTERWEICH, M., SEIFERT-SCHÄFER, A., HOFFMANN, S., KOPF, C., KNEISEL, C., DOTZLER, S., NINK, S., STOFFELS, J. & SCHÜLER, G. (2020):** Carbon stocks and their spatial distribution of drained and rewetted peatland forests in a low mountain range area, Germany. Mires and Peat. Under review.
- KRÜGER, J.P., LEIFELD, J., GLATZEL, S., SZIDAT, S., ALEWELL, C. (2015):** Biogeochemical indicators of peatland degradation - a case study of a temperate bog in northern Germany. Biogeosciences, 12, 2861–2871.
- LAINE, J., VASANDER, H. & PUHALAINEN, A. (1992):** A method to estimate the effect of forest drainage on the carbon store of a mire. Suo 43(4-5): 227-230.
- LEHMANN, L. (1986):** Hangbrücher bei Morbach und Hochscheid. Erläuterungen zur Bodenkarte 1:5000, Landesamt für Umweltschutz Rheinland-Pfalz, 32 S.
- LEIFELD, J., GUBLER, L. & GRÜNIG, A. (2011):** Organic matter losses from temperate ombrotrophic peatlands: an evaluation of the ash residue method. Plant and soil, 341(1-2), 349-361.
- MÄKIRANTA, P., RIUTTA, T., PENTTILÄ, T. & MINKKINEN, K. (2010):** Dynamics of net ecosystem CO2 exchange and heterotro-

- phic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12), 1585-1596.
- MÄKIRANTA, P., LAIHO, R., PENTTILÄ, T. & MINKKINEN, K. (2012):** The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 1-9.
- MEYER, A., TARVAINEN, L., NOUSRATPOUR, A., BJÖRK, R. G., ERNFORS, M., GRELLE, A. & WALLIN, G. (2013):** A fertile peatland forest does not constitute a major greenhouse gas sink. *Biogeosciences*, 10, 7739-7758.
- MINKKINEN, K. & LAINE, J. (1998):** Effect of forest drainage on the peat bulk density of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(2), 178-186.
- MINKKINEN, K., VASANDER, H., JAUHIAINEN, S., KARSISTO, M. & LAINE, J. (1999):** Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, Central Finland. *Plant and Soil*, 207(1), 107-120.
- MINKKINEN, K., KORHONEN, R., SAVOLAINEN, I. & LAINE, J. (2002):** Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1900-2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology*, 8(8), 785-799.
- MINKKINEN, K., OJANEN, P., PENTTILÄ, T., AURELA, M., LAURILA, T., TUOVINEN, J. P. & LOHILA, A. (2018):** Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences*, 15, 3603-3624.
- MOORE, T. R., YOUNG, A., BUBIER, J. L., HUMPHREYS, E. R., LAFLEUR, P. M. & ROULET, N. T. (2011):** A Multi-Year Record of Methane Flux at the Mer Bleue Bog, Southern Canada. – *Ecosystems* 14, 646-657.
- OJANEN, P., MINKKINEN, K. & PENTTILÄ, T. (2013):** The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest ecology and management*, 289, 201-208.
- OJANEN, P., MÄKIRANTA, P., PENTTILÄ, T. & MINKKINEN, K. (2017):** Do logging residue piles trigger extra decomposition of soil organic matter? *Forest ecology and management*, 405, 367-380.
- REICHERT, H. (1975):** Die Quellmoore (Brücher) des südwestlichen Hunsrücks. *Beiträge zur Landespflege in Rheinland-Pfalz*. Bd. 3, 101-164.
- RIGNEY, C., WILSON, D., RENOU-WILSON, F., MÜLLER, C., MOSER, G. & BYRNE, K. A. (2018):** Greenhouse gas emissions from two rewetted peatlands previously managed for forestry. *Mires and Peat*, 21, 1-23.
- ROSSKOPF, N., FELL, H. & ZEITZ, J. (2015):** Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *Catena*, 133, 157-170.
- RUTHSATZ, B. & HOLZ, I. (1997):** Dauerbeobachtung von Vegetation und Quellmechanismus im „Palmbuch“ und „Oberluderbruch“ der NSG „Hangbrücher bei Morbach“/Hunsrück. *Decheniana*, 150, 109-168.
- RUTHSATZ, B. (1999):** Die Quellwässer von Hangmooren im Hunsrück (Rheinland-Pfalz). *Chemismus und Einfluss auf Vegetation und Flora. Arch. für Nat.- Lands.-, Vol. 38*, 1-48.
- RUTHSATZ, B. (2000):** Vergleich der Qualität von Quellwässern aus bewaldeten und agrarisch genutzten Einzugsgebieten im westlichen Hunsrück und ihr Einfluss auf die Vegetation der durchsickerten Feuchtfächen. *Arch. für Nat.- Lands.-, Vol. 39*, 167-189.
- SCHÜLER, G. (2012):** Waldmoore – im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Forstwirtschaft. http://moor.naturpark-erzgebirge-vogtland.de/Moore_und_Forstwirtschaft_-_Gebhard_Schuler.pdf.
- SCHÜLER, G., KOPF, CHR., GORECKY, A., KRÜGER, J.-P., DOTTERWEICH, M., SEIFERT-SCHÄFER, A., HOFFMANN, S., SCHERZER, J., KNEISEL, C., TRAPPE, J., HILL, J., STOFFELS, J., DOTZLER, S., NINK, S., DEHNER, U., STEINRÜCKEN, U., HÖLZER, A. & SCHLOß, S. (2020):** Die Hangbrücher des Hunsrücks. Erkenntnisse aus dem Projekt MoorWaldBilanz – Kohlenstoffbilanzen bei der Renaturierung von Moorwäldern am Beispiel Hunsrück-Hochwald. *Mitt. a.d. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 86/20, 110 S.
- SLOAN, T.J., PAYNE, R.J., ANDERSON, A.R., BAIN, C., CHAPMAN, S., COWIE, N., GILBERT, P., LINDSAY, R., MAUQUOY, D., NEWTON, A.J. & ANDERSEN, R. (2018):** Peatland afforestation in the UK and consequences for carbon storage. *Mires and Peat*, 23, 1-17.
- STRACK, M., WADDINGTON, J. M. & TUUTTILA, E.-S. (2004):** Effect of table drawdown on northern peatland methane dynamics: Implications for climate change. – *Global Biogeochemical Cycles* 18: GB4003, doi:10.1029/2003GB002209, 2004.
- SUCCOW, M. (1988):** Landschaftsökologische Moorkunde. Fischer Vlg., ISBN 3-334-00129-6.
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001):** Landschaftsökologische Moorkunde. Science Publishers, Stuttgart. ISBN 978-3-510-65198-6.
- SUCCOW, M., JESCHKE, L. & KNAPP, H. D. (Hrsg.) (2012):** Naturschutz in Deutschland. Verl. Ch. Links. 333 S.
- TIEMEYER, B., ALBIAC BORRAZ, E., AUGUSTIN, J., BECHTOLD, M., BEETZ, S., BEYER, C. (2016):** High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, 22(12), 4134-4149.
- TRAPPE, J. & KNEISEL, CHR. (2019a):** Geophysikalische und Sedimentologische Untersuchungen an Hangmooren. Präsentation beim Abschlusskolloquium des WKF-Projektes MoorWaldbilanz.
- TRAPPE, J. & KNEISEL, CHR. (2019b):** Geophysical and Sedimentological Investigations of Peatlands for the Assessment of Lithology and Subsurface Water Pathways. *Geosciences* 2019, 9, 118; doi:10.3390/geosciences9030118.
- VON POST, L. (1922):** Sveriges Geologiska Undersöknings torvinventering och nagra av dess hittills vunna resultat. *Sven. Mooskulturföreningens Tidskr.* 37: 1-27.
- WÜST-GALLEY, C., MÖSSINGER, E. & LEIFELD, J. (2016):** Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands. *Mires and Peat*, 18(07), 1-22.