

**Abschlussbericht des im Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025 im Bereich LF-15
Schutz von Moorböden angesiedelten Projekts**

Waldmoore in Hessen – Erfassung, Zustandsanalyse und Maßnahmenvorschläge

Maria Aljes, Philipp Kühler, Marcus Schmidt



gefördert durch:



IKSP-2025-Projekt "Waldmoore in Hessen"

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Abt. Waldnaturschutz/Sachgebiet Arten- und Biotopschutz
Prof.-Oelkers-Str. 6, D-34346 Hann. Münden

Tel.: Philipp Kuchler 0551-69401-105, Maria Aljes 0551-69401-217

E-Mail: waldmoore@nw-fva.de (sowie: Philipp.Kuechler@nw-fva.de, Maria.Aljes@nw-fva.de)

Hinweis /Fehlerkorrektur:

Am 5.12.2023 wurden Teile der Ergebnisse im HMUKLV in Wiesbaden vorgestellt. Sie enthielten eine inkorrekte Darstellung der Summe des organischen Kohlenstoffs und des gefährdeten organischen Kohlenstoffs der Regenmoore (Rotes Moor, Breungeshainer Heide). Die Gesamtbilanzen für Hessen waren von dem Fehler nicht betroffen.

Die korrigierten Daten finden sich in Abbildung 13 auf Seite 28.

Titelbild: Waldmoor bei Seiferts im Bereich des Forstamts Fulda (Foto: Philipp Kuchler)

Inhalt

1. Zusammenfassung.....	4
2. Einleitung und Zielsetzung.....	5
3. Arbeitspaket Fernerkundung.....	7
3.1 Datenbeschaffung.....	7
3.2 Methodisches Vorgehen bei der Fernerkundung.....	8
3.3 Ergebnisse der Fernerkundung.....	9
4. Arbeitspaket Geländekartierung und Maßnahmenempfehlungen.....	10
4.1 Methoden der Erfassung im Gelände.....	10
4.2 Entwicklung von Maßnahmenempfehlungen.....	11
4.3 Kartierergebnisse.....	11
4.3.1 Moorverbreitung und Moortypen.....	11
4.3.2 Polygone und Mooranzahl.....	14
4.3.3 Flächengrößen.....	14
4.3.4 Bezug zur Verdachtsstufe.....	16
4.3.5 Hochrechnungen auf unkartierte Moorverdachtsflächen.....	18
5. Arbeitspaket Kohlenstoffberechnung und Treibhausgaseinsparungspotenzial.....	19
5.1 Abstimmung mit dem Niedermoorprojekt der NABU-Stiftung.....	19
5.2 Methode zur Erfassung des Kohlenstoffspeichers in den Waldmooren Hessens.....	20
5.3 Treibhausgas-Emissionen aus den Mooren.....	22
5.3.1 Quantifizierung von Treibhausgasemissionen – Stand des Wissens.....	22
5.3.2 Treibhausgasemissionen von Waldmoorökosystemen in natürlicher Ausprägung sowie nach Wiedervernässung.....	23
5.3.3 Abschätzung der potenziellen THG-Emissionen von Waldmooren in Hessen.....	25
5.3 Ergebnisse der Kohlenstoffberechnungen.....	28
5.3.1 Kohlenstoffwerte der untersuchten Moore.....	28
5.3.2 Hochrechnung auf die unkartierten Waldmoor-Verdachtsflächen.....	29
6. Arbeitspaket Good Practice-Beispiele für Renaturierungen und ihre Kosten.....	30
6.1 Durchgeführte Wiedervernässungsprojekte.....	30
6.1.1 Quellmoor Hirschhagen.....	32
6.1.2 Die Butterwiese auf dem Meißner.....	38
6.2 Beispiele für Renaturierungskosten.....	42
6.2.1 Quellmoor Hirschhagen – manueller Grabenverbau.....	43
6.2.2 Butterwiese – maschineller Grabenverbau.....	43
7. Arbeitspaket Recherchen für ein Förderkonzept für Waldmoore außerhalb des Staatswalds.....	44
7.1 Förderkonzepte in anderen Bundesländern.....	44
7.2 Ableitungen und Empfehlungen für Hessen.....	46
8. Fazit zum Projekt Waldmoore in Hessen.....	48
9. Literatur.....	49

1. Zusammenfassung

Im dreijährigen Projekt „Waldmoore in Hessen“ wurden landesweit Moor-Verdachtsflächen mit Hilfe von Geodaten und Abfragen bei den Forstämtern identifiziert. Ein Teil der Verdachtsflächen im Staatswald wurde aufgesucht. Die kartierten vermoorten Teilflächen (Moor- und Anmoorpolygone) lassen sich ca. 220 Mooren und weiteren 60 überwiegend anmoorigen Gebieten zuordnen. Sie umfassen 382 ha Fläche, wovon 157 ha auf Moore mit über 30 cm Torf entfallen.

Mit den bei den Kartierungen erfassten Daten konnte die gespeicherte und gefährdete Kohlenstoffmenge berechnet werden. Die nicht aufgesuchten Verdachtsflächen wurden zur Hochrechnung genutzt. Die kartierten Vermoorungen enthalten insgesamt rund 126.000 Tonnen organischen Kohlenstoff. Hochgerechnet auf Hessen ergibt sich eine vermoorte Fläche im Wald von gut 1000 ha (41% Moorfläche, 59% Anmoorfläche), die 300.000 t organischen Kohlenstoff enthält - das entspricht 1 Million Tonnen CO₂-Äquivalenten.

Die aufgelassenen Entwässerungsgräben in den Vermoorungen sind in vielen Gebieten weiter wirksam, so dass trotz einiger wachsender Moorteile die Waldmoore Hessens derzeit insgesamt Kohlenstoff-Emittenten sind. Zwei Drittel des im Torf gespeicherten Kohlenstoffs sind durch Entwässerung und auch durch den Klimawandel gefährdet. In flachgründigen Vermoorungen (Anmoor/Moorgley) ist der gesamte Torfkörper gefährdet.

Durch Wiedervernässung kann die CO₂-Freisetzung insgesamt verringert werden und einige Moore können wieder zu Kohlenstoffsinken werden. Bereits in den Waldmooren Hessens durchgeführte Good-Practice-Beispiele zeigen den Weg hierzu auf. Dabei mussten in jedem Fall Entwässerungsgräben in den geeigneten Mooren voll verfüllt werden und teils vorher die Fichtenaufforstungen moorschonend entfernt werden.

Die Recherchen zu Förderkonzepten für Waldmoore in Privatwäldern ergaben, dass am ehesten ein Ankauf der recht kleinen Waldmoore sinnvoll ist und hierzu eher Kleinprivatwaldbesitzer bereit sind, vorausgesetzt sie werden angesprochen und gut beraten.

Schlussfolgerungen zu Bedeutung und Perspektiven der hessischen Waldmoore finden sich im Fazit auf Seite 48 in Kapitel 8.



Abbildung 1: Wieder wachsendes Moor am Streitbach im Odenwald (Foto: Philipp Küchler)

2. Einleitung und Zielsetzung

Unter Waldmooren werden hier alle mit dem Wald verbundenen, offenen oder von Gehölzen bedeckten Moor- und Anmoorstandorte verstanden – also Vermoorungen im bodenkundlichen Sinne, die Torf oder Anmoortorf an der Oberfläche haben. Obwohl Hessen aufgrund seiner Lage außerhalb der von den Gletschern der letzten Eiszeit direkt beeinflussten Landschaften insgesamt zu den moorärmsten Bundesländern zählt, gehören Waldmoore in einigen Forstämtern zu den charakteristischen Naturraumelementen, denen im Rahmen der Naturschutzarbeit eine besondere Aufmerksamkeit zuteil wird.

Nur ein kleinerer Teil der hessischen Waldmoore kann heute noch als intakt und naturnah eingestuft werden. Infolge von Entwässerungsmaßnahmen, Aufforstung mit Nadelbäumen oder nach Torfabbau ist die Mehrzahl der noch vorhandenen Waldmoore in ihren vielfältigen Schutzfunktionen mehr oder weniger stark eingeschränkt. Aber auch wenn infolge des Klimawandels die Rahmenbedingungen für eine Wiedervernässung ungünstiger geworden sind, haben Waldmoore gegenüber Mooren im landwirtschaftlichen Bereich oftmals eine bessere Ausgangssituation für die Revitalisierung:

- meist einfachere Grundbesitzverhältnisse,
- kaum durch Wiedervernässung betroffene Ober- und Unterlieger,
- oft weniger Bewirtschaftungsinteressen,
- seltener großräumige Grundwasserabsenkung,
- oft Quellwasserspeisung und dadurch bessere Chancen für Moorerhalt im Klimawandel.

In den meisten entwässerten Mooren sind aktive wasserbauliche Maßnahmen zur Wiedervernässung nötig, die gegebenenfalls noch durch Biotoppflegemaßnahmen begleitet werden müssen.

Als Klimaschutzprojekt basiert das IKSP-2025-Projekt „Waldmoore in Hessen – Erfassung, Zustandsanalyse und Maßnahmenvorschläge“ besonders auf der Erkenntnis, dass Moore ein wichtiger Kohlenstoffspeicher sind. In Mooren bewirken frühere Entwässerungsmaßnahmen auch noch nach Nutzungsauflassung, dass Torf weiter zersetzt wird und Treibhausgase freigesetzt werden.

Der Kenntnisstand zu im Wald gelegenen Mooren war in Hessen bis auf sehr wenige genauer untersuchte Regionen beim Projektbeginn dürftig. Dies liegt insbesondere daran, dass die forstliche Standortkarte zwar Nasstandorte, aber keine Moorböden ausweist und dass die hessenweite Biotopkartierung selektiv ist und Moore daher nur unvollständig abbildet. Auch die Daten aus den Bodenkartierungen (Bodenübersichtskarte 1:50.000) sind im Wald unvollständig und veraltet – vor allem aber ist die Karte auf Grund ihrer Maßstabsvorgabe wenig geeignet, kleinere Moore aufzunehmen und abzubilden.

Folglich musste das Waldmoor-Projekt zuerst eine systematische Erfassung der Moore durchführen, bevor Maßnahmenempfehlungen gegeben werden können.

Das Projekt umfasste in seiner ursprünglichen Konzeption vier Arbeitspakete, darunter (1) das landesweite Screening von Waldmooren, (2) die Zustandsanalyse der Waldmoore im Staatswald, (3) Maßnahmenempfehlungen für Waldmoore im Staatswald und (4) Förderkonzept für Waldmoore außerhalb des Staatswaldes. Mit Screening ist hier eine grobe Kartierung der Moorflächen im Gelände einschließlich vorheriger Fernerkundung gemeint. Der Begriff soll andeuten, dass die Vermoorungen dabei nicht so intensiv erfasst werden können, wie es für eine Renaturierungsplanung nötig wäre.

Etwas abweichend von der ursprünglichen Gliederung werden die Arbeitspakete im vorliegenden Bericht in fünf Bereiche gruppiert: (1) Fernerkundung, (2) Geländekartierung und Maßnahmenempfehlungen, (3) Kohlenstoffberechnung und Treibhausgaseinsparungspotenzial, (4) Good-Practice-Beispiele für Renaturierungen und ihre Kosten sowie (5) Recherchen für ein Förderkonzept für Waldmoore außerhalb des Staatswaldes.

Die Gründe dafür liegen in einer stringenteren Darstellung der Inhalte und in während der Projektlaufzeit notwendig gewordenen Modifikationen im Programm. So umfasst die Fernerkundung bereits vom ursprünglichen Konzept her auch Moore im Privat- und Körperschaftswald, während die Kartierung nur im Staatswald angesetzt war. Dadurch, dass in Absprache mit dem HMUKLV im Projektzeitraum im Staatswald aufgrund der vielen Verdachtsflächen und des Zeitaufwands nur eine Teilkartierung stattfand, erscheint die Trennung von Fernerkundung und Kartierung sinnvoll. Maßnahmenempfehlungen sind hingegen ein Ergebnis der vor Ort festgehaltenen Beobachtungen, so dass sie den Kartierungen direkt zugeordnet werden können. Die theoretischen Hintergründe der Kohlenstoffberechnungen und der Bilanzierung der Good-Practice-Beispiele sind eigene Themen die am besten in getrennten Kapitel beschrieben werden.



Abbildung 2: In den meisten entwässerten Mooren sind aktive wasserbauliche Maßnahmen zur Wiedervernässung nötig (Graben durch ein Moor im Burgwald, Foto: Philipp Küchler).

3. Arbeitspaket Fernerkundung

Im Rahmen des landesweiten Screenings von Waldmooren sollte erstmals ein systematischer Ansatz verfolgt werden, um die Waldmoore Hessens besitzartenunabhängig möglichst vollständig zu erfassen. Dabei wurden ausdrücklich auch Anmoorstandorte in das Screening einbezogen, da diese sowohl in Bezug auf ihre Biodiversität als auch in Bezug auf ihre Klimaschutzfunktion als Kohlenstoffsenke von großer Bedeutung sein können.

Der Kartierung im Gelände ging die Fernerkundung voraus – die Identifikation von Suchräumen und Moor-Verdachtsflächen mit Hilfe vorhandener Geodaten und erfragten Informationen.

3.1 Datenbeschaffung

Folgende Geodaten wurden für den Einsatz im GIS beschafft und genutzt:

Grunddaten:

- Luftbilder (DOP)
- Topografische Karten
- DLM-Elemente: Gewässer, Moor, Sumpf
- DGM1 (daraus wurden Schummerungen errechnet, in denen u. a. Entwässerungsgräben erkennbar sind)

Daten vom HLNUG, etc.:

- Hessische Biotopkartierung 1992-2006 (HB)
- Hessische Lebensraumtypen- und Biotopkartierung ab 2019 (HLBK), soweit schon verfügbar (Stand Ende 2020)
- Artenfundpunkte ausgewählter Moorpflanzenarten einschließlich Moosen aus NATIS-Datenbank
- Weitere nicht landesweit verfügbare Kartierdaten, z. B. aus FFH-Erfassungen
- Bodenübersichtskarte bzw. die vom HLNUG Dezernat G3 (Boden und Altlasten, Vorsorgender Bodenschutz) für den Maßstab 1:50000 entworfene Moorkarte von Hessen
- Geologische Übersichtskarte und Karten für einzelne Bereiche
- Schutzgebiete (NSG, FFH, ...)
- Kompensationsflächen, Ökokontoflächen

Daten von HessenForst:

- Forstliche Standortkarte
- Grenzen der Forstämter, Abteilungen, Forstliche Beschreibungseinheiten
- Waldbesitz aufgeteilt nach Staatswald, Sonstiger Staatswald, Körperschaftswald, Privatwald und der Angabe, ob durch HessenForst betreut
- NWE-Flächen

Daten der NW-FVA

- Moorkartierungen Burgwald und Reinhardswald

- Vertical distance to channel network (VDCN)
- SAGA Topographic Wetness Index (STWI)

Für moorbezogene Flurnamen

- Historische Karten
- Topografische Karte 1:25000
- Liegenschaftskarte

Ausgewertete, aber nicht direkt als Layer in das Moor-GIS-Projekt integrierbare Datenquellen:

- Meldungen aus der Bevölkerung (von Einzelpersonen, u.a. pensionierten Förstern) und von Naturschutzbehörden und Naturschutzverbänden, die auf von uns erstellte Artikel z.B. im „Jahrbuch Naturschutz in Hessen“ erfolgten
- FFH-Grunddatenerhebungen
- Abfragen zu historischen Flurnamen (z. B. zusammengesetzte Flurnamen mit „moor“, „bruch“, „sol“ oder „struth“) im Landesgeschichtlichen Informationssystem Hessen (LAGIS) des Hessischen Landesamtes für geschichtliche Landeskunde und im Archivinformationssystem Hessen (Arcinsys Hessen)
- Geokarten des HLNUG Geologie VViewers
- Literatur zu bestehenden Schutzgebieten
- Literatur zu Moorprofilen und Pollenanalysen in Hessen
- weitere vegetationsökologische, forstliche, bodenkundliche, geologische, naturkundliche und naturschutzbezogene Fachliteratur
- **und vor allem als Wichtigstes: Die Rückmeldungen der Forstämter zu Moorverdachtsflächen**, die oft Abteilungsnummern und/oder Screenshots von Luftbilder enthielten.

3.2 Methodisches Vorgehen bei der Fernerkundung

Die Verwendbarkeit und Zuverlässigkeit der verschiedenen Geodaten konnte vorab an Hand des bereits auf Moore untersuchter Reinhardswalds getestet werden.

Folgende Probleme traten dabei auf:

Die Forstliche Standortkartierung kennt keine Moorböden, sondern nur Trophie- und Feuchtestufen. Sie enthält sehr viele Nassstandorte, von denen aber nur ein kleiner Teil vermoort ist. Daher eignet sie sich allein kaum zu Identifikation von Moorverdachtsflächen, obwohl die meisten Moorstandorte in der Standortkarte als nass eingezeichnet sind.

Die Bodenübersichtskarte (BÜK50) und die daraus vom HLNUG erstellte Moorübersicht von Hessen weist Datenlücken und auch falsche Zuordnungen zu organischen Böden im Wald auf. Vor allem aber kann sie als Übersichtskarte keine kleinen oder schmalen Moore darstellen, da Mindestbreiten vorgeschrieben sind (Druckbarkeit im Maßstab 1:50.000)

Die alte und neue Biotopkartierung in Hessen ist auf eine selektive Biotopauswahl beschränkt, die z.B. die Erfassung fichtenbestandener Moore ausschließt (auch nach der neuen HLBK). Die alte Biotopkartierung (HB 1992-2006) liegt flächendeckend vor, ist aber qualitativ in Bezug auf Moore unzureichend und mit Erfassungsdefiziten im Wald. Die neue Biotopkartierung (HLBK ab 2019) ist präziser, war aber zu Projektbeginn nur für kleine Teile Hessens erfolgt.

Bei der NW-FVA wurden die aus der Topografie und dem Gewässernetz errechnete Vertical Distance to Channel Network (VDCN) und der SAGA Topographic Wetness Index (STWI) erfolgreich für die Bilanzierung potenzieller NWE-Flächen eingesetzt. Leider erwiesen sich diese Indizes für die Suche nach Waldmooren als unbrauchbar, da sie hier eine sehr schlechte Trefferquote aufweisen.

Vorgehen:

Als geeignetste Grunddaten, um zu einem Moorverdacht zu kommen, erwiesen sich direkte Informationen (z. B. Meldungen aus den Forstämtern, Moorangaben aus der Literatur) und Kombinationen aus Biotop- und Artendaten zusammen mit bodenkundlichen Informationen und unserem Standort.

Die Erfassung und Nummerierung der Moor-Verdachtsflächen und auch die Literaturrecherche dazu wurde forstamtsbezogen durchgeführt. Grund dafür ist, dass die Forstämter für die Waldmoore im Hessischen Staatswald, sowohl für die Ermittlung von Verdachtsflächen als auch für die Renaturierung der primäre Ansprechpartner sind und daher ein forstamtsbezogenes Vorgehen wesentlich praxisnäher ist, als andere denkbare Einteilungen (z. B. Naturräume).

Die Stellen mit Moorverdacht wurden drei Verdachtsstufen zugeordnet (V1: sicherer Moorhinweis, V2: normaler Moorhinweis, V3: unsicherer Hinweis) und jeweils ein Shapefile dazu erstellt, das in den Attributen Hinweise auf die Informationsquellen für den Verdacht enthält, ebenso wie Flurbezeichnungen, Schutzstatus und Waldbesitz. Später kam noch eine Verdachtsstufe Null (V0) hinzu, die für Vermoorungen Anwendung findet, die im Gelände durch uns gefunden und daher kartiert wurden, ohne dass es vorher ausreichende Hinweise dafür gab, die eine Verdachtsstufe 1 bis 3 begründen würden.

Vor dem IKSP-Projekt erfasste Philipp Küchler im Rahmen von Gutachten die Moore im Reinhardswald und Burgwald relativ vollständig. Im Projekt wurden für den Reinhardswald nachträglich Verdachtsstufen mit derselben Methodik erstellt, um die Trefferquote von Verdachtsflächen zu prüfen und Hochrechnungen zu ermöglichen. Für die kartierten Burgwaldmoore wurde das nicht getan, da die Informationslage hier überdurchschnittlich gut war (exakte Hinweise aus dem Forstamt, HLBK-Pilotkartierung, genauerer Bodendaten) und nicht als typisch für Gesamthessen angesehen werden kann.

3.3 Ergebnisse der Fernerkundung

Mit Hilfe der genannten Methode wurden 1270 Moorverdachtsflächen in Hessen im GIS eingezeichnet (einschließlich der Altkartierung im Reinhardswald, aber ohne die Altkartierung im Burgwald). Davon liegen 1040 im Wald, sind also Waldmoorverdachtsflächen. Die 230 Moorverdachtsflächen im Offenland wurden allerdings viel ungenauer recherchiert (ohne Meldungen aus den Forstämtern) und sind daher unvollständiger.

Aufgesucht und kartiert wurden 293 der Verdachtsflächen im Wald (Daten wieder inkl. der Altkartierung Reinhardswald, aber ohne Altkartierung Burgwald). In dieser Summe und somit auch in der Gesamtsumme sind auch die 15 Vermoorungen der Verdachtsstufe Null (V0) enthalten, die im Gelände entdeckt wurden. Denn kartierte Moore wurden auch im Verdachtsflächenshape dokumentiert, um Hochrechnungen zu ermöglichen. Die kartierten Verdachtsflächen werden in Abschnitt 4.3 genauer aufgeschlüsselt.

Es muss betont werden, dass die heterogene Informationslage zu den unkartierten Verdachtsflächen keine einheitlich räumliche Abgrenzung der einzelnen Fläche ermöglicht. Das heißt, dass die Verdachtsflächen Suchräume sind, sich aber trotz ihrer räumlichen Darstellung als Polygone im GIS keinesfalls für eine Flächenabschätzung eignen.

4. Arbeitspaket Geländekartierung und Maßnahmenempfehlungen

Durch die Verdachtsflächenkulisse wurde schnell klar, dass im Zeitrahmen des Projekts nur eine Teilkartierung möglich ist, da die Anzahl an Verdachtsflächen deutlich höher war, als ursprünglich erwartet. Für die Geländekartierung wurden daher nur ausgewählte Verdachtsflächen aufgesucht. Dabei wurde zum einen eine hessenweite Repräsentanz angestrebt (Aufsuchen verschiedener Landesbereiche und geologischer Einheiten). Zusätzlich dazu wurden auch noch bevorzugt jene Verdachtsflächen aufgesucht, zu denen aus den Forstämtern Beratungsbedarf gemeldet wurde, da wir hier die Chance sahen, dass schneller sinnvolle Vernässungsmaßnahmen umgesetzt werden.

4.1 Methoden der Erfassung im Gelände

Da das Hauptkriterium für Vermoorungen das Vorhandensein von organischen Böden mit Torf oder zumindest Anmoortorf ist, erfolgte die Kartierung nach bodenkundlichen Kriterien. Demnach sind Flächen mit mindestens 30 cm Torf an der Oberfläche ein Moor. Torf besteht aus vor Ort unter nassen Bedingungen entstandenen und dort abgelagerten Pflanzenresten mit mindestens 30 % organischer Substanz. Anmoorgleye und Moorgleye sowie ihre Subtypen können ebenfalls den Vermoorungen zugerechnet werden.

Moordefinition

Bodenkundliche Definition	
Torf	30 % bis 100 % organische Substanz
Anmoortorf	15 % bis <30 % organische Substanz
Moor	≥ 30 cm Torf
„Anmoor“ (Moorgley)	10 bis < 30 cm Torf
„Anmoor“ (Anmoorgley)	> 10 cm Anmoortorf
Ökologische Definition	
Moore	haben Feuchtpflanzen UND Torf an der Oberfläche

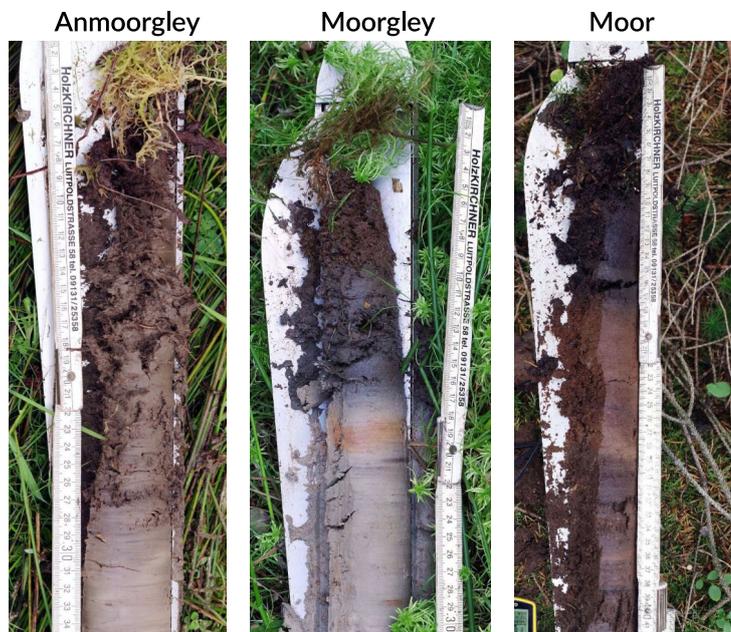


Abbildung 3: Anmoor- und Moor-Bohrprofile (Fotos: Philipp Küchler)

Im Rahmen dieser Arbeit aufgesuchte Verdachtsflächen wurden, wenn sie sich vor Ort als vermoort herausstellten, im Gelände mit folgenden Merkmalen erfasst:

- Räumliche Abgrenzung getrennt in Moorfläche (ab 30 cm Torf) und Anmoorfläche (Moorgley/Anmoorgley)
- Erfassung Torfmächtigkeiten, durchschnittlicher Torfmächtigkeit und Zersetzungsgrad
- Sichtung von Gräben und weiteren Beeinträchtigungen

- Erfassung quelliger Stellen und grobe hydrogenetische Einstufung des Moors oder Moorteils
- Notizen zu aktueller Vegetation und Bestockung; insbesondere zu moortypischer Vegetation und zu Störzeigern
- Notizen zu möglichen Renaturierungsmöglichkeiten.

Besonders die Abgrenzung des Torfkörpers erforderte einen hohen Zeitaufwand. Die Befunde wurden meist als Aufnahmepunkte (Punkt-Shapefiles) mit diversen Informationen festgehalten, um dann später im GIS Moorkarten erstellen zu können.

4.2 Entwicklung von Maßnahmenempfehlungen

Für jedes Waldgebiet wird eine Übersichtskarte aller Waldmoore erstellt. Die oft sehr schmalen und in Übersichten schlecht erkennbaren Einzelflächen werden zusätzlich auf großmaßstäblichen Detailkarten dargestellt. Dabei wird mithilfe des DGM1 die Lage der im Gelände erfassten Entwässerungsgräben präzisiert und ergänzt. Oberirdische Wassereinzugsgebiete werden abgegrenzt.

Aufbauend auf Geländeerfassungen, den Detailkarten und einer Betrachtung der Wassereinzugsgebiete der Waldmoore im Luftbild können erste Maßnahmenempfehlungen für eine Renaturierung gegeben werden. Das Ziel bei Waldmooren sollte eine „Vollvernässung“ sein – also eine Beseitigung aller entwässernden Faktoren und Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushalts. Idealerweise kann dann ein erneutes Moorwachstum erreicht werden oder es können zumindest die Effekte des Klimawandels mit häufigeren und längeren Trockenperioden im Sommer soweit kompensiert werden, dass im Moor kein weiterer Torfschwund erfolgt.

Bei der Durchführung des Projekts hat sich gezeigt, dass die Erkenntnisse aus dem Screening nur für die Initiierung einer Renaturierung ausreichen, dann aber weitere Geländebesuche und Beratungen notwendig sind, bei denen oft weitere Grabenreste gefunden werden, die Moorabgrenzung verbessert wird und der jahreszeitlich schwankende Wasserhaushalt besser verstanden wird als nur bei einem einmaligen Besuch.

Wichtigste Maßnahmen zur Verbesserung des Moorzustands ist in der Regel eine Grabenvollverfüllung, bei geneigten Mooren bzw. in speziellen Fällen auch ein Anstau oder selten ein Überstau. Weiterhin müssen in einigen Fällen dicht stehende Nadelbäume ganz oder teilweise entnommen werden. Dabei kommt in vielen Fällen auch Seilkrantechnik zum Einsatz, um die Moorböden nicht zu belasten oder gar zu beeinträchtigen.

4.3 Kartierergebnisse

4.3.1 Moorverbreitung und Moortypen

Die Vermoorungen wurden soweit möglich hydrogenetischen Moortypen (im Sinne von Succow & Joosten 2001) zugeordnet. Hydrogenetische Typen kennzeichnen die Art der Wasserversorgung, die zur Torfbildung führte. Damit liefern sie essenzielle Information für Fragen der Wiedervernässung.

Regenmoore

Regenmoore, also Hochmoore im klassischen Sinne, gibt es in Hessen nur zwei: Das Rote Moor in der Rhön und die Breungeshainer Heide im Vogelsberg. Mit ihrer hohen Torfmächtigkeit und großen Moorfläche ragen

die beiden Moore in der Kohlenstoffbilanz heraus. Als regenwasserernährte Moore haben sie fast kein Einzugsgebiet und entsprechen damit nicht ganz der im Rahmen des Projektes verwendeten Waldmoordefinition. Da sie aber überwiegend von Wald umgeben sind, der Randsumpf von Mineralbodenwasser beeinflusst ist und sie von HessenForst betreut werden, wurden sie mit aufgenommen.

Quell- und Hangmoore

Die häufigsten hydrogenetischen Moortypen im oft bergigen Wald Hessens sind Quell- und Hangmoore. Nicht selten gibt es eine Abfolge von Quellmoor mit anschließendem Hangmoor oder einer nur geringmächtigen Hangvermoorung. Teils sind die Vermoorungen am Hang sehr steil. Die Torfmächtigkeiten der Quellmoore betragen in Hessen bis 1,5 m, maximal 3 m; Hangmoore eher nur bis 1 m. Natürlicherweise wären die Quell- und Hangmoore mit einem sehr lichten lückigen Bruchwald bestanden; sind aber oft nutzungsbedingt offen.

Hang- und Quellmoore können in allen bergigen Waldgebieten auftreten. Verbreitungsschwerpunkte liegen in Bereichen mit Sandsteinen (Buntsandstein, Grauwacke und Quarzit) und Ton-Sandstein-Wechsellagen, aber auch auf jenen Basaltplateaus, auf denen abdichtende periglaziale Sedimente das klüftige Gestein bedecken: Reinhardswald, Kaufunger Wald, Söhre, Burgwald, Hoher Keller, Spessart, Odenwald und Taunus.

Durchströmungsmoore

Eine Besonderheit sind junge Durchströmungsmoore, die auf Hangmooren aufgewachsen sind, natürlich baumfrei bleiben und ein starkes Moorbuchstum und eine gute Regenerationsfähigkeit zeigen. Durchströmungsmoore kommen nur in Tälern des Burgwalds und Sandstein-Odenwalds vor.

Die Durchströmungsmoore und die Hangmoore im Bergland sind, obwohl grundwasserernährt, als mesotroph-saure, torfmoosgeprägte Moore ausgebildet. Auf Basalt und bei starken Quellschüttungen kommen auch nährstoffreichere Quellmoore vor.

Moorregionen in Hessen

Karte Topografie

(grasgrün=tief, beige=mittel, braun=hoch)

überlagert von Waldfläche



Abbildung 4: Moorregionen in Hessen



Abbildung 5: Quell- und Hangmoorkomplexe, wie hier als wieder wachsender Moorbereich im Kaufunger Wald, sind die verbreitetsten Moore im Bergland (Langebruch an der Hausfirste, Kaufunger Wald; Foto: Philipp Küchler).

Ebene, ungeneigte Moore

Von den ungeneigten Moortypen kommen in Hessen Verlandungsmoore, Grundwasser- und Stauwasser-Versumpfungsmoore, sowie einige wenige Kesselmoore vor.

Grundwasser-Versumpfungsmoore kommen oder kamen im Tiefland um Main und Rhein vor. Als Waldmoore sind sie noch in dem kleinen Bereich „Dachnau“ nördlich des Mönchbruchs (westlich der Startbahn West) erhalten.

Stauwasser-Versumpfungsmoore sind auf Plateaus im Bergland meist als kulturbedingt offene Flächen mit Moorgleyen zu finden.

Kesselmoore sind eine Besonderheit in Erdfällen im Umfeld von Fulda und eher nicht als Waldmoore ausgebildet.

Verbreitung in Hessen

Das Vorkommen von Waldmooren ist in Hessen naturgemäß sehr ungleichmäßig verteilt. Häufiger sind sie vor allem in den Regionen, die in der Karte „Moorregionen in Hessen“ (Abb. 4) rechts der Karte aufgeführt sind. Die links der Karte aufgeführten Regionen haben dagegen nur einzelne Waldmoore: im Rothaargebirge dominieren anmoorige Quellsümpfe und im Gebiet des hessischen Rieds – der einst moorreichen Region – degradierte Offenlandmoore.

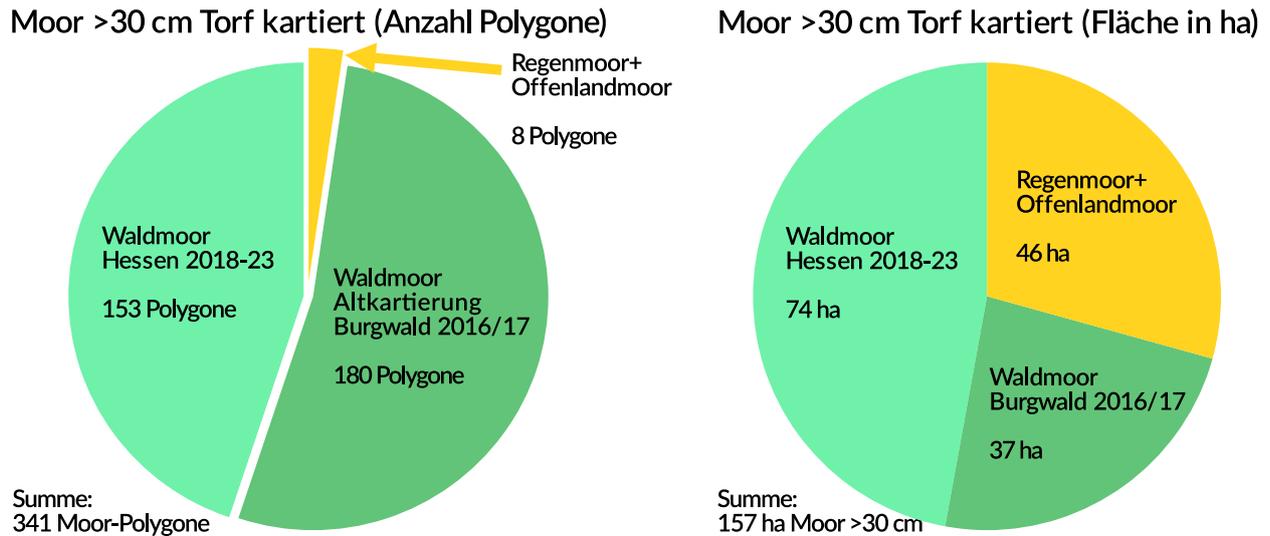


Abbildung 6: Kartierte Waldmoorflächen und Moorpolygone mit über 30 cm Torf in Hessen

4.3.2 Polygone und Mooranzahl

Um Aussagen über die Anzahl der kartierten Moore zu treffen, ist es wichtig, den Unterschied zwischen zusammenhängenden Moorflächen im Gelände und den im GIS erfassten Polygonen und den im GIS ermittelten Verdachtsflächen zu verstehen. Jede Vermooring, die nennenswert große Anmoorbereiche und echte Mooranteile mit über 30 cm Torf hat, wird somit über mindestens zwei Polygone dargestellt (1 x Moor, 1 x Anmoor). Bei mehreren Moorkernen oder Anmoorbereichen können es auch mehr Polygone sein, ebenso wenn eine Unterteilung des Moors in unterschiedlich charakterisierte Bereiche für die Kohlenstoffberechnung notwendig ist.

Somit entspricht die Zahl der Moor- und der Anmoorpolygone nicht der Mooranzahl! Auch die Verdachtsflächen können allein die Mooranzahl nicht wiedergeben, da sich viele davon als unvermoort herausstellen und da für die Altkartierung im Burgwald keine Verdachtsflächen-Einteilung vorliegt. Bei der Altkartierung im Burgwald 2016/17 wurde eine viel stärkere Unterteilung der Moore in Polygone als Unterbereiche vorgenommen als bei späteren Erfassungen, so dass diese die Hälfte der kartierten Moorpolygone ausmachen.

Erfasst wurden in den Waldlandschaften Hessens insgesamt 341 Moorpolygone mit über 30 cm Torf sowie 498 Anmoorpolygone. **Die insgesamt kartierten 839 Polygone lassen sich ungefähr 220 einzelnen Mooren mit deutlichen Anteilen über 30 cm Torf zuordnen und weiteren etwa 60 Gebieten mit (fast) ausschließlich Anmoor (Moorgley oder Anmoorgley).**

4.3.3 Flächengrößen

Kartiert wurden vermoorte Flächen in Hessen auf insgesamt 382 ha. Diese bestehen zu 41 % (157 ha) aus „echtem“ Moor ab 30 cm Torfmächtigkeit und zu 59 % (225 ha) aus Anmoor. Bemerkenswert ist, dass die beiden Regenmoore allein fast ein Drittel der kartierten „echten“ Moorfläche ausmachen. Die Waldmoore im engeren Sinne sind zahlreich, doch ist die Flächengröße der kartierten Waldmoore von 111 ha klein.

Die Anmoorflächen mussten aus Zeitgründen insgesamt etwas gröber kartiert werden. Es wurde aber dennoch erfasst, ob sie beim jeweiligen Moor ganz überwiegend als eher nährstoffarmer Moorgley (mit

Vom Waldmoorprojekt in Hessen kartierte vermoorte Fläche: 382 ha

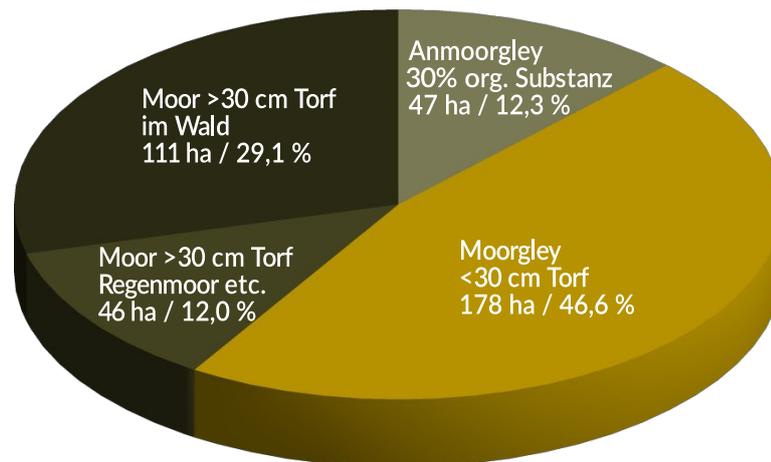


Abbildung 7: Kartierte vermoorte Fläche

echtem Torf) oder als Anmoorgley (geringerer organischer Anteil) ausgebildet waren. Die Moorgley-Flächen überwiegen dabei deutlich. Moorgleye können sowohl Überreste entwässerter Moore sein, oder auch Torfbildungen an Stellen, wo die Wasserversorgung nicht für eine stärkere Torfakkumulation ausreicht. Letzteres ist bei einigen nährstoffarmen Hochflächen z.B. im Reinhardswald und bei Fulda der Fall und dann kulturbedingt ein offengehaltener Standort seltener Übergangsmoor-Pflanzenarten. Hydrogenetisch stehen diese Bildungen den Stauwasser-Versumpfungsmooren nahe. Anmoorgleye sind dagegen oft das Ergebnis von Versumpfungen in nährstoffreicheren Gebieten.

Beide Typen zählen zu den organischen Böden und sind als Kohlenstoffspeicher schon von ihrer Flächenausdehnung bedeutend.



Abbildung 8: Große Flächen der Waldmoore Hessens haben Moorgleye mit unter 30 cm Torf - wie hier die Sonnentau-Standorte im Revier Marbach des Forstamts Fulda (Foto: Philipp Küchler).

4.3.4 Bezug zur Verdachtsstufe

Bei der Fernerkundung wurden den Stellen mit Moorverdacht drei mögliche Verdachtsstufen zugeordnet (V1: sicherer Moorhinweis, V2: normaler Moorhinweis, V3: unsicherer Hinweis). Kriterien für die Einstufung war die Art und Anzahl der Hinweise für das entsprechende Gebiet sowohl aus den Geodaten als auch aus Mitteilungen (z. B. des Forstamts). Hinzu kam für die Auswertung noch die Verdachtsstufe 0 (Null) für bei den Kartierungen im Gelände entdeckte Vermoorungen, für die es vorher keine hinreichenden Hinweise aus den Geodaten oder vom Forstamt gab.

In die Auswertung für die Hochrechnung wurden nur 293 „für Waldmoore repräsentative“ kartierte Verdachtsflächen einbezogen: 170 Waldmoore (Moor oder Anmoor) und viele Verdachtsflächen, die sich als unvermoort entpuppten. Nicht verwendet wurden neben den Regenmooren jene in den Jahren 2016/2017 von Philipp Küchler kartierten Burgwaldmoore, für die keine Verdachtsflächeneinstufung vorlag.

Es stellen sich 57 % der kartierten Verdachtsflächen der Stufe V1 bis V3 als vermoort heraus und 43 % als unvermoort. Dabei ist die „Trefferquote“ vermoorter Flächen stark abhängig von der Verdachtsflächenstufe. Sichere Moorhinweise (V1) führten uns in 91 % der Fälle zu einem Waldmoor; normale Hinweise (V2) in 67 % und unsicherer Hinweise (V3) in nur 35 %. Als Flächen ohne vorigen Hinweis (V0) konnten natürlich nur tatsächliche kartierte Vermoorungen aufgenommen werden, was eine etwas irreführend wirkende Trefferquote von 100 % für V0 ergibt.

Insgesamt hat sich die Einstufung in die Verdachtsflächenkategorien V1 bis V3 für die Moore bewährt und kann daher für Hochrechnungen gut genutzt werden. Die unkartierten Waldmoor-Verdachtsflächen der Stufe V1 und V2 mit höherer „Trefferquote“ werden auch genutzt, um auf einer Hessenkarte die insgesamt zu erwartende Waldmoorverteilung in Hessen zu simulieren.

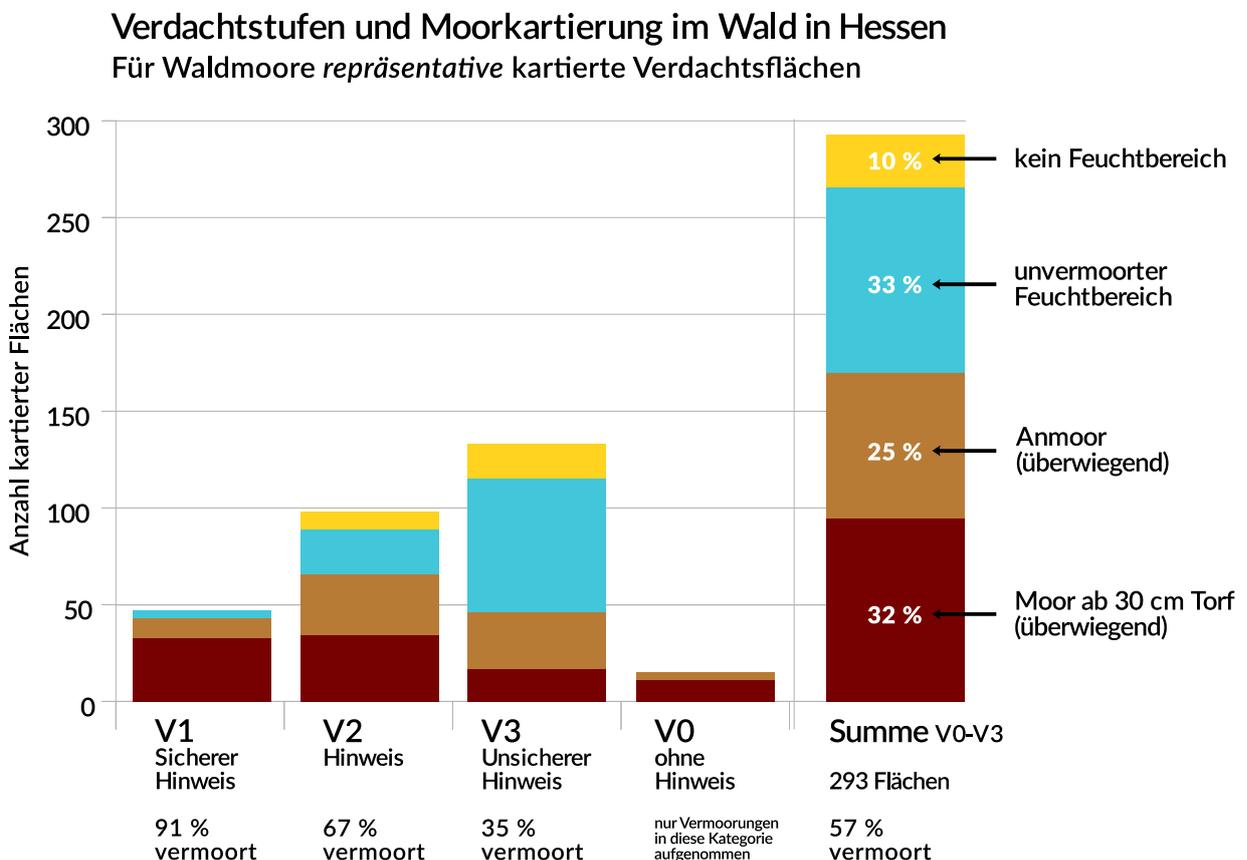


Abbildung 9: Anzahl kartierter Flächen pro Verdachtsstufe

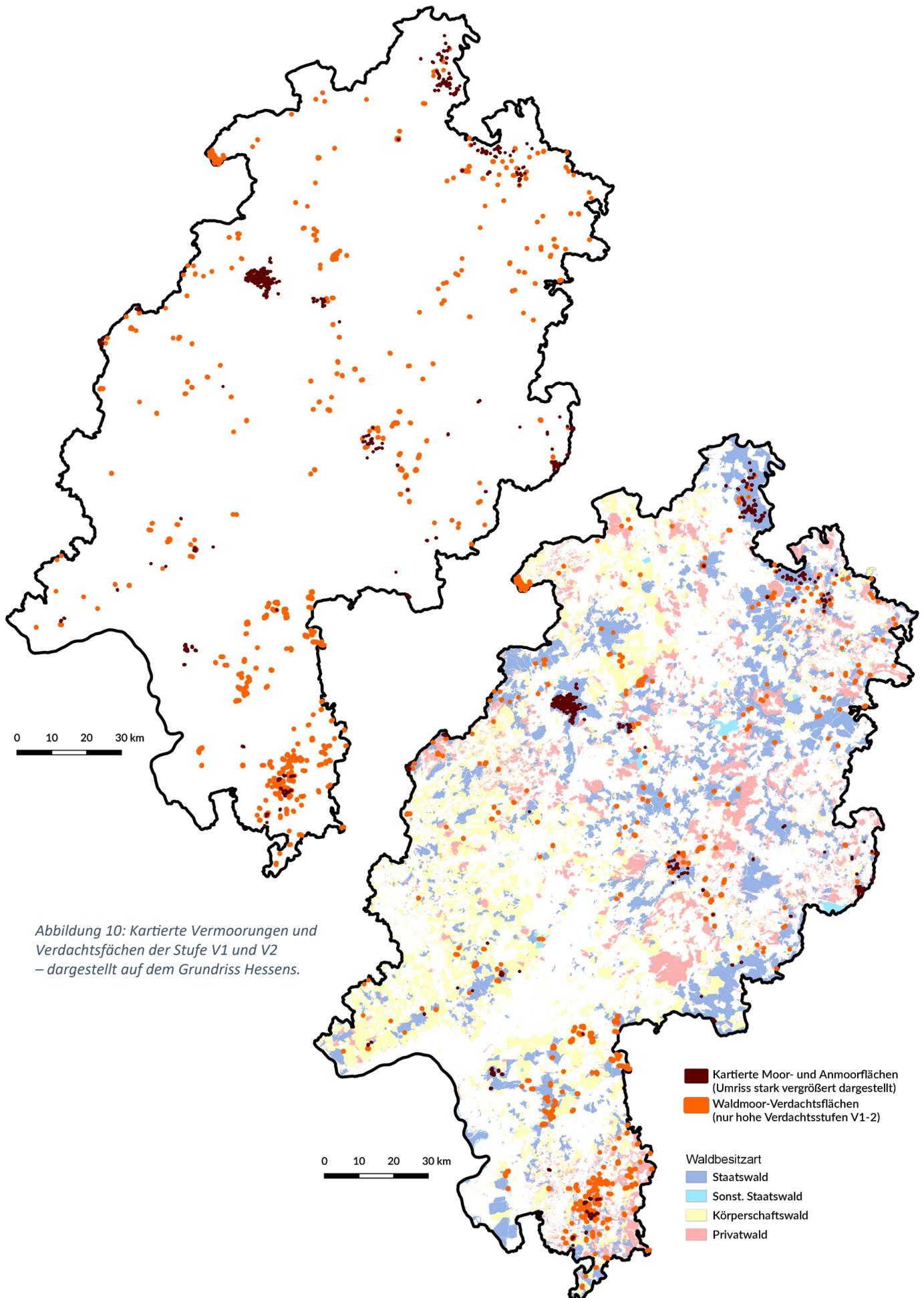


Abbildung 10: Kartierte Vermoorungen und Verdachtsflächen der Stufe V1 und V2 – dargestellt auf dem Grundriss Hessens.

4.3.5 Hochrechnungen auf unkartierte Moorverdachtsflächen

Die im Rahmen der Moorkartierung kartierten einzelnen Moor- und Anmoor-Polygone sind, wie im Abschnitt 4.3.2 erläutert, nicht mit der Mooranzahl und auch nicht mit den Verdachtsstufen identisch. Aus den kartierten Polygonen lassen sich aber Gesamtflächengrößen für die kartierten Mooranteile und Anmooranteile errechnen und durch die Anzahl der erfolgreich untersuchten Verdachtsflächen teilen.

Für die Hochrechnungen wurde das nur auf „die für Waldmoore repräsentative“ kartierte Verdachtsfläche getan (also ohne Hochmoore und Altkartierung Burgwald). Ergebnis ist für Hessen eine durchschnittliche vermoorte Fläche von 1,48 ha pro Waldmoor bezogen auf jene Verdachtsflächen, in denen eine Vermoorung angetroffen wurde. Diese 1,48 ha sind natürlich eine statistische Größe und verteilen sich auf 0,61 ha Moor- und 0,87 ha Anmooranteil.

Hochgerechnet auf die aus der Verdachtsflächenkulisse und der bisherigen „Trefferquote“ bei den Verdachtsflächen noch zu erwartenden weiteren 451 Vermoorungen ergibt dies:

- **667 ha unkartiertes Waldmoor (275 ha Moor, 392 ha Anmoor) in allen Waldbesitzarten**
- **1050 ha vermoorte Fläche in den Wäldern Hessen insgesamt** (prognostiziert + kartiert einschließlich der beiden Regenmoore),
davon sind:
 - **386 ha Waldmoor** im engeren Sinne mit über 30 cm Torf
 - **46 ha Regenmoor** mit weit über 30 cm Torf
 - **618 ha Anmoor** (Moorgley und Anmoorgley)

Diese Art von Hochrechnung musste so durchgeführt werden, da die Größen der Verdachtsflächenpolygone selbst nicht für ein Größenschätzung geeignet sind. Grund dafür ist die Heterogenität der bei der Fernerkundung verwendeten Informationen.

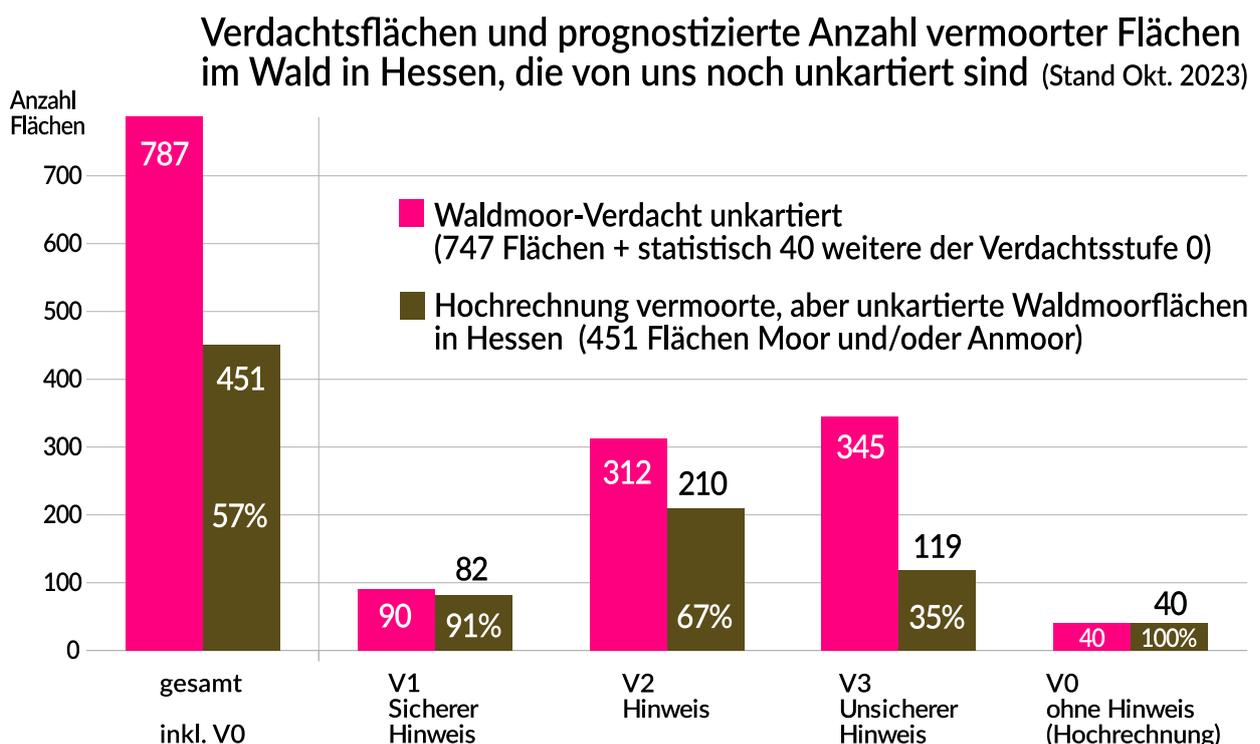


Abbildung 11: Verdachtsflächen und prognostizierte Anzahl vermoorter Flächen

5. Arbeitspaket Kohlenstoffberechnung und Treibhausgaseinsparungspotenzial

Die Klimarelevanz von Moorstandorten ist seit langem bekannt. Im Rahmen des Projektes „Waldmoore Hessen“ soll daher auch eine Abschätzung der potenziell langfristig möglichen Treibhausgas-Einsparungen vorgenommen werden, die sich durch die Renaturierungsmaßnahmen ergeben. Die Bestimmung der Treibhausgasbilanz für bewaldete Moorstandorte ist dabei methodisch sehr viel aufwändiger und unsicherer als für baumfreie Landnutzungstypen.

Drainierte Moorwälder emittieren erhebliche Mengen CO₂, die mit denen von Grünland vergleichbar sind. Dabei wurde lange Zeit übersehen, dass Anmoorstandorte bei Entwässerung ähnlich hohe jährliche Treibhausgas-Emissionen wie tiefgründige Moore haben (Drösler et al. 2012, Tiemeyer et al. 2013).

Methoden zur Berechnung des Treibhausgas-Einsparpotenzials durch die Umsetzung von Renaturierungsmaßnahmen sind im Rahmen des Projektes MoorFutures (www.moorfutures.de) entwickelt worden. Sie sollen im Rahmen des beantragten Projektes „Waldmoore Hessen“ in Kombination mit dem CARBSTOR Verfahren (CARBon STORage, www.carbstor.de) zur Anwendung kommen. CARBSTOR ist ein webbasiertes Tool, das der algorithmenbasierten Bestimmung der Kohlenstoffspeichermenge und des Kohlenstofffreisetzungspotentials von Moorböden dient. Dazu werden typische Moorlandschaften ausgewiesen, die in Abhängigkeit ihrer hydrologisch-geomorphologischen und anthropogenen Einflüsse charakteristische Bodenbildungen, und damit charakteristische C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentiale aufweisen.

Um den gespeicherten organischen Kohlenstoff im Torf der untersuchten Waldmoore in Hessen abzuschätzen, wird eine vereinfachte Methode des Carbstor-Baukastensystems mit für die Waldmoore angepassten Werten genutzt. Daraus lässt sich der Kohlenstoffspeicher für alle im Gelände räumlich abgegrenzten und abgebohrten Moore errechnen.

Eine zuverlässige Abschätzung der aktuellen sowie potentiellen Treibhausgasemissionen nach Revitalisierung bewaldeter Moorstandorte ist hingegen im Rahmen des Projekts „Waldmoore in Hessen“ vor dem Hintergrund der für die Datenaufnahme zur Verfügung stehenden Zeit und den zum jetzigen Zeitpunkt anwendbaren und anerkannten Methoden nicht möglich. Die Hintergründe werden in einer Literaturstudie dargelegt (Abschnitt 2).

Als mögliche Alternative für eine Einschätzung des Klimaschutzpotentials wird daher die Berechnung des Kohlenstoffs im Torf und des nach Entwässerungsmerkmalen (Grabentiefe oder Vererdungstiefe) gefährdeten Bodenkohlenstoffs je Untersuchungsgebiet angewendet.

5.1 Abstimmung mit dem Niedermoorprojekt der NABU-Stiftung

Das ebenfalls aus dem IKSP 2025 geförderte Niedermoorprojekt der NABU-Stiftung soll für seine Moorkulisse, die aus vorher definierten Verdachtsflächen (aus botanischen Kartierungen der BVNH) besteht, ebenfalls Kohlenstoffwerte ermitteln. Das Waldmoorprojekt hat sich daher in einen engen Austausch mit dem Niedermoorprojekt begeben, um erstens Doppelbearbeitungen von Flächen zu vermeiden und zweitens die Kohlenstoffberechnungen so zu koordinieren, dass eine einheitliche Methode für Hessen angewandt wird.

Die Abstimmung erfolgte dabei hauptsächlich mit Rupert Meier vom Büro Meier&Weise, der für die NABU-Stiftung die bodenkundlichen Arbeiten wie Torfsondierungen und Moorabgrenzungen übernimmt und im Gegensatz zum Waldmoorprojekt auch Laboranalysen von Torfproben durchführen ließ. Seine Beobachtungen und Laborwerte wurden in die gemeinsame Kohlenstoff-Schätztabelle einbezogen.

5.2 Methode zur Erfassung des Kohlenstoffspeichers in den Waldmooren Hessens

Bei der Kartierung im Rahmen des Projekts „Waldmoore in Hessen“ werden die im Gelände begangenen Moore und Anmoorbereiche flächenscharf abgegrenzt, durch Bohrungen und Sondierungen werden die Torfmächtigkeit, Torfart und Zersetzungsgrade erfasst. Mit der Flächengröße und Torfmächtigkeit lässt sich das Torfvolumen des Moores oder der Moor-Teilfläche (Polygon) berechnen. Der *Torfzersetzungsgrad (ZG)* wird als Durchschnittswert für das jeweilige Moorpolygon im Gelände aus den Bohrungen geschätzt (Verwendung der fünfstufigen Skala nach Ad-hoc-AG-Boden 2005), ebenso die *durchschnittliche Torfmächtigkeit* in Dezimeter (dm).

Die gespeicherte Menge organischen Kohlenstoffs pro Dezimeter Torf ist im Detail von der Torfart, Dichte des Torfs und dem Anteil anorganischer Beimengungen abhängig. Vereinfacht betrachtet ist sie den Literaturwerten nach vom Zersetzungsgrad abhängig. Je geringer der Torf zersetzt ist, desto lockerer ist er und desto geringer ist seine Trockenrohddichte. Bei der Torfzersetzung und Torfsackung (sekundär durch Entwässerung oder primär durch Moorwachstum unter wechselnden Wasserständen) entweicht Kohlenstoff in die Atmosphäre sowie in gelöster Form ins Wasser. Der restliche Kohlenstoff wird durch starke Sackung und Verdichtung aufkonzentriert. Daher haben stärker zersetzte Torfe höhere Kohlenstoffvorräte pro Dezimeter. An Hand der Auswertung von Literaturdaten aus den Projekten CARBSTOR (Möller und Heller, 2009), Berliner Moorböden im Klimawandel (Klingenuß et al., 2015) und Untersuchungen aus Waldmooren im Hunsrück (Schüler et al., 2020) wurde jedem Zersetzungsgrad (ZG) ein spezifischer Kohlenstoffgehalt zugeordnet (s. Tab. 1). Für ZG 1 existieren unter Verwendung der Labordaten aus dem Hunsrück (bereitgestellt durch Jan-Paul Krüger) mit insgesamt 10 Werten relativ wenig Daten. Ein durchschnittlicher ZG von 1 wird jedoch in unseren Waldmoorflächen für das Gesamtprofil nicht vorkommen und ist somit für die Berechnungen nicht von Bedeutung.

Für die Berechnung des Gesamtkohlenstoffvorrats C_{org} pro Moor wird die durchschnittliche Moormächtigkeit M_H in dm mit dem organischen Kohlenstoffgehalt des Torfs (C_{orgH} -Gehalt) in t C pro dm und ha (basierend auf dem durchschnittlichen Zersetzungsgrad der Torfe in dem Moor) und mit der Moorfläche A in ha multipliziert:

$$C_{org} = M_H \times C_{orgH} \times A$$

Tabelle 1: Zuordnung spezifischer Gehalte an organischem Kohlenstoff zu den Torfen

Zuordnung spezifischer Gehalte an organischem Kohlenstoff je Zersetzungsgrad aus Literaturwerten		
ZG nach KA5	C _{org} in t/ha*dm	n (Stichprobenumfang)
Torf ZG 1	29	10
Torf ZG 2	47	145
Torf ZG 3	64	172
Torf ZG 4	81	72
Torf ZG 5	99	429
Anmoortorf	35	M&W*

*M&W: Der Wert für Anmoortorfe mit 15-30 % organischer Masse an der Gesamtsubstanz entspricht den vom Ingenieurbüro Meier & Weise bei Untersuchungen in Hessen analysierten Wert für Anmoortorfe

Die Anzahl der zu Grunde liegenden Einzelwerte ist unter n angegeben.

*Der Wert für Anmoortorfe mit 15-30 % organischer Masse an der Gesamtsubstanz entspricht dem vom Ingenieurbüro Meier & Weise bei Untersuchungen in Hessen analysierten Wert für Anmoortorfe.

Anmerkungen: Werte Stand August 2023 gebildet nach Auswertung von Literaturdaten Carbstor, Berliner Moorböden, aktualisierten Untersuchungen Waldmoore Hunsrück.

„n“ kennzeichnet die Anzahl der verwendeten Literaturdaten. Diese sind für z1 zu wenige – z1 kommt aber als Durchschnittswert für das Gesamtprofil in unseren Flächen nicht vor.

Der Torfzersetzungsgrad (ZG) wird als Durchschnittswert für das jeweilige Moorpolygon im Gelände nach meist mehrere Bohrungen geschätzt, ebenso die Torfmächtigkeit als Durchschnitt in Dezimeter für das Moorpolygon. Daraus ergibt sich dann die gespeicherte Kohlenstoffmenge.

Tabelle 2: Zuordnung spezifischer Gehalte an organischem Kohlenstoff zu Anmoortorfen und Moorgley

Vermoorte Flächen unter 30 cm Torf (meist Moorgley mit 10-30 cm Torf, aber auch Anmoorgleye) werden gröber kartiert und daher mit einem pauschalen Torfmächtigkeitswert für alle solchen Flächen in Hessen verrechnet:

„Anmoor-Typ“	C _{org} in t/ha*dm	Pauschale Mächtigkeit	C _{org} in t/ha	Begründung für pauschale Mächtigkeit
Anmoorgley (AM)	(Quelle M&W) 35	3 dm	105	Anmoorgley kann beliebig mächtig sein, wird aber ungenauer in Flächenausdehnung kartiert. 3 dm ist eine Durchschnittsannahme
Moorgley (MG)	(entspricht Torf z4) 82	2,5 dm	203	Mächtigkeit muss definitionsgemäß zwischen 10 und 30 cm liegen – tendenziell wurden im Waldmoorprojekt eher Mächtigkeiten um 20-30 cm angetroffen.

5.3 Treibhausgas-Emissionen aus den Mooren

5.3.1 Quantifizierung von Treibhausgasemissionen – Stand des Wissens

Im Folgenden wird der Stand des Wissens zur Abschätzung klimarelevanter Treibhausgasemissionen aus organischen Böden vorgestellt: Die belastbare Quantifizierung von Treibhausgasemissionen aus natürlichen, entwässerten und wiedervernässten Moorstandorten gehört zu einer wichtigen Aufgabe in der nationalen Treibhausgasberichterstattung, da diese als größte Quelle außerhalb des Energiesektors identifiziert wurden (Röhling et al., 2014). Es existieren verschiedene Ansätze, denen eine Vielzahl von **Gasflussmessungen auf Moorstandorten** zugrunde liegt. Die für die internationale Berichterstattung erforderlichen klimarelevanten Gase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), die im Rahmen menschlicher Aktivitäten durch Landnutzung oder Landnutzungsänderungen freigesetzt oder festgelegt werden, sind im 2014 veröffentlichten IPCC Wetlands Supplement (IPCC, 2014) als Emissionsfaktoren für die jeweilige Landnutzung veröffentlicht. Sie werden als Global Warming Potential (GWP) in t CO₂eq. ha⁻¹ a⁻¹ bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren unter Berücksichtigung der Umrechnungsfaktoren für Methan und Lachgas angegeben (1 kg CH₄ = 25 kg CO₂ und 1 kg N₂O = 298 kg CO₂) (Forster et al., 2007).

Die Werte im IPCC Wetlands Supplement stützen sich auf bis dato bekannte Messungen und beziehen auch die Freisetzung von Methan aus Entwässerungsgräben sowie den Austrag löslichen Kohlenstoffs (C_{DOC} = dissolved organic carbon) über Auswaschung in die Berechnung mit ein. Eine Regionalisierung der Emissionsfaktoren für Deutschland ist in der Arbeit von Tiemeyer et al. (2020) vollzogen worden. Gasflussmessungen an 21 Standorten in Deutschland auf unterschiedlichen Landnutzungskategorien wurden in Beziehung gesetzt zu einer Karte der modellierten mittleren jährlichen Wasserstände für unterschiedliche Landnutzungskategorien, basierend auf periodischen Wasserstandsmessungen aus 53 Moorbodenstandorten in Deutschland. Der daraus resultierende Emissionsfaktor für CO₂ _{onsite} ist mit 7,7 t C ha⁻¹ a⁻¹ für entwässerte Moorstandorte unter forstlicher Nutzung dabei mehr als doppelt so hoch wie der im IPCC Wetlands Supplement für diese Art der Landnutzung angegebene Wert mit 2,6 t C ha⁻¹ a⁻¹. Ursache dafür sind laut Tiemeyer et al. (2020) die in den vom IPCC genutzten Studien niedrigeren Jahresdurchschnittstemperaturen der Untersuchungsgebiete sowie der im Vergleich zu deutschen Standorten durchschnittliche höhere mittlere Wasserstand.

Aus der Datengrundlage (Supplement 1 zu Tiemeyer et al., 2020) geht hervor, dass überwiegend landwirtschaftlich genutzte nährstoffreiche Moorböden Eingang in die Auswertungen fanden. Der in diesen Moorböden wesentlich höhere durchschnittliche Zersetzungsgrad der Torfe im Gegensatz zu oligo- bis mesotroph sauren Moortypen, könnte ein weiterer Faktor für die starke Abweichung sein. Da höhere Zersetzungsgrade jedoch mit höheren Vorräten organischen Kohlenstoffs assoziiert sind (Klingenfuß et al., 2015), folgt aus der Verwendung dieser Daten eine Überschätzung der Gesamt-CO₂-Emissionen aus Waldmoorböden. Die regionale Anpassung der Emissionsfaktoren für CH₄ und N₂O in verschiedenen Landnutzungskategorien organischer Böden erfolgte ebenfalls durch Tiemeyer et al. (2020), wobei hier tatsächliche Messwerte aus bewaldeten Standorten eingeflossen sind. Die Modellierung der Emissionsfaktoren für Methan erfolgte an Hand des Grundwasserflurabstands getrennt nach den Landnutzungskategorien Forst, Acker- und Weideland sowie ungenutzte/nasse Moorböden. Ab einem Wasserstand höher als 20 cm unter Flur steigen den Messungen zufolge die Methan-Emissionen stark an. Dabei sind die Emissionen am höchsten an offenen Standorten bei Vorhandensein von Pflanzen mit großporigem Aerenchym (sog. „shunt species“) (Bellisario et al., 1998; Joabsson and Christensen, 2001). Darunter zählen überwiegend Pflanzen wassergesättigter Moorstandorte, wie z. B. *Eriophorum vaginatum* oder *Scheuchzeria palustris* (Drösler, 2005). Danach kommen offene Standorte ohne „shunt species“, gefolgt von bewaldeten Standorten, in denen die Methanemissionen keinen nennenswerten Anstieg verzeichnen (Couwenberg et al., 2011). Tiefentwässerte Standorte emittieren kein Methan bzw. fungieren als leichte

Methansenken. Jedoch sind die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben ein ernstzunehmender Faktor von Emissionen auf diesen Standorten. Insbesondere auf Ackerland oder Torfabbaugebieten betragen die Methanemissionen aus Gräben bis zu 55 % der Gesamtemissionen von Methan (Tiemeyer et al., 2020). Der Austrag von Lachgas aus Waldmooren dürfte hingegen kaum relevant sein, da als Gründe für die zeitweise auftretende erhöhte Nitrifikation das Auftauen und Frieren bzw. Düngung als zusätzliche Stickstoffquelle diskutiert werden (Jungkunst et al., 2006; van Beek et al., 2004). Für wiedervernässte bzw. wassergesättigte Moore sind N_2O -Emissionen laut (Couwenberg et al., 2011) vernachlässigbar.

Der sogenannte **GEST-Ansatz** (Greenhouse-Gas-Emission-Site-Type), der von Couwenberg et al. (2008) entwickelt wurde und dem Klimaschutzrechner des Greifswald Moor Centrum (GMC) zugrunde liegt, basiert auf einer Einstufung der Vegetation unter Verwendung der Kombination spezifischer Artengruppen und deren Abwesenheit als Indikation der Standorteigenschaften - in diesem Fall der Wasserstufe (nach Koska, 2001). Um Treibhausgasemissionen mit der GEST-Methode abschätzen zu können, müssen zumindest Differenzialarten vor Ort aufgenommen werden. Für gebüsch- und baumdominierte Moore wurde das GEST-Konzept von Spangenberg (2011) weiterentwickelt. Da eine Bewertung des ökosystemaren Gasaustauschs bewaldeter Standorte nur über aufwändige Eddy-Covariance-Messungen möglich ist (mit Haubenmessungen wird lediglich der Gasaustausch der bodennahen Vegetation erfasst), wird über die Kombination von Schätzwerten aus dem GEST-Ansatz mit Biomassezuwachsdaten für Gehölze eine Annäherung an eine Gesamtbilanz erreicht. Zunächst werden die Schätzwerte des Global Warming Potential in $\text{t CO}_2\text{eq. ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ der Vegetationstypen offener Moore an Hand der verschiedenen Wasserstufen den möglichen Wald-Vegetationsformen von Moorwäldern und Mooregebüschern zugeordnet (Clausnitzer und Succow, 2001). Dies erfordert jedoch ebenfalls zumindest die Bestimmung von Vegetationsformen an Hand von Differenzialarten sowie Informationen über den Bestockungsgrad, Baumarten und jährliche Zuwachsraten am Standort, an Hand derer die Netto-Festlegung von Kohlenstoff in der Holzbiomasse berechnet werden kann. Da diese Auswertungen sehr differenziert erfolgen müssen, sind in Spangenberg (2011) bisher nur an Hand von hypothetischen Waldbeständen GWP-Werte für Moorwälder mit real gemessenen Werten verglichen worden, wobei die Abweichungen teils recht groß sind.

Der vom GMC unter <https://mowi.botanik.uni-greifswald.de/de/moore/tools/klimaschutzrechner.php> angebotene **Klimaschutzrechner (THG-Rechner)** basiert ebenfalls auf GESTs sowie auf bisher nicht veröffentlichten Messdaten und kann für landwirtschaftlich genutzte Moore ab einer Mindestgröße von 1 ha und Entwässerungstiefen von -30 cm unter Flur oder mehr verwendet werden. Er ist daher sowohl von der zugrunde liegenden Methodik, als auch aus der Größenordnung heraus, für die Waldmoore Hessens ungeeignet. Es wird immer eine Mindestentwässerungstiefe von 30 cm angenommen.

Im Rahmen der Anrechnung von Renaturierungsmaßnahmen in Mooren als handelbare CO_2 -Zertifikate (sog. MoorFutures), bei denen empfohlen wird die Berechnung über den GEST-Ansatz durchzuführen, ist bisher die Wiedervernässung von nicht-baumbestandenen Mooren die einzige akzeptierte Aktivität für die Generierung von MoorFutures, da keine Methodik für die Quantifizierung aus baumbestandenen Mooren vorliegt (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017).

5.3.2 Treibhausgasemissionen von Waldmoorökosystemen in natürlicher Ausprägung sowie nach Wiedervernässung

Das IPCC Wetlands Supplement (IPCC, 2014) beinhaltet Emissionsfaktoren für wiedervernässte und natürliche (nicht entwässerte Moorstandorte) und kommt zu dem Schluss, dass sich diese im Hinblick auf Treibhausgasemissionen im Wesentlichen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Verwendet wurden dabei Gasflussmessungen aus Standorten mit einem durchschnittlichen mittleren Grundwasserstand von 0,3

m unter Flur oder darüber, wobei unklar ist, wie viele der verwendeten Daten aus bewaldeten oder zumindest teilweise mit Gehölzen bestandenen Mooren stammen. Dabei weisen nährstoffreiche Standorte eine größere Spanne an Emissionswerten auf als nährstoffarme. Als Begründung dafür kann die höhere Diversität der Standorte bezogen auf die Artenausstattung sowie die Landnutzungshistorie angesehen werden. Obwohl einige Studien natürlich ausgeprägte nährstoffreiche organische Böden als Kohlenstoffquellen angeben (Drösler et al., 2013; Wickland et al., 2001), sollten diese Angaben mit Vorsicht behandelt werden, da es sich jeweils um Momentaufnahmen handelt, die nicht die langfristigen natürlichen Schwankungen abbilden können. Sowohl natürliche als auch erfolgreich wiedervernässte nährstoffreiche organische Böden stellen eine Kohlenstoffsенке dar, solange sie nicht durch menschliche Aktivitäten wie Verschmutzung oder atmosphärische Depositionen beeinträchtigt werden. Nährstoffarme organische Böden zeigten weniger Variabilität der CO₂-Flux-Daten. Dies legt nahe, dass diese nach wie vor nachhaltige Kohlenstoffsенке für atmosphärisches Kohlenstoffdioxid sind. Es ist somit davon auszugehen, dass natürlich baumbestandene Moorbodenstandorte mit einem oberflächennahen Grundwasserstand eine Kohlenstoffsенке darstellen.

Untersuchungen von (Hommeltenberg et al., 2014) haben in einem Vergleich der Treibhausgasemissionen mittels Eddy-Covariance-Messungen (Net Ecosystem Exchange) aus einer Hochmoor-Kiefernwaldgesellschaft mit einem räumlich benachbarten entwässerten und mit Fichten aufgeforsteten Moorstandort konstatiert, dass der entwässerte Standort über zwei Messzyklen hinweg zwar aktuell eine größere Kohlenstoffsенке darstellt ($-1,30 \pm 0,31 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $-3 \pm 0,66 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gegenüber $-0,53 \pm 0,28$ und $-0,73 \pm 0,38 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), die Kohlenstoffaufnahme im Fichtenforst dabei aber viel stärker von den Umweltvariablen abhängt als dies im natürlichen Moorwald der Fall ist. Berücksichtigt man den bisher durch die Entwässerung entstandenen Verlust des Bodenkohlenstoffs durch Torfzehrung, der sich in der vorliegenden Untersuchung auf 134 t C ha^{-1} über einen Zeitraum von 70-80 Jahren seit Entwässerung beläuft, wird deutlich, dass das natürliche Kiefernwaldmoor-Ökosystem den kontinuierlicheren Kohlenstoffspeicher darstellt. Um den Kohlenstoffverlust der Vergangenheit kompensieren zu können, müsste der Fichtenbestand ab heute über etwa 100 Jahre hinweg dieselben Zuwachsraten wie aktuell aufweisen. Dies zeigt, dass bei der Interpretation von Messwerten zur Quantifizierung der Klimaschutzwirkung von Moorstandorten nicht nur die aktuelle, sondern auch die langfristige Kohlenstoffbindung angegeben werden muss.

Die Artenausstattung mesotroph-saurer Mooregebiete der Mittelgebirge lässt vermuten, dass diese in ihrer natürlichen Ausprägung ebenfalls als Kohlenstoffsенке einzustufen sind. Häufig sind sie durch einen stetigen Grundwasserzustrom aus Quellen oder Klüften, teils trotz intakter Entwässerungsgräben ganzjährig wassergesättigt und zeichnen sich durch das Vorkommen zahlreicher Torfmoosarten aus. Hier lässt sich durchaus die Zuordnung zum GEST „Sehr feuchte Torfmoosrasen“ im oligotroph-sauren Bereich vornehmen, der mit einem GWP von $-1,5 \text{ t CO}_2\text{eq. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ assoziiert ist. Betrachtet man die bei Tiemeyer et al. (2020) im Supplement 2 aufgeführten gebietsspezifischen Emissionen (GWP), wird ebenfalls deutlich, dass eine Kohlenstoffsенкеfunktion unter nährstoffarmen Bedingungen und Vegetation wie z. B. *Sphagnum fallax*, *Eriophorum vaginatum*, *Juncus effusus*, *Carex canescens* und *Carex nigra* nachgewiesen werden konnte. Die Untersuchungen bestätigen die weiter oben aufgeführte Annahme, dass natürliche Moorwälder und nasse Waldmoore Kohlenstoffsенке darstellen.

Viele der Waldmoore, die aktuell nährstoffarmen Bedingungen ausgesetzt sind, weisen die hier genannten Arten auf und haben das Potential, sich bei Wiederherstellung des natürlichen Wasserregimes wieder zu langfristigen Kohlenstoffsенке zu entwickeln. Es besteht jedoch ein erhöhter Forschungsbedarf an der Gesamtbilanzierung von Treibhausgasemissionen der Vielfalt bewaldeter Moorstandorte, sowohl in natürlicher Ausprägung als auch in verschiedenen Stufen der Degradation und Wiedervernässung.

5.3.3 Abschätzung der potenziellen THG-Emissionen von Waldmooren in Hessen

Aus unserer Sicht ist die Übertragbarkeit der im Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Ansätze (GEST- und THG-Rechner) zur Berechnung der aktuellen Treibhausgasemissionen auf die überwiegend geneigten und teilweise bewaldeten Moore mit mesotroph-saurem Torf im Rahmen unseres Projekts nicht gegeben. Die von uns im Gelände erfassten Daten beschränken sich aufgrund der Menge der zu bearbeitenden Standorte auf eine durchschnittliche Moormächtigkeit, einen durchschnittlichen Zersetzungsgrad der Torfe sowie eine Abschätzung der aktuellen Entwässerungstiefe.

Für eine detaillierte Erfassung der Vegetation und Abschätzung der im jeweiligen Untersuchungsgebiet vorhandenen Anteile der Vegetationseinheiten, wie sie notwendig wäre, um einen GEST zuzuordnen, steht nicht ausreichend Zeit zur Verfügung. Daher eignet sich auch nicht die von (Spangenberg, 2011) vorgeschlagene Kombination aus für bewaldete Standorte angepassten GESTs und waldwachstums-kundlichen Daten. Auch dies würde einen erheblichen Aufwand für die Datenerhebung bedeuten.

Sowohl die im IPCC Wetlands Supplement (IPCC, 2014) für bewaldete organische Böden angegebenen Emissionsfaktoren (EFs) für CO₂ von 2,91 t C ha⁻¹ a⁻¹ als auch die von Tiemeyer et al. (2020) für Deutschland angepassten Emissionsfaktoren von 8,01 t C ha⁻¹ a⁻¹ scheinen (zumindest im Hinblick auf CO₂-Emissionen auf forstlich genutzten organischen Böden) aufgrund der verwendeten Datengrundlage aus überwiegend landwirtschaftlich genutzten tiefgründigeren Mooren des Tieflands (nährstoffreichere Niedermoore und entwässerte Hochmoore) nicht für Waldmoore in Mittelgebirgsstandorten geeignet zu sein bzw. sind mit großen Ungenauigkeiten behaftet. Ebenso existieren bisher keine konkret auf bewaldete Standorte angepassten GESTs, die eine Einordnung einzelner Gebiete und ihrer Klimarelevanz ermöglichen würden (Klingenuß et al., 2015).

Um dennoch eine Aussage über die Klimaschutzleistung der hessischen Waldmoore treffen zu können, wird eine vereinfachte Methode angewandt:

Diese Methode wurde unter anderem im Projekt „Berliner Moorböden im Klimawandel“ benutzt (Klingenuß et al., 2015). Dabei gilt der gesamte Torfkörper als von Torfzehrung bedroht, der sich oberhalb des identifizierten Grundwasserflurabstands befindet und somit belüftet ist.

Für die Berechnung des potentiell von Freisetzung bedrohten Bodenkohlenstoffs wird der Kohlenstoffvorrat C_{org gef.} der aktuell von Entwässerung betroffenen Torfschicht jedes Moores analog der gesamten Kohlenstoffmenge (vgl. Abschnitt 1) berechnet. Anstatt der Gesamtmächtigkeit des Torfs wird jedoch die Mächtigkeit der von Entwässerung bedrohten Torfschicht (M_{H gef.} in dm) mit dem organischen Kohlenstoffgehalt (C_{org H} in t C pro ha und dm) des durchschnittlichen Zersetzungsgrads der Torfe und der Fläche des Moores (A in ha) multipliziert:

$$C_{orggef.} = M_{Hgef.} \times C_{orgH} \times A$$

In der Praxis entspricht M_{H gef.} dem mittleren Grundwasserflurabstand bzw. der geschätzten Entwässerungstiefe in dm, wenn dieser nicht tiefer als die Torfmächtigkeit liegt. Reicht die Entwässerung

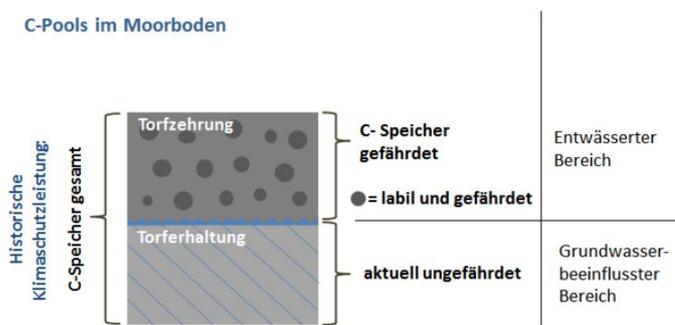


Abbildung 12: C-Pools im Moorboden (Grafik: Klingenuß et al. 2015)

Tabelle 3: Kriterien für die Bestimmung des als gefährdet einzustufenden Kohlenstoffvorrats	
Kriterium	Bewertung
Gräben	Beim Vorhandensein von Entwässerungsgräben im Moorzentrum wird die Grabentiefe als Entwässerungstiefe angenommen (Tiefe der Gräben zur Mooroberfläche bzw. bei wassergefüllten Gräben der tiefste Wasserspiegel im Graben).
Vererdung	Wichtige Hinweise bietet die Mächtigkeit eines Vererdungshorizonts in der obersten Torflage , da vererdeter Torf ein eindeutiges Indiz für eine direkte oder indirekte Entwässerung ist.
Vegetation	Störzeiger in der Vegetation geben auch zu nassen Jahreszeiten deutliche Hinweise auf einen abgesenkten Wasserstand. Beispiele sind Brennesseln, Him- und Brombeeren, vitaler neuer Gehölzaufwuchs, Reisermoorvegetation. Derartige Störungszeiger außerhalb von Bulten deuten je nach Moortyp auf Entwässerungstiefen von mindestens 3 dm hin.
Moorwachstum	Wenn bei der Geländebegehung u. a. aufgrund von Vegetationsmerkmalen notiert wurde, ob das Moor gegenwärtig <i>wachsend</i> , <i>teilweise wachsend</i> , <i>stagnierend</i> oder <i>schrumpfend</i> ist, kann hieraus eine Wasserstufe (nach KOSKA 2001) und die Entwässerungstiefe geschätzt werden, wenn sonst keine die ganze Fläche entwässernden Gräben oder Vererdungsmerkmale brauchbare Hinweise liefern: Moor wachsend Wasserstufe $\geq 5+$ Entwässerung/gefährdeter C-Speicher: 0 dm teilweise wachsend Wasserstufe $\sim 4+$ Entwässerung/gefährdeter C-Speicher: 1,5 dm Moor stagnierend Wasserstufe $\sim 3+$ Entwässerung/gefährdeter C-Speicher: 3 dm Moor schrumpfend Wasserstufe $\leq 2+$ Entwässerung/gefährdeter C-Speicher: > 3 dm
Flachgründigkeit	Für flachgründige Moor- und vor allem Anmoorflächen, die aktuell nicht ausreichend wasserversorgt und/oder von Entwässerung betroffen sind, wird der ganze Torfkörper als bedroht angesehen . Dies ist insbesondere angesichts der häufigeren Dürresommer im Zuge des Klimawandels angemessen.
Kleines Einzugsgebiet	Bei Vermoorungen mit kleinem Wassereinzugsgebiet (kaum größer als die Moorfläche) spielt die Wasserversorgung durch Niederschlag eine Hauptrolle. Da im Zuge des Klimawandels die prognostizierte Anzahl und Dauer von Trockenperioden zunimmt, muss auch hier eine Gefährdung des gesamten Torfkörpers angenommen werden – außer in regenreichen Hochlagen und bei tiefgründigen Mooren.
Grundwasser-Absenkung	Hier ist von einer Gefährdung des gesamten Torfkörpers oberhalb des abgesenkten Grundwasserniveaus auszugehen. Bei bestehender Grundwasserabsenkung gibt es in der Regel schon deutliche Vererdungsmerkmale.

hingegen in den Mooruntergrund, kann der gesamte organische Kohlenstoff im Torf als gefährdet angesehen werden, so dass in diesem Fall gilt: $C_{org} = C_{org\ gef.}$

Heraus kommt auch hier ein Wert in Tonnen organischem Kohlenstoff pro Moor. Das Ergebnis $C_{org\ gef.}$ kann als Klimaschutzleistung einer Moorrenaturierung angesehen werden, wenn das Moor *vollständig* vernässt wird. Das Moor muss dabei auch tatsächlich vollständig vernässbar sein, was beispielsweise bei Mooren in großräumigen Grundwasserabsenkungsgebieten nicht der Fall ist.

Die exakte Bestimmung des jährlichen mittleren Grundwasserflurabstands wird üblicherweise an Hand von fest installierten Grundwassermesspegeln vorgenommen. Auch diese Art der Genauigkeit lässt sich in unserem Projekt mit den meist nur einmaligen kurzen Moorbegehungen nicht umsetzen, weswegen über andere Merkmale die Entwässerungstiefe im Gelände grob abgeschätzt werden muss (siehe Tabelle 3 auf der gegenüberliegenden Seite).

Im Projekt „Waldmoore in Hessen“ wird bei echten Mooren mit mindestens 30 cm Torf die Entwässerungstiefe für das jeweilige Moorpolygon im Gelände nach den Kriterien aus Tabelle 3 geschätzt. Der geschätzte Wert kann dabei von einer tatsächliche gemessenen Graben- oder Vererdungstiefe abweichen, wenn er als Mittelwert für verschiedene Bereiche eines Moores gebildet wird (Beispielwert: -2 dm, wenn nur ein kleinerer Teilbereich aktiv wachsend ist mit 0 dm Entwässerung und größerer Teilbereich stagnierend mit 3 dm).

Bei Mooren mit kleinräumig wechselnden Torfmächtigkeiten kann die durchschnittliche Moortiefe zu einer leicht fehlerhaften Einschätzung von $C_{org\ gef.}$ führen, da tiefgründigere Moorteile in einigen Situationen weiter unter der Entwässerungstiefe liegen. Im Rahmen des Projekts wird eine Anpassung auch hier bei der Schätzung der Entwässerungstiefe im Gelände vorgenommen, die dann etwas geringer anzusetzen ist.

Der organische Kohlenstoff in Moorgleyen (<30 cm Torf) und einigen Anmoorgleyen wird in vielen Fällen vollständig gefährdet sein. Grund dafür ist die Geringmächtigkeit und die Bildung dieser Moorsubstrate unter nicht ganz für ein Moorwachstum ausreichenden Bedingungen oder gar als Überrest eines entwässerten Moores. Da es auch Vermoorungen mit permanent nassen „Anmooren“ gibt (z. B. Quellsümpfe mit für tiefgründiger Torfbildung zu hohem Gefälle oder Nährstoffgehalt), wird bei den Vermoorungen unter 30 cm Torf bzw. mit Anmoortorf ebenfalls eine der Situation angepasste Schätzung der Entwässerungstiefe vorgenommen. Diese muss aber berücksichtigen, dass aus Zeitmangel für eine genauere Geländeuntersuchung im Projekt das Torfvolumen und der Kohlenstoffgehalt der Moorgleye pauschal mit 2,5 dm und der Anmoorgleye mit 3 dm Mächtigkeit berechnet wird (vgl. Tabelle 2 auf Seite 21 unten).

Labile Fraktion des C-Speichers

Die zusätzliche Berechnung der labilen Fraktion innerhalb des C-Speichers, die besonders schnell umgesetzt wird und potentiell z. B. in Form von CO_2 in die Atmosphäre entweichen kann, weist keinen Zusammenhang mit dem Zersetzungsgrad der Torfe auf, sondern ist vielmehr besonders stark mit der leicht mineralisierbaren Oberbodensubstanz (Behm, 1988; Körschens et al., 1998) sowie der mikrobiellen Biomasse im Boden korreliert (Sparling et al., 1998).

Zum labilen C-Speicher erheben wir keine Daten. Daher lässt sich diese Fraktion in unserem Projekt „Waldmoore in Hessen“ nicht abschätzen.

Potentielle CO_2 -Freisetzung

Die Umrechnung von gefährdetem Kohlenstoffspeicher $C_{org\ gef.}$ in potentiell freigesetztes Kohlendioxid CO_2 erfolgt entsprechend des chemischen Molekulargewichts durch Multiplikation mit dem Faktor 3,67:

$$1 t C_{org\ gef.} = 3,67 t CO_2$$

Dabei bleibt unberücksichtigt, dass kleine Mengenanteile des Kohlenstoffs in anderer Form freigesetzt werden, z. B. als stärker klimawirksames Lachgas N₂O oder als wassergelöster organischer Kohlenstoff.

5.3 Ergebnisse der Kohlenstoffberechnungen

Mit den vorstehend ausführlich beschriebenen Methoden ist für die Waldmoore in Hessen eine Abschätzung der Mengen an organischem Kohlenstoff möglich. Sie dürfte deutlich exakter sein, als bisher z. B. vom Thünen-Institut bundesweit durchgeführte Hochrechnungen, die nur auf bestehenden Bodenkarten und der Annahme möglicher durchschnittlicher Moortiefen basieren konnte.

5.3.1 Kohlenstoffwerte der untersuchten Moore

Die von uns kartierten Vermoorungen enthalten insgesamt rund 126.000 Tonnen organischen Kohlenstoff, was gut 460.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten entspricht. Auffällig ist, dass die Hochmoorreste Rotes Moor und Breungeshainer Heide mit ihrer relativ großen Fläche und hohen Torfmächtigkeit besonders bedeutende Torfspeicher sind.

Ebenfalls auffällig ist die hohe Bedeutung der Moorgleye, die zwar durchschnittlich nur 20 cm Torf haben, aber große Flächen in Hessen einnehmen und deren fester Torf hohe Kohlenstoffwerte pro Dezimeter aufweist.

Kohlenstoffmenge in den bisher vom Waldmoorprojekt in Hessen kartierten Mooren

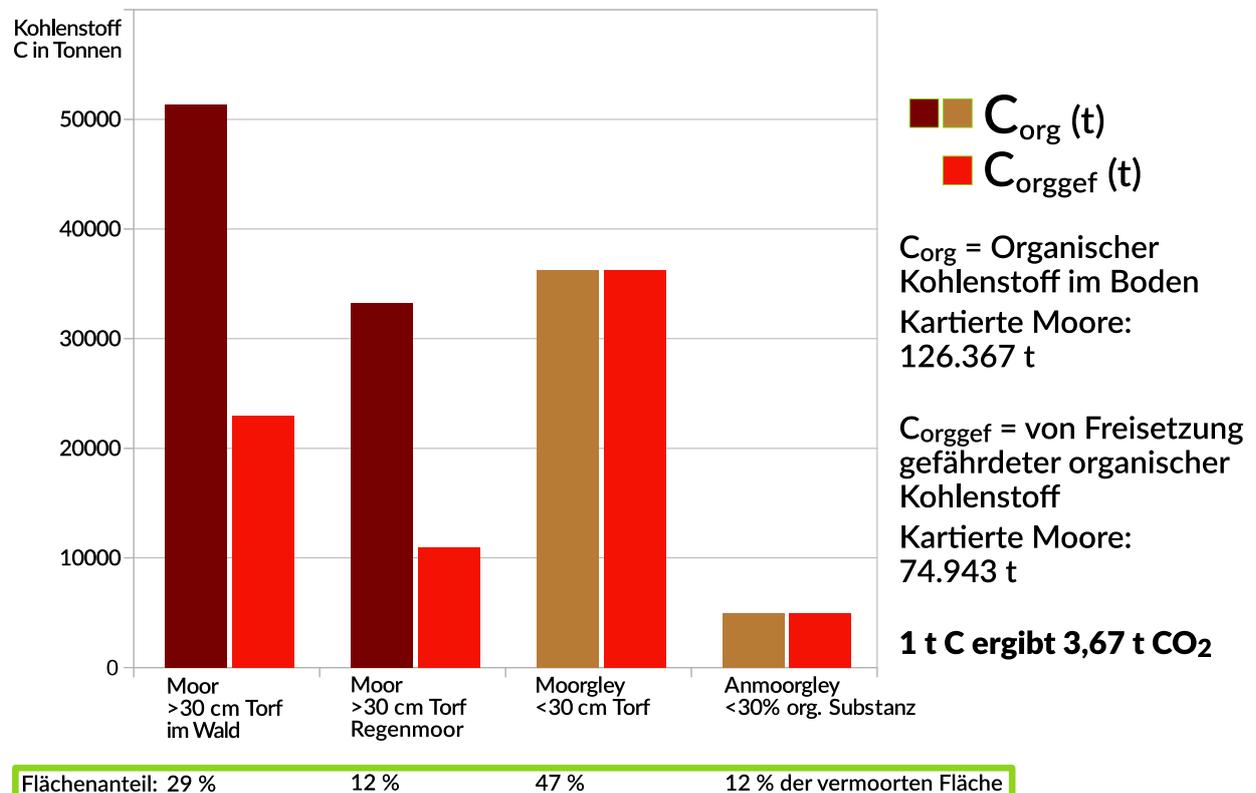


Abbildung 13: Organischer Kohlenstoff in den kartierten Vermoorungen

Die Moorgleye sind allerdings aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit nicht nur durch Entwässerungsgräben, sondern auch durch den Klimawandel (Dürresommer), insgesamt austrocknungsgefährdet. Daher muss ihr gesamter Kohlenstoff als gefährdet angenommen werden.

In den eher kleinen echten Moorflächen im Wald ist der Anteil gefährdeten Kohlenstoffs deutlich niedriger. Das hat in vielen Mooren mit einer guten Quellwasserversorgung der Moore zu tun, die bei erfolgtem Grabenrückbau auch ausreichend Wasser für ein wieder wachsendes Moor liefern kann.

Die Regenmoore haben ernste Probleme mit der verschlechterten klimatischen Wasserbilanz und zusätzlich den künstlichen Reliefunterschieden durch den früheren Torfabbau. Ihr austrocknender Torfanteil (= gefährdeter Kohlenstoff) zersetzt sich allerdings wesentlich langsamer, da der Hochmoortorf besonders nährstoffarm-sauer ist.

5.3.2 Hochrechnung auf die unkartierten Waldmoor-Verdachtsflächen

Die Hochrechnung wurde analog zu den in Kapitel 4 beschriebenen Flächenschätzungen auf Basis der ermittelten Daten zu den Verdachtsflächen durchgeführt. Wie diese kann sie nur Zahlen für die Waldmoore einschließlich der beiden Regenmoore liefern. Zu den nicht selten mit Auenlehm überdeckten Offenlandmooren in Ackerlandschaften wie z. B. im Hessischen Ried, der Untermainebene und Wetterau, die einen bedeutenden Teil der Torfkörper in Hessen umfassen oder historisch umfassten, liegen uns keine eigenen Untersuchungen und Zahlen vor.

Tabelle 4: Hochrechnung Waldmoorfläche und Kohlenstoff für Hessen

Hochrechnung Moorfläche+ Kohlenstoff	Prognostizierte Vermoorungen und Durchschnittswerte aus der Verdachtsflächenkulisse	Summe unkartierte Prognoseflächen	Summe Prognoseflächen plus kartierte Wald- und Regenmoore (220 + 451 = 671)
Anzahl Waldmoorflächen		ca. 450 Vermoorungen erwartet	ca. 670 Vermoorungen insgesamt
Vermoorte Waldmoor-Fläche	1,48 ha durchschnittlich pro Waldmoor	667 ha	≥1.050 ha
C _{org} Kohlenstoff	396 t durchschnittlich pro Waldmoor	178.596 t	≥304.963 t
C _{org} gef gefährdeter Kohlenstoff	294 t durchschnittlich pro Waldmoor	132.594 t	≥207.537 t

Für die Waldmoore ergeben sich in der hessenweiten Hochrechnung mindestens 300.000 Tonnen organischer Kohlenstoff (1,1 Million Tonnen CO₂-Äquivalente), von denen 200.000 Tonnen gefährdet sind.

Die Moore sind derzeit Kohlenstoffemittenten, solange die historischen Entwässerungseinrichtungen weiter wirken, der Klimawandel Flächen austrocknet bzw. die Grundwasserneubildung reduziert und lokal auch Grundwasserentnahmen im Umfeld die Moore beeinträchtigen.

Von dem gefährdeten organischen Kohlenstoff lässt sich daher nicht alles, aber ein bedeutender Teil, durch Vernässungsmaßnahmen wie etwa Grabenrückbau im Moor und Erhöhung der Grundwasserneubildung im Wassereinzugsgebiet sichern. Dieser Kohlenstoff-Teil sollte unbedingt gesichert werden!

6. Arbeitspaket Good Practice-Beispiele für Renaturierungen und ihre Kosten

„Good Practice-Beispiele“ von Vernässungsverfahren in Waldmooren aus Hessen und benachbarten Bundesländern spielen im Projekt eine wichtige Rolle, da sie im Hinblick auf technische Abläufe und mögliche Kosten konkrete Hinweise geben.

Eine Darstellung von Beispielen ist auch deswegen hilfreich, weil eine Gesamtkostenabschätzung (Grobkalkulation) für die empfohlenen Renaturierungsmaßnahmen der Waldmoore in Hessen aus den Daten des Projekts nicht erstellt werden kann. Sie wäre erst möglich, wenn eine genaue Planung für jedes Moor vorliegt.

Im Projekt wurde aber nur ein Screening mit einem einmaligen Besuch der kartierten Moorflächen durchgeführt. Daraus lassen sich bereits notwendige Maßnahmen ableiten, jedoch nicht ihr tatsächlicher Umfang. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass für die genauere Planung mehrere Besuche mit Nachkartierung weiterer Gräben möglichst zu unterschiedlich nassen Jahreszeiten notwendig sind.

6.1 Durchgeführte Wiedervernässungsprojekte

Innerhalb der dreijährigen Projektlaufzeit wurden unter fachlicher Begleitung der Projektmitarbeitenden in sechs Mooregebieten Revitalisierungsmaßnahmen abgeschlossen, in drei weiteren sind Maßnahmen begonnen worden und für 15 Flächen sind 2024 Maßnahmen zur Umsetzung vorgesehen, die zum Teil jedoch noch weiter konkretisiert werden müssen.

Maßnahmen im Moor/Anmoor

Als Best Practice-Beispiele der Revitalisierung wurden Mooregebiete im näheren Umfeld der NW-FVA (in den Forstämtern Reinhardshagen und Hessisch Lichtenau) ausgewählt, bei denen eine enge fachliche Begleitung der Maßnahmenumsetzung in Abstimmung mit den Forstämtern gewährleistet werden konnte. Bei mit Fichten bestockten Mooren ist häufig zunächst eine Holzerntemaßnahme notwendig. Als zweiter Schritt müssen die Entwässerungsgräben zurückgebaut werden. Bei geneigten Mooren am Hang ist idealerweise eine Vollverfüllung der Entwässerungsgräben notwendig, verbunden mit dem Einbau von Holzspundwänden zur Sicherung gegen Erosion und zur Erhöhung des Durchflusswiderstands. In Mooren mit mächtiger Torfauflage wird auf Torf als Füllmaterial zurückgegriffen, der an anderer Stelle als Flachschorf entnommen wird. Moore im Bergland besitzen in der Regel jedoch nur wenige Dezimeter mächtige Torfschichten, sodass hier, um die Eingriffe minimal zu halten, auf ein Gemisch aus Sägespänen und Hackschnitzeln als Verfüllung zurückgegriffen wird (die sogenannte „Zuger Methode“). Bei sehr kleinen bzw. stark wassergesättigten Torfen, in denen selbst mit bodenschonender Technik keine Befahrung des Bodens stattfinden sollte, muss dies in Handarbeit geschehen. Dafür hat sich als kompetenter Partner in der Durchführung der Verein Bergwaldprojekt e.V. (www.bergwaldprojekt.de) bewährt. Eine ausgezeichnete fachliche Betreuung der freiwilligen Teilnehmer und Teilnehmerinnen während der praktischen Renaturierungsarbeiten in Verbindung mit der Vermittlung von Hintergrundwissen zur ökologischen Bedeutung von Mooren durch die Projektleitenden gewährleistet die Langlebigkeit der eingebauten Staubauwerke bei gleichzeitig geringer Eingriffsintensität. Sind die Böden bereits stärker verdichtet bzw. ist der Oberboden vererdet, kann die Bearbeitung der Gräben auch über den Einsatz von Kettenbaggern erfolgen, die einen geringen Bodendruck verursachen. Wie eingangs bereits erwähnt kann über die Erstkartierung ein erster Eindruck von der Fläche

gewonnen werden, der zu einer Einschätzung der Renaturierbarkeit führt und eine grobe Abschätzung der dafür notwendigen Schritte erlaubt. Für die Detailplanung sind jedoch weitere Geländetermine, insbesondere für die zeitliche Abstimmung von Maßnahmen mit den Verantwortlichen des jeweiligen Forstamts und/oder weiteren Akteuren vor Ort vonnöten.

Maßnahmen außerhalb des Moores/im Wassereinzugsgebiet

Da es sich bei fast allen hessischen Waldmooren um Niedermoore handelt, die somit von einem Wassereinzugsgebiet abhängig sind, sind Maßnahmen zur Erhöhung der Versickerung innerhalb des bewaldeten Wassereinzugsgebiets und das Vermeiden linearer Abflüsse (z. B. in Wegeseitengraben oder tief ausgefahrenen Rückegassen) eine wichtige Stellschraube für die langfristige Sicherung der Wasserversorgung der Moore. Hier kann über waldbauliche Maßnahmen die Tiefenversickerung positiv beeinflusst werden. Verschiedene Studien kommen zu dem Ergebnis, dass in reinen Buchenbeständen eine um 30-40 % erhöhte Tiefenversickerung gegenüber Fichtenreinbeständen stattfindet. Im niedersächsischen Solling maß die NW-FVA am gleichen Standort 420 mm Tiefenversickerung unter Fichte und 586 mm unter Buche (Daten von Meesenburg, NW-FVA). Dies entspricht einer um 1,6 Millionen Litern pro Hektar und Jahr erhöhten Grundwasserneubildung unter Buchen

Somit sollte das langfristige Ziel in den bewaldeten (und meist weiter bewirtschafteten) Wassereinzugsgebieten die Umwandlung von Nadel- hin zu Laubwäldern oder wenigsten Laub-Nadel-Mischwäldern sein, insbesondere wenn durch Maßnahmen im Moor selbst keine ausreichende Vernässung erreicht werden kann. Als direkt wirksame Methode und als erster Schritt beim Waldumbau kann bereits eine vorsichtige und nicht die Stabilität des Bestandes gefährdende Absenkung des Bestockungsgrades insbesondere in Nadelholzbeständen durch die damit verbundene geringere Verdunstung im Bereich der Kronen-(Interzeption) zur Erhöhung der Wasserzufuhr beitragen. Die Absenkung darf nur so stark sein, dass der Effekt durch höhere Verdunstung aufgrund verstärkter Sonneneinstrahlung und vermehrter Bodenvegetation nicht zunichte gemacht wird. Das DSS-WAMOS favorisiert hierfür einen Bestockungsgrad von 0,6. Unabhängig von den Maßnahmen im Wassereinzugsgebiet empfiehlt das DSS-WAMOS um die vermoorten Flächen eine Pufferzone als Windbremse und Schutz vor Nährstoffeinträgen einzurichten – durch Anlage eines 5-10 m breiten Streifens aus Moor-Birke, Schwarz-Erle oder Grau-Weide (sofern es sich um staunasse Standorte handelt; Schwarz-Erle nur an nährstoffreichen Standorten) oder den standorttypischen Laubbaumarten.

Monitoring

Um den Erfolg der durchgeführten Maßnahmen bemessen zu können, ist es sinnvoll, ein geeignetes Monitoring zu etablieren, mit dessen Hilfe die Entwicklung der Moorwasserstände nachvollzogen werden kann. Generell wird in fachlichen Empfehlungen zu Moorrenaturierungen betont, dass die sommerlichen Tiefstwasserstände das Hauptkriterium dafür sind, ob es zu Torfmineralisation (Torfzersetzung) kommt (s. Tab. 5). Die Absinktiefe und -dauer der Wasserstände im Moor entscheidet maßgeblich über Artenzusammensetzung und Torfbildung bzw. -abbau. Mit zunehmender Absinktiefe und Dauer der Belüftung der Torfe nimmt die Torf-Mineralisation zu.

Dabei gibt es aber offenbar keine absoluten Werte, die in jedem Moor gelten und besagen, wie viele Zentimeter Wasserstand wie lange unter Flur für ein Torfwachstum noch verträglich sind. Häufig werden Tiefstwerte im Sommer um 20 oder 30 cm unter Flur als tolerabel angesehen (Ziel: Torfwachstum), bei Feuchtwiesen auch 30 bis maximal 40 cm (Ziel: Torferhalt). Im Winterhalbjahr sollen die Tiefststände dann flugleich oder nur gering unter Flur sein. Um darüber Aussagen für ein Gebiet treffen zu können, bieten sich also indirekte Verfahren, wie eine Ableitung der durchschnittlichen Tiefstwasserstände anhand der vorhandenen Vegetation, aber auch direkte Verfahren über den Einbau von Grundwassermesspegeln an.

Tabelle 5: Bewertung der Wasserstände für das Torfwachstum, verändert nach: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) 2005

Sommerlicher Tiefstwasserstand	Darstellung in Grafik	Auswirkung auf Moorwachstum
Bis -20 cm	Grüne Linie	Moor nass, potenziell torfbildend, Renaturierungsziel erreicht
-21 bis -35 cm	Gelbe Linie	Moor mäßig nass, Torfwachstum stagnierend, Renaturierungsziel teilweise erreicht. Torferhalt gesichert aber Pflege bzw. Management nötig, um eine Bewaldung mit Fichten und zu dichten Birkenbeständen zu bremsen. In Hochmooren eher Moorheide.
-36 bis -50 cm	Orangene Linie	Moor nur feucht, degeneriertes Moorheidestadium, Renaturierungsziel Torfwachstum nicht erreicht. Torferhalt nur gesichert, wenn die Tiefststände nicht zu lange andauern, Pflege bzw. Management nötig.
Unter -50 cm	Rote Linie	Entweder Moor stark gestört (Torfschwund) oder nur anmooriger oder mineralischer Nassbereich.

In fünf der renaturierten Gebiete wurde ein vereinfachtes Vegetations- und Fotomonitoring etabliert, in zwei Gebieten wurden Grundwassermesspegel mit Datenübertragung per Funk eingerichtet, die stundenweise aufzeichnen und die Werte einmal täglich an ein Webportal senden. So sind die Daten immer aktuell abrufbar und es können keine unbemerkten Datenlücken entstehen.

Im Folgenden werden zwei Beispiele der Renaturierungspraxis näher vorgestellt, bei denen sowohl in Handarbeit als auch unter Einsatz von Bagger und Dumper vorgegangen wurde.

6.1.1 Quellmoor Hirschhagen

Ausgangslage

Das knapp zwei Hektar große Mooregebiet im Forstamt Hessisch Lichtenau befindet sich etwa 2 km östlich der ehemaligen Sprengstofffabrik Hirschhagen, unterhalb des Bahndamms, der zur Sprengstofffabrik führte. Das Quellmoor unterliegt weder einem besonderen Schutzstatus noch wurde es von der hessischen Biotopkartierung erfasst. Es wurde vielmehr aufgrund der Meldung des ehemaligen Revierleiters Gert Snelthage aufgesucht. Einen Hinweis gibt die forstliche Standortkartierung, in der die gesamte jetzt als Moor kartierte Fläche mit „nass“ angegeben wird. Im Forstamt wird die Fläche seit mehreren Jahrzehnten als W.a.r.B. (Wald außer regelmäßigem Betrieb) geführt und weist somit keine neueren entwässernden Fahrspuren oder andere, durch Holzerntemaßnahmen verursachten Schäden an der sensiblen Moorvegetation auf. Lediglich der hangoberseits des Moores gelegene Fichtenbestand wurde bereits geerntet, da die Fichten durch Borkenkäferbefall geschwächt waren.

Zum Zeitpunkt der Kartierung war der größte Teil der Moorfläche mit der zweiten Fichtengeneration bestockt, die vermutlich als Naturverjüngung aufgewachsen ist. Es ist davon auszugehen, dass die Entwässerungsgräben im Zuge der Erstaufforstung um 1900 angelegt wurden. Die zweite Fichtengeneration wies allerdings eine deutlich schlechtere Wachstumsleistung auf als die erste, was auf die fehlende Unterhaltung der Gräben während des Aufwachsens hindeutet.

Das Grabennetz ist jedoch äußerst dicht auf der Fläche verteilt, Fanggräben beginnen in den Quellbereichen und leiten das Wasser in den nördlich der Fläche gelegenen, stark eingetieften Hauptabzugsgraben ab (siehe

Abb. 15). Im Zentrum des Moores sind die Hauptgräben zum Teil breit verfallen. Im östlichen, von zahlreichen Quellaustritten geprägten Moorteil haben sich einige Grabenanfänge teils selbst verschlossen; der Großteil der Grabenabschnitte ist jedoch noch wasserzünftig.

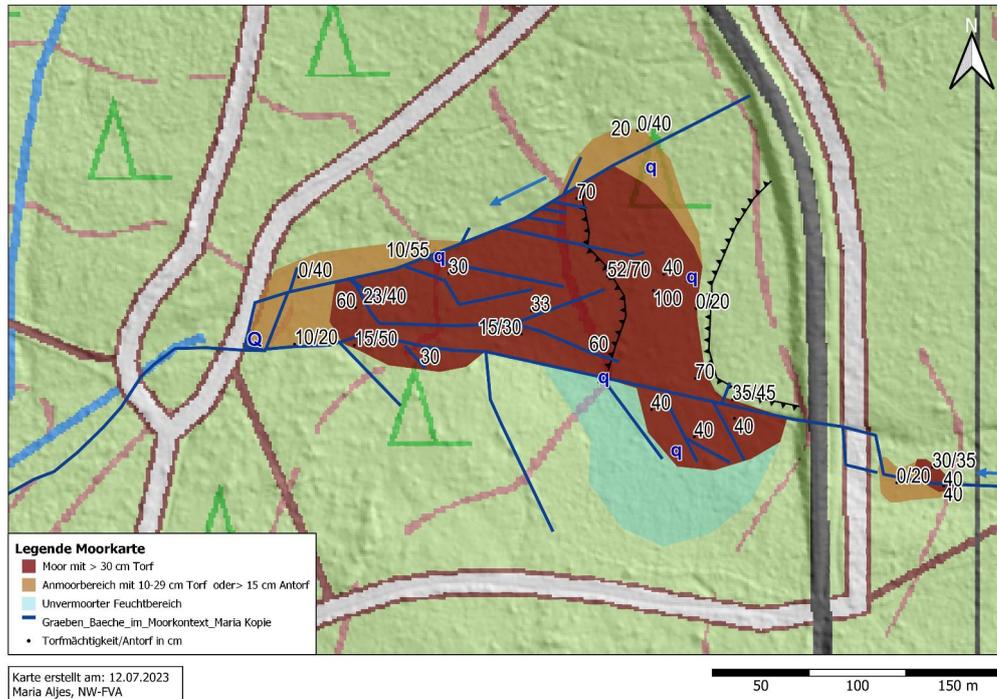


Abb. 14.: Moorabgrenzung des Quellmoors Hirschhagen mit Darstellung des intensiven Grabennetzes und Angaben zur Torfmächtigkeit



Abb. 15: Breit verfallener Abzugsgraben im Zentrum des Moores vor der Fichtenentnahme. Foto: Philipp Küchler

Maßnahmenplanung und -finanzierung

Die Planung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Bereichsleiter für Dienstleistung und Hoheit des Forstamtes Hessisch Lichtenau, Günter Groß, sowie dem Revierleiter Stefan Hesse. Als Ziel wurde die Vollvernässung der Fläche angestrebt, mit dem Leitbild eines wachsenden mesotroph-sauren Moores mit quellmoortypischer Vegetation aus offenen mesotrophen Riedgesellschaften und lichtem Birkenbruchwald.

Für die Finanzierung der Maßnahme wurde eine Projektskizze bei dem Regierungspräsidium Kassel, Dezernat 24 (Schutzgebiete, Artenschutz, biologische Vielfalt, Landschaftspflege) eingereicht und über Mittel aus dem Integrierten Klimaschutzplan Hessen bewilligt.

Umsetzung

Per Seilkrantechnik wurden im Februar 2022 alle auf dem Moor stockenden Fichten geräumt und zunächst am Weg abgelegt, insgesamt ca. 350 Vorratsfestmeter (s. Abb. 16). Im Anschluss wurden die Stämme entastet, gezopft und durch einen Hacker zu Hackschnitzeln verarbeitet. Diese wurden als Füllmaterial am nordwestlichen Ende des Gebietes gelagert. Das frühzeitige Lagern der Hackschnitzel vor der Verarbeitung in den Gräben wird empfohlen (idealerweise 3-5 Jahre), da das bereits etwas zersetzte Material in Kombination mit dem Sägemehl zu einer guten Wasserhaltefähigkeit bereits direkt ab dem Einbau führt und auch Effekte des Auswaschens von Nährstoffen minimiert werden (Rohland et al. 2021). Die hier gelagerten Hackschnitzel können auch für weitere Projekte innerhalb des Forstamtes Hessisch Lichtenau eingesetzt werden.

Die schlagartige Entnahme des Baumbestandes hat zunächst auch negative Folgen. An die starke Besonnung sind die bisher im Schatten der Bäume aufgewachsenen Moose nicht angepasst und reagieren mit „Sonnenbrand“ und Austrocknung der oberen Schichten. Deswegen sollten bei der Erntemaßnahme jeweils alle im Bestand vorhandenen Laubbäume erhalten werden. Diese dienen dann als wandernder Schatten auf der Fläche aber auch als Windbremse, was wiederum die Verdunstungseffekte auf der Freifläche etwas abmindert. In Hirschhagen wurden aus Mangel an Alternativen zusätzlich zu den wenigen vorhandenen Birken einzelne Kiefern belassen, da sie etwas standfester als die Fichten sind. Im nächsten Schritt wurde in Vorbereitung für den Grabenverbau mit den Projektleitenden des Bergwaldprojekts die am stärksten Wasser aus der abführenden Fläche identifiziert. Dabei wurde schnell ersichtlich, dass auf der Fläche erheblich mehr Gräben vorhanden waren, als zunächst kartiert. Die ersten zwei Projektwochen mit dem Bergwaldprojekt wurden im November 2022 durchgeführt. Dabei konnte der nördlich der Fläche gelegene Hauptgraben, und die zugehörigen Abzugsgräben etwa zur Hälfte verfüllt und mit Sperren versehen werden. In zwei weiteren Projektwochen im April 2023 konnten zwei weitere Hauptgräben im Moorzentrum und einige zuführende Abzugsgräben verschlossen werden. Folgende Arbeitsschritte werden dabei ausgeführt:

- Bau von Bohlenwegen zum zu bearbeitenden Grabenabschnitt
- Grabenräumung, d.h. Entfernen der Grabenvegetation und Ablage auf Planen
- Ausschachten der Grabenabschnitte, in denen Spundwände eingesetzt werden sollen
- Einbau der Spundwände
- Einbringen der Mischung aus Sägespänen und Holzhackschnitzeln, dabei möglichst Verdichten, indem das Gemisch mit dem anströmenden Wasser eingestampft wird
- Bepflanzung des verfüllten Grabenabschnitts mit der vorher ausgehobenen Vegetation
- Befestigung der Krone über den Spundwänden mit Bulten von Flatterbinse

Während der im November 2023 durchgeführten Projektwoche stellte sich heraus, dass der sehr starke Wasseranstrom aus weiterhin aktiven Gräben oberhalb des Torfkörpers trotz aller Sicherungsmaßnahmen zu Aus- und Umspülungen in der Grabenverfüllung geführt hat, sodass in dieser Woche vor allem an den alten Verfüllungen nachgebessert und stabilisiert werden musste. Dies zieht die Erkenntnis nach sich, dass auch auf

diese Gräben ein besonderes Augenmerk gelegt werden und gegebenenfalls ebenfalls ein Verschluss bzw. durch Verplombung (dann mit mineralischem Material) eine regelmäßige Verteilung des Wassers auf der Oberfläche erfolgen muss.



Abb. 16: Die im Moor per Hand gesägten Fichten werden in der Laufkatze eingehängt und können so ohne den Boden zu verletzen aus der Fläche abtransportiert werden. Foto: Maria Aljes



Abb. 17: Arbeitsschritte bei der Grabenverfüllung (von links nach rechts): Mischplatz für Holzhackschnitzel und Sägespäne (im Verhältnis 1:2), Verfüllen und Verdichten des Materials zwischen Spundwänden im gesäuberten Graben, sorgfältig abgelegte Vegetation zur anschließenden Wiederbepflanzung, verfüllter Grabenbeginn im Frühjahr 2023 (Fotos 1-3 Philipp Küchler, Foto 4 Maria Aljes)

Monitoring

Im Quellmoor Hirschhagen wurde ein Transekt in Ost-West-Richtung mit 10 Plots zu je 4 x 4 Meter eingerichtet, auf denen mit einem von der NW-FVA entwickelten vereinfachten Vegetationsmonitoring Veränderungen in den Deckungsgraden aussagekräftiger Pflanzenartengruppen (z. B. Torfmoose, Braunmoose, Seggen, Binsen) und der Entwicklung des Gehölzbestandes darstellbar sind. Die Aufnahmen wurden jeweils im August 2022 und 2023 durchgeführt.

Um die Entwicklungstrends der Vegetation mit der tatsächlichen Entwicklung des Wasserstands abgleichen zu können, wurden am 8. Februar 2023 zwei Grundwassermesspegel im Torfkörper installiert. Da insbesondere in Quellmooren die Wasserführung durch das unterschiedlich in den Torfkörper einströmende Wasser kleinräumig sehr verschieden sein kann, müssen die Standorte geschickt gewählt werden, um die Wasserstände als Reaktion auf die Wiedervernässungsmaßnahme hin interpretieren zu können. Es wurden ein Standort im aufgewölbten Quellmoorbereich hangoberseits (Messpegel 1) sowie im unteren Hangmoorbereich (Messpegel 2) eingerichtet. Messpegel 1 befindet sich zwischen zwei Gräben, die im April 2023 während der Projektwochen des Bergwaldprojekts verfüllt wurden. Hier könnte eine positive Entwicklung des Wasserstandes also durchaus auf die Grabenverfüllung zurückgeführt werden – es macht zumindest den Anschein, als ob der Abfall des Wasserstands bei ausbleibenden Niederschlägen etwas weniger stark ausgeprägt ist.

Während der längeren Trockenperiode im Juni und Juli lässt sich beobachten, dass die Wasserstände zeitweilig unter die Marke von 20 cm unter Flur sinken, den sommerlichen Tiefstwasserstand, der in der Fachliteratur für aktives Moorwachstum als tolerabel angesehen wird (Wagner & Wagner 2005).

Aktuell zeichnet sich ein leichter Trend für den Anstieg des Wasserstandes im Torfkörper ab. Messpegel 2 zeigt eine recht ähnliche Entwicklung der Wasserstände mit einer geringfügig stärkeren Absinktiefe im Sommer und einem etwas schwächer ausgeprägten Anstiegstrend. Im Umfeld von Messpegel 2 sind allerdings auch noch zahlreiche Gräben aktiv und leiten das Wasser ab. Hier sollen 2024 weitere Maßnahmen stattfinden.

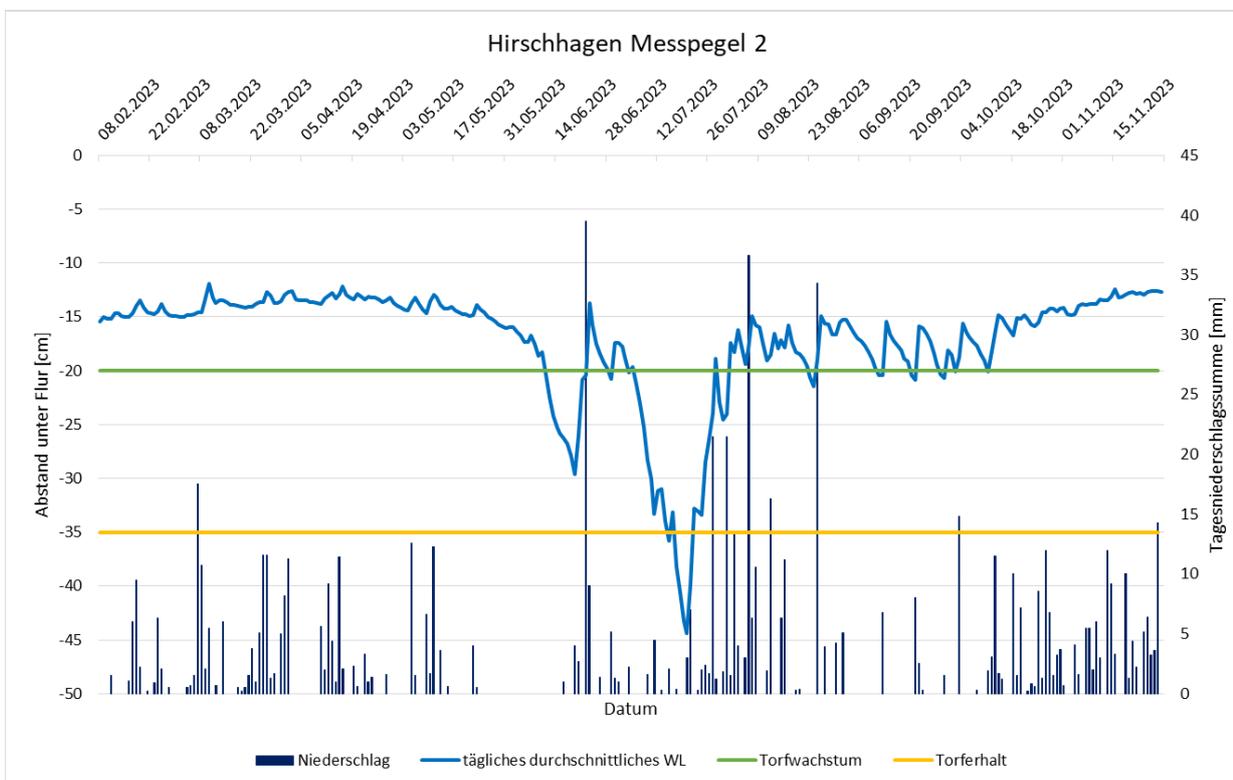
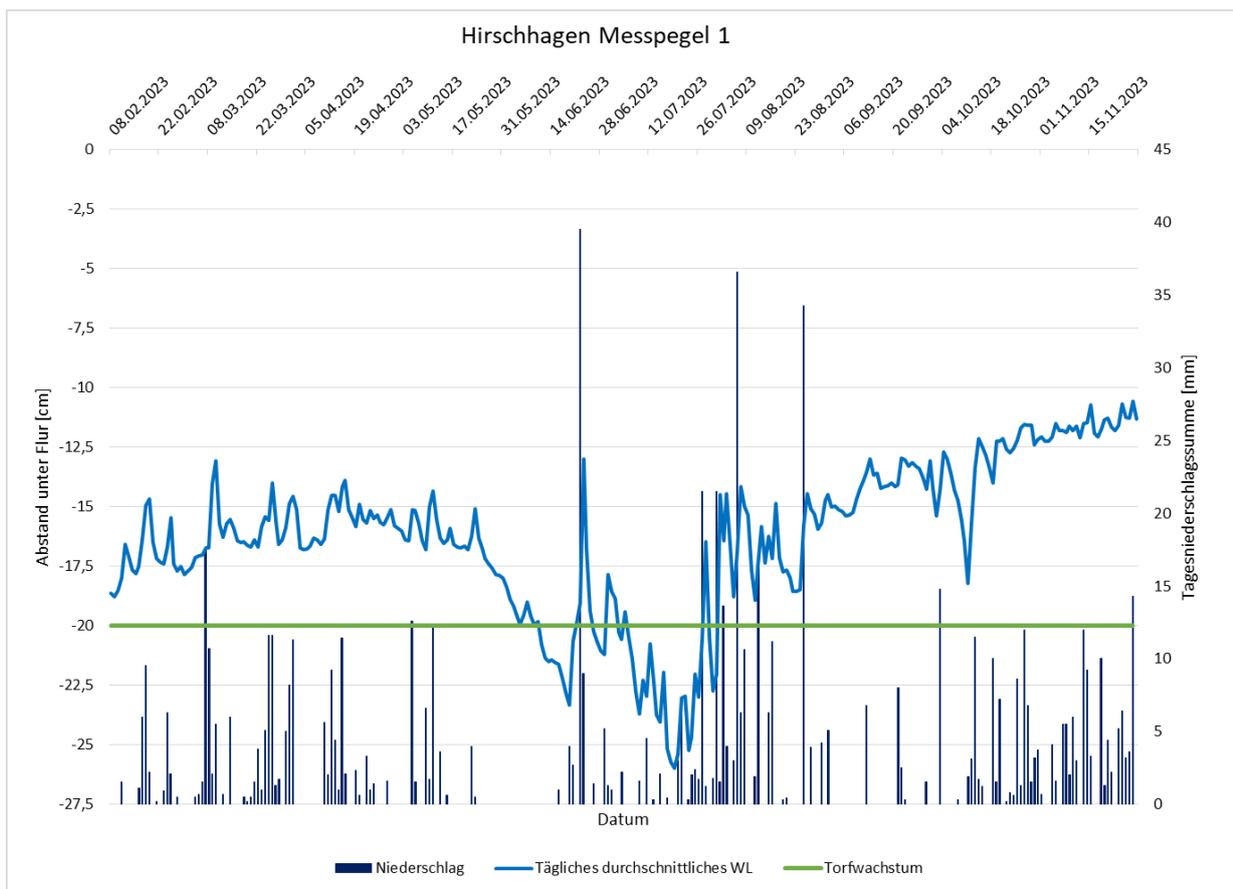


Abbildung 18 und 19: Ganglinien der Grundwasserstände im Quellmoor Hirschhagen, sowie der Niederschlagsdaten der Wetterstation Friedrichsbrück (Quelle: Deutscher Wetterdienst) an den Messpegeln 1 und 2 vom 8. Februar 2023 bis zum 27. November 2023

6.1.2 Die Butterwiese auf dem Meißner

Ausgangslage

Die etwa 2,7 ha große Moor- und Anmoorfläche „Butterwiese“ erstreckt sich auf einer Höhe zwischen 709 und 712 m ü. NN und liegt in Sattellage zwischen flachen Süd- und Nordhängen. Es handelt sich um ein Stauwasser-Versumpfungsmoor, welches auf abdichtender Lössauflage aufwachsen konnte. Die Wasserversorgung des Moores erfolgt durch eine Mischung aus Niederschlag direkt auf das Moor und lateral zufließendem Hangwasser. Das Hangwasser sickert dabei sowohl oberflächlich, als auch als Interflow im Boden zu.

Der Meißner war in historischer Zeit auf dem Hochplateau entwaldet. Die Butterwiese wurde damals durch Mahd genutzt und zu diesem Zweck entwässert. Die Streunutzung (Einstreu in Viehställen) fand alle 3 bis 5 Jahre statt (BÖF 2008, S. 96). Die heute noch offenen Bereiche entgingen den Fichtenaufforstungen, doch das Umfeld der Butterwiese wurde ab 1879 aufgeforstet (Jahresangabe für die Bereiche südlich der Butterwiese nach Pfalzgraf 1934, S. 10). Nach Nutzungsauflassung haben sich auf der „echten“ Moorfläche (d.h. über 30 cm Torf) der Butterwiese stark bultige Vegetationsstadien von Scheiden-Wollgras, Braunsegge und randlich auch Pfeifengras entwickelt, in denen nur gelegentlich aufkommende Gehölze entfernt werden. Angrenzende Moorbereiche mit unter 30 cm Torf und weitere unvermoorte Wiesen werden dagegen gemäht (Pfleßmaßnahme mit Mähgutentfernung) und beherbergen Kleinseggenriede sowie feuchte Borstgrasrasen.

Die südlich angrenzenden Fichten sind aufgrund der Trockensommer mit ihren Borkenkäferkalamitäten abgestorben und wurden 2022 durch das Forstamt beräumt.

Die Butterwiese ist teilweise als Lebensraumtyp 7140 „Übergangs- und Schwingrasenmoore“ nach Anhang 1 der FFH-Richtlinie erfasst worden und ist Teil des 1970 ausgewiesenen Naturschutzgebiets „Meißner“, sowie des FFH-Gebiets „Meißner und Meißner-Vorland“ und des Vogelschutzgebiets „Meißner“.

Der Klimawandel mit allgemein verschlechterter Wasserbilanz und längeren sommerlichen Trockenperioden gefährdet die Vermoorungen in ihrer Existenz. Seine Wirkung kann vor allem dadurch gemindert werden, dass alle vor Ort wirksamen Entwässerungen rückgebaut werden.



Abb. 20: Der Scheidenwollgras-Bestand der Butterwiese im Juni (Panoramabild vom 2.6.2022, Philipp Küchler)

Maßnahmenplanung und -finanzierung

Anlass für eine rasche Umsetzung von Maßnahmen im Gebiet der Butterwiese gab ein Treffen im Oktober 2022 zwischen Cornelia Becker (Planungsbüro BÖF), Dr. Gunnar Waesch (freiberuflicher Kartierer) und Marco Lenarduzzi (Funktionsbeamter Naturschutz im Forstamt Hessisch Lichtenau) zur Besprechung von

Pflegemaßnahmen in den Naturschutzgebieten Butterwiese und Weiberhemdmoor. Dabei wurde darauf hingewiesen, dass der in der Hessischen Biotopkartierung 2020 als Lebensraumtyp 7140 „Übergangs- und Schwingrasenmoore“ kartierte Bereich in seiner Artenausstattung grenzwertig ist und dringender Handlungsbedarf besteht, den Wasserhaushalt des Moores zu verbessern, um den Erhalt des LRT zu sichern. Daraufhin wurde ein ausführlicher Steckbrief inklusive Maßnahmenempfehlungen für das Moor erstellt und die Finanzierung über Schutzgebietsmittel aus dem RP Kassel gesichert. Im August 2023 wurden bei einem weiteren Geländetermin die Verantwortlichkeiten für die weitere Planung besprochen und eine Umsetzung für September/Oktober 2023 ins Auge gefasst.

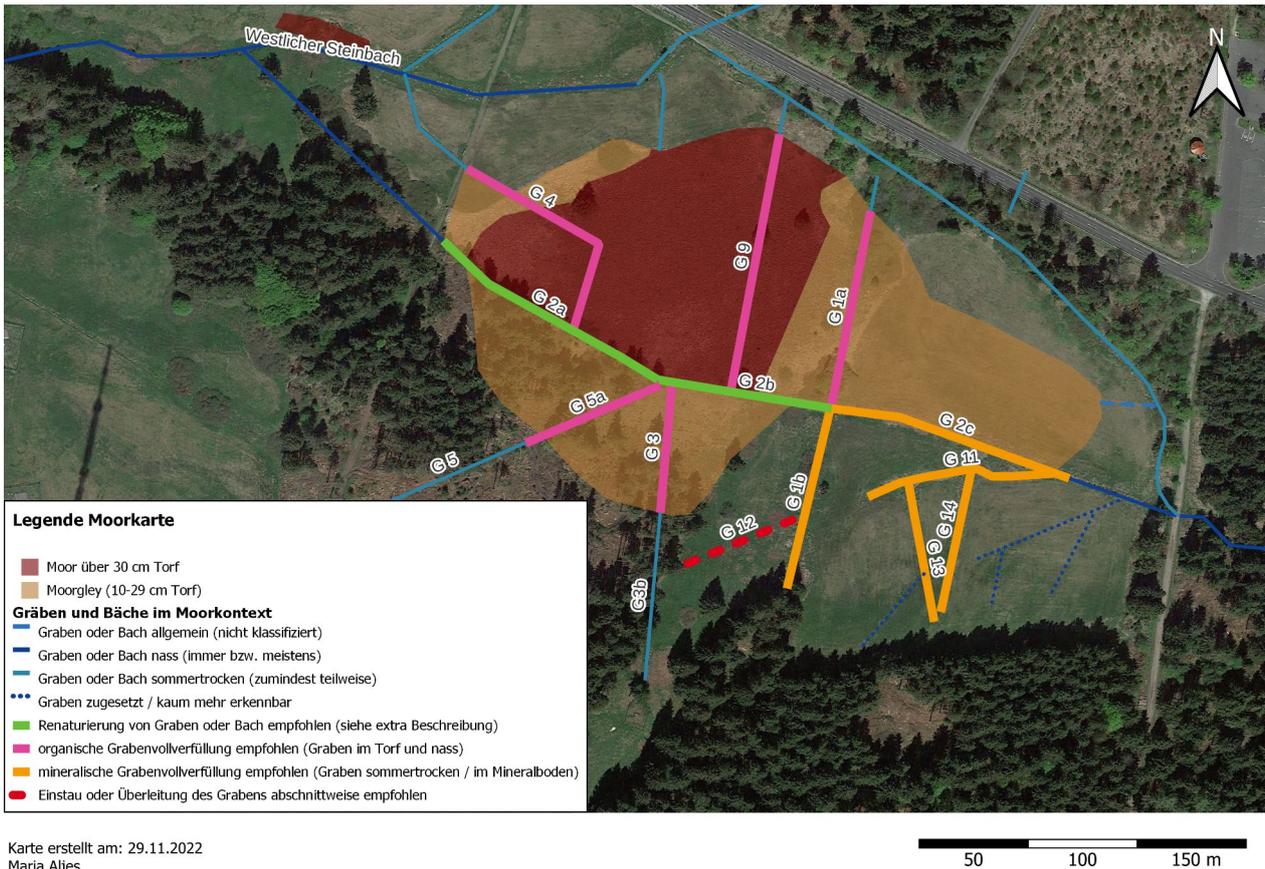


Abb. 21: Moorkarte der Butterwiese inklusive der Maßnahmenempfehlungen aus dem Bericht von Aljes und Küchler (2022) (siehe Farbcode) für die jeweiligen Grabenabschnitte.

Umsetzung

Im September 2023 wurden zunächst unter Federführung des zuständigen Revierleiters Lothar Freund die am Rand des Hauptgrabens stehenden Fichten und Weidengebüsche mit einer Seilwinde entfernt.

Für die Verfüllung der Gräben wurden Holzhackschnitzel aus dem „Lager“ am Quellmoor Hirschhagen auf den Meißner transportiert, sowie Sägespäne aus einem lokalen Sägewerk zugekauft und auf einem etwa 700 m von der Butterwiese entfernt gelegenen Parkplatz gelagert. Der 200 m lange Hauptgraben G2a sowie der von Südwesten her kommende Graben G5a wurden im Zuge der Maßnahmen mit dem Bagger bearbeitet und anschließend mit dem Füllmaterial verschlossen. Die Grabenvegetation wurde möglichst vorsichtig ausgehoben und nördlich des Grabens abgelegt. Um die sensiblen Ketten des Baggers und des Dumpers nicht zu beschädigen mussten jedoch zunächst auf der Fahrtrasse die noch im Boden befindlichen Fichtenstubben entfernt werden. Zur Sicherung der Grabenverfüllung und zur Erhöhung des Durchflusswiderstands wurden vom Forstwirtschaftsmeister Martin Hennemuth des Forstamts Hessisch Lichtenau und zwei Auszubildenden insgesamt vier Spundwände vorgefertigt und mit Hilfe des Baggers bis

auf den mineralischen Untergrund in den Boden gedrückt. Anschließend erfolgte die Verfüllung der Gräben durch den Dumper. Dabei sollte möglichst ein Dumper mit schwenkbarem Kipper eingesetzt werden, der jedoch für die Durchführung dieser Maßnahme nicht zur Verfügung stand.

Aufgrund der Größe des Dumpers, die notwendig war, um auch ausreichend Masse pro Weg vom Lagerplatz zum Graben transportieren zu können, fiel die Arbeitstrasse auf dem anmoorigen Boden breiter aus als zunächst geplant. Die Verletzung des Oberbodens wurde im weiteren Verlauf möglichst gering gehalten, indem der Dumper sowohl im östlichen Abschnitt des Hauptgrabens als auch im Seitengraben die weitere Verfüllung durch das Befahren auf den bereits verfüllten Abschnitten bewerkstelligen konnte. Hierdurch wurde gleichzeitig das Material noch ein wenig verdichtet. Bei starkem Wasseranstrom sollte die Verfüllung der Gräben allerdings von oben nach unten erfolgen.



Abb. 22: Abfolge der Revitalisierung der Butterwiese: 1) Der Hauptgraben vor Beginn der Maßnahmen. Blick von West nach Ost. (Foto: Philipp Küchler). 2) Säubern des Grabens mit dem Kettenbagger. Das Material wurde nördlich des Grabens abgelegt. 3) Einbau vorgefertigter Holzspundwände. Mit der Baggerschaufel wird die positionierte Spundwand in den tonigen Untergrund gedrückt. 4) Verfüllen des Grabens durch einen Dumper. (Fotos 2-4: Maria Aljes) 5) Blick von Ost nach West nach Abschluss der Maßnahmen. Die Grabenfüllung wurde leicht überhöht, um dem späteren Sacken der Füllung nach vollständiger Durchfeuchtung Rechnung zu tragen. (Foto: Marco Lenarduzzi)

Monitoring

Auf der Butterwiese wurden im Juli 2023 neun Vegetationsplots nach dem vereinfachten Verfahren eingerichtet. Vier der Plots befinden sich an rekonstruierten Positionen von Vegetationsaufnahmen, die im Rahmen einer Diplomarbeit im Jahr 1998 von Carola Hotze angelegt und aufgenommen worden waren. An diesen Plots wurde jeweils eine detaillierte Wiederholungsaufnahme nach Braun-Blanquet durchgeführt, die aktuell im Rahmen einer Bachelorarbeit ausgewertet wird. Die Vegetationsaufnahme förderte im Sommer 2023 bereits einen besonderen Fund zu Tage: Ein unscheinbares, aber sehr bemerkenswertes Lebermoos, das in großer Anzahl zwischen den Bulten des Scheidigen Wollgrases wächst: Es handelt sich um das Moor-Zweiglebermoos (*Odontoschisma fluitans*). Die Art ist in der Roten Liste für Deutschland als stark gefährdet eingestuft und war aus Hessen bisher noch nicht bekannt. Der nächst gelegene bekannte Wuchsort liegt in der bayerischen Rhön.

Des Weiteren wurde am höchst gelegenen Punkt des Moores am 27. April 2023 ein Grundwassermesspegel eingerichtet. An Hand der Ganglinie lässt sich sehr gut nachvollziehen, dass nach stärkeren Niederschlägen aufgrund des stark zersetzten und somit abdichtend wirkenden Oberbodens kurzfristig eine Sättigung des Torfkörpers eintritt, der Wasserstand jedoch kurz darauf ebenso schnell wieder absinkt und während der längeren Trockenperioden im Sommer auch langsamer wieder steigt. Somit lässt sich für den bisherigen Beobachtungszeitraum von 214 Tagen feststellen, dass während der Hälfte der Zeit der Wasserstand unterhalb von -20 cm unter Flur lag und somit im Bereich des stagnierenden Torfwachstums (s. Tabelle 5, S. 33). Seit Abschluss der Revitalisierungsmaßnahmen Ende Oktober 2023 ist der Wasserstand konstant knapp unterhalb der Geländeoberfläche, was allerdings auch auf die recht feuchte Witterung des Herbstes 2023 zurückzuführen ist. Eine abschließende Beurteilung des Erfolgs der Maßnahme lässt sich daher erst nach mehrjähriger Auswertung der Datenreihen abgeben.

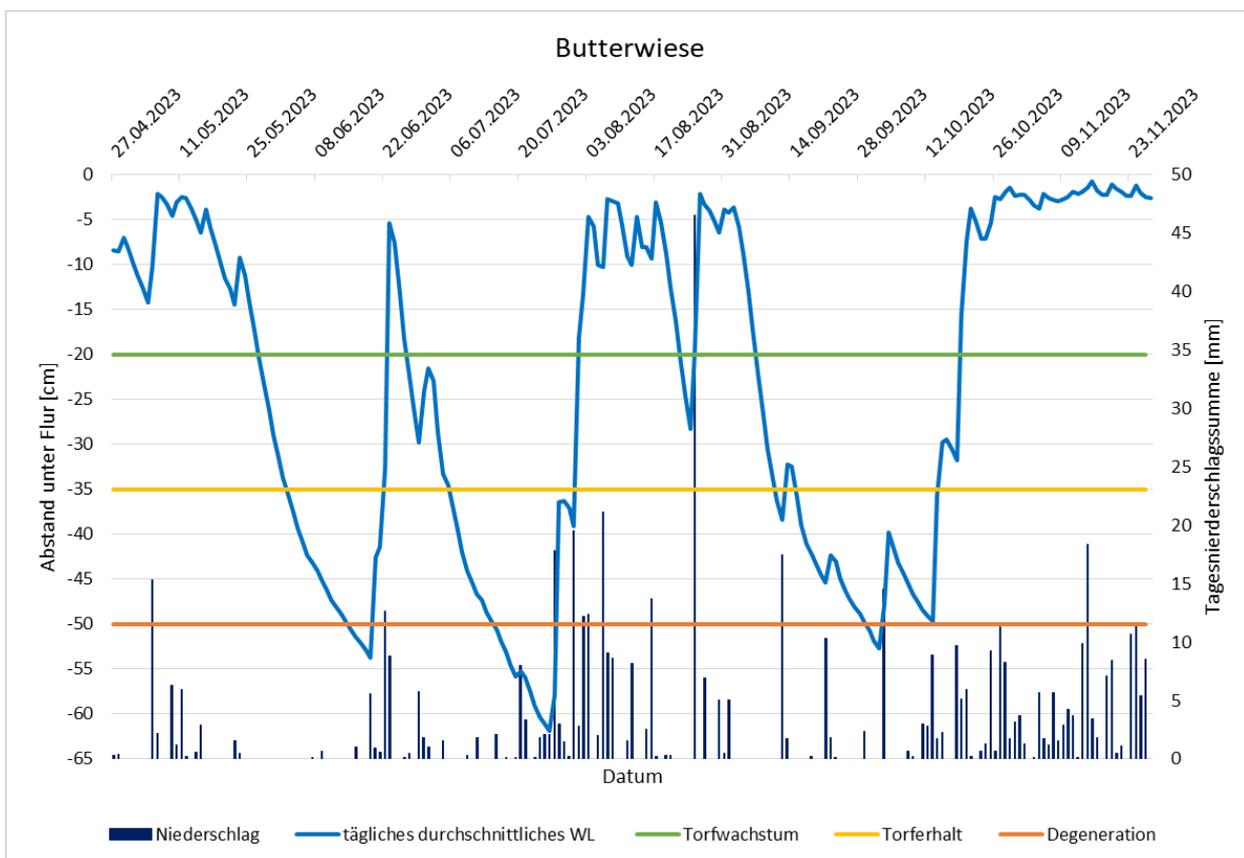


Abbildung 14: Ganglinie der Grundwasserstände im Stauwasser-Versumpfungsmoor Butterwiese, sowie der Niederschlagsdaten der Wetterstation Velmeden (Quelle: Deutscher Wetterdienst) vom 27. April 2023 bis zum 27. November 2023

6.2 Beispiele für Renaturierungskosten

Die Höhe der Kosten für die Renaturierung hängen entscheidend davon ab, wie groß das Gebiet ist, welche Maßnahmen durchgeführt werden müssen, ob zusätzliche Gutachten erforderlich sind (z. B. aufgrund wasserrechtlicher Genehmigungsverfahren), welche Technik eingesetzt wird etc. Pauschale Aussagen sind daher nicht möglich. Zur ungefähren Einordnung lässt sich aber sagen, dass eine Holzernte per Seilkran auf einem Hektar mit etwa 50.000 Euro angesetzt werden kann. Von diesen Kosten kann aber in vielen Fällen der Erlös für den Holzverkauf abgezogen werden.

Die manuelle Verfüllung von Gräben, die in den von uns begleiteten Projektgebieten in Zusammenarbeit mit dem Bergwaldprojekt e. V. (www.bergwaldprojekt.de) durchgeführt wurde, kostet pro Woche inklusive Material ca. 9.000 Euro und ist selten mit einer Woche getan. Kommen Moorbagger und Dumper (zum Einschütten des Füllmaterials in die Gräben) zum Einsatz, kann mit etwa 10.000 Euro pro 100 laufende Meter Graben gerechnet werden. Am Ende der Bilanz stehen für die meist zwischen einem und zwei Hektar kleinen Waldmoore Gesamtkosten von 80.000 bis 150.000 Euro auf der Rechnung.

Die Zusammenarbeit mit den Forstämtern auf allen Ebenen (Forstamtsleitung, Funktionsbeamte für Naturschutz, Revierleitungen, Forstwirtschaftsmeister) ebenso wie die frühzeitige Einbindung weiterer Akteurinnen und Akteure ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg von Maßnahmen. Bisher wurde die Finanzierung von Maßnahmen häufig aus Landesmitteln (Klimaplan-Mittel oder Mittel für die Schutzgebietspflege) über die Oberen Naturschutzbehörden realisiert oder aber über Naturschutzmittel des Landesbetriebs HessenForst. Die Umsetzung von Maßnahmen erfolgte dann zumeist über private Unternehmer unter Betreuung aus den Forstämtern, zum Teil jedoch auch mit eigenen Forstwirten. Wie bereits erwähnt, ist auch der gemeinnützige Verein Bergwaldprojekt e. V. ein wichtiger und sachkundiger Partner für die Umsetzung vor Ort.

Zur Veranschaulichung der einzelnen Positionen sind im Folgenden die Kosten an Hand der zwei oben beschriebenen Best Practice-Beispiele dokumentiert. Es handelt sich hierbei jedoch nur um die reinen Kosten für externe Dienstleister, d.h. ohne die Arbeitsstunden die von Mitarbeitenden des Forstamt und der NW-FVA für die Kartierung, Besprechungstermine und Umsetzung von (Holzernte-)Maßnahmen (inklusive Verkaufserlös) geleistet wurden.

6.2.1 Quellmoor Hirschhagen – manueller Grabenverbau

Tabelle 6: Übersicht über bisherige und voraussichtliche Ausgaben zur Renaturierung des Quellmoors Hirschhagen

Datum	Maßnahme	Person/Institution	Kosten in Euro	Finanzierung
Februar 2022	Entfichtung mit Seilkrantechnik	Firma Hochleitner (Bodman/Bodensee)	88.300	RP Kassel (IKSP 2025)
April 2022	Entastung und Hacken	Berner Forstbetrieb (Miesbach) und Rükkebetrieb Meurer (Melsungen)	8.230	Forstamt Hessisch Lichtenau
Oktober 2022	Manueller Grabenverbau (inkl. Materialkosten)	Bergwaldprojekt e.V.	18.000	RP Kassel (IKSP 2025)
Februar 2023	Installation Grundwassermesspegel	Matheja-Consult	6.500	RP Kassel (IKSP 2025)
April 2023	Manueller Grabenverbau	Bergwaldprojekt e.V.	18.000	RP Kassel (IKSP 2025)
November 2023	Manueller Grabenverbau	Bergwaldprojekt e.V.	9.000	RP Kassel (IKSP 2025)
vorrauss. April 2024	Manueller Grabenverbau	Bergwaldprojekt e.V.	18.000	vorrauss. RP Kassel (KPH 2030)
Gesamt			166.030 Euro	

6.2.2 Butterwiese – maschineller Grabenverbau

Tabelle 7: Übersicht über bisherige Ausgaben zur Renaturierung des Stauwasser-Versumpfungsmoores Butterwiese (ohne Eigenleistung des Forstbetriebs)

Datum	Maßnahme	Firma/Institution	Kosten in Euro	Finanzierung
April 2023	Installation Grundwassermesspegel	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt	2.484	RP Kassel (ISchutzgebietsmittel)
Oktober 2023	Maschineller Grabenverbau (inklusive Materialkosten)	Firma Beisheim (Bebra)	31.751	RP Kassel (ISchutzgebietsmittel)
Gesamt			34.234 Euro	

7. Arbeitspaket Recherchen für ein Förderkonzept für Waldmoore außerhalb des Staatswalds

Hessen gehört zu den waldreichen Bundesländern. 42,3 % der Landesfläche sind mit Wald bedeckt. Von dieser Waldfläche entfallen 39 % auf Staatswald (davon 1 % im Besitz der Bundesforsten), 36 % auf Körperschaftswald und 25 % auf private Waldbesitzende (<https://bwi.info.de>, Daten von 2012, Zugriff am 22.12.2023). Durch das Screening auf Moorverdachtsflächen in allen Waldbesitzarten ergibt sich auf der Grundlage unserer Hochrechnungen eine geschätzte Anzahl von knapp 170 Moor- und Anmoorflächen außerhalb des hessischen Staatswaldes. Der ökologische Zustand der Flächen ist weitestgehend unbekannt, eine Beeinträchtigung durch Entwässerungsgräben und Aufforstungen jedoch, analog zu vielen Waldmoorgebieten im Staatswald, zu erwarten. Es ist daher erstrebenswert, über entsprechende Fördergelder Maßnahmen zur Wiedervernässung der Waldmoore im privaten und kommunalen Waldbesitz umzusetzen.

Laut Projektantrag sollte das Ergebnis dieses Arbeitspaketes ein Förderkonzept für Waldmoore außerhalb des hessischen Staatswaldes auf der Grundlage von Umfragen unter privaten und kommunalen Waldbesitzenden sein. Es stellte sich heraus, dass die Flächenanzahl und der Aufwand für Kartierung, Vor- und Nachbereitung der kartierten Flächen sowie zahlreiche Anfragen zur Beratung aus den Forstämtern einen sehr viel größeren Umfang einnahmen, als gedacht. Zudem ergaben sich aus den Arbeiten der anderen Arbeitspakete heraus nur wenige Berührungspunkte mit anderen Waldbesitzarten. Daher wurde ein anderer Ansatz verfolgt: Über eine Recherche zu Förderkonzepten in anderen Bundesländern und deren Erfolg beziehungsweise Nicht-Erfolg sollte herausgearbeitet werden, wie sich die Erfahrungen auf hessische Verhältnisse übertragen lassen und welche Schlüsse daraus zu ziehen sind.

7.1 Förderkonzepte in anderen Bundesländern

Zahlreiche Bundesländer stellen staatliche Fördermittel bereit, mit denen sich Projekte zum Moorschutz und der Sicherung von Flächen in privatem und kommunalem Waldbesitz durchführen lassen. Die Förderziele reichen von Pflege- und Biotopschutzmaßnahmen zur Sicherung oder Wiederansiedlung typischer Arten, über die Optimierung des Wasserhaushalts bzw. Wiedervernässungsmaßnahmen bis zu angepasster Moornutzung (vor allem für landwirtschaftlich genutzte Moore relevant). Dabei verfügen Bundesländer mit einem hohen Flächenanteil an organischen Böden über ein breiteres Angebot an Fördermöglichkeiten als dies in Bundesländern mit vergleichsweise geringem Flächenanteil der Fall ist.

In **Brandenburg** werden beispielsweise über die Investitionsbank des Landes Brandenburg Maßnahmen zur Umsetzung des Moorschutzprogramms „ProMoor“ gefördert und dabei wird großer Wert auf die fachliche Unterstützung und wissenschaftliche Begleitung der Projekte gelegt (<https://www.ilb.de/de/infrastruktur/energieinvestitionen/moorschutzprogramm/#ablauf>, Zugriff am 22.12.2023).

Schleswig-Holstein schafft Anreize zur Revitalisierung durch Wiedervernässung und zur Entwicklung und Verbesserung der Lebensräume zum Erhalt der moortypischen Flora und Fauna, fördert allerdings auch explizit den Waldumbau nicht standortgerechter Baumarten auf organischen Böden (<https://www.stiftungsland.de/was-wir-tun/klimaschutz/foerderung-und-klimapunkte/?L=3>, Zugriff am

22.12.2023). Die Abwicklung der Projekte erfolgt über die Stiftung Naturschutz Schleswig-Holstein. Als innovatives Instrument wurden sogenannte Klimapunkte eingeführt. Diese werden über die mögliche CO₂-Einsparung nach Wiedervernässung berechnet. Über die Berechnung der eingesparten Emissionen, multipliziert mit dem aktuellen CO₂-Preis und angelegt auf 30 Jahre wird eine Vergütung der Wiedervernässung ermittelt. Im zweiten Schritt kann der Eigentümer entscheiden, ob er die Fläche an die Stiftung Naturschutz Schleswig-Holstein verkaufen möchte oder aber Eigentümer bleibt und lediglich die „Vernässungsrechte“ verkauft. Die Stiftung gibt an, dass der Preis für den Ankauf über das Klimapunkte-Modell in der Regel höher liegt als der Kaufpreis am Flächenmarkt. Die Einrichtungen zur Wiedervernässung dürfen allerdings nicht wieder rückgängig gemacht werden.

In **Bayern** stehen aus dem Bayerischen Umweltministerium in den Handlungsfeldern „Verbesserung der Biodiversität im Wald“, „Grüne Infrastruktur“ oder auch direkt der Moorrenaturierung Gelder für die Umsetzung von Maßnahmen zur Verfügung. Letztgenannte Förderung wird über die Kreisverwaltungsbehörden abgewickelt. Auf Nachfrage heißt es, dass die zur Verfügung stehenden Gelder überwiegend für den Ankauf von Flächen bzw. eine Überlassung für mindestens 25 Jahre verwendet werden. Renaturierungsmaßnahmen werden daraufhin ebenfalls von staatlicher Stelle geplant und durchgeführt. In einer sehr aufschlussreichen Beratenden Äußerung des Obersten Rechnungshofes Bayerns (Bayerischer Oberster Rechnungshof 2021) ist dokumentiert, dass im Privat- und Körperschaftswald, die zusammen 68 % der Waldfläche Bayerns bewirtschaften, bisher kein einziges Moorrenaturierungsprojekt umgesetzt wurde und Grundlagenerhebungen zu den Mooren fehlen. Es wird vorgeschlagen, über Pilotprojekte im Privat- und Körperschaftswald diese Gruppe der Waldbesitzenden für die Thematik zu sensibilisieren und darauf aufbauend auch hier Projekte in größerem Umfang umzusetzen.

Die Förderrichtlinie „Klimaschutz durch Moorentwicklung“ hat bis 2020 über die NBank des Landes **Niedersachsen** Moorschutzprojekte gefördert, die durch eine fachliche Begleitung des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) umgesetzt wurden (<https://www.nlwkn.niedersachsen.de/klimo/klimaschutz-durch-moorentwicklung-169548.html>, Zugriff am 22.12.2023). Die Gelder stammten aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), die Förderrichtlinie ist jedoch ausgelaufen. Im aktuellen „Multifondsprogramm für die EU-Strukturfondsförderperiode 2021-2027“ (Land Niedersachsen 2022) finden sich Moore nur als Randnotiz im Zusammenhang mit interkommunalen Entwicklungskonzepten.

In **Hessen** zielt der EFRE-Fonds auf andere Förderschwerpunkte, wie Forschungs- und Entwicklungsvorhaben in Unternehmen ab und bietet also keine Möglichkeit der Förderung von Naturschutzmaßnahmen. Eine Möglichkeit der Revitalisierung von Mooren besteht zum Beispiel im Flächenankauf durch die NABU-Stiftung, die mit ihrem Projekt „60 Niedermoores“ (www.niedermoorprojekt.de) gezielt Flächen in privater Hand anspricht und berät. Dabei liegt der Schwerpunkt der Aktivitäten jedoch auf den außerhalb des Waldes gelegenen Flächen.

Der **Bund** hat mit der Zukunft-Umwelt-Gesellschaft (ZUG) GmbH über den sogenannten „Wildnisfonds“ ein Instrument zum Flächenankauf von Gebieten bereitgestellt, die mit sofortiger Wirkung oder nach Wiederherstellung der ökologischen Funktionen aus der Nutzung entlassen werden. Damit soll die Umsetzung des 2 %- Ziels für Wildnisgebiete aus der Nationalen Biodiversitätsstrategie (BMU 2007) vorangetrieben werden. Die Förderperiode ist bis 2030 angesetzt (www.z-u-g.org/wildnisfonds/foerderaufruf/).

Das „Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz“ (BMU 2023) wurde entworfen, um die Bedeutung intakter

Ökosysteme als natürliche „Klimaschützer“ und somit Garant für unser aller Wohlergehen zu würdigen und durch entsprechende Maßnahmen zum Schutz und Wiederherstellung dazu beizutragen, dass ihre wichtigen Ökosystemfunktionen erhalten bleiben. Dabei stehen der Schutz intakter Moore und Wiedervernässungsmaßnahmen bei den Handlungsfeldern an erster Stelle. Ursprünglich war unter anderem eine Förderung von Projekten zur Renaturierung kleiner Waldmoore geplant und auch das darin enthaltene Programm „Ländliche Kommunen“ hätte gute Möglichkeiten geboten im Kommunalwald Projekte mit natürlicher Klimaschutzwirkung umzusetzen. Die Maßnahmen des Bundes sollten so konzipiert werden, dass sie bestehende Länderaktivitäten ergänzen und unterstützen und schwerpunktmäßig für die Belange des Schutzgebietssystems Natura 2000 genutzt werden. Die Förderung für alle Maßnahmen aus dem ANK steht jedoch durch das aktuelle Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Klima- und Transformationsfonds der Bundesregierung auf dem Prüfstand.

7.2 Ableitungen und Empfehlungen für Hessen

Förderrichtlinie „Wasserrückhalt im Wald“

In Hessen wird aktuell eine „Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zum Wasserrückhalt im Wald“ im Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz erarbeitet. Der Entwurf der Richtlinie lag uns in einer Fassung vom 22.03.2023 vor und wurde unsererseits mit Anmerkungen zu seiner Ausgestaltung hinsichtlich der Förderung zur Revitalisierung von Waldmooren versehen. Im Schriftverkehr mit Roland Piper, dem Referenten der Obersten Forstbehörde, Angelegenheiten für nichtstaatlichen Waldbesitz und Bearbeiter der Förderrichtlinie wurde deutlich, dass von Seiten des Ministeriums noch keine Klarheit besteht, ob die Förderung von Maßnahmen für die Renaturierung von Mooren, Fließ- und Stillgewässern einer eigenen Förderkulisse bedarf oder nicht eher auf bereits bestehende Fördermöglichkeiten zurückgegriffen werden sollte. Es wurde angemerkt, dass die Gefahr von Doppelförderung besteht bzw. es zu Schwierigkeiten bei der Abgrenzung von Maßnahmen kommen könnte, wenn diese Maßnahmen in die Richtlinie zur Förderung des Wasserrückhalts im Wald integriert würden. Direkte Fördermöglichkeiten für die Planung und Umsetzung von Revitalisierungsmaßnahmen, die doch mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden sind, wie im vorigen Kapitel deutlich wurde, gibt es in Hessen jedoch aktuell nicht.

In dieser Sache werden wir auch im Klimaplan-Projekt „Moorberatung“ weiter im Kontakt mit dem Ministerium bleiben und eine Lösung anstreben.

Inanspruchnahme forstlicher Beratung und Betreuung durch Waldbesitzende

Wie eingangs bereits erwähnt, konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Zeit keine eigenen Abfragen bei Waldbesitzenden zur Bereitschaft der Inanspruchnahme von Förderung durchgeführt werden. Eine aktuelle Arbeit von Seidl (2023) hat sich allerdings über eine bundesweit durchgeführte Online-Befragung mit der Inanspruchnahme forstlicher Beratungsangebote durch Waldbesitzende befasst und kommt zu dem Ergebnis, dass die Hauptmotivation der Teilnehmenden in der Beratung und Betreuung zu den Themenfeldern Waldumbau, Holznutzung und dem Interesse am eigenen Waldbesitz liegt. Es besteht also grundsätzlich ein gewisses Defizit im Interesse an naturschutzfachlicher Beratung und Begleitung von Maßnahmen. Allerdings misst knapp ein Drittel der Befragten der Schutzfunktion des Waldes (sowohl Naturschutz als auch Klimaschutz) eine hohe Bedeutung bei – ist dann aber wohl der Ansicht, der Wald könne diese Funktionen bereits zur Genüge erfüllen oder es werde bereits ausreichend getan. Ein weiteres Ergebnis zeigt, dass Betreuung und Beratung überwiegend von Kleinprivatwaldbesitzenden in Anspruch genommen wird.

Aus den Erfahrungen anderer Bundesländer zur mangelnden Inanspruchnahme von Förderung sowie Betreuung und Beratung kristallisiert sich das Bild heraus, dass eine solide Datengrundlage über den Zustand von Waldmooren im privaten und kommunalen Waldbesitz häufig nicht vorhanden ist. Die Arbeit von Seidl (2023) zeigt auf, dass wohl gezielter auf die Waldbesitzenden zugegangen werden muss, um das nötige Bewusstsein für Moorökosysteme im eigenen Besitz zu schaffen, bei gleichzeitigem Aufzeigen von Optionen, diese ökologisch aufzuwerten.

Ausblick

Als wichtige Voraussetzung, um private Waldbesitzende und Akteurinnen und Akteure aus dem Körperschaftswald von der Notwendigkeit der Revitalisierung von Waldmooren zu überzeugen und ihnen passende Optionen für die Umsetzung anbieten zu können wurden folgende Schritte identifiziert:

1. **Aufklärung** über das Vorkommen, die Bedeutung und Möglichkeiten der Revitalisierung von Waldmooren in Form von Veröffentlichungen in Zeitschriften mit hoher Reichweite bei Waldbesitzenden, direkte Kontaktaufnahme mit dem hessischen Waldbesitzerverband, großen Privatwaldunternehmen, über Fortbildungsangebote und Exkursionen, über das Bereitstellen von Informationsmaterial und Kontaktadressen zu Unternehmen mit Erfahrung im Bereich der Renaturierung auf der Projektwebseite des Folgeprojekts „Moorberatung“.
2. **Fortführung der Recherchen** zu den Erfolgsfaktoren für die Annahme von Förderkonzepten.
3. **Erstellen einer Übersicht** über die bundesweit angebotenen Fördermöglichkeiten und Veröffentlichung auf der Projektwebseite „Moorberatung“.
4. Gegebenenfalls **Weiterentwicklung einer Förderrichtlinie** auf Landesebene in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Umweltministerium.
5. Durchführung von **Pilotvorhaben** in privatem und/oder kommunalem Waldbesitz.

Aufgrund unserer Erkenntnisse, dass Vermoorungen in Hessen überwiegend kleinflächig ausgeprägt sind (im Durchschnitt 1,5 ha) ist das vermutlich am besten umzusetzende Konzept Moorflächen in Renaturierung zu bringen der Flächenankauf/Flächentausch mit nachfolgender Planung und Betreuung der Renaturierungsmaßnahmen durch staatliche Institutionen oder Naturschutzverbände.

8. Fazit zum Projekt Waldmoore in Hessen

Im Rahmen des Waldmoore-in-Hessen-Projekts wurde ein System entwickelt, um auf Basis von Geodaten und Abfragen bei den Forstämtern Moorverdachtsflächen landesweit zu identifizieren. In kartierten Flächen im Staatswald konnten ca. 220 räumlich getrennte Vermoorungen nachgewiesen werden und Daten zu Größe, Torfkörper und Beeinträchtigungen durch Entwässerungssysteme aufgenommen werden:

- Waldmoore (vermoorte Fläche Moor + Anmoor) einschließlich der beiden hessischen Regenmoore umfassen in Hessen der Hochrechnung zufolge gut 1000 Hektar. Die Hälfte davon sind „echte“ Moore mit über 30 cm Torf.
- Waldmoore einschließlich der beiden hessischen Regenmoore haben derzeit gut 300.000 Tonnen Kohlenstoff im Torf gebunden. Das entspricht über 1 Million Tonnen CO₂-Äquivalenten.
- Zwei Drittel des in den Mooren gespeicherten Kohlenstoffs sind mittelfristig durch Austrocknung gefährdet. In Vermoorungen mit unter 30 cm Torf ist bei zunehmend häufigeren Dürresommern der gesamte Torfkörper gefährdet.
- Wiedervernässungen können einen Teil der Moore retten. Moore mit einer Quellschüttung und im Verhältnis zur Moorfläche großem Wassereinzugsgebiet haben dabei oft eine günstigeren Prognose.

Über die Bedeutung als Kohlenstoffspeicher hinaus lässt sich über die Moore in Hessen festhalten:

- Es gibt in dem natürlich moorarmen Hessen mehr Waldmoore, als erwartet – wenn auch sehr kleinflächige.
- Auch wachsende Moore bzw. Moorteile sind im Wald vorhanden.
- Die Waldmoore besitzen eine hohe Bedeutung für den Erhalt der Biodiversität.
- Die Waldmoore sind Quellgebiete und Bachursprünge.
- Moore am Hang sind effektive Wasserspeicher und Abfluss-Verzögerer.
- Gerade kleine Moore mit verhältnismäßig großem Wassereinzugsgebiet haben bessere Überlebenschancen im extremen Klimawandel.

Zudem konnten im Projekt mit der Umsetzung erster Renaturierungsprojekte Erfahrungen und Daten gesammelt werden.

9. Literatur

- Ad-hoc-AG-Boden, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.
- Aljes, M., Küchler, P., Schmidt, M., 2021: Waldmoore - Erfassung und Renaturierungsperspektiven. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2021 für Hessen. S. 38–40. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5568954>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.], Bearb.: Wagner, A. & Wagner, I., 2005: Leitfaden der Niedermoorrenaturierung in Bayern, Augsburg.
- Bayerischer Oberster Rechnungshof, 2021: Beratende Äußerung zur Renaturierung von Mooren
- Behm, R., 1988: Untersuchungen zur Bestimmung der leicht umsetzbaren N- und C-Anteile im Heißwasserextrakt des Bodens. Kurzmitteilung. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 32, 333–335.
- Bellisario, L.M., Moore, T.R., Bubier, J. L., 1998: Net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland, northern Manitoba. *Écoscience* 5, 517–525. <https://doi.org/10.1080/11956860.1998.11682491>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2007: Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. Berlin
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2023: Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz: Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023. 88 Seiten.
- Büro für angewandte Ökologie und Forstplanung (BÖF), 2008: Grunddatenerfassung zum FFH-Gebiet DE 4725-306 "Meißner und Meißner-Vorland" Werra-Meißner-Kreis. Regierungspräsidium Kassel, Obere Naturschutzbehörde, Kassel.
- Clausnitzer, U., Succow, M., 2001: Vegetationsformen der Gebüsche und Wälder, in: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.), Landschaftsökologische Moorkunde. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, pp. 161–170.
- Couwenberg, J., Augustin, J., Michaelis, D., Wichtmann, W., Joosten, H., 2008. Entwicklung von Grundsätzen für eine Bewertung von Niedermooeren hinsichtlich ihrer Klimarelevanz (Endbericht). Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Institut für Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde e.V., Greifswald.
- Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärish, S., Dubovik, D., Liaschchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A., Joosten, H., 2011: Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia* 674, 67–89. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Drösler, M., 2005: Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystems, Southern Germany (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Drösler, M., Schaller, L., Kantelhardt, J., Schweiger, M., Fuchs, D., Tiemeyer, B., Augustin, J., Wehrhan, M., Förster, C., Bergmann, L., Kapfer, A., Krüger, G.-M., 2012: Beitrag von Moorschutz- und Revitalisierungsmaßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel von Naturschutzgroßprojekten. *Natur und Landschaft*. 87. 70-76. [10.17433/2.2012.50153144.70-76](https://doi.org/10.17433/2.2012.50153144.70-76).
- Drösler, M., Adelman, W., Augustin, J., Bergman, L., Beyer, C., Chojnicki, B., Förster, C., Freibauer, A., Giebels, M., Görlitz, S., Höper, H., Kantelhardt, J., Liebersbach, H., Hahn-Schöfl, M., Minke, M., Petschow, U., Pfadenhauer, J., Schaller, L., Schägner, P., Sommer, M., Thuille, A., Wehrhan, M., 2013: Klimaschutz durch Moorschutz. Schlussbericht des Vorhabens "Klimaschutz - Moornutzungsstrategien" 2006-2010 (Kurzfassung) (Endbericht). Hochschule Weihenstephan-Triesdorf.
- DSS-WAMOS = Decision Support System Waldmoorschutz: Ein Entscheidungsunterstützungs-System für das Management und die Renaturierung von Waldmooren, siehe: <https://dss-wamos.de/>
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (USA), p. 106.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), 2022: URL: <https://klimaportal.hlnug.de/witterungsbericht> (Zugriff am 15.11.2022)
- 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, 3477–3493. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3477-2014>
- IPCC, 2014: 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Switzerland.
- Joabsson, A., Christensen, T.R., 2001: Methane emissions from wetlands and their relation with vascular plants. *Global Change Biology* 7, 919–932.
- Jungkunst, H.F., Freibauer, A., Neufeldt, H., Bareth, G., 2006: Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany— a synthesis of available annual field data. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 341–351. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521954>
- Kind, F., 2022: Die Analyse des Potenzials und der Priorisierung der Moorerenaturierung sowie die Erstellung eines Renaturierungsleitfadens anhand der Erfassung des Moorzustandes der Butterwiese und des Weiberhemdmoores auf dem Meißner (Bachelorarbeit). HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fachhochschule Hildesheim/ Holzminde/ Göttingen; Fakultät Ressourcenmanagement, Göttingen.

- Klingenuß, C., Möller, D., Heller, C., Thrum, T., Köberich, K., Zeitz, J., 2015: Berliner Moorböden im Klimawandel (UEPII_Forschungsprojekt, Abschlussbericht). Humboldt-Universität zu Berlin.
- Körschens, M., Weigel, A., Schulze, E., 1998: Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances—tools for evaluating sustainable productivity of soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 161, 409–424.
- Koska, I., 2001: Ökohydrologische Kennzeichnung, in: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.), *Landschaftsökologische Moorkunde*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, pp. 92–111.
- Land Niedersachsen, 2022: Multifondensprogramm für die EU-Strukturfondsförderperiode 2021-2027. Niedersächsisches fonds- und zielgebietsübergreifendes Programm für den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und den Europäischen Sozialfonds Plus (ESF+). Stand 01.06.2022
- Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, 2017: Methodologie für MoorFutures-Projekte.
- Möller, D., Heller, C., 2009: CARBSTOR – ein Verfahren zur Quantifizierung und Bewertung der C-Speicher und des C-Freisetzungs potentials von organischen Böden (Endbericht). Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. www.carbstor.de
- Pfalzgraf, H., 1934: Die Vegetation des Meißners und seine Waldgeschichte, *Repertorium specierum novarum regni vegetabilis*. Verlag des Repertoriums, Dahlem bei Berlin.
- Rohland, L., Steinhardt, U., Ewender, U., Veltmann, K., Helms, A., Selzer, T., 2021: *Handbuch der Moorbiedervernässung*. 100 S.
- Röhling, S., Rötzer, T., Pretzsch, H., 2014: Einfluss des Klimas auf die Kohlenstoffspeicherung von Moorböden, in: Conference Paper. Presented at the 7th Conference on Biometeorology, Freiburg im Breisgau, Germany, p. 10.
- Schüler, G., Kopf, C., 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. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz No. 86/20*. Zentralstelle der Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Trippstadt.
- Seidl, L.C., 2023. Analyse der Waldbesitzer Motivatoren bezogen auf die Inanspruchnahme von forstlichen Beratungs- und Betreuungsangeboten (Masterarbeit). Fachhochschule Erfurt, Erfurt.
- Spanel, E., 2020: Meißner-Verbandswasserwerk: Errungenschaft, die Jahrhunderte überdauert. URL: <https://www.hna.de/lokales/witzenhausen/meissnerverbandswasserwerk-errungenschaft-jahrhundert-ueberdauert-13423537.html>. (Zugriff am 08.06.2022).
- Spangenberg, A., 2011: Einschätzung der Treibhausgasrelevanz bewaldeter Moorstandorte in Mecklenburg-Vorpommern hinsichtlich des Minderungspotentials nach Wiedervernässung (Endbericht). Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde (DUENE) e.V., Greifswald.
- Sparling, G., Vojvodic-Vukovic, M., Schipper, L.A., 1998: Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 30, 1469–1472.
- Succow, M., Joosten, H. (Eds.), 2001: *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2. überarbeitete Auflage. ed. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Drösler, M., Albiac-Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Belting, S., Bernrieder, M., Beyer, C., Eberl, J., Eickenscheidt, T., Fell, H., Fiedler, S., Förster, C., Frahm, E., Frank, S., Giebels, M., Glatzel, S., ..., Zeitz, J., 2013: Klimarelevanz von Mooren und Anmooren in Deutschland: Ergebnisse aus dem Verbundprojekt "Organische Böden in der Emissionsberichterstattung". Thünen Working Paper No. 15. Johann-Heinrich von Thünen Institut, Braunschweig.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M., 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
- van Beek, C.L., Hummelink, E.W.J., Velthof, G.L., Oenema, O., 2004: Denitrification rates in relation to groundwater level in a peat soil under grassland. *Biology and Fertility of Soils* 39, 329–336. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0685-3>
- Wickland, K.P., Striegl, R.G., Mast, M.A., Clow, D.W., 2001: Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998. *Global Biogeochemical Cycles* 15, 321–335. <https://doi.org/10.1029/2000GB001325>