

# KLIMASCHUTZ- UND ANPASSUNGSPOTENZIALE IN MOOREN BAYERN (KLIMOBAY)

## ABSCHLUSSBERICHT

PROJEKTLAUFZEIT 01. MÄRZ 2019 – 31. DEZEMBER 2022

J. KLATT, M. SCHLAIPFER, H. MEYER, C. BREHIER, S. FRIEDRICH,  
A. GERNER, M. TARANTIK, G. CHIOGNA, M. DISSE, M. FRISCHHUT,  
T. MACHL, N. CONZE, M. HERR, J. KOTZI, A. KÜHNEL, L. REIF-  
SCHNEIDER, J. WELTE, G. KUHN, A. FREIBAUER, V. HUBER GARCÍA,  
T. RAMSAUER, R. WOOD, Y. CHEN, V. KUCH, P. MARZAHN, R. LUDWIG  
& M. DRÖSLER

### PARTNER



### GEFÖRDERT DURCH



## AUTOREN UND INSTITUTIONEN

J. Klatt<sup>1</sup>, M. Schlaipfer<sup>1</sup>, S. Friedrich<sup>2</sup>, M. Tarantik<sup>2</sup>, A. Gerner<sup>2</sup>, G. Chiogna<sup>2</sup>, M. Disse<sup>2</sup>, M. Frischhut<sup>3</sup>, T. Machl<sup>3</sup>, N. Conze<sup>3</sup>, M. Herr<sup>3</sup>, J. Kotzi<sup>3</sup>, A. Kühnel<sup>3</sup>, L. Reifschneider<sup>3</sup>, J. Welte<sup>3</sup>, G. Kuhn<sup>3</sup>, A. Freibauer<sup>3</sup>, V. Huber García<sup>4</sup>, T. Ramsauer<sup>4</sup>, Y. Chen<sup>4</sup>, V. Kuch<sup>4</sup>, R. Wood<sup>4</sup>, P. Marzahn<sup>5</sup> (vorher<sup>4</sup>), R. Ludwig<sup>4</sup> & M. Drösler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peatland Science Centre – PSC, Institut für Ökologie und Landschaft, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Am Hofgarten 1, 85354 Freising

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, School of Engineering and Design, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München

<sup>3</sup> Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Lange Point 12, 85354 Freising

<sup>4</sup> Department für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstraße 37, 80333 München

<sup>5</sup> Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

**Die Autoren sind ausschließlich für die durch sie verfassten Kapitel verantwortlich.**

<p><b>Vorhabensleitung:</b> Prof. Dr. Matthias Drösler Peatland Science Centre – PSC, Institut für Ökologie und Landschaft Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Am Hofgarten 1 85354 Freising Tel. +0049 8161 71-6260 E-Mail: matthias.droesler@hswt.de</p>	<p><b>Koordination:</b> Dr. Janina Klatt und Martina Schlaipfer Peatland Science Centre – PSC, Institut für Ökologie und Landschaft Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Am Hofgarten 1 85354 Freising Tel. +0049 8161 71-6265 E-Mail: janina.klatt@hswt.de oder martina.schlaipfer@hswt.de</p>
<p><b>Projektleitung 1:</b> Prof. Dr. Matthias Drösler Peatland Science Centre – PSC, Institut für Ökologie und Landschaft Hochschule Weihenstephan-Triesdorf Am Hofgarten 1 85354 Freising Tel. +0049 8161 71-6260 E-Mail: matthias.droesler@hswt.de</p>	<p><b>Projektleitung 2:</b> Prof. Dr.- Ing. Markus Disse Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebiets- management, School of Engineering and Design, Technische Universität München Arcisstraße 21 80333 München Tel. +0049 89 289-23916 E-Mail: markus.disse@tum.de</p>
<p><b>Projektleitung 3:</b> Dr. Annette Freibauer Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Tel. +0049 8161 8640-4001 E-Mail: annette.freibauer@lfl.bayern.de</p>	<p><b>Projektleitung 4:</b> Prof. Dr. Ralf Ludwig Department für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstraße 37, 80333 München Tel. +0049 89 2180 6677 E-Mail: r.ludwig@lmu.de</p>

## DANKSAGUNG

Wir danken Dr. Francesco De Zan vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen für die Bereitstellung des PS/DS-Datensatzes und die technische Beratung. Die Daten des Hochmoorwaldstandorts Schechenfilz wurden vom KIT/IMK-IFU zur Verfügung gestellt. Großer Dank gilt dem Thünen Institut für die Bereitstellung von Wasserstandsdaten und besonders Dr. Bärbel Tiemeyer für die Zusammenstellung von Altdaten aus Vorläuferprojekten. Unser Dank gilt zudem den Bayerischen Staatsgütern in Karolinenfeld und dem Zentrum für Umwelt und Kultur in Benediktbeuern für den Zugang zu den Untersuchungsflächen. Danke an Anna-Maria Heim für ihren Beitrag und die Verschriftlichung zum Thema Biodiversität.

Großer Dank gilt allen Institutionen, die Wasserstandsdaten zur weiteren Nutzung zur Verfügung gestellt haben, darunter die ARGE Donaumoos, Bayerische Staatsforsten, der Landkreis Ostallgäu, die Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, das Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt und die Regierung von Oberbayern. Ebenso bedanken wir uns beim Referat 103 des LfU, insbesondere bei Reinhard Jochum, für Bodendaten und die hervorragende fachliche Unterstützung bei allen Bodenthemen. Darüber hinaus bedanken wir uns bei Birgit Weis vom LBV für die Unterstützung im Königsdorfer Weidfilz, der Stadt und dem Landkreis Freising für den Zugang zu den Untersuchungsflächen, den Stadtwerken Freising für die Bereitstellung der Grundwassermessstellen, sowie Herrn Burghardt von der Justizvollzugsanstalt Bernau für den Zugang zu den Damberger Filzen. Besonderer Dank gilt allen Privateigentümern die ihre Flächen für die Forschung zugänglich gemacht haben.

# I INHALTSVERZEICHNIS

<b>Autoren und Institutionen</b> .....	<b>2</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>3</b>
<b>I Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>II Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>9</b>
<b>III Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>11</b>
<b>IV Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Kurzzusammenfassung</b> .....	<b>15</b>
<b>2 Zusammenfassung</b> .....	<b>16</b>
<b>3 Einführung</b> .....	<b>21</b>
<b>4 Vorhabenstruktur und Aufgabenstellung</b> .....	<b>22</b>
<b>5 Fernerkundung und Klimaprojektionen (Projekt 4, LMU)</b> .....	<b>23</b>
5.1 Einführung.....	23
5.2 Fragestellungen und Ziele.....	23
5.3 Material und Methodik.....	24
5.4 Ergebnisse.....	28
5.4.1 Fernerkundung: Sackung, Bodenfeuchte, Wasserstand und Vegetation.....	28
5.4.1.1 Sackung.....	28
5.4.1.2 Bodenfeuchte.....	35
5.4.1.3 Verdunstung.....	35
5.4.1.4 Wasserstand.....	36
5.4.1.5 Vegetation.....	36
5.4.2 Regionale Klimaprojektionen.....	39
5.5 Output-Indikator.....	40
5.6 Diskussion.....	41
5.7 Weiterführender Forschungsbedarf.....	42
<b>6 Hydrologie und Wasserstandskarten (Projekt 2, TU München)</b> .....	<b>44</b>
6.1 Einführung.....	44
6.2 Fragestellungen und Ziele.....	44
6.3 Material und Methodik.....	45
6.3.1 Monitoring.....	46
6.3.2 Physikalisch basierte Modellierung mit Mike SHE.....	47
6.3.2.1 Modellaufbau.....	47
6.3.2.2 Analyse von Wiedervernässungsszenarien im Weidfilz.....	48
6.3.2.3 ClimEx im Mike SHE Modell.....	49
6.3.3 Regionalisierung der Flurabstände (Wasserstandskarte).....	49

6.3.3.1	Anforderungen an den Trainingsdatensatz .....	49
6.3.3.2	Datengrundlage für die Zielgröße Flurabstand.....	50
6.3.3.3	Ableitung von Prädiktoren .....	50
6.3.3.4	Erstellung des Machine-Learning-Modells .....	52
6.3.3.5	Zukünftige Flurabstände auf Basis von ClimEx-Klimaprognosen .....	52
6.3.4	Wasserbilanz Karten .....	53
6.4	Ergebnisse .....	53
6.4.1	Hydrologie, Erfassung von Wasserständen und Abflüssen, Bildung hydrologischer Einheiten, Modellierung von Wasserstandskarten .....	53
6.4.1.1	Monitoringaktivitäten der TUM im Rahmen von KliMoBay .....	54
6.4.1.2	Physikalisch basierte Modellierung mit Mike SHE .....	54
6.4.1.3	Regionalisierung der Flurabstände (Wasserstandskarte) .....	57
6.4.2	Wasserverfügbarkeit, Ent- & Bewässerungsnetz, Renaturierbarkeit .....	61
6.5	Output-Indikator.....	62
6.6	Diskussion .....	63
6.7	Weiterführender Forschungsbedarf.....	65
<b>7</b>	<b>Bodeninformation und Klimaanpassung (Projekt 3, LFL).....</b>	<b>67</b>
7.1	Einführung .....	67
7.2	Fragestellungen und Ziele.....	67
7.3	Material und Methodik .....	68
7.3.1	Untersuchungsgebiete .....	68
7.3.2	Das LfL-Moorarchiv und dessen digitale Erschließung .....	69
7.3.3	Geländeaufnahmen 2022.....	70
7.3.4	Datenauswertung der Bodeninformationen für den Moorbodenschutz .....	71
7.3.4.1	Bodeninformationen .....	71
7.3.4.2	Bodenphysik & -chemie.....	71
7.3.4.3	In situ Sackungsraten.....	72
7.3.4.4	Nutzung .....	73
7.3.5	Rechtliche und sozioökonomische Rahmenbedingungen.....	73
7.3.5.1	Karte der hydrologisch adressierbaren Bereiche (haB) .....	73
7.3.5.2	Sozioökonomische Indikatoren .....	73
7.3.5.3	Karte der sozioökonomischen Indikatoren .....	74
7.3.6	Karte der Endlichkeit einer landwirtschaftlichen Nutzung .....	75
7.3.6.1	Karte der jährlichen Torfsackungsraten .....	75
7.3.6.2	Kriterien für die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung.....	75
7.3.6.3	Berechnung der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Moornutzung .....	76
7.4	Ergebnisse .....	77
7.4.1	Bodeninformation, Bodenphysik & -chemie, Sackung .....	77

7.4.1.1	Bodeninformationen .....	77
7.4.1.2	Bodenphysik & -chemie.....	79
7.4.1.3	Sackung in situ .....	81
7.4.1.4	Sackung nach Nutzungsklassen .....	82
7.4.2	Sozioökonomische Rahmenbedingungen.....	82
7.4.2.1	Karte der hydrologisch adressierbaren Bereiche (haB) .....	82
7.4.2.2	Indikatoren und Karte der sozioökonomischen Restriktionen .....	82
7.4.3	Karte der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung .....	83
7.5	Output-Indikator.....	86
7.6	Diskussion .....	86
7.7	Weiterführender Forschungsbedarf.....	89
<b>8</b>	<b>Koordination, Klimarelevanz und Biodiversität (Projekt 1, HSWT) .....</b>	<b>90</b>
8.1	Einführung .....	90
8.2	Fragestellungen und Ziele.....	90
8.3	Material und Methodik .....	91
8.3.1	Untersuchungsgebiete und Methodik der THG-Messungen/-Bilanzierung .....	91
8.3.2	Aufbereitung und Auswertung der Altdaten.....	94
8.3.3	Treibhausgasmodellierung .....	96
8.4	Ergebnisse .....	96
8.4.1	Klimarelevanz, Treibhausgasaustausch, Abhängigkeit von Steuerfaktoren, Grundlagen für Modellbildung zur Klimabilanzierung, Vegetation.....	96
8.4.1.1	THG-Bilanzierung und Klimarelevanz der Untersuchungsgebiete BDB und KLF .....	96
8.4.1.2	Regionale Emissionsfaktoren.....	98
8.4.1.3	Treibhausgase und Steuerfaktoren .....	99
8.4.1.4	Treibhausgasbilanzierung der Moorwälder .....	101
8.4.2	Biodiversität.....	103
8.4.2.1	Hintergrund.....	103
8.4.2.2	Methodik.....	104
8.4.2.3	Synthese .....	111
8.4.3	Mooremissionen in Bayern.....	111
8.4.3.1	Berechnung der bayernweiten Mooremissionen .....	111
8.4.3.2	Einfluss des Klimawandels auf die Mooremissionen.....	113
8.4.4	Klimaschutzpotenzialkarten.....	114
8.4.4.1	Maximales Klimaschutzpotenzial durch Wiedervernässung .....	114
8.4.4.2	Sozioökonomisch realistisches Potenzial.....	114
8.4.4.3	Restriktionen zum Schutz der Biodiversität.....	115
8.4.4.4	Potenzial durch Paludikultur.....	115
8.4.4.5	Unter Klimawandelprognosen sicheres Potenzial .....	115

8.4.4.6	Unter Anpassung der Landnutzung optimiertes Potenzial .....	115
8.5	Output-Indikator.....	116
8.6	Diskussion Treibhausgase und Klimarelevanz.....	117
8.7	Weiterführender Forschungsbedarf.....	119
<b>9</b>	<b>Monitoring und Erfolgskontrolle .....</b>	<b>120</b>
<b>10</b>	<b>Zusammenfassende Diskussion .....</b>	<b>123</b>
<b>11</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit .....</b>	<b>131</b>
<b>12</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>133</b>
<b>13</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>139</b>
13.1	HSWT: Datenbasis Treibhausgase .....	139
13.2	TUM: Datenbasis Wasserstände.....	140
13.3	TUM: Detailansicht der KliMoBay Testgebiete.....	141
13.4	TUM: Monitoring Übersicht über die in den Testgebieten erfassten Parameter.....	144
13.5	TUM: Datenbasis Mike .....	145
13.6	LfL: Übersichtskarte über die Projektgebiete .....	147
13.7	LfL: Überblick über die Dokumente des analogen LfL-Moorarchivs und dessen Digitalisierungsstand .....	148
13.8	LfL: Überführung einer analogen Flurkarte (A) in die digitale Geodatenbank (Moortyp (B) und Oberflächeninformation (C)).....	149
13.9	LfL: Torfmächtigkeit in Meter, sowie die Lage der Tonschicht in m ü NN für das Staatsgut Karolinenfeld .....	150
13.10	LfL: Zusammenstellung der Ergebnisse der Nachbeprobung 2022 zu Torfmächtigkeit, Kohlenstoffvorrat über das gesamte Profil und Kohlenstoffvorrat der ersten 1,5 m .....	151
13.11	Substrat-Zersetungsgrad Tabelle .....	152
13.12	LfL: Sozioökonomische Restriktionspotenziale .....	153
13.13	Flächenanteile der Endlichkeitsklassen landwirtschaftlich genutzter Moorböden (IgM) Bayerns nach Moortyp und Tatsächlicher Nutzung getrennt .....	154
13.14	Torfsackungsraten nach Nutzungsklassen (Tatsächliche Nutzung) .....	155
13.15	Artentabellen: Konflikte und Synergien mit der Biodiversität.....	156
13.16	Flyer .....	165
13.17	KliMoBay Moorpegel Aufkleber (2019):.....	166
13.18	Karten in A3 Maßstab 1: 1.250.000.....	167
Karte 1	Schnitthäufigkeit von Grünlandflächen Jahr 2020.....	168
Karte 2	Flurabstandskarte 2020.....	169
Karte 3	Flurabstandskarte 2030 Nass.....	170
Karte 4	Flurabstandskarte 2030 Median.....	171
Karte 5	Flurabstandskarte 2030 Trocken.....	172
Karte 6	Flurabstandskarte 2040 Nass.....	173

Karte 7..Flurabstandskarte 2040 Median.....	174
Karte 8 Flurabstandskarte 2040 Trocken.....	175
Karte 9 Flurabstandskarte 2050 Nass.....	176
Karte 10 Flurabstandskarte 2050 Median.....	177
Karte 11 Flurabstandskarte 2050 Trocken.....	178
Karte 12 Unsicherheit der Flurabstandskarte 2020.....	179
Karte 13 Unsicherheit der Flurabstandskarte 2030 Median.....	180
Karte 14 Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2020.....	181
Karte 15 Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2030 Median.....	182
Karte 16 Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2040 Median.....	183
Karte 17 Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2050 Median.....	184
Karte 18 Hydrologisch adressierbare Bereiche.....	185
Karte 19 Sozioökonomische Restriktionspotenziale.....	186
Karte 20 Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Anzahl distinkter Privateigentümer je Hektar.....	187
Karte 21 Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteil Acker.....	188
Karte 22 Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteil Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen.....	189
Karte 23 Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteile in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum.....	190
Karte 24 Höhenveränderung auf Moorstandorten aus landesweitem DGM-Vergleich.....	191
Karte 25 Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung.....	192
Karte 26 Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Limitierende Faktoren.....	193
Karte 27 Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Grundwasser-Flurabstand als limitierender Faktor.....	194
Karte 28 Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Untergrund als limitierender Faktor.....	195
Karte 29 Mooremissionskarte 2020.....	196
Karte 30 Mooremissionskarte 2030.....	197
Karte 31 Mooremissionskarte 2040.....	198
Karte 32 Klimaschutzpotenzialkarte: Maximalszenario.....	199
Karte 33 Klimaschutzpotenzialkarte:Restriktion Sozioökonomie.....	200
Karte 34 Klimaschutzpotenzialkarte: Restriktion Sozioökonomie inkl. Paludikultur.....	201
Karte 35 Klimaschutzpotenzialkarte: Durch Landnutzungsanpassung optimiertes Szenario.....	202



## II ABILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Projekt- und Modulstruktur des KliMoBay-Vorhabens.....	22
Abbildung 2: Bodenbewegung in Blickrichtung des Sensors (LOS) im Schechenfilz (Referenz: Schechen), Median über alle Punkte (n) im jeweiligen Datensatz. Vergleich mit RADOLAN Niederschlagsdaten und Schneehöhenmessungen in Mooseurach (Quelle: Peatland Science Center, HSWT).....	29
Abbildung 3: Veränderung der Mooroberfläche (Versatz in mm) im Herbst im Vergleich zum Herbst des Vorjahres im PS/DS-Datensatz im Seeshaupter Weidfilz (westlich des Baches) und Schechenfilz. Der rote Stern markiert die Referenzsiedlung Schechen.....	30
Abbildung 4: Links: Herbstdifferenz 2018 zu 2017 ds PS/DS-Datensatzes über Seeshaupter Weidfilz und Schechenfilz. Rechts: Lage der Drainagegräben und Wiedervernässungsmaßnahmen in diesem Gebiet (Quelle: Rücker 2016)..	30
Abbildung 5: Mittlere LOS Bodenbewegung [mm/Jahr] im PS/DS-Datensatz (Punkte, Referenz: Schechen) und der darunterliegenden mit GMTSAR prozessierten SBAS-Karte für das Schechenfilz, den Großraum Benediktbeuern bis zum Kochelsee und das Gebiet um das Versuchsgut in Karolinenfeld. ....	32
Abbildung 6: Mittlere LOS Bodenbewegung [mm/Jahr], SBAS-Ergebnisse prozessiert über ASF-MintPy für das Schechenfilz, den Großraum Benediktbeuern bis zum Kochelsee und das Gebiet um das Versuchsgut in Karolinenfeld. ....	34
Abbildung 7: Verdunstungsmuster aus dem DATT-Modell und der „Triangle Method“ für den 05.08.2017.....	35
Abbildung 8: Verteilung der Schnitthäufigkeiten aller Grünland-Feldstücke („Felder“) für die Jahre 2017-2021.....	36
Abbildung 9: Beispielhafte EVI-, Kohärenz- und Niederschlagszeitreihe und entsprechende Schnitttermindetektion. ....	37
Abbildung 10: Detektierte Schnittanzahl 2021 für drei ausgewählte Moore.....	38
Abbildung 11: Mittlere Differenz des ersten detektierten Schnitttermin eines Jahres im Vergleich zu dem ersten vorgegebenen Schnitt aus AUM im Mittel über die Jahre 2017-2021.....	39
Abbildung 12: Überblick über die Verbindung von Messung und Prozessmodellierung in ausgewählten Testgebieten und die bayernweite Übertragung zur Ableitung von Wasserstandskarten .....	45
Abbildung 13: Konzeptmodell für das Königsdorfer Weidfilz (Ist-Zustand) (Friedrich, 2019).....	46
Abbildung 14: Modellierte und gemessene Flurabstände (m) im Weidfilz Modell am Pegel 5 für das Kalibrierungsjahr 19/20 sowie das Validierungsjahr 20/21. ....	48
Abbildung 15: Übersicht der Arbeitsschritte von Erstellung der Klima Prädiktoren über die Anwendung des Machine Learning hin zur der Auswahl der dargestellten Karten im Anhang für die Zustände Trocken, Median und Nass exemplarisch an 2030.....	53
Abbildung 16: Ergebnisse der numerischen Modellierung im zentralen Hochmoorkomplex Königsdorfer Weidfilz. Darstellung des Flurabstands in der Fläche bei unterschiedlichen Wiedervernässungsszenarien (Friedrich et al. in prep). ....	55
Abbildung 17: Übertragung der Flurabstände aus dem Modell in treibhausgasrelevante und -irrelevante Flächenanteile (Friedrich et al. in prep). ....	56
Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der simulierten Flurabstände bis 2050 am Beispiel Freisinger Moos (Pegel 32) für die Realisationen kcq (2030 Nass) und kcj (2030 Trocken) (vgl. Abbildung 15). ....	57

Abbildung 19: Ergebnisse des ML Modells an vier beispielhaften, unabhängigen Messstellen, welche nicht für das Training verwendet wurden. a) Freisinger Moos b) Benediktbeuern c) Bayerisches Donaumoos d) Weidfilz; STD = Standardabweichung (Friedrich et al. in prep).....	58
Abbildung 20: a) Fehlerverteilung und b) kumulative Fehlerverteilung der unabhängig vom Training vorhergesagten Testdaten (Friedrich et. al in prep).....	59
Abbildung 21: Vergleich der Modellanpassung gegenüber den gemessenen Daten zwischen a) Training, b) Test und c) dem 100er Ensemble; STD = Standardabweichung (Friedrich et. al in prep).....	60
Abbildung 22: Flurabstands Detailkarten für das Referenz Jahr 2020. a) Bayerisches Donaumoos, b) Freisinger Moos, c) Karolinenfeld und d) Benediktbeuern. Dunkelblau: flurnahe Wasserstände bzw. nass, rot: große Flurabstände bzw. trocken. ....	61
Abbildung 23 Torfmächtigkeiten in den Projektgebieten (Stand 2022). ....	78
Abbildung 24 Torfsubstrat, Zersetzungsgrad nach von Post (1924) und Mächtigkeit nach Bodenhorizonten getrennt von drei Bohrpunkten in Benediktbeuern und jeweils einer im Ampertal und Freisinger Moos. ....	78
Abbildung 25: Kohlenstoffvorrat der oberen 1,5 m getrennt nach den Projektgebieten. ....	79
Abbildung 26: Organischer Kohlenstoffgehalt (%) und Lagerungsdichte im Tiefenverlauf für den Standort Benediktbeuern 16. Gegenüberstellung historischer Moorarchiv-Daten (Links) und 2022 neu erhobenen Daten (rechts).....	80
Abbildung 27: Jährliche Sackungsraten [m/a] in den Projektgebieten berechnet aus dem Vergleich zwischen historischen und aktuellen Torfmächtigkeiten (AT, BN-NSG, EM und FSM) und zwischen historischen und aktuellen Nivellements (BDB). ....	81
Abbildung 28: Sozioökonomische Restriktionspotenziale. Flächenverteilung in Hektar der potenziellen Vorbehalte gegenüber einer Wiedervernässung, unterteilt in die Klassen gering (potenzielle Gunsträume), mittel (durchschnittliches Restriktionspotenzial) und hoch (potenziell höhere Restriktionen zu erwarten). Die Flächenanteile berechnen sich aus dem Anteil an der Gesamtfläche hydrologisch adressierbarer Bereiche > 1 Hektar.....	83
Abbildung 29: Flächenanteile der landwirtschaftlich genutzten Moorböden, eingeteilt in die Klassen in Jahren nach denen eine Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung zu erwarten ist. ....	84
Abbildung 30: Ausschnitt aus der Karte der geschätzten Endlichkeit in Jahren in BDB mit pixelweise verfügbaren Informationen auf einem 5 x 5 m Raster. ....	85
Abbildung 31: Übersicht über das Untersuchungsgebiet BDB (links) mit den Treatments 51 bis 53. ....	91
Abbildung 32: Übersicht über das Untersuchungsgebiet KLF (rechts) mit den Treatments 61 bis 64. ....	92
Abbildung 33: Aufteilung von Treatment 51 in Benediktbeuern in die Treatments 51A und 51B im Messjahr 2021 und Lage der beiden Treatments in Relation zum Drainagerohr. ....	93
Abbildung 34: Wasserstände an den Standorten BDB und KLF im Vergleich der Messjahre 2020 und 2021 .....	93
Abbildung 35: Treibhausgasmessstandorte in Bayern.....	95
Abbildung 36: Datenbasis für die THG-Modellierung für die unterschiedlichen Nutzungstypen, Zahlen und Proportionen zeigen die Anzahl an berücksichtigten Datensätzen je Landnutzungskategorie .....	95
Abbildung 37: Aufbau der Treibhausgasmodellierung .....	96

Abbildung 38: THG-Bilanzen und Klimarelevanz an den Messstandorten KLF und BDB in den Jahren 2020 und 2021 .....	97
Abbildung 39: Box-Plots der Treibhausgasbilanzen unterschiedlicher Landnutzungstypen (Median).....	99
Abbildung 40: Abhängigkeitsfunktionen für verschiedene Landnutzungen, basierend auf einer wasserstandsabhängigen Gompertz Funktion .....	100
Abbildung 41: Abhängigkeitsfunktionen für verschiedene Landnutzungen, basierend auf einer wasserstandsabhängigen Exponentialfunktion.....	100
Abbildung 42: Box-Plots der N <sub>2</sub> O Emissionen, basierend auf dem ausgewerteten bayerischen THG-Datensatz, dargestellt als CO <sub>2</sub> -Äquivalente.....	101
Abbildung 43 a) THG Bilanz des naturnahen Spirkenwalds Schechenfilz von 2011-2019 (Daten erhoben vom KIT/IMK-IFU in Garmisch-Partenkirchen) und b) des entwässerten Fichtenforstes Mooseurach 2011-2020, der 2016 vollständig gerodet wurde und seitdem der natürlichen Sukzession ohne Bewirtschaftungsziel überlassen wird.....	102
Abbildung 44: Effekt der Grünlandextensivierung auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tabelle 11 (nach Heim, verändert). .....	108
Abbildung 45: Effekt der Wasserstandsanhhebung im (extensivierten) Grünland auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert). .....	109
Abbildung 46: Effekt der Renaturierung auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert). .....	109
Abbildung 47: Effekt der Umwandlung von Acker oder Intensivgrünland in Paludikultur auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert). .....	110
Abbildung 48: Effekt der Umwandlung von Acker zu (Intensiv-) Grünland auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert). .....	110
Abbildung 49: Landnutzungen, kombiniert mit der Wasserstandskarte und den Regressionsmodellen bilden die Grundlage für die neue Mooremissionskarte. ....	112
Abbildung 50: Vergleich der Mooremissionen im Jahr 2020 (links) mit den Emissionen nach potenzieller Landnutzungsanpassung und Optimierung (rechts) am Beispiel von Karolinenfeld und Benediktbeuern .....	119

### III TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Aufbereitete und bereitgestellte Klimadaten aus dem Vorgängerprojekt ClimEx. ...	40
Tabelle 2: Liste aller Prädiktoren, die in das endgültige Modell einbezogen wurden; t ist der aktuelle Zeitschritt (Monat), t-1 der Vormonat, t-2 der vorletzte Monat; Gleitender Mittelwert s. Gleichung 3. ....	51
Tabelle 3: Übersicht über verfügbare Ergebnisse der Regionalisierung .....	60
Tabelle 4 Indikatoren und ihre Grenzwerte, zur bayernweiten Darstellung von Gunsträumen und Restriktionen für Wiedervernässungsprojekte. ....	75
Tabelle 5: Bestimmung der Moormächtigkeitssklassen in m und der zugrundeliegenden Moorinformation (MBK = Moorbodenkarte, BSCH = Bodenschätzung).....	76
Tabelle 6: Benediktbeuern, Bohrpunkt 16. Vergleich zwischen Torfmächtigkeit, gemittelter organischer Kohlenstoffgehalt und gemittelter Lagerungsdichte von 1964 und 2022 im klar abgrenzbaren Bereich über der Tonmudde. ....	80

Tabelle 7: Auf die hydrologisch zusammenhängenden Bereiche der Moorbodenkarte ermittelten Indikatoren in Anlehnung an Tiemeyer et al., 2017. ....	82
Tabelle 8: Durchschnittliche Lufttemperatur und klimatische Wasserbilanz 2020 und 2021 für die Messstandorte BDB und KLF .....	93
Tabelle 9: In die Auswertung eingegangene Gefährdungsstufen .....	104
Tabelle 10: Bewertung der Arten und deren Reaktion auf potenzielle Landnutzungsänderung .....	105
Tabelle 11: Bewertung der Reaktion der Arten auf die dem Handlungsspielraum im Moorschutz entsprechenden Landnutzungsänderungen.....	106
Tabelle 12: Vergleich von gemessenen Mittelwerten des Wasserstands und der Treibhausgase gegenüber modellierten Gesamtflächenmittelwerten nach den Landnutzungskategorien für die organischen Böden Bayerns. ....	113
Tabelle 13: Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 im Vergleich zu den Zukunftsprognosen 2030 und 2040 für die Moorkulisse des Hydrologischen Bayern (222.000 ha) .....	113
Tabelle 14: Gegenüberstellung der THG Emissionen bei Beibehalt des Ist-Zustands (Baseline Szenario) mit dem durch Landnutzungsanpassung optimierten Szenario.....	116
Tabelle 15 Vergleich der Emissionen und der Einsparleistungen der im Kapitel 8.4.4 beschriebenen Szenarien * außer Wohnbebauung/Gewässer/Infrastruktur/naturnahe Moore.....	118

## IV ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ASF:	Alaska Satellite Facility
AT:	Ampertal
AUM:	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
BDB:	Benediktbeuern
BN:	Bernau
BPP	Bruttoprimärproduktion
C:	Kohlenstoff
CanESM2:	Canadian Earth System Model, version 2
CO <sub>2</sub> :	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> -Äqu.:	CO <sub>2</sub> -Äquivalente, Zugrunde gelegt sind die Treibhausgaspotenziale des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2014/2015, bezogen auf 100 Jahre
COH:	Kohärenzwerte
C <sub>org</sub> :	Oorganischer Kohlenstoffgehalt
CH <sub>4</sub> :	Methan
CRCM5:	Canadian Regional Climate Model, version 5
DATT:	DATTUTDUT (Deriving Atmosphere Turbulent Transport Useful To Dummies Using Temperature) model
DGM:	Digitales Geländemodell
DGPS:	Differential Global Positioning System
DLR:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen
DS:	Distributed Scatterers
EC:	Eddy-Covariance
EF:	Emissionsfaktor
EM:	Erdinger Moos
ET0:	potentielle Evapotranspiration
ETA:	aktuelle Evapotranspiration
EVI:	Enhanced Vegetation Index
FSM:	Freisinger Moos
GIS:	Geoinformationssystem
GMTSAR:	InSAR Prozessierungssystem basierend auf den Generic Mapping Tools
HSWT:	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
InVeKoS:	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
JVA:	Justizvollzugsanstalt Bernau
KLF:	Karolinenfeld
KliMoBay:	Klimaschutz und Anpassungspotenziale in Mooren Bayerns
LAI:	Blattflächenindex (Leaf Area Index)
LD:	Lagerungsdichte
LfL:	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfU:	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LMU:	Ludwig-Maximilians-Universität
LOS:	Line-of-Sight (Blickrichtung des Radarsensors)
LWF:	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
N <sub>2</sub> O:	Lachgas
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
MBK25:	Moorbodenkarte 1:25.000

MintPy:	Miami INsar Time-series software in Python
MODIS:	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (Messinstrument auf NASA-Satelliten)
ML:	Machine Learning
N:	Niederschlag
NIR:	Nahes Infrarot
OLI:	Operational Land Imager
PEP:	Peatland Emission Predictor
PS:	Persistent-Scatterer
PSC:	Peatland Science Center in Weihenstepan
PV:	Photovoltaik
QGIS:	Open-source Geographisches Informationssystem
RADOLAN:	Wetterradardaten des Deutschen Wetterdienstes
RCP:	Representative Concentration Pathway
RD:	Wurzeltiefe (Rootdepth)
R <sub>eco</sub> :	Ökosystematmung
RMSD:	Root-Mean-Square Deviation
SBAS:	Small Baseline Interferometrie
SDCLIREF:	Meteorologischer Referenzdatensatz der LMU 1981-2014
StMELF	Bayerisches Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
StMUV:	Bayerisches Staatministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
SR:	Surface Reflectance
TDR:	Time-Domain Reflectometry (Zeitbereichsreflektometrie)
THG:	Treibhausgas
TI:	Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig
TN:	Tatsächliche Nutzung, Bestandteil von ALKIS® und beschreibt die Nutzung der Erdoberfläche in vier Hauptgruppen
TUM:	Technische Universität München
WDF:	Weidfilz
WISKI:	Wasserwirtschaftliches Informationssystem für Hydrologie und Meteorologie
ZUK:	Zentrum für Umwelt und Kultur

# 1 KURZZUSAMMENFASSUNG

Das Verbundvorhaben KliMoBay hat mit einem interdisziplinären Konsortium aus vier einzelnen Projekten bayernweite Fachgrundlagen zur Unterstützung des Masterplans Moore geschaffen, die in ihrer Qualität und Konsistenz mindestens deutschlandweit einzigartig sind. Dadurch wird eine ausgezeichnete Wissensgrundlage für transparente Kommunikation und Entscheidungsfindung geschaffen. Die Daten zeigen, wo Moorbodenschutz besonders einfach umgesetzt werden kann und welche Restriktionen zu beachten sind. Gleichzeitig können die Klima- und Moorschutzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel präzise und transparent quantifiziert werden.

Folgende konkrete Fachgrundlagen wurden erstellt:

- Bayernweite Moorwasserstandskarten auf Jahres- und Monatsbasis 2020 (TUM)
- Erweiterung des bisher genutzten PEP-Modells (Peatland Emission Predictor) für die Bestimmung der THG-Emissionen aus rein bayerischen Daten für alle Landnutzungstypen und wiedervernässte Flächen (HSWT)
- Klimaprojektionen mit Extremereignissen (ausgewählte ClimEx Szenarien, LMU) und ihre Wirkung auf Moorwasserstände und Treibhausgasemissionen aus Moorböden bis 2050 (LMU, TUM, HSWT)
- Nutzungsintensität im Grünland – Schnittzeitpunkte, Schnitthäufigkeiten (LMU)
- Bodeninformationen: typische chemische und physikalische Eigenschaften (LfL)
- Torfsackungsraten (LfL, LMU).
- Einteilung der Moorböden in hydrologisch adressierbare Bereiche (LfL)
- Indikatoren und ein Szenario der sozioökonomischen Restriktionen für den Moorschutz in den hydrologisch adressierbaren Bereichen (LfL)
- Karte der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Moornutzung (LfL, TUM)

Zentrale Ergebnisse:

- Die THG-Emissionen aus bayerischen Moorböden liegen mit 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (5,7-7,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>, Spanne ergibt sich aus Standardabweichung der Wasserstandskarte) höher als bisher geschätzt.
- Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstände in Moorböden und die THG-Emissionen aus Moorböden sind bis 2050 durch Dürre spürbar, aber übers Gesamtjahr verteilt gering.
- Durch fortschreitende Torfsackung ist die Landwirtschaft auf Moorböden endlich. 25% der landwirtschaftliche Nutzflächen (v.a. Ackerbau) auf Moorböden erreichen innerhalb von 15 Jahren die Grenze der Bewirtschaftbarkeit, insgesamt 38% innerhalb von 30 Jahren.
- 100.000 Hektar Moorböden haben günstige sozioökonomische Ausgangsbedingungen für den Klima- und Moorbodenschutz. Bei 90.000 Hektar gibt es möglicherweise mindestens eine größere sozioökonomische Hürde.
- In einem optimierten Landnutzungsszenario unter Berücksichtigung von sozioökonomischen Restriktionen und Biodiversität können die THG-Emissionen aus den bayerischen Mooren um knapp 80% auf 1,53 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> reduziert werden.
- Die entwickelten Methoden und Ergebnisse sind geeignet, die Erfolge beim Klima- und Moorbodenschutz auf der Ebene von Bayern zu quantifizieren. Dazu sollten die erzeugten Datengrundlagen und Ergebnisse von den zuständigen Behörden übernommen und weitergeführt werden.

## 2 ZUSAMMENFASSUNG

Moore sind die einzigen terrestrischen Ökosysteme, die dauerhaft und effizient Kohlenstoff speichern. Diese natürliche Speicherfunktion ist den deutschen Mooren durch Entwässerung und Bewirtschaftung weitestgehend verloren gegangen. In Bayern gelten nur noch knappe 5% der Moore als naturnah. Sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene rückt die Bewahrung und Wiederherstellung der natürlichen Kohlenstoffsенke Moor als „Klimaschützer“ zunehmend in den politischen Fokus. Politische Ziele wie die Einsparung von 5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> Mooremissionen auf Bundesebene bis 2030 (Bundesmoorschutzstrategie 2022) oder die Umwandlung von 20.000 ha entwässerter Moorfläche in moorbodenschonende Bewirtschaftungsformen im Rahmen des bayerischen Moorbauernprogramms bis 2030 sind klar benannt. Für diese Ziele liefern die Ergebnisse des KliMoBay-Vorhabens wichtige Grundlagen. Die im Vorhaben entwickelten Strategien und Produkte und die veröffentlichten Klimaschutz- und Anpassungspotenzialkarten bilden die Basis für die Identifikation von Handlungsspielräumen, für Flächen-Priorisierungen, Monitoring und Erfolgskontrolle.

Zur Erreichung dieser Ziele wurden im KliMoBay-Verbundvorhaben von März 2019 bis zum Dezember 2022 verschiedenste Aspekte der bayerischen Moore, wie die Wasserstände, Moorsackung, Treibhausgase (THG) oder sozioökonomische Restriktionen interdisziplinär untersucht. Die vier beteiligten Partner, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), Technische Universität München (TUM), Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und die bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), hatten jeweils einen unterschiedlichen Fokus und haben als Gesamtheit die Produkte des Vorhabens entwickelt.

In den Modulen der LMU wurden verschiedene Methoden der Satellitenfernerkundung eingesetzt um topographische Deformationen, Verdunstungsmuster und Nutzungsintensitäten von Moorflächen abzuleiten; Erkenntnisse zu diesen Variablen können der flächenhaften Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von hydrologischen Modellen sowie von Modellen zur Erfassung von THG-Emissionen aus Moorkörpern dienen. Unter Verwendung eines hochauflösenden Referenzdatensatzes und eines großen Ensembles eines regionalen Klimamodells wurden meteorologische Antriebsdaten für die Modellanwendungen der anderen Verbundpartner bereitgestellt; dadurch können langfristige Entwicklungen der Hydrologie und der THG-Emissionen in Mooregebieten berechnet und projiziert werden.

Die LMU war verantwortlich für die Bereitstellung von flächendifferenzierten Informationen zur Unterstützung der Modellrechnungen in den anderen Projekten unter Zuhilfenahme verschiedener Methoden der Satellitenfernerkundung und der Aufbereitung von Klimamodelldaten.

Zur Detektion der Oberflächenbewegung von Mooren wurden unterschiedliche interferometrische Verfahren auf Mikrowellenfernerkundungsdaten (Sentinel-1) angewandt. Die Persistent-Scatterer- (PS) und Distributed-Scatterer-Interferometrie (DS) lieferten Ergebnisse auf naturnahen, waldlosen Mooren und erlaubten die Ermittlung von saisonalen Hebungs- und Sackungsprozessen, die besonders deutlich im Trockenjahr 2018 zu sehen sind. Des Weiteren werden durch die PS/DS-Methode räumliche Muster der Bodenbewegung sichtbar, welche am Beispiel des Schechenfilz klare Zusammenhänge mit Wiedervernässungsbemühungen aufzeigten.

Auf landwirtschaftlich genutzten Mooren wurde zudem die „Small Baseline Methode“ (SBAS) mit zwei unterschiedlichen Prozessierungstools getestet, um trotz erhöhter Vegetationsdynamik und Bewirtschaftung eine Aussage zur Bodenbewegung treffen zu können. Erste Ergebnisse konnten mit diesem Verfahren erstellt werden, allerdings besteht



noch erheblicher Forschungsbedarf, um die Güte der Ergebnisse bewerten zu können. Auf bewaldeten Mooren kann durch den hohen Vegetationseinfluss auch mit der SBAS-Technik keine Bodenbewegung erkannt werden.

Mit Hilfe zweier Verfahren wurden räumliche Verdunstungsmuster aus optischen Landsat-Satellitenbildern über dem Schechenfilz abgeleitet, die der hydrogeologischen Modellierungen der TUM als Validierungsgrundlage dienen sollten. Das räumliche Bild der Verdunstung ist bei der „Triangle Method“ auf Grund des Einbeziehens eines Vegetationsparameters differenzierter. Allerdings limitieren die Anforderungen an weitere Eingangsdaten die flächendeckende Ableitung für alle Moore Bayerns. Das einfache DATTUTTDUT Modell produziert vergleichbare Ergebnisse und könnte aufgrund der geringen Anforderungen flächendeckend eingesetzt werden.

Die Intensität landwirtschaftlicher Nutzung von Grünlandflächen über Moorkörpern steht in direktem Zusammenhang mit den zu erwartenden Emissionen von Treibhausgasen auf eben diesen Flächen. Schnitthäufigkeiten und parzellengenaue Termine des ersten Schnittes sind daher von großem Interesse. Die Satellitenfernerkundung ist dazu im Stande, über Beobachtungen des zeitlichen Verlaufs von Reflexionseigenschaften und auch strukturellen Veränderungen auf der Landoberfläche eben diese Mahdereignisse zu detektieren. Genauer wird dazu eine dichte Zeitreihe des Enhanced Vegetation Index (EVI) aus optischen Satellitendaten (Landsat 8/9 und Sentinel-2) und der interferometrischen Kohärenz aus der Mikrowellenfernerkundung (Sentinel-1) verwendet. Über den Verlauf der aufgezeichneten Vegetationseigenschaften im Jahresgang kann eine Erkennung von konkreten Schnittterminen geschehen.

Die LMU lieferte zudem speziell für die Anforderungen der Verbundpartner aufbereitete Klimadaten, die aus dem Projekt ClimEx bereits zur Verfügung standen. Dabei wurden die Klimavariablen Niederschlag, Temperatur, relative Feuchte, Strahlung und Wind für den historischen Zeitraum 1981-2014 als auch zehn Zukunftsszenarien für den repräsentativen Konzentrationspfad (representative concentration pathway, RCP) 8.5, das Szenario mit den höchsten Treibhausgasemissionen, von 1950-2099 bereitgestellt. Die Daten deuten auf eine starke Erhöhung der Jahresmitteltemperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts hin (ca. +4°C). Bei den Gebietsniederschlägen ändert sich die saisonale Verteilung erheblich; dabei ist mit deutlich erkennbaren Zunahmen der Winterniederschläge und Reduktion der Sommerniederschläge zu rechnen. Letztere Entwicklung zeigt sich auch in der Verstärkung und Verlängerung sommerlicher Dürreereignisse, die für die Hydrologie in Mooregebieten besonders relevant sind.

Letztendliches Ziel des Projekts der TUM war eine bayernweite Karte saisonaler Moorwasserstände, da die THG-Emissionen von Moorstandorten maßgeblich vom Wasserstand abhängen. Als Grundlage für die dafür notwendige Regionalisierung von Wasserständen umfasste das Projekt die Messung und prozessbasierte Modellierung von Moorwasserständen in ausgewählten Testgebieten.

Als Ergebnis des moorhydrologischen Monitorings liegt neben Klimadaten für die Teststandorte nunmehr eine Datenbank auf Basis des Wasserwirtschaftlichen Informationssystem für Hydrologie und Meteorologie (WISKI) mit dem bislang umfassendstem Bestand an Moorwasserständen in Bayern vor. Diese ist von größtem Wert für zukünftige Moorschutzaktivitäten und sollte daher unbedingt gepflegt und fortgeschrieben werden. Eine zentrale Verwaltung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) in Augsburg wird als sinnvoll erachtet. Die für die Testgebiete aufgebauten Prozessmodelle auf Basis der Software

MIKE SHE können zukünftig für Szenarienuntersuchungen und Wassermanagement an diesen Standorten genutzt werden.

Der wesentlichste Output von Projekt Hydrologie sind bayernweite Wasserstandskarten für den Ist-Zustand (Jahr 2020) und für prognostizierte Zustände in den Jahren 2030, 2040 und 2050. Wichtigste Innovation gegenüber der bereits vorliegenden deutschlandweiten Karte des Thünen-Instituts (Bechtold et al., 2014) ist deren Dynamisierung, also die Abbildung der innerjährlichen Variabilität auf Basis von Monatsmitteln. Da die THG-Emissionen vom Wasserstand abhängen, sind die Karten der Jahresmittelwasserstände außerdem wichtige Grundlagen für die Klimabilanzierung.

Die LfL beherbergt mit dem bayerischen Moorarchiv einen einzigartigen Datenschatz zur historischen Verbreitung von Moorböden und zu Moorbodeninformationen. Die Daten sind komplementär zu den am LfU vorhandenen Bodendaten.

Zunächst wurden die am einfachsten zugänglichen Moorkarten gescannt und georeferenziert, so dass die historische Moorverbreitung in Kartenviewern anzusehen ist. Zu Projektende werden die digitalen Karten ans LfU übergeben.

Am Beispiel von sechs Modellgebieten wurden Informationen zu Torfmächtigkeiten, physikalischen und chemischen Eigenschaften und zur Degradation durch Entwässerung aus dem Moorarchiv extrahiert. Die Daten können als Standardwerte für hydrologische Modelle genutzt werden. Die Modellgebiete repräsentieren die wesentlichen hydrogeologischen Bedingungen der bayerischen Moore. In Nachbeprobungen historischer Transekte wurde versucht, den Torfschwund zu quantifizieren und die Prozesse der Torfsackung zwischen Verdichtung und Mineralisation zu trennen. Dies gestaltete sich als enorm schwierig und unsicher. In allen entwässerten Mooren war aber ein deutlicher Torfverlust nachweisbar.

Es wurde versucht, eine bayernweite Karte der Moormächtigkeiten mit Daten des LfU und der Bodenschätzung zu erstellen. Die Datenlage gestaltete sich überraschend ungenau, insbesondere im Unterboden. Aktuell sind nur Moormächtigkeiten bis 40 cm unterscheidbar. Für Moormächtigkeiten > 40 cm gibt es keine ausreichend verfügbaren Flächendaten. Ebenso gibt es kaum nutzbare Flächendaten zum Unterliegenden und insbesondere zu dessen Stauwirkung. Diese Informationen sind für jede Maßnahmenplanung aber unbedingt erforderlich und können außerdem helfen, den Moorbodenschutz zu priorisieren. Das Moorarchiv enthält zahlreiche Bohrprofiltransekte („Mutterpausen“) und weitere Informationen zu Moormächtigkeiten und Stauhorizonten in den Handakten. Sie sollten prioritär digitalisiert werden, um diese Informationslücke zu schließen. Zunächst sollten die Informationen digital lesbar gemacht werden. Die digitale Aufbereitung zur direkten Nutzung in Geoinformationssystemen erfordert enorm aufwändige Handarbeit, sollte aber ebenfalls angegangen werden.

Flächendaten zur Torfsackung über einen Zehnjahreszeitraum wurden sehr erfolgreich aus DGM-Vergleichen für ganz Bayern hergeleitet. Diese Daten wurden zusammen mit der Wasserstandskarte (TUM) und - soweit möglich - den Moormächtigkeiten genutzt um abzuschätzen, wie lange die derzeitige landwirtschaftliche Nutzung noch weitergeführt werden kann. Ein Ende der Nutzung ist erreicht, wenn die Fläche zu nah ans Grundwasser gesackt ist oder der Torf bis zu einem ungünstigen Unterliegenden aufgezehrt ist („Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung“). Insgesamt stößt nach diesen Berechnungen ein Viertel der landwirtschaftlichen Moorfläche, darunter ein Drittel der Ackernutzung, in den nächsten 15 Jahren an hydrologische oder pedologische Grenzen. Der Anpassungsbedarf der landwirtschaftlichen Nutzung aufgrund der fortschreitenden Moordegradation ist erheblich.

In Eigenleistung wurden mögliche Handlungsräume für den Klima- und Moorbodenschutz bestimmt und mögliche sozioökonomische Hürden berechnet. Handlungsräume sollten hydrologisch abgrenzbar sein. Daher wurden die Moorkörper entlang von Gräben und Straßen in hydrologisch adressierbare Einheiten unterteilt. Es ergaben sich 21.322 hydrologisch adressierbare Einheiten mit Flächen zwischen weniger als einem und 1.428 Hektar bei einer medianen Größe von 2 ha. Für diese Einheiten wurde eine Vielzahl sozioökonomischer Indikatoren berechnet, die mögliche Restriktionen für die Wiedervernässung zeigen. Ein beispielhaftes Szenario der sozioökonomischen Restriktionen wurde aus vier Indikatoren berechnet: Zahl privater Eigentümer, staatlicher Flächenbesitz, Ackerflächenanteil, Anteil an Wohn- und Siedlungsflächen. Auf 90.000 Hektar zeigte mindestens einer der vier Indikatoren überdurchschnittlich starke Restriktionen. Darin sind aber auch 46.000 Hektar Ackerflächen enthalten, deren Nutzung z.T. endlich ist. Insgesamt könnten die Flächen mit größeren Restriktionen also überschätzt sein. Das Szenario floss in die Landnutzungsszenarien der Klimaschutzpotenziale (HSWT) ein.

Das Peatland Science Center (PSC) der HSWT kann auf über 20 Jahre Treibhausgasdaten (THG)-Daten zu den bayerischen Mooren zurückgreifen. Basierend auf den Ergebnissen von 75 Untersuchungsstandorten mit unterschiedlichen Landnutzungsformen aus sieben verschiedenen bayerischen Mooregebieten wurden wasserstandsabhängige Regressionsgleichungen abgeleitet, über die sich die THGs Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>) modellieren lassen. Das THG Lachgas (N<sub>2</sub>O) konnte auf Grund seiner großen Dynamik nicht modelliert werden und wurde als Mittelwert der THG-Bilanz hinzugefügt. Da es im Projektzeitraum nicht möglich war, flächendeckende unabhängige Informationen über Kohlenstoff-Input und Export durch Düngung und Ernte zu generieren, wurde CO<sub>2</sub> als Bilanz aus CO<sub>2</sub>+Cinput–Cexport der Messflächen modelliert. Über die von der TUM entwickelte Wasserstandskarte konnten so die THG dynamisch in die Fläche modelliert werden. Dadurch ließen sich erstmals Potenziale berechnen und lokalisieren und zudem die Entwicklung der THG-Emissionen in die Zukunft projizieren. Einschränkend muss gesagt werden, dass für Ackerstandorte kein wasserstandsabhängiges Modell gefunden werden konnte. Zudem konnte die THG-Bilanz naturnaher Moore nicht wasserstandsbasiert in die Fläche modelliert werden, da die Wasserstandskarte der TUM die Flurabstände naturnaher Moore systematisch überschätzt. Daher mussten für Ackerstandorte und naturnahe Moore regionale Emissionsfaktoren (EF) angewendet werden, die nach dem bisherigen Verfahren des Ansatzes EF\*Fläche extrapoliert wurden.

Trotzdem konnte auf dieser Basis die bisherige Tier 2 Mooremissionskarte großteils auf Tier 3 gehoben werden. Für das Jahr 2020 wurde so eine THG-Bilanz von 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (5,7-7,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>) errechnet. Sie liegt damit etwas höher als die bisherige Berechnung von 4,9-5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (Drösler und Kraut 2020).

Ein signifikanter Einfluss der Wasserstandsänderungen durch den Klimawandel konnte auf Basis der genutzten regionalen Klimawandel-Prognosen bis 2040 nicht erkannt werden und wird daher nicht als einschränkend für die Moorbodewiedervernässung bewertet. Die Wasserstände sind oft schon so tief, dass eine weitere Absenkung keinen weiteren Effekt auf die THG-Emissionen mehr hat.

Im Projekt wurden verschiedene Nutzungsszenarien und deren Einsparpotenziale in Klimaschutzpotenzialkarten dargestellt. Es wurden vier verschiedene Szenarien entwickelt. Das größte Einsparpotenzial birgt die umfangreiche Wiedervernässung aller land- und forstwirtschaftlichen Flächen mit einem optimal eingestellten Wasserstand von -10 cm. So würden sich die THG auf 0,94 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> beschränken lassen und knappe 86 % der

Mooremissionen ließen sich einsparen. Dieses Potenzial ist aber aus sozioökonomischer Sicht nicht realistisch. Unter Einbezug dieser Einschränkung lassen sich immer noch gut 50 % der Emissionen vermeiden. In diesem Szenario würden Flächen, die aus sozioökonomischer Sicht ungünstig zu vernässen sind, in ihrer bisherigen Nutzungskategorie der mittlere Jahreswasserstand auf dem Niveau von 2020 verbleiben. Ein Teil dieser Flächen wird aufgrund des hohen Ackeranteils im umliegenden Gebiet als nicht für Wiedervernässung geeignet angesehen. Wenn diese ca. 30.000 ha Ackerflächen, unter Berücksichtigung des Natur- und Artenschutzes, in Paludikulturen überführt würden, könnte das Einsparpotenzial wieder erhöht werden und die Emissionen würden sich auf 2,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> reduzieren. Als sehr effektiv erweist sich das Potenzial, das sich aus der Anpassung bzw. Optimierung der Landnutzung ergibt. Hierbei bleibt die extensive bzw. intensive Grünlandnutzung erhalten, der Wasserstand wird aber konsequent auf 20 cm unter Flur angehoben. Auch der Forst bleibt in seiner Nutzungsform erhalten, aber es wird ein Wasserstand von -10 cm eingestellt. Dadurch können sich trotz Fortführung der Landnutzung die Treibhausgase deutlich reduzieren lassen. Das größte Potenzial liegt aber in der Umwandlung von Acker- in Paludikulturflächen, wodurch sich eine deutliche Einsparung erzielen lässt. Dies setzt allerdings die Wirtschaftlichkeit der Flächen durch etablierte Erzeugnisse und Wertschöpfungsketten voraus. Mit einem solchen durch Landnutzungsanpassung optimierten Szenario ließen sich bis zum Jahr 2040 77% der Mooremissionen einsparen. Mit verbleibenden Restemissionen von 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> ließe sich so ein ähnliches Niveau wie durch Wiedervernässung erreichen und es könnte dennoch eine produktive Landnutzung fortgesetzt werden. Eine weitere THG-Reduktion könnte durch die Umwandlung von Grünland in Paludikultur erreicht werden. Die weitere Schärfung der Szenarien mit zeitlichen Umsetzungsschritten bedarf einer regionalen (Landkreis oder Moorregion) Betrachtung, die die Maßstabebene des KliMoBay-Vorhabens übersteigt.

Die im KliMoBay Vorhaben entwickelten Methoden und Ergebnisse sind geeignet, die räumliche und zeitliche Schwerpunktsetzung für den Klima- und Moorbodenschutz auf eine fachliche Grundlage ganz neuer Qualität zu stellen und damit z.B. den Masterplan Moore zu unterstützen. Es können die internationalen Kriterien „Messbarkeit, Berichtbarkeit und Verifizierbarkeit“ der Maßnahmen erfüllt werden um mit einem Monitoring auf der Ebene von Bayern Erfolge quantifizieren zu können. Durch die detailliert gerechneten Szenarien werden aber auch Konsequenzen von Nicht-Handeln (s. Endlichkeitskarte) oder zu zögerlichem Handeln (s. Szenarien) aufgezeigt, um die politisch gesetzten Zielen zu unterstützen und die erforderliche steigende Ambition zu verdeutlichen.

Die erzeugten Datengrundlagen und Ergebnisse dienen zuständigen Behörden und Akteuren im Moorschutz auf allen Ebenen als Basis und sind fortschreibungstauglich. Für die Ableitung von Umsetzungsmaßnahmen auf Projektmaßstab bieten die Ergebnisse für die Priorisierung von Gebieten und die Identifikation von Handlungsmöglichkeiten eine sehr wesentliche Grundlage. Die konkreten Maßnahmen können dann auf Moorgebiets- oder Einzelflächenebene unter Einbeziehung weiterer Grundlagen (organisatorisch, eigentums- und wasserrechtlicher Art) daraus entwickelt werden.

### 3 EINFÜHRUNG

Natürliche Moore sind wahre Multitalente, sie sind Rückzugsraum und Hort seltener Arten, haben eine ausgleichende Wirkung auf den Landschaftswasserhaushalt und das Regionalklima, sind Retentionsräume und zudem aktive Klimaschützer. „Moore“ stehen für die Gesamtheit der ~226.000 ha organischer Böden in Bayern, inklusive den Anmooren und Moorfolgeböden. Die bayerischen Moore sind zu 95 % entwässert und stehen unter land- und forstwirtschaftlicher Nutzung. Dadurch gehen die meisten ihrer Ökosystemleistungen verloren. Der Kohlenstoff, der seit der letzten Eiszeit in den teilweise mehrere Meter mächtigen Torfböden gespeichert wurde, wird in großen Mengen an die Atmosphäre freigegeben. Nach bisherigen Berechnungen auf Tier 2 Ebene (s. IPCC 2014) emittieren entwässerte Moore in Bayern gut 5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-Äqu.) pro Jahr (Drösler & Kraut 2020). Damit liegen die Emissionen der Moore in der Größenordnung von etwa 6 Prozent der Gesamtemissionen Bayerns aus der Nutzung fossiler Energieträger. Auch die Politik erkennt zunehmend die Bedeutung der Moore; so sind Moorrenaturierungen in Bayern ein wichtiger Baustein der Bayerischen Klimaschutzoffensive. Das Bayerische Klimaprogramm 2050 (KliP 2050) fordert zudem, die Treibhausgasemissionen aus Mooren drastisch zu reduzieren und Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Klimaanpassung auf Mooren umzusetzen. Dafür werden seit 2008 klimaschutzorientierte Moorrenaturierungen durchgeführt. Die Personalausstattung für dieses Programm wurde 2022 auf Projektstellenbasis ausgebaut. Eine großflächige Wiedervernässung gestaltet sich allerdings bis heute schwierig. Die verschiedenen Interessen von Naturschutz, Land- und Forstwirtschaft, Gewässerschutz und Klimaschutz sowie klein-strukturierte Besitz- und Pachtverhältnisse erschweren die Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen für den Moorbodenschutz erheblich. Bis heute fehlen bayernweite Entscheidungsgrundlagen, um effektiv und flächenpriorisiert handeln zu können. Diese Herausforderung greift das KliMoBay-Vorhaben auf und bietet basierend auf der Integration bayernweiter Messdaten, Fernerkundung, Modellierung und der Aufbereitung von Daten des bayerischen Moorarchivs eine Grundlage für die Priorisierung von Handlungsräumen und die regionale Vorplanung.

## 4 VORHABENSTRUKTUR UND AUFGABENSTELLUNG

Das KliMoBay-Vorhaben wurde im Verbund zwischen der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Peatland Science Center), der Technischen Universität München (Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau) und der Ludwig-Maximilians-Universität München (Department für Geographie) bearbeitet. Die vier einzelnen Projekte zu Klimarelevanz und Treibhausgasen, Hydrologie und Wasserstandskarten, Bodeninformation und Klimaanpassung sowie der Fernerkundung und Klimaprojektionen sind eng mit einander abgestimmt und verzahnt (Abbildung 1). Die Ergebnisse der einzelnen Projekte werden in den Projektionen und Szenarien zu den Wasserstandskarten, Emissionskarten sowie Klimaschutzpotenzial- und Anpassungskarten zusammengeführt.

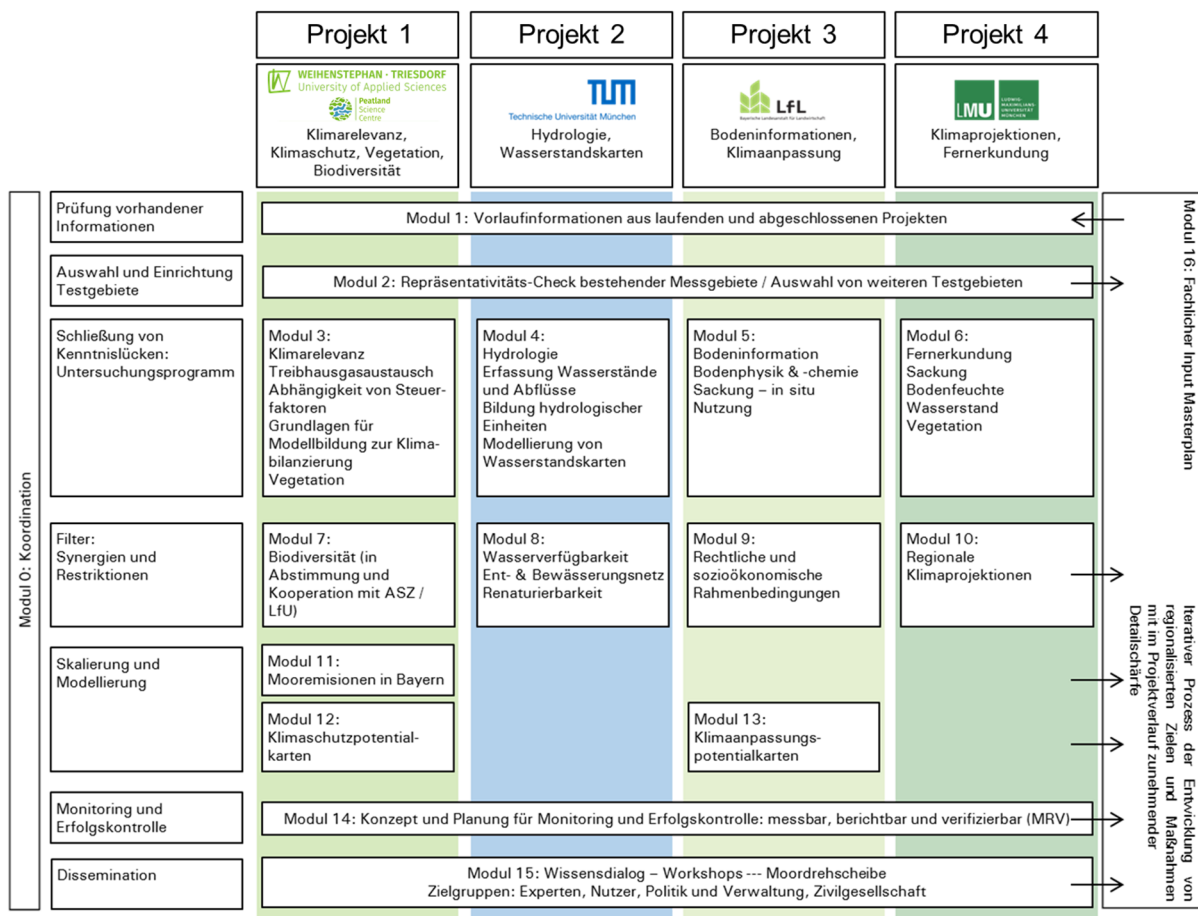


Abbildung 1: Projekt- und Modulstruktur des KliMoBay-Vorhabens

Im folgenden Bericht werden erst die Ergebnisse des Projekts 4 (Kapitel 5) behandelt, da die in diesem Projekt bereitgestellten Klimaprojektionen die Basis für die Zukunftsprojektionen der Wasserstandskarte und Treibhausgaskarte sind. Die Wasserstandskarte der TUM ist die Basis für die Karten der Projekte 1 und 3 und wird im Kapitel 6 vorgestellt. Darauf folgen im Kapitel 7 die Arbeiten der LfL zu Bodeninformationen und Klimaanpassungen und im Kapitel 8 die Ergebnisse zu Treibhausgasen, Klimarelevanz und Biodiversität.

## 5 FERNERKUNDUNG UND KLIMAPROJEKTIONEN (PROJEKT 4, LMU)

### 5.1 Einführung

Projekt 4 hat sich mit der Bereitstellung räumlich differenzierter Daten für die gesamte Fläche Bayerns, die wichtige Eingangsgrößen für die Modellierung von Treibhausgasen und Wasserständen darstellen, auseinandergesetzt. Diese unterstützen die Detektion von „Emissions-Hotspots“ und erlauben so eine Priorisierung von Flächen und die Entwicklung von relevanten Moorschutzmaßnahmen. In diesem Zusammenhang wurden mit Hilfe fernerkundlicher Methoden wichtige Steuerfaktoren der Treibhausgasemissionen erstmals flächenhaft für Bayern ermittelt und Methoden zum Monitoring von Moorflächen auf Basis von Satellitendaten getestet. Des Weiteren wurden bereits gerechnete Klimawandelszenarien und ein an der LMU entwickelter meteorologischer Referenzdatensatz, die ebenfalls für ganz Bayern zur Verfügung stehen, für die Anwendung in KliMoBay angepasst und analysiert. All diese Daten dienen der Modellierung in den anderen Teilprojekten sowohl als Antriebsdaten als auch zur Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung und leisten damit einen wichtigen Beitrag vor allem in Gebieten, in denen keine Feldmessungen zur Verfügung stehen.

### 5.2 Fragestellungen und Ziele

Ziel des Modul 6 (Fernerkundung) und Modul 10 (Regionale Klimaprojektionen) war die flächendeckende und einheitliche Bereitstellung von Informationen zu Steuerfaktoren, welche den Zustand der bayerischen Moore beeinflussen. Diese Größen sollten sowohl den Ist-Zustand repräsentieren als auch historische Änderungen aufzeigen. Für Klimavariablen stehen außerdem Projektionen für die Zukunft zur Verfügung, die zur Berechnung von zukünftigen Treibhausgasemissionen aus bayerischen Mooren verwendet werden können. Konkret liegen folgende Fragestellungen und Überlegungen der Ermittlung der einzelnen Steuerfaktoren zugrunde:

#### *Sackung*

Die Entwässerung von Mooren oder Austrocknung durch klimatische Schwankungen führt dazu, dass das organische Material im durchlüfteten Teil des Bodens oxidiert und große Mengen an Treibhausgasen freigesetzt werden, was auch die Sackung der Mooroberfläche bewirkt (Hoyt et al. 2020). Es sollte erfasst werden, ob Bewegungen der Mooroberfläche mit Hilfe der Fernerkundung flächendeckend detektiert werden können, ob dies sowohl bei bewirtschafteten als auch auf unbewirtschafteten Mooren gelingt und ob eine Quantifizierung der Hebung und Sackung über längere Zeiträume möglich ist. Ferner stellt die Ermittlung der vertikalen Oberflächenbewegung von Mooren eine Möglichkeit dar, die Freisetzung von Treibhausgasen indirekt zu quantifizieren.

#### *Verdunstung*

Die aktuelle Verdunstung ist eine nur mit großem Aufwand messbare Größe, die starken räumlichen Schwankungen unterliegt und daher mit Feldmessungen nur unzureichend erfasst werden kann. In Modul 6 wurden Modelle zur Ableitung räumlicher Verdunstungsmuster aus Satellitendaten verglichen und deren Übertragbarkeit auf andere Gebiete bewertet.

#### *Schnitttermindetektion*

Die Information zur Nutzungsintensität von Grünland über Moorkörpern erlaubt eine quantitative Modellierung von THG-Emissionen über diesen Flächen. Diese Information lässt sich aus Schnitthäufigkeiten und den -terminen ableiten. Mit Hilfe von Daten und Methoden aus der Multispektralfernerkundung sowie Radarfernerkundung wurde im Modul 6 versucht, diese Zeitpunkte abzuleiten. Feldspezifische Vegetationsindizes (z.B. Enhanced Vegetation Index, EVI) und Kohärenzzeitreihen lassen dabei Rückschlüsse auf Mahdereignisse zu. Das Ziel ist, die jährliche Schnitthäufigkeit und den Termin des ersten Schnittes zu detektieren; letzterer ist ein guter Indikator für die Nutzungsintensität des jeweiligen Feldes.

#### *Klimaprojektionen*

In Modul 10 wurden bereits vorhandene Klimadaten für die Bedürfnisse des Projekts aufbereitet und sowohl historische Daten als auch zukünftige Klimaprojektionen zur Verfügung gestellt.

### **5.3 Material und Methodik**

#### *Sackung*

Zur Detektion von Hebungs- und Senkungsprozessen der Mooroberflächen wurden im Projekt dreierlei interferometrische Verfahren auf Sentinel 1A und 1B Radarsatellitendaten des Copernicus Programms der Europäischen Kommission angewendet und verglichen. Dafür wurden Daten im Zeitraum September 2016 bis Dezember 2021 für den Ascending Path 117 und den Descending Path 168 heruntergeladen und prozessiert. Die von Ferretti et al. (2000, 2001) entwickelte Technik der Persistent-Scatterer-Interferometrie (PS) ist zur Ableitung der Bodenbewegung von versiegelten oder vegetationsfreien Flächen weit verbreitet und liefert hier Ergebnisse mit Genauigkeiten im Millimeterbereich. Bei dieser Methode werden zuerst Interferogramme, d.h. Bilder der Phasendifferenz, zwischen einer ausgewählten Satellitenaufnahme und allen anderen Aufnahmezeitpunkten, erstellt und im folgenden nur jene Pixel ausgewählt, deren Rückstreuereigenschaften sich über den Beobachtungszeitraum möglichst wenig ändern. Für diese Punkte mit hoher Kohärenz werden dann Bodenbewegungen berechnet. Im Rahmen von KliMoBay fand die Prozessierung mit Hilfe der SNAP Toolbox (ESA, o. J.) und StaMPS (Hooper et al. 2012) statt. Um die Daten von einer Software in die andere überführen zu können, wurden die Pythonskripte snap2stamps (Foumelis et al. 2018) verwendet. Die so prozessierten Daten wurden durch einen experimentellen Datensatz des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen erweitert, bei dem neben der PS-Interferometrie auch die neuere Technik der Distributed Scatterers (DS) (Ansari et al., 2018) auf dieselbe Datengrundlage angewendet wurde.

Als Alternative zur PS/DS-Technik, welche die Notwendigkeit stabiler Rückstreuer mit sich bringt, wurde die „Small Baseline Methode“ (SBAS) als drittes interferometrisches Verfahren im Projekt angewendet. Diese Technik basiert auf einer Kombination von Interferogrammen, die von Sentinel-1-Datenpaaren erzeugt werden, welche einen geringen orbitalen Abstand („small baseline“) aufweisen. Damit werden räumliche Dekorrelationsphänomene begrenzt. Über mathematische Verfahren ist daraufhin die Verknüpfung von unabhängigen Radaraufnahmen, welche zunächst einen hohen orbitalen Abstand aufweisen, möglich und eine zeitlich dichte Datenreihe kann somit erstellt werden (Berardino et al. 2002). Die SBAS-Prozessierung wurde zum einen auf lokalen Ressourcen mit der GMTSAR Software der University of California (Sandwell et al., 2011a, Sandwell 2011b) durchgeführt, zum anderen bietet die Alaska Satellite Facility (ASF) Plattform seit kurzem die Möglichkeit SBAS auf ASF-



Servern zu prozessieren (ASF 2022), was ebenfalls genutzt wurde. Aufgrund des großen Rechenaufwands wurde bei der GMTSAR-Prozessierung die fünf Jahre lange Sentinel1-Zeitreihe in mehreren überlappenden Zeitabschnitten nur für die Ascending Szene im Path 117, die das Alpenvorland abdeckt, mit dieser Software prozessiert. Auch räumlich wurde die Prozessierung in einen westlichen Teil von Kempten bis ca. Bad Tölz (subswath 2) und einen östlichen Teil (subswath 3) von dort bis Traunstein aufgeteilt. Die sich daraus ergebenden Karten der Bodenbewegungsgeschwindigkeit für jeden Zeitabschnitt in mm/Jahr wurden gemittelt.

Bei der Prozessierung über ASF wurde dieselbe Szene (Path 117) für das Alpenvorland und zusätzlich ein Ausschnitt des Path 44, der den östlichen Teil Bayerns mit dem Bayerischen Wald abdeckt, prozessiert. Dieses Vorgehen verlangt eine Nachbearbeitung, die mit dem open-source Paket Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) und der darin enthaltenen Routine smallbaselineApp.py zur Zeitreihenanalyse durchgeführt wurde (Yunjun, Fattahi & Amelung 2019).

Da interferometrische Ergebnisse immer relativ zu einem stabilen und naheliegenden Referenzpunkt betrachtet werden müssen, wurden die Geschwindigkeiten der Hebung und Senkung der versiegelten Flächen in einem Radius von 1 km zu den Moorflächen extrahiert, in R Statistics mit dem Universal Kriging-Verfahren unter Verwendung der gstat (Gräler et al. 2016) und automap (Hiemstra et al. 2008) Pakete interpoliert und von den endgültigen GMTSAR und ASF Geschwindigkeitskarten abgezogen. Als positiver Nebeneffekt ist eine Atmosphärenkorrektur der Ergebnisse, die den Rechenaufwand nochmal erhöhen würde, hinfällig, da angenommen werden kann, dass die Atmosphäreigenschaften über einem Moor und der Referenzfläche in unmittelbarer Nachbarschaft vergleichbar sind.

Alle Bodenbewegungsergebnisse sind im Folgenden in Blickrichtung des Sensors (engl.: Line-of-Sight, LOS), der bei SAR-Satelliten seitlich auf die Erdoberfläche blickt, angegeben. Die Umrechnung in eine vertikale Bewegung ist mit Hilfe des genauen Einfallswinkels möglich, wurde zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht durchgeführt. Grob geschätzt ist die vertikale Komponente um ca. 25-30% größer als die LOS-Werte.

### *Verdunstung*

Zwei Verfahren zur Ableitung der aktuellen Evapotranspiration (AET) aus optischen Satellitendaten wurden über dem Schechenfilz getestet. Die sogenannte „Triangle Method“ nach Jiang & Islam (1999), ursprünglich für semi-aride Gebiete entwickelt, macht sich dabei die Beziehung zwischen dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), einem Vegetationsindex, welcher die Vitalität von Pflanzenbeständen charakterisiert, und der Landoberflächentemperatur (LST) zu nutze. Werden die Pixelwerte beider Variablen für eine Aufnahme in einem Streudiagramm aufgetragen, ergibt sich annähernd eine Dreiecksform. Die Grundannahme bei diesem Verfahren ist nun, dass Gebiete mit hohem Vegetationsanteil (NDVI nahe 1) bei geringen LST-Werten eine hohe AET aufweisen, da die Verdunstungskühle die Temperatur der Oberfläche reduziert (Jiang & Islam 1999). Ist der NDVI hingegen niedrig und die Temperatur hoch, limitiert die fehlende Vegetation die Verdunstung und die Landoberfläche erhitzt sich. Werte dazwischen werden nach einem verfahrensspezifischen Parameter skaliert, um die AET abzuleiten. Der NDVI wird aus den Wellenlängenbereichen des roten und nahen Infrarotlichts berechnet, in diesem Fall aus Landsat-8-Aufnahmen (path 193, row 27, Überflugszeit ~10.04 UTC). Die LST wurde unter Verwendung des Codes von Ermida et al. (2020) in der Google Earth Engine ebenfalls mit Landsat-Daten prozessiert. Ein Eddy Covariance Turm (EC-Turm) im Untersuchungsgebiet, betrieben vom Karlsruher Institut für Technologie in Garmisch-Partenkirchen (KIT/IMK-IFU) gemeinsam mit dem PSC, lieferte

weitere Eingabedaten für die Berechnung (z.B. Nettostrahlung, Bodenwärmestrom und Lufttemperatur), sowie LST-Werte zur Überprüfung der Fernerkundungsergebnisse.

Die zweite auf das Schechenfilz angewendete Methode ist das einfache DATTUTDUT Modell (Timmermans, Kustas & Andreu 2015, im folgenden DATT Modell abgekürzt), das lediglich LST-Daten verwendet, um daraus in QGIS mit dem QWaterModel Plugin (Ellsäßer et al. 2020) die AET abzuschätzen. Annahme für die Berechnung ist eine lineare Beziehung zwischen dem Verdunstungsanteil und bodennahen Extremtemperaturen aus Fernerkundungsdaten abgeleiteter LST-Daten. Das Modell kann gemessene Daten eines EC-Turms, wie z.B. die Nettostrahlung oder Lufttemperatur zusätzlich miteinbeziehen und dadurch erweitert werden.

### *Schnitttermindetektion*

Zur Ableitung von Schnittterminen auf Grünland werden zwei Bereiche der Satelliten-Fernerkundung herangezogen. Daten der aktiven Mikrowellenfernerkundung lassen Rückschlüsse über die Struktur der Landoberfläche zu. Multispektrale Satellitendaten geben die reflektierte und emittierte elektromagnetische Strahlung der Erdoberfläche zu einem Zeitpunkt wieder. Mittels Zeitreihenanalysen beider Aufnahmesysteme werden Änderungen in der Vegetation erkennbar. Die gewonnenen Informationen werden für einzelne Parzellen auf Basis vorliegender Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) je Aufnahme gemittelt, um störende Effekte an Feldgrenzen auszugleichen. Es wurden Agrarflächen der Klassen Grünland und Dauergrünland, welche über relevanten Flächen der MBK liegen, betrachtet. Mittels Batch-Prozess und einem Modell, welches mit dem „Zonal-Statistics-Tool“ und den Feldgrenzen räumliche Mittelwerte liefert, wurden in QGIS alle Satellitenbilder verarbeitet. Die dann je Zeitschritt anfallenden Shapefiles wurden in Python zusammengeführt.

Vegetationsindizes aus der Multispektral-Fernerkundung werden dazu verwendet, den physiologischen Zustand des Pflanzenbestandes zu beschreiben. Dafür werden oftmals Reflexionseigenschaften des Zellaufbaus der Vegetation ausgenutzt, um aus Aufnahmekanälen des sichtbaren Wellenlängenbereichs und des nahen Infrarots aussagekräftige Indizes zu berechnen. Genauer wurde in diesem Projekt auf den EVI zurückgegriffen, um etwaige zeitliche Variationen im Reflexionsspektrum herauszustellen. Der EVI setzt sich wie folgt zusammen (Huete 2002):

$$EVI = G \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)} \quad (1)$$

wobei NIR/red/blue jeweils für auf atmosphärische Einflüsse korrigierte Rückstreuwerte im nahen Infrarot (NIR) und im roten sowie blauen Bereich des sichtbaren Spektrums stehen. L wird als Anpassungsfaktor für den Vegetationshintergrund angegeben; C1 und C2 sind Faktoren, welche Einflüsse von Aerosolen ausgleichen; und G wird als Gain-Faktor beschrieben. Es werden die Werte aus dem MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) EVI-Algorithmus verwendet (L=1, C1 = 6, C2 = 7.5, G = 2.5, (Huete 2002). Sentinel-2 als auch Landsat-8/9 Aufnahmen dienen als Eingangsdaten. Diese liegen in Prozessierungsstufe Level 2 vor und beinhalten bereits eine Atmosphärenkorrektur. Dieses Verfahren verringert Fehlinterpretationen, da störende atmosphärische Einflüsse in den Bilddaten beseitigt werden. Im Falle der Sentineldaten wurde die Korrektur mit der Software sen2cor durchgeführt (Müller-Wilm 2016). Die Aufnahmen der Landsat-Satelliten sind genauer die Operational Land Imager (OLI) Collection 2 Surface Reflectance (SR) Daten. Diese korrigierten SR-Daten wurden mit dem Land Surface Reflectance Code (LaSRC, Version

1.5.0) unter Zuhilfenahme des eigenen Küsten-Aerosol-Bandes, MODIS-Daten und einem Strahlungstransfermodells berechnet (Vermote et al. 2016).

Multispektrale Aufnahmen der Erdoberfläche können nur ohne Wolkenbedeckung geschehen. Hier wurden mit erhöhtem Bearbeitungsaufwand 7798 Sentinel-2-Aufnahmen mit bis zu 80% Bewölkung, und 631 Landsat-8/9 Aufnahmen (ohne Einschränkung in der Bewölkung) heruntergeladen und mit Hilfe von mitgelieferten Wolkenmasken beschnitten. Dieses Vorgehen erlaubt im Gegenzug eine dichtere EVI-Zeitreihe auf Einzelfeld-Basis als bei generellem Ausschluss bewölkter Bilder.

Für die Berechnung der interferometrischen Kohärenz wurden, wie auch in der Detektion von Sackungsbewegungen, Sentinel-1-Daten verwendet. Diese wurden für diesen Schritt programmatisch über das „Graph-Processing-Tool“ (GPT) (Veci 2020) der SNAP Toolbox (ESA, o. J.) in der Linux Bash-Shell vorprozessiert und die Interferometrische Kohärenz für alle jeweils aufeinanderfolgenden Bildpaare berechnet. Die Kohärenzwerte an einem Zeitpunkt geben dann die Interferometrische Kohärenz zwischen dieser und der darauffolgenden Aufnahme nach sechs Tagen an.

Um nun aus den Zeitreihen Schnitttermine ableiten zu können, wurden verschiedene Annahmen getroffen. Es wird mit einer Abnahme eines Vegetationsindizes nach Entnahme der Biomasse gerechnet. Durch die geringere Vegetationsbedeckung nach einem Schnitt kann von einer erhöhten Kohärenz zwischen den auf den Schnittzeitpunkt folgenden Sentinel-1-Aufnahmen gerechnet werden. Zusammengefasst wird ein direkter Abfall der EVI-Werte und ein verzögerter Anstieg der Kohärenzwerte (COH) für ein Mahdereignis angenommen. Für eine durchgängige Zeitreihe wurden die Daten mit Hilfe des Savitzky-Golay-Filters interpoliert (Savitzky und Golay 1964; SG). Über folgende Formel wurde bestimmt, ob die Konditionen für ein Mahdereignis (S) vorliegen:

$$S(EVI', COH') = a \times -EVI'_{SG} + b \times COH'_{filt\_shift(-6)_{SG}} = \begin{cases} \text{Schnitt,} & \text{falls } S(EVI', COH') > S_G \\ \text{kein Schnitt,} & \text{falls } S(EVI', COH') \leq S_G \end{cases} \quad (2)$$

Dabei stellen a und b Skalierungsfaktoren dar, welche die Zeitreihen der ersten Ableitung der gefilterten und interpolierten EVI- und Kohärenzdaten gewichten. Die Annahme der ansteigenden Kohärenz nach einem Schnitt begründet den zeitlichen Versatz der COH-Zeitreihe um sechs Tage (*shift(-6)*). Des Weiteren wurden COH-Werte ausgeschlossen, bei welchen es laut den zeitlich hochaufgelösten RADOLAN Wetterradardaten des Deutschen Wetterdienstes (Bartels 2004, Winterrath et al. 2017) in den vorangegangenen 24 Stunden mehr als 0.1mm geregnet hat (*filt*). Eine Falschinterpretation der auf Mikrowellen-Fernerkundungsdaten basierenden Kohärenz-Zeitreihe, welche sensitiv auf Interzeptionsfeuchte reagiert, wurde damit verringert.

Mangels Kontrolldaten wurden die Skalierungsfaktoren a und b nach umfassender Prüfung der Zeitreihen und zugehörigen Schnitttermindetektionen auf a=10 und b=8 bei einem Detektionsgrenzwert  $S_G = 0.05$  festgesetzt.

### *Klimaprojektionen*

Die von der LMU bereitgestellten Klimavariablen entstammen dem Forschungsprojekt ClimEx ([www.climex-project.org](http://www.climex-project.org), finanziert durch das StMUV), in dem das globale Klimamodell CanESM2 (Canadian Earth System Model, version 2) mit dem regionalen CRCM5 (Canadian Regional Climate Model, version 5) dynamisch skaliert verknüpft wurde, um ein Large Ensemble mit 50 Realisationen (Members) zu erzeugen. Die einzelnen Realisationen wurden

für den Zeitraum 1950 bis 2099 gerechnet und repräsentieren alle das stärkste Emissionsszenario RCP8.5, dass die deutlichste globale Temperaturzunahme erwarten lässt. Die Realisationen unterscheiden sich aber jeweils durch leicht veränderte Initialbedingungen und die so entstehende Spannbreite spiegelt die natürliche Variabilität des Klimasystems wider (Leduc et al., 2019; von Trentini et al, 2020). Die für die hydrologische Modellierung relevanten Klimavariablen wurden ferner von ihren systematischen Abweichungen (Bias) mit Hilfe einer erweiterten Version des Quantile-Mapping-Daily-Translation nach Mpelasoka und Chiew (2009) bereinigt und durch statistisches Downscaling auf 500m x 500m skaliert, um raumzeitliche Heterogenitäten für den Antrieb hydrologischer Modellierung besser beschreiben zu können. Auf diese Weise sind die Daten auf den am Department für Geographie der LMU entwickelten meteorologischen Referenzdatensatz SDCLIREF, der ebenfalls zur Verfügung gestellt wird, geeicht. Diese Referenz basiert auf gemessenen Werten und ist für den Zeitraum 1981-2014 in 500m räumlicher und 3h zeitlicher Auflösung vorhanden. Bereitgestellt wurden folgende Klimavariablen in hoher zeitlicher Auflösung: Niederschlag, Temperatur, relative Feuchte, Strahlung und Windgeschwindigkeit.

## **5.4 Ergebnisse**

### **5.4.1 Fernerkundung: Sackung, Bodenfeuchte, Wasserstand und Vegetation**

#### **5.4.1.1 Sackung**

Mit Hilfe der PS-Interferometrie können kohärente Punkte über versiegelten Flächen und auf naturnahen Mooren ausgemacht werden, nicht aber auf bewirtschafteten Flächen. Dies gilt sowohl für die Ergebnisse der StaMPS-Prozessierung als auch für die im Datensatz des DLR enthaltenen PS und DS, wobei es sich bei der Anwendung der DS über Mooren aktuell noch um ein experimentelles Verfahren handelt. Durch die Bewirtschaftung (Pflügen, Düngen, Mähen, Ernten, etc.) und das stärkere Vegetationswachstum über die Zeit verändert sich das Rückstreusignal und die Kohärenz von Punkten geht damit verloren. Des Weiteren konnte durch die Prozessierung unterschiedlich langer Zeitreihen mit StaMPS festgestellt werden, dass es zu einem Verlust an PS-Punkten auch auf naturnahen Mooren kommt, je länger der prozessierte Zeitraum ist. In diesem Fall erhält man nur noch vereinzelt Punkte in einem Moor, wodurch Informationen zur räumlich differenzierten Bodenbewegung verloren gehen. Die im DLR-Datensatz enthaltenen DS detektieren hingegen kohärente Punkte auch über längere Zeiträume in großer Zahl und flächendeckend. Im Unterschied zu den PS werden bei der DS-Methode stabile Rückstreuer durch Mitteln mehrerer homogener Pixel erzeugt (Ansari et al. 2018), was auch zur charakteristischen Verteilung in gleichmäßigem Abstand zueinander führt (siehe Abbildung 3). Wie bei der PS-Methode gilt das allerdings nur für unbewirtschaftete Flächen mit kurzer und „stabiler“ Vegetation, d.h. nur auf kaum bewaldeten, naturnahen Mooren. Die zeitlichen Verläufe der Bodenbewegung an vom DLR prozessierten PS- und DS-Punkten wie auch die von der LMU prozessierten Verläufe sind durchaus vergleichbar, sowohl über versiegelten Flächen als auch über den KliMoBay-Testgebieten.

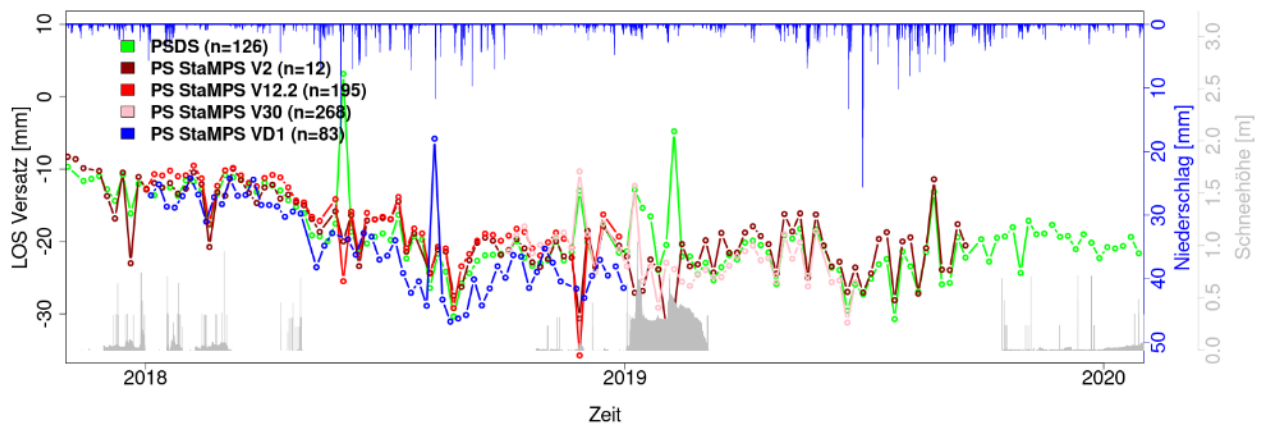


Abbildung 2: Bodenbewegung in Blickrichtung des Sensors (LOS) im Schechenfilz (Referenz: Schechen), Median über alle Punkte (n) im jeweiligen Datensatz. Vergleich mit RADOLAN Niederschlagsdaten und Schneehöhenmessungen in Mooseurach (Quelle: Peatland Science Center, HSWT).

In Abbildung 2 ist die Bodenbewegung in LOS-Richtung im Schechenfilz für mehrere StaMPS-Läufe und den PS/DS-Datensatz des DLRs dargestellt, wobei der Median aller beim jeweiligen Lauf in diesem Gebiet vorkommenden Punkte (Angabe  $n$  in Klammern) berechnet wurde. Es gilt zu beachten, dass es mit interferometrischen Verfahren lediglich möglich ist, relative Bewegungen zwischen zwei Gebieten zu ermitteln, weshalb die Bodenbewegungen immer im Vergleich zu einem nahe gelegenen, möglichst stabilen Referenzpunkt betrachtet werden müssen. Im Fall vom Schechenfilz erfüllt die Siedlung Schechen in unmittelbarer Nachbarschaft zum Moor diesen Zweck. Die unterschiedlichen Datensätze in Abbildung 2, basierend sowohl auf Ascending-Szenen (PS/DS, V2, V12.2, V30) als auch auf Descending-Szenen (VD1), bei denen das Radarsignal einen anderen Einfallswinkel hat, haben einen ähnlichen zeitlichen Verlauf. Der Vergleich mit Schneehöhenmessungen des Peatland Science Centers der HSWT in Mooseurach (ca. 10 km Luftlinie entfernt) zeigt, dass Zeiträume mit deutlichen Abweichungen zwischen den Datensätzen mit dem Vorhandensein einer Schneedecke zusammenfallen. Dies ist besonders im schneereichen Winter 2018/2019 der Fall. Hoher Wassergehalt am Boden in Form von Regen oder Schnee aber auch in der Atmosphäre beeinflusst die Laufzeit des Radarsignals und kann zu Fehlinterpretationen der Phasenänderung zwischen zwei Aufnahmen führen. Solche Unwrapping-Fehler führen dazu, dass die abgeleiteten Bodenbewegungen in solchen Zeiträumen nicht verlässlich sind. Nach Abgleich mit RADOLAN Wetterradardaten können auch einzelne Ausreißer in den Zeitreihen auf hydrometeorologische Ereignisse während des Satellitenüberflugs und eine damit verbundene fehlerhafte Berechnung zurückgeführt werden, allerdings lässt dies nicht den Umkehrschluss zu: Ein Niederschlagsereignis während der Aufnahme oder kurz davor führt nicht zwangsläufig zu einem sichtbaren Ausreißer in der Zeitreihe. Auch Änderungen in der Vegetation (Wachstum, Windeinflüsse etc.) können solche Fehler verursachen.

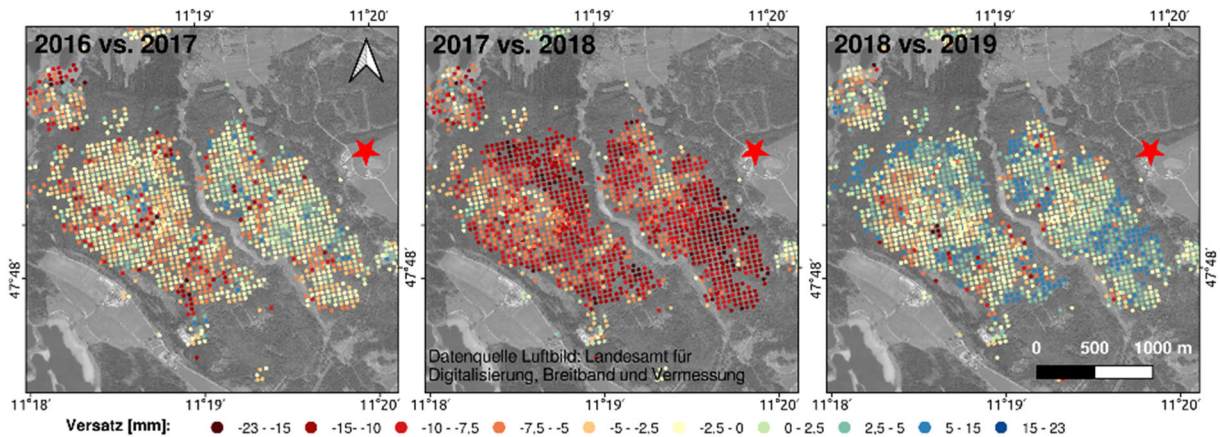


Abbildung 3: Veränderung der Mooroberfläche (Versatz in mm) im Herbst im Vergleich zum Herbst des Vorjahres im PS/DS-Datensatz im Seeshaupter Weidfilz (westlich des Baches) und Schechenfilz. Der rote Stern markiert die Referenzsiedlung Schechen.

Um robustere Ergebnisse für die Bewegung der Mooroberfläche von Jahr zu Jahr zu erhalten, wurde der LOS-Versatz der Herbstmonate September, Oktober, November gemittelt und im Vergleich zum Herbstmittel des Vorjahres gesetzt. Abbildung 3 zeigt diese Herbst-zu-Herbst-Differenz für alle im PS/DS-Datensatz enthaltenen Punkte über dem Schechenfilz und westlich davon gelegenen Seeshaupter Weidfilz für die Jahre 2016 - 2019. Es wird ein differenziertes Bild unterschiedlich starker und zum Teil entgegengesetzter Bodenbewegung sichtbar: Der Versatz der Mooroberfläche im Herbst 2017 im Vergleich zum Herbst 2016 weist sehr kleinräumige Unterschiede auf. In einigen Bereichen ist die Mooroberfläche im Mittel leicht bis mittelstark um  $<0$  bis  $-10$  mm gesackt, während im zentralen und nördlichen Teil des Schechenfilz eine leichte Hebung von  $>0$  bis  $5$  mm, vereinzelt auch bis  $15$  mm, detektiert wurde. Im Vergleich dazu ist die Bewegung 2018 zu 2017 im gesamten Gebiet fast ausschließlich negativ. Größere homogene Bereiche starker Sackung von  $-10$  bis  $-23$  mm treten zum Vorschein, wie beispielsweise in der südöstlichen Hälfte des Schechenfilz. Es wird davon ausgegangen, dass der starke Negativtrend durch die extrem trockenen Wetterbedingungen 2018 hervorgerufen wurde. 2019 ist der Versatz zwar größtenteils wieder positiv mit Werten von  $0$  bis  $2,5$  mm und bis  $+15$  mm in Gebieten, die im Vorjahr besonders stark gesackt waren. Dennoch kann der Verlust von 2018 von bis zu  $-23$  mm in weiten Teilen nicht revidiert werden.

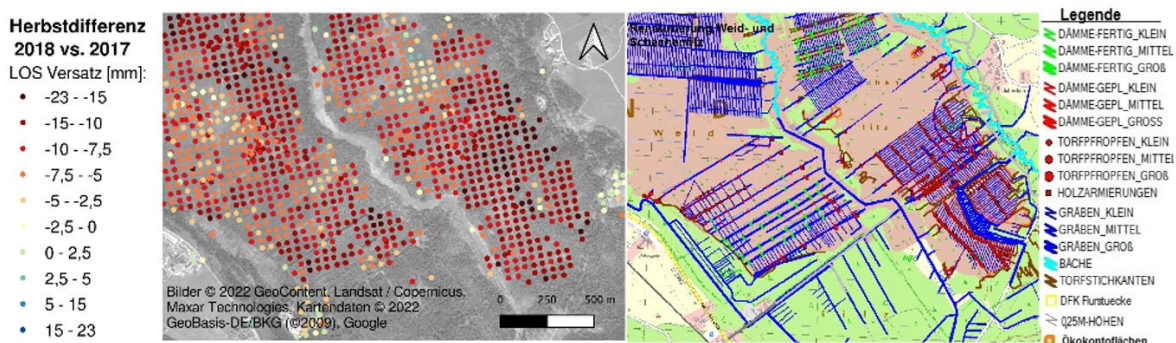


Abbildung 4: Links: Herbstdifferenz 2018 zu 2017 ds PS/DS-Datensatzes über Seeshaupter Weidfilz und Schechenfilz. Rechts: Lage der Drainagegräben und Wiedervernässungsmaßnahmen in diesem Gebiet (Quelle: Rücker 2016).

Die in Abbildung 3 sichtbaren Muster der Bodenbewegung 2018 und 2019 können mit der Ausdehnung vorhandener Drainagegräben in Verbindung gebracht werden. Dabei korrelieren die Bereiche stärkster Sackung im Herbst 2018 mit Gräben, die 2015 geschlossen wurden, wie der Vergleich zur Karte der Renaturierungsmaßnahmen von Rücker (2016) in Abbildung 4 zeigt. Hellgrüne Dämme und Pfropfen wurden bereits 2001 installiert, rote erst 2015 (Rücker 2016). Vor allem im Norden und an der südöstlichen Spitze des Weidfilz sowie in der südöstlichen Hälfte des Schechenfilz gibt es Übereinstimmungen. Die bereits 2001 renaturierten Bereiche im Norden des Schechenfilz und südlichen Teil des Weidfilz sacken hingegen 2018 weniger stark. Dieser Unterschied könnte durch die zeitliche Differenz der Wiedervernässungsbemühungen erklärt werden und Rückschlüsse auf deren Erfolg zulassen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die vorgestellten Daten lediglich hinsichtlich ihrer Plausibilität im Vergleich zueinander und zu anderen räumlichen Strukturen untersucht werden konnten. Da eine ausreichend lange Zeitreihe an in-situ gemessenen Bodenbewegungsdaten zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht vorlag, konnte keine Validierung der Ergebnisse durchgeführt werden.

Im Vergleich zu naturnahen Mooren weisen bewirtschaftete Moore eine ganz andere Vegetationsdynamik auf. Persistente Rücksteuer, wie sie in Form bestimmter Vegetationsformen in naturnahen Mooren auftreten, sind in Folge der Bewirtschaftung (z.B. Fruchtfolgen, Schnitttermine, Ernte) auf diesen Flächen kaum vorhanden. Um trotzdem Aussagen über die Bodenbewegung treffen zu können, wurde im Projekt zusätzlich die „Small Baseline Methode“ (SBAS) auf Mooren getestet. Bei der Verwendung der GMTSAR Software erhält man ein flächendeckendes Raster der Bodenbewegung, das lediglich Bereiche sehr geringer Kohärenz (der genaue Schwellenwert wird während der Prozessierung manuell gesetzt) wie beispielsweise Wälder ausschließt. Detailkarten der mit der MBK25 auf die Moore ausgeschnittenen GMTSAR-Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

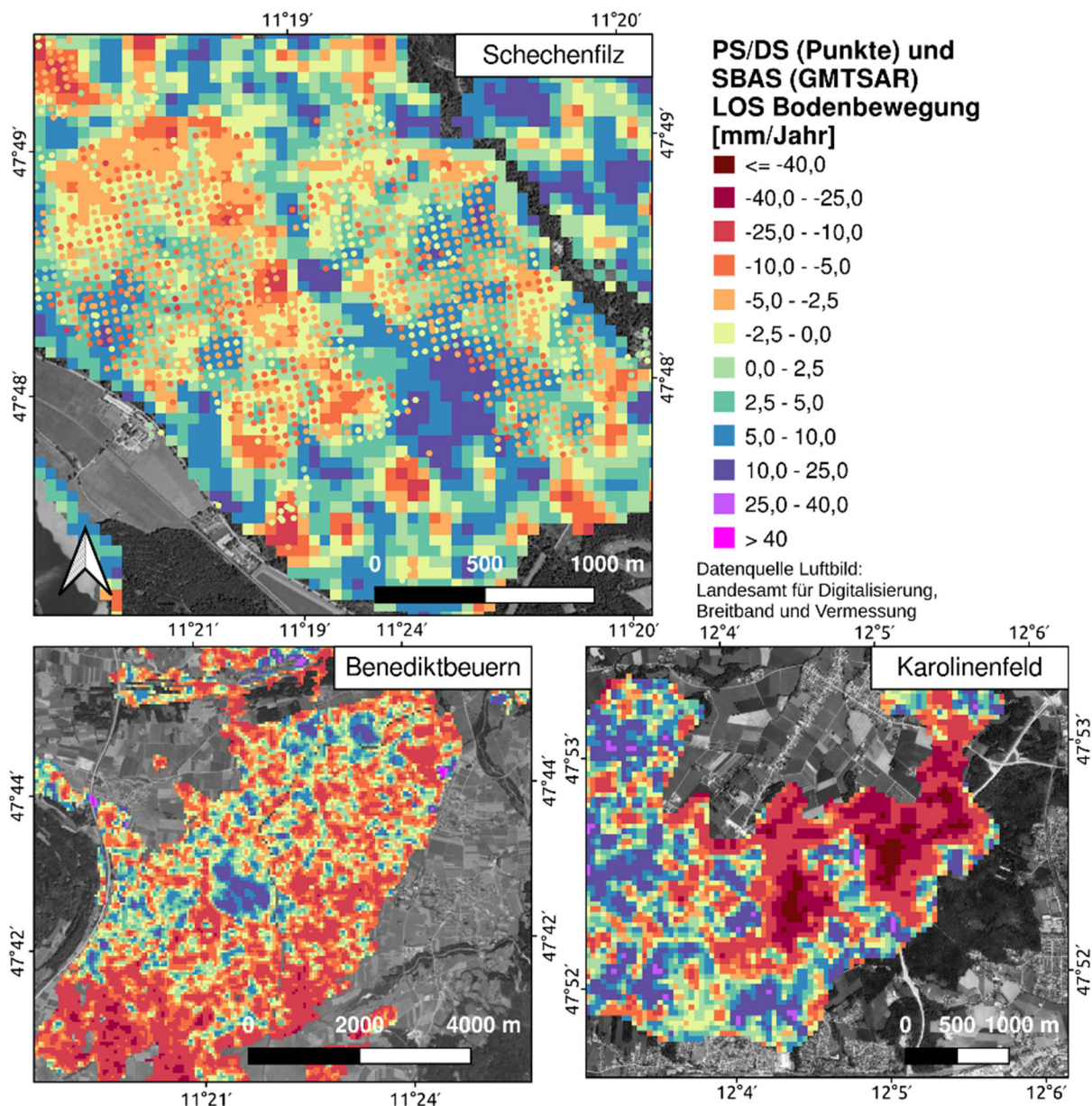


Abbildung 5: Mittlere LOS Bodenbewegung [mm/Jahr] im PS/DS-Datensatz (Punkte, Referenz: Schechen) und der darunterliegenden mit GMTSAR prozessierten SBAS-Karte für das Schechenfilz, den Großraum Benediktbeuern bis zum Kochelsee und das Gebiet um das Versuchsgut in Karolinenfeld.

In Abbildung 5 (oben) sind die mittleren LOS Bodenbewegungen in mm/Jahr gemäß dem PS/DS-Datensatz als Punkte und die GMTSAR-SBAS-Ergebnisse als Raster für das Schechenfilz in gleicher Skala übereinandergelegt. Das Mittel des PS/DS-Datensatz repräsentiert den Zeitraum November 2016 bis April 2020, bei den SBAS-Daten ergibt sich das Mittel aus einem leicht anderen Zeitraum September 2016 bis Oktober 2020. Wie in Kapitel 5.3 erwähnt, handelt es sich bei den SBAS-Ergebnissen um die relative Bewegung im Vergleich zu nahe gelegenen versiegelten Flächen, beim PS/DS-Datensatz bildet ebenfalls das nahegelegene Schechen die Referenz.

Die Übereinstimmungen zwischen diesen beiden Methoden sind eher gering. Während die PS/DS im langjährigen Mittel größtenteils negative Bewegungen detektieren, gibt es gemäß der SBAS-Karte doch einige Bereiche mit positiven Werten (bläulich bis violette Farbgebung), vor allem im zentralen Teil des Schechenfilz. In übereinstimmenden Bereichen sollten die PS/DS-Punkte kaum zu erkennen sein, da sie dann dieselbe Farbgebung und damit ähnliche Werte wie die SBAS-Ergebnisse aufweisen. Das ist nur im nördlichen Teil des Weidfilz der



Fall. Der Kartenausschnitt für Benediktbeuern, hier ist das Moor zwischen Penzberg im Norden und dem Kochelsee im Süden dargestellt, zeigt die SBAS-Ergebnisse für ein Gebiet sowohl mit bewirtschafteten als auch unbewirtschafteten Mooren. Dabei scheinen naturnahe Bereiche weniger stark zu sacken oder heben sich sogar wie beispielsweise das Gebiet um den Fichtsee (violetter Fleck in der Karte), während die deutlich roten und damit sackenden Bereiche im Südwesten und Südosten mit landwirtschaftlichen Flächen übereinstimmen. Das Gebiet um das LfL Versuchsgut in Großkarolinenfeld in der rechten unteren Karte in Abbildung 5 stellt einen Hotspot der Sackung in den GMTSAR-Ergebnissen dar. Hier werden Werte von über -40 mm/Jahr in LOS erreicht, d.h. in vertikaler Richtung ist die Sackung noch um 25-30% stärker. In unmittelbarer Umgebung scheint es auch Pixel mit entgegengesetzter Bewegung und Werten von +25 bis +40 mm zu geben. Allerdings liegen diese fast ausschließlich auf Waldflächen und sind daher nicht verlässlich, da das Unwrapping auf bewaldeten Flächen ein generelles Problem in der Interferometrie darstellt. Wie bereits bei den PS/DS-Daten, können aufgrund fehlender Validierungsdaten diese Werte nicht mit tatsächlichen Bodenbewegungen verglichen werden und daher ist keine Aussage bezüglich der Güte der GMTSAR-SBAS-Ergebnisse möglich.

Die sowohl zeitliche als auch räumliche Aufteilung der Prozessierung, die aufgrund des hohen Rechenaufwands mit GMTSAR notwendig war, erzeugt ferner in den Überlappungsbereichen unterschiedliche Ergebnisse. Bei den zwei getrennt prozessierten Raumausschnitten zeigen sich bei Mooren im Überlappungsbereich nicht nur unterschiedlich starke Trends der Bodenbewegung, sondern zum Teil auch unterschiedliche Muster. Dies kann mehrere Gründe haben: Beim letzten SBAS-Prozessierungsschritt wird ein einziger Einfallswinkel für die gesamte Szene angenommen, der sich im westlichen Szenenausschnitt ( $38^\circ$ ) deutlich vom östlichen Teil ( $42^\circ$ ) unterscheidet. Außerdem kommt es bei der Prozessierungskette in GMTSAR immer wieder zu Problemen bei einzelnen Interferogrammen, sodass die Anzahl und Auswahl an Interferogrammen nicht für beide Teile gleich ist. Ein weiterer Grund könnte auf den Einfluss des Referenzrasters zurückzuführen sein, welches von der SBAS-Bodenbewegungskarte abgezogen wurde. Da zum Rand der Szenenausschnitte hin weniger versiegelte Flächen zur Interpolation zur Verfügung stehen, ist die Unsicherheit des Kriging-Ergebnisses hier größer. Die genauen Gründe für diese Unterschiede und die generell extremen Werte, die die SBAS-Methode erzeugt, sollten weiter untersucht werden, siehe Kapitel 5.7.

In Abbildung 6 sind die auf der ASF-Plattform und mit MintPy (nach-)prozessierten SBAS-Ergebnisse für dieselben Raumausschnitte wie in Abbildung 5 dargestellt. Auf ASF wurden Szenen im Zeitraum Januar 2017 bis Dezember 2021 prozessiert, die Zeitreihe ist damit nicht ganz mit den PS/DS- und GMTSAR-Ergebnissen vergleichbar. Für das Schechenfilz ergeben sich laut ASF-MintPy noch stärkere Hebungen als bei GMTSAR, in großen Teilen werden Werte von +5 bis +25 mm/Jahr erreicht. Bei den räumlichen Mustern gibt es in diesem Gebiet nur wenige Übereinstimmungen mit den GMTSAR-Ergebnissen. Was Benediktbeuern betrifft, so stimmen die beiden SBAS-Prozessierungen darin überein, dass die landwirtschaftlich genutzten Moorflächen im südwestlichen und östlichen Teil sacken, bei ASF-MintPy stärker als bei GMTSAR. Bei letzterer Methode ist auch die Hebung des naturnahen Moors im Zentrum weniger extrem und kleiner in der Ausdehnung als bei den ASF-MintPy-Ergebnissen, wo zum Teil Werte von >40 mm/Jahr erreicht werden. Für Karolinenfeld ähneln sich die ASF-MintPy- und GMTSAR-Ergebnisse hingegen sehr, sowohl im Muster als auch im Wertebereich. Bei ASF-MintPy ist der Kohärenzgrenzwert strenger gesetzt, ab dem auf ein Gebiet das Unwrapping durchgeführt wird, weshalb vor allem über Waldflächen auch Pixel

ohne Werte vorkommen, siehe westlicher Teil im Ausschnitt für Karolinenfeld. Wie bereits bei GMTSAR erwähnt, sind Bodenbewegungen über Waldgebieten nicht verlässlich, was sich vor allem in diesem Gebiet auch an den kleinräumig stark schwankenden und zum Teil entgegengesetzten Werten in Abbildung 6 zeigt.

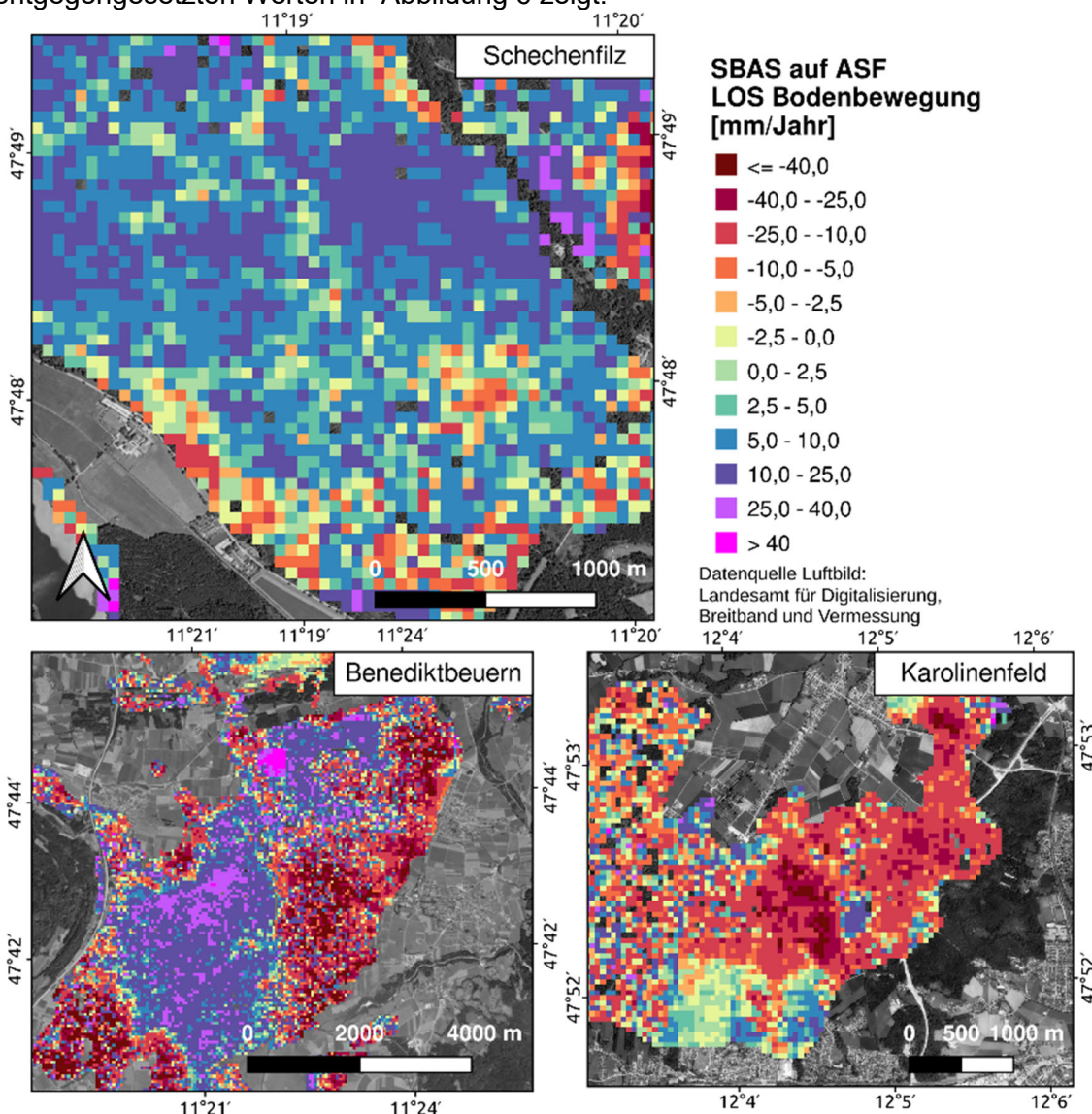


Abbildung 6: Mittlere LOS Bodenbewegung [mm/Jahr], SBAS-Ergebnisse prozessiert über ASF-MintPy für das Schechenfilz, den Großraum Benediktbeuern bis zum Kochelsee und das Gebiet um das Versuchsgut in Karolinenfeld.

Die Unterschiede zwischen den ASF-MintPy- und GMTSAR-Ergebnissen können mehrere Gründe haben: Zunächst handelt es sich nicht um exakt den gleichen Zeitraum, der abgebildet wird. Des Weiteren wurden bei GMTSAR Interferogramme mit größerem zeitlichen Abstand (temporal baseline) zwischen den Szenen miteinbezogen. Es wurden neben den Interferogrammen mit maximal 37 Tagen temporaler baseline zusätzlich Interferogramme mit zeitlichen Abständen der Aufnahmen von drei, sechs und neun Monaten verwendet. Auf der ASF-Plattform wurden hingegen nur Szenenpaare mit weniger als 13 Tagen Differenz berücksichtigt. In mehreren aktuellen Forschungsarbeiten wurde erst kürzlich bestätigt, dass die SBAS-Methode unter Verwendung von nur kurzen zeitlichen Abständen, also „short baselines“, über Vegetation und nach Niederschlagsereignissen einem Bias unterliegt, der zu verfälschten Bodenbewegungen führen kann (Ansari et al. 2021, De Zan et al. 2022,

Maghsoudi et al. 2022, Zheng et al. 2022). In diesem Arbeitsfeld besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, siehe Kapitel 5.7.

### 5.4.1.2 Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte dient als Indikator für trockenheitsbedingten Stress der Moorvegetation und des Moorkörpers. Trotzdem wurde in enger Absprache mit den anderen Projektpartnern beschlossen, diesen Parameter nicht flächendeckend abzuleiten. Die Bodenfeuchte findet weder bei den Treibhausgasmodellierungen der HSWT noch bei der hydrologischen Modellierungen der TUM Eingang. Sie ist auch nicht direkt mit den modellierten Wasserständen vergleichbar, die aber für die Treibhausgasmodellierung von besonderer Wichtigkeit sind.

### 5.4.1.3 Verdunstung

Auf Anfragen anderer Teilprojekte wurden alternativ zur Bodenfeuchte zwei Verfahren zur Ableitung von räumlichen Verdunstungsmustern auf dem Schechenfilz getestet, die bei den hydrologischen Modellierungen als Validierungsgrundlage dienen sollten, da vor allem flächenhafte Messwerte der Verdunstung kaum existieren.

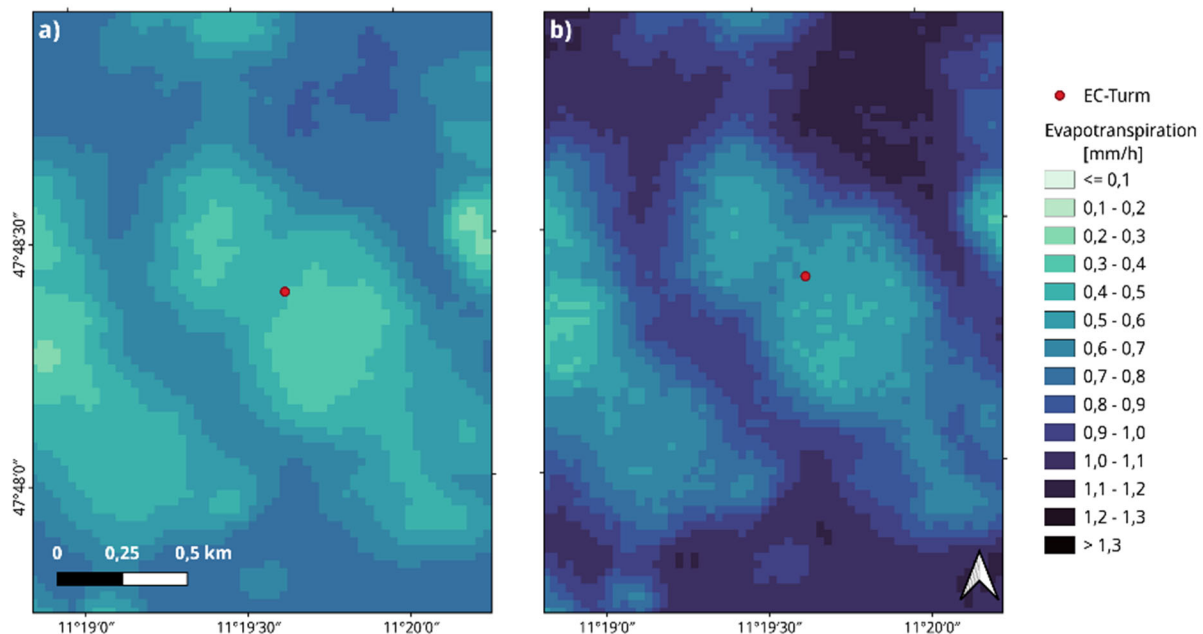


Abbildung 7: Verdunstungsmuster aus dem DATT-Modell und der „Triangle Method“ für den 05.08.2017.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der vorgestellten „Triangle Method“ und des DATT-Modells an einem exemplarischen Zeitpunkt. Die Ergebnisse sind sich sehr ähnlich, jedoch zeigt die „Triangle Method“ eine höhere räumliche Variabilität in den Verdunstungsmustern und eine höhere Varianz im Wertebereich insgesamt. Dies kann auf die Verknüpfung mit den räumlich differenzierteren NDVI Daten zurückgeführt werden, da diese eine höhere Auflösung als die LST-Daten aufweisen. Das Schechenfilz mit dem markierten EC-Turm ist in beiden Ableitungsverfahren klar abgegrenzt zu den umliegenden Landnutzungen. Ähnliche Verdunstungsmuster im Westen sind dem Hochmoor Weidfilz zuzuschreiben.

Die Modellierungsergebnisse des DATT Modells bei Miteinbeziehen der Nettostrahlung ergaben im Vergleich mit den gemessenen Daten am EC-Turm bessere Ergebnisse (RMSD = 0,11 mm/h) als mit der „Triangle Method“ (RMSD = 0,26 mm/h). Die Ergebnisse

ohne Nettostrahlung sind im Vergleich mit der „Triangle Method“ ähnlich aussagekräftig (RMSD = 0,30 mm/h).

#### 5.4.1.4 Wasserstand

Ähnlich wie bei der Bodenfeuchte kann das Detektieren offener Wasserflächen unter Vegetation interessante Informationen bereitstellen, die aber nicht in direkten Bezug zu den von der TUM modellierten quantitativen Wasserständen unter Flur gesetzt werden können. Die sehr rechenintensive Prozessierung der Sackungen und Schnitttermine wurde daher prioritär behandelt und die Detektion von Wasserflächen nur als zweitrangig für das Projekt angesehen.

#### 5.4.1.5 Vegetation

Satellitendaten können flächendeckende Informationen zum Zustand der Vegetation liefern. Beide bisher besprochenen Systeme, Multispektral- und Mikrowellenfernerkundung, lassen Rückschlüsse auf physiologische Eigenschaften der Pflanzenbedeckung zu. Die gewonnenen Informationen wurden im Teilprojekt 4 insbesondere dazu verwendet, die Schnitthäufigkeiten und auch -termine von Grünländern auf Moorflächen abzuleiten. Angaben über die Häufigkeiten und über den Zeitpunkt des ersten Schnittes helfen bei der Einteilung der Nutzungsintensitäten entsprechender Flächen.

Die Detektion eines Mahdereignisses bedarf einer dichten Zeitreihe an Satellitendaten, da sich der Vegetationsbestand im Verhältnis zu den Überflugszeiten schnell wieder erholt. Eine ausreichende zeitliche Abdeckung mit Werten zur Vegetationsbeschaffenheit ist mit dem datenintensiven Vorgehen, auch sehr bewölkte Bilder in die Schnitttermindetektion mit einzubeziehen, gesichert. Auch die grundsätzlich bewölkungsunabhängigen Aufnahmen des Mikrowellen-Satelliten Sentinel-1, welche zur Darstellung struktureller Änderungen herangezogen werden, liegen nach einer Filterung mit RADOLAN-Daten, um Einflüsse von Interzeptionswasser zu vermeiden, noch in einer zeitlich hohen Auflösung vor.

Über alle betrachteten Felder hinweg, wurden in den meisten Fällen vier Schnitte in der Wachstumsperiode verzeichnet (s. Abbildung 8). Die Verteilung der Schnitthäufigkeiten bleibt über die untersuchten Jahre 2017-2021 konstant. Lediglich in den Jahren 2018 und 2020 steigt die Anzahl der Felder mit fünf detektierten Schnitten.

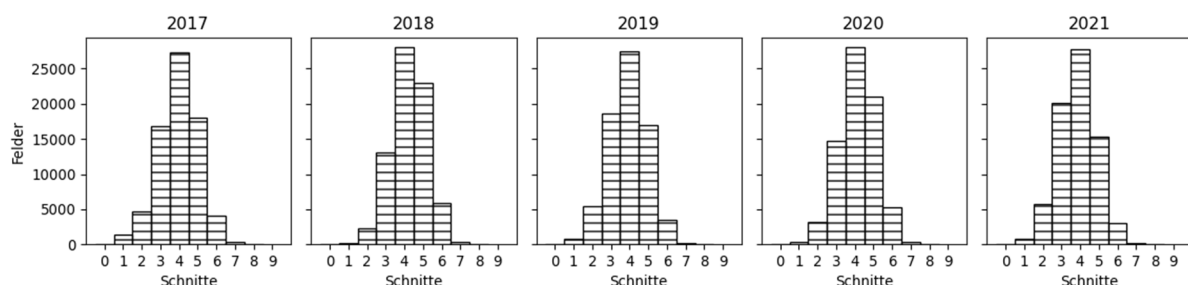


Abbildung 8: Verteilung der Schnitthäufigkeiten aller Grünland-Feldstücke („Felder“) für die Jahre 2017-2021.

Eine typische Zeitreihe für ein intensiv bewirtschaftetes Grünland ist in Abbildung 9 zu finden. Die interpolierte Zeitreihe des Vegetationsparameters zeigt deutlich die Veränderungen der Vegetation in den Sommermonaten auf. Solch starke und vor allem wiederkehrende Schwankungen sind nicht auf Seneszenz oder phänologische Veränderungen zurückzuführen, sondern deuten klar auf Mahdereignisse hin. Ebenfalls sind die Anstiege der Kohärenzwerte nach den vermeintlichen Schnitten zu erkennen. Es werden zunächst

Zeitabschnitte, welche die Vorgaben eines Schnittes (siehe Abschnitt 5.3) erfüllen, aufgezeigt. Der konkrete Schnitttermin wird auf den ersten Tag eines solchen Bereichs gelegt, da dann bereits die Veränderung an der Landoberfläche erfolgt ist und z.B. ein Abfall des EVI zu verzeichnen ist.

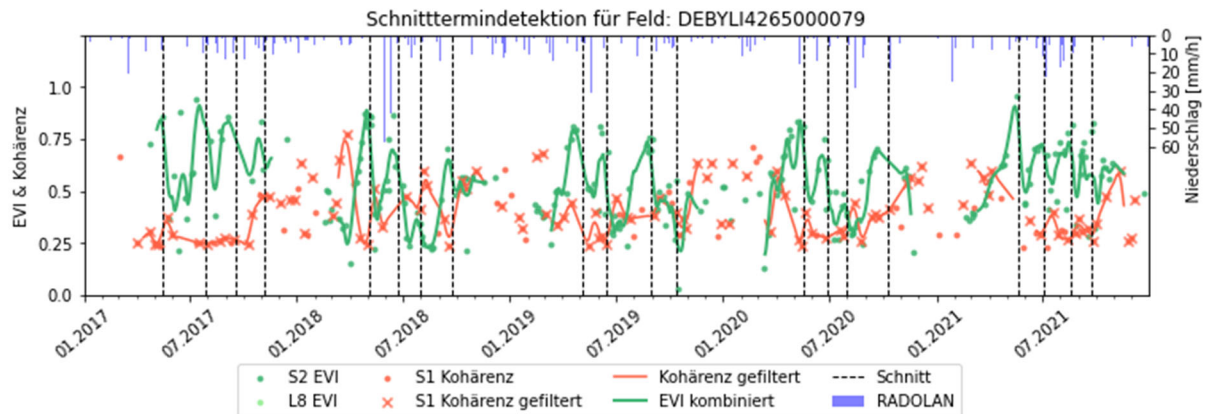


Abbildung 9: Beispielhafte EVI-, Kohärenz- und Niederschlagszeitreihe und entsprechende Schnittterminerkennung.

Die Reflexionseigenschaften von Vegetation werden jedoch nicht nur von Mahdereignissen beeinflusst. So zeigen auch Grünlandflächen auf naturnahen Mooren Schwankungen. Die vorgestellte Detektionstechnik überschätzt die Schnitthäufigkeit bei extensiv bewirtschafteten Flächen in einigen Fällen.

Abbildung 10 zeigt die Schnittanzahl für das Jahr 2021 in drei ausgewählten Standorten, dem Altbayerischen Donaumoos, Freisinger Moos und dem Murnauer Moos. Hier spiegelt sich die Verteilung aus Abbildung 8 wider mit meist vier Schnitten pro Jahr. Im Donaumoos werden im südwestlichen Teil bei Klingsmoos weniger Schnitte detektiert als beispielsweise im südöstlichen Areal bei Alteneich. Im Freisinger Moos wurden ebenfalls der gezeigten Verteilung entsprechend Mahdereignisse angegeben. Im naturnahem Murnauer Moos hingegen sind für 2021 auffällig wenig Schnitte für den nördlichen Bereich erkannt. Der Süden weist außerhalb des Kernbereichs des Moores eine höhere Schnitthäufigkeit auf.

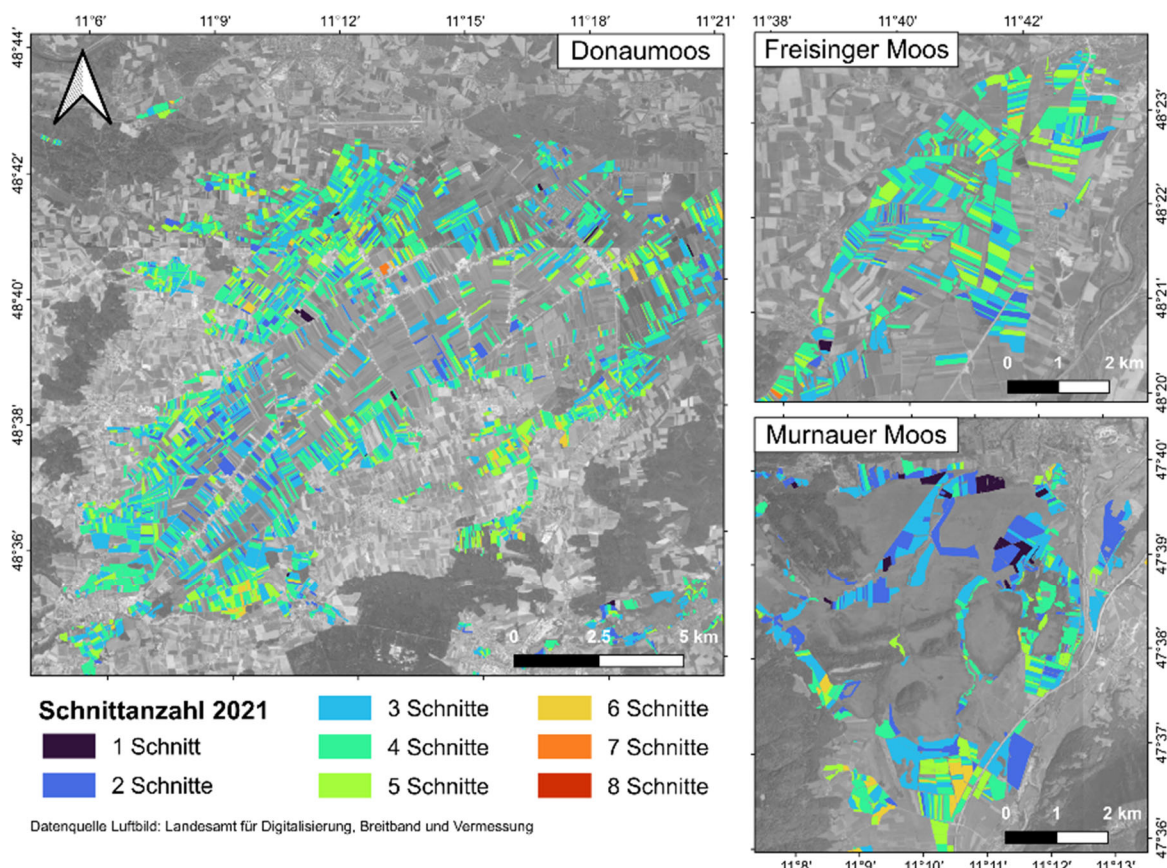


Abbildung 10: Detektierte Schnitzzahl 2021 für drei ausgewählte Moore.

Mangels Kontrolldaten bleibt nur die Plausibilitätsprüfung der Schnitthäufigkeiten. Die gezeigten Muster sind insofern nachvollziehbar und sinnvoll, als dass naturräumlich diverse Standorte auch zu erwartende Unterschiede in der Schnitthäufigkeit zeigen.

Die Schnitthäufigkeit steht in direkter Verbindung mit der Nutzungsintensität der Grünlandflächen. Daneben gilt aber auch das Datum des ersten Schnittes als Indikator. In den Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUM) wird die Höhe der Zuwendung für extensive Mähnutzung naturschutzfachlich wertvoller Lebensräume geregelt. Folgende Maßnahmen-Codes stehen dabei für entsprechende Zeitpunkte des ersten Schnittes:

- Schnittzeitpunkt ab 01.06. - H21
- Schnittzeitpunkt ab 15.06. - H22/F22
- Schnittzeitpunkt ab 01.07. - H23/F23
- Schnittzeitpunkt ab 01.08. - H24/F24
- Schnittzeitpunkt ab 01.09. - H25/F25

Diese Maßnahmen Codes wurden in Python in Daten übersetzt und mit den detektierten Schnittzeitpunkten auf relevanten AUM-Flächen verglichen. Abbildung 11 zeigt die mittlere Abweichung in Tagen über die Jahre 2017-2021 zwischen den ermittelten und erlaubten ersten Schnitten auf entsprechenden Flächen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass in den intensiver bewirtschafteten Flächen die Abweichung zumeist in der Klasse -30 - 0 Tage liegt. Das bedeutet, dass der Schnitt bis zu einem Monat zu früh detektiert wurde.

Auf naturnahen Flächen scheint jedoch die Detektion der Schnitttermine ein verzerrtes Bild zu liefern. Im Murnauer Moos sind vornehmlich Flächen mit Maßnahmen-Codes H25/F25 zu finden, welche einen Schnitt erst im September erlauben. Hier wurden schon in vielen Fällen während der Wachstumsperiode über drei Monate vorher Schnittereignisse detektiert. Dies kann wie bereits angesprochen an phänologischen Entwicklungen oder meteorologischen

Einflüssen liegen, die eine Veränderung der Bestandsstruktur und somit eine rapide Änderung im Rückstreuverhalten mit sich ziehen.

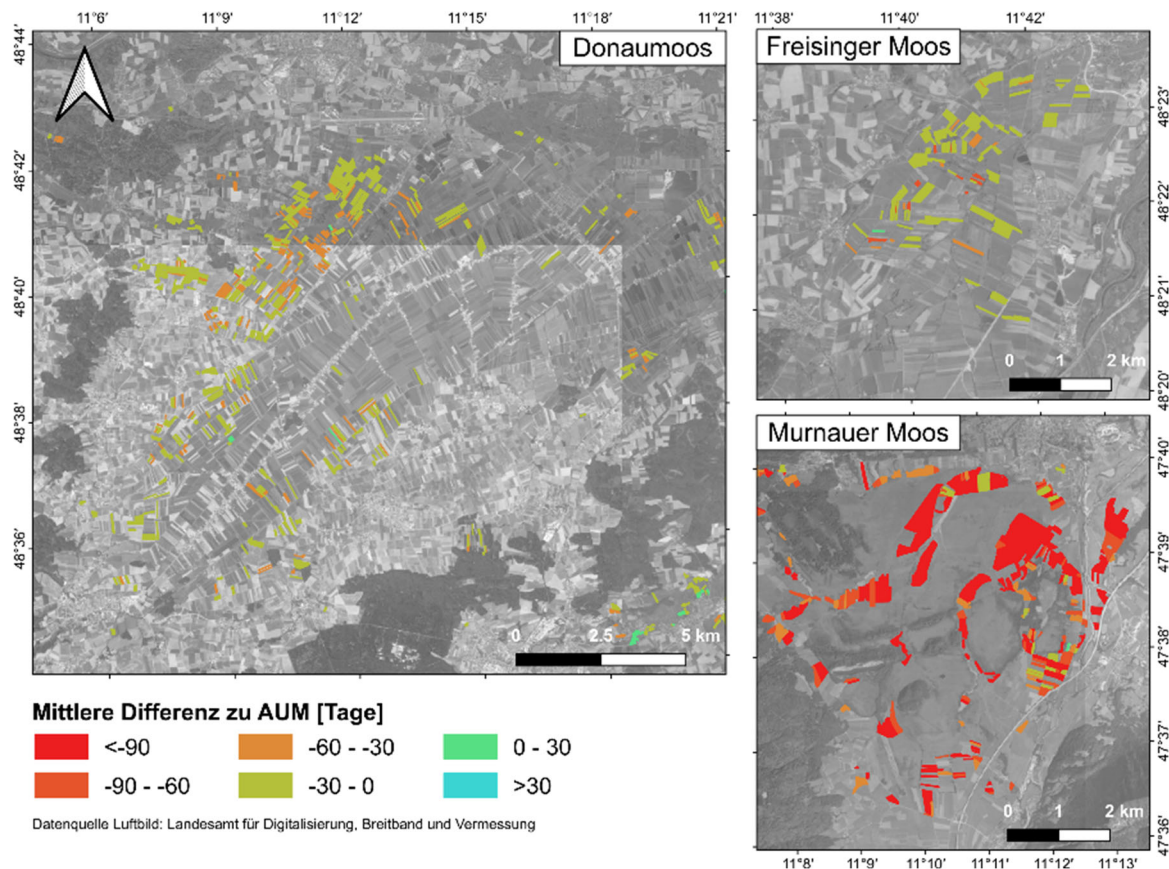


Abbildung 11: Mittlere Differenz des ersten detektierten Schnitttermin eines Jahres im Vergleich zu dem ersten vorgegebenen Schnitt aus AUM im Mittel über die Jahre 2017-2021.

Eine endgültige und umfassende Validierung der gezeigten Schnittterminerkennung ist aber ohne Vergleichswerte nicht zu leisten.

## 5.4.2 Regionale Klimaprojektionen

Für das Verbundvorhaben KliMoBay konnte auf Klimasimulationen des Projektes ClimEx zurückgegriffen werden ([www.climex-project.org](http://www.climex-project.org)). Aus dem großen Klimamodellensemble mit insgesamt 50 Realisationen wurden aus Gründen der Verarbeitbarkeit 10 Realisationen zufällig ausgewählt und gemäß der vereinbarten Projektspezifikationen aufbereitet. Die Verwendung von 10 statistisch gleichwertigen Modellrealisationen lieferte eine hinreichend genaue Abbildung der natürlichen Variabilität im Klimasystem und ermöglichte somit i) eine deutlich verbesserte Abgrenzung gegenüber statistisch eindeutigen Effekten des Klimawandels, und lieferte ii) eine robuste Grundlage für die Erfassung von Extremereignissen (Extremniederschläge, Dürre, Hitze). Zusätzlich wurde der Referenzdatensatz SDCLIREF bereitgestellt. In Tabelle 1 sind die bereitgestellten Daten nochmal zusammengefasst. Die Daten wurden in Teilprojekt 2 zur Modellierung aktueller Wasserstände und für zukünftiger Wasserstandsszenarien verwendet.

Tabelle 1 Aufbereitete und bereitgestellte Klimadaten aus dem Vorgängerprojekt ClimEx.

Bezeichnung	Variablen	Zeitraum	Auflösung (räuml./zeitlich)	Realisation (nur für Klimasimulationen)
Referenzdatensatz SDCLIREF	pra, tasb, hursc, rsdsd, sfcWinde	1981-2014	500m / 3h	
Bearbeitete Klimamodelldaten (CRCM5-LE)	pra, tasb, hursc, rsdsd, sfcWinde	1980-2099	500m / 3h	kbj, kbo, kbs, kbv, kby, kce, kcj, kcm, kcq, kcv
a Niederschlag (pr): Summe über drei Stunden; Einheit: mm				
b Temperatur (tas): Mittel über drei Stunden; Einheit: °C				
c Relative Luftfeuchte (hurs): Mittel über drei Stunden; Einheit: %				
d Globalstrahlung (rsds): Mittel über drei Stunden; Einheit: W/m <sup>2</sup>				
e Windgeschwindigkeit (sfcWind): Mittel über drei Stunden; Einheit: m/s				

Die Daten deuten auf eine erhebliche Erhöhung der Jahresmitteltemperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts hin (ca. +4°C), was zu besonders intensiven Hitzeereignissen führt. Bei den Gebietsniederschlägen sind im Jahresmittel keine deutlichen Veränderungen zu erwarten, jedoch ändert sich die saisonale Verteilung erheblich; dabei ist mit deutlich erkennbaren Zunahmen der Winterniederschläge zu rechnen sowie mit einer starken Reduktion der Sommerniederschläge. Letztere Entwicklung zeigt sich auch in der Verstärkung und Verlängerung sommerlicher Dürreereignisse, die für die Hydrologie in Mooregebieten besonders relevant sein können.

## 5.5 Output-Indikator

Die Wiedervernässung von 3 ha Grünland auf dem staatlichen Versuchsgut in Karolinenfeld führte gemäß den Treibhausgasmessungen der HSWT im Projekt zu einer Treibhausgasminde rung von rund 70 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr. Es war geplant, eine angrenzende tief entwässerte Niedermoorfläche von 10 ha im Staatsgut Karolinenfeld in Stufen wiederzuvernässen, um hydrologische Zusammenhänge zu messen und aktuelle Fernerkundungsmessungen zu kalibrieren. Die Baumaßnahmen dafür verzögerten sich, weil die in den Drainageplänen eingezeichneten Drainagerohre nur teilweise im Boden vorhanden waren und damit eine komplette Neuplanung und sehr viel aufwändigere Umsetzung nötig war. Die Baumaßnahme wurde im Herbst 2022 durchgeführt. Dadurch werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Fläche erwartungsgemäß ebenfalls ungefähr halbiert und weitere 23,4 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Emissionsminderung, insgesamt also zusätzlich 234 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr erzielt.

Durch die Innovationen und Ergebnisse des KliMoBay Projekts wird die Umsetzung des Masterplans Moore Bayern beschleunigt. Die Bereitstellung der Klimaszenarien erlaubte erstmals, die zukünftige Entwicklung des Klimas für den Moorbodenschutz in Szenarien zu berücksichtigen. Die Klimaszenarien zeigen, dass die Gesamtniederschläge relativ gleich bleiben. Dadurch können datenbasiert Argumente der Moorschutzgegner widerlegt werden, dass eh nicht genug Wasser für Wiedervernässungsmaßnahmen vorhanden sei. Gleichzeitig weisen die Klimaszenarien deutliche Extreme in der Saisonalität der Niederschläge auf. Diese



Information ist sehr wichtig, um Moorschutzmaßnahmen resilient zu planen, z.B. mit saisonaler Wasserzwischenspeicherung.

Zusätzlich wurden erstmals für Bayern robuste Daten der Bewirtschaftungsintensität im Moorgrünland mittels vielfältiger, nicht nur optischer, Fernerkundungsdaten ermittelt. Diese Information ist ein wichtiger MRV Indikator.

Erstmals wurde eine Methodik entwickelt, die zeitlich hochaufgelöst aus Fernerkundungsdaten Sackungsraten auf Moorböden bestimmen kann – ein zentrales Element für hochaufgelöstes Erfolgsmonitoring von Wiedervernässungsprojekten.

Insgesamt wurden wichtige Fachgrundlagen geschaffen, damit die politisch geforderten 55.000 Hektar Moorschutz bis 2040 erfolgreich umgesetzt werden können.

## 5.6 Diskussion

### *Sackung*

Die PS- und DS-Interferometrie ist in der Lage Oberflächenbewegungen auf naturnahen Mooren zu detektieren. Trotz der Verwendung zweier unterschiedlicher Methoden und auch Software, die Prozessierung von Szenen mit anderem Einfallswinkel (Ascending/Descending) und variierender Zeitreihenlängen, sind die Ergebnisse vergleichbar. Die Größenordnung der Bewegungen liegen im erwarteten Bereich und räumliche Muster konnten plausibilisiert und in Zusammenhang mit Wiedervernässungsmaßnahmen gestellt werden. Vorausgesetzt, dass eine geeignete Validierung mit in-situ Daten die Güte der PS- und DS-Ergebnisse bestätigt, könnten diese Methoden dazu verwendet werden flächendeckend den Erfolg von Moorrenaturierungen zu kontrollieren. Probleme mit Unwrapping-Fehlern bleiben jedoch bestehen und nur Mittel über längere Zeiträume sollten betrachtet werden.

Für das Monitoring von landwirtschaftlich genutzten Mooren, die den Großteil der Moore in Bayern darstellen, eignen sich die PS- und DS-Interferometrie allerdings nicht. Die SBAS-Methode produziert prinzipiell Ergebnisse auch auf bewirtschafteten Flächen, es bestehen aber noch große Unsicherheiten, wie einzelne Einstellungen bei der Prozessierung das Ergebnis beeinflussen, siehe Kapitel 5.7 zum Forschungsbedarf. Dies gilt sowohl für die Prozessierung mit GMTSAR als auch auf den ASF Servern inklusive der Nachprozessierung mit MintPy.

### *Verdunstung*

Es wurde gezeigt, dass eine Ableitung von flächenhaften Verdunstungswerten mittels Satellitenfernerkundung machbar ist. Die Ergebnisse sind mit Fehlerwerten um 0,2 mm/h (RMSD) im Vergleich zu dem EC-Turm vielversprechend. Schwierigkeiten bei der Verdunstungsmodellierung bleiben trotzdem bestehen. So existiert beispielsweise die Abhängigkeit im DATT-Modell, einen gemessenen Wert für die Nettostrahlung mitanzugeben, um gute Ergebnisse zu erzielen. Die "Triangle Method" liefert ebenfalls plausible Verdunstungsmuster in der Region; es muss allerdings darauf verwiesen werden, dass die Methode für semi-aride Verhältnisse entwickelt wurde und somit speziell bei trockenen Gegebenheiten genauere Ergebnisse erwarten lässt. Unter feuchten Bedingungen muss damit gerechnet werden, dass nicht in allen Satellitendaten eine robuste Dreiecksbeziehung zwischen NDVI und LST hergestellt werden kann.

### *Schnitttermine*

Die vorgestellte Technik zur Detektion von Schnittereignissen auf Grünland über Mooren ist vielversprechend. Anhand einer dichten Zeitreihe an multispektralen und mikrowellenbasierten

Aufnahmen der Sentinel Satelliten können zeitliche Veränderungen im Pflanzenbestand der zuvor ausgewählten Grünlandflächen dargestellt werden. Die Schnitthäufigkeit lässt sich durch Analyse abrupter Änderungen im Reflexionssignal bestimmen. Dies funktioniert jedoch vornehmlich auf intensiv genutzten Flächen gut und weist auf extensiv gemähten Feldern noch zu viele falsch-positive Detektionen auf. So weisen viele Flächen, welche laut AUM Maßnahmen-Code erst ab September abgemäht werden dürfen, bereits einige Monate früher einen detektierten Schnitt auf. Dies ist auf ein zu „aggressives Erkennen“ und die natürliche Variation in der Pflanzendecke zurückzuführen. So ändert sich das Signal sowohl im optischen Wellenlängenbereich als auch im Rückstreuverhalten der Mikrowellenfernerkundung fortschreitender phänologischer Entwicklungen, z.B. Schossen oder Rispschieben, im Jahresverlauf. Eindeutigeres Rückstreuen durch höheren Stängelanteil kann in der Mikrowellenfernerkundung zu einem Kohärenzanstieg führen oder auch zu einem Abfall im Vegetationsindex. Beide Fälle werden bei aktuellem Vorgehen bei deutlicher Ausprägung einem möglichen Schnittereignis zugeordnet. Eine genauere und weitere Betrachtung des Sachverhalts und eine Weiterentwicklung der Schnittermindetektion ist notwendig, um auch auf Grünlandflächen über naturnahen Mooren eine robuste Ableitung zu treffen. Dazu sind Referenzdaten unerlässlich. Eine automatisierte Optimierung, beispielsweise der empirischen Faktoren a und b, war wegen der ungleichen Zielvorgabe von Algorithmus und AUM Maßnahmen-Codes nicht möglich. Eine konkrete Information zur Schnitthäufigkeit ist dazu unabdingbar.

## 5.7 Weiterführender Forschungsbedarf

Oberstes Ziel weiterführender Forschungsarbeiten sollte die Validierung der Fernerkundungsergebnisse sein. Im Rahmen des MoMoK-Programms (Moorbodenmonitoring für den Klimaschutz) des Thünen-Instituts werden seit kurzer Zeit zwar Bodenbewegungen in einigen der KliMoBay-Testgebiete erhoben. Die Zeitreihen standen aber bei Abschluss der Projektarbeit nicht zur Verfügung, weil sie noch nicht ausgelesen oder validiert waren oder ihr Überlappungszeitraum mit den Fernerkundungsdaten nicht ausreichend war. Auch umfassende Referenzdaten zur Schnittermindetektion waren bis zum Projektabschluss nicht verfügbar.

### *Sackung*

Zusätzlich zur Validierung der Ergebnisse aller hier angewendeter interferometrischer Verfahren, besteht vor allem bei der SBAS-Methode noch erheblicher Forschungsbedarf. Der Einfluss einiger Stellschrauben in der Prozessierung auf das Endergebnis sollte untersucht werden, darunter vor allem i) das Einbeziehen von Szenenpaaren mit großem zeitlichem Abstand (baseline) bei der Interferogrammbildung und ii) welchen Einfluss die Anzahl und konkrete Auswahl an Interferogrammen auf die absoluten Werte und Muster der Bodenbewegung hat, siehe Kapitel 5.4.1. Des Weiteren ist nicht ausreichend geklärt, wie sich die Wahl der Masterszene und die Angabe des Einfallswinkels auf das Endergebnis bei GMTSAR auswirken. Schließlich sollte angestrebt werden, die Prozessierung mit GMTSAR sowohl zeitlich als auch räumlich in einem Stück zuprozessieren, da die aufgrund der rechenintensiven Prozessierung notwendigen Aufsplittung zu Unsicherheiten führt. Die Prozessierung mit ASF ist in diesem Zusammenhang praktischer, da die Prozessierung auf externe Server ausgelagert wird. Allerdings sollte auch hier die Parametrisierung genauer untersucht werden.

### *Verdunstung*

Kann kein „Triangle Shape“ für eine Szene erstellt werden, können Varianten der Methode Abhilfe schaffen. Für eine bessere Einsetzbarkeit über Moorflächen wäre beispielsweise eine spezifische Anpassung der Feuchtigkeitsgrenzwerte aussichtsreich. Przeździecki und Zawadzki (2020) ersetzen den linearen Zusammenhang entlang der Dreieckskanten mit einer Polynomfunktion zweiten Grades, um anderen Oberflächeneigenschaften Rechnung zu tragen.

Außerdem kann das Vorgehen mit weiteren Daten, wie z.B. Informationen zur lokalen Landnutzung angereichert werden. Die Koordinaten der Eckpunkte des entsprechenden Dreiecks für eine Landnutzung können dann anhand der zugehörigen Verdunstungseigenschaften bestimmt werden.

### *Schnitttermine*

Wie in der Diskussion angemerkt, ist vor allem auf naturnahen Flächen eine Verbesserung der Schnitttermindetektion anzustreben. Eine robustere Ableitung kann beispielsweise durch Anpassungen im Algorithmus aber auch durch das Hinzuziehen von Referenzdaten geschehen. Die zusätzliche Verwendung von absoluten Sprüngen im Vegetationsindex oder zeitlich angepassten Grenzwerte innerhalb eines gleitenden Fensters entlang der Zeitserie sind vielversprechende Ansatzpunkte, welche im abgelaufenen Projektzeitraum nicht realisiert werden konnten. Diverse Studien zeigen anhand weitreichender Bezugsdaten die Sinnhaftigkeit dieses Vorgehens (De Vroey et al. 2021). Auch gerade wegen des Sättigungsverhaltens sollte in zukünftigen Versuchen der NDVI wieder eine Rolle spielen, da durch den glatteren Verlauf eine klarere Detektierbarkeit des Schnitttermins erreicht werden könnte. Der EVI wurde nach den vielversprechenden Ergebnissen von Reinermann et al. (2022) zunächst vorgezogen. Wegen des damit verbundenen Daten- und Bearbeitungsaufwands konnte eine Neuberechnung des NDVI und vor allem die feldbezogene Mittelwertextraktion nicht mehr geleistet werden. Auch Machine Learning Techniken zeigen hohes Potenzial (Lobert et al. 2021) und sollten in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

## 6 HYDROLOGIE UND WASSERSTANDSKARTEN (PROJEKT 2, TU MÜNCHEN)

### 6.1 Einführung

Die Entstehung und der Erhalt von Mooren ist unmittelbar mit dem Wasserregime an den jeweiligen Standorten verknüpft. Darüber hinaus zeigen Treibhausgasemissionen von Moorstandorten eine starke Abhängigkeit vom vorliegenden Wasserstand im Moor. Für eine Abschätzung des Klimaschutzpotenzials und eine zuverlässige Treibhausgas-Bilanzierung sind daher räumlich und zeitlich differenzierte und flächendeckende Aussagen zu den Moorwasserständen an allen bayerischen Moorstandorten unerlässlich. Aus methodischen Gründen ist die letztendlich verwendete Zielgröße nicht der Wasserstand selbst, sondern der Flurabstand, also die Differenz aus Geländeoberkante und Moorwasserspiegel.

Für die Wiedervernässung von entwässerten oder degenerierten Moorstandorten sind außerdem Kenntnisse über die lokale Wasserverfügbarkeit und die physikalischen Eigenschaften der Moorböden an den jeweiligen Standorten von zentraler Bedeutung. Das Projekt 2: „Hydrologie und Wasserstandskarten“ will vor diesem Hintergrund dazu beitragen, Daten und Wissen über die Hydrologie der Moore Bayerns zusammenzutragen und mittels innovativer Methoden zu Klimabilanzierung und Klimaschutz durch Moorwiedervernässung beitragen.

### 6.2 Fragestellungen und Ziele

Entsprechend dem Projektantrag sollten im Projekt 2 primär folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie reagieren Moorwasserstände auf stärkere saisonale Niederschläge und ausgeprägte Trockenperioden (kritische Zeiträume)?
- Wie wirken Maßnahmen der Wiedervernässung (Projekt 2) auf die moorhydrologischen Prozesse und den Wasserstand in Mooren?
- Welche Wirkung haben Nutzungsänderungen oder Renaturierungsmaßnahmen auf den Moorwasserhaushalt und den daraus resultierenden Wasserstand in Mooren?
- Wie können die Ergebnisse zusammen mit bayernweiten Bodendaten (Projekt 3), unterstützt durch die Fernerkundung (Projekt 4) und mit weiteren verfügbaren langfristig erhobenen Messdaten zu saisonalen Flächenwasserständen der Moore Bayerns skaliert werden und welche Unsicherheiten sind dabei zu berücksichtigen?

Diese Fragen erforderten in einem ersten Schritt die detaillierte messtechnische Erfassung maßgeblicher Klima- und Wasserhaushaltsgrößen an Pilotstandorten, um das hydrologische Geschehen beispielhaft zu untersuchen. Die Recherche, Erprobung und Anwendung prozessbasierter Modellansätze dienten dazu, die kausalen Zusammenhänge zwischen naturräumlichen Gegebenheiten, menschlichen Eingriffen (insbesondere Drainage und Wiedervernässung) und Moorwasserständen nachzuvollziehen und auf Grundlage der verfügbaren Daten zuverlässig zu prognostizieren. Die Skalierung auf alle Moore Bayerns wurde durch Anwendung datenbasierter Modellansätze einschließlich der bayernweiten Bereitstellung und Prozessierung geeigneter Datengrundlagen realisiert.

Im Einzelnen wurden insbesondere folgende Ziele verfolgt:

- Entwicklung dynamischer Wasserstandskarten für gegenwärtige und zukünftige klimatologische Randbedingungen durch Weiterentwicklung der Methodik von Bechtold et al. (2014) (Schwerpunkt von Modul 4 entsprechend Abbildung 12)
- Bereitstellung von Daten zur Wasserverfügbarkeit als wesentlicher Beitrag für die Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen (Schwerpunkt von Modul 8 entsprechend Abbildung 12)

### 6.3 Material und Methodik

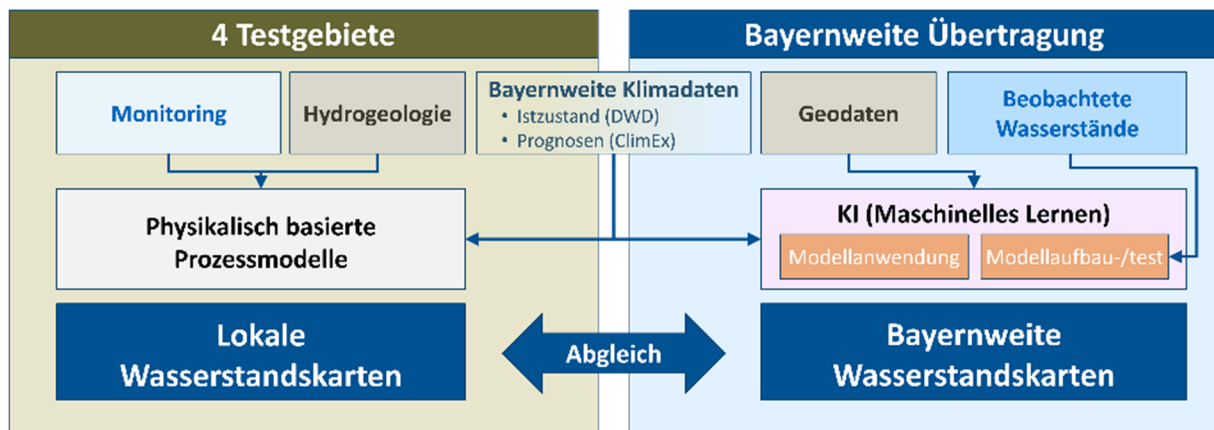


Abbildung 12: Überblick über die Verbindung von Messung und Prozessmodellierung in ausgewählten Testgebieten und die bayernweite Übertragung zur Ableitung von Wasserstandskarten

Die Arbeit von Projekt 2 verfolgt drei aufeinander aufbauende Arbeitsschritte: a) Messung, b) physikalisch basierte Prozessmodellierung und c) bayernweite Übertragung (Regionalisierung) mittels Künstlicher Intelligenz (KI) bzw. mit Maschinellem Lernen (ML, machine learning). Die Monitoring-Aktivitäten sowie die Prozessmodellierung des Projekts 2 konzentrieren sich auf 4 Testgebiete, die in Kapitel 6.3.1 benannt werden. Für die Regionalisierung wurden beobachtete Wasserstände an ergänzenden Standorten akquiriert und bayernweit Kennwerte zur physischen Geographie und Landnutzung abgeleitet. Zeitlich wird der Istzustand (beobachtete Zeiträume) von der Prognose zukünftiger Zustände auf der Grundlage von Klimaprognosen unterschieden.

Abbildung 12 zeigt das Zusammenspiel der räumlichen Ebenen (Testgebiete und flächendeckende Betrachtung für die bayernweite Übertragung) sowie das Ineinandergreifen von Monitoring, Geodatenbasis zur Standortcharakterisierung und Modellansätzen zur (lokalen) Prozessmodellierung und (bayernweiten) Regionalisierung für Istzustand und Prognosen auf. Der Abgleich von lokal gemessenen oder modellierten und bayernweit abgeleiteten Wasserständen dient zusätzlich zur Plausibilisierung der Regionalisierung.

Als wichtige Grundlage für das Prozessverständnis einschließlich Identifikation der maßgeblichen Prozesse und Wasserhaushaltsgrößen wurde ein Konzeptmodell entwickelt. Exemplarisch zeigt Abbildung 13 das Konzeptmodell für das Königsdorfer Weidfilz.

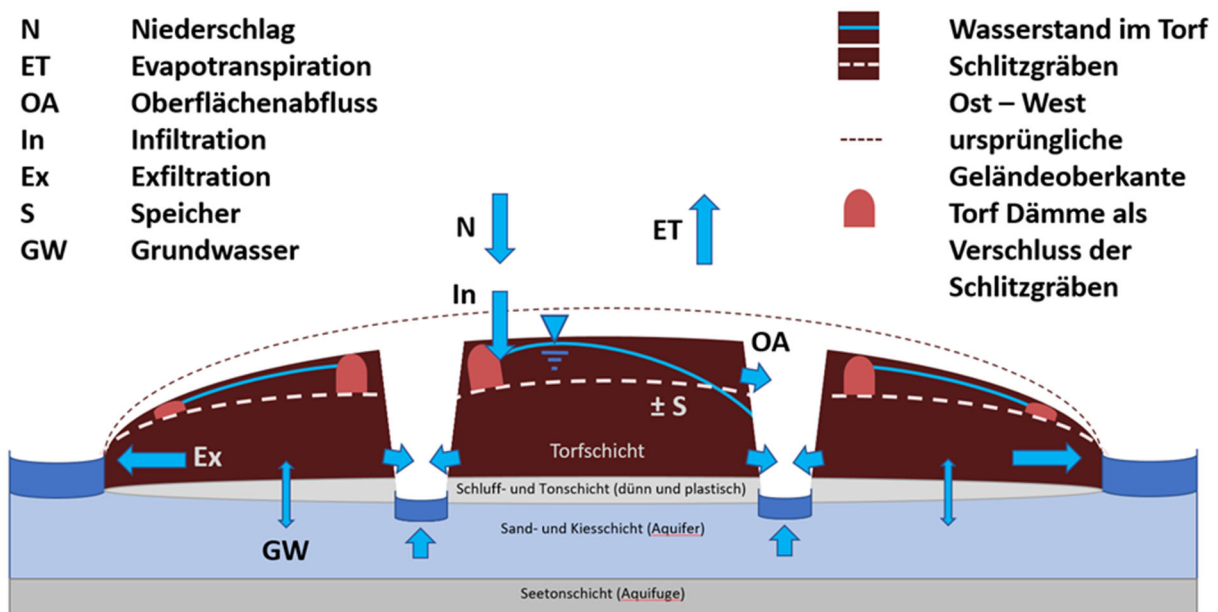


Abbildung 13: Konzeptmodell für das Königsdorfer Weidfilz (Ist-Zustand) (Friedrich, 2019)

### 6.3.1 Monitoring

Detailansichten der 4 Intensiv-Messgebiete (Königsdorfer Weidfilz, Benediktbeuren, Freisinger Moos und Karolinenfeld; im Folgenden Testgebiete genannt) sind in Anlage 13.3 kartographisch dargestellt.

Das Königsdorfer Weidfilz (WDF) wurde als Modellierungsgebiet ausgewählt, um Hochmoore zu repräsentieren. Mit seiner historisch starken anthropogenen Nutzung und teilweise renaturierten Flächen spiegelt es den Zustand vieler Hochmoore in Bayern wider. Für die Niedermoorgebiete Benediktbeuern (BDB) und Freisinger Moos (FSM) wurde jeweils auf Grundlage des Gewässernetzes ein hydrologisches Teileinzugsgebiet aus dem gesamten Moorkomplex ausgewählt. In BDB ist das Kloster Benediktbeuern in Kooperation mit ausgewählten Pächtern bestrebt, sukzessive geeignete Teilflächen wiederzuvernässen. Das FSM ist ein Forschungsgebiet der HSWT, in dem Forschungsprojekte zu THG-Emissionen aus Mooren und zur Bewirtschaftung wiedervernässter Moorstandorte laufen. Das Niedermoor Großkarolinenfeld (KLF) ist ein Versuchsgut der Bayerischen Staatsgüter mit Versuchen der LfL. Auch dort wurden innerhalb der Projektlaufzeit Flächen sukzessive wiedervernässt und Forschungen zur Bewirtschaftung wiedervernässter Moore betrieben. An der Justizvollzugsanstalt Bernau (JVA) wurde schließlich ein Abflusswehr installiert, um an frühere langjährige Abflussmessungen (Jordan et al., 1999) anzuschließen.

Messinstrumente der Firma OTT Hydromet GmbH erfüllten die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der gemessenen Daten. Als zentraler Punkt im Modul 4 sollten die Wasserstände im Torfkörper untersucht werden. Um diese präzise zu messen, wurden OTT Orpheus Mini Datenlogger verbaut. Aufgrund des bereits integrierten Atmosphärendruckausgleiches ist eine Korrektur der Wasserstände in der Nachbearbeitung nicht mehr notwendig. Die Drucksonden wurden in handelsüblichen PVC-Pegelrohren verbaut und mittels Differential-GPS eingemessen. Die Zu- und Abflüsse aus den Testgebieten wurden mittels kontinuierlicher Wasserstandsmessungen (OTT Orpheus Mini) und regelmäßiger Abflussmessungen abgebildet. Aufgrund der fehlenden Zustimmungen für Messwehre durch Eigentümer und aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde in WDF, BDB und FSM auf Messwehre verzichtet.

Alternativ wurden die Ergebnisse regelmäßiger Abflussmessungen genutzt, um Wasserstand-Abfluss-Beziehung abzuleiten.

Für die Speicherung, Prüfung und Analyse der erhobenen Daten wurde eine Zeitreihendatenbank mit der Software WISKI (Fa. Kisters) aufgebaut. Die Messdaten können damit automatisiert nach dem Auslesen im Feld hochgeladen und sicher gespeichert werden. Der vom Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement betriebene Server erstellt täglich ein Backup und sichert so die Daten gegen Verlust. Diese Software wird auch in der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung genutzt. Auch vor diesem Hintergrund erscheint diese Datenbank als Grundlage für eine zukünftige bayernweite Datenbank von Moorwasserständen sinnvoll (siehe Kapitel 6.7). Auch für den Datenaustausch über Bayern hinaus ist diese qualitätsgesicherte Datenhaltung wertvoll.

Aufgrund des begrenzten Messzeitraumes des KliMoBay-Monitorings wurden für die Modellierung des Istzustandes ergänzend zu den TUM-Stationen folgende zusätzliche meteorologische Stationen genutzt:

- Benediktbeuern (BDB): (MeteoGroup Wetterstation), Schlehdorf (LfU), Attenkam (DWD)
- Freisinger Moos (FSM): Dürnast (DWD), Weihenstephan (LfL)
- Karolinenfeld (KLF): Versuchsgut Karolinenfeld (LfL), Rosenheim (DWD)
- Weidfilz (WDF): Geretsried (LfU), Attenkam (DWD)

Mittels Korrelation und linearer Regression wurden die Daten der externen Wetterstationen im Messzeitraum mit den Werten der TUM-Stationen verglichen und an die vor Ort gemessenen Daten angepasst.

## **6.3.2 Physikalisch basierte Modellierung mit Mike SHE**

### **6.3.2.1 Modellaufbau**

Mit den gemessenen hydrologischen Daten und recherchierten Geodaten (Digitale Geländemodelle, Torfstratigraphie, Geologie im Umfeld der Testgebiete etc.; siehe Anlage 13.5 und aufbauend auf den Konzeptmodellen (vgl. Abbildung 13) wurde für die Teststandorte Weidfilz, Freisinger Moos und Benediktbeuern ein weitgehend physikalisch basiertes numerisches hydrologisches Modell erstellt, das den gesamten Wasserkreislauf (meteorologische Randbedingungen, Oberflächenwasser, gesättigte und ungesättigte Zone) umfasst. Diese Modelle wurden mit dem Programm MIKE SHE (DHI, 2021) bearbeitet. Grund für die Auswahl dieser Software war die Möglichkeit, den gesamten ober- und unterirdischen Wasserkreislauf einschließlich künstlicher Strukturen wie Dränagen, Wehre oder Wasserüberleitungen integriert in einem System betrachten zu können.

Die Modelle decken jeweils einen Ausschnitt aus dem gesamten Moorkomplex ab, der anhand geeigneter Randbedingungen abgegrenzt werden konnte. Grund dafür war zum einen das begrenzte Budget für Abfluss- und Wasserstandmessungen, um Referenzdaten für größere Gebiete bereitzustellen. Zum anderen sind insbesondere die Niedermoore oft hydraulisch an (über-)regionale Grundwassersysteme angebunden, so dass eine vollständige Abbildung hinsichtlich Datenverfügbarkeit und Rechnerkapazität nicht leistbar ist. Außerdem erfordert die vorliegende Aufgabenstellung eine angemessen hohe räumliche Auflösung, die wiederum viel Rechenkapazität erfordert.

Insbesondere am Modell Weidfilz wurden im 2. und 3. Quartal 2021 umfangreiche Parameterstudien vorgenommen sowie MIKE SHE-Module getestet, um sowohl die adäquate Prozessbeschreibung als auch die Rechenzeit zu optimieren. Die Kalibrierung aller drei Modelle wurden mit dem in MIKE SHE implementierten Optimierungstool AutoCAL verfeinert. Als Kalibrierungszeitraum wurde das Wasserhaushaltsjahr 2020 ausgewählt. Nach Abschluss der Kalibrierung wurde die Validierung am Wasserhaushaltsjahr 2021 durchgeführt (vgl. Abbildung 14).

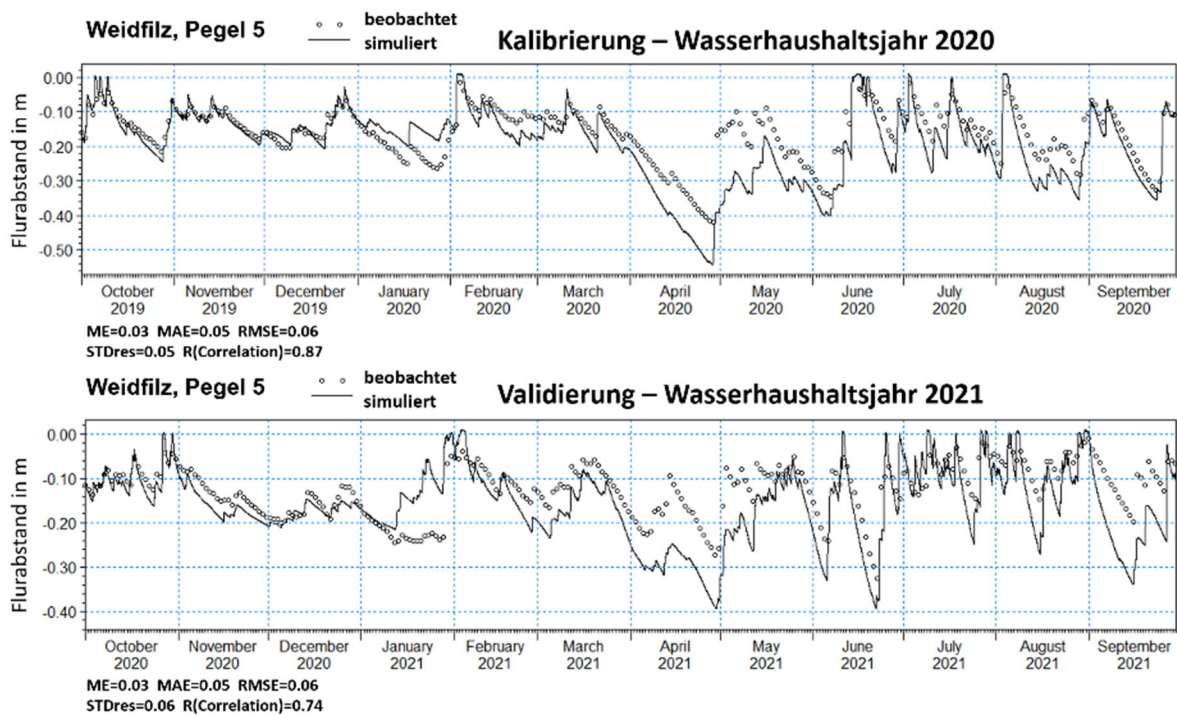


Abbildung 14: Modellerte und gemessene Flurabstände (m) im Weidfilz Modell am Pegel 5 für das Kalibrierungsjahr 19/20 sowie das Validierungsjahr 20/21.

### 6.3.2.2 Analyse von Wiedervernässungsszenarien im Weidfilz

Das teilweise wiedervernässte Hochmoor Königsdorfer Weidfilz wurde ausgewählt, um verschiedene Wiedervernässungsszenarien am Modell zu untersuchen. Es eignet sich dafür besonders gut, da im Istzustand dränierte und bereits in 2015 wiedervernässte Flächen nebeneinander vorhanden sind. Bei der Modellkalibrierung konnten für beide Nutzungen gute Übereinstimmungen zwischen berechneten und beobachteten Wasserständen erreicht werden. Auf dieser Grundlage wurden drei Szenarien entwickelt:

- Szenario 1: Ist-Zustand des Königsdorfer Weidfilz als Referenz
- Szenario 2: Aktive Schlitzgräben zur Drainage wurden aus dem Modell entfernt
- Szenario 3: Vegetations- und bodenhydraulische Parameter wurden angepasst, wie sie nach einer Wiedervernässung und anschließender Sukzession zu erwarten sind. Hierfür wurden die Parameter der nassen Hochmoorflächen auf die zuvor noch drainierten Flächen übertragen.

Alle Szenarien wurden für die Jahre 2018 und 2020 berechnet, um ein besonders trockenes Jahr (2018) und ein neutrales Jahr (2020) im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961-1990 abzubilden. Anschließend wurde der mittlere Wasserstand für saisonale und jährliche Flurabstände ausgewertet. Zur einfachen Darstellung der klimarelevanten Flurabstände wurden die prozentualen Anteile der Untersuchungsfläche in Flurabstände mit einem



Wasserstand größer bzw. kleiner – 0,15 m unter GOK aufgeteilt. Bei größeren Flurabständen steigt die Emission von Treibhausgasen nach Evans et al. (2021) stark an.

### **6.3.2.3 ClimEx im Mike SHE Modell**

Als klimatische Randbedingungen bei der Prognose zukünftiger Wasserstände in den mit MIKE SHE modellierten Testgebieten wurden die in Kapitel 5.4.2 genannten ClimEx-Daten verwendet. Hierfür wurden die rasterbasierten Klimadaten punktspezifisch an den Standorten der TUM-Klimastationen ausgelesen. Die Referenzverdunstung ET<sub>0</sub> wurde mittels der Penman-Monteith-Gleichung berechnet (Allen et al., 1998). ET<sub>0</sub> sowie Niederschlag und Temperatur aus den ClimEx-Daten wurden anschließend genutzt, um die Modelle von 2021 bis 2050 in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung anzutreiben.

### **6.3.3 Regionalisierung der Flurabstände (Wasserstandkarte)**

Auf Basis der Erkenntnisse aus der physikalisch basierten Modellierung, welche Einflussfaktoren den Flurabstand in welcher Weise verändern, wurde eine regionale Übertragung (kurz: Regionalisierung) der Moorwasserstände vorgenommen. Als Basis diente hierbei der Regionalisierungsansatz nach Bechtold et al. (2014). Um die Zielgröße Flurabstand vorherzusagen, wurden mehrere Einflussfaktoren – im Folgenden als Prädiktoren bezeichnet – verwendet. Die Prädiktoren umfassen neben Geofaktoren wie Reliefparametern oder Landnutzung auch Klimagrößen, insbesondere Niederschlag und Grasreferenzverdunstung ET<sub>0</sub> in unterschiedlichen zeitlichen Aggregationen.

Dabei wird mittels statistischer Algorithmen auf Basis von Maschinellem Lernen (ML) eine Regression zwischen Prädiktoren und beobachtetem Flurabstand hergestellt. Dieser trainierte Algorithmus kann anschließend verwendet werden, um anhand der Prädiktoren den Flurabstand an Standorten vorherzusagen, an denen keine Messwerte vorhanden sind. Um dies zu realisieren, wurde ein Basisraster mit 25 m Rasterweite für alle bayerischen Moorflächen angelegt. Auf Basis dieses Rasters, in dem jeder Zelle eine eindeutige ID zugeordnet ist, wurden die Prädiktoren abgeleitet und mit den Moorpegelstandorten verschnitten.

#### **6.3.3.1 Anforderungen an den Trainingsdatensatz**

Prognosemodelle auf Basis künstlicher Intelligenz sind stark abhängig von der Qualität und Quantität der verwendeten Trainingsdaten. Je mehr Datenpaare von Prädiktoren und Zielgröße (hier: Flurabstand des Moorwasserspiegels) zur Verfügung stehen, desto mehr unterschiedliche Kombinationen von Prädiktoren und Zielgrößen können erlernt und im Idealfall reproduziert werden. Dabei darf jedoch die Qualität der Daten nicht vernachlässigt werden, da sonst unter Umständen fehlerhafte Regressionen trainiert werden. Um die Zielsetzung einer dynamischen Wasserstandkarte zu realisieren, war es nötig, sowohl eine möglichst hohe Anzahl an Pegeln als auch möglichst lange Wasserstandzeitreihen zu erreichen. Die Anzahl und räumliche Anordnung der Pegel ist dabei maßgeblich dafür entscheidend, wie gut in der Fläche vorhergesagt werden kann. Zusätzlich ist die Länge der Messreihen essenziell, um eine gute Regression mit Klimaparametern und damit eine gute zeitliche Dynamik der Wasserstandkarte zu erzielen.

### 6.3.3.2 Datengrundlage für die Zielgröße Flurabstand

Für die Regionalisierung der Flurabstände in den bayerischen Mooren wurden ausschließlich Daten von Automatik-Moorpegeln aus verschiedensten Institutionen zusammengetragen (vgl. Anhang 13.1). Die Daten wurden in der WISKI-Datenbank (siehe Kapitel 6.3.1) abgelegt und hinsichtlich Datenqualität überprüft. Im ersten Schritt wurden alle Moorpegel ausgewählt, für die entweder der Flurabstand bereits vorlag, oder alle Informationen vorhanden waren, um diesen anhand der gemessenen Wasserstände zu berechnen. Im zweiten Schritt wurden Pegel mit unklarer Informationslage nachbearbeitet. Nach Rückfrage bei den jeweiligen Institutionen konnten teilweise fehlende Informationen wie Sensortiefe unter Geländeoberkante (GOK) ermittelt und der Flurabstand nachträglich quantifiziert werden. Moorpegel, denen nicht eindeutig ein Flurabstand zugeordnet werden konnte, wie z.B. aufgrund fehlender Angaben zur GOK, wurden nicht mit in den Datensatz aufgenommen. Eine Verschneidung mit dem Digitalen Geländemodell (DGM) wurde aufgrund der teilweise beträchtlichen Höhenungenauigkeit auf Moorstandorten und der dadurch entstehenden Fehlerfortpflanzung ausgeschlossen. Als Basis-Zielgröße wurden aus den kontinuierlichen Zeitreihen Monatsmittelwerte erzeugt. Mittels visueller Prüfung der Flurabstandsganglinien wurden Monate mit Datenlücken und trockenen Pegeln (konstante Ganglinie am tiefsten Messpunkt) nicht mit in den Datensatz aufgenommen. Im Laufe der ersten Tests mit dem Modell hat sich darüber hinaus gezeigt, dass Pegel nahe der Landesgrenze ebenfalls zu Problemen führen können, da die Geodatenbasis nur bis zur Landesgrenze verfügbar war. Diese wurden daraufhin aus dem Datensatz entfernt. Basierend auf Messwerten aus den Jahren 2010 bis 2021 ergab sich somit ein Datensatz von 280 Moorpegelmessstellen mit 9074 Monatsmittelwerten.

### 6.3.3.3 Ableitung von Prädiktoren

Auf Basis der von Bechtold et al. (2014) verwendeten Prädiktoren wurden die in KliMoBay verwendeten Prädiktoren ausgewählt und ggf. angepasst. Außerdem wurden zusätzliche Prädiktoren eingebunden, die von Bechtold et al. nicht verwendet wurden (Friedrich et al. in prep.). Um die statische Wasserstandkarte zu einer dynamischen Karte umzuwandeln, wurden zunächst die Prädiktoren in Geofaktoren (im weiteren auch Geo-Prädiktoren genannt) und Klimaparameter (im weiteren auch Klima-Prädiktoren) unterteilt. Die Geofaktoren sind dabei unveränderlich in der Zeit und nur in der Fläche variabel. Die Klimaparameter sind hingegen sowohl in Zeit als auch in der Fläche variabel. Für letztere wurden der Niederschlag  $N$  und die Referenzverdunstung nach Penman-Monteith ( $ET_0$ ) als Monatsmittelwerteraster des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2019) in einem Zeitraum von 2009 bis 2021 auf das KliMoBay-Basisraster übertragen und als Attributtabelle abgespeichert. Damit der ML-Algorithmus klimatische Einflüsse, die länger als einen Monat zurückliegen, erkennen kann, wurden die Klimadaten zu gleitenden Mitteln über unterschiedliche Zeiträume aggregiert. Für jeden Monat, in dem ein Flurabstand vorhergesagt wird, existieren 14 Niederschlags- und 14 Verdunstungs-Prädiktoren: Klima im Zeitschritt  $t$ , Klima im vergangenen Monat (Zeitschritt  $t-1$ ), sowie der gleitende Mittelwert zum Zeitschritt  $t$  mit bis zu 12 vorangehenden Monaten (vgl. Gleichung 3 und Tabelle 2). Der Gleitende Mittelwert am Bsp. Niederschlag von  $n$  Monaten im Zeitschritt  $t$  wird wie folgt berechnet:

$$N^{(n)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} N(t-i) \quad (3)$$

Die vom DGM abgeleiteten Reliefparameter lassen sich nach Bechtold et al. (2014) weiter in drei Klassen einteilen:

- Prädiktoren mit radialen Pufferzonen,
- Distanz-Prädiktoren und
- Senken-Prädiktoren.

Prädiktoren mit radialen Pufferzonen sollen den Einfluss der Umgebung auf einen Punkt projizieren. Die Standardabweichung der Höhenwerte des DGM ist dabei ein Maß für den anthropogenen Einfluss auf die Geländeoberfläche durch indirekte Sackungen infolge von Dränagemaßnahmen oder direkter Bearbeitung in Form von Entwässerungsgräben und Torfstichen. Distanz-Prädiktoren übergeben dem Algorithmus Informationen, wie weit Torfstiche, Gräben oder anderweitige Störfaktoren im Moor von einem Punkt entfernt sind. Senken sollen Bereiche identifizieren, in denen ein Einstau möglich ist bzw. Oberflächenwasser nicht frei ablaufen kann.

Tests mit den Prädiktoren „topographic wetness index“ und „relative Höhe“, die von Bechtold et al. (2014) verwendet wurden, zeigten im Vergleich zu den in KliMoBay neu entwickelten Standardabweichungs-Prädiktoren schlechtere Leistungen in der Regression. Schließlich ergab sich eine Liste von 35 Prädiktoren, die als Basis für die Vorhersage des Wasserstandes dienten (siehe Tabelle 2/Tabelle 1):

Tabelle 2: Liste aller Prädiktoren, die in das endgültige Modell einbezogen wurden; t ist der aktuelle Zeitschritt (Monat), t-1 der Vormonat, t-2 der vorletzte Monat; Gleitender Mittelwert s. Gleichung 3.

<b>Klima Prädiktoren :</b>	
<b>Niederschlag</b>	<b>Ref. Verdunstung</b>
N (t)	ET0 (t)
N (t-1)	ET0 (t-1)
$(N (t) + N (t-1)) / 2$	$(ET0 (t) + ET0 (t-1)) / 2$
$(N (t) + N (t-1) + N (t-2)) / 3$	$(ET0 (t) + ET0 (t-1) + ET0 (t-2)) / 3$
...	...
s. Gleichung (3)	s. Gleichung (3)
...	...
$(N (t) + \dots + N (t-12)) / 13$	$(ET0 (t) + \dots + ET0 (t-12)) / 13$
<b>Geoprädiktoren :</b>	
Landnutzung	
MBK_25	
STD_DGM1_Puffer25	
STD_DGM1_Puffer50	
STD_DGM5_Puffer100	
Distanz_STD_DGM1_>15cm	
Senken_DGM5	

Als Geo-Prädiktoren wurden insgesamt sieben ausgewählt (siehe Tabelle 2). Dazu gehören

1. **Landnutzung:** auf Basis der in Projekt 3 erarbeiteten Landnutzungskulisse
2. **MBK\_25:** Moorbodenkarte im Maßstab 1:25.000 (MBK), in der Anmoorböden mit den Niedermooren zusammengelegt wurden
3. **STD\_DGM1\_Puffer25:** Standardabweichung aller Zellen des 1 x 1 m-DGM innerhalb einer quadratischen 25 x 25 m Pufferzone, die jeweils einer Zelle des KliMoBay-Basisrasters entspricht

4. **STD\_DGM1\_Puffer50**: Standardabweichung aller Zellen des 1 x 1 m-DGM innerhalb einer radialen 50 m-Pufferzone, deren Mittelpunkt einer Zelle des KliMoBay-Basisrasters zugeordnet ist.
5. **STD\_DGM5\_Puffer100**: Standardabweichung aller Zellen des 5 x 5 m-DGM innerhalb einer radialen 100 m-Pufferzone, deren Mittelpunkt einer Zelle des KliMoBay-Basisrasters zugeordnet ist.
6. **Distanz\_STD\_DGM1\_>15cm**: Auf Basis des Prädiktors STD\_DGM1\_Puffer25 wurde ein binäres Raster erstellt, bei dem jeder Zelle mit einem Wert  $STD > 15$  cm der Wert 1 zugewiesen wurde. Das resultierende Raster repräsentiert z.B. Entwässerungsgräben und Torfstiche. Im Anschluss wurde von jeder Zelle des KliMoBay Basisrasters der Abstand zu Zellen mit dem Wert 1 ermittelt. Dabei wurde der Maximalwert auf 200 m festgesetzt.
7. **Senken\_DGM5**: Auf Basis des 5 x 5 m-DGM wurden Senken bis zu 1 m Tiefe aufgefüllt. Die Differenz zwischen dem resultierenden Raster und dem ursprünglichen 5 x 5 m-DGM ergibt den Prädiktor. Bei der Aggregation auf das 25 x 25 m Basisraster wurden jeweils der Mittelwert gebildet.

#### 6.3.3.4 Erstellung des Machine-Learning-Modells

Für die Berechnung der Flurabstände mittels der Prädiktoren aus Kapitel 6.3.3.3 wurde der Gradient-Boosting-Regressor-Algorithmus verwendet (Pedregosa et al., 2011). Zur Vermeidung einer Überanpassung (overfitting) und somit einer schlechten Vorhersagefähigkeit des Modells wurde eine Gittersuche und fünffache Kreuzvalidierung zur Modellparameteroptimierung durchgeführt. Bei einer Kreuzvalidierung wird der Trainingsdatensatz (75 % des gesamten Datenumfangs) weitere fünf Mal in Trainings- und Testdaten unterteilt. Die Modellparameter, die auf allen 5 Kreuzvalidierungen am besten vorhersagen, werden für das Modell ausgewählt. Die Modellgüte wurde anhand eines unabhängigen, zufällig erzeugten Testdatensatzes (25 % des gesamten Datenumfangs) überprüft, welcher nicht zuvor im Training und der Kreuzvalidierung des Modells verwendet wurde (Müller & Guido, 2017).

Um das Modell noch weiter zu verbessern, wurde die Methode des Ensemble-Modells angewendet (Zounemat-Kermani et al., 2021). Dazu wurden 100 (leicht) unterschiedliche Regressionsmodelle generiert, deren Aufbau sich in der Kombination der Trainings- und Testdaten unterscheidet. Jedes dieser 100 Modelle hat eine jeweils unterschiedliche Auswahl von 75 % Trainings- und 25 % Testdatensätzen aus der Gesamtzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze. Damit wird vermieden, dass 25 % der Trainingsdaten nicht in das Modell mit einfließen. Weiterhin wurden diese Modelle mittels Gittersuche und fünffacher Kreuzvalidierung optimiert. Alle 100 Modelle im Ensemble generieren (gemeinsam) 100 Vorhersagen des Flurabstandes an einem Punkt. Der Mittelwert dieser 100 Modellergebnisse wird schließlich als Ergebnis der Vorhersage ausgegeben. Die Standardabweichung der 100 Vorhersagen ist dabei ein Maß für die Unsicherheit der Vorhersage. Diese Unsicherheit kann flächendifferenziert für ganz Bayern dargestellt werden. Ist die Standardabweichung gering, ist also die Vorhersage von allen 100 Modellen (nahezu) gleich. Ist die Standardabweichung hoch, divergieren die Vorhersagen zwischen den Modellen.

#### 6.3.3.5 Zukünftige Flurabstände auf Basis von ClimEx-Klimaprognosen

Für die Vergleichsjahre 2030, 2040, 2050 wurden die von der LMU zur Verfügung gestellten Rasterdatensätze von Temperatur, Luftfeuchte, Solarstrahlung und Windgeschwindigkeit

(Leduc et al., 2019) mittels der Penman-Monteith Gleichung in Monatsmittelwerte der Referenzverdunstung ET<sub>0</sub> umgerechnet (Allen et al., 1998). Anschließend wurden die Raster der ClimEx Klimaparameter Niederschlag und ET<sub>0</sub> (siehe oben) wie in Kapitel 6.3.3.3 beschrieben prozessiert. Die so generierten Klima-Prädiktoren für 2030, 2040 und 2050 wurden in das trainierte und geprüfte ML Modell (100er-Ensemble) eingespeist, wobei die zeitlich invariablen Geofaktoren nicht verändert wurden.

Die Auswahl der als Ergebnis präsentierten Karten wurde auf Basis der bayernweit gemittelten Jahresflurabstände getroffen. Da die Daten pro Zeitscheibe 2030, 2040 u. 2050 für 10 CLIMEX-Realisationen sowohl in Monats- als auch in Jahresmittelwerten vorliegen, musste eine Vorauswahl getroffen werden. Dabei wurde pro Jahresscheibe die ClimEx Realisation als Karte ausgewählt, welche der trockensten, dem Median und der nassesten der 10 Klima-Realisationen entspricht (vgl. Abbildung 15).

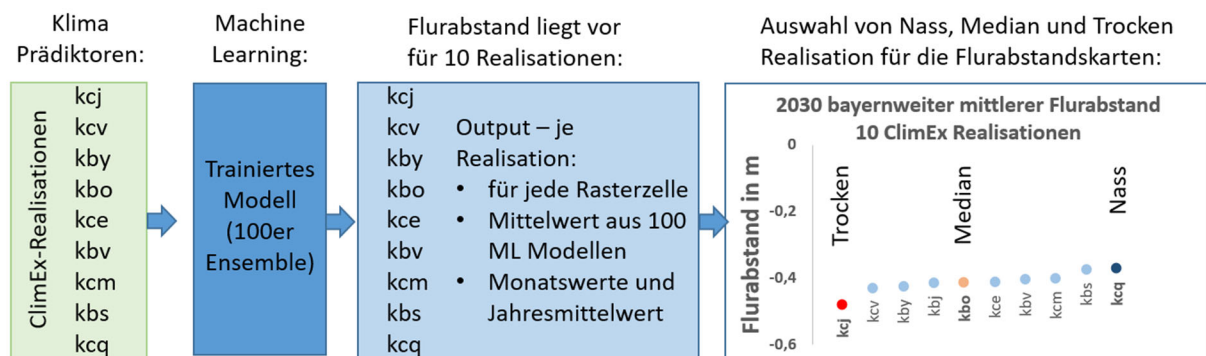


Abbildung 15: Übersicht der Arbeitsschritte von Erstellung der Klima Prädiktoren über die Anwendung des Machine Learning hin zur der Auswahl der dargestellten Karten im Anhang für die Zustände Trocken, Median und Nass exemplarisch an 2030.

### 6.3.4 Wasserbilanz Karten

Zur Abschätzung der Wasserverfügbarkeit wurde die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung (ET<sub>0</sub>) abgeleitet. Für das Referenzjahr 2020 wurden dafür Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes verwendet (DWD, 2022a, 2022b). Für die Vergleichsjahre 2030, 2040, 2050 wurden die in Kapitel 6.3.3.5 genannten Monatswerte auf Grundlage der Klimaprojektionen verwendet.

## 6.4 Ergebnisse

### 6.4.1 Hydrologie, Erfassung von Wasserständen und Abflüssen, Bildung hydrologischer Einheiten, Modellierung von Wasserstandskarten

Als ein wichtiges Resultat von Projekt 2 wurden klimatische und hydrologische Parameter aus den vier in Kapitel 6.3.1 genannten Testgebieten erfasst und in der WISKI-Datenbank gespeichert. Darüber hinaus wurden von anderen Institutionen bereits vorhandene Messergebnisse übernommen (siehe Anhang 13.1). In ausgewählten Gebieten wurden nicht nur Messwerte übernommen, sondern auch die Wartung und das Auslesen der Messwerte an Messstationen aus früheren Forschungsprojekten. Diese Gebiete sind ebenfalls in Anhang 13.1 benannt. Im Hinblick auf den immens hohen Wert möglichst langer Zeitreihen sollte diese Aufgabe auch über das KliMoBay hinaus fortgeführt werden (siehe Kapitel 6.7).

Entsprechend Kapitel 6.3 decken die physikalisch basierten Modelle jeweils Teileinzugsgebiete aus den gesamten Moorkomplexen ab. Im Projektzusammenhang können diese als hydrologische adressierbare Einheiten im Sinne von Modul 9 verstanden werden.

Im Folgenden werden die Resultate unterteilt in Monitoring, physikalisch basierte Modellierung und Regionalisierung vorgestellt.

#### **6.4.1.1 Monitoringaktivitäten der TUM im Rahmen von KliMoBay**

Nach Beschaffung und Installation der erforderlichen Messinstrumente in den drei Testgebieten Weidfilz, Freisinger Moos und Benediktbeuern konnte die Moorhydrologie an den jeweiligen Standorten zuverlässig erfasst werden. Trotz der herausfordernden Umweltbedingungen in den Mooren konnten bis auf wenige Ausfälle kontinuierliche und zeitlich hoch aufgelöste Messreihen ermittelt werden. Die neu gewonnenen Daten waren daher besonders geeignet für die Weiterverwendung in den folgenden Forschungsthemen Modellierung und Regionalisierung.

In Zusammenarbeit mit der LfL wurde auch im Testgebiet Karolinenfeld ein Monitoringprogramm installiert.

Auf dem Gelände der JVA Bernau wurde zudem ein Oberflächenwasserpegel reaktiviert, an dem in früheren Jahren schon über längere Zeiträume Abflüsse erfasst wurden (Jordan et al., 1999).

Anhang 13.2 gibt einen Überblick, welche Messgrößen in den Testgebieten im Einzelnen erfasst wurden.

#### **6.4.1.2 Physikalisch basierte Modellierung mit Mike SHE**

##### *Ist Zustand*

Die Modellergebnisse für die Testgebiete im Istzustand wurden für die Plausibilisierung der Wasserstandskarten (Istzustand 2020) verwendet. Darüber hinaus stehen die Modelle nunmehr als Werkzeuge für weitergehende Untersuchungen bzgl. Wiedervernässungs-Maßnahmen zur Verfügung.

##### *Wiedervernässungsszenarien am Beispiel Königsdorfer Weidfilz*

Für das Königsdorfer Weidfilz wurde das zusätzliche Wiedervernässungspotenzial auf Basis des Flurabstandes untersucht. Als Grundlage hierfür wurde das Trockenjahr 2018 sowie das neutrale Jahr 2020 im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 herangezogen. Die Modellergebnisse des teilweise wiedervernässten Hochmoores in Abbildung 16 zeigen, dass nach Verschließen der verbleibenden aktiven bzw. unzureichend deaktivierten Drainagen eine signifikante Reduktion der Flächen mit einem Wasserstand tiefer als 15 cm unter GOK möglich ist (vgl. Abbildung 17 Szenario 2). Nach zu erwartender hochmoortypischer Sukzession und Einstellung eines neuen Akrotelmwachstums, wie es in großen Teilen der wiedervernässten Flächen bereits geschehen ist, kann eine weitere Verbesserung im Modell abgebildet werden (vgl. Abbildung 17 Szenario 3). Es konnte auch gezeigt werden, dass die Resilienz in extremen Trockenperioden wie zum Beispiel im Sommer 2018 durch die Wiedervernässung deutlich verbessert wurde und der Wasserstand schneller wieder in einen flurnahen Zustand zurückkehrt (Friedrich et al. in prep.).

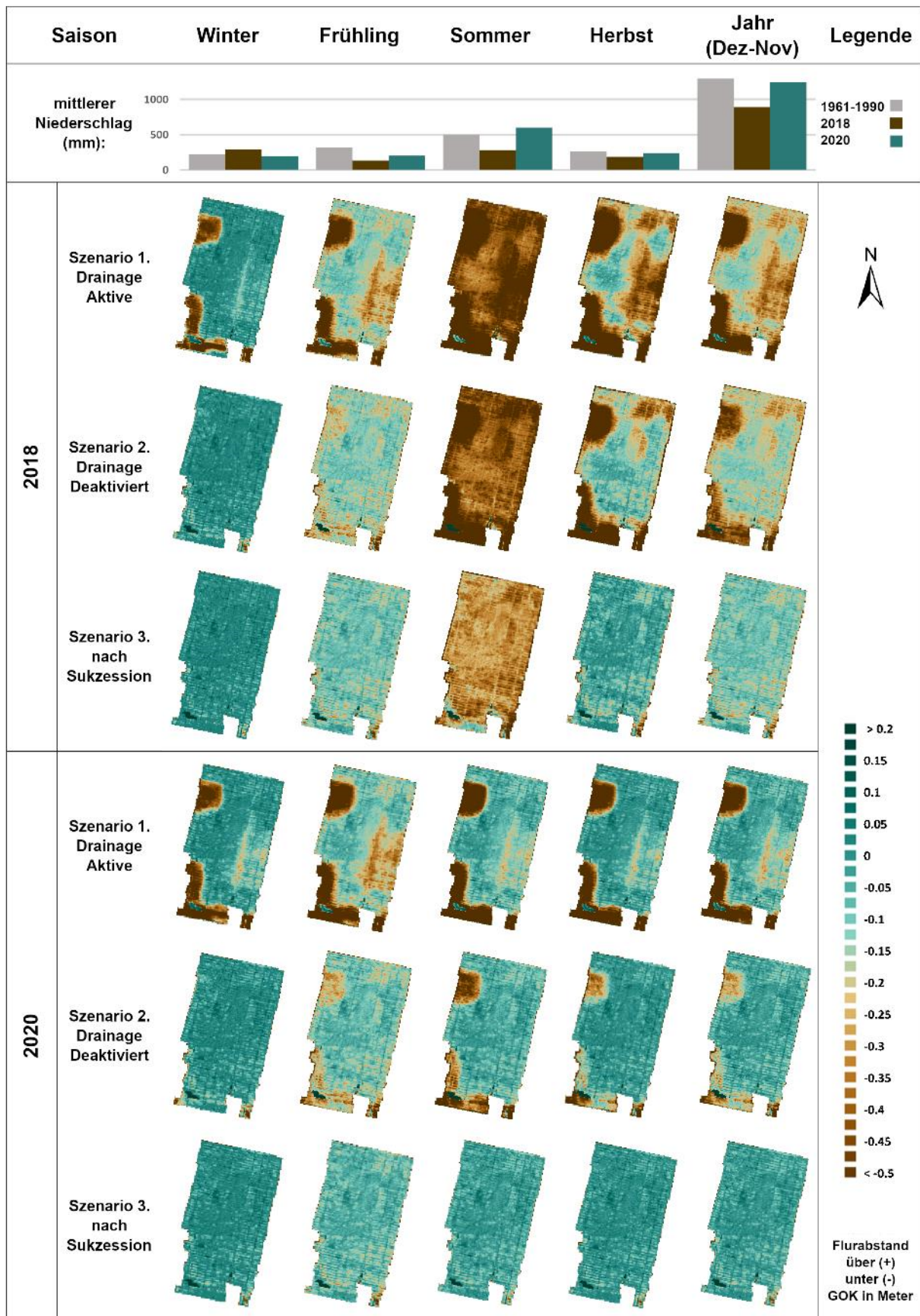


Abbildung 16: Ergebnisse der numerischen Modellierung im zentralen Hochmoorkomplex Königsdorfer Weidfilz. Darstellung des Flurabstands in der Fläche bei unterschiedlichen Wiedervernässungsszenarien (Friedrich et al. in prep).

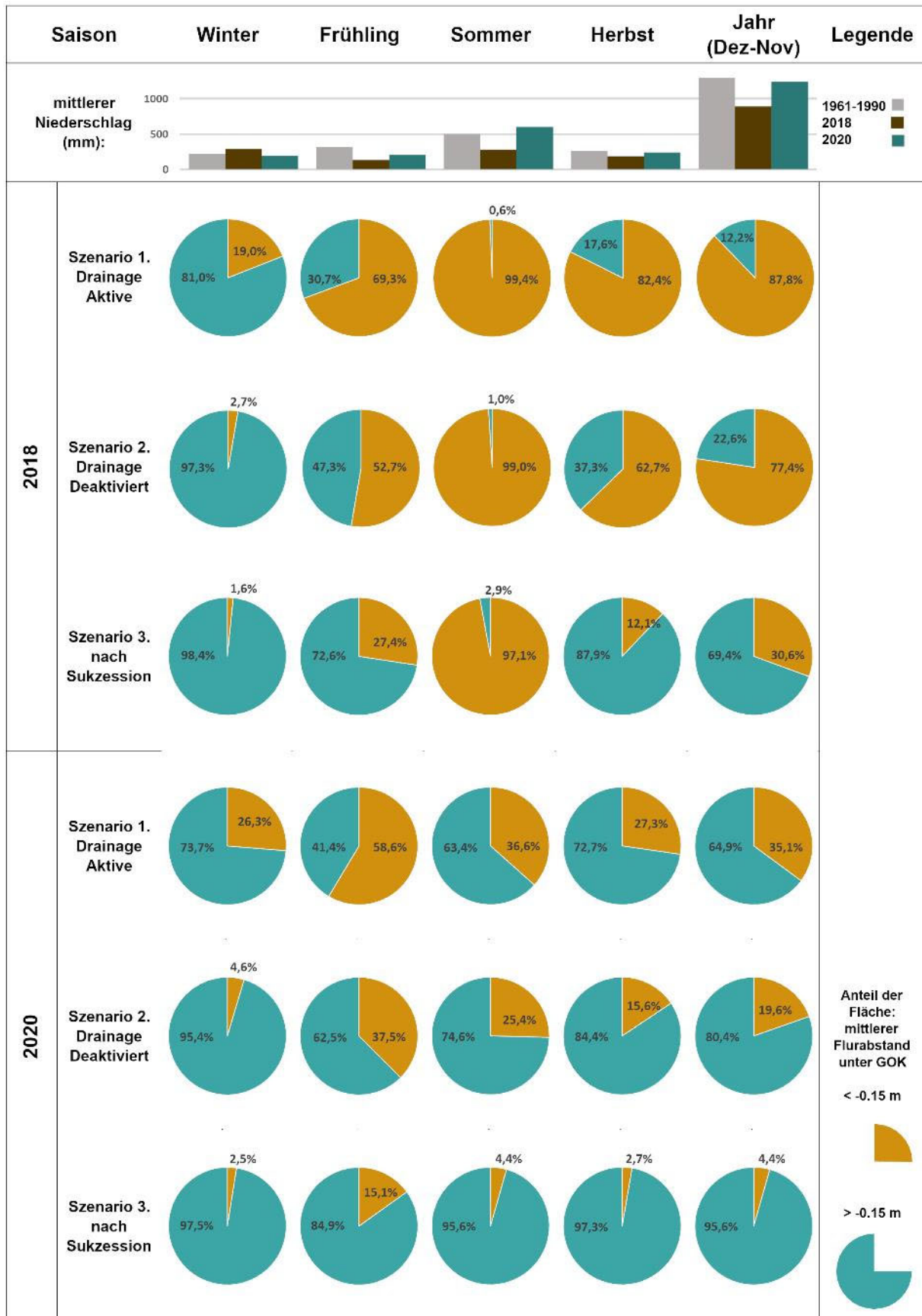


Abbildung 17: Übertragung der Flurabstände aus dem Modell in treibhausgasrelevante und -irrelevante Flächenanteile (Friedrich et al. in prep).



### Zukunftsprognosen auf Basis der ClimEx-Daten

Für die Modelle Königsdorfer Weidfliz und Freisinger Moos wurden Prognosen von 2021 – 2050 mit den in Kapitel 5.4.2 genannten zufällig ausgewählten 10 Realisationen des ClimEx-Ensembles berechnet. Als Folge von zentral veranlassten Maßnahmen zur Energieeinsparung an der TUM brachen alle Modellläufe zu den Zukunftsprognosen für das Testgebiet Benediktbeuern vorzeitig ab. Daher dauert die zeitaufwändige Berechnung nach erneutem Start zum Stand 30.11.2022 noch an. *[Anmerkung der Verfasser: Die Ergebnisse stehen voraussichtlich im Februar 2023 zur Verfügung.]*

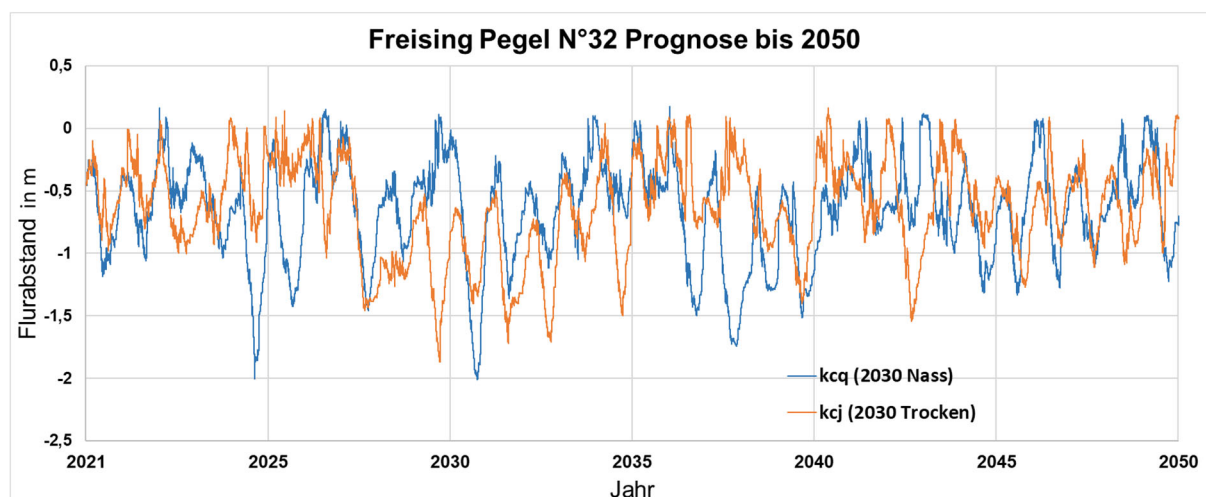


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der simulierten Flurabstände bis 2050 am Beispiel Freisinger Moos (Pegel 32) für die Realisationen kcq (2030 Nass) und kcj (2030 Trocken) (vgl. Abbildung 15).

Nach Analyse der bisher vorliegenden Ergebnisse lassen sich im Allgemeinen keine gravierenden Austrocknungsprozesse bis 2050 erkennen (vgl. Abbildung 18). Jedoch treten auch im prognostizierten Zeitraum weiterhin deutliche Trockenperioden vergleichbar mit 2018 auf, die zu weiterer Degradation und Sackungen in drainierten Mooren führen werden.

#### 6.4.1.3 Regionalisierung der Flurabstände (Wasserstandkarte)

Ein zentrales Ergebnis aus Projekt 2 war die Entwicklung einer dynamischen Wasserstandkarte für die Moorflächen Bayerns einschließlich der Bewertung ihrer Vorhersagekraft. Dabei ist ein unabhängiger Testdatensatz, wie in Kapitel 6.3.3.4 beschrieben, essenziell wichtig. Anhand von Abbildung 19 (a, d) kann gezeigt werden, dass auch Messstellen, die nicht für das Training genutzt wurden, ausreichend präzise vorhergesagt werden konnten. Am Beispiel des Bayerischen Donaumooses (Abbildung 19 c) hat sich jedoch gezeigt, dass insbesondere sehr tiefe Flurabstände aufgrund fehlender flächendeckender Prädiktoren zu Unterflurdränagen bzw. Dränagetiefen schlechter vorhergesagt werden können. Auch oberflächennahe bis eingestaute Flurabstände stellen eine Herausforderung für das ML-Modell dar (Abbildung 19a). Dies wird darauf zurückgeführt, dass zu wenige flächenscharfe Informationen vorliegen, welche Flächen (zu welchem Zeitpunkt) wieder vernässt wurden.

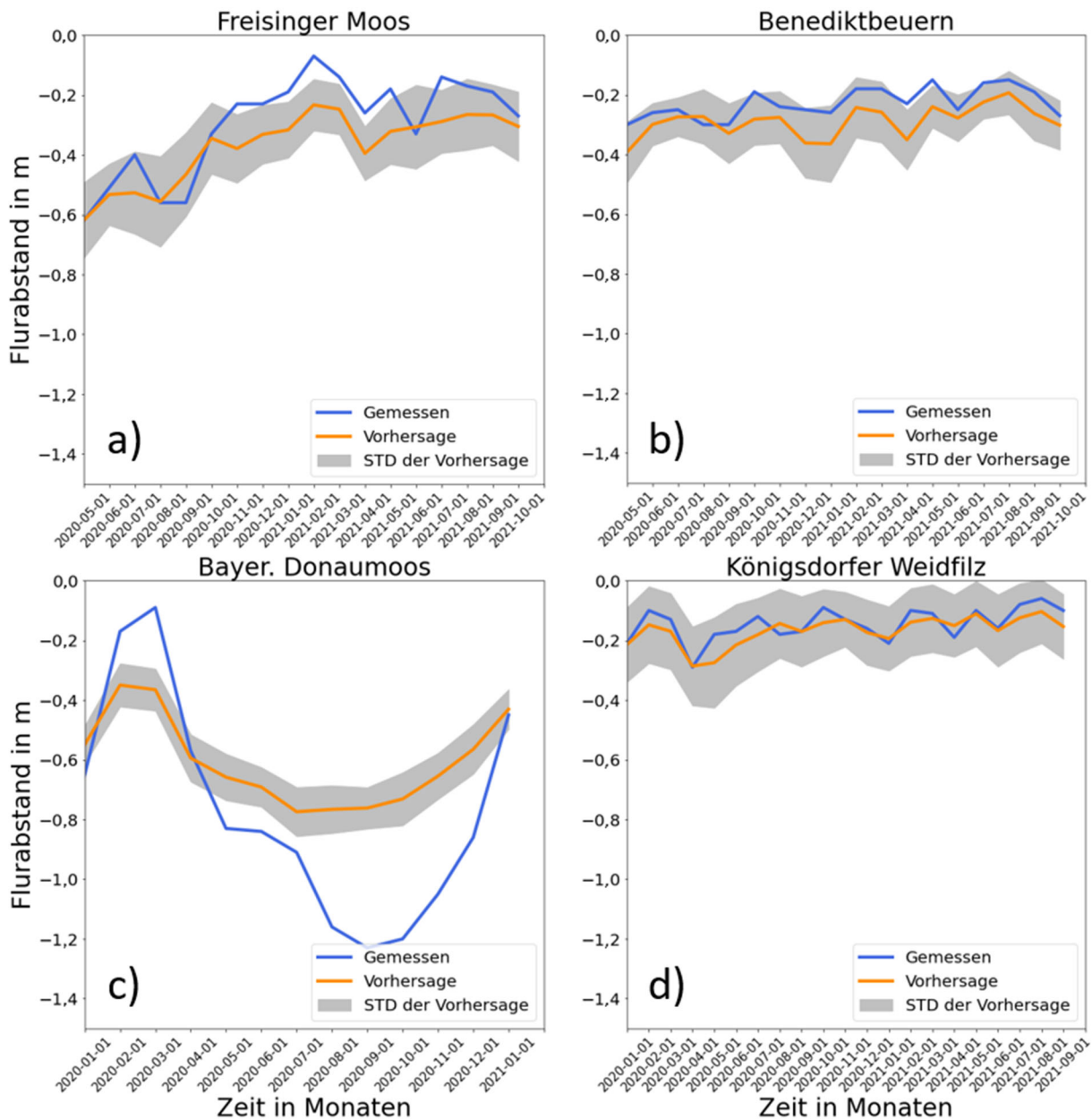


Abbildung 19: Ergebnisse des ML Modells an vier beispielhaften, unabhängigen Messstellen, welche nicht für das Training verwendet wurden. a) Freisinger Moos b) Benediktbeuern c) Bayerisches Donaumoos d) Weidfilz; STD = Standardabweichung (Friedrich et al. in prep).

Nach Analyse der Fehlerverteilung auf dem unabhängigen Testdatensatz (vgl. Abbildung 20, a) konnte gezeigt werden, dass das Ensemble-ML-Modell den richtigen Vorhersagewert (Fehler =  $\pm 0$  m) mit der höchsten Wahrscheinlichkeit trifft. Darüber hinaus zeigte sich in der kumulativen Fehlerverteilung in Abbildung 20 (b), dass ca. 80 % der vorhergesagten Daten innerhalb einer Fehlerspanne von ca.  $\pm 0.25$  m liegen. Mit den unabhängigen Testdaten konnte somit aufgezeigt werden, mit welcher Präzision der Flurabstand an einem dem Modell zuvor unbekanntem Ort vorhergesagt werden kann.

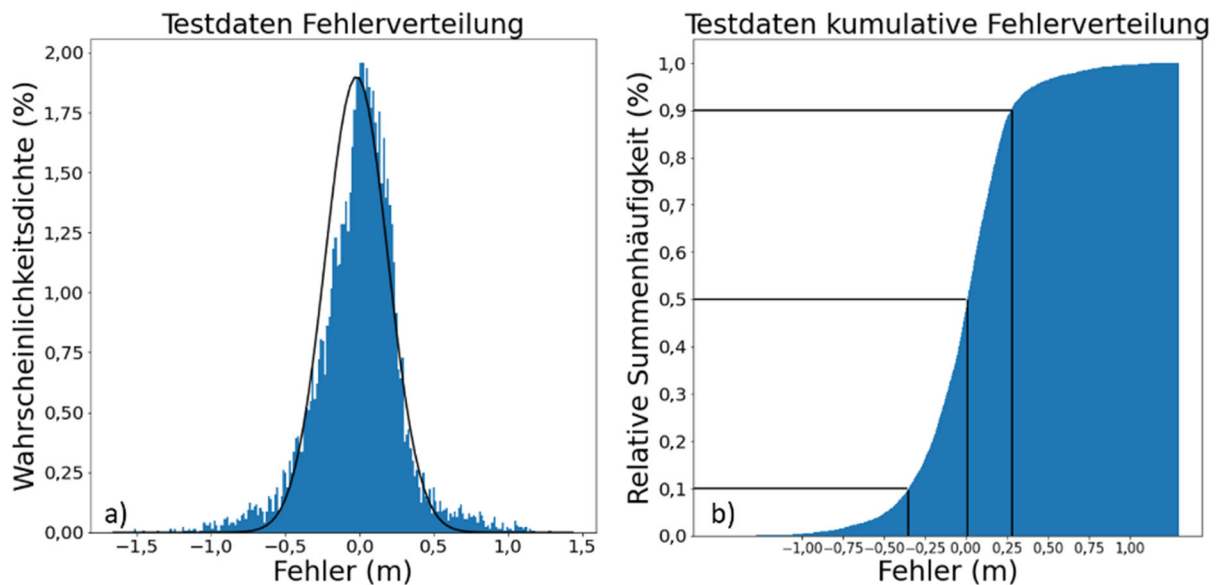


Abbildung 20: a) Fehlerverteilung und b) kumulative Fehlerverteilung der unabhängig vom Training vorhergesagten Testdaten (Friedrich et. al in prep).

Bei der Ensemblemodellierung wurden 100 Modelle nach identischer Vorgehensweise trainiert und getestet – wobei die Trainings- und Testdatensätze zufällig ausgewählt wurden. Festgelegt war, dass für jedes der 100 Modelle 75 % der verfügbaren Datensätze für das Training und die restlichen 25 % für den Test der Modelle verwendet wurden.

Für einen ausgewählten Messpunkt im Bayerischen Donaumoos zeigt die orange Linie in Abbildung 21 c) den Mittelwert aller Vorhersagen und die graue Fläche deren Standardabweichung. Die gemessenen Wasserstände an dem Punkt liegen bis maximal 0,2 m unterhalb des Mittelwerts der 100 Vorhersagen und innerhalb deren Standardabweichung. Außerhalb der Sommermonate ist die Abweichung zwischen Mittelwert der Ensemblevorhersage und beobachteten Flurabständen geringer. Das vollständige Ensemble ist also geeignet, den Wasserstand gut vorherzusagen, wenn man davon ausgehen kann, dass der Messwert im überwiegenden Teil der Trainingsdatensätze enthalten war.

Um zu demonstrieren, wie sehr beobachtete Werte beim Modelltraining die resultierenden Modelle beeinflussen, zeigt Abbildung 21 a) Mittelwert und Standardabweichung aller Vorhersagen, bei denen der Messwert der betreffenden Station im Trainingsdatensatz enthalten war. Im Ergebnis liegen gemessene und prognostizierte Wasserstände deutlich näher beieinander als in Abbildung 21 c). Die Standardabweichung ist deutlich geringer, weshalb die gemessenen Werte in den Sommermonaten mit extrem großen Flurabständen etwas unterhalb der Standardabweichung liegen. Dagegen zeigt Abbildung 21 b) den Mittelwert aller Vorhersagen, bei denen die Messwerte der Station nicht im Trainingsdatensatz enthalten waren. Hier weichen die prognostizierten Werte  $\pm$  Standardabweichung sehr deutlich von den beobachteten Werten ab.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass ein Wert der Ensemblemodellierung darin liegt, dass nicht, wie im herkömmlichen Verfahren, 25 % der Messstationen aus dem Training ausgeklammert werden müssen, um methodisch angemessene Tests zu gewährleisten.

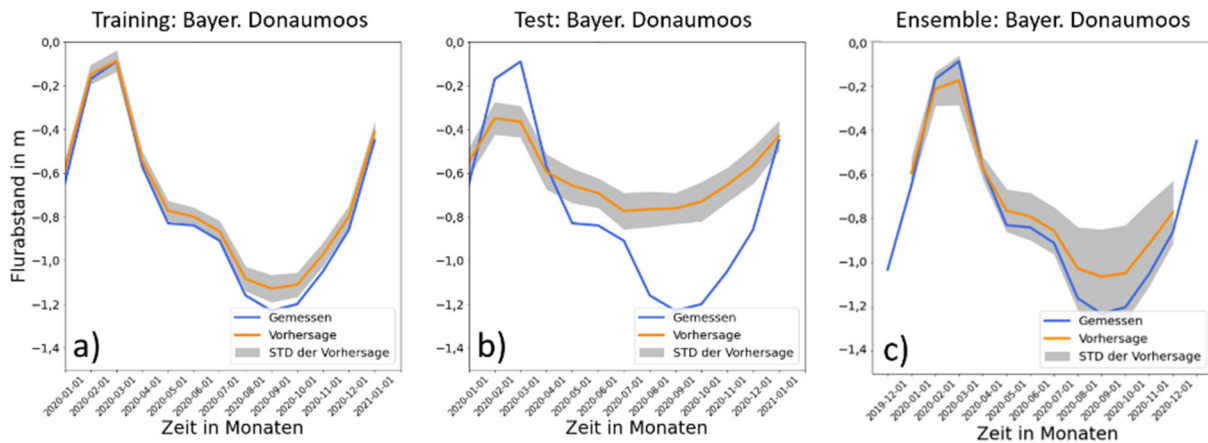


Abbildung 21: Vergleich der Modellanpassung gegenüber den gemessenen Daten zwischen a) Training, b) Test und c) dem 100er Ensemble; STD = Standardabweichung (Friedrich et. al in prep).

Nach Anwendung der 100 sich leicht unterscheidenden Modelle war es auch möglich, die Standardabweichung der resultierenden Flurabstände auszugeben. Diese Information gibt Aufschluss darüber, wie verlässlich bzw. unsicher die Aussage an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt ist. Wie in Abbildung 21 c) zu erkennen ist, divergieren die Modelle stärker in Bereichen tiefer Flurabstände als bei ca. -0,2 m. Daher wurden neben den Flurabstandskarten auch die Standardabweichungskarten für ganz Bayern ausgegeben (vgl. Anhang 13.18. Insbesondere wenn Moorstandorte Charakteristiken aufweisen, die nicht mit dem Trainingsdatensatz abgedeckt wurden, können diese durch die Standardabweichungskarte identifiziert werden.

Mit der Anwendung des trainierten Ensemble-Modells wurden letztendlich für alle Moorflächen Bayerns Flurabstandskarten und Karten der Standardabweichung der Flurabstände für das Referenzjahr 2020 sowie die Klimaprognosen für die Jahre 2030, 2040 und 2050 erstellt. Die Resultate liegen digital jeweils als Monatsmittel und als Jahresmittelwerte vor (siehe Tabelle 3: Übersicht über verfügbare Ergebnisse der Regionalisierung):

Tabelle 3: Übersicht über verfügbare Ergebnisse der Regionalisierung

Zeitraum	Berechnete Kenngrößen	Zeitliche Auflösung
Jahr 2020 (Ist-Zustand)	Flurabstände der Moorwasserspiegel und Standardabweichung der Ergebnisse des Modell-Ensembles	Monatsmittelwerte und Jahresmittelwerte
Jahr 2030 (Prognose)		
Jahr 2040 (Prognose)		
Jahr 2050 (Prognose)		

Aus diesem Datensatz wurden anschließend die Karten für diesen Bericht ausgewählt und im Anhang 13.18 zur Verfügung gestellt. Für die Prognosen wurden entsprechend Kapitel 6.3.3.5 jeweils neben dem Median die Realisierungen mit trockensten und nassesten Bedingungen für die Flurabstandskarten ausgewählt.

Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung von 25 x 25 m können Zonen mit besonderem Handlungsbedarf aufgrund extrem ungünstiger Flurabstände auch innerhalb von Moorflächen und nicht nur auf überregionaler Ebene identifiziert werden (siehe Abbildung 22).

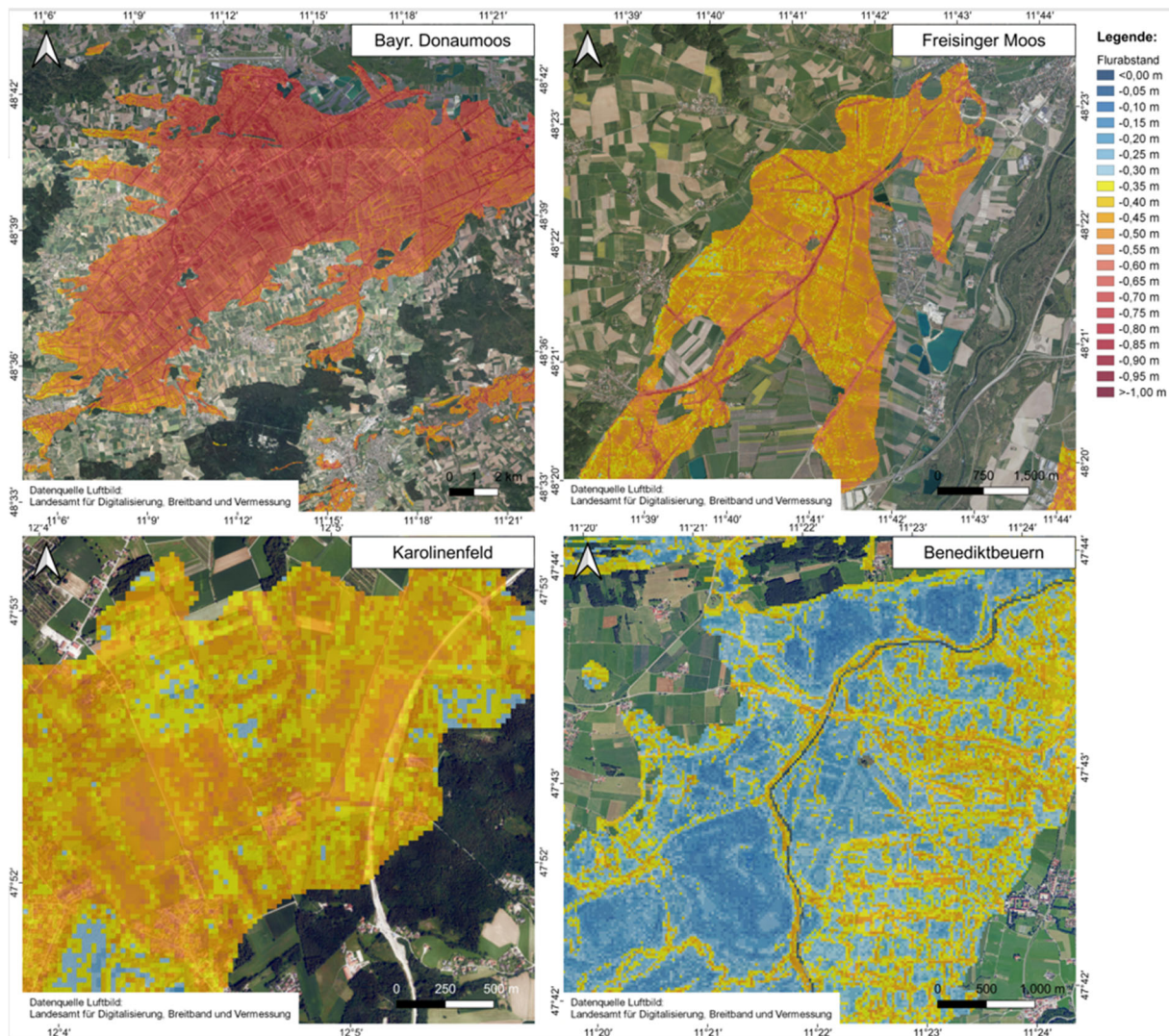


Abbildung 22: Flurabstands Detailkarten für das Referenz Jahr 2020. a) Bayerisches Donaumoos, b) Freisinger Moos, c) Karolinenfeld und d) Benediktbeuern. Dunkelblau: flurnahe Wasserstände bzw. nass, rot: große Flurabstände bzw. trocken.

#### 6.4.2 Wasserverfügbarkeit, Ent- & Bewässerungsnetz, Renaturierbarkeit

Entsprechend Kapitel 6.3.4 wurde für das Basisraster, also für alle bayerischen Moorstandorte, die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung ( $ET_0$ ) flächendifferenziert abgeleitet. Damit kann die standortbezogene Wasserverfügbarkeit aus dem Niederschlagsdargebot in erster Näherung abgeschätzt werden. Entsprechend Leduc et al. (2019) ist dabei im Jahresmittel nicht von signifikanten Änderungen gegenüber dem Istzustand auszugehen. Lediglich in Zentralbayern ist in der Hinsicht eine Verschlechterung gegenüber dem Istzustand zu erwarten. Innerjährlich können sich ungünstige Änderungen durch Verschiebung von advektiven zu vermehrt konvektiven Niederschlägen und längeren Trockenperioden ergeben.

Das gesamte Dargebot eines Moorstandortes ergibt sich aus dem jeweiligen ober- und unterirdischen Einzugsgebiet. Die Ausweisung der jeweiligen Einzugsgebiete für alle bayerischen Moore ist im Rahmen von KliMoBay nicht leistbar und bleibt

Detailuntersuchungen im Rahmen einzelner Maßnahmenplanungen vorbehalten (vgl. Kapitel 6.4.1)

Im Rahmen weiterführender Arbeiten kann die oben genannte standortbezogene Wasserverfügbarkeit dahingehend ausdifferenziert werden, dass anstatt der potenziellen Verdunstung  $ET_0$  die tatsächliche bzw. aktuelle Verdunstung  $ET_A$  als Funktion (i) der Vegetation und (ii) der Bodenspeicherfüllung angesetzt wird. Zur Unterstützung der Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen an einzelnen Moorstandorten könnte dies mit einem für Moorstandorte geeigneten konzeptionellen Wasserhaushaltsmodell flächendeckend und standardisiert bereitgestellt werden. Zur Laufzeit von KliMoBay erfolgte eine vergleichbare Modellierung mit der Software AKWA-M (Münch, 2017) für das Testgebiet Karolinenfeld im Rahmen der Masterarbeit von Lauber (2021).

Ob ein Moorstandort renaturierbar ist, hängt neben dem notwendigen Wasserdargebot von Mächtigkeit und Zustand der noch vorhandenen Torfschicht ab. Vorhandene Informationen dazu wurden von Projekt 3 (Modul 5) zusammengetragen.

Mangels geeigneter Datengrundlagen ist das Ent- und Bewässerungsnetz nicht bayernweit ableitbar. Insbesondere Hochmoorschlitzgräben und Unterflurdrainagen sind nicht flächendeckend kartiert.

## 6.5 Output-Indikator

Die Wiedervernässung von 3 ha Grünland auf dem staatlichen Versuchsgut in Karolinenfeld führte gemäß den Treibhausgasmessungen der HSWT im Projekt zu einer Treibhausgasminderung von rund 70 t  $CO_2$ -Äqu. pro Jahr. Es war geplant, eine angrenzende tief entwässerte Niedermoorfläche von 10 ha im Staatsgut Karolinenfeld in Stufen wiederzuvernässen, um hydrologische Zusammenhänge zu messen und aktuelle Fernerkundungsmessungen zu kalibrieren. Die Baumaßnahmen dafür verzögerten sich, weil die in den Drainageplänen eingezeichneten Drainagerohre nur teilweise im Boden vorhanden waren und damit eine komplette Neuplanung und sehr viel aufwändigere Umsetzung nötig war. Die Baumaßnahme wurde im Herbst 2022 durchgeführt. Dadurch werden die  $CO_2$ -Emissionen auf der Fläche erwartungsgemäß ebenfalls ungefähr halbiert und weitere 23,4 t  $CO_2$ -Äqu.  $ha^{-1} a^{-1}$  Emissionsminderung, insgesamt also zusätzlich 234 t  $CO_2$ -Äqu. pro Jahr erzielt.

Durch die Innovationen und Ergebnisse des KliMoBay Projekts wird die Umsetzung des Masterplans Moore Bayern beschleunigt. Erstmals liegen nun konkrete Wasserstandsdaten vor, um mit Betroffenen gezielt in Planungsräumen bis hin zu konkreten hydrologisch adressierbaren Einheiten in den Dialog zu treten.

Erstmals wurde für Bayern eine statistische Karte der Grundwasserstände in Moorböden erstellt. Sie bildet die Grundlage für eine faktenbasierte Kommunikation mit Betroffenen, und zeigt prioritäre Handlungsräume für den Klimaschutz auf Planungsmaßstab auf. Der Grundwasserstand bestimmt auf den meisten Moorflächen die Endlichkeit der entwässerungsbasierten Nutzung und ist damit eine zentrale Information für den Handlungsbedarf im Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung. Erstmals wurden monatliche Grundwasserstände modelliert. Sie sind für Abstimmungen und Abwägungsprozesse mit Nutzern und bei Naturschutzaspekten sehr wichtig. Ebenso wurde unter Verwendung von

relativ extremen Klimaszenarien gezeigt, dass die Wiedervernässbarkeit der Moore in den nächsten Jahrzehnten grundsätzlich in Bayern erhalten bleibt. Insgesamt wurden wichtige Fachgrundlagen geschaffen, damit die politisch geforderten 55.000 Hektar Moorschutz bis 2040 erfolgreich umgesetzt werden können.

## 6.6 Diskussion

### *Monitoring*

Als Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte wurde im Rahmen des Projekts 2 mittels eigenen Monitoring-Aktivitäten und ergänzender Akquise vorhandener Daten der bislang umfassendste Bestand an Moorwasserstanddaten in Bayern zusammengetragen. Im Hinblick auf den Wert und die Notwendigkeit entsprechender Datengrundlagen für zukünftige Moorschutzaktivitäten ist es unbedingt erforderlich, diesen Datenbestand zu pflegen und fortzuschreiben. Mit der WISKI-Datenbank wurde eine softwaretechnische Lösung implementiert, die auch in der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung verwendet wird. In diesem Zusammenhang ist es auch hilfreich festzulegen, an welcher Institution diese „Datenbank Moormonitoring“ zukünftig angesiedelt sein wird. Zum Beispiel erklärte die Allgäuer Moorallianz (Dr. Ulrich Weiland, E-mail vom 22.12.2021) ihnen sei es noch „*unklar, inwieweit LfU oder andere Stellen in Bayern eine Koordinierung der Datenverwendung aus öffentlichen Projekten beabsichtigen.*“ Es ist zu hoffen, dass diesbezügliche Klarheit die Bereitstellung vorhandener Daten befördert.

### *Physikalisch basierte Modellierung mit MIKE SHE*

Mittels physikalisch basierter Prozessmodellierung in den drei Testgebieten konnte gezeigt werden, dass die modellbasierte Analyse von naturnahen und entwässerten Hoch- und Niedermooren möglich und hilfreich ist. Der Modellaufbau inklusive Wassermanagement (Drainagen u. Entwässerungsgräben) ist methodisch anspruchsvoll. Es hat sich gezeigt, dass eine hohe räumliche Auflösung der Modellgeometrie zwischen 5 und 10 m essenziell ist, um die oft kleinräumigen Strukturen angemessen abzubilden. Dies führte zu sehr langen Rechenzeiten von bis zu 8 Stunden für ein Modelljahr.

Berechnete Wiedervernässungsszenarien für das bislang teilweise renaturierte Hochmoor Weidfilz zeigten anhand eines eher feuchten und eines eher trockenen Jahres, welches Verbesserungspotenzial durch Deaktivierung von Dränagen und nachfolgender Sukzession zu erwarten ist. Solche Szenarioanalysen zeigen die Stärken und das Potenzial prozessorientierter Modellwerkzeuge. Die Herangehensweise ist prinzipiell auch auf andere Standorte übertragbar. So können auch die Modelle für das Freisinger Moos und für Benediktbeuern zukünftig für Wiedervernässungsszenarien oder die modellbasierte Begleitung von Maßnahmen zum Wassermanagement genutzt werden.

Mit allen drei in KliMoBay aufgebauten MIKE SHE-Modellen wurden Zukunftsprognosen gerechnet, bei denen die von Projekt 4 bereitgestellten ClimEx-Daten als klimatische Randbedingungen genutzt wurden. Dabei ist anzumerken, dass die Moorsackung im MIKE SHE-Modell (Veränderung der Geländeoberkante und der physikalischen Eigenschaften des Torfs) nicht implementiert werden konnte. Dies schränkt die Aussagekraft der Modellaussagen für zukünftige Zeiträume ein. Die naturgetreue Umsetzung zeitlich variabler Gelände-Oberkanten sowie die zeitliche Veränderung der hydraulischen Charakteristika durch

Torfdegradation in einem numerischen Modell ist generell eine Herausforderung, für die es nach Kenntnisstand der Autoren aktuell (noch?) keine zufriedenstellende Lösung gibt.

Bei der Modellierung des Hochmoors Weidfilz hat sich außerdem gezeigt, dass laterale Flüsse und die hohe Porosität im Akrotelm verbunden mit den Bult-Schlenken-Komplexen in MIKE SHE nur auf Umwegen umgesetzt werden können. Über den Oberflächenabfluss kann der laterale Fluss abgebildet werden, während die hohe Porosität über die ungesättigte Zone modelliert wird. Diese Herangehensweise ist eine stark vereinfachte Abbildung der tatsächlichen physikalischen Prozesse. In Zusammenarbeit mit dem Softwareentwickler DHI könnte die Software mit moorspezifischen Erweiterungen weiterentwickelt werden. Eine entsprechende Weiterentwicklung seitens DHI ist vorhanden. Da in den landwirtschaftlich genutzten Flächen in Benediktbeuern und im Freisinger Moos kaum natürliche oder naturnahe Akrotelmschichten vorkommen, ist dieser Aspekt dort vernachlässigbar.

### *Regionalisierung*

Die flächendeckende Modellierung von Flurabständen in bayerischen Mooren mittels künstlicher Intelligenz bzw. Machine Learning-Algorithmen war insgesamt erfolgreich. Die in Projekt 2 entwickelte bayernweite, dynamische Wasserstandkarte weist im Vergleich mit der zeitlich invariablen Vorgängerversion von Bechtold et al. (2014) folgende Innovationen auf:

- Dynamisierung (also saisonale bzw. monatliche Wasserstandskarten)
- Die Standardabweichung der Geländehöhen im 1 x 1 m-DGM als Indikator für Dränagen, die sonst mangels Datengrundlage kaum zuverlässig abzubilden sind
- Ensemblemodellierung, die eine flächendifferenzierte Einschätzung der Modellunsicherheit erlaubt (anschaulich und verständlich dokumentiert in einer Karte der Standardabweichung als Ergänzung zur Wasserstandkarte)

Gleichwohl ist anzumerken, dass die erzeugten Wasserstandskarten nicht im umgangssprachlichen Sinne ‚genau‘ sind, sondern dass auch die prognostizierten Wasserstände mit Unsicherheiten behaftet sind. Jedoch darf betont werden, dass 80 % der Werte mit einem Fehler von  $\pm 0,25$  m (vgl. Abbildung 5) aus fachlicher Sicht als großer Erfolg zu werten sind. Bechtold et al. (2014) geben für ihre deutschlandweite Wasserstandkarte eine Spannweite von ca.  $\pm 0,5$  m an.

Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass Wasserstände an Standorten mit bestimmten Charakteristika, die nicht durch Wasserstandsmessungen abgedeckt waren, stärker vom vorhergesagten Flurabstand abweichen können. So ist im Rahmen von Plausibilitätsprüfungen aufgefallen, dass insbesondere bei naturnahen großflächigen Moorkomplexen sowie nach Wiedervernässung eingestauter Bereiche systematisch ein zu großer Flurabstand berechnet wurde. Dies lässt sich neben fehlenden Wasserstandbeobachtungen (mit automatischen Pegeln) in naturnahen Mooren auf fehlende Geodaten zur Unterscheidung von wiedervernässten und unbeeinflussten Mooren zurückführen. Für die meisten bei der Modellerstellung einbezogenen Pegel war die Information zum Wiedervernässungsstatus zwar gegeben. Jedoch gibt es als Grundlage für die Modellanwendung (bayernweite Übertragung) bis dato keine zentrale flächenscharfe Erfassung, wo bereits wiedervernässt wurde (einschließlich dem Zeitpunkt der Wiedervernässung). Eine ähnliche Problematik zeigt sich bei den zu nass vorhergesagten tiefen Flurabständen wie zum Beispiel im Bayerischen Donaumoos. Hier kann davon ausgegangen werden, dass flächendeckende Unterflurdrainagekarten sowie die Einbindung



von Grabentiefen als Prädiktor die Vorhersage verbessern würden. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass im Modell für die Regionalisierung, wie auch im MIKE SHE-Modell, keine Torfsackung implementiert werden konnte.

Basierend auf diesen Erfahrungen werden in Kapitel 6.7 konkrete Datenanforderungen benannt, die bei einer Fortschreibung der Wasserstandskarten zu einer weiteren Verbesserung der Qualität beitragen können, die allerdings aktuell nicht vorliegen. Vor diesem Hintergrund ist eine zyklische Aktualisierung der Karten im Abstand von ca. 2 bis 3 Jahren wünschenswert.

### *Wasserverfügbarkeit*

Die flächendeckend ermittelte klimatische Wasserbilanz erlaubt standortbezogene Aussagen zur Wasserverfügbarkeit. Eine integrale Betrachtung des Wasserhaushalts in einem Mooregebiet erfordert zusätzlich die Kenntnis des unterirdischen Einzugsgebiets, das insbesondere bei grundwasserdominierten Niedermooren im Allgemeinen deutlich über das oberirdische Einzugsgebiet hinausgeht. Bei der gegebenen Datenlage ist eine flächendeckende, standardisierte Bearbeitung dieses Aspekts jedoch praktisch nicht machbar. Eine umfassende Bewertung des Wasserhaushalts einzelner Moore bleibt daher vertieften standortbezogenen Betrachtungen vorbehalten, wie zum Beispiel bei der Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen.

Einen Mehrwert der standortbezogenen Wasserverfügbarkeit gegenüber der klimatischen Wasserbilanz kann eine standardisierte, flächendeckende Ermittlung der aktuellen Verdunstung für unterschiedliche Landnutzungen und unterschiedliche Annahmen zum Bodenfeuchtestatus (grundwassernahe, mittlere oder grundwasserferne Wasserstände) liefern. Diese kann mit für Moorstandorte geeigneten konzeptionellen Wasserhaushaltsmodellen flächendeckend ermittelt und dann für weitergehende Untersuchungen zu einzelnen Moorstandorten zentral bereitgestellt werden.

## **6.7 Weiterführender Forschungsbedarf**

Messdaten von Wasserständen und Klimagrößen sind überaus wichtige Grundlagen für moorhydrologische Untersuchungen. Dies gilt nicht nur für das hier dokumentierte Projekt, sondern auch für weiterführende Arbeiten einschließlich der praktischen Umsetzung von Klimaschutz durch Moorschutz. Von besonderem Wert sind möglichst lange Zeitreihen. Daher sollte die Beobachtung vorhandener Messstellen unbedingt fortgeführt werden.

Ergänzende Wasserstandmessstellen in naturnahen Mooren und in oder nahe von Wiedervernässungs- und Eintauchflächen können wesentlich zu Verbesserungen bei einer zukünftigen Fortschreibung der Regionalisierung von Moorwasserständen beitragen. In dem Zusammenhang ist es auch wünschenswert, Institutionen mit einzubinden, die ihre vorhandenen Wasserstanddaten im Rahmen von KliMoBay noch nicht übermittelt haben.

Neben ergänzenden Wasserstandmessstellen und längeren Zeitreihen können folgende Geodaten, die zur Laufzeit von KliMoBay nicht verfügbar waren, zu einer Qualitätssteigerung im Rahmen einer wünschenswerten Fortschreibung der Regionalisierung beitragen:

- Alle verwendeten Geodaten auch bis ca. 2 km jenseits der Landesgrenze, da mehrere Prädiktoren auf Puffer-Bereichen um die einzelnen Rasterzellen basieren,

- Informationen zu Dränagen (genaue Lage, Einbautiefen, aktueller Zustand) und
- flächenscharfe Informationen zu bereits erfolgten Wiedervernässungsmaßnahmen einschließlich Angaben, zu welcher Zeit die Maßnahmen umgesetzt wurden.

Als praxisorientierte Grundlagenarbeit zur Unterstützung von Wiedervernässungsprojekten ist eine flächendeckende Ermittlung der aktuellen Verdunstung für unterschiedliche Landnutzungen und für unterschiedliche Bodenfeuchtezustände anzuraten. Da unterschiedliche Vegetationstypen unterschiedlich hohe Verdunstungsraten haben und die moortypische Vegetation eine Flurabstandsabhängigkeit bei der aktuellen Verdunstung zeigt, spielt diese Frage bei konkreten, standortbezogenen Maßnahmen eine wichtige Rolle für den lokalen Wasserhaushalt.

Zur wissenschaftlichen Begleitung und praktischer Umsetzung von moorfremdlicher Landwirtschaft ist eine modellbasierte Simulation des Wassermanagements (Be- und Entwässerungsmaßnahmen für jahreszeitlich unterschiedliche Wasserstände) sinnvoll. Die Kombination von Vor-Ort-Erfahrungen und Modelluntersuchungen ist eine wichtige Grundlage, um Handreichungen für Bemessung und Betrieb abzuleiten.

## 7 BODENINFORMATION UND KLIMAANPASSUNG (PROJEKT 3, LFL)

### 7.1 Einführung

Bayernweit sind etwa 90 % aller Moore für die Land- und Forstwirtschaft dräniert. Dadurch sacken die Torfkörper durch Mineralisation und Verdichtungsprozesse. Diese Veränderungen in den bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften degradieren die Moorböden auf lange Sicht. Damit ist die langfristige Nutzung der Moorstandorte gefährdet. Um diesen Degradationsprozess aufzuhalten, müssen die Flächen baldmöglichst wiedervernässt und die Nutzung auf eine angepasste Bewirtschaftung mit hohen Grundwasserständen umgestellt werden. Die Rückführung der Moorflächen in einen naturnahen Wasserzustand hat somit neben einer klimatischen, auch eine wirtschaftliche und soziale Komponente.

Für die Umsetzung des Masterplans Moore in Bayern sollen Handlungsräume ermittelt werden, in denen der Moorbodenschutz priorisiert umgesetzt werden kann. Hierbei spielen bodenphysikalische und -chemische Informationen, bayernweite Sackungsraten und Daten über die rechtliche und sozioökonomische Situation der Moorstandorte eine wichtige Rolle. Darüber hinaus kann die Analyse der Veränderung der Boden-Parameter über die Zeit dazu beitragen, zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. Da es sich bei der Bodendegradation um einen schleichenden, kaum reversiblen Prozess handelt, sind allerdings Messabstände von Dekaden erforderlich.

Aufgrund der Dringlichkeit der Thematik sind Jahrzehnte dauernde Untersuchungsprojekte nicht zielführend, weshalb auf historische Daten zurückgegriffen werden muss. Als Nachfolgerin der Königlich Bayerischen Moorkulturanstalt verfügt die LfL über eine einzigartige, mehr als 100 Jahre abdeckende Sammlung umfassender historischer Dokumente zu Mooren in ganz Bayern mit Fachdaten, die in den vorhandenen Bodenfachinformationen derzeit nicht verfügbar sind. Durch die digitale Erschließung der historischen Information und den Abgleich mit aktuellen Nacherhebungen lassen sich damit regionale Veränderungen analysieren und wichtige bodenkundliche Entscheidungsgrundlagen für eine Wiedervernässung ableiten.

### 7.2 Fragestellungen und Ziele

#### Bodeninformationen für den Moorbodenschutz

Der Leitfaden „Moorschutz in Deutschland“ (Tiemeyer et al. 2017) des gleichnamigen BfN-Projekts empfiehlt eine Liste von Bodendaten für die Bewertung des aktuellen Moorzustands im Hinblick auf Klimarelevanz, Gewässerqualität, Wiedervernässungschancen und -risiken, Nährstoffe und Naturschutzrelevanz. Im KliMoBay Projekt wurden diese Faktoren und deren zeitliche Veränderung anhand von sechs Beispielgebieten genauer untersucht. Durch den Vergleich historischer Profilbeschreibungen mit aktuellen Erhebungen wurden Höhenveränderungen und Änderungen in den Bodeneigenschaften untersucht. Speziell wurden die folgenden Fragen geklärt, welche in **Modul 5** zusammengefasst sind:

- Wie ist die aktuelle Situation in den Projektgebieten in Bezug auf Torfsackungsraten und physikalische sowie -chemische Bodeneigenschaften? Wie haben sich diese über die letzten Dekaden verändert?
- Welche Restriktionen und Möglichkeiten ergeben sich daraus für eine landwirtschaftliche Nutzung und die Wiedervernässung dieser Gebiete?

- Wie hängen bodenphysikalische und -chemische Parameter mit dem Torfsubstrat und dem Zersetzungsgrad zusammen? Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Wiedervernässbarkeit?
- Wie beeinflussen Bodeneigenschaften und Landnutzungsform die Sackungsraten von Torfkörpern und die Geschwindigkeit des Torfabbaus?

Weitere Zielgrößen auf bayerischer Ebene waren die historische Verbreitung der Moore, Moormächtigkeiten, Stauhorizonte, besonders wasserdurchlässige Horizonte und Grobmaterialien, die die Wiedervernässung beeinflussen.

### **Sozioökonomische Indikatoren für die Priorisierung des Moorbodenschutzes**

Um 55.000 Hektar Moore zu renaturieren (Bayerische Staatsregierung, 2022), müssen hydrologisch zusammenhängende Flächen ermittelt werden, die sich für eine Wiedervernässung aus standörtlicher und sozioökonomischer Sicht besonders eignen. Dazu sind Informationen über die rechtlichen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen für alle Moorgebiete in Bayern notwendig. Der Leitfaden „Moorschutz in Deutschland“ (Tiemeyer et al. 2017) hat in detaillierten Voranalysen Indikatoren empfohlen, die sich aus regional bis bayernweit vorhandenen, aber nicht ohne weiteres öffentlich verfügbaren Datenquellen speisen. Ziel des **Modul 9** ist es, den Leitfaden flächendeckend für ganz Bayern anzuwenden und somit den Entscheidungsträgern ein Werkzeug an die Hand zu geben, um die Frage zu klären:

- Wo gibt es rechtliche und sozioökonomische Restriktionen?
- Wo liegen Gunsträume für einen raschen Moorschutz?

### **Klimaanpassung und nachhaltige Nutzung durch Moorbodenschutz**

Durch die Entwässerung des Torfkörpers und die damit einhergehende Sackung und Degradation der Moorböden ist deren landwirtschaftliche Nutzung auf lange Sicht gefährdet. Ein Ende für die Landwirtschaft wird angenommen, wenn aufgrund von Torfschwund der zu geringe Grundwasserstand unter Flur die Tragfähigkeit herkömmlicher Maschinen verhindert, oder ein für die Landwirtschaft ungeeignetes Bodensubstrat erreicht wird. Schlüssel für die Abschätzung des zeitlichen Horizonts sind die Sackungsraten des Torfkörpers. In **Modul 13** sollen diese Informationen für ganz Bayern zusammengetragen und eine Endlichkeitskarte der landwirtschaftlichen Moornutzung erstellt werden. Folgende Frage soll damit geklärt werden:

- Zu welchem Zeitpunkt endet voraussichtlich die landwirtschaftliche Nutzbarkeit entwässerter Moorflächen?

Darüber hinaus leistet die LfL Beiträge zu den Modulen 1, 2, 14, 15, 16 (siehe übergeordnete Teile).

## **7.3 Material und Methodik**

### **7.3.1 Untersuchungsgebiete**

Für die Auswertung der historischen Daten und deren Vergleich mit neu erhobenen Bodeneigenschaften und Sackungsraten wurden fünf Niedermoor-Standorte und ein Hochmoor-Standort mit unterschiedlicher Landnutzungsform genauer untersucht (Anhang 13.6):

- BDB: Verlandungsmoor im Voralpenraum; Grünlandnutzung
- FSM: Quellmoor in der Münchner Schotterebene; Grünlandnutzung
- EM (Erdinger Moos): Quellmoor in der Münchner Schotterebene; Ackernutzung

- AT: Durchströmungsmoor im Ampertal nördlich von Freising; Grünland- und Ackernutzung
- BN: Versumpfungsmoor mit Hochmoor im Voralpenraum; Flächen der JVA (BN\_JVA) und die südlich daran angeschlossenen Hacken und Rottauer Filze (BN\_NSG); Grünlandnutzung (JVA) und Naturschutzgebiet (Moorwald)
- KLF: Durchströmungsmoor im Voralpenraum, Grünlandnutzung

### 7.3.2 Das LfL-Moorarchiv und dessen digitale Erschließung

Das Moorarchiv umfasst einzigartige historische Informationen zu den bayerischen Mooren vom 19. bis ins 21. Jahrhundert. Es wurde begonnen, die Informationen des analogen Archivs in eine digitale Version zu überführen. Neben Flurkarten wurden 143 von 642 Handakten gescannt und 131 Bohrbücher, 14 Nivellements-Bücher, 14 Bücher mit botanischen Analysen (detaillierten Substratbeschreibungen an 1.747 Bohrpunkten), 3 Brenntorfanalysebücher (1.562 Bohrpunkte) sowie ca. 2.000 Karteikarten abfotografiert und als PDF, sowie durchsuchbare Tabellen abgelegt. Ein Überblick über die vielfältigen Moorinformationen ist in Anhang 13.7 zusammengestellt. Ziel war es, diese Daten für die weitere Auswertung zu vektorisieren und in einer neu zu erstellenden Geodatenbank abzulegen. Es zeichnete sich jedoch bald ab, dass dies nicht flächendeckend in der Projektlaufzeit darstellbar war. Die Unterlagen wurden daher flächendeckend gescannt/digitalisiert, jedoch nur priorisiert für die Projektgebiete BDB, FSM, EM, AT und BN vektorisiert und ausgewertet. Das Staatsgut Karolinenfeld wurde im Rahmen der Masterarbeit von A. Hoyer 2021 systematisch nachbeprobet. Für das Projekt wurden folgende Daten verwendet:

- **Flurkarten** im Maßstab 1:5.000:  
Flurkarten beinhalten Flächeninformationen zum Moortyp (Hoch-/ Nieder-/ Übergangsmoor) und Oberflächeninformationen (z. B. gemischter Wald, Kulturflächen) sowie Punktinformationen (Nivellement-Punkte, Einzelbohrungen oder Bohrungen entlang eines Transektes [nummeriert und zum Teil mit Torfmächtigkeit, und Horizontangaben auf Kartenblatt vermerkt]).
- **Bohrbücher:** nach Moorgebiet, Transekt und Bohrpunkten getrennt finden sich hier Bohrkernbeschreibungen mit Schichtinformationen u.a. zu der jeweiligen Lage in cm, dem Hauptsubstrat mit eventuellen Beimengungen sowie dem Zersetzungsgrad nach von Post (1924).
- **Brenntorfanalysebücher:** hier sind im Labor erhobene bodenchemische und -physikalische Eigenschaften aus Moorproben zusammengetragen. Aus den aufgenommenen Parametern wurden der pH-Wert, die Lagerungsdichte und der Aschegehalt bei 800 °C verwendet.
- **Handakten:** beinhalten unterschiedliche Informationen nach Moorgebiet getrennt. Neben Karten (u. a. detaillierte Lagepläne, Geländeoberflächen- und Vegetationsaufnahmen), Profilschnitten und Bohrkernbeschreibungen (inklusive bodenphysikalischer und -chemischer Messwerte) finden sich Schriftwechsel und Gutachten, die Rückschlüsse auf die historische Moornutzung und zurückliegende Aufnahmen ermöglichen. Die Handakten sind somit essenziell für die Verknüpfung der historischen Daten.

Finanziert durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) wurden im Auftrag der LfL alle Flurkarten des Moorarchivs von der Firma Image Pro GmbH gescannt und die Karten mit

Moorinformation von der Firma ili gis-services georeferenziert. Diese werden zum Projektende an das LfU übergeben.

### **Moorarchiv-Datenbank**

Für die Erfassung der Moorbodeninformation wurde eine Digitalisierungsumgebung samt zugrundeliegender (Geo-)Datenbankstruktur aufgebaut, mit deren Hilfe sich alle Informationen der ehemaligen Moorbodenverbreitung, Moormächtigkeiten und Moorbodenprofilbeschriebe mit bodenphysikalischen und –chemischen Analysendaten erfassen lassen. Darin können Flächeninformationen zur historischen Moorausdehnung, dem Moorbodentyp und Oberflächeninformation aus Flurkarten und den Lageplänen der Handakten in Polygonlayern erfasst werden. Bohrpunkte (Einzelbohrungen bzw. Bohrungen entlang eines Transektes) sowie Punkte mit Angabe von Nivellements oder der Torfmächtigkeit im Kartenblatt werden als punktförmige Objekte erfasst (vgl. Anhang 13.8). Die Digitalisierung der Flurkarten und der gescannten Lagepläne aus den Handakten erfolgt für jedes Kartenblatt in einer eigenen Datei im GeoPackage-Format (\*.gpkg). Diese werden im Anschluss automatisiert zusammengeführt, wobei eine Konsistenz- und Qualitätskontrolle erfolgt.

Die in den Büchern vorliegenden Informationen, sowie Einzelbeschrieben aus den Handakten werden zunächst in Tabellen übertragen und über die Flurkarten-, Transekt- und Bohrpunktnummer in die Geodatenbank eingebunden.

### **7.3.3 Geländeaufnahmen 2022**

Um den aktuellen Zustand und die Veränderung der Moorkörper beispielhaft darzustellen, wurden Nachkartierungen historischer Bodenaufnahmen 2021 und 2022 in BDB, BN-NSG, EM, FSM und AT durchgeführt (die Untersuchung in KLF ist Gegenstand der Masterarbeit von A. Hoyer, 2021). Dabei sollte möglichst die gesamte, aus den historischen Daten ersichtliche Variabilität der untersuchten Moore abgedeckt werden. Neben der Bodenansprache (Horizontabfolge, Substratansprache nach Luthardt et al. (2015) und Zersetzungsgrad nach von Post (1922)), erfolgte die Klassifikation nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Bodenkundliche Kartieranleitung, KA5). Die Torfmächtigkeit wurde gemessen und Proben für bodenphysikalische und -chemische Analysen entnommen.

An allen 98 Punkten wurden die exakten Koordinaten und die Höhe über Normalnull mit einem ppm 10xx GNSS-Sensor mit Helix-Antenne der Firma ppm Precise Positioning eingemessen. Mit einer meterweise verlängerbaren Moorpeilsonde (Eigenanfertigung durch Metallbauer Breitsameter aus Freising, nach einem Modell von Professor Drösler, HSWT) wurde die Mächtigkeit bis zum anstehenden Untergrund ermittelt. Der Übergang zu Kies und Sand konnte durch den spürbaren Substratwechsel leicht erfasst werden, tonige Substrate ließen sich dagegen nicht so einfach ermitteln. Die Genauigkeit der Lage des Schichtwechsels war insbesondere in größerer Tiefe gering, weshalb die Moorpeilsonde nur bis zu einer Mächtigkeit von 7 m angewendet werden konnte. Dadurch konnte an 78 Punkten die Moormächtigkeit erfasst werden.

An 35 Punkten wurden zusätzlich Bohrprofile mit einer *Eijkelkamp*-Moorklappsonde vom Typ M-0409 ausgehoben und angesprochen. Der Grundwasserstand im Jahresmittel wurde anhand der Veränderungen im Zersetzungsgrad abgeschätzt. Aufgrund unserer Expertenschätzung, dass sich Drainage-bedingte physikalische- und chemische Veränderungen und Torfsackungsprozesse vorwiegend im oberen Bereich des Torfkörpers abspielen, wurden je Horizont Proben für die Lagerungsdichte (LD) und die bodenchemischen Parameter bis zu einer Tiefe von einem Meter unter dem Grundwasserspiegel in dreifacher Wiederholung entnommen.

Für die Validierung und Einordnung der Treibhausgasmessungen (Projekt 1) und als Input für die Wasserstandsmodellierung (Projekt 2) wurden aktuelle Bodeneigenschaften an den Standorten Karolinenfeld, Benediktbeuern und Freising erhoben.

### **7.3.4 Datenauswertung der Bodeninformationen für den Moorbodenschutz**

#### **7.3.4.1 Bodeninformationen**

##### **Flächendaten zum Status quo der bayerischen Moorböden**

Aus den historischen Bodenprofilbeschrieben können Restriktionen für die Wiedervernässbarkeit und eine zukünftige Nutzung bei fortschreitender Torfsackung abgeleitet werden, welche mit Hilfe hydrogeologischer Karten flächendeckend für die Moore Bayerns skaliert werden können. Dabei sind die Zielgrößen die historische Verbreitung der Moore, die Moormächtigkeiten, vorhandenen Stauhohizonte sowie besonders wasserdurchlässige Horizonte und Grobmaterialien, die bayernweit aus Daten des LfL-Moorarchivs und Bodenfachinformationen des LfU ermittelt werden sollten. Die Vektorisierung der entsprechenden Daten aus dem Moorarchiv konnte während der Projektlaufzeit nur für die Projektgebiete umgesetzt werden. Darüber hinaus liegen die Bodenfachinformationen des LfU nicht ausreichend genau vor und auch die Bodenschätzung ist nicht geeignet, um eindeutige Informationen zum Status quo der bayerischen Moorböden bayernweit aufzuzeigen. Somit konnte der Status quo in Bezug auf Bodeninformationen nur an einzelnen Mooren ermittelt werden. Aus den Wiederholungsaufnahmen von Torfprofil-Transekten lassen sich aktuelle Informationen zur Torfmächtigkeit, der Horizontabfolge und der Lage stauender Schichten für die Projektgebiete ableiten.

##### **Torfmächtigkeit und Lage des Untergrunds am Beispiel des Staatsguts Karolinenfeld**

In einer projektbegleitenden Masterarbeit mit dem Titel „Bewertungsparameter zur Abschätzung des Restitutionspotenzials von Mooren - am Beispiel des Staatsguts Karolinenfeld“ von A. Hoyer (2021), wurden am Standort Karolinenfeld die Torfmächtigkeiten, sowie die Höhen in einem 80 x 80 m Raster vermessen. Damit konnte die Lage des Untergrundes, in diesem Fall des Rosenheimers Seetons berechnet werden. Insgesamt wurden ca. 430 Punkte aufgenommen und die Daten der Torfmächtigkeit und Lage des Untergrundes auf die Fläche interpoliert (vgl. Anhang 13.9).

#### **7.3.4.2 Bodenphysik & -chemie**

Aus den 35 Bohrpunkten die 2022 beprobt wurden ergaben sich insgesamt 189 Horizontproben, von denen 140 einem Torfhorizont entsprachen. Die chemischen Analysen zur Bestimmung des C- und N-Gehalts sowie des pH-Wertes wurden extern durch die Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) durchgeführt. Die C- und N-Gehalte wurden mittels einer Elementaranalyse mit dem Gerät RC612 der Firma Leco bestimmt. Die Verbrennung der Proben findet bei 580 °C statt.

Die Proben zur Bestimmung der Lagerungsdichte (LD) wurden an der LfL für 48 h bei 105 °C getrocknet. Aus dem Trockengewicht und dem definierten Volumen wurde die LD berechnet.

##### **Kohlenstoffvorrat**

Aus dem organischen Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ), der Lagerungsdichte und der Horizontmächtigkeit wurde der Kohlenstoffvorrat [ $kg\ m^{-2}$ ] an allen 35 Bohrpunkten berechnet und auf Ebene der Mooregebiete gemittelt. Um die C-Vorräte der Profile vergleichbar zu

machen, wurden neben dem C-Vorrat des Gesamtprofils zusätzlich der C-Vorrat der oberen 1,5 m berechnet.

### **Veränderung bodenphysikalischer und -chemischer Eigenschaften über die Zeit**

Aus den historischen Unterlagen des Moorarchivs werden detaillierte Informationen der Lagerungsdichte und Kohlenstoffgehalte für fünf beispielhafte Bohrprofile (drei in BDB; je eines in FSM und AT) extrahiert und zusammengetragen. In EM, BN und KLF waren historische Daten nicht in ausreichender Qualität verfügbar. Die gezielte Nachbeprobung der entsprechenden Punkte ermöglicht die Gegenüberstellung der historischen und aktuellen Situation, wodurch Veränderungen in den bodenphysikalischen und –chemischen Eigenschaften aufgezeigt werden können. Die auf Profilebene durchgeführte Analyse ermöglicht es allgemeine Tendenzen der Veränderung vor Ort aufzuzeigen. Bohrpunkt 16 in Benediktbeuern ermöglichte es darüber hinaus exemplarisch, den Torfschwund und die Veränderung im Kohlenstoffgehalt und der Lagerungsdichte zu analysieren. Grund hierfür war eine, sowohl im historischen als auch im aktuellen Profil eindeutig erkennbare tonige Muddeschicht in den ersten 1,5 m. Somit bot sich die Möglichkeit, die Veränderungen in dem Bereich über der Mude zu vergleichen und den Höhenverlust, sowie die Veränderung der Kohlenstoffgehalte und Lagerungsdichten aufzuzeigen.

### **Substrat-Zersetzungsgrad Kombinationen**

In Anlehnung an einen Ansatz von Roßkopf et al. (2016) wurden Substrat-Zersetzungsgrad-Kombinationen erstellt, um Degradationsprozesse abzuleiten. Die Zersetzungsgrade stehen für die Intensität der Degradation, die Substrate für die Pflanzen, aus denen die Torfe entstanden sind. Sie bestimmen wesentlich die Degradationsgeschwindigkeit.

Aus den 140 Horizontproben wurden die unterschiedlichen Substrate den folgenden Substratklassen zugeordnet: Sphagnumtorfe (Sphagnumtorf), Seggen-, Schilf- und Braunmoostorfe (Seggentorf) und vererdete, vermulmte und anmoorige Torfe (Degradierter Torf). In Anlehnung an (Tiemeyer et al., 2017) wurden die Zersetzungsgrade nach von Post in drei Klassen eingeteilt: Schwach zersetzter Torf (H1 – H3), mäßig zersetzter Torf (H4 – H6) und stark zersetzter Torf (H7 – H9). Daraus wurden Substrat-Zersetzungsgrad-Kombinationen erstellt und deren Kohlenstoff-, Stickstoff und pH-Werte sowie die Lagerungsdichte gemittelt.

#### **7.3.4.3 In situ Sackungsraten**

##### **Neu zu installierendes Sackungsmonitoring:**

Um kontinuierliche Messreihen der Oberflächenveränderung von Moorstandorten zu erhalten, sollte durch Projekt 3 ein neues Sackungsmonitoring installiert werden. Parallel dazu startete im Juli 2019 das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz mit einem Projekt zum Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz im Offenland mit automatisierten Sackungsmonitoringsystemen

(<https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/moorbodenmonitoring-fuer-den-klimaschutz>).

Um die Projekte zu verbinden, mussten zunächst die methodischen Standards abgewartet werden. Dabei kam es zu Verzögerungen, weshalb erst 2021 die Einrichtung von Flächen für ein automatisiertes Sackungsmonitoring in Zusammenarbeit mit dem Thünen-Institut erfolgte. Die LfL kümmerte sich dabei um die Vorerkundung der Flächen in Bezug auf aktuelle Landnutzung und Moorbodeneigenschaften, die Einrichtung der Flächen erfolgte über das Thünen-Institut. Die Verzögerung führte dazu, dass auch durch die ursprünglich geplante zusätzliche Einrichtung manueller Pegelsysteme durch die LfL keine ausreichenden



Zusatzinformationen während der Projektlaufzeit zu erwarten waren, weshalb auf deren Installation verzichtet wurde. Flächendeckende Informationen zu den Torfsackungsraten wurden mit einem alternativen Ansatz des Vergleichs digitaler Geländemodelle berechnet (vgl. Kapitel 7.3.6.1).

### **Vergleich der historischen Torfmächtigkeit und Nivellements mit aktuellen Nacherhebungen:**

Die im Feld erhobenen Daten der GNSS-Höhen sowie die aktuellen Torfmächtigkeiten wurden in die Geodatenbank des Moorarchivs eingebunden. Durch den Vergleich der historischen und aktuellen Torfmächtigkeiten (BN-NSG, FM, EM und AT) und der Nivellements (BDB) konnte die absolute Höhendifferenz zwischen den Aufnahmen in Metern und unter Einbezug der Zeit zwischen den Aufnahmen die mittlere, jährliche Höhendifferenz in Metern pro Jahr berechnet werden. Da die historischen Nivellements im Höhen Bezugssystem DHHN12 vorlagen, wurden diese im Vorfeld über den *CRS-Transformation Bayern* SAPOS Dienst der bayerischen Vermessungsverwaltung (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2022) in das neue amtliche Höhen Bezugssystem, Deutsches Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016), umgerechnet.

#### **7.3.4.4 Nutzung**

Ein weiteres Ziel bestand darin, die Veränderungen der Torfeigenschaften und die Sackungsraten auf die Landnutzungsform zu beziehen. Die historischen Nutzungsänderungen waren über den großen Zeitraum nicht ausreichend nachvollziehbar, so dass sich die Analysen auf die Sackungsraten beschränkten.

### **7.3.5 Rechtliche und sozioökonomische Rahmenbedingungen**

Um die rechtlichen und sozioökonomischen Indikatoren für die bayernweite Moorfläche aufbereitet darzustellen, wurden flächendeckend vorliegende Geodaten zur landwirtschaftlichen Flächennutzung sowie zu Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS; StMELF), Kataster- und Eigentümerdaten des ALKIS (LDBV), Daten der Tatsächlichen Nutzung und des ATKIS (jeweils LDBV), Daten zu Schutzgebieten (StMUV) sowie Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes zusammengetragen.

#### **7.3.5.1 Karte der hydrologisch adressierbaren Bereiche (haB)**

Für ganz Bayern wurden hydrologisch einzeln adressierbare Flächen ermittelt. Dazu wurden die Moorbodenkarte des LfU entlang von Straßen (Bundesautobahnen, Land-/Staats- oder Kreisstraßen) und Gewässerachsen (Datenquelle jeweils ATKIS) zerschnitten und dadurch in hydrologisch adressierbare Bereiche (haB) unterteilt (vgl. Anhang 13.18, Karte 18). Die Grenzen wirken als Barrieren für den horizontalen Wasseraustausch bzw. können mit einfachen Mitteln dazu gemacht werden.

#### **7.3.5.2 Sozioökonomische Indikatoren**

In einem nächsten Schritt wurden wichtige räumliche Daten zu sozioökonomischen Restriktionen zusammengeführt und Indikatoren in Anlehnung an die Vorschläge aus dem BfN-Projekt „Moorschutz in Deutschland“ (Tiemeyer et al., 2017) und Aktualisierungen des Thünen-Instituts abgeleitet. Alle Indikatoren wurden in einer Datenbank bezogen auf die haB zusammengeführt.

### 7.3.5.3 Karte der sozioökonomischen Indikatoren

Aus der Vielzahl verschiedener Indikatoren wurden vier ausgewählt, die entscheidend für die Ermittlung von Gunsträumen und Restriktionen für Projekte zur Wiedervernässung sind:

1. die **Anzahl der privaten Eigentümer pro Hektar** (Annahme: je mehr verschiedene Eigentümer, desto schwieriger ist die Wiedervernässung eines gemeinsamen Moorbereichs)
2. der **Flächenanteil der Flurstückfläche in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum in %** (Annahme: je größer der Flächenanteil eines hydrologisch adressierbaren Moorbereichs in öffentlicher Hand ist, desto weniger Hürden sind bei der Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen zu erwarten, wenn mit gutem Beispiel vorangegangen wird. Als „Flächen in öffentlicher“ Hand werden diejenigen betrachtet, deren Einträge im Eigentümerverzeichnis auf Gemeinden, Landkreise, Bundesland, Bundesrepublik, Staatsbetriebe oder Behörden schließen lassen.)
3. der **Anteil der Ackerflächen an der Gesamtfläche in %** (Annahme: je größer der Anteil an Ackerflächen in einem Gebiet, desto stärker sind die Landwirte von einer Anhebung des Grundwasserpegels betroffen)
4. der **Anteil der Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen an der Gesamtfläche in %** (Annahme: je größer der Anteil von Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen und Flächen gemischter Nutzung (= Mischformen aus Gewerbe- und Wohnfläche, z. B. Bauernhöfe), desto schwieriger gestaltet sich die Wiedervernässung eines Gebiets wegen Ängsten oder tatsächlicher Betroffenheit der Infrastruktur)

Jeder Indikator wurde entsprechend seiner Werteverteilung in den bayernweiten haBs in drei Klassen unterteilt (Tabelle 4). Die Klassengrenzen entsprechen Quantilgrenzen der Häufigkeitsverteilung der Werte für haB größer 1 ha. Bei sehr linksschiefen und engen Verteilungen wurden die 10 % bzw. 90 %-Perzentile gewählt, bei breiteren Verteilungen die 25 % bzw. 75 %-Perzentile. Diese wurden im nächsten Schritt aggregiert und ebenfalls drei Klassen zugeordnet, die das sozioökonomische Restriktionspotenzial einstufen:

- *gering* (alle Indikatorwerte entsprechen der Klasse „gering“ oder „mittel“. Dies sind potenzielle Gunsträume für eine Wiedervernässung und einen raschen Moorschutz)
- *mittel* (alle Indikatorwerte entsprechen der Klasse „mittel“. Für diese Flächen kann pauschal keine Aussage über die Eignung oder Restriktion für Wiedervernässungsprojekte getroffen werden)
- *hoch* (mindestens ein Indikator liegt im Wertebereich des „hohen“ Restriktionspotenzials. Dies sind Flächen mit höheren potenziellen Restriktionen, die einer Wiedervernässung entgegenstehen könnten)

Die Aggregation wurde bayernweit für alle hydrologisch adressierbaren Bereich ab einer Flächengröße von 1 Hektar durchgeführt. Die Minimalgröße wurde gewählt, damit die Grenzwerte der Einzelindikatoren durch geringe Flächengrößen nicht verzerrt werden. Darüber hinaus werden für die Renaturierung der geplanten 55.000 ha größere zusammenhängende Flächen benötigt. Die daraus entstandene bayernweite **Karte zu den sozioökonomischen Restriktionspotenzialen** wurde für die Erstellung der Klimaanpassungspotenzialkarte im Projekt 1 verwendet.

Die GIS-Arbeiten zur Datenhaltung, -verschneidung und zur Entwicklung eines Digitalen Informationssystems wurden von Projekt 3 in Eigenleistung ohne Finanzierung über KliMoBay erbracht.

Tabelle 4 Indikatoren und ihre Grenzwerte, zur bayernweiten Darstellung von Gunsträumen und Restriktionen für Wiedervernässungsprojekte.

Indikator	Grenzwerte des Restriktionspotenzials		
	gering	mittel	hoch
Anzahl der privaten Eigentümer pro ha	< 0,6	0,6 - 2,6	> 2,6
Flächenanteil der staatlichen/kommunalen Eigentümer (%)	> 48,4 %	48,4 % - 1,6 %	< 1,6 %
Anteil der Ackerflächen an der Gesamtfläche (%)	0 %	0 % - 48,6 %	> 48,6 %
Anteil der Wohnbauflächen an der Gesamtfläche (%)	0 %	0 % - 6,7 %	> 6,7 %

Die Karte der sozioökonomischen Restriktionspotenziale (Karte 19: Sozioökonomische Restriktionspotenziale) stellt ein Anwendungsbeispiel der sozioökonomischen Restriktionen dar. Die zugrundeliegenden Indikatoren lassen standörtlich angepasste Analysen, andere Indikatoren oder Klassengrenzen zu.

### 7.3.6 Karte der Endlichkeit einer landwirtschaftlichen Nutzung

Die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung wurde in zwei Szenarien bestimmt: 1) Anzahl der Jahre, bis die Geländeoberfläche durch Torfsackung eine kritische Nähe zum Grundwasser unterschreitet, bzw. 2) Anzahl der Jahre, bis der Torfkörper über einem landwirtschaftlich ungeeigneten Unterliegenden aufgezehrt ist. Um die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung von Moorböden bayernweit abschätzen zu können, werden Daten zur Geschwindigkeit des Torfschwunds (Sackungsrate), der Lage des Grundwasserstands unter Flur (GWFA), der Mächtigkeit der Moore (M) und dem unterliegenden Substrat benötigt.

#### 7.3.6.1 Karte der jährlichen Torfsackungsraten

Zur Abschätzung jährlicher Torfsackungsraten wurden Digitale Geländemodelle mit einer Bodenauflösung von 1 m (DGM1) verschiedener Aufnahmezeitpunkte verglichen. Die DGM1-Daten werden vom Bayerischen Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung bereitgestellt. Insgesamt wurden für die Moorflächen der LfU-Moorbodenkarte 11.422 Kachelpaare aus „historischen“ und „aktuellen“ DGM1-Kacheln (je 1 km<sup>2</sup>) gebildet und hieraus Höhenunterschiede der Geländeoberfläche in einem 1 x 1 m Punkteraster ermittelt. An jedem Punkt wurde die absolute Höhendifferenz zwischen den Aufnahmen in m und unter Einbezug der Zeit zwischen den Aufnahmen die mittlere, jährliche Höhendifferenz in m pro Jahr berechnet. Insgesamt konnte eine Fläche von 217.492 ha mit 11.781 Kachel-Paaren und einem medianen Abstand von 10,0 Jahren zwischen den Aufnahmen abgebildet werden, was 95,8 % der Fläche der Moorbodenkarte entspricht. Die Daten wurden auf ein 50 x 50 m Punkteraster skaliert und mit Informationen aus der LfU-Moorbodenkarte (MBK), der Bodenschätzung (BSCH) und der Tatsächlichen Nutzung ergänzt (Abbildung 30 und Anhang 13.18, Karte 24).

Die Karte der flächenscharfen dekadischen Torfsackung der Moorböden Bayerns stellt ein wesentliches Ergebnis des KliMoBay Projekts der LfL dar.

#### 7.3.6.2 Kriterien für die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung

**Mittlerer jährlicher Grundwasserflurabstand GWFA:** Informationen zum mittleren GWFA des Jahres 2020 wurden durch das Projekt 2 bereitgestellt. Für die klassische Bewirtschaftung als produktives Dauergrünland gilt ein Grundwasserflurabstand von 0,3 m als Befahrbarkeitsgrenze. Da im Sommerhalbjahr der Grundwasserflurabstand tiefer ist als im

Winter, kann ein mittlerer GWFA von 0,2 m als Grenze der klassischen Grünlandnutzung definiert werden. Bei Ackernutzung liegt diese Grenze bereits bei einem GWFA von 0,4 m. Diese empirischen Befunde werden von den typischerweise gemessenen GWFA auf bundesweiten Treibhausgas-Messplots bestätigt (Tiemeyer et al., 2013). Die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Moornutzung wird entsprechend bei einem GWFA von 0,2 m berechnet, bei aktueller Ackernutzung bereits bei 0,4 m GWFA.

**Moormächtigkeit M:** Da bayernweit abgesehen von Einzelerhebungen keine aktuellen und flächendeckenden Informationen zur tatsächlichen Mächtigkeit der Torfkörper sowie zu darunterliegenden Substraten verfügbar sind, wurde diese anhand der Klassifikation der BSCH und der Legendeneinheiten der MBK in vier Klassen unterteilt (Tabelle 5). Die Einteilung erfolgt auf Grund einer stark vereinfachten Annahme. Landesweit belastbare Daten fehlen. Ein stichprobenartiger Vergleich der Klasseneinteilung mit den im Feld erhobenen Daten zeigte, dass diese nicht flächendeckend übereinstimmen.

Perspektivisch könnten wichtige Datengrundlagen zu historischen Mächtigkeiten sowie auch zu darunterliegenden Substraten durch Digitalisierung bzw. Vektorisierung historischer Karten und weiterer Informationen aus den Handakten und Mutterpausen des LfL-Moorarchivs gewonnen werden.

Tabelle 5: Bestimmung der Moormächtigkeitsklassen in m und der zugrundeliegenden Moorinformation (MBK = Moorbodenkarte, BSCH = Bodenschätzung).

Klasse	Mächtigkeit in m	Informationsursprung
MK1	> 1,0	„Hochmoor“ laut MBK
MK2	> 0,4	Moor oder Moor mit höheren/ niedrigeren mineralischem Anteil laut BSCH
MK3	0,3 - 0,4	Moor mit Schichtwechsel („Mo/xy“) laut BSCH und „Niedermoor“ nach MBK
MK4	0 - 0,3	BSCH: Moor mit Schichtwechsel (Mo/xy) und MBK „Anmoor“

Qualität des Unterliegenden: Zusätzlich wurde aus den Informationen der BSCH abgeleitet, ob sich das zurückbleibende Substrat ungünstig auf die landwirtschaftliche Nutzung auswirkt. Als problematisch wurden hier Ton und schwerer Lehm angenommen, was in diesem Fall den Klassen TMo (Ton, Moor), MoT (Moor, Ton), Mo/T (Moor auf Ton), T/Mo (Ton auf Moor) und LT/Mo (Schwerer Lehm auf Moor) der BSCH entspricht.

Idealerweise müsste hier eine genauere standörtliche Differenzierung vorgenommen werden, z. B. Nähe zum unterliegenden Kieskörper, Quell-Schrumpfdynamik des Unterliegenden, Muddeart, Art des Stauhorizonts. Entsprechende Informationen liegen in Bayern ungenügend vor. Das unterliegende Substrat liefert gleichzeitig die Information, ob unter dem Torf ein Stauhorizont liegt oder nicht. Diese Information ist die Voraussetzung für jede Wiedervernässungsplanung. Nützliche Daten zu vielen Moorkörpern könnten perspektivisch aus den Handakten und Mutterpausen des Moorarchivs mobilisiert werden.

### 7.3.6.3 Berechnung der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Moornutzung

Durch die Verknüpfung der Sackungsrate, der geschätzten Mächtigkeit und dem GWFA wurde die verbleibende Zeit berechnet, ab der bei einer linear fortlaufenden bzw. andauernden Torfsackung die bisherige Bewirtschaftung der Flächen hinsichtlich Befahrbarkeit und pflanzenbaulicher Aspekte problematisch wird. Diese Zeitspanne ergibt sich aus der mittleren jährlichen Torfsackung und der Mächtigkeit des zersetzungsgefährdeten Torfkörpers. Als erstlimitierende Faktoren gelten je nach örtlichen Gegebenheiten entweder das Unterschreiten kritischer GWFA oder die vollständige Zersetzung des Torfkörpers bis zu einem

pflanzenbaulich ungeeigneten, mineralischen Substrat im Untergrund. Die Zeit, gemessen als Anzahl der Jahre ab der bereits ein solcher Zustand erreicht werden könnte, wurde in vier Klassen unterteilt (0 - 15 Jahre, 15 - 30 Jahre, 30 - 60 Jahre und über 60 Jahre).

Die Ermittlung der Höhenverluste beschränkt sich nicht ausschließlich auf die landwirtschaftlich genutzten Moorflächen sondern schließt auch andere Landnutzungsformen bzw. naturnahe Räume mit ein. Da für diese Bereiche einerseits andere Aspekte die Endlichkeit der jeweiligen Landnutzung limitieren und andererseits Angaben zu Mindest-Grundwasser-Flur-Abständen und auch Angaben zu darunterliegenden Substraten flächendeckend fehlen, werden für diese Bereiche keine Aussagen zur Endlichkeit der jeweiligen Landnutzungsform getroffen. Die Klimaszenarien aus Teilprojekt 2 lassen darüber hinaus keine grundsätzliche Gefährdung naturnaher Moorstandorte durch den Klimawandel erkennen.

Zur Reduktion der Datenmenge werden die Ergebnisse in einem Punkteraster 50 x 50 m dargestellt. Für die Transformation des 1 x 1 m-Rasters in ein 50 x 50 m-Punkteraster wurde die Rastermatrix entsprechend geteilt und für jeden Abschnitt Median, Minimal-, Mittel- und Maximalwert der absoluten Torfsackung aus den 2500 Rasterzellen je Teilbereich ermittelt.

## 7.4 Ergebnisse

### 7.4.1 Bodeninformation, Bodenphysik & -chemie, Sackung

#### 7.4.1.1 Bodeninformationen

##### **Flächendaten zum Status quo der bayerischen Moorböden**

Erste Flächendaten zum Status quo der bayerischen Moore wurden in die Geodatenbank eingebunden. Ein Beispiel der Vektorisierung von Moortyp, Oberflächeninformation und der Lage eines Bohrtransekts sind in Anhang 13.8 dargestellt. In der Geodatenbank liegen außerdem Informationen zur historischen Moormächtigkeit vor (flächendeckend für BDB, Bohrungen entlang eines Transekts AT, BN\_NSG, FSM und EM). Durch die Wiederholungsaufnahmen im Jahr 2021 und 2022 konnten aktuelle Informationen für die Projektgebiete gesammelt werden (Abbildung 23 und Anhang 13.10). Die geringsten Mächtigkeiten wurden in AT ( $1,0 \pm 0,58$  m) und in EM ( $0,9 \pm 0,6$  m) gemessen. In Benediktbeuern muss beachtet werden, dass die aktuellen Aufnahmen meist nur bis 7 m durchgeführt wurden und somit nicht die tatsächlichen Torfmächtigkeiten darstellt. Es zeigt sich jedoch sehr schön die Variabilität der Torfmächtigkeiten, von sehr geringen Mächtigkeiten am Rand zu höheren Torfmächtigkeiten im Zentrum des Moores.

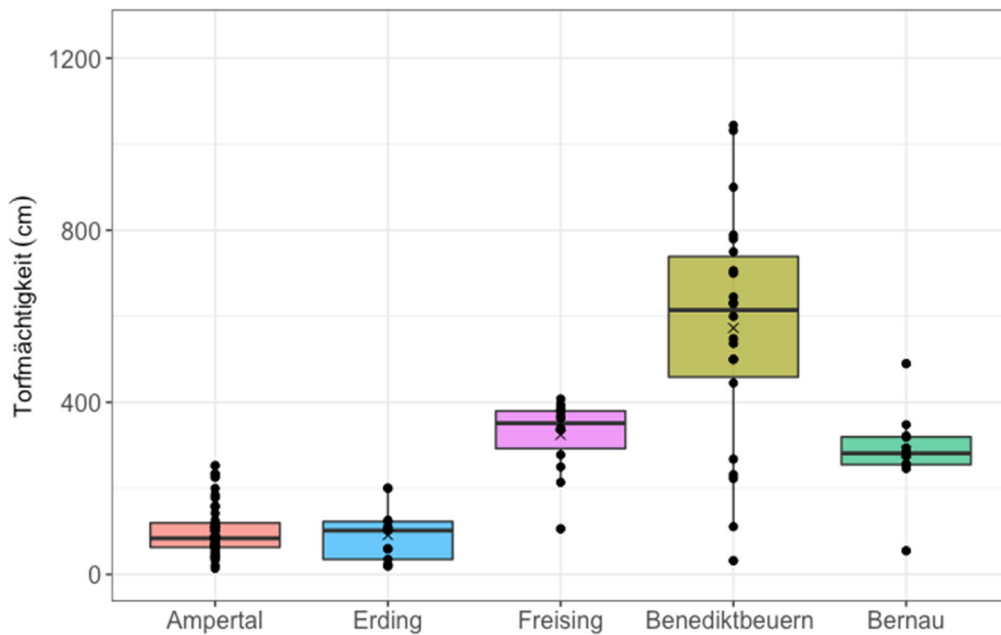


Abbildung 23 Torfmächtigkeiten in den Projektgebieten (Stand 2022).

Durch die detaillierten Horizontbeschreibungen und Laboruntersuchungen kann die Lage von mineralischen Muddeschichten im Bohrprofil bestimmt werden. Beispielhaft sind in Abbildung 24 einzelne Profile aus BDB, AT und FSM dargestellt, welche in Horizonte mit zugehörigen Zersetzungsgrad nach von Post unterteilt sind. Die hier vorkommenden z.T. sehr mächtigen mineralischen Tonmudden wirken sich einerseits ungünstig auf das Pflanzenwachstum aus und wirken andererseits stauend. Besonders gravierend ist dies bei Bohrpunkt 16 in Benediktbeuern, bei dem eine 0,3 m mächtige Tonmudde knapp 0,4 m unter Flur beginnt. Kiesige Untergrundssubstrate wurden v.a. im Ampertal gefunden. Bernau und Freisinger Moos konnten dagegen meistens bis zu einem muddigen Substrat beprobt werden. Besonders häufig wurden im Erdinger Moos Almkalke, zum Teil bis 0,3 m unter Flur gefunden.

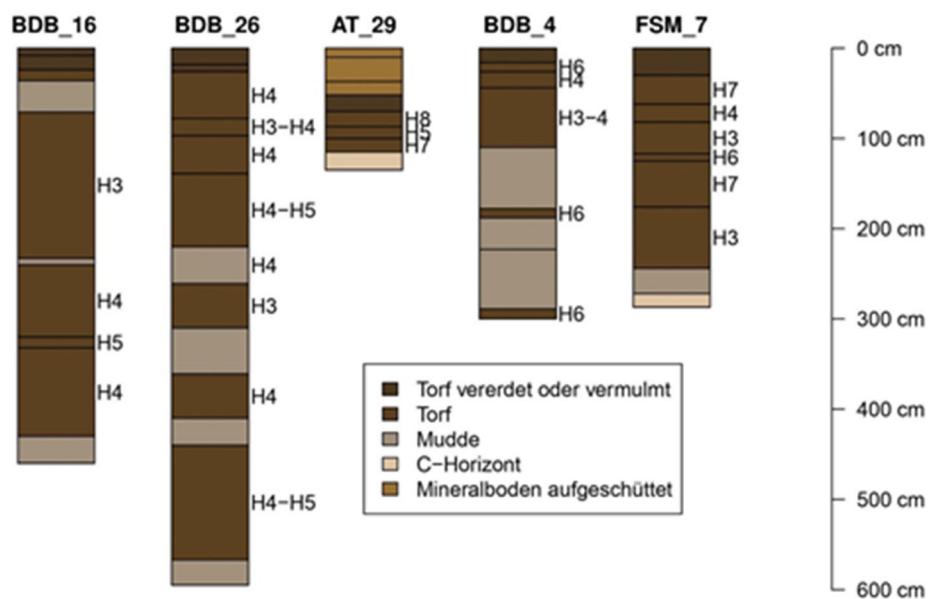


Abbildung 24 Torfsubstrat, Zersetzungsgrad nach von Post (1924) und Mächtigkeit nach Bodenhorizonten getrennt von drei Bohrpunkten in Benediktbeuern und jeweils einer im Ampertal und Freisinger Moos.

### 7.4.1.2 Bodenphysik & -chemie

#### Kohlenstoffvorrat

Der Kohlenstoffvorrat der oberen 1,5 m liegt im Freisinger Moos und in Benediktbeuern deutlich höher als in den anderen Gebieten (Abbildung 25 und Anhang 13.10). Die höchsten C-Vorräte wurden in den Grünland-bewirtschafteten Gebieten Freisinger Moos und Benediktbeuern ermittelt (101 bzw. 87 kg m<sup>-2</sup>). Die geringsten Vorräte gab es im ackerbaulich geprägten Erdinger Moos (62 kg m<sup>-2</sup>) bzw. im Ampertal (68 kg m<sup>-2</sup>).

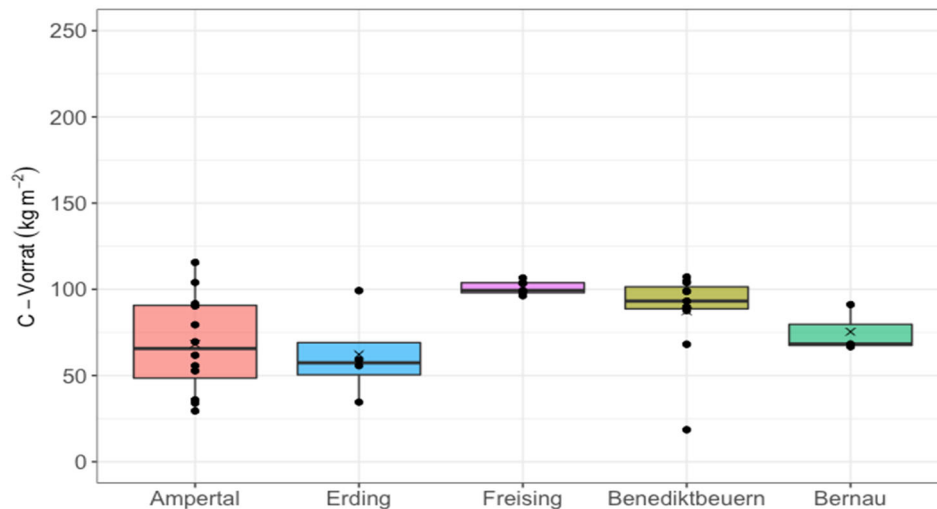


Abbildung 25: Kohlenstoffvorrat der oberen 1,5 m getrennt nach den Projektgebieten.

#### Veränderung bodenphysikalischer und -chemischer Eigenschaften über die Zeit

Durch die direkte Gegenüberstellung der historischen und aktuellen Daten bezüglich Lagerungsdichte und Kohlenstoffgehalt zeigte sich, dass es an den untersuchten Punkten in BDB, AT und FSM zu einer Abnahme des Kohlenstoffgehalts und einer Zunahme der Lagerungsdichte in den oberen Horizontschichten kam (Abbildung 26). Am Bohrpunkt 16 in Benediktbeuern kam es über die letzten 58 Jahre im Bereich über der Tonmudde zu einer Abnahme des Kohlenstoffgehalts um 29 % des ursprünglichen C-Gehalts und einer Zunahme der Lagerungsdichte um 71 % der ursprünglichen LD. Die Torfmächtigkeit hat um 60 % der ursprünglichen Höhe abgenommen (Tabelle 6).

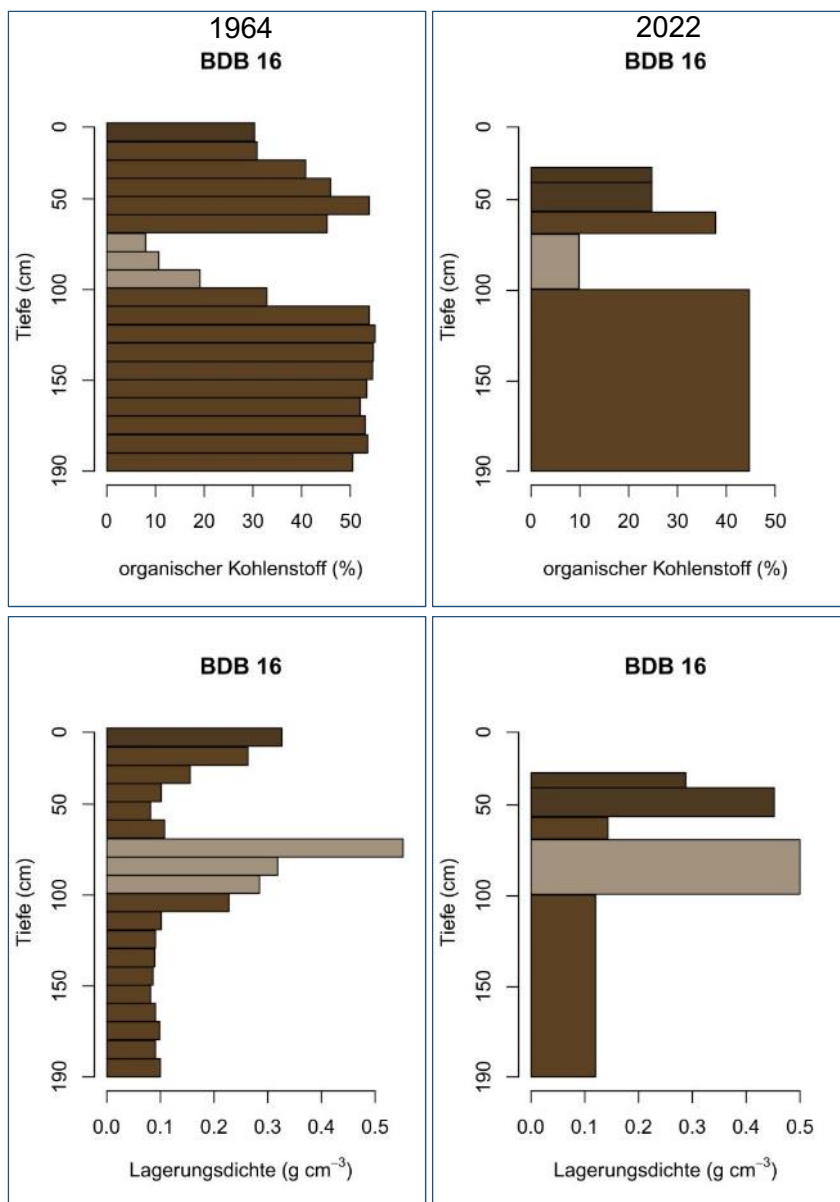


Abbildung 26: Organischer Kohlenstoffgehalt (%) und Lagerungsdichte im Tiefenverlauf für den Standort Benediktbeuern 16. Gegenüberstellung historischer Moorarchiv-Daten (Links) und 2022 neu erhobenen Daten (rechts).

Tabelle 6: Benediktbeuern, Bohrpunkt 16. Vergleich zwischen Torfmächtigkeit, gemittelter organischer Kohlenstoffgehalt und gemittelter Lagerungsdichte von 1964 und 2022 im klar abgrenzbaren Bereich über der Tonmulde.

	1964	2022	Veränderung	
			absolut	in % vom ursprünglichen Wert
<b>Torfmächtigkeit über der Tonmulde in m</b>	0,6	0,36	- 0,24	- 40,0 %
<b>Mittlerer C<sub>org</sub>-Gehalt über der Tonmulde in %</b>	41,17	29,07	- 12,10	- 29,4 %
<b>Mittlere Lagerungsdichte über der Tonmulde g cm<sup>-3</sup></b>	0,173	0,295	+ 0,122	+ 70,7 %

### Substrat-Zersetzungsgrad Kombinationen

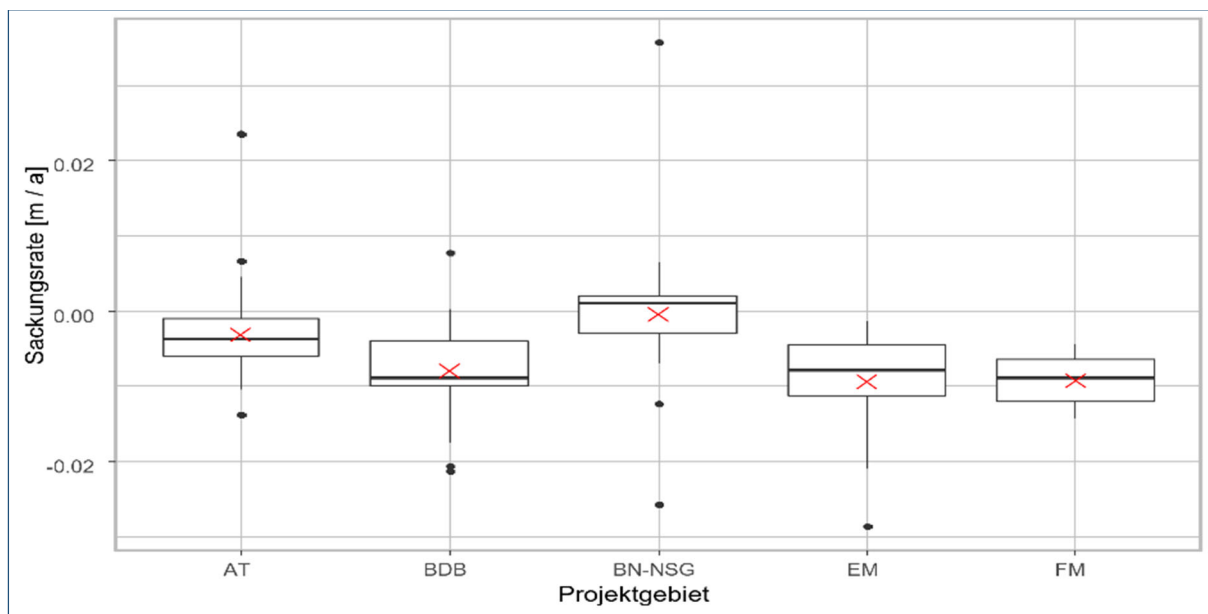
Wie erwartet lagen die Werte der Lagerungsdichte und die pH-Werte der Klassen Seggen-Schilftorfe (Niedermoortorf) über denen des Sphagnumtorfs (Hochmoortorf). Während sie im Niedermoortorf mit zunehmenden Zersetzungsgrad anstiegen, blieben die Werte im Hochmoortorf relativ konstant. Der Kohlenstoffgehalt verringerte sich erwartungsgemäß im



Seggen-Schilftorf, im Sphagnum-Torf kam es dagegen zu einem Anstieg im C-Gehalt. In der Klasse degradiertorfe zeigte sich ein ähnlicher Trend wie in den Niedermoororten, die Werte der LD und der C-Gehalte waren aber nicht deutlich höher bzw. niedriger als in den Seggen-Schilftorfen. Die Substrat-Zersetzungsgradtabelle ist im Anhang 13.11 zu finden. Für die Interpretation muss die unterschiedliche Anzahl an Proben innerhalb einer Klasse bedacht werden. Diese ist in den Sphagnumtorfen und degradierten Torfen relativ gering (2-4 Proben). Für Aussagen über deren typischen Werte sollten gezielt weitere Proben dieser Torfe erhoben werden. Für die Seggen-Schilftorfe konnten dagegen eine ausreichend große Anzahl an Horizonten beprobt werden (10-58).

### 7.4.1.3 Sackung in situ

Der direkte Vergleich der ermittelten Sackungsraten zwischen den Projektgebieten zeigt, dass es mit Ausnahme des Naturschutzgebiets BN zu einer Abnahme der Torfmächtigkeit kam. Diese ist besonders hoch in dem ackerbaulich geprägten Erdinger Moos (Mittelwert = - 0,0094 m/a) und im Freisinger Moos (Mittelwert = - 0,0094 m/a). Im Naturschutzgebiet Bernau liegt der Median knapp über 0, jedoch ist hier die Standardabweichung am höchsten ( $\pm 0,012$  m/a) (Abbildung 27).



Gebiet (Differenz zw. den Aufnahmejahren)	Mittelwert [m/a]	Standardabweichung [m/a]	Max [m/a]	Min [m/a]	Anzahl
BDB (57 - 60 Jahre)	- 0,008	$\pm 0,0066$	- 0,021	0,0077	23
BN-NSG (49 Jahre)	- 0,0005	$\pm 0,0121$	- 0,026	0,036	17
EM (63 Jahre)	- 0,0094	$\pm 0,0080$	- 0,029	- 0,0013	13
FM (63 Jahre)	- 0,0092	$\pm 0,0040$	- 0,014	- 0,0043	6
AT (47-63 Jahre)	- 0,0031	$\pm 0,0059$	- 0,014	0,024	40

Abbildung 27: Jährliche Sackungsraten [m/a] in den Projektgebieten berechnet aus dem Vergleich zwischen historischen und aktuellen Torfmächtigkeiten (AT, BN-NSG, EM und FSM) und zwischen historischen und aktuellen Nivellements (BDB).

#### 7.4.1.4 Sackung nach Nutzungsklassen

Die flächendeckend über DGM-Vergleich ermittelten Torfsackungsraten (7.3.6.1) wurden unterteilt nach Nutzungsklassen ausgewertet (Anhang 13.14, mit Statistik). Dabei zeigen sich keine systematischen Landnutzungsunterschiede. Dieser Befund bestätigt die Studie von Weinzierl und Waldmann (2015) in Baden-Württemberg. Wie in Abbildung 27 gezeigt, sind die Torfsackungsraten eher gebietsspezifisch, abhängig vom Grundwasserstand und der Torfmächtigkeit. Da die Torfmächtigkeiten für tiefgründige Moore nicht flächendeckend verfügbar sind, konnte keine tiefergehende Auswertung durchgeführt werden.

### 7.4.2 Sozioökonomische Rahmenbedingungen

#### 7.4.2.1 Karte der hydrologisch adressierbaren Bereiche (haB)

Die 7.474 einzeln abgrenzbaren Moorkörper der Moorbodenkarte wurden in 21.322 haB-Objekte mit Flächen zwischen weniger als einem und 1.428 Hektar bei einer medianen Größe von 1,5 ha unterteilt. Die Karte der hydrologisch adressierbaren Bereiche (haB) stellt ein wichtiges Projektergebnis dar (Karte 18: Hydrologisch adressierbare Bereiche). Sie weist hydrologische Einheiten aus, die bei Wasserstandsmaßnahmen auf Einzelflächen direkt betroffen sind bzw. die als Einheit beplant werden sollten.

#### 7.4.2.2 Indikatoren und Karte der sozioökonomischen Restriktionen

Die erstellte Datenbank umfasst 57 sozioökonomische Indikatoren, welche auf Basis der hydrologisch zusammenhängenden Bereiche abgerufen werden können (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Auf die hydrologisch zusammenhängenden Bereiche der Moorbodenkarte ermittelten Indikatoren in Anlehnung an Tiemeyer et al., 2017.

	<b>Anzahl berechneter Indikatoren</b>	<b>Wichtige Indikatoren</b>
<b>Bodeneigenschaften</b>	- Vorhandensein stauender Schichten*	
<b>Klimatische Wasserbilanz (KWB)</b>	- 7 Attribute (auf Basis von DWD-Daten)	- Flächenanteil positive KWB - Flächenanteil negative KWB
<b>Flächenanteil Schutzgebiete</b>	- 3 Attribute	- Flächenanteil FFH-, Naturschutz-, Wasserschutzgebiete
<b>Eigentümerstruktur</b>	- 3 Attribute	- Flächenanteil in öffentlicher Hand - Anzahl distinkter, nicht öffentlicher Eigentümer
<b>Flächenanteile Tatsächliche Nutzung</b>	25 Objektarten ; 25 Attribute	
<b>Landwirtschaft</b>	5 Attribute	- Anzahl der betroffenen landwirtschaftlichen Betriebe - Anzahl betroffener Landwirte - Anzahl der betroffenen Ackerparzellen - Anzahl der betroffenen Dauergrünlandparzellen - Anzahl der betroffenen Dauerkulturparzellen
<b>Flurstücksgrößenverteilung</b>	- 5 Attribute	
<b>Minimale Abstände</b>	- 5 Attribute	- zu Flughäfen - zu Bahnstrecken - zu Wegen - zu Straßen - zu Siedlungen

\* Die wichtigen Bodeninformationen zu Stauhorizonten waren aufgrund fehlender Daten nicht ermittelbar.

Die im Projekt erstellte Karte des sozioökonomischen Restriktionspotenzials sowie die klassifizierten Karten der dafür herangezogenen Einzelindikatoren sind im Anhang abgebildet (Karten 19 bis 23). Zur Veranschaulichung der Klasseneinteilung wurden Detailausschnitte für das Projektgebiet Benediktbeuern erstellt (Anhang 13.12). Dadurch wird veranschaulicht, wie sich die Karte der sozioökonomischen Restriktionspotenziale (E) aus den einzelnen Indikatoren (A-D) zusammensetzt.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass 45 % der hier untersuchten haB ein geringes und weitere 15 % ein durchschnittliches Restriktionspotenzial haben. 40 % der Fläche weisen dagegen in mindestens einem Indikator eine überdurchschnittliche Restriktion für die Wiedervernässung auf (Abbildung 28).

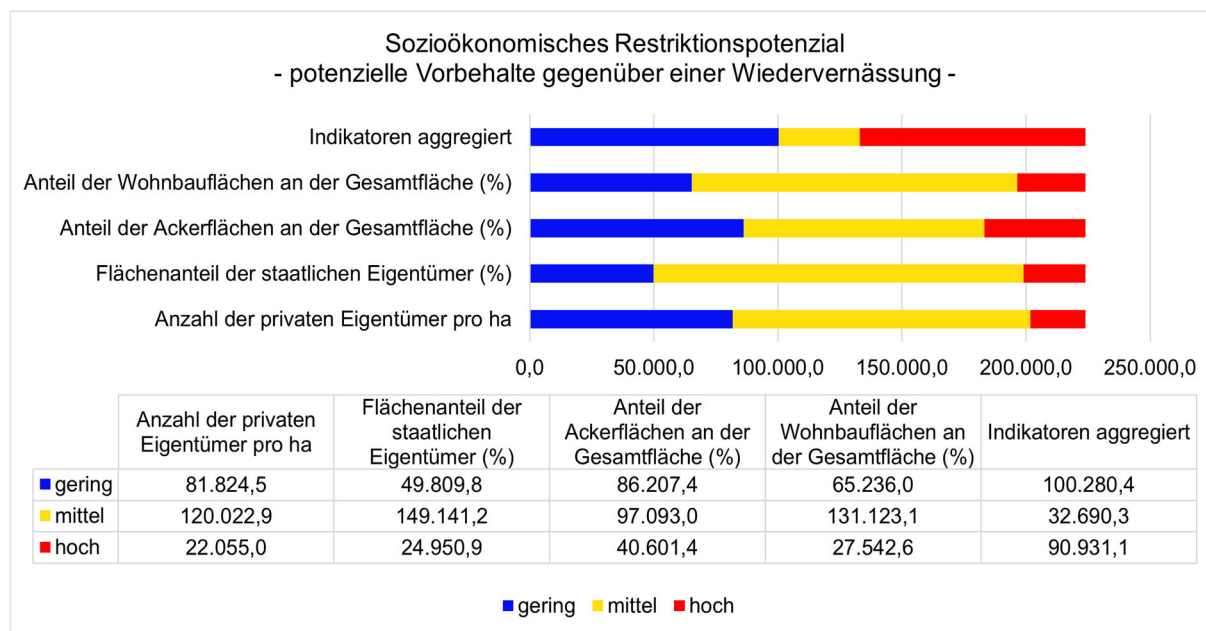


Abbildung 28: Sozioökonomische Restriktionspotenziale. Flächenverteilung in Hektar der potenziellen Vorbehalte gegenüber einer Wiedervernässung, unterteilt in die Klassen gering (potenzielle Gunsträume), mittel (durchschnittliches Restriktionspotenzial) und hoch (potenziell höhere Restriktionen zu erwarten). Die Flächenanteile berechnen sich aus dem Anteil an der Gesamtfläche hydrologisch adressierbarer Bereiche > 1 Hektar.

### 7.4.3 Karte der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung

Die Karte der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung stellt ein wichtiges Endergebnis des KliMoBay Projekts und nach unserer Kenntnis weltweit einzigartiges Produkt dar. Sie ist datenbedingt relativ grob, kann aber trotzdem kritische Situationen identifizieren, die dann vor Ort mit Realdaten zu verifizieren sind.

Betrachtet man die Flächenanteile in den Endlichkeitsklassen, zeigt sich, dass 25,4 % der landwirtschaftlich genutzten Moorböden Bayerns in 15 Jahren und zusätzliche 12,5 % in 30 Jahren – **in Summe also rund 37,9 % in den kommenden 30 Jahren** - voraussichtlich an die Endlichkeitsgrenze ihrer aktuellen Nutzung stoßen werden (vgl. Abbildung 29). Auch wenn Ackerland nur ein Drittel der hier ermittelten bayernweiten landwirtschaftlichen Nutzung auf Moorböden ausmacht, wird auf über der Hälfte der Fläche, die in 15 Jahren an ihre Endlichkeitsgrenze kommt, Ackerbau betrieben. Insgesamt konnten knapp zwei Drittel der landwirtschaftlich genutzten Moorböden einer Endlichkeitsklasse zugeordnet werden. Für das letzte Drittel gibt es keine Angaben, was auf fehlende Untergrenzen (GWFA oder Mächtigkeit)

bzw. keine oder positive Höhenveränderungen zurückzuführen ist. Alle Flächenanteile der landwirtschaftlich genutzten Moorflächen Bayerns sind in Anhang 13.13 zusammengetragen.

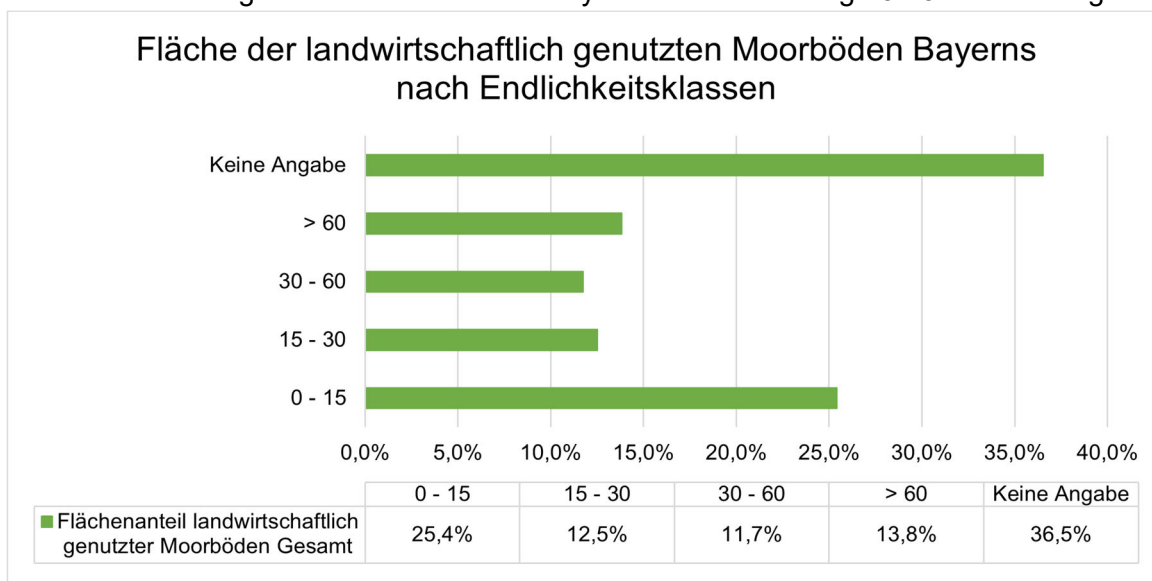


Abbildung 29: Flächenanteile der landwirtschaftlich genutzten Moorböden, eingeteilt in die Klassen in Jahren nach denen eine Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung zu erwarten ist.

Die Abschätzung der Endlichkeit ist datenbedingt relativ grob. Dabei ist zu beachten, dass die Wasserstandskarte statistisch erwartbare GWFA zeigt und mit entsprechend hohen Unsicherheiten behaftet ist. Die Torfsackung könnte sich verlangsamen, wenn sich Torf mit Unterliegendem mischt, nur noch geringmächtig vorhanden ist oder der Boden durch die Sackung dem Grundwasser näherkommt. Auch die Schätzung der Moormächtigkeit ist relativ grob.

Bayernweite Übersichtskarten der Endlichkeit in Jahren bis zum Erreichen eines minimalen Grundwasserabstands unter Flur (Anhang 13.18, Karte 27) beziehungsweise bis zum Erreichen eines für den Pflanzenbau ungünstigen Substrats (Anhang 13.18, Karte 28) sind im Format A3 dem Anhang beigelegt. Da ein ungeeignetes Substrat nur bei 1,5 % der Gesamtfläche den limitierenden Faktor darstellt, ist dessen Endlichkeit nur in detaillierteren Betrachtungen sichtbar.

Zur Veranschaulichung des Datensatzes ist in Abbildung 30 ein Kartenausschnitt für das Projektgebiet Benediktbeuern abgebildet. Hier sind, neben der Visualisierung der abgeschätzten Zeit in Jahren bis zum Ende der bisherigen Landnutzung, alle für jede Rasterzelle vorhandenen Informationen beispielhaft dargestellt. Diese umfassen u.a. die mittlere Sackungsrate in m pro Jahr und die Anzahl der Jahre, in der voraussichtlich ein für den Pflanzenbau ungeeigneter Zustand erreicht wird. Darüber hinaus sind Informationen zur Datenbasis, wie die geschätzte Mächtigkeit und deren Quelle, dem Grundwasserflurabstand sowie Informationen zur tatsächlichen Nutzung und zum durch Torfersetzung zurückbleibenden Substrats enthalten.

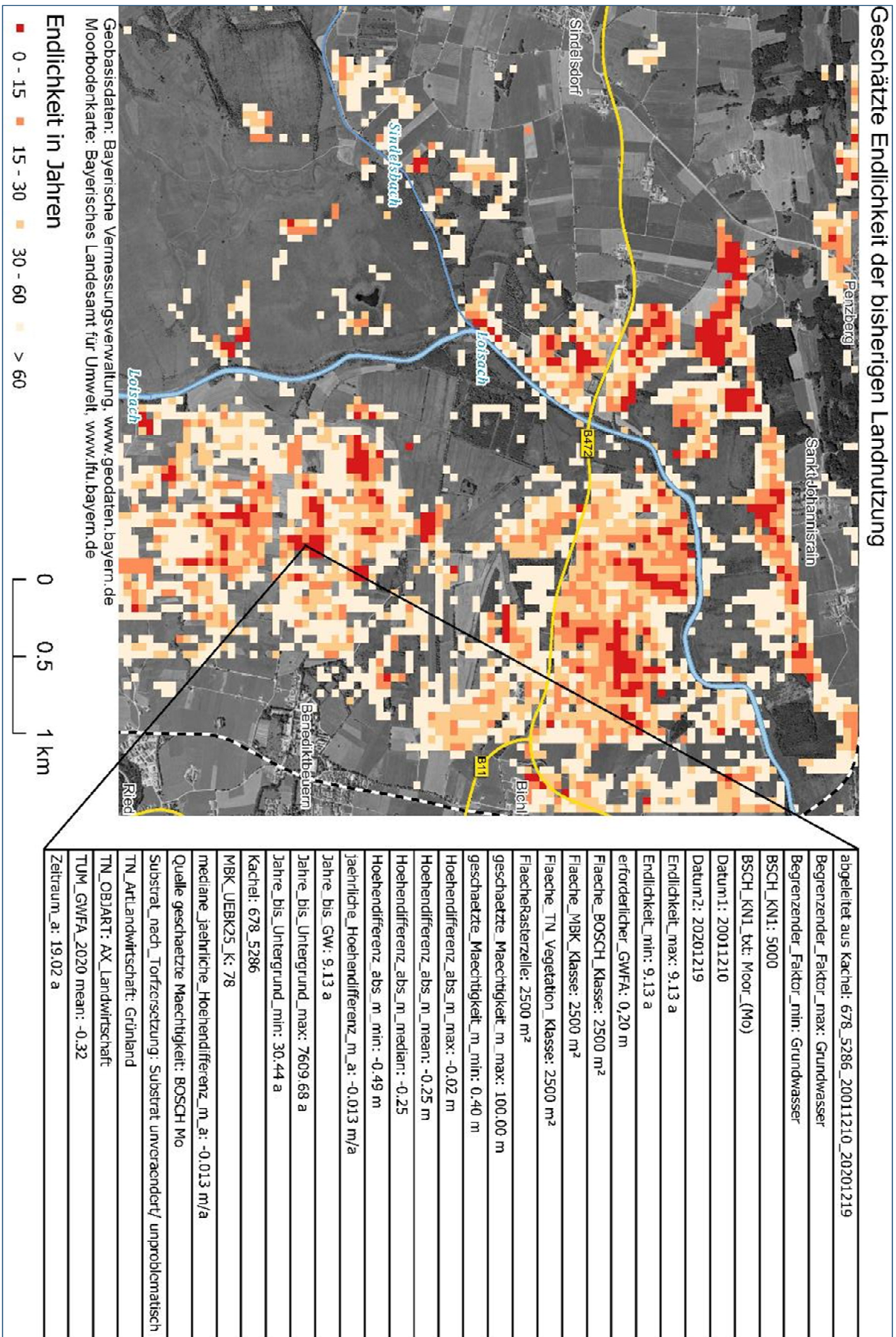


Abbildung 30: Ausschnitt aus der Karte der geschätzten Endlichkeit in Jahren in BDB mit pixelweise verfügbaren Informationen auf einem 5 x 5 m Raster.

## 7.5 Output-Indikator

Die Wiedervernässung von 3 ha Grünland auf dem staatlichen Versuchsgut in Karolinenfeld führte gemäß den Treibhausgasmessungen der HSWT im Projekt zu einer Treibhausgasminderung von rund 70 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr. Es war geplant, eine angrenzende tief entwässerte Niedermoorfläche von 10 ha im Staatsgut Karolinenfeld in Stufen wiederzuvernässen, um hydrologische Zusammenhänge zu messen und aktuelle Fernerkundungsmessungen zu kalibrieren. Die Baumaßnahmen dafür verzögerten sich, weil die in den Drainageplänen eingezeichneten Drainagerohre nur teilweise im Boden vorhanden waren und damit eine komplette Neuplanung und sehr viel aufwändigere Umsetzung nötig war. Die Baumaßnahme wurde im Herbst 2022 durchgeführt. Dadurch werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Fläche erwartungsgemäß ebenfalls ungefähr halbiert und weitere 23,4 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Emissionsminderung, insgesamt also zusätzlich 234 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr erzielt.

Durch die Innovationen und Ergebnisse des KliMoBay Projekts wird die Umsetzung des Masterplans Moore Bayern beschleunigt. Erstmals liegen nun konkrete Daten vor, um mit Betroffenen gezielt in Planungsräumen bis hin zu konkreten hydrologisch adressierbaren Einheiten in den Dialog zu treten. Im Einzelnen:

Erstmals wurden für Bayern Karten der dekadischen Torfsackungsraten, der hydrologisch adressierbaren Einheiten für Wiedervernässungsmaßnahmen, der sozioökonomischen Restriktionspotenziale und für die Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung erstellt. Sie bilden die Grundlage für eine faktenbasierte Kommunikation mit Betroffenen. Mit ihnen kann die Priorisierung für erfolgreiche Moorschutzprojekte schneller und zielgerichteter erfolgen.

## 7.6 Diskussion

### Bodeninformationen

Durch die Wiederholungsaufnahmen im Jahr 2021 und 2022 konnten die Projektgebiete im Hinblick auf die Torfsackung sowie physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht werden. In allen Untersuchungsgebieten kam es zu einem deutlichen Höhenverlust der Torfmächtigkeit. Die Berechnung der Kohlenstoffvorräte ermöglicht eine Abschätzung der CO<sub>2</sub> Emissionen bei fortschreitendem Torfschwund. Die Lagerungsdichte, der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt sowie der pH-Wert der Torfe/ Substrate sind wichtige Faktoren für die landwirtschaftliche Nutzung und eine potenzielle Wiedervernässbarkeit der Flächen. Durch den Zugriff auf umfangreiche historische Daten konnte der schleichende, doch deutliche Wandel der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften in drei der fünf Projektgebiete aufgezeigt werden.

Der Aufbau der Geodatenbank ermöglicht es detaillierte Informationen für die landwirtschaftliche Nutzung und eine Wiedervernässbarkeit der Gebiete zusammenzutragen. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass die Projektgebiete (mit Ausnahme BN-NSG) generell von Torfsackung und damit einer Zunahme der Lagerungsdichte und einer Abnahme der Kohlenstoffgehalte in den oberen Horizontschichten betroffen sind. Damit ist eine langfristige landwirtschaftliche Nutzung der Moorböden, insbesondere im Erdinger Moos und im Ampertal, zeitlich begrenzt. Auch in Benediktbeuern ist die landwirtschaftliche Nutzung vor allem auf den Flächen mit hoch anstehenden Tonmudden gefährdet.

Mit Hilfe der Substrat-Zersetungsgrad-Tabelle (Anhang 13.11) können zukünftige Veränderungen der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Torfkörper

abgeschätzt werden. Dies erlaubt eine bessere Planungsgrundlage für eine Wiedervernässung und eine Bewirtschaftung, sofern die Degradation des Torfkörpers ungebremst voranschreitet. Durch die Zunahme der Lagerungsdichte im Oberboden kann es zur Bildung von Stauhorizonten kommen. Die Abnahme des Kohlenstoffgehalts wirkt sich nicht nur negativ auf das Pflanzenwachstum aus, sondern hat zusätzlich noch eine signifikante Klimawirkung. Die hier dargestellten Ergebnisse sind insbesondere für die Seggen-Schilftorfe aussagekräftig. Für die Substratklasse der Sphagnumtorfe und der degradierten Torfe sollte der Probenumfang für ein statistisch valides Ergebnis erhöht werden.

## **Bodenphysikalische Restriktionspotenziale**

Hinsichtlich bodenphysikalischer Restriktionspotentiale ergeben sich eine Reihe von Herausforderungen - diese sind:

Wie beeinflussen Bodeneigenschaften die Bodendegradation und Sackungsraten in entwässerten Mooren? Durch Wiederholungsbeprobungen wurde versucht, die Geschwindigkeit der Torfdegradation zu bestimmen. Dieser Ansatz scheiterte im Gelände aber, da die wiederbeprobten Profile nicht ausreichend gut horizontweise mit den Altdaten parallelisiert werden konnten. Lediglich über größere Profilbereiche konnten die bekannten Degradationsprozesse quantifiziert werden: Verdichtung (zunehmende Lagerungsdichte) und abnehmende Kohlenstoffgehalte. Die Gründe für die unerwartet hohen Schwierigkeiten sind unklar. Entweder waren die beprobten Moore zu heterogen, z.B. durch kleinräumige Muddeeinlagerungen, oder die in den Karten händisch vermerkten Bohrpunkte konnten trotz höchst genauem GPS-Gerät und sorgfältiger Digitalisierung der Altdaten nicht ausreichend genau aufgefunden werden.

Mit den Ergebnissen und den Erfahrungen aus der Wiedervernässungsmaßnahme in Karolinenfeld können folgende Fragen beantwortet werden:

Wo kann aufgrund der bodenkundlichen Ausgangssituation und in Anbetracht der erwarteten zukünftigen Entwicklung der Bodendegradation die Wiedervernässung erfolgreich umgesetzt werden? Grundsätzlich ist die Wiedervernässung überall möglich. Die Daten zu hydraulischen Leitfähigkeiten sind vergleichbar mit Daten aus dem BfN-Projekt „Moorschutz in Deutschland“ (Tiemeyer et al. 2017) und weiteren Daten aus Norddeutschland. Sie bestätigen, dass die bekannten Faustzahlen auch in Bayern für die Kalibration hydrologischer Modelle geeignet sind. Je stärker der Torf zersetzt ist, desto drastisch geringer ist die hydraulische Leitfähigkeit. Dieser Zusammenhang ist für die Wiedervernässung wichtig. Die Wiedervernässungsmaßnahme in Karolinenfeld zeigte, dass selbst tiefgründig vererdeter, also hoch degradierter Torf bis zur Geländeoberkante wiedervernässt werden kann. Der Wiedervernässungsprozess brauchte zunächst Monate, bis das Torfprofil wieder flächig nass war. Danach konnten hohe Wasserstände bei regelmäßigen Niederschlägen durch Anstau stabil gehalten werden.

Wo begünstigen Bodeneigenschaften und Horizontierung eine mögliche zukünftige Wiedervernässung? Mittel bis schwach zersetzte Torfe unterstützen flächige Wiedervernässungsmaßnahmen durch Wasseranstau oder Einleitung von unten. In den beprobten Mooren und untersuchten Mooregebieten waren bei Torfmächtigkeiten von einigen Dezimetern meist derartige Torfe im Untergrund, z.T. sogar bis überraschend nah an die Oberfläche vorhanden. Diese Torfschichten sorgen aber auch für eine Konnektivität in benachbarte Flächen, also mögliche Beeinflussung von Nachbarflächen. Stark zersetzte Torfe reagieren zunächst langsam, halten das Wasser aber gut bei oberflächlicher Wassereinleitung, z.B. durch Überrieselung, und nach einer Aufsättigungsphase auch durch Anstau und Einleitung von unten.

Wo gefährden fortschreitende Bodendegradationsprozesse eine erfolgreiche Wiedervernässung? Erfreulicherweise konnten keine bodenphysikalischen Grenzen der Wiedervernässbarkeit identifiziert werden – vielmehr ist die Wiedervernässbarkeit eine Frage der Zeit.

### **Sozioökonomische Restriktionspotenziale**

Nach unserem Wissen ist dies der erste Ansatz um, bezogen auf hydrologisch adressierbare Moorteilstücke, sozioökonomische Vorbehalte gegenüber einer Wiedervernässung bayernweit digital aufzubereiten. Der digital verfügbare Datensatz stellt relevante Informationen zusammen, die die Wiedervernässbarkeit einer Fläche maßgeblich beeinflussen. Mit der Karte der sozioökonomischen Restriktionspotenziale können Gunsträume für eine Wiedervernässung und einen raschen Moorschutz ermittelt werden, da die vier zugrundeliegenden Indikatoren maßgeblich die Umsetzbarkeit von Wiedervernässungsprojekten beeinflussen. Um den Einfluss und das Zusammenspiel der anderen, weniger limitierend wirkenden und trotzdem relevanten Indikatoren zu untersuchen, werden weiterführende Analysen benötigt. Eine Eingruppierung der Indikatoren könnte zum Beispiel entsprechend der Vorarbeit von Tiemeyer et al. (2017) durchgeführt werden.

Die Karte der sozioökonomischen Restriktionspotenziale ermöglicht eine Vorauswahl von Gebieten, deren tatsächliche Situation im Einzelnen geprüft werden muss. Aufgrund der bei der Aggregation getroffenen Annahme, dass eine Fläche ein hohes Restriktionspotenzial hat, sobald einer der Indikatorwerte ungünstig ist, kann es zur fälschlichen Einstufung des Potenzials kommen. So kann zum Beispiel bei Großgrundbesitzern die Fläche mit hohem Vorbehalt gegenüber einer Wiedervernässung ausgewiesen werden, wenn der Anteil der Fläche in Öffentlicher Hand zu gering ist. Da es sich aber nur um einen einzigen Landbesitzer handelt, ist die Umsetzung der Wiedervernässung möglicherweise wenig problematisch.

Die flächendeckende Datenbank mit allen sozioökonomischen Indikatoren ist eine geeignete Grundlage, um Flächen für eine Wiedervernässung zu identifizieren und mögliche sozioökonomische Restriktionen abzuwägen.

### **Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung von Moorböden**

Die hier erstellte Karte der Endlichkeit einer landwirtschaftlichen Nutzung ermöglicht es für die Bereiche der Moorbodenkarte Bayerns Informationen abzurufen, die relevant für die zukünftige Ausrichtung von Betrieben und für die Flächenauswahl für Wiedervernässungsprojekte sind. Insbesondere in den Bereichen, in denen es zu einem ungünstigen Substratwechsel kommen kann, sollte die Möglichkeit einer Anhebung des Grundwasserpegels und einer raschen Betriebsumstellung auf eine Bewirtschaftung mit hohem Grundwasserpegel erfolgen, um die Torfzersetzung und damit den Schwund wirtschaftlich nutzbaren Bodens aufzuhalten. In den verfügbaren Geodatenätzen zu Mooren fehlen zumeist flächenscharfe Angaben zu Torfmächtigkeiten sowie zu Art und Lage unter- bzw. dazwischenliegender Mineralbodenschichten, weshalb für die Abschätzung vereinfachte Annahmen zu treffen waren. Die Unterlagen des historischen LfL-Moorkartenarchivs enthalten dazu hilfreiche Angaben, jedoch liegen diese Informationen noch nicht in verarbeitbarer, digitaler Form vor. Auch in Bereichen, in denen der Grundwasserpegel bereits hoch ansteht, sollte ein Umdenken angeregt werden. Da eine Vertiefung der aktuellen Entwässerung nach Art. 3 Abs.4 Satz 1 Nr.2 BayNatschG untersagt ist, müsste auch hier bald eine Umstellung auf eine angepasste Wirtschaftsform erfolgen. In besonders gefährdeten Bereichen wäre auch eine Renaturierung und unter Schutzstellung eine sinnvolle Alternative zur Bewirtschaftung. Durch die gleichzeitige Betrachtung der sozioökonomischen Indikatoren könnten hierfür Gebiete ausgewählt werden, in denen ein geringes sozioökonomisches Restriktionspotenzial vorliegt.



## 7.7 Weiterführender Forschungsbedarf

Im Projekt wurde deutlich, dass flächendeckende Informationen zu (historischen) Torfmächtigkeiten und dem unterliegenden Substrat fehlen. Beide Informationen sind unbedingt für die Planung und Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen notwendig. Neuere Untersuchungen der Moorböden werden meist nur bis zu einem Meter Tiefe durchgeführt (vgl. Bodenschätzung und Bodeninformationssystem des LfU). Die schnellste und kostengünstigste Möglichkeit detaillierte Informationen für mächtigere Moore zu erhalten, bietet die Digitalisierung des Moorarchivs der LfL. Aus den Daten zu Querprofilen könnte neben dem Untergrund auch die Lage stauender Schichten im Torfkörper ermittelt werden.

Die Berechnung rezenter Torfsackungsraten aus DGM-Vergleichen ist flächendeckend umsetzbar. Regionale Muster können aufgezeigt werden, jedoch ist die Methode auch fehlerbehaftet. Die Ursachen für auffällig hohe Verluste und Zuwächse müssten evaluiert werden, denn neben einer tatsächlichen Torfsackung können Vegetations- und Bodenbearbeitungseffekte für die Veränderung verantwortlich sein. Eine weitere relevante Forschungsfrage besteht darin, ob und wie die Sackungsraten aus DGM-Vergleichen mit dem Grundwasserflurabstand oder der Torfmächtigkeit korrelieren.

Die Karte der Sozioökonomischen Restriktionen ermöglicht die einfache Identifikation und Vorauswahl von Gunsträumen für einen raschen Moorschutz. Für die Detailplanung können weitere Indikatoren herangezogen werden, was essenziell ist, um die lokalen Begebenheiten zu verstehen. Relevante Informationen sind zum Beispiel die Betroffenheit nach landwirtschaftlichen Betriebsstrukturen (Anteile der Betriebsfläche auf Moor, Betroffenheit Ackerbau-/Grünlandbetrieb, betroffene Tierzahl, Anzahl der betroffenen Bewirtschafter), oder der Forstwirtschaft sowie die Größe zusammenhängender Flächen (Verschmelzung benachbarter Flur-/Feldstücke, Potenzial des Nutzungstausches). Dabei ist eine Betrachtung auf verschiedenen, idealerweise durchgängigen Skalenebenen notwendig. Aktuell liegen die Daten auf Landes- und Moorteilkörperebene vor. Darunter muss weiter ins Detail gegangen werden.

Grundsätzlich besteht die Notwendigkeit der Harmonisierung heterogener und verteilt vorliegender Geodaten. Ideal wäre der Aufbau einer Moordateninfrastruktur MDI für Grundlagendaten und Echtzeitinformation (z.B. tatsächliche Wasserstände). Dabei sollten die Fachinformation verschiedener Akteure auf identische Geoobjekte bezogen werden (wie zum Beispiel die hier ermittelten hydrologisch abgegrenzten Bereiche). Damit könnten „Was wäre wenn...“ Szenarien durchgespielt werden, die die Entscheidung für oder gegen eine Wiedervernässung oder einer Nutzungsänderung unterstützen.

## 8 KOORDINATION, KLIMARELEVANZ UND BIODIVERSITÄT (PROJEKT 1, HSWT)

### 8.1 Einführung

Generell gilt, naturnahe Moore sind Kohlenstoff-Senken. In Bayern sind über 95% der Moore entwässert, sie sind somit Hotspots von THG-Emissionen mit z.T. mehr als 50 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Eickenscheidt et al., 2015). Durch Wasserstandsanhhebung und Wiedervernässung können die THG-Emissionen der Moore am effizientesten reduziert werden. Je nach Ausgangszustand und Nutzungsziel bzw. vollständiger Renaturierung sind erhebliche THG-Einsparungen bis hin zur THG-Neutralität naturnaher Moore erreichbar. Die Bilanzierung von THG-Emissionen unter unterschiedlicher Landnutzung, Landnutzungsintensität und Wasserstand ist daher eine wichtige Grundlage für Planungen, Priorisierungen und Potenzialabschätzungen, aber auch für die Erfolgskontrolle des klimaschutzorientierten Moormanagements.

### 8.2 Fragestellungen und Ziele

Im Projekt „Klimarelevanz und Treibhausgase“ des KliMoBay-Vorhabens werden, basierend auf THG-Messungen mit Hauben und Eddy-Kovarianz, regionale, für Bayern (und Süddeutschland) gültige, Emissionsfaktoren (EF) entwickelt und die Mooremissionen landnutzungsspezifisch mit Hilfe von Aktivitätsdaten für die gesamte bayerische Moorkulisse modelliert und dargestellt. In bundesweiten und bayerischen Vorläuferprojekten (z.B. Klimaschutz-Moornutzungsstrategien (BMBF); Organische Böden (Thünen-Institut) und weitere) konnten bereits wichtige Messdaten generiert werden. Allerdings beschränken sich die Gesamt-THG-Bilanzen auf baumfreie Nutzungstypen. Anmoortypen sind kaum erfasst, repräsentieren aber mehr als 40% der bayerischen Moore. Für Waldmoore sind nur einzelne Gase publiziert (Eickenscheidt et al. 2014; Hommeltenberg et al. 2014). Zudem haben Messungen des Thünen-Instituts ergeben, dass Unterflurbewässerungen zu überraschend hohen THG-Emissionen führen können. Dieser Aspekt wird im Projekt aufgenommen und anhand von ergänzenden Messungen untersucht. Zudem soll gezeigt werden, wie sich die THG-Bilanz auf Hochmoorwaldstandorten in Folge von Sukzession nach Waldrodung oder Renaturierung entwickeln. Außerdem sind die Emissionen stark von den naturräumlichen Gegebenheiten und dem regionalen Klima abhängig, weshalb regionaltypische EFs von Vorteil sind. Dies geht für Bayern deshalb, weil hier der größte Datensatz auf Bundesland-Ebene hinsichtlich des Spurengasaustausches erzeugt wurde.

Die Berechnung der Klimaschutzleistung der Renaturierungsmaßnahmen im KliP 2020/2050 (LfU) erfolgt mit dem PEP-Modell (Drösler et al. 2013). Die nationale Treibhausgasberichterstattung nutzt Jahresmittelwasserstände und Nutzungstypen und aggregiert diese zu nutzungsabhängigen EFs. Weinzierl & Waldmann (2015) leiteten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Sackungsraten für Moore Baden-Württembergs ab.

Für eine bayernweite Berechnung (Status quo und Szenarien) der Emissionen müssen die Folgen des Klimawandels, von Wasserstands- und Nutzungsänderungen und ggf. der Bodendegradation in die Modelle einfließen. Dies erfordert regionale Emissionsfaktoren und die Anwendung/Weiterentwicklung von Skalierungs-Modellen. Hierzu stellt sich die Frage, welche Steuerfaktoren für die Modellbildung benötigt werden und welche Flächeninformationen notwendig sind, um regional rechnen zu können.

Neben der Frage, wie sich ein verändertes Temperatur- und Niederschlagsregime im Zuge des Klimawandels auf die THG-Emissionen der Moore auswirken wird, sollen

Klimaschutzpotenzialkarten Synergien und Restriktionen der Biodiversität und sozioökonomische Fragestellungen berücksichtigen.

Damit kann das KliMoBay Projekt die Bilanzierung der Emissionen auf Tier 3-Niveau (höchstes Qualitätsniveau nach IPCC) heben, regionalspezifisch modellieren und die Unsicherheiten reduzieren.

## 8.3 Material und Methodik

### 8.3.1 Untersuchungsgebiete und Methodik der THG-Messungen/-Bilanzierung

Untersucht wurden zwei Niedermoor-Standorte unter Grünlandnutzung im Voralpenraum, um die Auswirkung von Wiedervernässungsmaßnahmen und Unterflurbewässerung auf die THG-Flüsse landwirtschaftlich genutzter Moorstandorte vergleichen zu können. In den beiden Untersuchungsgebieten Benediktbeuern (BDB, Abbildung 31) und Karolinenfeld (KLF, Abbildung 32) wurden im Dezember 2019 drei bzw. vier Treatments (=Messstandorte bestehend aus jeweils drei Messplots) eingerichtet. Der Standort in BDB wurde im Dezember 2020 um ein Treatment ergänzt, sodass dort im Jahr 2021 ebenfalls vier Messstandorte untersucht wurden. Weitere Details zu den Untersuchungsgebieten und Treatments werden auf den folgenden Seiten beschrieben.

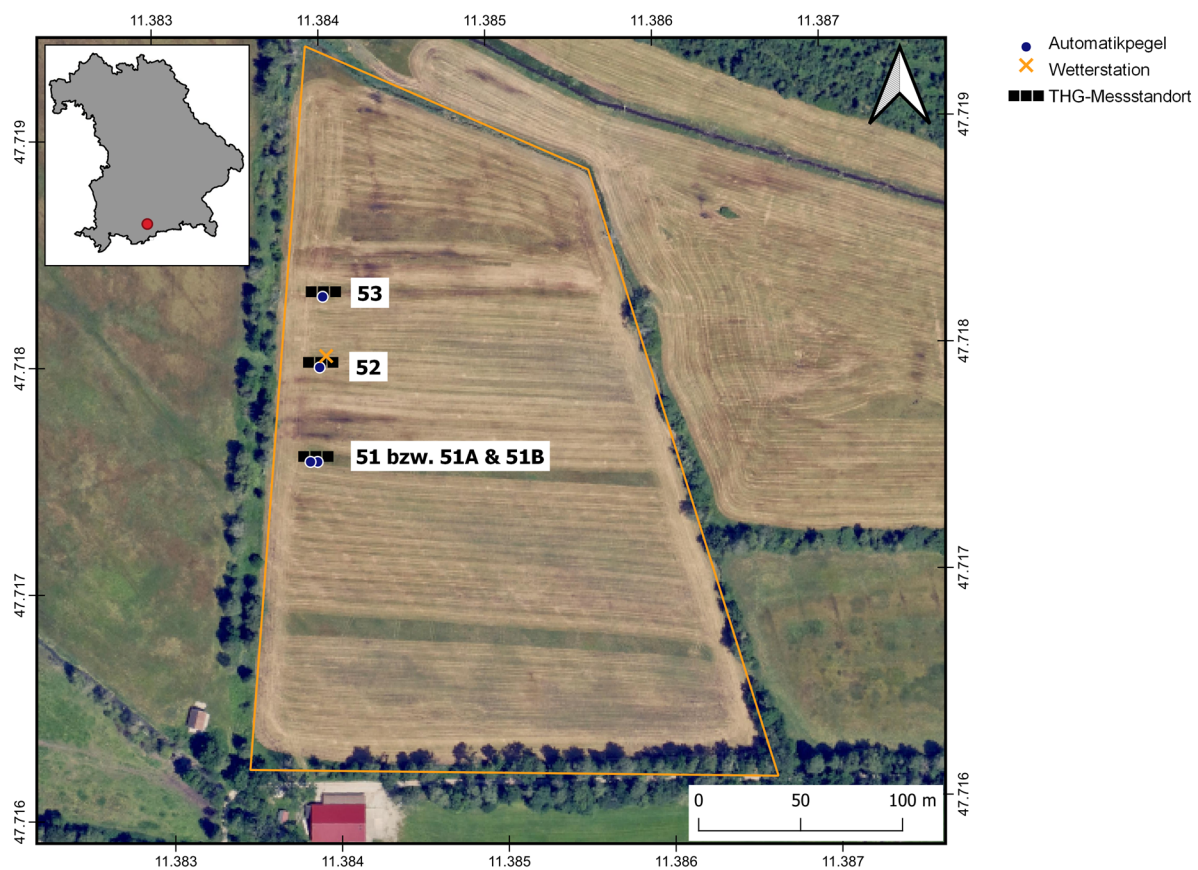


Abbildung 31: Übersicht über das Untersuchungsgebiet BDB (links) mit den Treatments 51 bis 53.

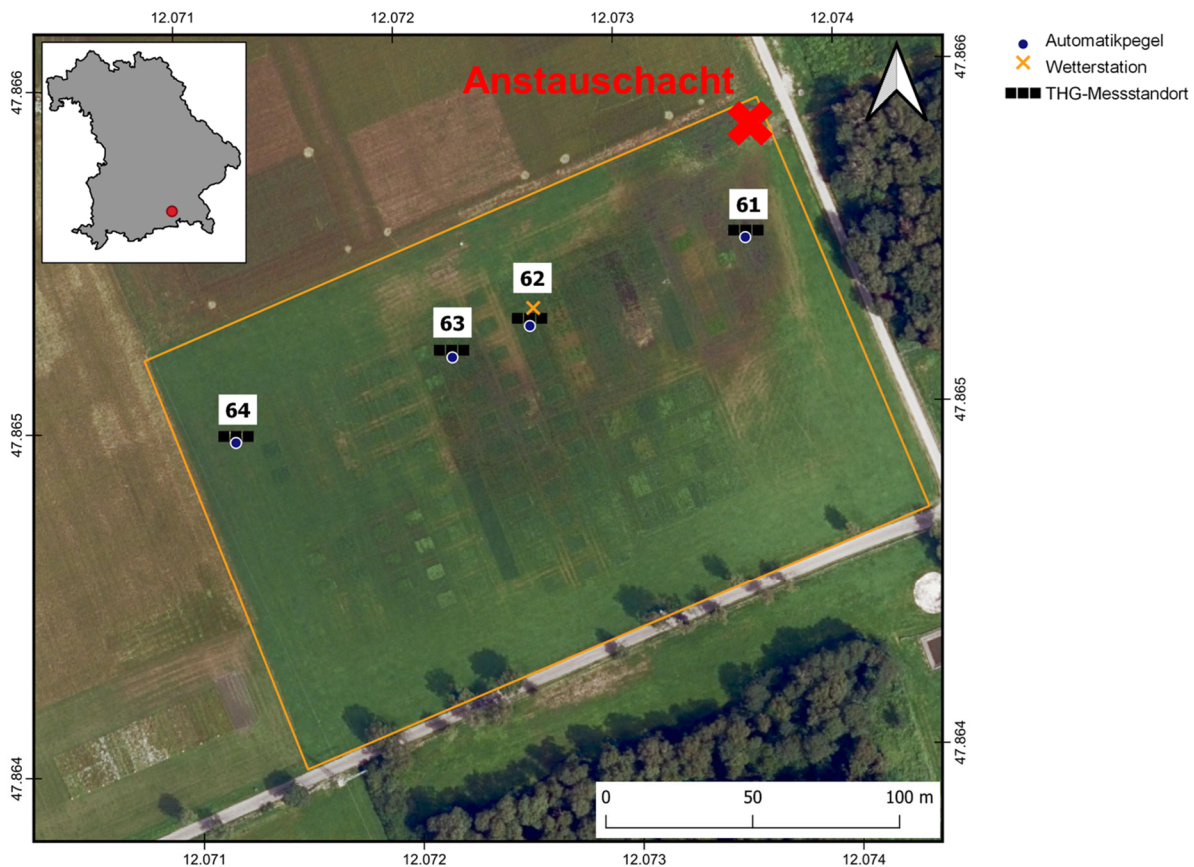


Abbildung 32: Übersicht über das Untersuchungsgebiet KLF (rechts) mit den Treatments 61 bis 64.

Im Projektzeitraum konnte nur die Wiedervernässung der Fläche in KLF umgesetzt werden, da die wasserrechtliche Genehmigung für den Anstau in BDB erst im November 2022 erteilt wurde. Durch günstige Witterungsbedingungen in BDB im zweiten Messjahr 2021 haben sich aber auch dort im Jahresmittel geringere Grundwasserflurabstände eingestellt (Tabelle 8 und Abbildung 34).

Die ausgewählte Fläche in KLF ist ein Grünland mit einer (mittel)intensiven Bewirtschaftung (drei Schnitte und zwei bis drei Gülle-Düngungen pro Jahr). Zudem wurde auf der Messfläche im Rahmen des Projekts „Moor-KULAP“ von der LfL eine spezielle nässeverträgliche Grünlandmischung, bestehend u.a. aus Rohr-Schwinkel, Wiesen-Lieschgras, Wiesen-Rispengras, Rohrglanzgras und Wiesen-Fuchsschwanz, eingesät. Seit Oktober 2020 ist das Schachtsystem für die Regelung des Wasserstandes fertiggestellt, sodass mit dem Wasseranstau in der Fläche begonnen werden konnte. Dies spiegelt sich in geringeren Grundwasserflurabständen im Jahresmittel für 2021 bei den Treatments 61, 62 und 63 wider. Der Wasserstand des am weitesten vom Anstauschacht entfernten Treatments 64 wurde hingegen im Jahr 2021 noch nicht von den Anstaumaßnahmen beeinflusst - auch weil die Fläche höher liegt (Abbildung 34). In BDB wurde ebenfalls eine Grünlandfläche, dort allerdings mit extensiver Bewirtschaftung (zwei Schnitte pro Jahr, keine Düngung) gewählt. Im Gegensatz zu KLF (vier Treatments) wurden in BDB im Jahr 2019 nur drei Treatments (51, 52, 53) eingerichtet. Da Bereiche der Messplots von Treatment 51 direkt über einem Drainagerohr lagen, wurde dieses im zweiten Messjahr 2021 um drei Plots erweitert und in die beiden Treatments 51A (etwas von der Drainage entfernt) und 51B (direkt über der Drainage) aufgeteilt (Abbildung 33).

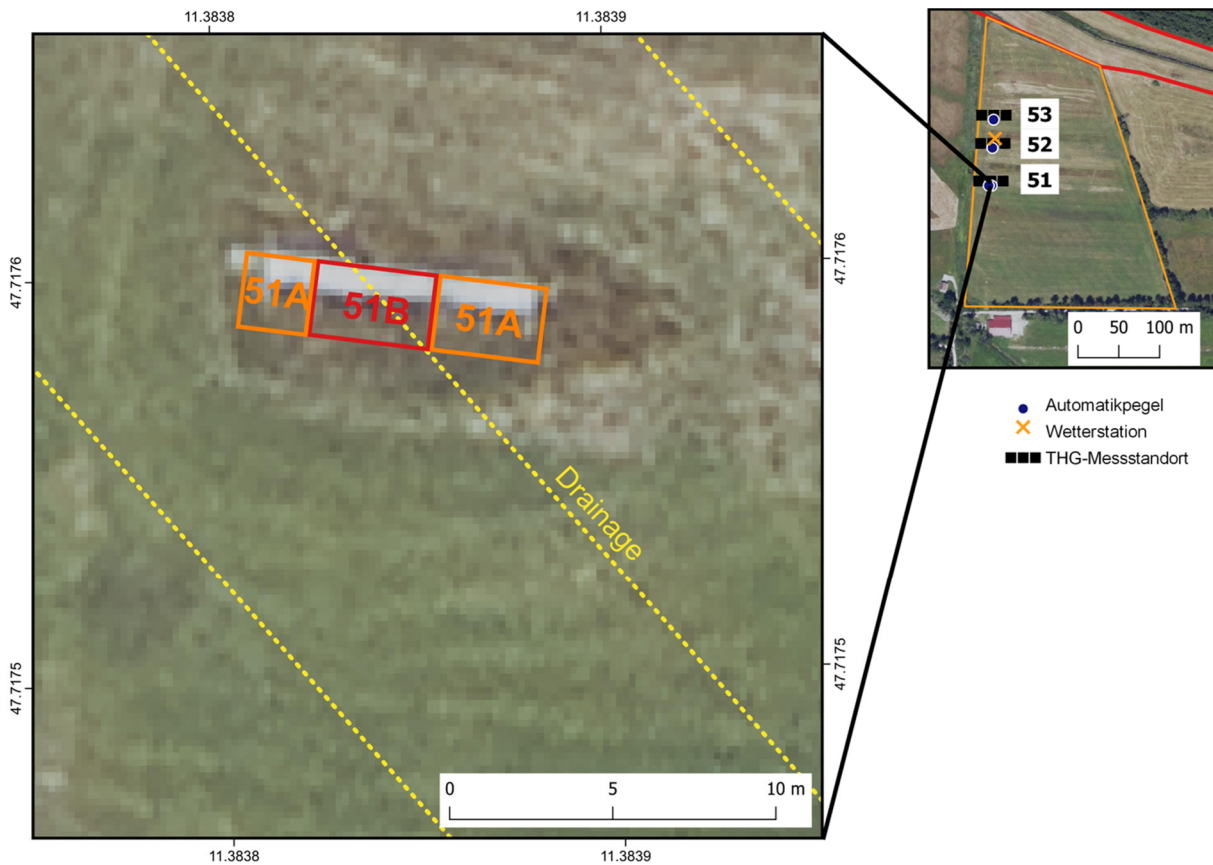


Abbildung 33: Aufteilung von Treatment 51 in Benediktbeuern in die Treatments 51A und 51B im Messjahr 2021 und Lage der beiden Treatments in Relation zum Drainagerohr.

An beiden Standorten wurde die Lage der Treatments so gewählt, dass sich innerhalb des Messgebiets ein Wasserstandsgradient ergeben sollte. In KLF verläuft dieser Wasserstandsgradient mit kleinen Abweichungen in der Flächenmitte annähernd von West nach Ost (tiefste Wasserstandswerte im Jahresmittel bei Treatment 64, höchste Werte bei Treatment 61), in BDB hingegen von Süd (tiefste Jahresmittelwasserstände bei Treatment 51 bzw. 51A/51B) nach Nord, wobei die beiden Treatments 52 und 53 annähernd gleiche Grundwasserflurabstände im Jahresmittel aufweisen. Grundsätzlich sind die Wasserstände in BDB homogener als in KLF, wo zwischen den vier Treatments in beiden Messjahren größere Differenzen im mittleren Grundwasserflurabstand sichtbar sind (Abbildung 34).

Tabelle 8: Durchschnittliche Lufttemperatur und klimatische Wasserbilanz 2020 und 2021 für die Messstandorte BDB und KLF

		Benediktbeuern	Karolinenfeld
Lufttemperatur [°C]	2020	9,6	10,0
	2021	8,8	9,1
Klimatische Wasserbilanz [mm]	2020	793,7	550,4
	2021	825,4	489,0

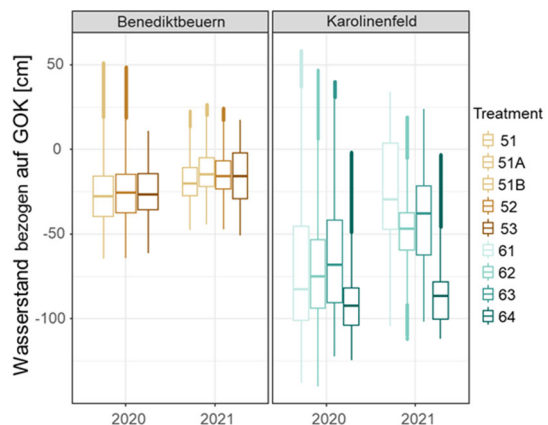


Abbildung 34: Wasserstände an den Standorten BDB und KLF im Vergleich der Messjahre 2020 und 2021

Mit der Einrichtung der Messfläche wurde im Oktober 2019 begonnen. Diese war bis Dezember 2019 abgeschlossen und es konnte zu diesem Zeitpunkt mit den THG-Messungen begonnen werden. Die Messungen wurden bis Anfang Januar 2022 fortgeführt. Sowohl in BDB als auch in KLF wurde der THG-Austausch mittels manueller Haubenmesstechnik erfasst. Die Methan- und Lachgasflüsse wurden dabei in einem wöchentlichen Rhythmus oder nach Düngung auch zeitlich höher aufgelöst gemessen. CO<sub>2</sub>-Messkampagnen wurden alle drei bis vier Wochen bzw. ebenfalls aktivitätsbezogen (bei Ernte) durchgeführt. Die Auswertung der Gasproben erfolgte entweder über Gaschromatographie (Clarus 480, PerkinElmer, Inc.) im Labor (Methan und Lachgas) bzw. im Fall von CO<sub>2</sub> mit Hilfe eines Infrarot-Gas-Analysators (LI-840/LI-850, LI-COR Biosciences) direkt in-situ im Feld.

Da für Methan und Lachgas bisher keine zufriedenstellenden Optionen existieren, um den Tagesgang dieser THG zu modellieren, werden die Jahresbilanzen durch Interpolation zwischen den einzelnen Messtagen erzeugt. Für CO<sub>2</sub> werden hingegen für jeden Messtag ein temperaturabhängiges Modell für die Ökosystematmung ( $R_{ECO}$ ) sowie ein strahlungsabhängiges Modell für die Bruttoprimärproduktion (BPP) parametrisiert. Diese Modelle werden dann zusammen mit halbstündlich aufgezeichneten Klimakennwerten (Lufttemperatur, Bodentemperaturen in 2, 5 und 10 cm Tiefe, photosynthetisch aktive Strahlung) verwendet, um die Flüsse von  $R_{ECO}$  und BPP zwischen den Messtagen zu modellieren. Aus der Differenz aus  $R_{ECO}$  und BPP ergibt sich der Netto-Ökosystem-Austausch (NEE). Dieser kann sowohl positive (CO<sub>2</sub>-Abgabe) als auch negative Werte (Kohlenstofffestlegung) annehmen. Summiert man den NEE über das Jahr auf, erhält man die Jahresbilanz des CO<sub>2</sub>-Austauschs. Zusätzlich zu den Jahresbilanzen der THG werden für jedes Treatment auch der Kohlenstoff-Export aus der Fläche über die Ernte sowie der Kohlenstoff-Input in die Fläche über die organische Düngung erfasst. Diese beiden Komponenten ergeben dann zusammen mit den Bilanzen der Einzelgase die THG-Jahresbilanz. Dabei werden die Lachgas- und Methandaten in CO<sub>2</sub>-Äqu. umgerechnet. Dies ist deshalb notwendig, weil Methan und Lachgas eine höhere Klimawirksamkeit in der Atmosphäre aufweisen als CO<sub>2</sub>. Dafür wurde auf die Umrechnungsfaktoren aus dem AR5 (IPCC 2013) zurückgegriffen.

Durch die im Rahmen von KliMoBay durchgeführten THG-Messungen und -Bilanzierungen konnten für die unterschiedlichen Treatments in BDB und KLF insgesamt 15 THG-Jahresbilanzen erzeugt werden, die den bestehenden Altdatenbestand für die THG-Modellierung ergänzen.

### 8.3.2 Aufbereitung und Auswertung der Altdaten

Grundlegend für die Modellierung des THG-Austauschs und die bayernweite Darstellung war die Aufbereitung des Altdatensatzes von Hauben- und Eddy-Kovarianz-Messungen zu CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- und N<sub>2</sub>O-Flüssen. Die THG-Bilanzen wurden zwischen 1999 und 2021 in insgesamt 7 Moorgebieten und für 75 unterschiedliche Treatments erhoben (Abbildung 35, Anhang 13.1). Insgesamt konnten 180 Messjahre allein aus bayerischen Messgebieten in den Datensatz einfließen, die überwiegend von der HSWT (PSC) und für den naturnahen Wald (9 Messjahre) vom Karlsruhe Institut für Technologie erzeugt wurden.

Für das Projekt wurden zusätzlich am Standort Karolinenfeld und Benediktbeuern je 2 Jahre Haubenmessungen durchgeführt, um den Datensatz mit intensiven und extensiven Grünlanddaten zu ergänzen. Es hat sich gezeigt, dass die größte Variabilität der EFs in den Grünlandstandorten liegt. Im Zuge der Altdatenaufbereitung wurden die Methan- und

Lachgas-Flüsse sowie die meteorologischen Daten und die Wasserstandsdaten nach einem einheitlichen Verfahren interpoliert. Außerdem wurden die Eddy-Kovarianz-Messungen der Waldstandorte Schechenfilz und Mooseurach teilweise neu berechnet und ausgewertet. Somit ergänzen erstmals deutschlandweit THG-Moorwalddaten die Treibhausgasbilanzierung. Der finale Datensatz enthält tägliche Mittelwerte der THGs, Informationen zu C-Input und C-Export, Wasserstände sowie meteorologische Begleitparameter.

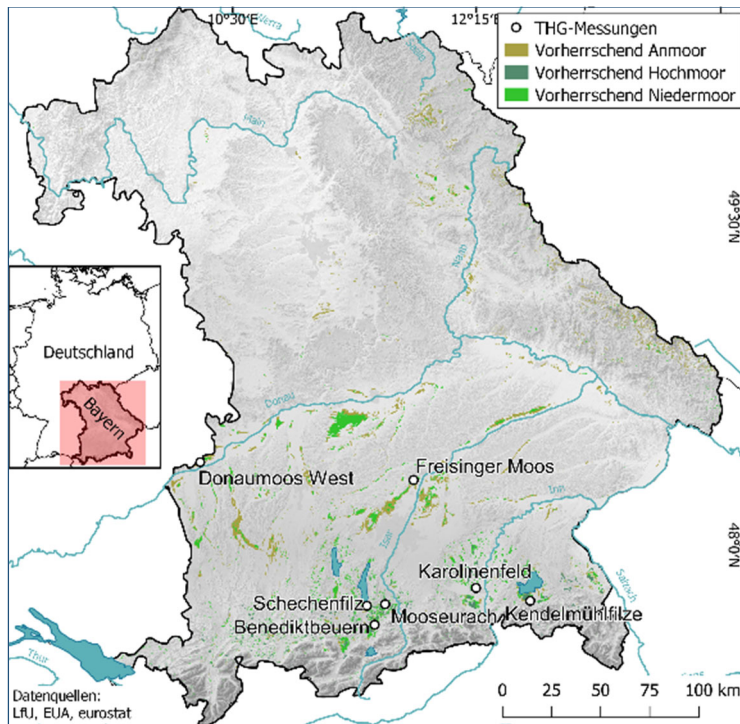


Abbildung 35: Treibhausgasmessstandorte in Bayern

Um die Daten aller Untersuchungsstandorte (Treatments) gleich zu gewichten, rechnen wir mit Standort-Mittelwerten für jedes der 75 Treatments. Nur für die mit der Eddy-Kovarianz Methode gemessenen Moorwald-Standorte haben wir jeweils die 9 bzw. 10-jährige Messreihe als einzelne Jahresmittelwerte für die Modellierung genutzt, da diese Landnutzungstypen nur in jeweils einem Gebiet gemessen wurden. Daraus ergibt sich die in Abbildung 36 dargestellte Verteilung der berücksichtigten Jahresbilanzen für die verschiedenen Landnutzungstypen.

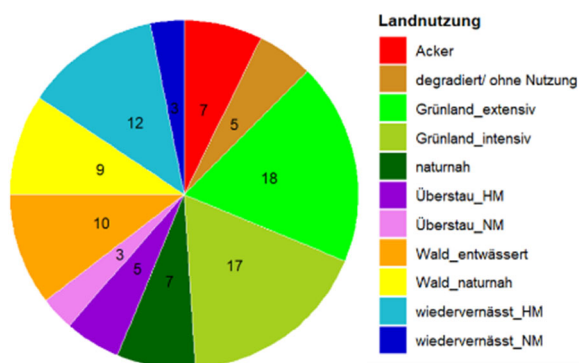


Abbildung 36: Datenbasis für die THG-Modellierung für die unterschiedlichen Nutzungstypen, Zahlen und Proportionen zeigen die Anzahl an berücksichtigten Datensätzen je Landnutzungskategorie

### 8.3.3 Treibhausgasmodellierung

Im Gegensatz zum PEP Modell (Drösler et.al, 2013) wurden im KliMoBay-Vorhaben die Einzelquellen bzw. Senken der THG-Bilanz ( $\text{THG} = \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2\text{O} + \text{C\_Export} - \text{C\_Import}$ ) individuell berechnet (Abbildung 37). Dadurch finden die  $\text{CH}_4$ -Emissionen der nassen Standorte eine differenzierte Berücksichtigung in der THG-Bilanz. Nicht berücksichtigt werden konnte der Beitrag des gelösten Kohlenstoffs (DOC), zu dem es deutschlandweit nur sehr wenige Daten gibt. Auf Basis der Datensynthese des IPCC-Wetland Supplements (IPCC 2014) kann ein Anteil von 0,9 am jeweiligen  $\text{CO}_2$ -Austausch angenommen werden. Da dieser Beitrag sehr schwer zu beziffern, insgesamt sehr unsicher und im Vergleich zu den Gesamtemissionen eher klein ist, wird im Weiteren nicht auf den DOC Beitrag eingegangen.

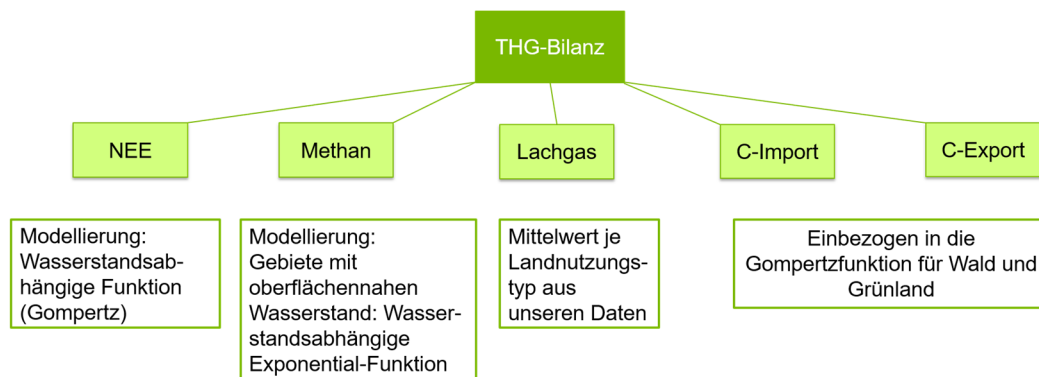


Abbildung 37: Aufbau der Treibhausgasmodellierung

Eine über die empirische Modellierung hinausgehende prozessorientierte Modellierung wurde nach eingehender Prüfung und Recherche verworfen. Die vorhandenen Modelle, die abgesichert organische Böden abbilden können, sind nicht für die entsprechende Skala des KliMoBay-Vorhabens ausgelegt oder können durch die unzureichende bayernweite Datenverfügbarkeit zu bodenchemischen und bodenphysikalischen Parametern nicht angewendet werden. Zudem haben wir uns für eine jahresbasierte Modellierung entschieden. Die THG-Bilanzen von bewirtschafteten Standorten sind stark von Ernte und Düngeereignissen überprägt. Da Schnitttermine je nach Nutzungsintensität sehr unterschiedlich liegen und für die Ackerflächen die Ernte je nach Fruchtfolge variiert, konnten keine saisonalen  $\text{CO}_2$ -Abhängigkeitskurven für alle Landnutzungstypen definiert werden. Für naturnahe, wiedervernässte Moore und Waldökosysteme ist eine Modellierung auf saisonaler Basis vorstellbar, konnte aber im Projektzeitraum nicht mehr geprüft werden.

## 8.4 Ergebnisse

### 8.4.1 Klimarelevanz, Treibhausgasaustausch, Abhängigkeit von Steuerfaktoren, Grundlagen für Modellbildung zur Klimabilanzierung, Vegetation

#### 8.4.1.1 THG-Bilanzierung und Klimarelevanz der Untersuchungsgebiete BDB und KLF

Im Zuge der Auswertung der Altdaten (siehe auch Abschnitt 8.4.1.2) hat sich gezeigt, dass Überstausituationen in Hochmooren aus THG-Sicht vergleichsweise unproblematisch sind (siehe Abbildung 39). Neue THG-Messungen wurden im Projekt daher in Niedermoorgebieten (BDB und KLF) als Begleitung von Wiedervernässungsmaßnahmen durchgeführt, wobei in BDB aufgrund von Problemen mit der wasserrechtlichen Genehmigung der höhere



Wasserstand im zweiten Messjahr letztendlich nur durch eine natürliche Variation der Witterungssituation im Sommer zustande kam. In Abbildung 38 sind die THG-Jahresbilanzen sowie die Klimarelevanz der insgesamt 15 Treatments an den beiden Versuchsstandorten BDB und KLF in Abhängigkeit vom mittleren Jahreswasserstand dargestellt.

Was die beiden Bewirtschaftungskomponenten C-Input über Düngung und C-Export durch Ernte angeht, unterscheiden sich BDB und KLF deutlich. Da in BDB keine Düngung erfolgt, fehlt der Düngungsterm an diesem Standort komplett. Zudem kann man feststellen, dass der Kohlenstoffentzug durch Ernte am Standort KLF in beiden Messjahren größer war als in BDB. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass die BPP in KLF generell höher ist als in BDB. Auffällig ist, dass es an beiden Standorten in keinem der Messjahre zu ausgeprägten Lachgasemissionen kommt, obwohl in KLF über Gülle-Düngung Stickstoff in moderatem Umfang zugeführt wurde.

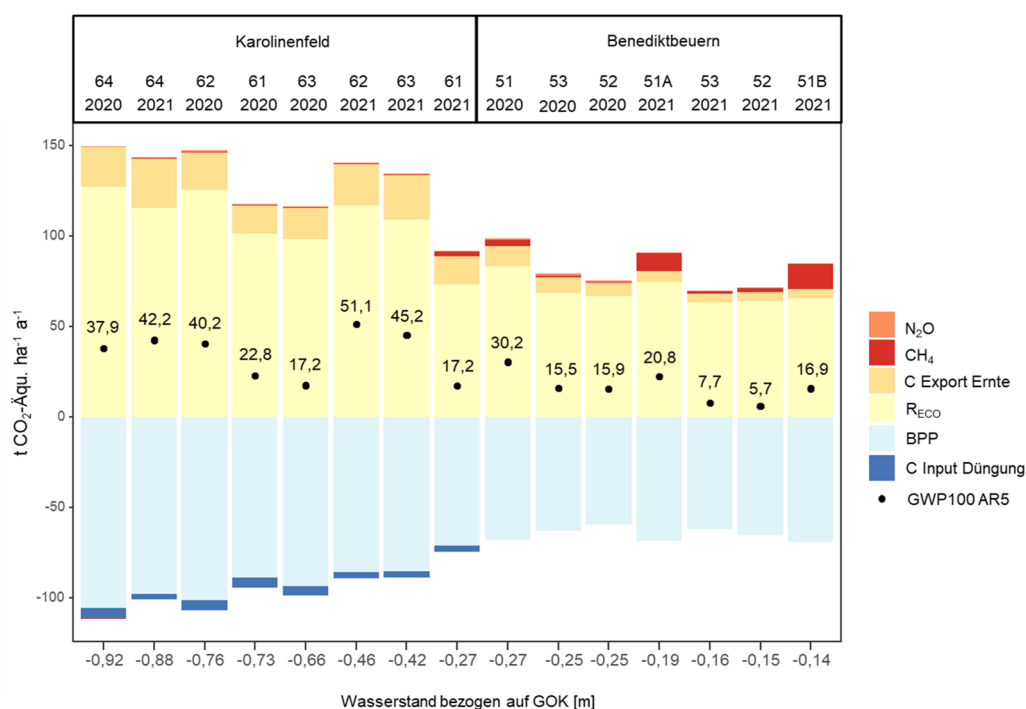


Abbildung 38: THG-Bilanzen und Klimarelevanz an den Messstandorten KLF und BDB in den Jahren 2020 und 2021

Mit Ausnahme von Treatment 61 im Jahr 2021 ist die Ökosystematmung in KLF immer höher als in BDB, was gut mit der tieferen Entwässerung und der höheren Biomasseproduktion in KLF übereinstimmt. Die verringerte  $R_{ECO}$  bei Treatment 61 ergibt sich wohl daraus, dass sich hier durch die Ansturmaßnahmen im zweiten Messjahr im Jahresmittel der Grundwasserflurabstand deutlich verringert hat. Dies ist auch daran erkennbar, dass bei Treatment 61 im Jahr 2021 das einzige Mal im gesamten Messzeitraum in KLF deutliche Methanemissionen auftraten. Generell zeigen sich in BDB in beiden Messjahren höhere Methanemissionen als in KLF. Die besonders markanten  $CH_4$ -Emissionswerte bei Treatment 51 im Jahr 2020 bzw. 51A und 51B im Jahr 2021 hängen aber vermutlich mit der Lage dieser Treatments direkt über bzw. räumlich nahe der Drainage zusammen (siehe auch Abbildung 33). Durch die Drainagen hat sich auf der Fläche ein Mikrorelief ausgebildet, da die Torfsackung über den Drainagen schneller und stärker voranschreitet als im Rest der Fläche. Dieses Mikrorelief führt dazu, dass das Wasser in den Senken zusammenfließt und dort Überstausituationen verursacht. Diese traten im Jahr 2021 verstärkt im Hochsommer (Juli,

August) in Kombination mit hohen Luft- und Bodentemperaturen auf und führten so zu den sehr hohen Methanemissionen der Treatments 51A und 51B.

Die beschriebenen Unterschiede in den Einzelkomponenten der THG-Bilanz wirken sich natürlich auch auf die Klimarelevanz der einzelnen Treatments aus, sodass hier keine einfaktorielle Abnahme mit verringerten Grundwasserflurabständen im Jahresmittel erkennbar ist. Einerseits wird dies beeinflusst durch die bereits beschriebenen großen Methanemissionen in BDB im zweiten Messjahr (hohe Klimarelevanz bei relativ geringem Grundwasserflurabstand). Vor allem besteht aber auch im intensiv bewirtschafteten Grünland im tief entwässerten Bereich eine hohe Varianz (auch ersichtlich im Gesamtdatensatz, siehe Abbildung 39), sodass hier davon auszugehen ist, dass der Einfluss des Wasserstands auf die Höhe der THG-Emissionen von anderen Faktoren überlagert wird. Möglicherweise ist auch am Standort KLF, wie in den vom Thünen Institut im SWAMPS-Projekt und im Modellprojekt Gnarrenburger Moor erhobenen Daten, das Phänomen zu beobachten, dass es durch Unterflurbewässerung bei mittleren Wasserständen zu erhöhten THG-Emissionen kommt. Im Gegensatz zum Projekt im Gnarrenburger Moor waren am Standort Karolinenfeld durch die Unterflurbewässerung allerdings keine erhöhten Lachgasemissionen zu beobachten. Dies ist vermutlich dadurch zu erklären, dass in Karolinenfeld durchgehend eine geschlossene Vegetationsbedeckung vorhanden war. Dadurch konnte der Stickstoff wohl zum größten Teil von den Pflanzen aufgenommen werden, sodass dieser nicht in Form von  $\text{N}_2\text{O}$  an die Atmosphäre abgegeben wurde. Im Gegensatz dazu war im Gnarrenburger Moor durch Probleme bei der Grünlanderneuerung in den ersten Messjahren keine geschlossene Vegetationsdecke vorhanden. Die dort beobachteten extremen Lachgasemissionen sind daher wahrscheinlich nicht hauptsächlich auf die Unterflurbewässerung zurückzuführen, sondern maßgeblich durch die fehlende Pflanzenbedeckung entstanden (Offermanns et al. 2023). Eine alternative Erklärung für die teilweise geringeren THG-Emissionen bei sehr tiefen Wasserständen wäre, dass der stark degradierte verdichtete Oberboden in diesen Situationen „biologisch tot“ ist, bei mittleren Wasserständen aber biologische Prozesse kontinuierlich weiterlaufen. Dies würde v. a. bedeuten, dass Wasserstände entsprechend den IPCC-Empfehlungen stärker als mindestens 30 cm unter Flur im Jahresmittel angehoben werden sollten. Ein Messjahr stellt allerdings eine zu geringe Datengrundlage dar, um dies als gesichert anzusehen. Zur Klärung können weitere THG-Messungen auf Grünland mit Unterflurbewässerung, die im Moment im Rahmen des StMELF-geförderten Projekts „Moorverträgliche Bewirtschaftungsmaßnahmen“ durchgeführt werden, beitragen.

Im Untersuchungsgebiet KLF hat sich bestätigt, dass es sich auch bei tiefentwässerten Niedermoorstandorten mit Grünlandnutzung um Emissions-Hotspots handelt; im Durchschnitt der beiden Messjahre wurden an den Treatments mit Jahresmittelwasserständen tiefer 0,3 m unter Flur  $36,7 \text{ t CO}_2\text{-Äqu. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Spanne: 17,2 bis  $51,1 \text{ t CO}_2\text{-Äqu. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) emittiert. Im Flächenmittel der beiden Jahre wurden am extensiv bewirtschafteten Standort BDB, mit den geringeren mittleren Grundwasserflurabständen, fast  $20 \text{ t CO}_2\text{-Äqu. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  weniger an THG-Emissionen ausgestoßen als in KLF.

#### **8.4.1.2 Regionale Emissionsfaktoren**

Basierend auf den in Kapitel 8.3.2 beschriebenen Datensatz wurden im Projekt regionale Emissionsfaktoren für Bayern berechnet (Tier 2), die sich je nach Landnutzungstyp und dem mittleren Wasserstand der Messflächen deutlich unterscheiden (Abbildung 39).

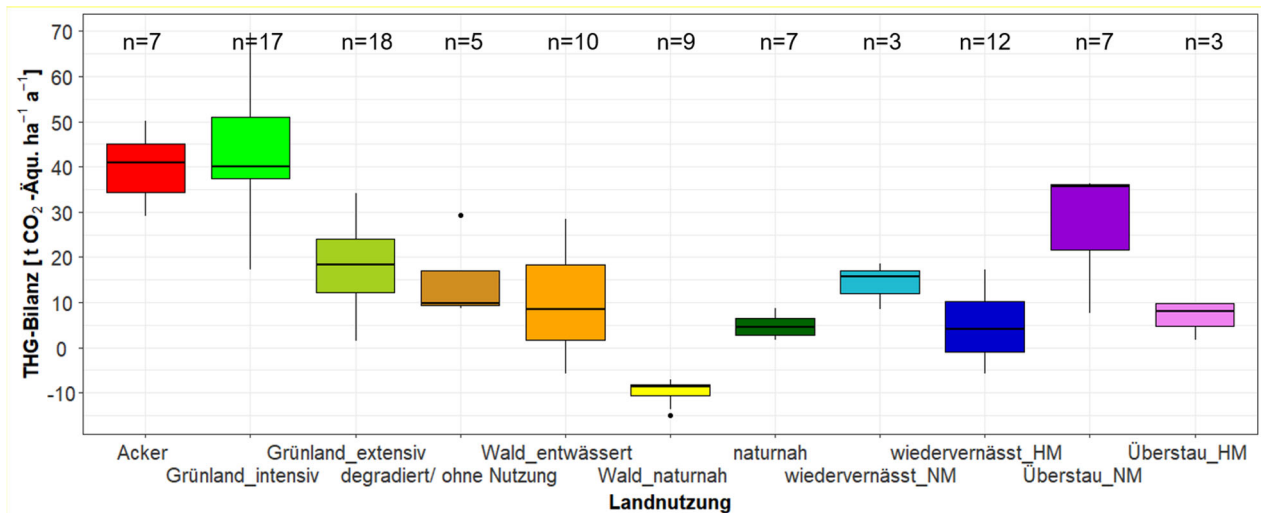


Abbildung 39: Box-Plots der Treibhausgasbilanzen unterschiedlicher Landnutzungstypen (Median)

Die höchsten THG-Emissionsfaktoren wurden mit 41 bzw. 40 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> für Acker und intensiv bewirtschaftete Grünländer ermittelt, bei insgesamt vergleichbarem Wasserstand. Dies verdeutlicht, dass die Umwandlung von Acker zu Grünland allein, ohne Wasserstandsanhhebung und Extensivierung, kein THG-Einsparpotenzial bewirkt. Zudem wird deutlich, dass längerer Überstau insbesondere in Niedermooren vermieden werden sollte. Durch die hohen Methanemissionen liegt der Median der THG Emissionen in dieser Kategorie höher als bei extensiven Grünländern. Für die Ausprägung der modellierten mittleren Emissionen („abgeleitete“ EFs) mit ihren mittleren Wasserständen in Bayern s. die zentrale Tabelle 12.

### 8.4.1.3 Treibhausgase und Steuerfaktoren

#### Kohlenstoffdioxid - CO<sub>2</sub>

Die Modellierung des CO<sub>2</sub>-Austauschs erfolgte angelehnt an Tiemeyer et al. (2020) über das Gompertzmodell. Für die Landnutzung „Acker“ ließ sich keine THG-Wasserstandsabhängigkeit finden. Durch die hohe Heterogenität der Ackerbewirtschaftung mit unterschiedlichen Feldfrüchten und Fruchtfolgen sowie Unterschiede in der Nährstoffverfügbarkeit sind Abhängigkeiten von Steuerfaktoren bei diesem Landnutzungstyp besonders schwierig zu finden. Auch die Einbeziehung des gesamtdeutschen Datensatzes lies keine Modellierung zu. Somit wurde für diese Kategorie der Mittelwert aus dem vorliegenden Datensatz genutzt. Die Datenlage zu Grünländern ist vergleichsweise gut, so dass extensive Grünlandnutzung individuell modelliert werden konnte. Außerdem zeigen wiedervernässte An-/Niedermoore bei an der Oberfläche anstehenden Wasserständen zwar eine ähnliche THG-Wasserstandsabhängigkeit für CO<sub>2</sub> wie Hochmoore, aber deutlich höhere Methanemissionen. Daher wurden sie separat modelliert.

Da es nicht möglich war, Flächeninformationen zum Ernte-Entzug und dem Kohlenstoff-Eintrag über Düngung zu erhalten, wurden im Folgenden die CO<sub>2</sub>-Bilanz (onsite) + C-Export - C-Input als Gesamtes (CO<sub>2</sub>\_C<sub>gesamt</sub>) modelliert:

Folgende Formel wird für die Modellierung angewendet:

$$CO_2 - C_{gesamt} (WT) = CO_2 - C_{min} + CO_2 - C_{diff} * exp^{-aexp^{bWT}} \quad (4)$$

In Abbildung 40 sind die individuellen Abhängigkeitskurven für die CO<sub>2</sub>-Modellierung der unterschiedlichen Landnutzungen dargestellt.

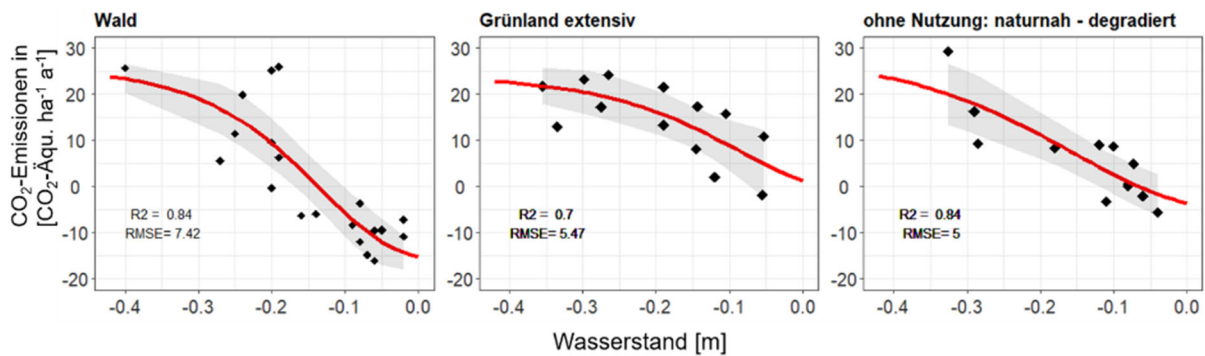


Abbildung 40: Abhängigkeitsfunktionen für verschiedene Landnutzungen, basierend auf einer wasserstandsabhängigen Gompertz Funktion

### Methan - CH<sub>4</sub>

Zwischen den Emissionen von Methan und dem Wasserstand besteht generell ein exponentieller Zusammenhang. Die in der Literatur beschriebenen Funktionen unterschieden sich minimal. Der CH<sub>4</sub>-Modellierung im KliMoBay-Vorhaben liegt folgender Zusammenhang zu Grunde (vgl. Tiemeyer et al., 2020)

$$CH_4 - C(WT) = CH_4 - C_{min} + c * \exp^{-dWT} \quad (5)$$

Nur bei relativ oberflächennahen Wasserständen (30 cm unter Flur oder näher) kann Methan aus dem Boden an die Oberfläche gelangen, ohne vorher oxidiert zu werden. Daher konnte nur für Grünland, naturnahe/degradierte Standorte ohne Nutzung und wiedervernässte Standorte auf Hoch- und An-/Niedermooren ein Zusammenhang gefunden werden (Abbildung 41).

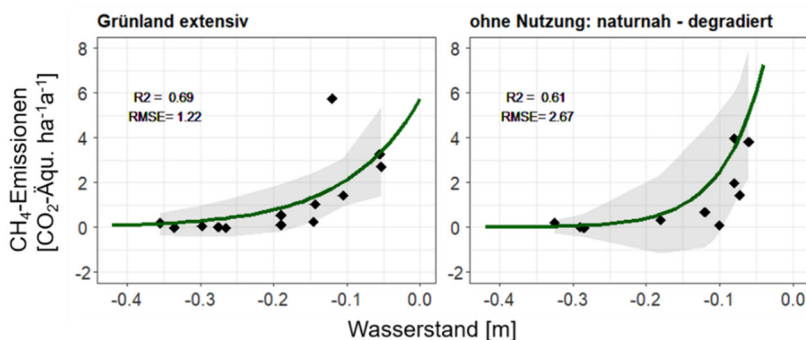


Abbildung 41: Abhängigkeitsfunktionen für verschiedene Landnutzungen, basierend auf einer wasserstandsabhängigen Exponentialfunktion

### Lachgas - N<sub>2</sub>O

Messungen und Modellierung des sehr potenten Treibhausgases Lachgas (Klimawirksamkeit 265-mal höher als die von CO<sub>2</sub> (GWP 100 AR5)) sind auf Grund der geringen atmosphärischen Konzentration und der geringen zeitlichen Kontinuität in der Flussgröße zum einen schwierig zu erfassen und zum anderen schwierig zu modellieren.

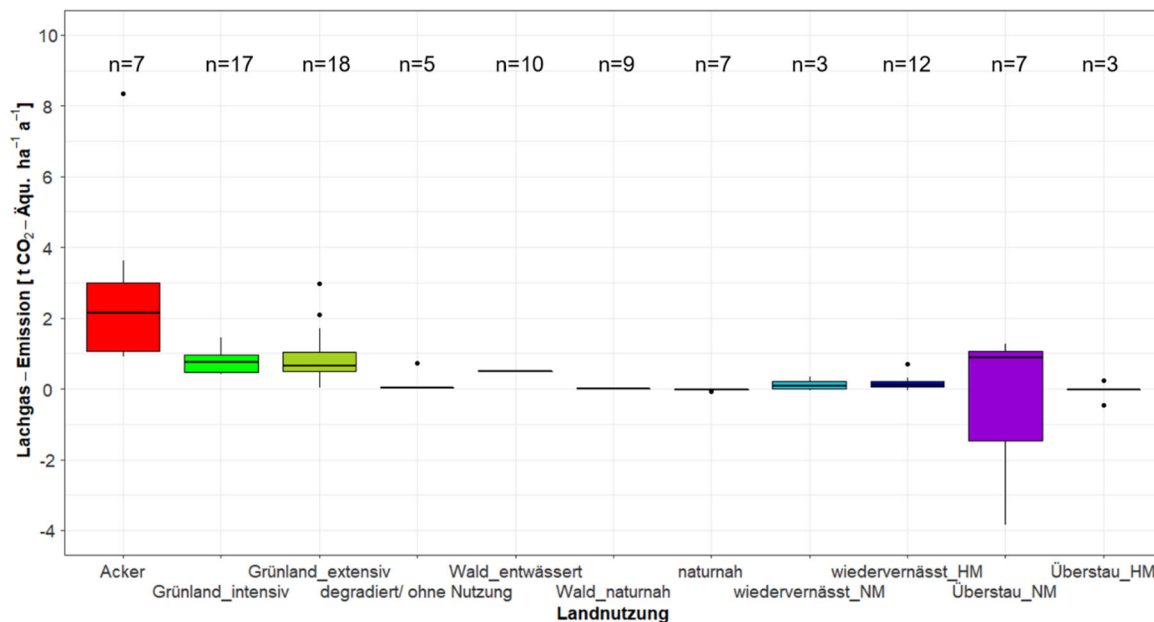


Abbildung 42: Box-Plots der N<sub>2</sub>O Emissionen, basierend auf dem ausgewerteten bayerischen THG-Datensatz, dargestellt als CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

Signifikante Lachgasemissionen treten in der Regel nach Düngeeintrag auf und werden durch Schwankungen im Wasserstand und damit einem Wechsel zwischen anaeroben und aeroben Bedingungen verstärkt. Diese Zusammenhänge können nicht vom vorliegenden Datensatz abgebildet werden. Auch die Einbeziehung des gesamtdeutschen Datensatzes lässt keine Modellierungsgrundlage zu. Daher können in die Bilanzierung nur Mittelwerte der unterschiedlichen Landnutzungen eingehen (vgl. Abbildung 42). Insbesondere für die Ackerstandorte haben die Lachgasemissionen erwartungsgemäß einen signifikanten Anteil an der Gesamt-THG-Bilanz (ca. 7 %).

#### 8.4.1.4 Treibhausgasbilanzierung der Moorwälder

Die Treibhausgasbilanzierung von Moorwäldern ist sehr vielschichtig und schwierig. Aus diesem Grund greift auch die aktuelle Veröffentlichung zur Berichterstattung von THG-Emissionen aus Mooren (Tiemeyer et al., 2020) nur auf einfache Emissionsfaktoren für Wälder zurück. Allein Hommeltenberg et al. (2014) haben für deutsche Moorwälder eine Gesamt-THG-Bilanz für die bayerischen Hochmoorwaldstandorte Schechenfilz (naturnah) und Mooseurach (entwässert und bewirtschaftet) abgeschätzt. Mittlerweile beträgt die Messdauer an beiden Standorten über 10 Jahre. Diese langen Datenreihen wurden im Zuge des KliMoBay-Vorhabens neu prozessiert, qualitätsgesichert und lückengefüllt.

Für den naturnahen Standort Schechenfilz ist die Bilanzierung der über die Eddy-Kovarianz Messungen ermittelten Flüsse verhältnismäßig einfach. Da keine Bewirtschaftung und Ernte der langsam wachsenden Moorkiefern (Spirken) vorgenommen wird, entspricht die Bilanz aus CO<sub>2</sub>-Fluss und Methanfluss der gesamten THG-Bilanz (in naturnahen nährstoffarmen Hochmooren sind N<sub>2</sub>O Emissionen nicht zu erwarten bzw. sehr gering). Der hohe Wasserstand und die Schwammfunktionen der Sphagnen und des Sphagnumtorfs puffern die interannuelle Variabilität deutlich ab, sodass eine stabile THG-Senke von -9,8 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> bestimmt werden konnte. Die Methanemissionen betragen im Mittel knapp 3,6 g CH<sub>4</sub>-C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (entspricht 1,2 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>), die Bilanz wird somit hauptsächlich von der CO<sub>2</sub>-Fixierung bestimmt (Abbildung 43 a)

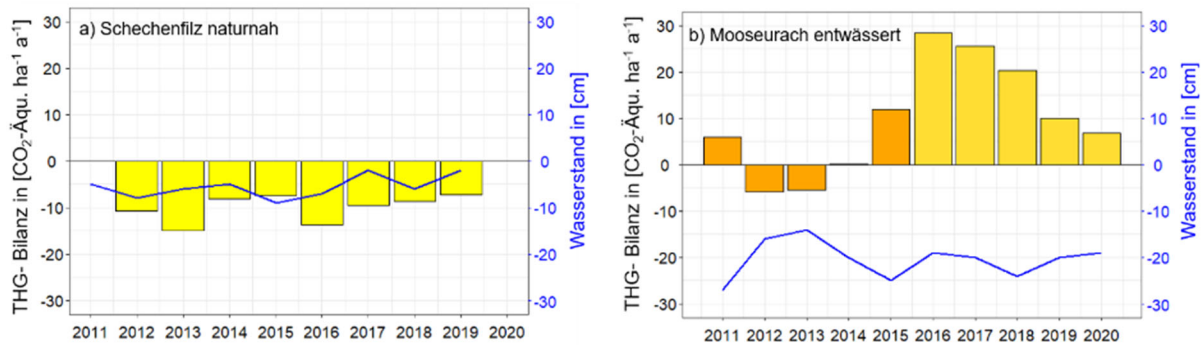


Abbildung 43 a) THG Bilanz des naturnahen Spirkenwalds Schechenfilz von 2011-2019 (Daten erhoben vom KIT/IMK-IFU in Garmisch-Partenkirchen) und b) des entwässerten Fichtenforstes Mooseurach 2011-2020, der 2016 vollständig gerodet wurde und seitdem der natürlichen Sukzession ohne Bewirtschaftungsziel überlassen wird.

Die Bilanzierung von bewirtschafteten Wäldern ist deutlich schwieriger. Mittels der Eddy-Kovarianz-Methode kann ein integrierter Wert über eine größere Fläche bestimmt werden. Allerdings ist somit eine Differenzierung zwischen Flüssen aus dem Boden und der Vegetation nicht möglich. Haubenmessungen können helfen, die Bodenemissionen zu quantifizieren, allerdings muss sichergestellt sein, dass die gemessene Bodenatmung nicht durch die Wurzelatmung der Bäume überprägt wird; dies ist nur mittels sogenanntem Trenching möglich. Insgesamt bleibt das Problem sehr großer Einzelterme (Bodenemissionen, Photosynthese der Bäume, autotrophe Atmung der Bäume/Wurzeln) und einer relativ dazu kleinen Bilanz. Außerdem kann der Kohlenstoffzug durch Ernten bedingt durch die langen Rotationsperioden nur schwer abgeschätzt werden.

Der Untersuchungsstandort Mooseurach bietet die Besonderheit, dass die ca. 50 Jahre alten Fichten, nach Borkenkäferbefall und einem Windwurfereignis Ende März 2015, zum Jahreswechsel 2015/2016 vollständig geräumt wurden. Die gerodeten Festmeter betragen  $301 \text{ fm ha}^{-1}$ . Dies entspricht wiederum einem geschätzten Kohlenstoffvorrat von  $98,5 \text{ t C ha}^{-1}$  (die Abschätzung basierend auf [LWF-Bayern](#)). Im Rahmen einer Forschungsarbeit (Steffi Röhling) am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München wurde für 2008 ein Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse von ca.  $70 \text{ t C ha}^{-1}$  modelliert. Daraus lässt sich ableiten, dass binnen 7 Jahren  $28,5 \text{ t C ha}^{-1}$  zugewachsen sind, was einer jährlichen Rate von  $4,07 \text{ t C ha}^{-1}$  entspricht. So war es möglich, für die ersten 5 Jahre der Eddy-Kovarianz Messung einen Ernteterm gegenzurechnen. Seit der Räumung unterliegt der Standort der natürlichen Sukzession und wird nicht mehr bewirtschaftet. Daher wird seitdem kein C-Export mehr für die Bilanzierung berücksichtigt. Die ersten 2 Jahre nach dem Kahlschlag wurden sehr hohe Emissionen gemessen. Der Bewuchs wurde durch die Räumung nahezu vollständig zerstört, wodurch kaum Photosynthese stattfand. Zudem ist zu erwarten, dass durch den aufgerissenen Boden und das zurückgebliebene Totholz die Emissionen über der erwartbaren mittleren Moorwaldbodenemission liegen. Seit der Rodung 2016 sinken die Emissionen stetig und es bleibt abzuwarten, ob sich eine dauerhafte Senke einstellen kann (Abbildung 43b). Ohne die Berücksichtigung der Jahre 2016-2017 wird für einen flach entwässerten Hochmoorwald (Jahresmittelwasserstand  $-21 \text{ cm}$  bei einer Spannweite von  $-14$  bis  $-27 \text{ cm}$  der Jahresdurchschnittswerte) ein mittlerer Emissionsfaktor von ca.  $7,2 \text{ t CO}_2\text{-Äqu. a}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  (Median  $8,4 \text{ t CO}_2\text{-Äqu. a}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) ermittelt und liegt somit nahe der Abschätzung basierend auf alten und aktuellen Torfprofilkarten und Bodenparametern von Hommeltensberg et al. (2014). Bewirtschaftete Moorwälder haben in Bayern mit geschätzt 30 % einen großen Anteil an der Moorgesamtkulisse, die Modellierung von gut  $66.000 \text{ ha}$  stützt sich somit allein auf die bundesweit einzigen THG-Moorwald-Bilanzen der Hochmoorstandorts Mooseurach und

Schechenfilz. Hochmoorwälder haben aber nur einen Flächenanteil von 17% an der Moorwaldkulisse Bayerns.

## 8.4.2 Biodiversität

Das wesentliche Ziel von Moorschutz ist die Wiederherstellung der ökosystemaren Funktionen. Im BfN-Vorhaben (Bundesamt für Naturschutz) „Moorschutz in Deutschland“ wurde Moorschutz folgendermaßen definiert.

Moorschutz ist „Bewahrung oder Wiederherstellung der moortypischen Biodiversität und Ökosystemleistungen durch

- reduzierten Verlust oder Erhalt des Torfkörpers oder Wiederanregung des Torfwachstums und
- Etablierung eines standorttypischen Wasser- und Nährstoffhaushalts.“  
(Tiemeyer et al. 2017, S.33)

Damit ist in Bezug auf die Biodiversität die Blickrichtung eindeutig auf moortypische Arten gerichtet, die von einem funktionsfähigen Ökosystem profitieren. Die Betrachtung der Biodiversität im KliMoBay Vorhaben dient dazu, sowohl Synergien als auch mögliche Konflikte durch Moorschutz zu identifizieren.

### 8.4.2.1 Hintergrund

Für die Definition einer moortypischen Biodiversität sind verschiedene Ansätze vorgelegt worden, wie z.B. von Fuchs et al. (2017) im BfN-Vorhaben „Moorschutz in Deutschland“ oder von Dr. Müller-Kroehling der sog. „Moorartenkorb“ für Bayern. Fuchs zeigte die Methodik exemplarisch auf, wie moortypische Arten definiert und eingestuft werden können. Allerdings wurden keine Artenlisten von ausgewählten Artengruppen nach der entwickelten Methodik durchbewertet und damit schied die Nutzung dieser Herangehensweise mangels Datengrundlage für das KliMoBay-Vorhaben aus. Der Moorartenkorb mit einer Differenzierung von tyrophilen und tyrophobionten Arten scheint durchbewertet worden zu sein, ist aber nicht veröffentlicht und damit nicht verfügbar. Daher wurde eine eigene Herangehensweise erforderlich die im Folgenden dargestellt wird. Explizit sei hier vorangestellt, dass es auf der Ebene von FFH-Lebensraumtypen für die Identifikation von Konflikten und deren Lösung im Spannungsfeld von Klimaschutz und Moorschutz bereits einschlägige Handlungsanleitungen gibt (s. z. B. Ssymank et al. 2015), die in einer konkreten Maßnahmenplanung berücksichtigt werden sollen und die praktische Empfehlungen für die Lösung von möglichen Konflikten beinhalten. Diese Ebene adressiert aber die konkrete Maßnahmenplanung, die für den Maßstab des KliMoBay-Vorhabens zu detailliert ist. Denn ob ein Konflikt tatsächlich entsteht, hängt im Wesentlichen von der planerischen Ausgestaltung von Maßnahmen ab.

Die Diskussion um Gewinner und Verlierer von Wiedervernässung läuft seit geraumer Zeit in der Fachwelt. In der Regel sind wenige trockenheitsliebende Spezialisten von der Wiedervernässung betroffen, die Ersatzlebensräume in naturfernen degradierten, insbesondere stark entwässerten Moorflächen gefunden haben (z. B. Buntbäuchiger Grashüpfer, *Omocestus rufipes*). Ebenso können (großflächig) überstaute Mooregebiete, die sich nicht zu einem wachsenden Moor weiterentwickeln, zu Ersatzlebensräumen für nicht moortypische Wasservögel (s. Koller- und Hochrunstfilze) werden.

Im Gegensatz dazu steht eine große Bandbreite an Arten, die durch die Wiedervernässung von Flächen wesentlich profitiert. Für diese Arten haben aufgrund der drastischen

Verringerung der Feuchtlebensräume die verbliebenen Hoch- und Niedermoore eine besondere Bedeutung. Darüber hinaus erhalten die wiedervernässten Teilbereiche eine hohe Bedeutung als Ersatzlebensraum für in der früheren extensiveren Kulturlandschaft noch häufig vorkommende Arten. Gerade auch die Paludikulturen (siehe MOORuse-Projekt) haben sich auf den Flächen des Projektes (drei Moorgebiete über Bayern verteilt) zu Hot-Spots der faunistischen Biodiversität entwickelt und bieten entgegen den Befürchtungen sogar Wiesenbrüterarten bei langsamem Aufwuchs im Frühjahr Habitate.

Dennoch sollen hier neben den Synergien auch mögliche Konflikte identifiziert werden, die insbesondere für die Fauna bei Landnutzungsänderungen im Zuge des Moorschutzes auftreten könnten.

#### 8.4.2.2 Methodik

Um auf einem bayernweiten einheitlichen Datensatz aufzusetzen und für die grundsätzlichen Landnutzungsänderungen (ohne Ebene der detaillierten Maßnahmenplanung s.o.!) bewertbare Effekte auf die Biodiversität abbilden zu können, wurden die flächenhaften Artnachweise der Artenschutzkartierung (ASK) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt genutzt. Die Einschränkungen der ASK sind bekannt (keine gezielte einheitliche flächendeckende Kartierung, unterschiedliche Aktualität der Daten etc.). Dennoch ist es die beste Datengrundlage für den Nachweis von Artvorkommen auf Bayernebene und in der Datenhaltung und Qualitätssicherung auch beispielhaft für andere Bundesländer.

Innerhalb dieser landesweiten Datenbank wurden faunistische und floristische Daten in Hinblick auf die zu erwartenden Landnutzungsänderungen (s. Szenarien) im Moorschutz selektiert. Im ersten Schritt (1) wurde eine Überschneidung der selektierten Nutzungstypen (Grünland, Acker, Wald, Moor, Sumpf und Heide; aus ATKIS) mit der Moorbodenkarte überschritten. Dann (2) wurden die Artnachweise auf diesen Flächen für indikatorisch und planerisch wichtige ausgewählte Artengruppen (Tagfalter, Libellen, Heuschrecken, Laufkäfer, Vögel sowie die Blütenpflanzen) identifiziert und schließlich (3) die Nachweise nach der Roten Liste in Hinblick auf ihre Gefährdung priorisiert. Hier wurde sowohl die Rote Liste des Bundes wie auch die des Bundeslandes Bayern verschnitten, um die Gefährdung der Artengruppen sowohl bundesweit wie auch landesweit abzubilden. Insgesamt sind mit dieser Vorgehensweise folgende Artenanzahlen für die Bewertung identifiziert worden: 37 Tagfalter, 24 Libellen, 18 Heuschrecken, 2 Laufkäfer, 39 Vögel sowie 137 Blütenpflanzen. Dabei werden Arten der folgenden Gefährdungsstufen in der weiteren Bewertung betrachtet (Tabelle 9):

Tabelle 9: In die Auswertung eingegangene Gefährdungsstufen

<b>Rote Liste Deutschland</b>	0 ausgestorben oder verschollen
	1 vom Aussterben bedroht
	2 stark gefährdet
<b>Rote Liste Bayern</b>	0 ausgestorben und verschollen
	1 vom Aussterben bedroht
	2 stark gefährdet
	3 gefährdet

Die Bewertung und damit einhergehende Einschätzung der Arten und deren Reaktion auf potentielle Landnutzungsänderungen erfolgte tabellarisch.



Im ersten Schritt der Betrachtung wurden die Arten anhand eines vierstufigen Bewertungssystems, auf Grundlage von Literaturanalyse und Experteneinschätzung, in Hinblick auf ihre Bindung an den potentiellen Landnutzungstyp eingeschätzt.

Tabelle 10: Bewertung der Arten und deren Reaktion auf potenzielle Landnutzungsänderung

Tabellen Kürzel	Bedeutung	Interpretation
1	Art wird nicht beeinträchtigt	Die Art ist nicht oder nur schwach auf den Landnutzungstyp angewiesen.
2	Art ist indifferent	Die Art lässt sich als indifferent in Bezug auf die Landnutzung einstufen. Die Arten sind auf der jeweiligen Nutzung zu finden, jedoch nicht schwerpunktmäßig darauf angewiesen.
3	Art profitiert	Der Nutzungstyp wird von der entsprechenden Art prioritär besiedelt. Die Landnutzung der Flächen beeinflusst die Populationen maßgebend.
4	Art ist spezialisiert	Die Art ist aufgrund ihrer Eigenschaften auf den Nutzungstyp spezialisiert oder angewiesen.
NA	Not available	Die Eigenschaft der betreffenden Art ist nicht vorhanden oder es konnte bisher keine Literatur oder Experteneinschätzung zur weiteren Einschätzung gefunden werden.

Die Einschätzung stellt die Grundlage der nachgehenden Bewertung der Reaktion der Arten auf die geplante Landnutzungsänderung dar. Arten, die in der ASK genannt werden, aus fachlicher Sicht im Rahmen der Bewertung jedoch nicht aussagekräftig sind, fließen nicht in die Bewertung ein.

Im zweiten Schritt der Bewertung wird die Reaktion der Arten auf die dem Handlungsspielraum im Moorschutz entsprechenden Landnutzungsänderungen dargestellt (Tabelle 11). Die Einschätzung und Wertung der Reaktion erfolgt durch die vorangegangene Bewertung des Nutzungstyps. Dabei werden folgenden Landnutzungsänderungen betrachtet:

- Umwandlung Acker zu Grünland
- Grünlandextensivierung
- Wasserstandsanehebung auf Grünland
- Wiedervernässung und Renaturierung von Moorstandorten
- Umwandlung Acker oder Intensivgrünland zu Paludikultur
- Umwandlung Acker oder Intensivgrünland zu Moor-Photovoltaik (PV)
- Entstehung von sekundärem Moorwald

Nicht alle diese Umwandlungsschritte werden mit den bisher gerechneten Szenarien abgebildet, wie z.B. Umwandlung zu Moor-PV. Diese bieten aber einen Bewertungssatz, der für weitere Szenarien und Planungsschritte zur Verfügung steht.

Tabelle 11: Bewertung der Reaktion der Arten auf die dem Handlungsspielraum im Moorschutz entsprechenden Landnutzungsänderungen.

Tabellen Kürzel	Bedeutung	Interpretation
< 0	Art wird beeinträchtigt	Die Arten werden durch die Landnutzungsänderung beeinträchtigt. Sie verlieren temporär oder auf Dauer wertgebende Strukturen.
0	Art reagiert indifferent	Die Art ist nicht oder nur schwach auf den Landnutzungstyp angewiesen. Sie wird durch die Landnutzungsänderung aufgrund ihrer ökologischen und biologischen Parameter nicht beeinträchtigt.
1	Art schwach profitierend	Die Art kann hier von der Landnutzungsänderung profitieren, jedoch handelt es sich nur um eine Ergänzung des Lebensraumes oder des Sekundärlebensraumes.
2	Art profitiert mäßig	Die Art profitiert durch die Landnutzungsänderung und die damit einhergehende Änderung der Lebensraumparameter.
3	Art profitiert	Der Lebensraum wird durch die Landnutzungsänderung maßgeblich für die Art verbessert oder optimiert.
NA	Not available	Die Eigenschaft der betreffenden Art ist nicht vorhanden oder es konnte bisher keine Literatur oder Experteneinschätzung zur weiteren Bewertung gefunden werden.

Die Auswertung der potentiell vom Moorschutz betroffenen Arten ergibt, dass eine Vielzahl der Arten mit einer gewissen Indifferenz den Maßnahmen begegnen und somit nicht beeinträchtigt werden. Es lassen sich aber auch Gewinner sowie temporäre Verlierer der Nutzungsänderung formulieren. Als Gewinner lassen sich die Arten einstufen, die auf den Charakter der Hoch- und Niedermoorstrukturen spezialisiert sind oder diese Strukturen als Ersatzlebensraum in Anspruch nehmen. Dazu zählen anhand der angewendeten Methodik der Hochmoor-Perlmutterfalter (*Bolaria aquilonaris*), das Große Wiesenvögelchen (*Coenonympha tullia*), der Wiesenpieper (*Anthus pratensis*), die Knäkente (*Spatula querquedula*), der Kiebitz (*Vanellus vanellus*), die Speer-Azurjungfer (*Coenagrion ornatum*) und der Hochmoor-Laufkäfer (*Carabus menetriesi*). Darüber hinaus lassen sich aus der tabellarischen Bewertung eine Vielzahl an Arten als profitierend von einer Wiedervernässung bewerten. Für diese Arten stellt die Landnutzungsänderung eine Aufwertung des Lebensraums dar, jedoch nicht das Optimum, was sich meist auf das Fehlen artspezifischer Strukturen zurückführen lässt. Die laut der Bewertung als verlierend einzuschätzende Arten sind die Feldlerche (*Alauda arvensis*), die Wachtel (*Coturnix coturnix*) und das Rebhuhn (*Perdix perdix*). Die Beeinträchtigung in Bezug auf die Art soll im Weiteren kurz erläutert werden:

### Feldlerche

Die Feldlerche besiedelt vor allem offene Feldflur, größere Rodungsinseln und Kahlschläge, sowie Brachflächen, Extensivgrünland und Bestände von Sommergetreide. Die Art profitiert stark von zur Brutzeit niedrigen und lückenhaften Vegetationsbeständen. Generell profitiert die

Art von einer Extensivierung von Grünland, jedoch gehen bei einer Wiedervernässung und Renaturierung wertgebende Strukturen für die Art verloren. Die Flächen werden aufgrund der Vegetationsdichte und der Nässe unattraktiv für die Art.

### **Wachtel**

Die Wachtel lebt bevorzugt in einer relativ hohen Vegetationsschicht, die ausreichend Deckung für die Brut bietet. Sie besiedelt Acker- und Grünlandflächen, aber auch Feucht- und Nasswiesen, Niedermoor und Brachflächen. Die Beeinträchtigung dieser Art beschränkt sich lediglich auf den Verlust von Ackerflächen und für die Art wertgebende Strukturen wie Ackerrandstreifen. Da dieser aber in der Regel durch die Schaffung neuer attraktiver Lebensräume ausgeglichen wird, kann von einer lediglich geringen temporären Beeinträchtigung für die Wachtel ausgegangen werden.

### **Rebhuhn**

Das Rebhuhn wird begünstigt durch offenes, reich strukturiertes Ackerland. Der optimale Lebensraum wird durch klein parzellierte Feldfluren mit unterschiedlichen Anbauprodukten, die von Altgrasstreifen, Staudenfluren sowie Hecken und Feldrainen durchzogen sind, definiert. Da diese Strukturen sowohl durch eine flächige Wiedervernässung wie auch Renaturierung und Umnutzung verloren gehen, wird die Art beeinträchtigt. Darüber hinaus reagiert die Art negativ auf zu feuchte Grünländer. Dieser Problematik kann nur durch die Schaffung von Ersatzlebensräumen außerhalb des renaturierten Bereiches oder einer Ausnahme einzelner Teillebensräume bei der Vernässung der Flächen entgegengewirkt werden.

In der Bewertung lässt sich erkennen, dass lediglich Feldlerche, Rebhuhn und Wachtel von der Landnutzungsänderung von Intensivgrünland oder Acker hin zu Paludikulturen beeinträchtigt wird. Gerade bei der Feldlerche sind aber auch Bruten in den ersten Jahren der Paludikulturetablierung nachgewiesen worden. Offensichtlich hängt es sehr davon ab, wie dicht die Vegetation sich entwickelt. Dies kann durch die Form des Managements und des Wasserstandes beeinflusst werden.

Der **Kiebitz** kann von der Landnutzungsumwandlung hin zu Paludikulturen sowohl profitieren, wie auch negativ beeinflusst werden. Negativ für den Bruterfolg sind zu bewerten:

- sehr schnelle dichte Vegetationsentwicklung zu Beginn der Brutzeit
- durch die Etablierung der Vegetationsbestände zunehmende Abnahme offener nasser Bodenstellen zu Beginn der Brutzeit
- aus der vorhergehenden Vegetationsperiode stehen gebliebene Vegetationsbestände, zu denen Abstand gehalten wird.

Positiv zu bewerten ist, wenn

- sich die Vegetation durch entsprechendes Management (Winterschnitt!) im Frühjahr langsam entwickelt. Dies ist auch davon abhängig, welche Paludikultur-Arten genutzt werden: Seggen sind aus dieser Sicht günstiger, denn die Vegetationsentwicklung ist langsamer.
- keine weitere Störung innerhalb der Brutzeit erfolgt, da sich das Management der Flächen auf den einmaligen Schnitt vorzugsweise im Winter beschränkt (z. B. kein Walzen!).

In der Summe sind die Entwicklungen der Kiebitz-Bestände in den Paludikultur-Testflächen des MOORuse-Projektes sehr positiv, denn die oben genannten Einschränkungen sind hier

nicht gegeben: Winterschnitt und flurnahe Wasserstände führen zur erwünschten langsamen Vegetationsentwicklung im Frühjahr: Die Fläche entwickelt sich zum Schwerpunkt des Kiebitz-Vorkommens im Bayerischen Donaumoos.

Wie die Daten aus dem parallel abgeschlossenen MOORuse-Projekt zeigen, profitiert eine Vielzahl an Arten verschiedener Artengruppen (insbesondere Fauna) von einer Umwandlung von Acker zu Paludikulturen. Gerade Spezialisten, die auf geringe Störung, hohe Feuchte, zum Teil offene Wasserflächen (Gräben) und auch Struktureichtum angewiesen sind, können hier neue Lebensräume finden. Klimaschutz und Biodiversitätsschutz können Hand in Hand gehen, wenn die Bewirtschaftung angepasst und die Wasserstände flurnah eingestellt sind.

Im aktuellen bundesweiten Projekt „Paludivers“ geht es ebenfalls darum, die Synergien zwischen Paludikultur und Biodiversitätsschutz herauszuarbeiten und Handlungsanleitungen für die Anlage und die Nutzung der Flächen zu entwickeln, um das Potenzial für den Biodiversitätsschutz weiter zu optimieren.

Im Folgenden werden die Reaktionen der verschiedenen Artengruppen auf die Landnutzungsänderungen grafisch dargestellt. Die Datenbasis ist die mit oben erläuterte Vorgehensweise erstellte Bewertungstabelle (s. Anhang). Wichtig ist hier noch einmal zu betonen, dass die Datengrundlage (1) diejenigen RL-Arten beinhaltet, die (2) mit ASK-Nachweisen auf Grünland, Acker, Wald, Moor, Sumpf und Heide aus ATKIS mit der Moorbodenkarte überschritten identifiziert wurden. (3) Die Auswahl der zu bewertenden Artengruppen wurde nach planerischer Relevanz und Datenlage vorgenommen.

Die x-Achse der folgenden Abbildungen stellt dabei den Mittelwert der Effekte der Landnutzungsänderung über alle bewerteten RL-Arten der Artengruppe dar. Die Wertstufen sind in Tabelle 11 erläutert (s. o.)

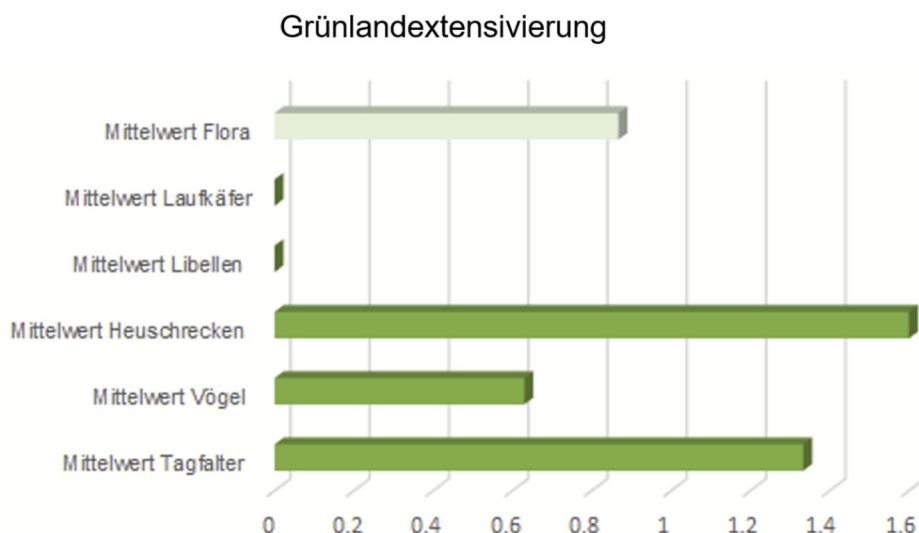


Abbildung 44: Effekt der Grünlandextensivierung auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tabelle 11 (nach Heim, verändert).

Nach der Bewertung profitieren von dieser Landnutzungsänderung insbesondere die Heuschrecken und Tagfalter aber auch die Flora (Abbildung 44). Die erwartete artenreichere Vegetationszusammensetzung, der deutlich höhere Blütenanteil und die geringere Schnitthäufigkeit und reduzierte Düngung sind die Schlüsselfaktoren für die erwarteten Effekte.

### Grünland Wasserstandsanhebung

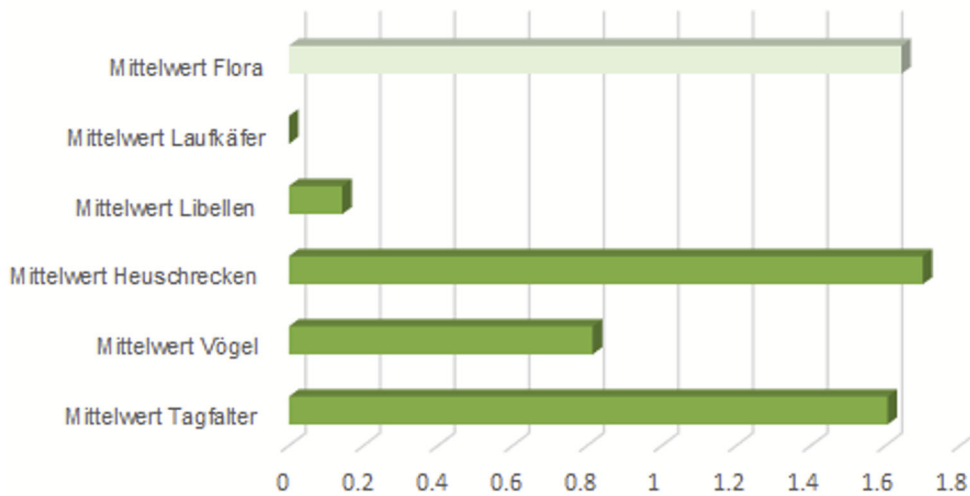


Abbildung 45: Effekt der Wasserstandsanhebung im (extensivierten) Grünland auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert).

Die Maßnahme Wasserstandsanhebung ergänzt die Extensivierung im Grünland. Im Vergleich zwischen Abbildung 44 und Abbildung 45 sieht man, dass die Heuschrecken und Tagfalter noch mehr profitieren, aber sich insbesondere die positiven Effekte auf die Flora verstärken.

### Renaturierung Wiedervernässung

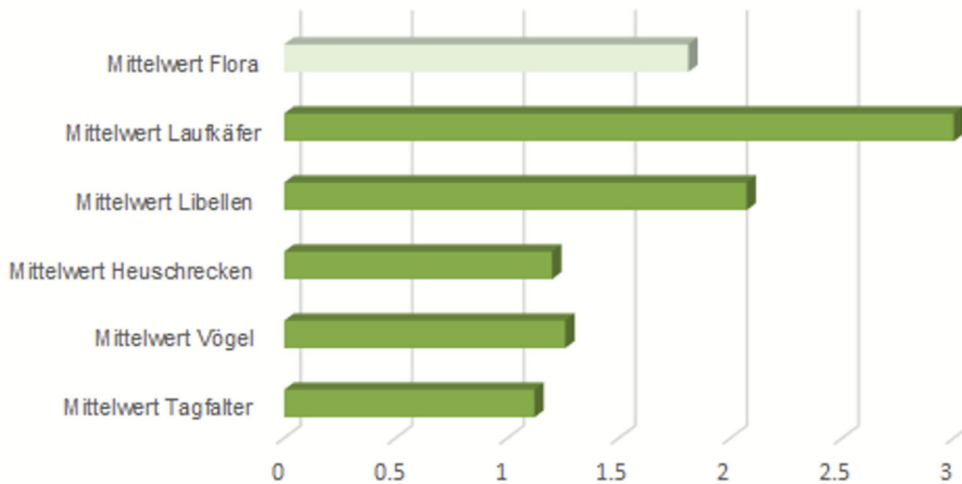


Abbildung 46: Effekt der Renaturierung auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert).

Wir gehen bei dieser Landnutzungsänderung von einer erfolgreichen Renaturierung mit naturnahen Wasserständen aus. Wie zu erwarten profitieren alle Artengruppen von einer Renaturierung; insbesondere auch die Laufkäfer und Libellen, die von den vorhergehenden Landnutzungsänderungen bisher noch nicht profitiert haben (Abbildung 46). Die Zielbestände weisen in der Regel ein Mosaik von unterschiedlichen Feuchte/Nässestufen auf, inklusive kleinen offenen Wasserflächen (z.B. angestaute ehemalige Entwässerungsgräben).

### Acker bzw. Intensivgrünland zu Paludikultur

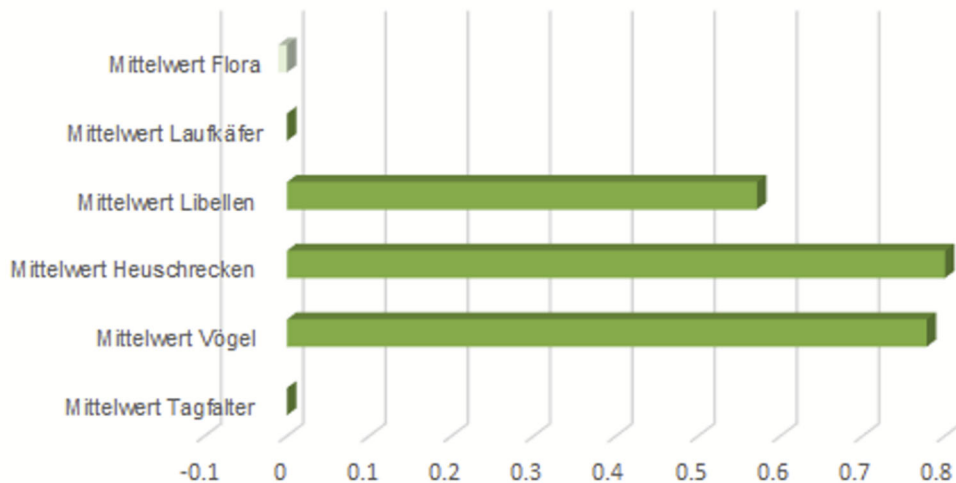


Abbildung 47: Effekt der Umwandlung von Acker oder Intensivgrünland in Paludikultur auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert).

Für die Bewertung der Effekte der Paludikulturen auf die Artengruppen gehen die Untersuchungen aus dem Freisinger Moos, dem Bayerischen und dem Schwäbischen Donaumoos ein, die im Rahmen des parallelen MOORuse-Projektes durchgeführt wurden. Grundsätzlich gilt für diese Landnutzungsänderung die Ausprägung eines optimierten Bestandsmanagements mit niedriger Vegetation im Frühjahr nach Winterschnitt und flurnahen Wasserständen, die ausreichend Bodenfeuchte einerseits und verlangsamte Vegetationsentwicklung andererseits bedingen. Unter diesen Rahmenbedingungen und basierend auf den eigenen Erhebungen können die Paludikulturen auch für die Biodiversität einen erheblichen Mehrwert gegenüber Acker und Intensivgrünland darstellen. Dies gilt insbesondere für die Artengruppen der Libellen, der Heuschrecken aber auch der Vögel (auch Wiesenbrüter). Floristisch sind keine wesentlichen positiven Effekte zu erwarten, da die Paludikulturen grundsätzlich monodominante Bestände darstellen (Abbildung 47). Dies ist aber in naturnahen Vergleichsbeständen (z.B. Schilfröhricht, Großseggenbestand) ebenfalls gegeben.

### Acker zu Grünland

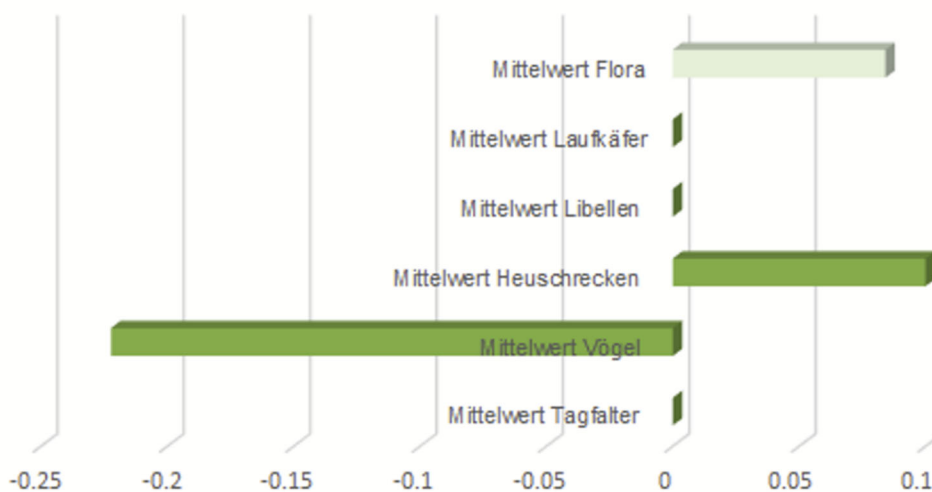


Abbildung 48: Effekt der Umwandlung von Acker zu (Intensiv-) Grünland auf die Artengruppen: Mittelwert der Bewertung nach Tab. 11 (nach Heim 2023, verändert).

Die Maßnahme Umwandlung von Acker in Grünland ist oft der erste Schritt für eine schonende Moorentwicklung. Zur Abtrennung der weiteren Maßnahmen (s. o.) gehen wir hier davon aus, dass das Grünland intensiv bewirtschaftet wird und keine Wasserstandsanhhebung erfolgt. Unter diesen Bedingungen ist aus Klimaschutzsicht kaum ein Mehrwert zu erwarten. Aber auch für die Biodiversität sind die Effekte gering: Vergleicht man die Skala der Abbildung 48 mit den anderen Skalen, so wird offensichtlich, dass die Effekte (egal in welche Richtung) sehr gering ausfallen. Dass für die Vögel sogar ein leichter Negativtrend aus der Bewertung folgt, liegt an den oben beschriebenen Arten (Rebhuhn, Wachtel, Kiebitz), die in einem intensiv bewirtschafteten Grünland keine verbesserten Bedingungen vorfinden.

Die Bewertung soll aber nicht den Eindruck auslösen, dass eine Umwandlung von Acker auf Grünland nicht sinnvoll wäre; allerdings kann man ohne Extensivierung und ohne Wasserstandsanhhebung das positiv-Potenzial der Umwandlung aus Biodiversitäts-Sicht nicht ausschöpfen.

Die Bewertung der Maßnahme „Umwandlung in PV-Anlagen“ hängt sehr von der Ausprägung der Maßnahmenvariante ab: Wird vollständig wiedervernässt? Wird zwischen den Paneelen extensives Grünland oder Paludikultur etabliert? Wird bewirtschaftet/gepflegt oder nicht? etc. Derzeit laufen seitens des LfU im Bayerischen Donaumoos erste Biodiversitäts-Erhebungen in Moor-PV Anlagen. Die Begleitforschung dieser neuen Landnutzungsform ist sehr wichtig, aber es gibt bisher nur sehr wenige Ergebnisse. Daher wird in diesem Fall von einer vergleichbaren Abbildung wie für die anderen Landnutzungsänderungen Abstand genommen, weil der bisherige Datenstand hier noch kein umfassendes Bild zulässt. Andererseits ist derzeit enormer Druck der PV-Anlagen auf Moorflächen zu spüren. Die EEG Förderung von PV-Anlagen auf Moor wird in Zukunft an Kriterien geknüpft, wie z.B. maximaler Grundwasserflurabstand von 10 cm im Winter und 30 cm im Sommer. Diese Schlüsseleigenschaft lässt dann nur Nasswiesen oder besser Paludikultur zwischen den Paneelen zu. Entsprechend wird sich auch die Biodiversitäts-Bewertung auf diese Zustände fokussieren müssen. Reine Extensivwiesen (ohne Wasserstandsanhhebung) soll es unter Moor-PV nicht mehr geben.

#### **8.4.2.3 Synthese**

Die betrachteten Artengruppen reagieren unterschiedlich hinsichtlich Dimension und Richtung auf die verschiedenen Landnutzungsänderungen. Zusammenfassend lässt sich aber sagen, dass es nur sehr wenige Verlierer gibt (s. o.) und in Summe die standorttypische Biodiversität von einer Entwicklung hin zu nasseren und damit klimaschonenderen Moor-Standorten profitiert. Die Synergien zwischen Klimaschutz und Biodiversitätsschutz sind offensichtlich. Detaillierte Hinweise zur weiteren Optimierung insbesondere von Paludikultur-Flächen werden sowohl im MOORuse-Abschlussbericht als auch in den Ergebnissen des „Paludivers“-Projekts formuliert.

### **8.4.3 Mooremissionen in Bayern**

#### **8.4.3.1 Berechnung der bayernweiten Mooremissionen**

Basierend auf bayernweiten Landnutzungs- und Wasserstandsinformationen werden die modellierten THG-Bilanzen in die Fläche projiziert (Abbildung 49) .

Die im Projekt genutzte Information zur Landnutzung basiert auf der Tatsächlichen Nutzung (TN, Bestandteil von ALKIS<sup>(R)</sup> 1:1000). Zusätzlich standen uns zur Abschätzung der Intensität

der weitverbreiteten Grünlandnutzung InVeKos-Daten zur Verfügung. Die flächenhafte Information zum Wasserflurabstand basiert auf den Arbeiten der TUM (Kapitel 6). Den größten Anteil an der Moorfläche haben die Nutzungen Acker (51.000 ha), intensive Grünlandnutzung (60.000 ha, mehr als zwei Schnitte und Düngung) sowie der Wald (70.000 ha). Noch gut 10.000 ha können als naturnahe Standorte bezeichnet werden (Tabelle 12). Der Wald hat trotz seiner hohen Flächenanteile einen geringeren Beitrag an der Gesamt-THG-Bilanz als intensiv genutzte Grünländer und Ackerstandorte.

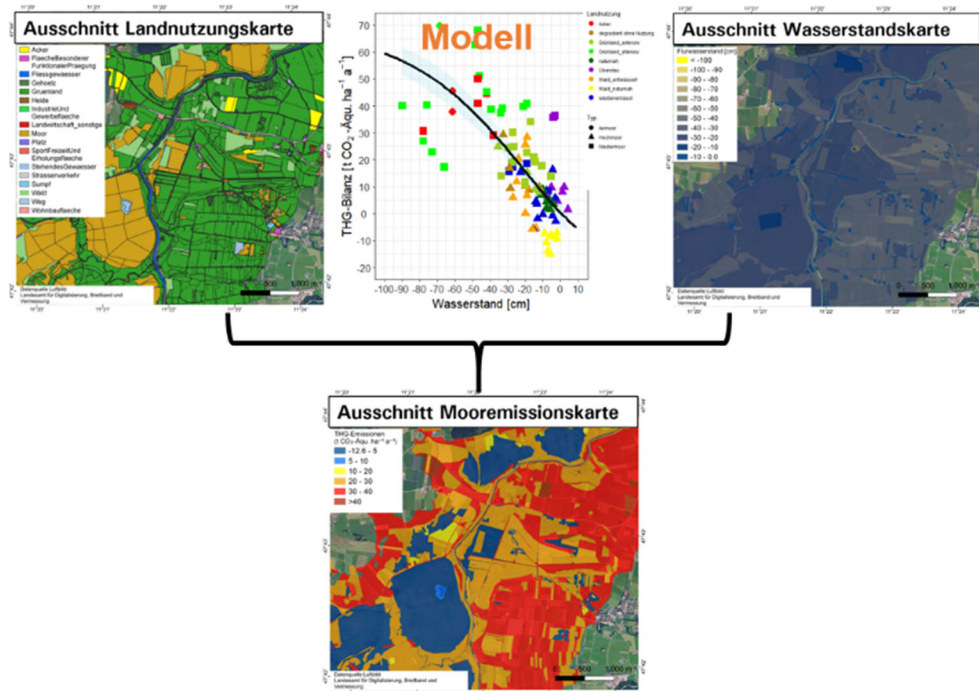


Abbildung 49: Landnutzungen, kombiniert mit der Wasserstandskarte und den Regressionsmodellen bilden die Grundlage für die neue Mooremissionskarte

Für die Moore Bayerns ergeben sich für das Jahr 2020 Treibhausgasemissionen von 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (5,7-7,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>). Damit liegen die Emission über der bisherigen Spanne von 4,9-5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (Drösler und Kraut 2020). Die Übersicht in Tabelle 12 zeigt die gemessenen regionalen Emissionsfaktoren im Vergleich zu den modellierten Gesamtfächenmittelwerten je Landnutzung.

Es zeigt sich im Vergleich, dass die Wasserstände an den Ackermessstandorten repräsentativ für den Wasserstand von Äckern auf organischen Böden in Bayern sind. Die gemessenen Wasserstände der intensiv bewirtschafteten Grünländer sind etwas niedriger als der bayernweite Durchschnitt, die der extensiven Grünländer im Vergleich zu den modellierten Mittelwasserständen zu oberflächennah. Wenig repräsentativ ist der Hochmoorwaldstandort Mooseurach. Im Vergleich zu den Mittelwasserständen im Moorwald ist der Standort Mooseurach nur sehr flach entwässert und die niedrige THG-Bilanz von 8,4 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> nicht repräsentativ für die entwässerten, meist Nieder- oder Anmoor-Wälder in Bayern. Der abgeleitete Wald-Emissionsfaktor für Gesamtbayern ist mit 22,5 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> hingegen vergleichbar mit dem deutschen Bundesmittel von 26,6 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (Tiemeyer et al. 2020).



Tabelle 12: Vergleich von gemessenen Mittelwerten des Wasserstands und der Treibhausgase gegenüber modellierten Gesamtflächenmittelwerten nach den Landnutzungskategorien für die organischen Böden Bayerns.

Landnutzungs-kategorie	Standortmittel (gemessen)		Gesamtflächenmittel (modelliert)			Fläche [ha]
	Wasserstand [cm]	Emissionsfaktor [t CO <sub>2</sub> -Äqu. ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	Wasserstand [cm]	THG-Emissionen [t CO <sub>2</sub> -Äqu. ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	Summe THG-Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup> ]	
<b>Acker</b>	-53,6	41,9	-49,5	41,9*	2,14	51.204
<b>ohne Nutzung degradiert</b>	-24	9,7	-34,8	20,4	0,00093	46
<b>Grünland intensiv</b>	-49,7	41	-41,3	34,8	2,10	60.322
<b>Grünland extensiv</b>	-19,4	17,7	-39,8	24,2	0,348	14.078
<b>naturnahe Moore</b>	-7,8	2,8	-30,9**	2,8*	0,3	10.102
<b>Wald</b>	-20,4	8,4	-36,7	22,5	1,58	70.052

\* gekennzeichnete Emissionsfaktoren wurden nicht modelliert, sondern sind der Median aus den gemessenen regionalen Emissionsfaktoren

\*\*Wasserstand naturnaher Moore ist nicht ausreichend gut abgebildet

#### 8.4.3.2 Einfluss des Klimawandels auf die Mooremissionen

Im Projekt wurden für die Jahre 2030 und 2040 der Einfluss der Temperatur- und Niederschlagsbedingungen auf den Wasserstand in zukünftige Treibhausgasbilanzen übersetzt und geprüft, ob dies das Ziel der Klimaneutralität bezüglich der Moore beeinflusst. Basierend auf den ClimEx-Klimaprojektionen (Kapitel 5.4.2) hat die TUM Wasserstandskarten für die Jahre 2030, 2040 und 2050 entwickelt.

Es wurde erwartet, dass eine Veränderung des Niederschlagsregimes zu einer weiteren Absenkung der Wasserstände führt. Allerdings lassen die Auswertungen der ClimEx-Daten bis 2050 keine gravierenden Austrocknungsprozesse erkennen (Kapitel 6.4.1.2). Die mit dem Emissionsmodell abbildbaren Veränderungen sind ebenfalls gering (Tabelle 13).

Tabelle 13: Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020 im Vergleich zu den Zukunftsprognosen 2030 und 2040 für die Moorkulisse des Hydrologischen Bayern (222.000 ha)

Jahr	THG Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup>	Zuwachs an Emissionen [%]
2020 (hydrologisches Bayern)	6,62	
2030 (hydrologisches Bayern)	6,80	2,7
2040 (hydrologisches Bayern)	6,83	3,2

Demnach ist, basierend auf dem Median des zur Verfügung gestellten Ensembles, eine leichte klimawandelbedingte Erhöhung der bayerischen Moor-THG-Bilanz von 6,7 auf 6,83 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> zu erwarten. Da die Moore weitestgehend entwässert sind und die Wasserstände großflächig heute schon niedriger als 50 cm unter Flur sind, ist bei einer weiteren Absenkung nur noch ein geringer Effekt auf die resultierende THG-Bilanz zu erwarten.

Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass der Einfluss auf naturnahe Moore wegen der Unsicherheit der Wasserstandskarte in diesem Bereich nicht berücksichtigt werden konnte. Allerdings zeigen langjährige Messreihen aus naturnahen Mooren wie z.B. dem Schechenfilz (Abbildung 43 a), dass ein intakter Torfkörper auch gegen längere

Trockenperioden eine hohe Resilienz aufweist. Die erwartete klimatische Wasserbilanz ist auch in der Zukunft deutlich positiv, weshalb keine Verschiebung der Hochmoorgrenze in Richtung Süden zu erwarten ist.

Die Treibhausgasberechnung für die Jahre 2030 und 2040 berücksichtigt allein den Effekt durch die Klimaveränderungen. Landnutzungsänderung und Moorsackung sind nicht berücksichtigt.

#### **8.4.4 Klimaschutzpotenzialkarten**

Im Folgenden werden verschiedene Stufen der Klimaschutzpotenziale der Moore gezeigt. Das theoretisch maximal mögliche Potenzial wird praktisch durch verschiedene Einschränkungen und Hindernisse reduziert.

##### **8.4.4.1 Maximales Klimaschutzpotenzial durch Wiedervernässung**

Es wurde angenommen, dass alle land- und forstwirtschaftlich genutzten Moore sowie degradierte Hochmoorheiden und Torfabbaugelände aus der Nutzung genommen werden und optimal wiedervernässt werden. Es hat sich flächendeckend ein Wasserstand von -10 cm unter Flur eingestellt. Für die landwirtschaftlich genutzten Standorte und Torfabbaugelände wurde das Modell für die wiedervernässten Standorte, getrennt nach Hoch- und Niedermoor, angewendet. Entwässerte Waldgebiete behalten ihre forstliche Nutzung bei, es erfolgte lediglich die Wasserstandsanhhebung auf ebenfalls -10 cm unter Flur.

Unter diesen Bedingungen würden sich in Bayern die Mooremissionen um 85% auf 0,94 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> verringern, dies entspricht einer Reduktion von 5,74 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>.

Moore stehen unter hohem Flächendruck, somit ist dieses Szenario als nicht realistisch anzusehen. Die Einschränkungen durch schlechte hydrologische Voraussetzungen, rechtliche Rahmenbedingung (z.B. naturschutz-, wasserrechtlich) und sozioökonomische Hemmnisse führen zu deutlichen Konflikten.

##### **8.4.4.2 Sozioökonomisch realistisches Potenzial**

Die sozioökonomischen Restriktionen berücksichtigen die Anzahl der privaten Eigentümer pro Hektar, den Flächenanteil der Flurstückfläche in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum, den Anteil der Ackerflächen an der Gesamtfläche und den Anteil der Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen an der Gesamtfläche (siehe Kapitel 7.4.2.2). Flächen mit den Indikatorenklassen „geringes bzw. mittleres sozioökonomisches Restriktionspotenzial“ werden aus sozioökonomischer Sicht als wiedervernässbar angenommen. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung kann die Gesamtemission noch auf 3,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> halbiert werden; es wird eine Reduktion von 52 % erreicht. Da der „Anteil der Ackerflächen an der Gesamtfläche“ in die Bewertung miteinbezogen wird, gelten durch Ackerbau geprägte Moore in diesem Fall als schlecht wiedervernässbar, obwohl diese Flächen mit das größte Einsparpotenzial aufweisen. Durch die Umwandlung dieser Flächen, die ausschließlich aufgrund ihrer ackerbaulichen Nutzung ein hohes Restriktionspotenzial aufweisen, in Paludikultur-Flächen kann der ökonomische Wert trotz Wiedervernässung voraussichtlich erhalten bleiben.

#### **8.4.4.3 Restriktionen zum Schutz der Biodiversität**

Wie im Kapitel zur Biodiversität ausgeführt, sind nur sehr wenige Konflikte mit der Biodiversität identifiziert worden. Diese beschränken sich auf die Vorkommen von 3 Vogelarten: Für die Wiedervernässung von Acker und intensiven Grünlandstandorten gelten die Vogelarten Wachtel, Rebhuhn und Feldlerche als restriktiv, wobei nur letztere auch restriktiv für den Anbau von Paludikulturflächen ist (Kapitel 8.4.28.4.2). Da die Feldlerche in Bayern aber kein Vorkommen auf Paludipotenzialflächen hat, wirkt ihr Vorkommen nicht zusätzlich beschränkend. Die genannten Vogelarten beschränken die Wiedervernässung von 572 ha Ackerfläche, wodurch 20.500 t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> weniger eingespart werden können.

#### **8.4.4.4 Potenzial durch Paludikultur**

Für gut 30.000 ha Ackerfläche auf organischen Böden ist der Ackerbau-Parameter das alleinige Wiedervernässungshindernis aus sozioökonomischer Sicht. Unter Berücksichtigung der Paludikulturpotenzialfläche, die für intensive Grünländer und Ackerstandorte die Gebiete mit Schutzgutauflagen (FFH, NSG und weitere) ausweist, kann eine Umwandlung in Paludikultur vorgenommen werden. Dadurch wird eine zusätzliche Entlastung von über 65 % erreicht, die Gesamtemissionen erreichen dann 2,31 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>.

#### **8.4.4.5 Unter Klimawandelprognosen sicheres Potenzial**

Die Klimaprognosen für die kommenden Dekaden lassen ausgeprägte Trockenperioden und vermehrte Starkniederschläge erwarten. Lange Trockenphasen beeinflussen insbesondere den Wasserhaushalt degradierter Moore und erschweren erheblich die Einstellung eines oberflächennahen Wasserstands. Auch die ClimEx Prognosen (Kapitel 5.4.2) zeigen eine Reduzierung der Niederschläge und eine deutliche Temperaturerhöhung. Allerdings ist für Bayern immer noch mit einer positiven klimatischen Wasserbilanz zu rechnen. Moore mit einem funktionierenden Wasserhaushalt scheinen gegenüber einer Temperaturerhöhung resilient zu sein, wie erste Ergebnisse aus dem MOORadapt-Projekt gezeigt haben. Das bedeutet, dass Einschränkungen durch den fortschreitenden Klimawandel noch eher gering sind.

#### **8.4.4.6 Unter Anpassung der Landnutzung optimiertes Potenzial**

Bayern hat sich vorgenommen bis 2040 klimaneutral zu werden. Ohne den Erhalt und den Ausbau natürlicher Kohlenstoffsenken wird dies nicht zu erreichen sein. Das bisherige Ziel bis zum Jahr 2040 mindestens 55.000 ha der Moore in Bayern wiederzuvernässen, ist zum Erreichen der Klimaneutralität nicht ausreichend. Eine reine Renaturierung der Moore ist aber insbesondere aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht immer durchführbar. Trotzdem muss zukünftig für alle Flächen eine moorbodenschonende Nutzungsstrategie verfolgt werden. Für Flächen, die nicht aus der Nutzung genommen werden können, muss die Landnutzung angepasst und der Wasserstand angehoben werden, um Wirtschaftlichkeit und den Moorbodenschutz zu vereinbaren. Folgende Maßnahmen sind zu empfehlen, wenn eine Renaturierung nicht möglich ist:

- In allen Grünländern soll ein Wasserstand von höchstens -20 cm unter Grund eingestellt werden. Bei diesem Wasserstand ist eine Bewirtschaftung noch möglich.
- In allen Waldgebieten auf organischem Boden soll der Wasserstand konsequent nahe der -10 cm angehoben werden.

- Alle Ackerstandorte, die aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten erhalten bleiben müssen, sollen in eine alternative Nutzungsform wie Paludikultur überführt werden.

Diese Umstrukturierungen bedürfen Zeit, bis zum Jahr 2030 sollten etwa 50 % der Maßnahmen erfolgt sein. Die Treibhausgasemissionen würden sich so auf 3,07 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> beschränken lassen. Bis zum Jahr 2040 sollten alle Maßnahmen umgesetzt werden. Die Einsparung würde knapp 80 % erreichen und die Gesamtemissionen würden nahe dem optimalen Wiedervernässungsszenario bei 1,53 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> liegen. Dadurch könnte die maximal mögliche Einsparung unter Minimierung der sozioökonomischen und biodiversitätsbedingten Hemmnisse erreicht werden.

Tabelle 14: Gegenüberstellung der THG Emissionen bei Beibehalt des Ist-Zustands (Baseline Szenario) mit dem durch Landnutzungsanpassung optimierten Szenario.

Landnutzungs-kategorie	Baseline Szenario		Landnutzungsangepasstes optimiertes Szenario		Eingesparte Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup> ]
	Mittlere THG-Emissionen [t CO <sub>2</sub> -Äqu. ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	Summe THG-Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup> ]	Mittlere THG-Emissionen [t CO <sub>2</sub> -Äqu. ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ]	Summe THG-Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup> ]	
<b>Acker</b>	41,9*	2,15	-10**	-0,51	2,66
<b>ohne Nutzung degradiert</b>	20,4	0,0009	3,0	0,0001	0,0008
<b>Grünland intensiv</b>	34,8	2,1	23,2	1,4	0,7
<b>Grünland extensiv</b>	24,2	0,34	18,8	0,26	0,076
<b>naturnahe Moore</b>	2,8*	0,03	2,8	0,03	
<b>Wald</b>	22,5	1,58	-3,5	-0,24	1,82

\*gekennzeichnete Emissionsfaktoren wurden nicht modelliert, sondern sind der Median aus den gemessenen regionalen Emissionsfaktoren

\*\*noch nicht finaler Wert aus dem MOORuse Projekt.

## 8.5 Output-Indikator

Die Wiedervernässung von 3 ha Grünland auf dem staatlichen Versuchsgut in Karolinenfeld führte gemäß den Treibhausgasmessungen der HSWT im Projekt zu einer Treibhausgasminderung von rund 70 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr. Es war geplant, eine angrenzende tief entwässerte Niedermoorfläche von 10 ha im Staatsgut Karolinenfeld in Stufen wiederzuvernässen, um hydrologische Zusammenhänge zu messen und aktuelle Fernerkundungsmessungen zu kalibrieren. Die Baumaßnahmen dafür verzögerten sich, weil die in den Drainageplänen eingezeichneten Drainagerohre nur teilweise im Boden vorhanden waren und damit eine komplette Neuplanung und sehr viel aufwändigere Umsetzung nötig war. Die Baumaßnahme wurde im Herbst 2022 durchgeführt. Dadurch werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf der Fläche erwartungsgemäß ebenfalls ungefähr halbiert und weitere 23,4 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> Emissionsminderung, insgesamt also zusätzlich 234 t CO<sub>2</sub>-Äqu. pro Jahr erzielt.

Durch die Innovationen und Ergebnisse des KliMoBay Projekts wird die Umsetzung des Masterplans Moore Bayern beschleunigt. Die Klimaschutzpotenzialkarten bilden die Grundlage für eine faktenbasierte Kommunikation mit Betroffenen und zeigen prioritäre Handlungsräume für den Klimaschutz auf. Die Szenarien für den Klimaschutz zeigen einerseits, dass der Klimawandel trotz relativ extremer Szenarien bis 2050 keine wesentlichen Einschränkungen für den Moorschutz in Bayern bilden wird. Andererseits zeigen die Szenarien

erhebliche Emissionsminderungspotenziale um bis zu 85% der THG-Emissionen auf - weit über die politisch geforderten 55.000 Hektar hinaus und im Einklang mit einer optimierten Landnutzung und mit Biodiversitätszielen.

Das völlig auf bayerischen Messdaten beruhende, erweiterte PEP-Modell zur Berechnung von THG erlaubt eine sehr viel präzisere bayernweite THG-Bilanzierung als bisher. Es zeigt, dass bisher die THG-Emissionen aus entwässerten Moorböden unterschätzt wurden. Das Modell kann die Grundlage für eine projektbasierte THG-Bilanzierung im Sinne von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten bilden.

## 8.6 Diskussion Treibhausgase und Klimarelevanz

### Mooremissionen

Im Projekt konnte die bisherige Mooremissionskarte von Tier 2 auf Tier 3 angehoben werden. Dies ermöglicht neben der verbesserten gesamt-bayerischen Bilanzierung die Abbildung von Potenzialen, Landnutzungsänderungen und Wiedervernässung sowie die Berechnung zukünftiger Emissionen.

Aufgrund der Datenlage war es nicht möglich die Treibhausgase der Ackerflächen zu modellieren, sodass für diese Flächen ein regionaler EF angewendet werden musste. Insgesamt zeigen sich ab einem Wasserstand von -50 cm unter GOK große Unsicherheiten in der THG-Wasserstandsabhängigkeit. Ab dieser Tiefe ist der Einfluss des Wasserstands auf die THG-Höhe von anderen Faktoren wie z.B. Nährstoffverfügbarkeit oder Bodendegradation überlagert (siehe auch Ergebnisse der THG-Bilanzierung in BDB und KLF, Kapitel 8.4.1.1). Tief entwässerte Standorte sind in der Regel intensiv landwirtschaftlich genutzte Böden, bei denen viele Faktoren die THG-Bilanzen beeinflussen, wie Fruchtfolge, Düngeintensität, Schnitthäufigkeit, Ernteerfolg etc. Dies ist ein entscheidender Grund, warum für ackerbaulich bewirtschaftete Flächen kein Regressionsmodell gefunden werden konnte, die THG-Bilanzen der sieben untersuchten bayerischen Mooracker-Standorte zeigen eine sehr große Streuung. Die Erweiterung des Datensatzes um norddeutsche Messungen wurde geprüft, führte aber nicht zu einer Verbesserung. Somit wurde für Äcker auf regionale Emissionsfaktoren zurückgegriffen. Dieser Emissionsfaktor ist mit 41,9 t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> nahezu identisch mit dem bundesdeutschen Mittelwert (Tiemeyer et al. 2020).

Für naturnahe Moore konnte zwar ein gutes Modell erstellt werden, allerdings hat die statistische Wasserstandmodellierung die Flurabstände dieses Landnutzungstyps systematisch unterschätzt (Kapitel 6). Daher sind auch die Emissionen dieser Gebiete nur durch einen regionalen EF dargestellt.

Glücklicherweise besteht für die Gebiete mit diesen Landnutzungstypen wenig Interpretationsbedarf. Äcker auf organischen Mooren waren in allen bisherigen Berichten und Veröffentlichungen als starke THG-Emittenten eingestuft. Naturnahe Moore sind in vielerlei Hinsicht das Optimum, das jede Renaturierung/Wiedervernässung anstrebt.

Die in Kapitel 8.4.1.3 beschriebenen Abhängigkeitskurven wurden in einem Modell zusammengefasst. Das Modell kann leicht um weitere Landnutzungen erweitert und neue Messergebnisse können integriert werden, um so die vorgestellten Abhängigkeitskurven zu verbessern und abzusichern. Zukünftig soll es so für z. B. Moormanager der Regierungsbezirke/Landkreise möglich werden, über einfache Geoinformationsdaten zu Landnutzung und Wasserstand (Shapefiles) Treibhausgasemissionen flurstücksgenau (je nach Geodaten-Input) abzurufen und somit die Effekte von Landnutzungsänderungen, Extensivierung und Wasserstandanhebung abzuschätzen. Die dynamischen Mooremissionskarten können so als Planungs- und Priorisierungsgrundlage genutzt werden.

Exemplarisch wurde eine Ausleitung für den Landkreis Weilheim-Schongau vorgenommen. Die Aufbereitung für alle Landkreise Bayerns ist aber innerhalb des KliMoBay Projektes nicht möglich.

### Klimaschutzpotenziale

Wie zu erwarten zeigen die Berechnungen und Auswertungen, dass die maximalen Einsparpotenziale durch eine Umwandlung oder Wiedervernässung der intensiv bewirtschafteten Moorböden zu erreichen sind. Dies gilt sowohl für Ackerbau als auch für intensive Grünlandnutzung. Eine reine Umwandlung von Acker in Grünland ohne Wasserstandsanhhebung und Extensivierung birgt kein Einsparpotenzial an Treibhausgasen. Eine optimale Wiedervernässung aller bewirtschafteten Flächen (Wald, Grünland und Acker) würde zu einer Treibhausgasreduktion von 86 % führen. Unter Berücksichtigung sozioökonomischer Hemmnisse und naturschutzrechtlicher Einschränkungen (in Hinblick auf die Etablierung von Paludikulturen) ließen sich immer noch 50 % der Treibhausgasemissionen reduzieren (Tabelle 15). Einen großen Gewinn für den Klimaschutz bringt die Umwandlung von Ackerland zu Paludikulturen. Paludikultur ist die einzige Nutzungsform die, nach bisherigen Ergebnissen für mindestens die ersten 10 Jahre und vermutlich dauerhaft, als effektive Kohlenstoffsенke trotz Bewirtschaftung fungiert: Aufnahme von ca. 10 t CO<sub>2</sub>-Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Paludikulturflächen erreichen ein höheres Einsparpotenzial als reine Renaturierungsflächen und sind zukünftig, wenn Verwertungsketten etabliert sind, eine wirtschaftliche Alternative zum herkömmlichen Ackerbau (siehe MOORuse-Projekt). Somit liegt auf diesen Flächen das maximale netto Einsparpotenzial (Tabelle 14).

Tabelle 15 Vergleich der Emissionen und der Einsparleistungen der im Kapitel 8.4.4 beschriebenen Szenarien \* außer Wohnbebauung/Gewässer/Infrastruktur/naturnahe Moore

Szenario	THG Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äqu. a <sup>-1</sup>	Einsparung [%]
Baseline: Ist-Zustand 2020	6,7	
Maximal: Wiedervernässung aller Flächen*	0,9	86
Sozioökonomisch realistisch	3,4	48,5
Sozioökonomisch realistisch unter Berücksichtigung des Artenschutzes mit Paludikultur	2,3	65,5
Durch Anpassung der Landnutzung optimiertes Potenzial bis 2030	3,0	54,0
Durch Anpassung der Landnutzung optimiertes Potenzial bis 2040	1,5	77

Wenn Ackerflächen konsequent in Paludikulturen umgewandelt werden und Wälder und Grünländer in Nassbewirtschaftung (Wasserstand -10 bzw. -20 cm unter Grund) überführt werden, lassen sich erhebliche Einsparpotenziale erzielen. Auf diese Weise können die Treibhausgasemissionen um bis zu 80 % gesenkt und dabei die Bewirtschaftung trotzdem fortgeführt werden. Die Vergleichskarten in Abbildung 50 verdeutlichen das große Einsparpotenzial insbesondere in den intensiv genutzten Mooregebieten.

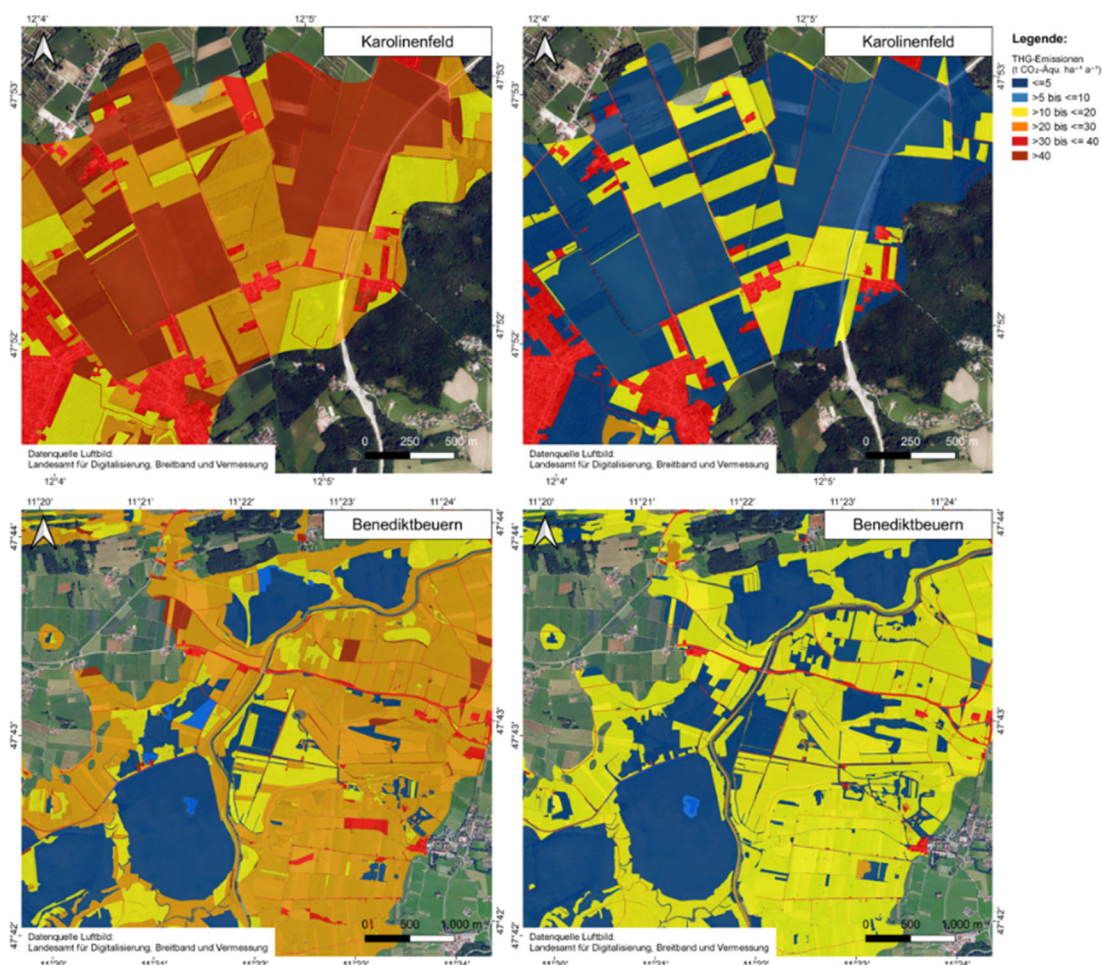


Abbildung 50: Vergleich der Mooremissionen im Jahr 2020 (links) mit den Emissionen nach potenzieller Landnutzungsanpassung und Optimierung (rechts) am Beispiel von Karolinenfeld und Benediktbeuern

## 8.7 Weiterführender Forschungsbedarf

Die Auswertung der Altdaten hat gezeigt, dass die Datenlage zu Treibhausgasmessungen für drei Landnutzungsformen nicht ausreichend ist. Dies betrifft neben den Äckern auch die Weidenutzung, welche gar nicht in der Erhebung berücksichtigt werden konnte. Es wird erwartet, dass die Datenlage sich durch schon in der Umsetzung befindende Projekte (MoLaKlim (2022-2031, BMUV) und MoorBewi (2021-Mai 2024, StMELF)) zukünftig verbessert. Dringend notwendig sind ergänzende Messungen im Moorwald, insbesondere in tiefer entwässerten Niedermoorwäldern. Für diese weit verbreitete Nutzung ist momentan keine Verbesserung der Datenlage absehbar. Dies gilt nicht nur für Bayern; auch für den Rest des Bundesgebietes liegen keine Daten vor.

Bisher wiedervernässte Moore konnten nicht als diese berücksichtigt werden. Meist waren sie im ATKIS als naturnahe Moore gekennzeichnet. Durch eine Verbesserung der Datenlage zu den Vernässungsflächen könnten Unterschiede in den Bilanzen zwischen wiedervernässten Standorten und naturnahen Gebieten in die Darstellungen und Interpretationen mit aufgenommen werden. Hier wird im MOORclimb II Projekt in Zusammenarbeit mit den Regierungen an einer Verbesserung des Kenntnisstandes zu Flächendaten der Wirkräume gearbeitet.

Eine prozessbasierte Modellierung konnte aufgrund fehlender flächenhafter Daten zu bodenchemischen und bodenphysikalischen Parametern nicht weiterverfolgt werden. Eine flächendeckende Erhebung weiterer Bodenparameter wird in Zukunft benötigt.

Im Projekt wurden für Grünländer die Beiträge des C-Exports und C-Imports als Gesamtes mit dem CO<sub>2</sub>-Fluss über die Wasserstandsabhängigkeit modelliert. Zukünftig wäre sehr erstrebenswert, diesen Beitrag individuell in der Fläche abbilden zu können. Dies kann über die Frequenz der Schnitthäufigkeiten geschehen, die einen starken linearen Zusammenhang mit C-Exporten und C-Importen zeigen. Erste Schritte und große Erfolge für intensiv bewirtschaftete Flächen gab es bereits in diesem Projekt durch Multispektral- und Mikrowellenfernerkundung. Eine Fortführung dieser Erkenntnisse und eine Verbesserung der Methode für extensive Gebiete würde die Treibhausgasmodellierung zukünftig sehr unterstützen.

## 9 MONITORING UND ERFOLGSKONTROLLE

*Wie können die Ergebnisse aus dem KliMoBay-Projekt zur Umsetzung der Kriterien „messbar, berichtbar und verifizierbar“ (MRV) von bayernweiten Maßnahmen beitragen?*

Modul 14 beantwortete in Kooperation aller vier Projekte die Forschungsfrage: Wie müssen das Monitoring und die Erfolgskontrolle der Umsetzung von Maßnahmen zum Moorbodenschutz ausgestaltet werden, um die damit erreichten Klimaschutzeffekte nachzuweisen? Damit soll der internationale Standard für „MRV“ erfüllt werden: Emissionsminderungen müssen messbar, berichtbar (reportable) und verifizierbar sein. MRV Kriterien werden auf zwei Skalen unterschieden:

1. Regionale bis nationale Ebene im Sinne der Treibhausgasberichterstattung. Wichtige Emissionsquellen wie die Moorböden müssen detailliert mit regionalen bzw. nationalen Daten berechnet und berichtet werden. Das betrifft gleichermaßen entwässerte und wiedervernässte Bereiche und die historische Entwicklung der Steuerfaktoren wie Nutzung, Entwässerungstiefe seit 1990. Dabei gelten die folgenden Kriterien: Transparent (Methode muss beschrieben und veröffentlicht sein), akkurat (keine Über- oder Unterschätzung der THG-Emissionen), vollständig (entwässerte und wiedervernässte Bereiche, alle Nutzungsformen), konsistent (gleiche Methodik für die gesamte Zeitreihe seit 1990), vergleichbar (mit anderen Staaten; zwischen Bayern und Bund). Unsicherheiten in den Berechnungen sind zu quantifizieren.
2. Projektebene für Projekte, die beim Emissionshandel teilnehmen oder CO<sub>2</sub>-Zertifikate generieren. Hier ist zusätzlich eine Referenz ohne Maßnahmen zu berechnen, gegenüber der Emissionsminderungen festgestellt werden. Die Emissionsminderung und ihre Unsicherheiten müssen auf Projektebene nachgewiesen werden. Dies erfolgt üblicherweise in Zeiträumen von wenigen Jahren und erfordert zusätzliches Monitoring im Projektgebiet.

Folgende Komponenten des MRV wurden im KliMoBay Projekt erprobt:

- THG-Messung und THG-Bilanzierung: Erweiterung des PEP-Modells. Die Eingangsgrößen bestimmen, welche Daten bei MRV erhoben werden müssen: Wasserstand (jährlicher Mittelwert), Vegetationstyp bzw. Nutzung, Nutzungsintensität, idealerweise Ertrag, C-Eintrag durch organische Düngung, Moortyp, ggf. weitere Bodeneigenschaften.



- Nutzungsintensität: Schnittzeitpunkte und Schnitthäufigkeit im Grünland mit Fernerkundung
- Hydrologie:
  - Hydrologisches Monitoring, Wasserstandsmonitoring mit Automatikpegeln
  - Hydrologische Modellierung mit physikalisch basiertem Modell (Projekt) und einem statistischen Ansatz (Bayern)
- Moortyp (Bayern), Torfmächtigkeit (Bayern, Projekt): überraschend sind Daten zu tiefgründigen Moorböden nicht flächendeckend verfügbar.
- Sackungsraten als Proxy für CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Zeitraum Jahrzehnte: Nachbeprobung historischer Bodenprofile (Projekt). Die meisten nachbeprobten Profile waren nicht parallelisierbar. Der Torfverlust war nur in wenigen Fällen sicher quantifizierbar.
  - Zeitraum 10 Jahre: Vergleich digitaler Höhenmodelle (Projekt, Bayern). Die Methode ist sehr genau, wenn die DGMs zum Vergleich an regionalen Fixpunkten verankert werden.
  - Zeitraum < 1 Jahr bis wenige Jahre: Fernerkundung. Vielversprechend für naturnahe Moore außerhalb von Wäldern, aber weitere Methodenentwicklung nötig.

Als Ergebnis der Projekterfahrungen empfiehlt das Projektkonsortium folgendes Konzept für **MRV auf der Ebene von Bayern:**

- Anwendung des erweiterten PEP-Modells - Datenbedarf: Wasserstände flächig, Landnutzungs-Vegetationstypen, Nutzungsintensität im Grünland
- Verbreitung der Moorflächen: KliMoBay arbeitete auf dem Stand der LfU Moorbodenkarte. Seither gibt es Aktualisierungen und Ergänzungen, z.B. durch landwirtschaftliche Moorböden aus der Bodenschätzung, die in die GLÖZ 2 Kulisse unter der Gemeinsamen Agrarpolitik ab 2023 eingeflossen sind. Die Ergebniskarten von KliMoBay sind auf die neue Moorbodenkulisse zu übertragen.
- Torfmächtigkeit und Bodeninformationen: Wir haben den ersten Versuch einer bayernweiten Torfmächtigkeitskarte unternommen als Basis für die Karte der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung. Bei Mooren über 40 cm Mächtigkeit sind nur äußerst dürftige Profildaten verfügbar. Das Moorarchiv der LfL verfügt noch über zahlreiche Mutterpausen und Handakte mit Torfprofilen, die im Rahmen des Projektes nur für ausgewählte Modellgebiete gesichtet und digitalisiert werden konnten.
- Landnutzung (tatsächliche Nutzung, bei Grünland zusätzlich Nutzungsintensität z.B. durch Schnittzeitpunkte, Agrarumweltmaßnahmen): die Fernerkundungsansätze sind vielversprechend, brauchen allerdings eine gute Validierung. Synergien mit den GAP-Kontrollen sind anzustreben.
- Wasserstandsmonitoring: Zahlreiche Pegelmessdaten wurden in einer Datenbank zusammengeführt, die mit der Wasserwirtschaft kompatibel ist. Diese Datenbank ist nicht nur für MRV sehr wertvoll, sondern auch für Maßnahmenplanungen und Informationen zum Landschaftswasserhaushalt. Die Datenbank sollte von der Wasserwirtschaft oder einer anderen Behörde übernommen, ergänzt und fortgeführt werden.
- Das im Projekt entwickelte statistische Modell für Flurabstände kann für Bayern angewendet werden. Es sollte anhand weiterer Pegelmessdaten und neuer Daten in regelmäßigen Abständen, z.B. 3-5 jährlich aktualisiert werden.

- Sackungsraten als Proxy für CO<sub>2</sub>-Emissionen werden parallel zum PEP-Modell empfohlen. Die Torfsackung führt nur teilweise zu CO<sub>2</sub>-Freisetzung, der andere Teil ist Verdichtung im Bodenprofil. Damit sind Sackungsraten alleine nicht als Proxy für CO<sub>2</sub>-Emissionen geeignet, aber als Validierung und Erfolgskontrolle bei Wiedervernässung sehr wertvoll. Bayernweit wird die im Projekt angewandte Methode des DGM-Vergleichs empfohlen, validiert mit in situ Stützstellen mit Bodenbewegungsmessungen aus dem bundesweiten MoMoK Projekt des Thünen-Instituts (ca. 30 Messstellen in Bayern).

Als Ergebnis der Projekterfahrungen empfiehlt das Projektkonsortium folgendes Konzept für **MRV von Moorbodenschutzprojekten für den Klimaschutz:**

Alle Informationen sind auf Projektebene VOR Beginn der Maßnahme und danach kontinuierlich zu erfassen, solange das Monitoring gewünscht ist. Die Mindestanforderungen richten sich nach den Projektzielen. Das Monitoring sollte mit den Anforderungen auf der Ebene von Bayern kongruent oder kompatibel sein.

- Räumliche Ausdehnung (einmalig)
- Landnutzung bzw. Vegetationstyp (übersichtsartig, alle 5 Jahre)
- Torfmächtigkeit und Unterliegendes (Stauhorizont?) durch Tiefensondierung entlang von Transekten und bodenkundliche Ansprache (einmalig). Diese Informationen sind für die Wassermanagementplanung sowieso erforderlich.
- Wasserstände (Boden und offene Wasserflächen) vor Maßnahmen und dann kontinuierlich (täglich) an wenigen Stellen (je nach Relief bis 1/ha), manuelle Stichtagsmessungen 2x jährlich mit Pegelnetz höherer Dichte)
- Sackungsraten: in ca. 10-jährigem Turnus aus dem Vergleich der Digitalen Höhenmodelle (DGM 1) machbar.

MRV für CO<sub>2</sub>-Zertifikate und über den Klimaschutz hinausgehende Ziele wie Biodiversität erfordern ergänzende Untersuchungen:

- Perspektivisch wird die THG-Modellierung den Torfzustand berücksichtigen, da die Geschwindigkeit der biologischen Prozesse wesentlich vom Torfzustand abhängen. Auf Bundesebene laufen Bemühungen zur Berücksichtigung des belüfteten Stickstoffvorrats  $N_{air}$  im Moorboden, der oberhalb des Grundwasserstands ist. Dazu sind Daten zum Torfsubstrat, Degradationsgrad nach van Post, Trockenrohddichte, C- und N-Gehalt nach Tiefenstufen erforderlich.
- Torfzustand (Tiefenprofil des Moorbodens, z.B. entlang eines Transekts durchs Gebiet bzw. in räumlich verschiedenen Einheiten. 1/Einheit) mit Profil der notwendigen Bodendaten für den belüfteten Stickstoffvorrat.
- Jährliche Sackungsraten: Fernerkundung plus wenige manuelle *in situ* Messpfosten (2-4x jährlich) auf größeren homogenen Flächen zur Kalibration oder nur manuelle *in-situ* Messungen (1/ha, 4x jährlich). Für landwirtschaftlich genutzte Moore hat die Fernerkundungs-Methodik Potenzial, sie bedarf allerdings noch weiterer Forschung.
- Perspektivisch wird die THG-Modellierung die Saisonalität berücksichtigen. Dies kann insbesondere bei geregelten Wasserständen zu anderen Ergebnissen führen als die bisherigen Modelle. Dazu sind phänologische Parameter aus der Fernerkundung zusätzlich zu erheben (LAI, NDVI).

## 10 ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION

Das KliMoBay-Projekt hat in einer umfassenden, ressourcenübergreifenden Herangehensweise Altdaten aufbereitet und neu interpretiert, Datenlücken gefüllt und für die Entwicklung von dringend benötigten flächenhaften Produkten zusammengeführt. Dabei ist durch die enge Zusammenarbeit der vier beteiligten Institutionen mit ihren jeweiligen Kompetenzen eine neue Qualität der Aussagetiefe für landesweite Entscheidungsgrundlagen für den Moorschutz entstanden.

In der zusammenfassenden Diskussion werden die Ergebnisse des KliMoBay-Vorhabens entlang von Kernfragen, die zum Moorschutz perspektivisch gestellt werden und die das Vorhaben beantworten kann, beleuchtet:

*Das Klima wird immer wärmer – ist in Zukunft genug Wasser für die bayerischen Moore da?*

Für das KliMoBay Vorhaben wurden seitens der LMU die ClimEx Daten aufbereitet und für die Moorkulisse verfügbar gemacht (Kapitel 5.4.2). Die Zeitschritte des Datensatzes für die Zukunftsbetrachtung wurden für 2030, 2040 und 2050 festgelegt. Als Emissions-Szenario für die Berechnungen wurde RCP8.5, also das pessimistischste IPCC Szenario genutzt. Dennoch kann hinsichtlich der Entwicklung der klimatischen Eingangsparameter für die Wasserbilanz keine wesentliche Veränderung abgeleitet werden. Die prognostizierte Ausprägung der Klimaparameter (Niederschlag und Verdunstung) gehen in die Modellierung der Wasserstandskarte der TUM ein, die hinsichtlich der Jahresbilanzen dynamisch in die Zukunft modelliert wird. Einschränkend kann aber eine veränderte Verteilung von Niederschlägen im Jahr die Vitalität der Vegetation und die Kohlenstoffbilanz im Moor (bei gleicher Mittelwasserstandssituation) beeinflussen. Für die ausgewählten Modellzeitschritte ist diese Dynamik aber nicht bestätigt.

Aus den regionalisierten prognostizierten Klimaänderungen und deren Parameter-Nutzung in der hydrologischen Modellierung lassen sich keine wesentlichen Veränderungen der zukünftigen Wasserstände ableiten. Damit ist kein Hinweis auf zu wenig Wasser für die Moore (bis Mitte des Jahrhunderts) gegeben. Zudem sind bisher in der Modellierung die flächigen Sackungsraten beim Baseline-Szenario noch nicht einbezogen, weshalb die Grundwasserflurabstände (bei nicht weiterer Vertiefung der Entwässerungseinrichtungen) eher flurnäher werden. Eine prognostizierter Temperaturanstieg führt bei hohen Wasserständen nicht zu einem erhöhten Risiko des Kohlenstoffverlusts, wie im Projekt MOORadapt gezeigt werden konnte.

*Fazit:* Bayern ist und bleibt im Vergleich zu anderen Bundesländern ein klimatischer Gunstraum für den Moorschutz, weil in den meisten Moorregionen zumindest ganzjährig eine positive klimatische Wasserbilanz erhalten bleibt. Um die Flächenwasserstände auf das Niveau der entwickelten Klimaschutzszenarien zu heben, braucht es aber die Implementation eines intelligenten flächendeckenden Wassermanagements mit dem Einsatz von gebietsspezifischen Kombinationen aus Wasserrückhalt, Einleitung, Grundwassernutzung, Hochwasserrückhalt und Speicherung mit geregelter Abgabe. Moorschutz durch angepasste Nutzung braucht Wasserregelung. Die Effekte dieser Maßnahmen können mittels einer detaillierten hydrologischen Modellierung für beliebige Einzugsgebiete modelliert werden.

*Wie genau kann die flächenhafte Wasserstandskarte für Bayern sein?*

Das wichtigste Ergebnis von Projekt 2 ist die bayernweite Wasserstandskarte. Diese zeigt monatliche oder aggregierte Mittelwerte der Flurabstände des Moorwasserspiegels mit einer räumlichen Auflösung von 25 x 25m für das Jahr 2020 (Ist-Zustand) sowie für prognostizierte Zustände der Jahre 2030, 2040 und 2050. Die Dynamisierung, also die Darstellung der innerjährlichen Variabilität, ist die wichtigste Innovation gegenüber Bechtold et al. (2014). Dennoch sind für bestimmte Zustände, wie die naturnahen und wiedervernässten Moore noch Unsicherheiten in der Skalierung gegeben. Die Güte der Karte mit einer „Sicherheit von +/- 0,25 cm auf 80% der Fläche“ ist als sehr gut für den bayernweiten Maßstab einzuschätzen (Halbierung der Unsicherheit gegenüber Bechtold). Dennoch ist für Moorschutzmaßnahmen immer die lokale Situation vor Ort zu prüfen, da sie von vielen Unbekannten, z.B. dem Anschluss an das Grundwasser und lokalen Entwässerungseinrichtungen abhängt.

*Fazit:* Eine Verbesserung der bayernweiten Wasserstandskarte durch die Einbeziehung von erweiterten Daten (Automatikpegel) im naturnahen und wiedervernässten Bereich ist erforderlich und mit angemessenem Aufwand in den nächsten Jahren machbar. Eine zyklische Aktualisierung (ca. alle 2 – 3 Jahre) bei gleichzeitiger Fortschreibung der Datenbasis ist daher ratsam. Da Methodik und Werkzeuge vorliegen, wird der Aufwand dafür verhältnismäßig sein. Ebenso müssen vorhandene Entwässerungseinrichtungen und deren Entwässerungstiefen flächendeckend erfasst werden, damit sie bei der Modellierung berücksichtigt werden können.

*Warum sind die Emissionen auf Bayernebene nun noch höher als bisher angenommen?*

Bisher wurde von 4,9-5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> ausgegangen (Drösler und Kraut 2020). Die im KliMoBay-Projekt berechneten Emissionen liegen aber deutlich höher mit einem Mittelwert von 6,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> (5,7-7,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup>). Hintergrund für diesen höheren Wert ist einerseits, dass nun erstmals (1) regionale Emissionsfaktoren aus einem rein bayerischen Datensatz von Spurengasbilanzen abgeleitet wurden, dass nun (2) auf Tier 3 Level landnutzungsspezifische Wasserstandsabhängigkeiten für die Modellierung gebildet und eingesetzt werden konnten und dafür die Voraussetzung war, dass (3) eine Flächen-Wasserstandskarte seitens der TUM entwickelt wurde. Der große Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber dem bisherigen Tier 2 Ansatz ist, dass einerseits die regionaltypischen Emissionsfaktoren deutlich zuverlässiger für die naturräumliche Situation sind und damit die Unsicherheiten reduziert werden können und dass die Emissionen bei sich ändernden Wasserständen (z.B. durch Maßnahmen) regressionsbasiert berechnet/aktualisiert werden können.

*Fazit:* Die neuen Gesamtemissionen zeigen nochmal deutlicher die Relevanz dieses Landnutzungssektors für die gesamte Klimabilanz und andererseits das große Potenzial für eine erhebliche Reduktion der Emissionen auf einer relativ kleinen betroffenen Fläche.

*Wo liegen Handlungsschwerpunkte zur Anpassung an den Klimawandel?*

Die Ergebnisse der Klimaszenarien zeigen, dass die Moornutzung durch den Klimawandel wenig beeinflusst wird (s. Karte 14-17, Anhang 13.18). Viel zentraler ist die kontinuierliche

Moorsackung, die die Geländeoberfläche näher ans Grundwasser bringt, Flächen überschwemmungsgefährdeter macht und in einigen Fällen nach Verlust der Torfschicht landwirtschaftlich ungünstige Substrate an die Oberfläche bringt. Die Moorsackung (Torfzehrung) zeigt über Bayern hinweg eine nutzungsabhängige Spanne von wenigen mm bis über 3.5 cm (s. Karten 29-31, Anhang 13.18). In der Zusammenführung von flächigen Grundwasserständen, Sackungsraten, Torfmächtigkeiten und Unterliegendem wurde eine Karte der Endlichkeit der entwässerungsbasierten Nutzung erstellt. Sie ist die erste quantitative Schätzung des Handlungsbedarfs für eine standortangepasste Nutzung. 25% der landwirtschaftlichen Flächen erreichen in den nächsten 15 Jahren die Grenzen der Bewirtschaftbarkeit, insgesamt 38% innerhalb der nächsten 30 Jahre. Dies zeigt die hohe Vulnerabilität der derzeitigen Bewirtschaftung in Abhängigkeit von den genannten Standortfaktoren.

Unabhängig vom tatsächlichen Handlungsbedarf zeigten sich überraschend starke Datenlücken in den bodenkundlichen und hydrologischen Fachgrundlagen. Für eine wirklich robuste Abschätzung der Endlichkeit, aber auch als Basis für jede Moorschutzmaßnahme, fehlen insbesondere Daten zu

- Moormächtigkeit
- Unterliegendem, insbesondere die Stauwirkung und landwirtschaftliche Nutzbarkeit
- Entwässerungseinrichtungen, insbesondere Rohrdrainagen und deren Entwässerungstiefe.

Diese Datenmängel spiegeln sich in unvermeidlichen Inkonsistenzen, die stellenweise zu einer Fehleinschätzung der Endlichkeit führen. So treten z.B. stellenweise gleichzeitig hohe Sackungsraten und relativ hohe Flurwasserstände auf. Die Karte der Endlichkeit der Nutzung sollte daher als grobe Konzeptkarte verstanden werden.

*Fazit:* Die Ergebnisse betonen die starke Endlichkeit des Ackerbaus auf Moorstandorten. Selbst wenn man die Unsicherheiten dieser Schätzung berücksichtigt, ist der Handlungsbedarf also akut und erheblich.

#### *Wo liegen Handlungsschwerpunkte zum Klimaschutz?*

Eine wesentliche Basis für die Identifikation von prioritären Handlungsräumen stellt die aktuelle Mooremissionenkarte dar. Hier wird sichtbar, dass gerade die tiefentwässerten Niedermoores mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung im Acker wie im Grünland die Emissions-Hot-Spots darstellen. Entsprechend der Verteilung dieser Landnutzungen auf Niedermoor sind die Handlungsschwerpunkte räumlich bayernweit ablesbar (siehe Anhang 13.18, Karte 29). Die Daten sind als GIS-Dateien auch in höherer Auflösung nutzbar und können somit auch auf Regierungsbezirks- oder Landkreisebene für die Identifikation von Schwerpunktregionen eingesetzt werden.

Nachdem identifiziert wurde, wo die derzeitigen Belastungen am höchsten sind, müssen inhaltlich und räumlich differenzierte Maßnahmen für den Klimaschutz entwickelt und deren Effekte für den Klimaschutz modelliert werden. Dies erfolgte mit verschiedenen Szenarien, die von einem Maximalszenario ausgehend, über Sozioökonomie und Biodiversitätskonflikte abgeschichtet und ein exklusives Paludikultur-Szenario gerechnet wurde. Schließlich wurde ein landnutzungsoptimiertes Szenario zeitlich differenziert für 2030 und 2040 durchgerechnet. Mit dem landnutzungsoptimierten Szenario könnten die Emissionen um fast 80% auf nur noch ca. 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äqu. a<sup>-1</sup> gesenkt und dennoch weiterhin Landnutzung betrieben werden.

Durch die Einbeziehung von sozioökonomischen Restriktionen und unter Annahme der Wiedervernässbarkeit in den Zielhöhen der Wasserstände (siehe oben: Wasserverfügbarkeit sollte gegeben sein), wird dieses Szenario als grundsätzlich umsetzbar eingeschätzt. Hervorzuheben ist, dass die größte Klimaschutzleistung mit der Umwandlung von Acker zu Paludikulturen erreicht werden kann. Eine weitere Reduktion der Emissionen hin zu klimapositiver Landnutzung ist durch Erweiterung der Paludikulturnutzung auch in das Intensiv-Grünland möglich. Je nach Definition wird auch Nass-Grünland als Paludikultur gewertet. Dieses Szenario wurde aber bisher nicht gerechnet, da die Vermeidung einer Grünlandreduktion bei der Szenarienentwicklung bisher als gesetzt angesehen wurde.

*Fazit:* Mittels der flächenhaften verbesserten Mooremissionskarten und der Moorschutzpotenzialkarten sind abgestufte Priorisierungen möglich, die hinsichtlich ihrer Klimaschutzleistung berechnet wurden. Inwieweit aber eine tatsächliche Umsetzung in der erforderlichen Geschwindigkeit zur Unterstützung der Klimaneutralität auf Landes- und Bundesebene erreicht werden kann, hängt dann viel mehr von Governance, Förderung, Wertschöpfungsketten, Best-Practise Beispielen und dem Zusammenspiel von Landes- und Bundesaktivitäten (s. ANK) etc. ab.

*Sind die Systemgrenzen für die Bewertung der potenziellen Klimaschutzleistung angemessen?*

Die Grundlage für die Emissionsberechnungen ist konform mit der Berichterstattung für die Fläche. Damit werden auch Klimaschutzleistungen pro Fläche als erste Systemgrenze ausgedrückt, die handlungsleitend für die Maßnahmen auf den Flächen der korrekte Ansatz sind. Vor dem Hintergrund von Gesamtbetrachtungen zum Klimaschutz ist darüber hinaus aber eine erweiterte Systemgrenze einzubeziehen, die mitberechnet, welche Produkte entstehen, wie diese genutzt werden und welche Substitutionseffekte dabei entstehen. Daher sind für eine Gesamtbilanzierung zwei weitere Ebenen zu betrachten: Die Festlegung von Kohlenstoff in dauerhaften klimapositiven Produkten, wie z.B. Bauplatten aus Paludikulturmaterial und die Substitution von bisherigem Material mit dem jeweiligen CO<sub>2</sub>-footprint.

*Fazit:* Die Berechnungen einer erweiterten Systemgrenze sind nicht trivial und hängen u.a. davon ab, in welchem Detailgrad der CO<sub>2</sub>-footprint von Vorketten- und Verarbeitungsschritten bis hin zum Einbau bekannt sind und für welche Zeiträume die Substitution gesichert gerechnet werden kann. Die komplette Bilanzierung hat aber das Potenzial, die Klimaschutzleistung der Maßnahmen im Moorschutz auf gesamtgesellschaftlicher Ebene noch deutlich zu erhöhen. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.

*Wie kann die Planung und Umsetzung von Klima- und Moorbodenschutz durch die KliMoBay-Ergebnisse beschleunigt werden?*

Die KliMoBay-Ergebnisse beschleunigen die Umsetzung von Klima- und Moorbodenschutz durch objektive Daten und Informationen auf drei Ebenen:

- 1) Fakten zum Status quo und zur Dringlichkeit des Handelns. Klimaschutz durch Moorbodenschutz ist ein vergleichsweise junges Thema, das weder in der Bevölkerung noch bei den handelnden Akteuren der Eigentümer, Bewirtschafter, Naturschützer und der

Wasserwirtschaft bisher ausreichend wahrgenommen wird. Die KliMoBay-Ergebnisse liefern konkrete Daten und Fakten zu Treibhausgasemissionen, Grundwasserflurabständen, Torfsackungsraten und der Endlichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung, die die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs deutlich aufzeigen.

- 2) Lösungsoptionen: Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse Landnutzungsszenarien auf, die Klima- und Moorschutz mit einer langfristigen Nutzung verbinden können und wo die Klimaschutzeffekte besonders groß sind. Sie berücksichtigen auch die sozioökonomischen Restriktionen und naturschutzfachlichen Grenzen.
- 3) Günstige Handlungsräume aus rechtlicher und sozioökonomischer Sicht: Die Moorflächen wurden in hydrologisch adressierbare Bereiche unterteilt. Damit sind direkt konkrete einzeln beplanbare Räume für alle Interessierten erkennbar. Für diese Räume wurden vielfältige Indikatoren ermittelt, die günstig oder hemmend auf Abstimmungsprozesse für die notwendige Wasserstandsanhhebung wirken. Beispielhaft wurde die Anwendung an einem Szenario der sozioökonomischen Restriktionen gezeigt. Noch wichtiger ist aber, diese Analysen konkret mit Stakeholdern in den Regionen und hydrologisch adressierbaren Bereichen vor Ort durchzuführen. Für diese Prozesse stehen nun wichtige objektive Daten zur Verfügung.

*Wie werden die Ergebnisse aus dem KliMoBay-Vorhaben für die Planung und Umsetzung von bayernweiten Maßnahmen verfügbar gemacht?*

Auslöser für das KliMoBay-Vorhaben war die Etablierung einer fachlichen Grundlage für die Umsetzung des Masterplans Moore. Seit der Ankündigung des Masterplans sind weitere Entwicklungen in Bayern eingeleitet worden, wie z.B. die spezifischen Aktivitäten und in Aussicht gestellten Extra-Gelder für das Bayerische Donaumoos mit Etablierung eines behördenübergreifenden Umsetzungsteams. Die Projektergebnisse können hier die zielgerichteten Aktivitäten wesentlich unterstützen.

*Fazit:* Als wissenschaftliche Institutionen sind wir dem DFG-Kodex des offenen Datenzugangs verpflichtet und empfehlen daher, dass die Daten über (fach-)öffentlich zugängliche Plattformen, wie FIN-VIEW und FIN-WEB, unter Wahrung von Autorenrechten zugänglich gemacht werden.

### **Ausblick Vertiefung-Fortsetzung**

*Wie kann die physikalisch basierte Modellierung mit MIKE SHE weiter genutzt werden?*

Wiedervernässungsszenarien für das Hochmoor Weidfilz zeigen die Stärke der prozessbasierten Modellierung inkl. Betrachtung von Planzuständen oder Zukunftsszenarien. Die in der Software MIKE SHE aufgebauten Prozessmodelle für die Testgebiete können zukünftig für Szenarienuntersuchungen und Wassermanagement genutzt werden.

Eine physikalisch basierte Modellierung sollte für alle wichtigen Mooregebiete Bayerns angestoßen werden. Sie ist Voraussetzung dafür, Nutzungsszenarien zu vergleichen, ein echtes Wassermanagement mit Regelungen aufzubauen und die Betroffenheit von Anrainern abzuschätzen.

*Welche fachlichen Herausforderungen für die Umsetzung von Maßnahmen für einzelne Mooregebiete wurden identifiziert?*

- 1) Unzureichende hydrogeologische Daten: Der Wasserhaushalt einzelner Niedermoorgebiete muss deren Grundwassereinzugsgebiete mitberücksichtigen. Deren Ausdehnung geht im Allgemeinen über die oberirdischen Einzugsgebiete hinaus. Oftmals sind sie an überregionale Grundwassersysteme angebunden. Die verfügbaren Informationen zur Hydrogeologie sind, bayernweit gesehen, lückenhaft.  
→ Verlässliche Aussagen dazu waren im Rahmen von KliMoBay nicht möglich. Sie sind tiefergehenden Untersuchungen im Rahmen der Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen vorbehalten. Einen Mehrwert für die Abschätzung der standortbezogenen Wasserverfügbarkeit gegenüber der klimatischen Wasserbilanz kann eine standardisierte, flächendeckende Ermittlung der aktuellen Verdunstung für unterschiedliche Landnutzungen und unterschiedliche Annahmen zum Bodenfeuchtestatus (grundwassernahe, mittlere oder grundwasserferne Wasserstände) liefern. Diese kann mit für Moorstandorte geeigneten konzeptionellen Wasserhaushaltsmodellen flächendeckend ermittelt und dann für weitergehende Untersuchungen zu einzelnen Moorstandorten zentral bereitgestellt werden.
- 2) Unzureichende Bodeninformationen: Es fehlen flächendeckende Daten zur Moormächtigkeit in tiefgründigen Mooren > 40 cm Torfmächtigkeit. Genauso fehlen flächendeckende Daten zum Unterliegenden, insbesondere zur Verbreitung und Wirkung von Stauhorizonten. Diese Informationen sind Grundvoraussetzung für jedes Wassermanagement. Derartige Daten sind nur in aufwändigen Kartierungen zu erheben. Für viele Moore Bayerns liegen aber wertvolle Bodeninformationen analog im Moorarchiv der LfL vor, die im Rahmen des Projektes lediglich für die Testgebiete gesichtet und digitalisiert werden konnten. Um den Kartieraufwand vor Projekten zu reduzieren, sollten diese umfangreichen historischen Daten digital zugänglich gemacht werden. Noch besser wäre die komplette Vektorisierung, damit die Informationen direkt im GIS und in hydrologischen Modellen genutzt werden können.

*THG-Bilanzen - müssen wir immer noch Spurengase messen?*

Dank des langjährigen Forschungsschwerpunkts des PSC (bzw. seiner Vorläufer) besteht ein bundesweit einzigartiger Datensatz an 180 THG-Jahresbilanzen inkl. der zugehörigen Steuerfaktoren. Diese spezifische Datenbasis für Bayern (und angrenzende Gebiete) war Voraussetzung, um im KliMoBay-Vorhaben landnutzungsspezifische Abhängigkeitskurven entwickeln und für die Emissionsmodellierung einsetzen zu können. Dennoch ist die Abdeckung von verschiedenen Landnutzungssystemen noch nicht ausgewogen und insbesondere folgende Typen und Zustände sind noch unterrepräsentiert:

- Wald (bisher nur ein Standort entwässert und einer naturnah im Hochmoor; Niedermoor-Wald komplett fehlend)
- Acker (aufgrund der hohen Einflüsse der Nutzung noch nicht gut parametrisierbar)
- Grünland (aufgrund der großen Streuung)
- Paludikulturen (erste bundesweite Bilanzen für Anbaupaludikulturen auf Niedermoor aus dem MOORuse-Projekt)



- Dynamische Entwicklungen nach Maßnahmen (nach Wiedervernässung; bei Unterflurbewässerung; nach Düngung; bei Managementänderung etc.; hier Einsatz von Automatikhauben sinnvoll)
- Absicherung von Langfristmonitoring auf ausgewählten Anker-Flächen (s. ICOS-Standorte und deren notwendige Erweiterung)
- Erfassung der Effekte zukünftigen Klimawandels auf Mooremissionen (Weiterführung des MOORadapt Projektes im Hochmoor)

*Fazit:* Es ist dringend erforderlich die Datenbasis weiter auszubauen und zu homogenisieren, um die Erfolgskontrolle (s.o.) abzusichern und die Skalierungsmodellierung zu verbessern. Dazu gehört auch eine Erweiterung der Aufnahme von Bodenparametern.

*Wie kann die fernerkundungsbasierte Sackungsmessung für Bayern implementiert werden?*

Die Methodentests für die fernerkundungsbasierte Sackungsmessung durch die LMU haben sehr vielversprechende hochaufgelöste Ergebnisse gebracht, deren Oberflächen-Oszillation insbesondere in den naturnahen Testgebieten ein klares Klimasignal des jeweiligen Messjahres nachweisen ließ (siehe „Mooratmung“). In den überwiegend landgenutzten Flächen mit ihrer hohen Dynamik der Oberfläche aufgrund von Managementeinflüssen, fehlte aber bisher eine als „Ground Truthing“ nutzbare unabhängige Erfassung der Bodenbewegungen bzw. der Sackung. Diese Limitierung kann aber in Zukunft mittels des bundesweiten MoMoK-Projektes überwunden werden, das derzeit auch in Bayern hochgenaue Messstationen für Oberflächenbewegungen im Moor einbringt.

*Fazit:* In Kombination mit den bis 2025 eingerichteten MoMoK Bodenbewegungs-Stationen kann die fernerkundungsbasierte hochauflösende Sackungsmessung als flächendeckendes Evaluierungstool über die bayerischen Moore eingesetzt werden.

*Wie sicher sind die Schnitthäufigkeiten als Proxy für Landnutzungsintensität im Grünland detektierbar?*

Im KliMoBay-Vorhaben wurden die bisher robustesten Karten der Schnitthäufigkeiten und Schnittzeitpunkte erzeugt, da weit über das übliche Maß hinaus verschiedene Sensoren und zeitlich hoch aufgelöste Szenen verwendet wurden. Trotzdem zeigen sich nach wie vor Grenzen in den extensiver genutzten Bereichen, da sich Signale der Phänologie und der Nutzung überlagern. Die mögliche Weidenutzung von Grünland ist bisher ebenfalls nicht berücksichtigt. Insgesamt ist der Stand der Entwicklung sehr vielversprechend. Voraussetzung für die Verbesserung ist aber eine umfangreiche parallele Erhebung der tatsächlichen Schnitte in situ zur Kalibration und Validierung der Produkte. Schnittzeitpunkte sind als Teil der AUM auch Bestandteil der landwirtschaftlichen Förderkontrollen. Hier wäre ein Fachaustausch und Bündeln der Anstrengungen empfehlenswert.

*Wie werden flächenscharfe Maßnahmenkarten für Wiedervernässung und Renaturierung erreicht?*

Die bisherigen Moorschutzprojekte sollen am LfU gesammelt werden. Dabei fehlt vielen Projekten aber eine konkrete Dokumentation der hydrologischen Wirkung - hinsichtlich Flächenwasserständen und Wirkraum. Das Sammeln von Projekten ist also ein erster Schritt,

aber nicht hinreichend zur Abschätzung der Maßnahmenwirkung für den Klima- und Moorschutz.

Ein Defizit in der Bemessung der Einflüsse von Wiedervernässung und Renaturierung auf die Klimaschutzleistung ist die flächenhafte Abgrenzung des Wirkraumes. Dies ist nicht trivial. Bisher setzt die Bilanzierung der Einsparungsleistungen im MOORclimb II Projekt auf die Umsetzungs-Planungen und deren Effekte auf die Vegetationsentwicklung. Eine flächendeckende Erfassung der Effekte nach Renaturierung fehlt aber bisher, u.a., weil die Instrumentierung mit Pegeln vor und nach Maßnahmen bisher nicht zum Standard der umsetzungsorientierten KLIP-Maßnahmen (Klimaschutzprogramm Bayern) gehört. Im Rahmen des KliWaMo Projektes (Waldmoorrenaturierung auf Hochmoorstandorten im Staatsforst - Bewertung der Klimaschutzwirkung, StMELF) wurden für Renaturierungsmaßnahmen im Wald verschiedene Methoden der Wirkraumabgrenzung erprobt. Derzeit ist ein Projekt in Vorbereitung, das unter Einsatz von Fernerkundungsmethoden erproben soll, wie Flächenwasserstände abgrenzbar werden.

*Fazit:* Eine Verbesserung der flächenhaften Detektion der Wirkräume von Wiedervernässungs- und Renaturierungsmaßnahmen ist dringend erforderlich, insbesondere vor dem Hintergrund in Zukunft zu erwartender deutlich beschleunigter Umsetzungsmaßnahmen.

*Wie können die Emissionen und die Klimaschutzleistung in Zukunft verbessert modelliert werden?*

Das KliMoBay-Vorhaben hat aufgrund der (1) landnutzungsspezifischen Regressionen und der (2) flächenhaften Wasserstandskarte einen Qualitätssprung hinsichtlich der statistischen Modellierung der THG-Emissionen für Bayern erbracht. Verbesserungen sind aber in den Unsicherheiten der Aktivitätsdaten für die naturnahen Moore (Wasserstandskarte) erforderlich. Ebenso ist, wie oben erwähnt, eine bessere Abdeckung bei verschiedenen, hinsichtlich der THG-Emissionen lückig bemessenen, Landnutzungssystemen notwendig, allen voran dem Wald. Zudem sind aber weitere Steuerfaktoren in der Fläche nicht vorhanden, wie Bodenparameter (z.B. Lagerungsdichte oder Nährstoffversorgung), die die Variabilität in den Grünlanddaten erklären könnten. Hier ist eine Weiterentwicklung der statistischen Modellierung vorgesehen.

*Fazit:* Eine stetige Weiterentwicklung der statistischen Modellierung ist erforderlich um die Güte der Emissionsberechnungen weiter zu verbessern. Die Modellierung sollte aufgrund des wissenschaftlichen Anspruchs weiterhin an einer Forschungsinstitution, wie dem PSC, angesiedelt bleiben, um damit ggf. auch prozessbasierte Ansätze (in Kooperationen) einbeziehen zu können und die Klimaschutzleistung durch Moorwiedervernässung unabhängig zu evaluieren. Reine proxy-basierte Methoden scheiden für eine solide Evaluierung aufgrund ihrer großen Unsicherheiten, insbesondere auf nicht naturnahen Standorten, aus.

# 11 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Folgende Beiträge, Veranstaltungen und Materialien wurden im Rahmen des KliMoBay-Vorhabens erstellt:

## 2019:

Auf folgender Fachtagung wurde das KliMoBay-Projekt vorgestellt und diskutiert:

- KliMoBay: Potentials of climate protection and adaptation in peatlands in Bavaria. Clarisse Brehier & Heta Meyer, GfÖ (Gesellschaft für Ökologie e.V.) - Tagung, 09.-13. September 2019, Münster

## 2020:

- 30.06.2020 ein Informationstermin im Messgebiet Benediktbeuern für Landwirte, Mitarbeiter des Zentrums für Umwelt und Kultur (ZUK) in Benediktbeuern, sowie Pressevertreter des ZUKs, des Gelben Blatts und des Tölzer Tagblatts.
- 03.07.2020 interner Information- und Präsentationstermin am Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV)
- Informationstafeln für die Messstandorte Karolinenfeld und Benediktbeuern zu den dort laufenden Messungen und das Gesamtvorhaben wurden erstellt.

Auf folgenden Fachtagungen und wissenschaftlichen Treffen/Workshops wurden Ergebnisse aus dem KliMoBay-Projekt vorgestellt und diskutiert:

- Monitoring the drought resilience of near-natural peatlands by means of SAR remote sensing, Verena Huber García et al., Session BG3.5 – Peatland under Pressure - EGU20-35203, 4.-8. Mai 2020

## 2021:

- Eigener Webauftritt des KliMoBay-Vorhabens [www.klimobay.de](http://www.klimobay.de) präsent.
- Beitrag zum KliMoBay-Projekt und der Arbeit von Clarisse Brehier (HSWT) auf der Seite <https://www.research-in-bavaria.de/de/climate-research/moorelands>
- Im Juni 2021 ist ein Podcast von Herrn Prof. Dr. Drösler zu Mooren und insbesondere zu den EFRE-geförderten Moorprojekten KliMoBay und MOORuse erschienen: <https://www.podcastfabrik.de/podcasts/dart-date/>
- In Heft 2/2021 der Fachzeitschrift *Hydrologie und Wasserwirtschaft* (HyWa) erschien ein Kurzbericht zum Projekt KliMoBay. Neben einer Kurzpräsentation des Projekts wurde auch Bezug zu dem Stakeholder-Workshop zum damaligen Entwurfsstand der Bundesmoorschutzstrategie am 15. Dezember 2020 genommen, an dem Dr. Alexander Gerner als Vertreter des KliMoBay-Vorhabens teilnahm.
- 25.10.2021 Besuch einer Schülergruppe aus Baden-Württemberg auf dem Versuchstandort Benediktbeuern. Von Mitarbeitern der HSWT wurde dabei Allgemeines über die Bedeutung von Mooren erläutert sowie die CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O-Messung vorgeführt und ein Torfprofil genommen.

Auf folgenden Fachtagungen und wissenschaftlichen Treffen/Workshops wurden Ergebnisse aus dem KliMoBay-Projekt vorgestellt und diskutiert:

- Peat soil in Bavaria - implications for agricultural and climate-change strategies from a century of archived peat soil data. Anna Kühnel et al., RRR21, 9.-11. März 2021
- Effects of different land management strategies on greenhouse gas emissions from pre-alpine fens under grassland use. Clarisse Brehier et al., Session BG3.8 – Peatland management and restoration-EGU21-10162, 19.-30. April 2021
- InSAR time series over rewetted bogs highlight spatially heterogeneous surface deformation. Verena Huber García et al., Session HS10.8 – Peatland hydrology - EGU21-9038, 19.-30. April 2021
- The spatially heterogeneity of surface deformation in rewetted bogs visible from InSAR time series. Verena Huber García et al., Mer Bleue Workshop, 19.-21. Mai 2021
- KliMoBay- Potentials of climate protection and adaption in Bavarian peatlands- An interdisciplinary look at Bavaria's peatlands. Clarisse Brehier et al., Eurosoil 2021, Genf
- Messung und Modellierung von Moorwasserständen zur Berechnung von Treibhausgasemissionen in drei bayerischen Moorstandorten, Sebastian Friedrich et al., Tag der Hydrologie, 31. August 2021, Potsdam
- Moorwaldmessungen in Süddeutschland. Janina Klatt et.al., ICOS-D Jahrestagung, 13.-15. September 2021, Tharandt

## 2022:

- Am 21.07.2022 fand an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf der Wissensdialog-Workshop statt. Insgesamt haben 41 Teilnehmer von 19 unterschiedlichen Institutionen teilgenommen. Für den Workshop wurde ein Projektflyer erstellt (Anhang 13.16)
- Das KliMoBay-Vorhaben wurde in der EFRE-Bürgerinfo 2022/2023 vorgestellt [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/publikationen/pdf/2022-06-23\\_EFRE\\_Buergerinfo\\_2022\\_nach\\_BGA\\_BF.pdf](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/publikationen/pdf/2022-06-23_EFRE_Buergerinfo_2022_nach_BGA_BF.pdf)
- Am 10. November 2022 wurden im Rahmen eines Vortrags am ZUK Benediktbeuern „Erste Ergebnisse aus dem KliMoBay-Projekt für die Moore des Klosterlands Benediktbeuern“ durch Martina Schlaipfer (HSWT) präsentiert.
- Am 13. November 2022 ist im Regionalteil Bad Tölz-Wolfratshausen der SZ ein Artikel zum Vortrag am ZUK erschienen: <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/wolfratshausen/klimaschutz-moore-benediktbeuern-klosterland-tu-muenchen-lmu-muenchen-hochschule-weihenstephan-triesdorf-landesanstalt-fuer-landwirtschaft-forschung-klimobay-zuk-1.5694995>

Auf folgenden Fachtagungen und wissenschaftlichen Treffen/Workshops wurden Ergebnisse aus dem KliMoBay-Projekt vorgestellt und diskutiert:

- KliMoBay-Klimaschutz- und Anpassungspotenziale in Mooren Bayerns - das Verbundvorhaben, Matthias Drösler et al., Tag der Hydrologie 2022, 22.-23. März 2022, München
- Greenhouse Gas Budgets of Bavarian Peatlands. Martina Schlaipfer et al., EGU22-3587- Peatland management and restoration, 23.-27. Mai 2022, Wien
- Vorträge und Poster zu allen Projekten auf dem Symposium Moorschutz: Forschung und Praxis verbinden (ANL), 19.-20. September 2022, Rosenheim

## 12 LITERATUR

- Alaska Satellite Facility (2022). ASF SAR Data Search Manual, SBAS. <https://docs.asf.alaska.edu/vertex/sbas/>
- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Hrsg.). Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Ansari, H., Zan, F. D., & Bamler, R. (2018). Efficient Phase Estimation for Interferogram Stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7), 4109–4125. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2826045>
- Bartels, H. (2004). Projekt RADOLAN. Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Deutscher Wetterdienst, Hydrometeorologie.
- Bayerische Staatsregierung (2022). „Klimaland Bayern – Bayerisches Landesportal.“ Zugriff am 04. November 2022. <https://www.bayern.de/klimaland-bayern/>.
- Bayerische Vermessungsverwaltung (2022): SAPOS Bayern. Online verfügbar unter [https://sapos.bayern.de/coord\\_tm.php](https://sapos.bayern.de/coord_tm.php), zuletzt aktualisiert am 21.11.2022, zuletzt geprüft am 21.11.2022.
- Bechtold, M., Tiemeyer, B., Laggner, A., Leppelt, T., Frahm, E., & Belting, S. (2014). Large-scale regionalization of water table depth in peatlands optimized for greenhouse gas emission upscaling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3319–3339. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3319-2014>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792>
- Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Eckelmann, W., Sponagel, H., Grotenthaler, W., Hartmann, K.-J., Hartwich, R., Janetzko, P., Joisten, H., Kühn, D., Sabel, K.-J., Traidl, R., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, ISBN 978-3-510-95920-4
- De Vroey, M., Radoux, J., Defourny, P. „Grassland Mowing Detection Using Sentinel-1 Time Series: Potential and Limitations“, *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 3 (2021).
- De Zan, F., Saporta, P., & Gomba, G. (2022). Spatiotemporal Analysis of C-band interferometric Phase Anomalies over Sicily. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR*.
- DHI (2021). MIKE SHE User Guide and Reference Manual. Danish Hydraulic Institute.
- Dickopf, B. (1995): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. Hydrogeologische Grundlagenkarte 1:50 000. Munich, Bayerischen Geologischen Landesamt, 1995. Bd. L 8134 Wolfratshausen.
- Drösler M. (2005). Trace Gas Exchange of Bog Ecosystems, Southern Germany, Dissertation, Technische Universität München
- Drösler, M., Adelmann, W., Augustin, J., Bergmann, L., Beyer, C., Chojnicki, B., Förster, C., Freibauer, A., Giebels, M., Görlitz, S., Höper, H., Kandelhardt, 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 in der Praxis-Schlussbericht des Vorhabens „Klimaschutz-Moornutzungsstrategien“ 2006-2010 (S. 201).

- Drösler, M., & Kraut, M. (2020). Mooremissionskarte Bayern [Karte].
- DWD Climate Data Center (CDC) (2022a). Monatliche Raster der Summe der potentiellen Evapotranspiration über Gras, Version 0.x.
- DWD Climate Data Center (CDC) (2022b), Raster der Monatssumme der Niederschlagshöhe für Deutschland, Version v1.0.
- Eickenscheidt T., Freibauer A., Heinichen J., Augustin J., Drösler M. (2014a). Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions from high organic carbon grasslands. *Biogeosciences*, 11, 6187-6207, <https://doi.org/10.5194/bg-11-6187-2014>
- Eickenscheidt, T., Heinichen, J., Augustin, J., Freibauer, A., & Drösler, M. (2014b). Nitrogen mineralization and gaseous nitrogen losses from waterlogged and drained organic soils in a black alder (*Alnus glutinosa*; (L.) Gaertn.) forest. *Biogeosciences*, 11(11), 2961–2976. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2961-2014>
- Eickenscheidt, T., Heinichen, J., & Drösler, M. (2015). The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content. *Biogeosciences*, 12(17), 5161–5184. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5161-2015>
- Ellsäßer, F., Röhl, A., Stiegler, C., Hendrayanto, & Hölscher, D. (2020). Introducing QWaterModel, a QGIS plugin for predicting evapotranspiration from land surface temperatures. 130, 104739. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104739>
- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., & Trigo, I. F. (o. J.). Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. 12, 1471. <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
- ESA (o. J.). S1TBX - ESA Sentinel-1 Toolbox v. 8.0.3. <http://step.esa.int>
- Evans, C. D., Peacock, M., Baird, A. J., Artz, R. R. E., Burden, A., Callaghan, N., Chapman, P. J., Cooper, H. M., Coyle, M., Craig, E., Cumming, A., Dixon, S., Gauci, V., Grayson, R. P., Helfter, C., Heppell, C. M., Holden, J., Jones, D. L., Kaduk, J., ... Morrison, R. (2021). Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. 38, 2202–2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. 39, 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Förster C. (2016). Influence of Management and Restoration on CO<sub>2</sub> Balances of a Drained Bog, Dissertation, Technische Universität München
- Fuchs, D. et al. (2017). Biodiversität—Fauna. In B. Tiemeyer, M. Bechtold, S. Belting, A. Freibauer, C. Förster, E. Schubert, U. Dettmann, S. Frank, D. Fuchs, J. Gelbrecht, B. Jeuther, A. Laggner, E. Rosinski, K. Leiber-Sauheitl, J. Sachteleben, D. Zak, & M. Drösler, Moorschutz in Deutschland—Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen: Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren (Bd. 462). Deutschland: Bundesamt für Naturschutz. <https://doi:10.19217/skr462>
- Gillies, R. R., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1997). A verification of the „triangle“ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote

measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface e. 18, 3145–3166. <https://doi.org/10.1080/014311697217026>

- Gräler, B., Pebesma, E., & Heuvelink, G. (o. J.). Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal*, 8, 204. <https://doi.org/10.32614/rj-2016-014>
- Heim A.-M. (2023). Konflikte und Synergien von Rote Liste Arten auf Moorstandorten bei Landnutzungsänderung, Bachelorarbeit, Hochschule Weihenstephan Triesdorf, Freising
- Hiemstra, P. H., Pebesma, E. J., Twenhöfel, C. J. W., & Heuvelink, G. B. M. (2009). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. *Computers & Geosciences*, 35(8), 1711–1721. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.10.011>
- Hofer, B., et al. (2015). Königsdorfer Weidfilz Gutachten zum klimarelevanten Gasaustausch. Altenberge: Hofer & Pautz GbR
- Hommeltenberg, J., Schmid, H. P., Drösler, M., & Werle, P. (2014a). Can a bog drained for forestry be a stronger carbon sink than a natural bog forest? *Biogeosciences*, 11(13), 3477–3493. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3477-2014>
- Hommeltenberg J, Mauder M, Drösler D., Heidbach K., Werle P., Schmid H. P. (2014b) Ecosystem scale methane fluxes in a natural temperate bog-pine forest in southern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198, 273-284, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.017>.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. 514–517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hoyer, A. (2021): Bewertungsparameter zur Abschätzung des Restitutionspotenzials von Mooren – am Beispiel des Staatsguts Karolinenfeld. Masterarbeit. TUM Campus Straubing
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00096-2)
- IPCC (2013). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Hrsg.). Cambridge University Press.
- IPCC (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (Ed.). Published: IPCC, Switzerland.
- Jiang, L., & Islam, S. (1999). A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations. 26, 2773–2776. <https://doi.org/10.1029/1999gl006049>
- Jordan, F., Frankl, R., Schmeidl, H., & Zollner, A. (1999). Hydrologische Bodendauerbeobachtung. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (LBP).
- Kurz, M. (1998). Datenanalyse und -bewertung für ein Bayerisches Moorentwicklungskonzept - am Beispiel des Moorarchivs der Bayerischen Landesanstalt. Diplomarbeit. Freising - Weihenstephan: Lehrstuhl für Vegetationsökologie der Technischen Universität München.

- Lauber, T. (2021): Concept of Water Supply for rewetting te fen peatland around research site Karolinenfeld. Master Thesis. Department of Civil, Geo, and Environmental Engineering. Technical University of Munich.
- Leduc, M., Mailhot, A., Frigon, A., Martel, J.-L., Ludwig, R., Brietzke, G. B., Giguère, M., Brissette, F., Turcotte, R., Braun, M., & Scinocca, J. (2019). The ClimEx Project: A 50-Member Ensemble of Climate Change Projections at 12-km Resolution over Europe and Northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(4), 663–693. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-18-0021.1>
- Letts, M. G., Roulet, N. T., Comer, N. T., Skarupa, M. R., & Versegny, D. L. (2000): Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme. *Atmosphere-Ocean*, 38(1), 141–160. <https://doi.org/10.1080/07055900.2000.9649643>
- Lobert, F., Holtgrave, A.-K., Schwieder, M., Pause, M., Vogt, J., Gocht, A., & Erasmi, S. (2021). Mowing event detection in permanent grasslands: Systematic evaluation of input features from Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat 8 time series. 267, 112751. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112751>
- Luthardt, V., Schulz, C., und Meier-Uhlher, R. (2015). *Steckbriefe Moorsubstrate, 2. Auflage*. Unter Mitarbeit von FID GEO: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Hrsg.).
- Maghsoudi, Y., Hooper, A. J., Wright, T. J., Lazecky, M., & Ansari, H. (2022). Characterizing and correcting phase biases in short-term, multilooked interferograms. *Remote Sensing of Environment*, 275, 113022. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113022>
- Metzger C., Jansson P.-E., Lohila A., Aurela M., Eickenscheidt T., Beilelli-Marchesini L., Dinsmore K.J., Drewer J., van Huissteden J., Drösler M. CO<sub>2</sub> fluxes and ecosystem dynamics at five European treeless peatlands – merging data and process oriented modelling, *Biogeosciences*, 12 , 125-146, <https://doi.org/10.5194/bg-12-125-2015>
- Mpelasoka, F. S., & Chiew, F. H. S. (2009). Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), 1168–1183. <https://doi.org/10.1175/2009jhm1045.1>
- Müller, A. C., & Guido, S. (2017). Einführung in Machine Learning mit Python: Praxiswissen Data Science (K. Rother, Übers.; 1. Auflage). O'Reilly.
- Müller-Wilm, U. (2016). Sen2Cor 2.2.1—Software Release Note. ESA. [https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/\[L2A-SRN\]ESA-EOPG-CSCGS-TN-0014\[2.2.1\].pdf](https://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.2.1/[L2A-SRN]ESA-EOPG-CSCGS-TN-0014[2.2.1].pdf)
- Münch, A. (2017): Wasserhaushalts- und Niederschlags-Abfluss-Modell AKWA-M®. Version 4.8, Teil 2 Dokumentation. Edited by Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH. Dresden.
- Offermanns, L., Tiemeyer, B., Dettmann, U., Ruffer, J., Düvel, D., Vogel, I. & Brümmer, C. (2023). High greenhouse gas emissions after grassland renewal on bog peat soil. *Agricultural and Forest Meteorology* 331. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109309>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., & Cournapeau, D. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *MACHINE LEARNING IN PYTHON*, 6.



- Przeździecki, K., & Zawadzki, J. J. (2020). Triangle method modification with second degree polynomial edges fitting in LST NDVI scatterplot in lignite mine influence area. 20, 100404. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100404>
- Reinermann, S., Gessner, U., Asam, S., Ullmann, T., Schucknecht, A., & Kuenzer, C. (2022). Detection of Grassland Mowing Events for Germany by Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing*, 14(7), 1647. <https://doi.org/10.3390/rs14071647>
- Roßkopf, N., Edom, F., Zeitz, J. (2016). Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Sphagnum-Torfe. DOI: 10.23689/FIDGEO-2946.
- Rücker, A. (2016). Abschlussbericht zur Renaturierung des Schechenfilz-Südteils, Gmd. Iffeldorf, Stand 24.03.2016.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011a). GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography. <https://doi.org/10.2172/1090004>.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., & Wessel, P. (2011b). Open radar interferometry software for mapping surface Deformation. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(28), 234–234. <https://doi.org/10.1029/2011eo280002>.
- Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures.36, 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
- Ssymank, A., Ullrich, K., Vischer-Leopold, M., Belting, S., Bernotat, D., Bretschneider, A., Rückriem, C., & Schiefelbein, U. (2015). Handlungsleitfaden „Moorschutz und Natura 2000 für die Durchführung von Moorrevitalisierungsprojekten“. In M. Vischer-Leopold, G. Ellwanger, A. Ssymank, K. Ullrich, & C. Paulsch, *Natura 2000 und Management in Moorgebieten (Naturschutz und Biologische Vielfalt Bd. 140, S. 277–312)*. Landwirtschaftsverlag.
- Tamm, T., Zalite, K., Voormansik, K., & Talgre, L. (o. J.). Relating Sentinel-1 Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands. 8, 802. <https://doi.org/10.3390/rs8100802>.
- 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., Grünwald, T., Heinichen, J., Hoffmann, M., Hommeltenberg, J., Höper, H., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K., Leppelt, T., Metzger, C., Peichl-Brak, M., Röhling, S., Roskopf, N., Rötzer, T., Sommer, M., Wehrhan, M., Werle, P., and Zeitz, J. (2013). Klimarelevanz von Mooren und Anmooren in Deutschland: Ergebnisse aus dem Verbundprojekt "Organische Böden in der Emissionsberichterstattung", Thünen Working Paper, No. 15, [doi:10.3220/WP\\_15\\_2013](https://doi.org/10.3220/WP_15_2013).
- Tiemeyer B., Albiac Borraz E., Augustin J., Bechtold M., Beetz S., Beyer C., Drösler M., Eickenscheidt T., Ebli M., Fiedler S., Förster C., Freibauer A., Giebels M., Glatzel S., Heinichen J., Hoffmann M., Höper H., Jurasinski G., Leiber-Sauheitl K., Peichl-Brak M., Roßkopf N., Sommer M., Zeitz J. (2016). High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils, *Glob. Change Biol.*, 22, 4134-4149, <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>
- Tiemeyer, B., Bechtold, M., Belting, S., Freibauer, A., Förster, C., Schubert, E., Dettmann, U., Frank, S., Fuchs, D., Gelbrecht, J., Jeuther, B., Laggner, A., Rosinski, E., Leiber-Sauheitl, K., Sachteleben, J., Zak, D., Drösler, M. (2017). Moorschutz in Deutschland - Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der

Biodiversität und der Ökosystemleistungen: Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren. Deutschland: Bundesamt für Naturschutz, BfN Skripten 462, <https://doi:10.19217/skr462> .

- 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>
- Timmermans, W. J., Kustas, W. P., & Andreu, A. (2015). Utility of an Automated Thermal- Based Approach for Monitoring Evapotranspiration. 63, 1571–1608. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0016>.
- Veci, L. (2020). SNAP Command Line Tutorial. Graph Processing. ESA. [http://step.esa.int/docs/tutorials/SNAP\\_CommandLine\\_Tutorial.pdf](http://step.esa.int/docs/tutorials/SNAP_CommandLine_Tutorial.pdf).
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>.
- Voormansik, K., Zalite, K., Sünter, I., Tamm, T., Koppel, K., Verro, T., Brauns, A., Jakovels, D., & Praks, J. (o. J.). Separability of Mowing and Ploughing Events on Short Temporal Baseline Sentinel-1 Coherence Time Series. 12, 3784. <https://doi.org/10.3390/rs12223784>.
- von Trentini, F., Aalbers, E. E., Fischer, E. M., & Ludwig, R. (2020). Comparing interannual variability in three regional single-model initial-condition large ensembles (SMILEs) over Europe. *Earth System Dynamics*, 11(4), 1013–1031. <https://doi.org/10.5194/esd-11-1013-2020>.
- Vroey, M. D., Radoux, J., & Defourny, P. (2021). Grassland Mowing Detection Using Sentinel-1 Time Series: Potential and Limitations. *Remote Sensing*, 13(3), 348. <https://doi.org/10.3390/rs13030348>.
- Weinzierl, W., & Waldmann, F. (2015). Ermittlung langjähriger CO<sub>2</sub>-Emissionen und Beurteilung der Moore Oberschwabens auf Basis historischer und aktueller Höhennivellements (S. 112) [Forschungsbericht].
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., & Becker, E. W. und A. (2017). Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. In *Berichte des Deutschen Wetterdienstes (Bd. 251)*. Deutscher Wetterdienst..
- Yunjun, Z., Fattahi, H., & Amelung, F. (2019). Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. *Computers & Geosciences*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.10433>
- Zounemat-Kermani, M., Batelaan, O., Fadaee, M., & Hinkelmann, R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, 598, 126266. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266>.
- Zheng, Y., Fattahi, H., Agram, P., Simons, M., & Rosen, P. (2022). On Closure Phase and Systematic Bias in Multilooked SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–11. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2022.3167648>.

## 13 ANHANG

### 13.1 HSWT: Datenbasis Treibhausgasdaten

Folgende Treibhausgasmessungen sind im KliMoBay-Projekt verwendet worden

Messgebiet	Institut	Referenz
Benediktbeuern (BDB)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	Drösler et al. (2013), Tiemeyer et al. (2016), Tiemeyer et al. (2020), nicht publizierte Daten,
Donauermoos-West (DOW)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	Drösler et al. (2013), Tiemeyer et al. (2016), Tiemeyer et al. (2020)
Freisinger Moos (FSM)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	Drösler et al. (2013), Eickenscheidt et al. (2014a, 2014b, 2015), Metzger et al. (2015), Tiemeyer et al. (2016), Tiemeyer et al. (2020)
Karolinenfeld (KLF)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	nicht publizierte Daten
Kendlmühlfilze (KMF)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	Drösler (2005), Drösler et al. (2013), Tiemeyer et al. (2020)
Mooseurach (MSR)	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Hommeltenberg et al (2014a), Förster (2016), Drösler et al. (2013), Tiemeyer et al. (2016), nicht publizierte Daten
Schechenfilz (SFZ)	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT)	Hommeltenberg et al (2014a, 2014b), nicht publizierte Daten

## 13.2 TUM: Datenbasis Wasserstände

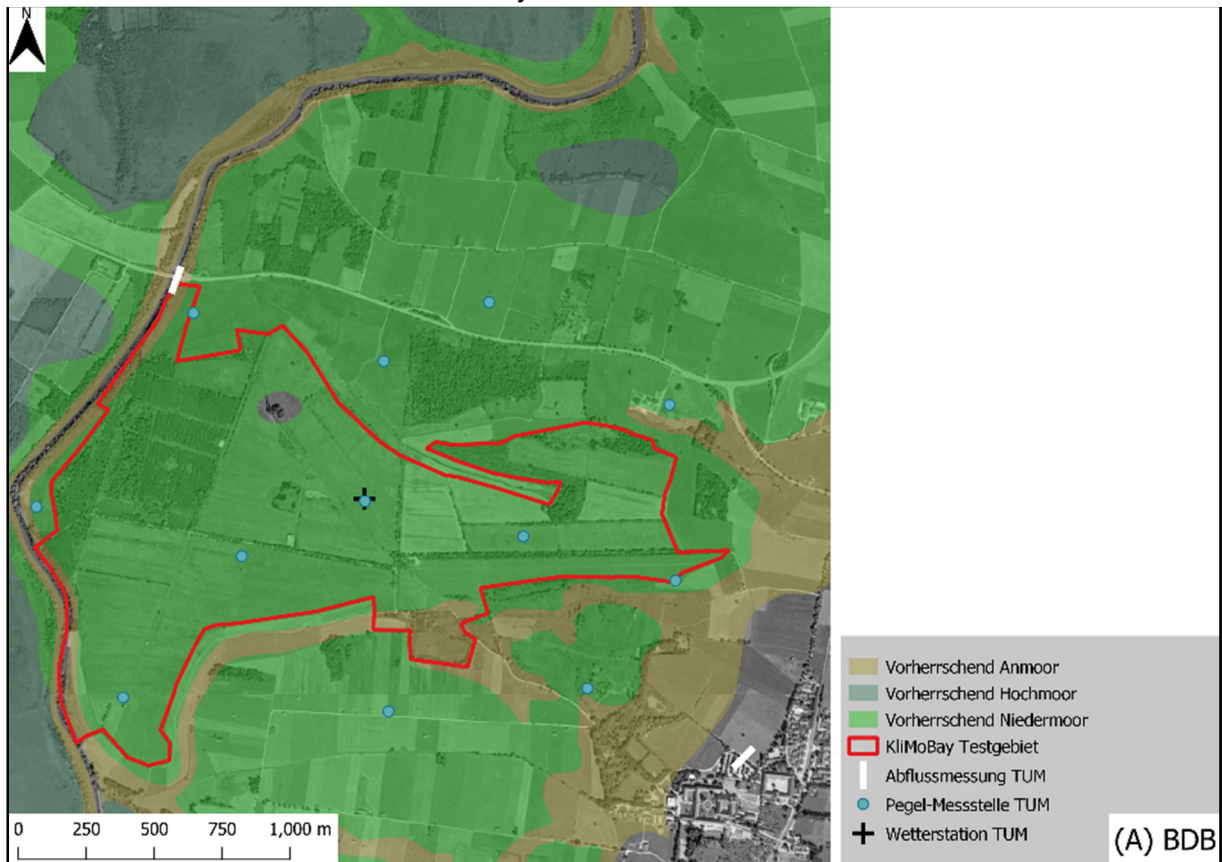
An folgenden Moorstandorten wurden Wasserstanddaten von Institutionen erhoben und im Rahmen des KliMoBay Projektes zur Verfügung gestellt.

<b>Übernahme gemessener Wasserstände</b>		
<b>HSWT</b>	<b>Thünen Institut</b>	<b>Landkreis Ostallgäu</b>
Auracher Moor *	Freisinger Moos	Lechbruck
Benediktbeuern *	Kendelmuehlfilze	Lemerdingen
Burghaglerried	Mooseurach	<b>Nationalpark Bayerischer Wald</b>
Burghamerfilz*	Schechenfilz	Dornerau
Dattenhauserried	<b>LfU</b>	Filzwald
Emmereisermoor*	Bernau, Dammlberger Filze	Finsterauer Filz
Freisinger Moos	<b>Reg. v. Oberbayern</b>	Grosser Filz bei Riedlhuetten
Karolinenfeld	Schlufelder Moos	Grosser Filz bei Spitzberg
Königsdorfer Weidfilz*	<b>Bayerische Staatsforsten</b>	Klosterfilz
Toedinger Moos*	Haeusellohe	Latschenfilz
<b>LfL</b>	<b>ARGE Donaumoos</b>	Todtenau
Karolinenfeld	Gundelfingermoos	Zwieselter Filz
	Leipheimermoos	<b>WWA Ingolstadt</b>
		Bayerisches Donaumoos
<b>Testgebiete TUM</b>		
Benediktbeuern		
Freisinger Moos		
Grosskarolinenfeld		
Königsdorfer Weidfilz		

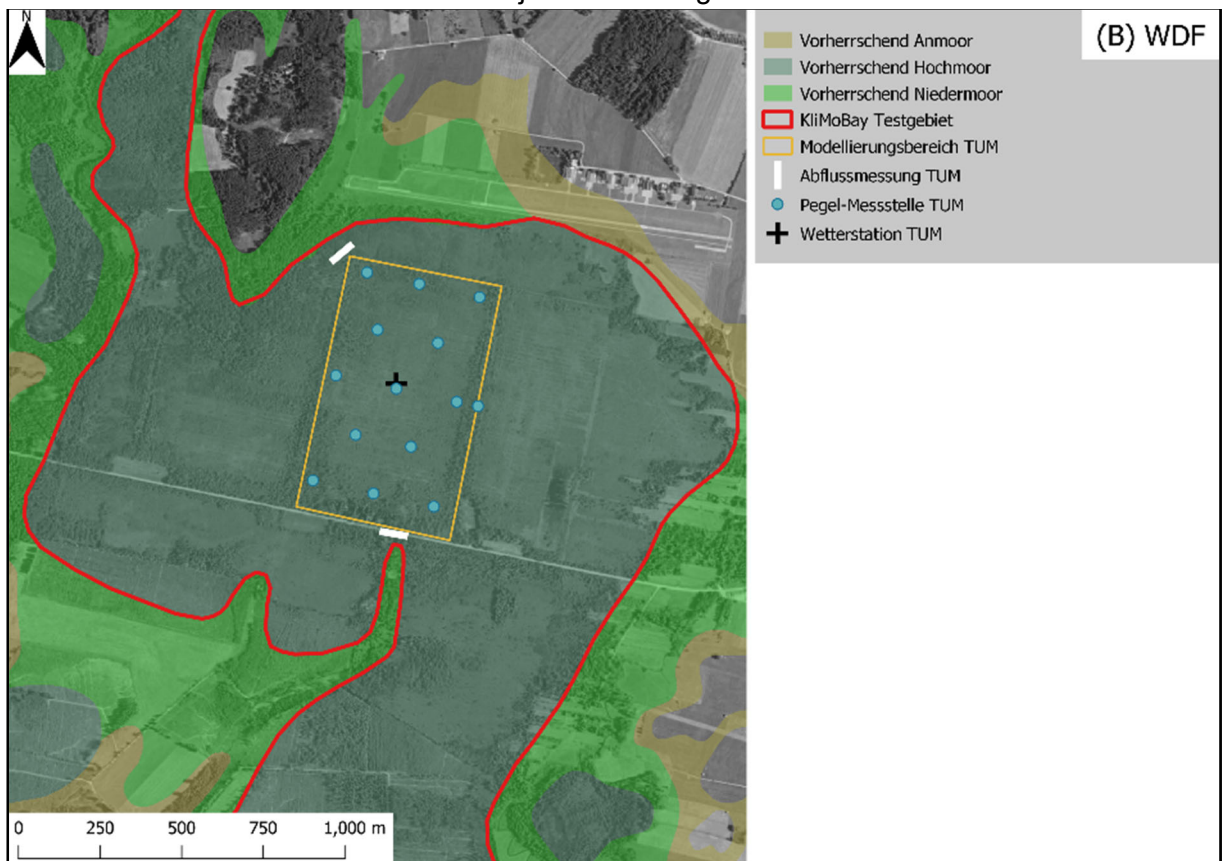
\*Messstellen der HSWT, die während des KliMoBay Projektes durch die TUM betreut und ausgelesen wurden.

### 13.3 TUM: Detailansicht der KliMoBay Testgebiete

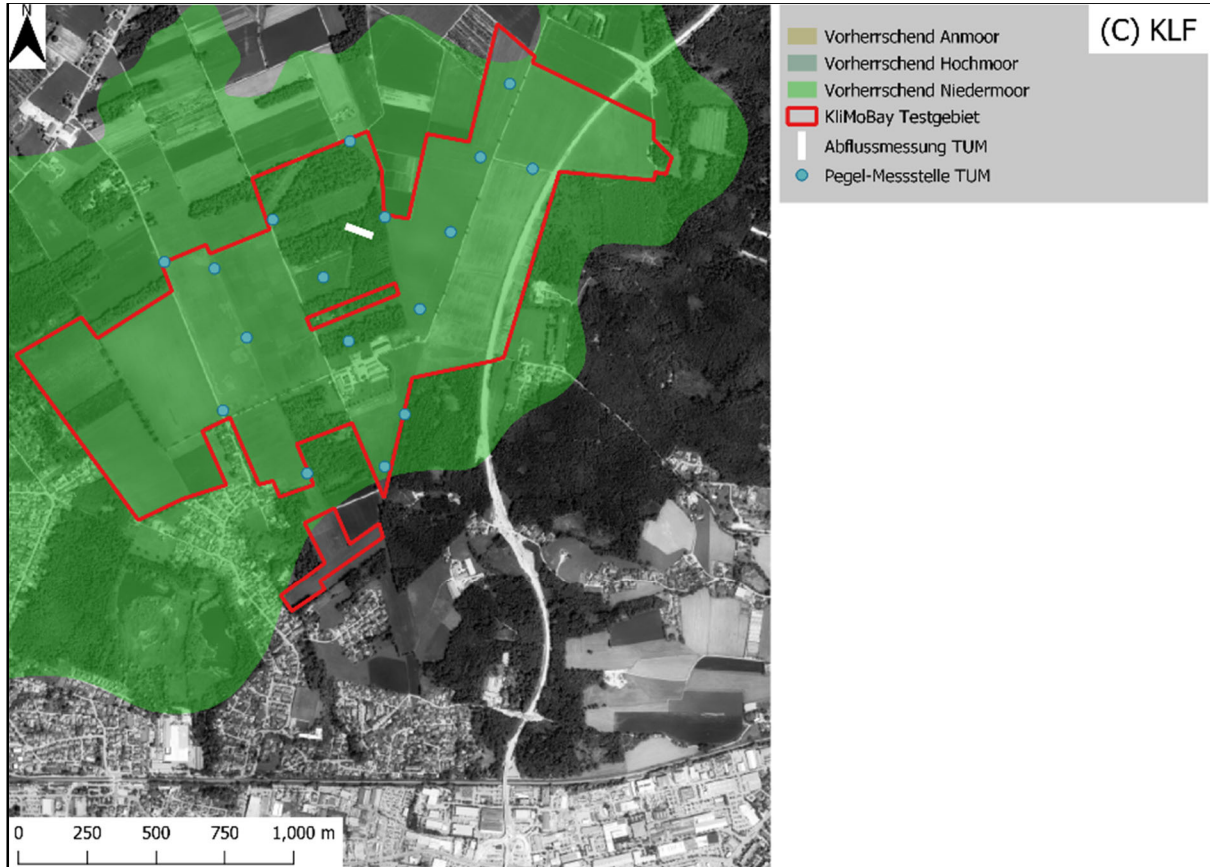
Detailansicht der Messtationen aus Projekt 2 in Benediktbeuern:



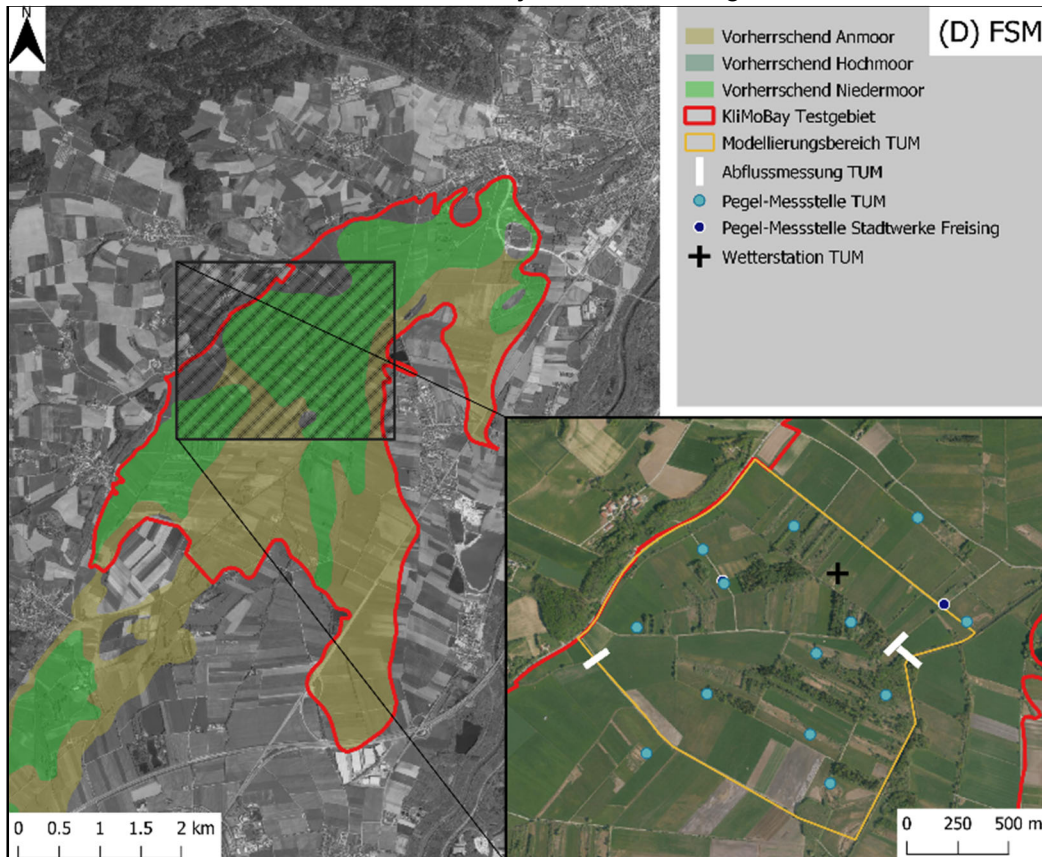
Detailansicht der Messtationen aus Projekt 2 im Königsdorfer Weidfilz:



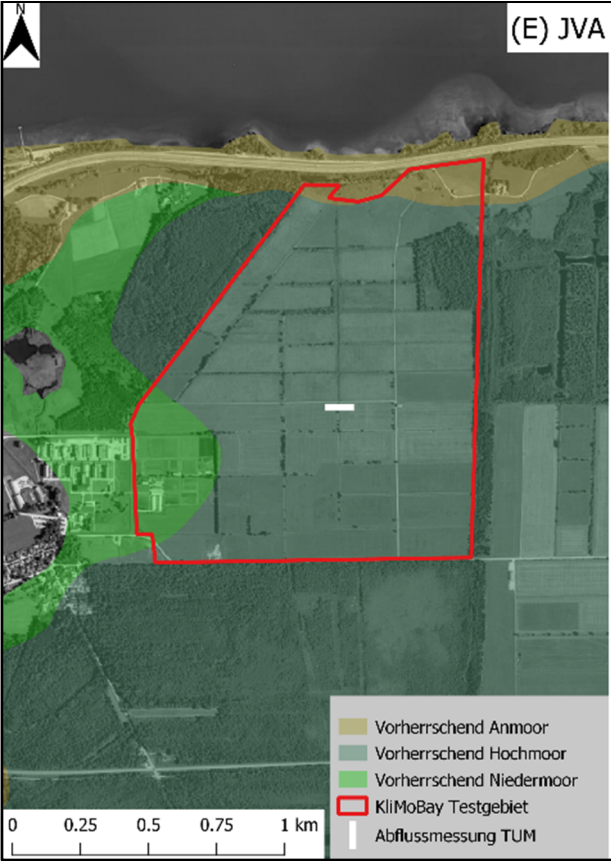
Detailansicht der Messtationen aus Projekt 2 in Karolinenfeld:



Detailansicht der Messtationen aus Projekt 2 im Freisinger Moos:



Detailansicht der Messtation aus Projekt 2 in der JVA Bernau:



### 13.4 TUM: Monitoring Übersicht über die in den Testgebieten erfassten Parameter

TUM Testgebiete	Messtation	Monitoring Messgrößen
<b>Benediktbeuern</b>	13 Moorpegel	Flurabstand Wassertemperatur
	2 Abflussmessungen	Grabenwasserstand
	Klimastation	Niederschlag Lufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit und Richtung Bodenwärmestrom net. Solarstrahlung Niederschlag
<b>Königsdorfer Weidfilz</b>	13 Moorpegel	Flurabstand Wassertemperatur
	1 Moorpegel	elekt. Leitfähigkeit
	2 Abflussmessungen	Grabenwasserstand elekt. Leitfähigkeit
	Klimastation	Niederschlag Lufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit und Richtung Bodenwärmestrom net. Solarstrahlung Niederschlag
<b>Karolinenfeld</b>		
	17 Moorpegel	Flurabstand
	Abflussmessung (Lfl)	Grabenwasserstand incl. Messwehr
<b>JVA</b>	Abflussmessung	Grabenwasserstand incl. Messwehr

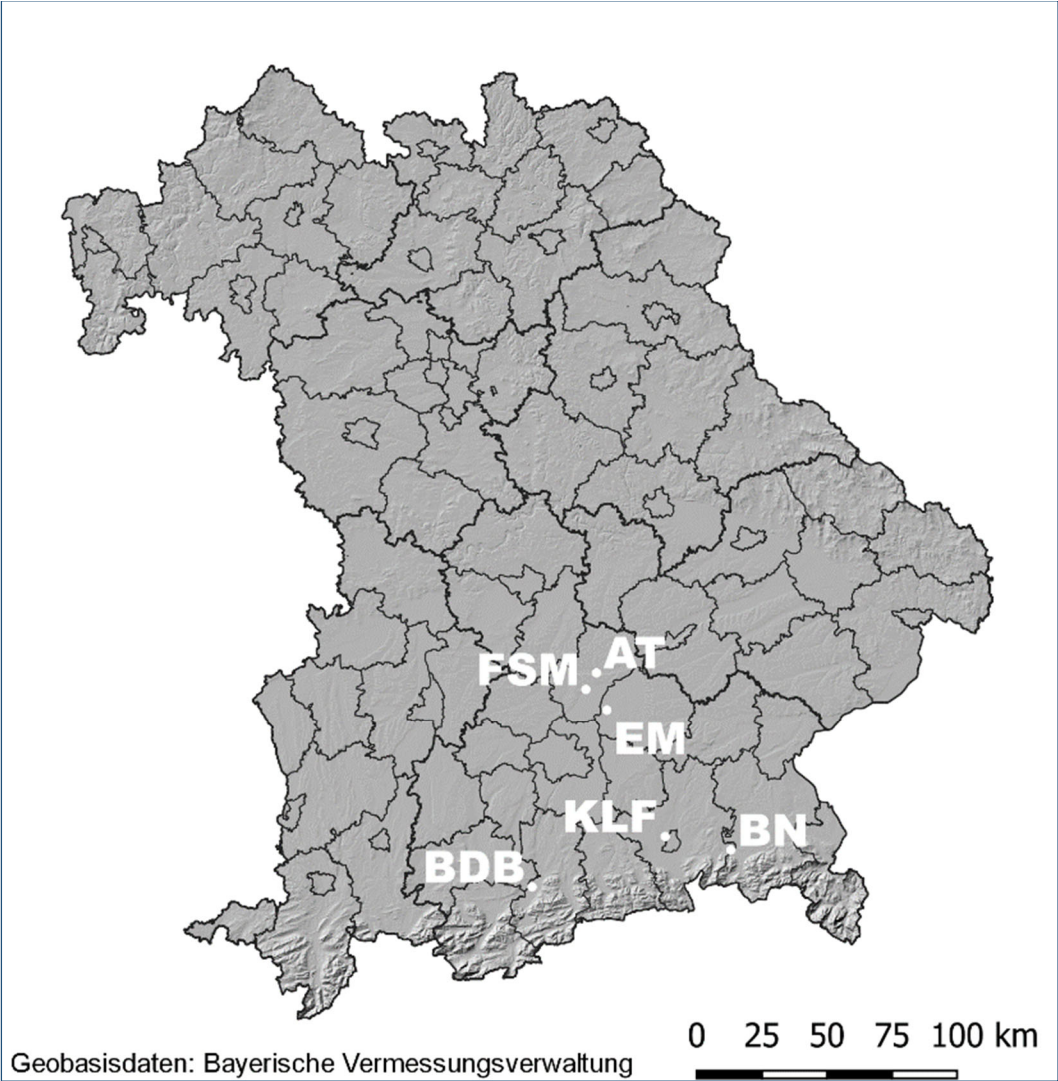


## 13.5 TUM: Datenbasis Mike

MIKE SHE Datenanforderungen	Beschreibung	Verarbeitete Rohdaten	Herkunft/Quelle
Oberflächeneinzugsgebiet	Shape File: abgeleitet in ArcGIS mittels „Hydrology Toolbox“	DGM 1	LfU
Topographie	Raster-Datensatz des DGM 1 von 2020: hydrologische Durchgängigkeit manuell in GIS hergestellt, Höhenkorrektur im Bereich der angegebenen Ungenauigkeit des DGM auf die 13 DGPS vermessenen GOKs am Pegel	DGM 1	LfU
		DGPS	TUM
<b>Klima :</b>			
Niederschlag	Niederschlag in mm/h	-	LfU, TUM, LMU (ClimEx)
ET0	Referenzverdunstung nach Penman Monteith in mm/h	-	DWD, TUM, LMU (ClimEx)
Temperatur	Temperatur in °C	-	LfU, TUM, LMU (ClimEx)
<b>Vegetation :</b>			
Vegetationsklassifizierung	BDB, FSM : In GIS abgeleitete Klassifizierung auf Rasterbasis in Landnutzungsklassen die in AKWA-M mit Vegetationseigenschaften hinterlegt sind.	Luftbilder, BDB: KULAP Merkblatt u. Karten, WDF: Vegetationskarte Weidfilz (Benesch 2019)	TUM
Vegetationseigenschaften	Jahresverlauf von Wurzeltiefe (RD) und Blattflächenindex (LAI) für Moorvegetationstypen	RD, LAI	AKWA-M Vegetationsdatenbank (Münch, 2017)
<b>Hydrodynamik :</b>			
MikeHydro (1D-hydraulisches Modell)	MikeHydro wurde für die Entwässerungsgräben u. Schlitzgräben mit MikeShe gekoppelt	DGM 1	LfU
Oberflächenabfluss	Manning (M) und Oberflächenspeicher wurden zur Kalibrierung verwendet	-	-
<b>Ungesättigte Zone :</b>			
Bodenverteilung	WDF : Interpolierte Übergangstiefe Hoch- zu Niedermoortorf wurde mit dem DGM verschnitten um eine Verteilungskarte der Torfarten zu erhalten.	DGM 1	LfU
		Bohrprofile	Ingenieurbüro Hofer (Hofer et al., 2015)
	BDB, FSM : Bodenverteilung wurde aus der ÜBK 25 übernommen	ÜBK 25	LfU
Bodeneigenschaften	Literaturwerte der Van Genuchten Parameter für Torf wurden als <b>Startwert</b> herangezogen und mittels der TDR Messungen und Kalibrierung angepasst	-	Letts et al., 2000
<b>Gesättigte Zone :</b>			
Geologische Einheiten (Bereiche gleicher Bodeneigenschaften)	Parameter für horizontale/ vertikale Leitfähigkeit und entwässerbares Porenvolumen wurden aus Literatur abgeschätzt und in der stationären und instationären Kalibrierung angepasst	WDF, BDB, FSM : Bohrprofile	LfU (Umweltatlas),
		WDF Bohrprofile	Ingenieurbüro Hofer (Hofer et al., 2015)
		BDB, FSM : Bohrprofile	LfL u. TUM vor Ortmessungen im KliMoBay Projekt

		Bodenparameter	Letts et al., 2000
Untere Grenzschichten	Interpolierte Höhenraster für Torf, Lehm, Kies	WDF Bohrprofile	Ingenieurbüro Hofer (Hofer et al.,2015)
		BDB Bohrprofile	LfL
		FSM Bohrprofile	LfL, TUM
Unterliegender Mineralische Grundwasserleiter	Abgeleitet aus Bohrprofilen in allen drei Testgebieten, sowie weiterführender Informationen aus Hydrogeologischen Karten und Projekten.	WDF : Bohrprofile, Hydrogeologische Grundlagenkarte	LfU (Umweltatlas), LfU (Dickopf, 1995)
		BDB : Bohrprofile	LfU (Umweltatlas)
		FSM : Bohrprofile, Profilschnitt	LfU (Umweltatlas), LfU-TUM GeoPot Projekt (Lehrstuhl für Hydrogeologie)
Unterflurdrainagen	BDB : Unterflurdrainagen wurden anhand des 1x1m DGM im GIS abgeschätzt und im Drainage Modul entsprechend aktiviert. Die Stärke der Drainwirkung wurde anhand der Flurabstandsmessungen kalibriert.	DGM1	LfU

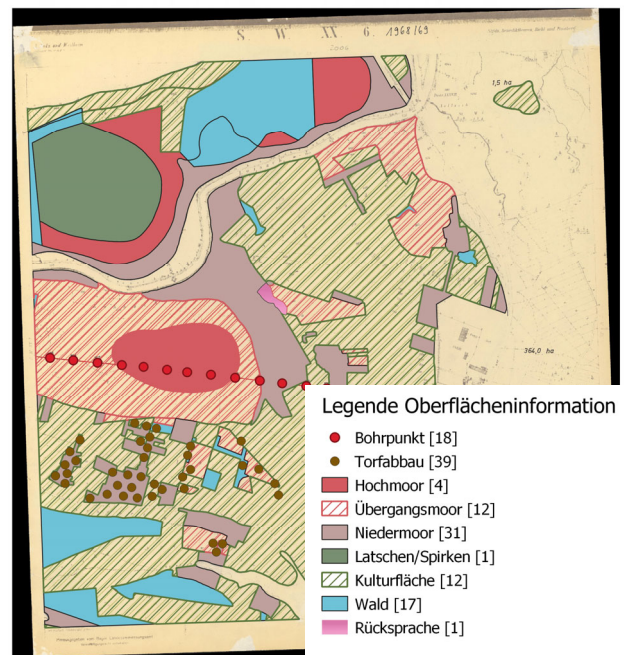
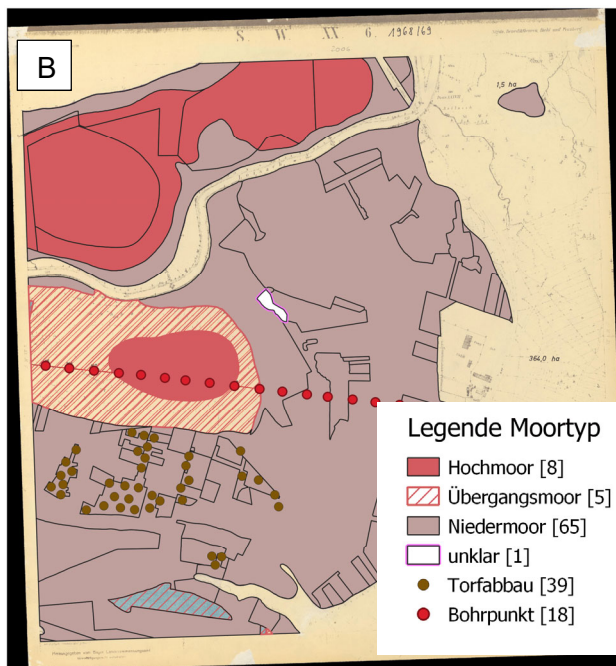
### 13.6 LfL: Übersichtskarte über die Projektgebiete



## 13.7 LfL: Überblick über die Dokumente des analogen LfL-Moorarchivs und dessen Digitalisierungsstand

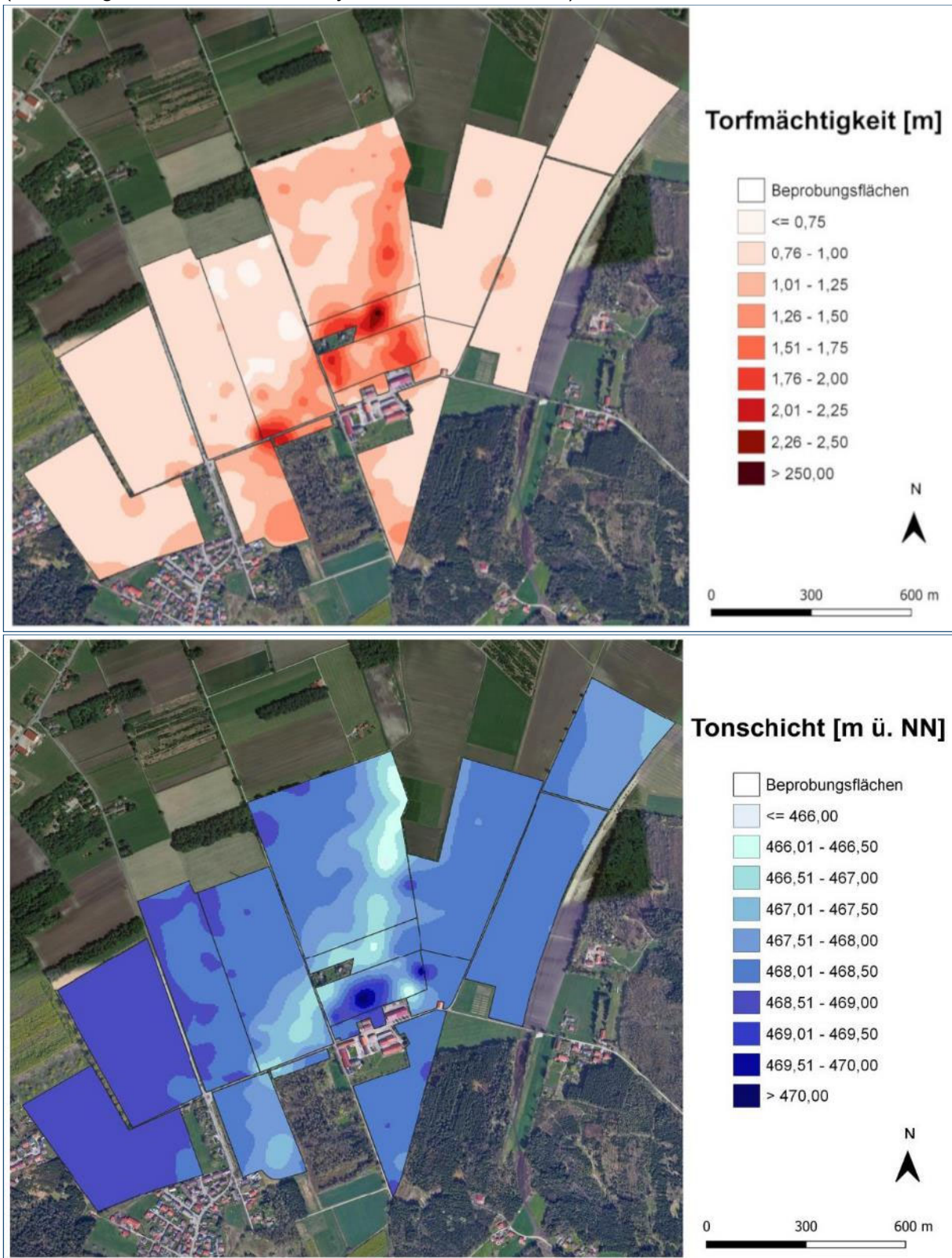
Dokument	Anzahl der Objekte	Zeitraum	Gesamt	Georeferenziert
Flurkarten	ca. 4200	1862-2007	Ja	Alle relevanten
Leinenkarten	ca. 1600	1900-2001	Nein	Nein
Moorübersichtskarten 1:100000		Königl. Bayr.	Nein	Nein
Mooratlas	1 Atlas ca. A0	ca. 1913	Nein	Nein
Handakte	642		145	Nein
Lagepläne aus Handakten			Siehe Handakten	Nein
Mutterpausen (Bodenprofil-Transekte)	ca. 1300		Nein	Nein
Feld-Bohrbücher	131		Ja/Fotografiert	Nein
Feld-Nivellementbücher	14			
Chemische/Physikalische Analysen	3 Bücher, 1562 Einträge	1900-2003	Ja/Fotografiert	Nein
Botanische Analysen	14 Bücher, ca. 1700 Einträge	1947-2007	Ja/Fotografiert	Nein
Karteikarten	ca. 2000		Ja/Fotografiert	Ja
Ordner	ca. 60		3	Nein
Historische Zeitschriften und Veröffentlichungen			Nein	
Historische Moorliteratur	ca. 400	1795-1986	Nein	Nein
Historische Bilder + Dias	ca. 1700+		Nein	Nein
Historische Luftbilder	ca. 500		Nein	Nein
Historische topographische Karten			Nein	Nein
Disketten/CDs/DVD/Festplatten				Nein

# 13.8 LfL: Überführung einer analogen Flurkarte (A) in die digitale Geodatenbank (Moortyp (B) und Oberflächeninformation (C))



### 13.9 LfL: Torfmächtigkeit in Meter, sowie die Lage der Tonschicht in m ü NN für das Staatsgut Karolinenfeld

(Abbildung übernommen aus Hoyer, 2021 Seite 44, 46.)



### 13.10LfL: Zusammenstellung der Ergebnisse der Nachbeprobung 2022 zu Torfmächtigkeit, Kohlenstoffvorrat über das gesamte Profil und Kohlenstoffvorrat der ersten 1,5 m

Standort (Probepunkte)	Torfmächtigkeiten (cm)				
	Mittelwert	Standardabweichung	Median	max.	min.
Ampertal (40)	100	± 58,14	84	253	14
Freisinger Moos (14)	325	± 81,81	352	408	106
Erdinger Moos (13)	91	± 60,02	102	201	19
Benediktbeuern (22)	573	± 267,44	615	1044	32
Bernau (12)	285	± 93,64	282	490	55

Standort (Probepunkte)	C-Vorrat (kg m <sup>-2</sup> ) gesamtes Profil* bzw. bis Probenahmetiefe				
	Mittelwert	Standardabweichung	Median	max.	min.
Ampertal (12) *	71,66	± 32,97	65,67	142,01	29,46
Freisinger Moos (5)	169,45	± 40,98	149,72	249,21	134,85
Erdinger Moos (4)	67,78	± 23,87	68,67	99,24	34,55
Benediktbeuern (11)	109,63	± 33,55	121,90	137,54	18,57
Bernau (3)	80,40	± 7,69	76,49	91,15	73,56

Standort (Probepunkte)	C-Vorrat (kg m <sup>-2</sup> ) bis 150 cm Tiefe				
	Mittelwert	Standardabweichung	Median	max.	min.
Ampertal (12)	68	± 27,16	66	116	29
Freisinger Moos (5)	101	± 3,83	99	107	96
Erdinger Moos (4)	62	± 23,39	57	99	35
Benediktbeuern (11)	87	± 24,07	93	107	19
Bernau NSG (3)	75	± 11,18	68	91	67

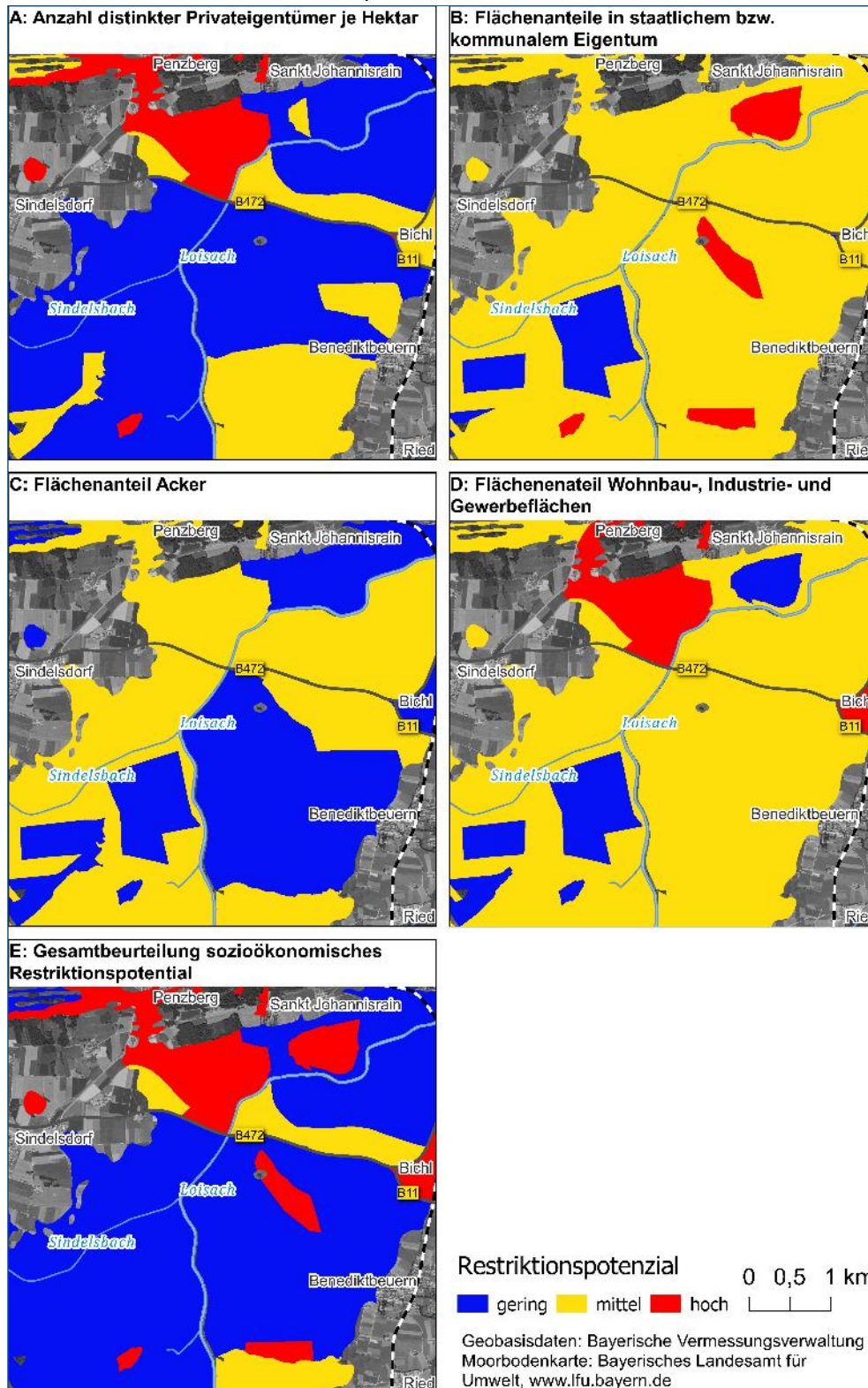
### 13.11 Substrat-Zersetungsgrad Tabelle

		Seggen-Schilftorf			Sphagnumtorf			Degradierter Torf	
		H1 - H3	H4 - H6	H7 - H10	H1 - H3	H4 - H6	H7 - H10	H4 - H6	H7 - H10
<b>LD</b> (g cm <sup>-3</sup> )	<b>Mittelwert</b>	0,17	0,21	0,25	0,11	0,09	0,12	0,14	0,30
	<b>STABW</b>	0,05	0,11	0,11	0,04	0,02	0,01	0,03	0,17
	<b>Min.</b>	0,11	0,08	0,14	0,09	0,08	0,10	0,12	0,17
	<b>Max.</b>	0,29	0,62	0,52	0,14	0,12	0,13	0,16	0,49
	<b>Anzahl</b>	15	56	10	2	3	3	2	3
<b>C<sub>org</sub></b> (Mas- se-%)	<b>Mittelwert</b>	39,10	36,81	33,25	46,27	47,73	51,90	46,05	37,60
	<b>STABW</b>	7,65	10,87	8,64	2,80	0,55	2,75	1,77	9,95
	<b>Min.</b>	24,30	8,40	17,70	43,40	47,00	49,50	44,80	29,80
	<b>Max.</b>	48,80	55,80	45,10	49,00	48,20	54,90	47,30	48,80
	<b>Anzahl</b>	15	58	11	3	4	3	2	3
<b>N</b> (Mas- se-%)	<b>Mittelwert</b>	1,83	1,77	1,86	1,30	1,40	1,47	2,06	1,84
	<b>STABW</b>	0,37	0,54	0,50	0,31	0,39	0,35	0,62	0,33
	<b>Min.</b>	1,08	0,40	1,10	0,94	1,00	1,14	1,62	1,56
	<b>Max.</b>	2,50	3,00	2,90	1,49	1,76	1,84	2,49	2,20
	<b>Anzahl</b>	15	58	11	3	4	3	2	3
<b>pH</b>	<b>Mittelwert</b>	5,74	5,68	6,30	3,16	3,16	2,78	4,29	5,43
	<b>STABW</b>	0,42	1,09	0,50	1,17	1,00	0,27	1,29	0,40
	<b>Min.</b>	5,00	2,48	5,50	2,38	2,47	2,57	3,38	5,00
	<b>Max.</b>	6,60	7,60	7,00	4,50	4,60	3,08	5,20	5,80
	<b>Anzahl</b>	15	58	11	3	4	3	2	3



## 13.12 LfL: Sozioökonomische Restriktionspotenziale

Gegenüberstellung der Indikatoren **Anzahl der privaten Eigentümer pro Hektar**, **Flächenanteil der Flurstückfläche in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum in %**, **Anteil der Ackerflächen an der Gesamtfläche in %**, **Anteil der Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen an der Gesamtfläche in %** und das daraus abgeleitete allgemeine sozioökonomische Restriktionspotenzial.



### 13.13 Flächenanteile der Endlichkeitsklassen landwirtschaftlich genutzter Moorböden (IgM) Bayerns nach

Moortyp und Tatsächlicher Nutzung getrennt

		Anmoor		Hochmoor		Niedermoor		Moorfläche ausschließlich in BSCH enthalten		Gesamt	
Endlichkeits- klasse in Jahren		IgM Fläche in ha	Anteil an der IgM in %	IgM Fläche in ha	Anteil an der IgM in %	IgM Fläche in ha	Anteil an der IgM in %	IgM Fläche in ha	Anteil an der IgM in %	IgM Fläche in ha	Anteil an Gesamtfläc he IgM in %
0 - 15	<b>Gesamt</b>	<b>11500</b>	<b>10,2</b>	<b>1068</b>	<b>1,0</b>	<b>11722</b>	<b>10,4</b>	<b>4231</b>	<b>3,8</b>	<b>28521</b>	<b>25,4</b>
	- Ackerland	8379		62		4551		2141		15133	13,5
	- Grünland	3107		1005		7168		2079		13359	11,9
	- sonstige Nutzung	14		< 1		3		11		28	0,0
	- ohne Angabe	< 1		< 1		< 1		< 1		0,4	0,0
15 - 30	<b>Gesamt</b>	<b>2578</b>	<b>2,3</b>	<b>407</b>	<b>0,4</b>	<b>8774</b>	<b>7,8</b>	<b>2295</b>	<b>2,0</b>	<b>14053</b>	<b>12,5</b>
	- Ackerland	881		2		2294		773		3950	3,5
	- Grünland	1694		405		6466		1515		10080	9,0
	- sonstige Nutzung	3		< 1		15		6		24	0,0
	- ohne Angabe	< 1		< 1		< 1		< 1		1	0,0
30 - 60	<b>Gesamt</b>	<b>2101</b>	<b>1,9</b>	<b>203</b>	<b>0,2</b>	<b>6323</b>	<b>5,6</b>	<b>4561</b>	<b>4,1</b>	<b>13189</b>	<b>11,7</b>
	- Ackerland	512		1		1380		1185		3078	2,7
	- Grünland	1583		202		4923		3363		10071	9,0
	- sonstige Nutzung	6		< 1		20		14		39	0,0
	- ohne Angabe	< 1		< 1		1		< 1		1	0,0
> 60	<b>Gesamt</b>	<b>2257</b>	<b>2,0</b>	<b>164</b>	<b>0,1</b>	<b>6124</b>	<b>5,5</b>	<b>6960</b>	<b>6,2</b>	<b>15505</b>	<b>13,8</b>
	- Ackerland	435		< 1		1068		1443		2946	2,6
	- Grünland	1813		164		5031		5498		12505	11,1
	- sonstige Nutzung	2		< 1		14		5		21	0,0
	- ohne Angabe	< 1		< 1		1		< 1		1	0,0
Keiner Klasse zugewiesen	<b>Gesamt</b>	<b>10889</b>	<b>9,7</b>	<b>703</b>	<b>0,6</b>	<b>16788</b>	<b>15,0</b>	<b>12609</b>	<b>11,2</b>	<b>40990</b>	<b>36,5</b>
	- Ackerland	5137		12		4098		4128		13375	11,9
	- Grünland	5736		690		12673		8450		27549	24,5
	- sonstige Nutzung	16		< 1		17		31		65	0,1
	- ohne Angabe	< 1		< 1		< 1		< 1		1	0,0

### 13.14 Torfsackungsraten nach Nutzungsklassen (Tatsächliche Nutzung)

Die Statistik der Sackungsraten aus DGM-Vergleichen wurde für alle landwirtschaftlich genutzten Flächen Bayerns auf Basis des 5 x 5 m DGM-Vergleichs berechnet. In Anlehnung an Weinzierl 2015 wurde ein „Moorwachstum“ von > 0,4 cm pro Jahr als Bodenauftrag und eine Sackung von mehr als -3 cm pro Jahr als Abgrabung interpretiert und von der Berechnung ausgeschlossen.

	Mittelwert in m/a	Standardabweichung in m/a	Min in m/a	Max in m/a	Fläche in ha
<b>Ackerland</b>	-0,007	± 0,007	-0,030	0,004	30699
<b>Grünland</b>	-0,006	± 0,006	-0,030	0,004	59094
<b>Hopfen</b>	-0,009	± 0,008	-0,030	0,003	70
<b>Obstplantage</b>	-0,007	± 0,007	-0,030	0,004	55
<b>Baumschule</b>	-0,007	± 0,007	-0,030	0,004	51
<b>Weingarten</b>	-0,004	± 0,005	-0,030	0,003	2

# 13.15 Artentabellen: Konflikte und Synergien mit der Biodiversität

(aus der Bachelorarbeit von Anna-Maria Heim, 2023, HSWT, teilweise geändert)

art_id	Taxa				Gefährungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)							Potentielles Vorkommen							Reaktion									
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL Anhang II	FFH-RL Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nas	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludi Kulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Exensivierung	Grünland Wstd.-Anhebung	Renaturierung Wiedervernässung	Intensivgrünland zu Paludi-Kultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	Quelle
<b>Tagfalter</b>																																
51X7027511	Agriadetes	optilete		Hochmoor-Bläuling	1a,2	2	2	NA	NA	16	1	54	6	0	0	77	1	1	1	1	3	1	1	4	0	0	0	2	0	0	3	3,4,12
51X7222000	Boloria	selene		Braunfleckiger Perlmutterfalter	1a,2	V	3	NA	NA	274	2	137	55	0	0	468	NA								NA							3,4,12
51X7221000	Boloria	titania		Natterwurperlmutterfalter	1a,2	V	3	NA	NA	41	0	37	3	0	0	81	1	1	2	3	2	1	1	3	0	1	2	1	0	0	2	3,4,12
51X7237000	Boloria	aquilonaris		Hochmoor-Perlmutterfalter	1a,2	2	3	NA	NA	138	0	90	15	0	0	243	1	1	1	2	4	1	1	2	0	0	2	3	0	0	1	3,4,12
51X7218000	Boloria	eunomia		Randring-Perlmutterfalter	1a,2	2	2	NA	NA	248	2	127	17	0	0	394	1	1	1	3	3	1	1	1	0	0	2	2	0	0	0	3,12
51X7220000	Boloria	euphrosyne		Silberfleck-Perlmutterfalter	1a,2	2	2	NA	NA	5	0	12	2	0	0	19	NA								NA							3,4,12
51X6881601	Carcharodus	flociferus		Heilziest-Dickkopffalter	1a,2	2	2	NA	NA	24	0	15	4	0	0	43	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7326000	Coenonympha	glycerion		Rotbraunes Wiesenvögelchen	1a,2	V	2	NA	NA	90	0	50	0	0	0	140	1	1	3	3	2	1	1	2	0	2	2	1	0	0	1	3,4,12
51X7321000	Coenonympha	tullia		Großes Wiesenvögelchen	1a,2	2	2	NA	NA	70	0	49	20	1	0	140	1	1	2	4	3	1	1	1	0	0	3	2	0	0	0	3,4,12
51X7332000	Coenonympha	hero		Wald-Wiesenvögelchen	1a,2	2	2	II	NA	40	0	26	24	0	0	90	1	1	2	2	3	1	1	3	0	1	1	2	0	0	2	3,4,12
51X7013000	Colias	palaeno		Hochmoorgelbling	1a,2	2	2	NA	NA	2410	0	1879	563	56	0	4915	1	1	1	1	3	1	1	3	0	0	0	2	0	0	2	3,4,12
51X7088000	Cupido	minimus		Zwerg-Bläuling	1a,2	*	3	NA	NA	3	0	0	0	0	0	3	1	1	3	2	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	3,4,12
51X7372000	Erebia	aethiops		Graubindiger Mohrenfalter	1a,2	3	3	NA	NA	11	0	6	0	1	0	18	1	1	1	1	2	1	1	3	0	0	0	1	0	0	2	3,4,12
51X7379000	Erebia	medusa		Rundaugen-Mohrenfalter	1a,2	V	3	NA	NA	146	19	32	1	2	0	200	1	1	4	2	2	1	1	1	0	3	1	1	0	0	0	3,4,12
51X7360000	Erebia	ligea		Weißbindiger Mohrenfalter	1a,2	V	3	NA	NA	15	0	10	4	0	0	29	1	1	1	2	2	1	1	3	0	0	1	1	0	0	2	3,4,12
51X6879000	Erynnis	tages		Kronwicken-Dickkopffalter	1a,2	*	3	NA	NA	2	0	2	2	0	0	6	1	1	3	2	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	3,4,12
51X3837000	Eumedonia	eumedon		Storchschnabel-Bläuling	1a,2	3	2	NA	NA	75	5	17	0	0	0	97	1	1	2	2	2	1	1	2	0	1	1	1	0	0	1	3,4,12
51X7268000	Euphydryas	aurinia		Goldener-Scheckenfalter	1a,2	2	2	II	IV	233	0	166	15	2	0	416	1	1	2	3	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	3,4,12
51X3619000	Fabriciana	niobe		Mittlerer Perlmutterfalter	1a,2	2	2	NA	NA	5	0	0	1	0	0	6	1	1	3	2	2	1	1	1	0	2	1	1	0	0	0	3,4,12
51X7030000	Hamearis	lucina		Schlüsselblumen-Würfelfalter	1a,2	3	2	NA	NA	9	0	7	0	0	0	16	1	1	3	2	2	1	1	2	0	2	1	1	0	0	1	3,4,12
51X6928000	Hesperia	comma		Komma-Dickkopffalter	1a,2	3	2	NA	NA	37	2	30	2	0	0	71	1	1	3	3	2	1	1	2	0	2	2	1	0	0	1	3,4,12
51X7312000	Lasioommata	maera		Braunauge	1a,2	V	3	NA	NA	43	0	39	0	0	0	82	NA								NA							3,4,12
51X7040000	Lycæna	alciphron		Violetter Feuerfalter	1a,2	2	2	NA	NA	87	1	51	1	0	0	140	1	1	2	3	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7041000	Lycæna	hippotoe		Lilagold-Feuerfalter	1a,2	3	2	NA	NA	128	0	52	2	0	0	182	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7037000	Lycæna	virgaureae		Dukatenfalter	1a,2	V	2	NA	NA	28	0	21	0	0	0	49	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7039000	Lycæna	tityrus		Brauner Feuerfalter	1a,2	*	2	NA	NA	39	0	0	0	0	0	39	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,4,12
51X3847000	Lysandra	bellargus		Himmelblauer Bläuling	1a,2	3	3	NA	NA	60	5	17	0	1	0	83	1	1	3	2	1	1	1	2	0	2	1	0	0	0	1	3,4,12
51X7283000	Melitæa	athalia		Wachtelweizen-Scheckenfalter	1a,2	3	3	NA	NA	132	1	97	59	0	0	289	1	1	3	3	2	1	1	2	0	2	2	1	0	0	1	3,4,12
51X7270000	Melitæa	cinxia		Wegerich-Scheckenfalter	1a,2	3	2	NA	NA	76	0	58	22	0	0	156	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7276000	Melitæa	diamina		Baldrian-Scheckenfalter	1a,2	3	3	NA	NA	208	2	119	13	0	0	342	1	1	2	3	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7427000	Minois	dryas		Blaukernaue	1a,2	2	3	NA	NA	157	9	30	1	5	1	203	1	1	2	3	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	3,4,12
51X7258000	Nymphalis	polychloros		Großer Fuchs	1a,2	V	3	NA	NA	1	0	0	0	0	0	1	NA								NA							3,4,12
51X3830900	Phengaris	alcon f. alcon		Enzian-Amesbläuling	1a,2	2	2	NA	NA	186	0	0	123	3	0	319	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,12
51X3827100	Phengaris	arion		Thymian-Amesbläuling	1a,2	3	2	NA	IV	11	0	0	0	0	0	11	1	1	3	3	2	1	1	1	0	2	2	1	0	0	0	3,12
51X3828100	Phengaris	telieus		Heller Wiesenknopf-Amesbläuling	1a,2	2	2	II	IV	33	1	11	0	0	0	45	1	1	2	4	2	1	2	1	0	1	3	1	0	1	0	3,12
51X3829100	Phengaris	nausthus		Dunkler Wiesenknopf-Amesbläuling	1a,2	V	3	II	IV	290	15	91	5	5	0	406	1	1	2	4	2	1	2	1	0	1	3	1	0	1	0	3,12
51X7065000	Satyrrium	ilicis		Brauner Eichen-Zipfelfalter	1a,2	2	2	NA	NA	10	0	5	0	0	0	15	NA								NA							3,4,12
51X6891000	Spialia	sertorius		Roter Würfel-Dickkopffalter	1a,2	*	3	NA	NA	0	0	1	0	0	0	1	1	1	3	2	1	1	2	2	0	2	1	0	0	1	1	3,4,12
<b>Summe Tagfalter</b>																<b>33</b>	<b>33</b>	<b>78</b>	<b>85</b>	<b>70</b>	<b>33</b>	<b>36</b>	<b>54</b>	<b>0</b>	<b>44</b>	<b>53</b>	<b>37</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>21</b>		
<b>Mittelwert Tagfalter</b>																<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2.36</b>	<b>2.58</b>	<b>2.12</b>	<b>1</b>	<b>1.09</b>	<b>1.64</b>	<b>0</b>	<b>1.3</b>	<b>1.6</b>	<b>1.12</b>	<b>0</b>	<b>0.09</b>	<b>0.64</b>		

art_id	Taxa				Gefährdungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)							Potentielles Vorkommen						Reaktion											
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL-Anhang II	FFH-RL-Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nass	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludikulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Extensivierung	Grünland Wäld.-Anhebung	Renaturierung Wiedervermässung	Intensivgrünland zu Paludikultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	Quelle	
Vögel																																	
1V00V72600	Acrocephalus	arundinaceus		Drosselrohrsänger	1b,2	V	3	NA	NA	221	0	52	55	530	0	381	1	1	1	1	2	1	1	1		0	0	0	1	0	0	0	10,11,12
1V00V44700	Actitis	hypoleucos		Flussuferläufer	1b,2	1	2	NA	NA	6	0	40	0	0	0	60	NA									NA							10,11,12
1V00V60500	Alauda	arevensis		Feldlerche	1b,2	3	3	NA	NA	356	76	52	0	0	0	484	3	2	3	2	1	1	1	1		-1	1	0	1	0	-1	-1	10,11,12
1V00V53400	Alcedo	atthis		Eisvogel	1b,2	*	3	NA	NA	325	37	44	0	14	0	406	NA									NA							10,11,12
1V00V13500	Anas	crecca		Krickente	1b,2	3	3	NA	NA	168	10	169	23	11	0	381	1	1	1	1	3	1	1	1		0	0	0	2	0	0	0	10,11,12
1V00V63300	Anthus	trivialis		Baumpieper	1b,2	V	2	NA	NA	1107	9	266	105	13	0	1502	1	1	2	2	3	1	1	3		0	1	1	2	1	1	2	10,11,12
1V00V63400	Anthus	pratensis		Wiesenpieper	1b,2	V	1	NA	NA	1854	284	626	241	12	0	3017	1	1	3	3	4	3	1	1		0	2	2	3	2	-1	0	10,11,12
1V00V53200	Apus			Mauersegler	1b,2	*	3	NA	NA	4	0	13	6	0	0	23	NA									NA							10,11,12
1V00V40400	Charadrius	dubius		Flussregenpiefer	1b,2	*	3	NA	NA	179	126	59	0	26	0	390	1	1	1	1	2	1	1	1		0	0	0	1	0	0	0	10,11,12
1V00V31300	Coturnix	coturnix		Wachtel	1b,2	*	3	NA	NA	2820	1107	249	13	0	0	4189	2	1	3	3	2	3	2	1		-1	2	2	1	2	1	0	10,11,12
1V00V33500	Crex	crex		Wachtelkönig	1b,2	2	2	NA	NA	6070	498	582	493	77	0	7720	1	1	2	3	2	2	1	1		0	1	2	1	1	0	0	10,11,12
1V00V61500	Delichon			Mehlschwalbe	1b,2	V	3	NA	NA	23	1	9	0	0	0	33	NA									NA							10,11,12
1V00V55600	Dendrocoptes	leucotos		Weißrückenspecht	1b,2	2	3	NA	NA	0	0	17	0	0	0	17	1	1	1	1	1	1	1	3		0	0	0	0	0	0	2	10,11,12
1V00V91400	Emberiza	hortulana		Ortolan	1b,2	3	1	NA	NA	0	34	10	0	0	0	44	NA									NA							10,11,12
1V00V91100	Emberiza	calandra		Grauwammer	1b,2	3	1	NA	NA	161	71	14	0	0	0	246	1	1	2	2	1	1	2	1		0	1	1	0	0	1	0	10,11,12
1V00V76500	Ficedula	albicollis		Halsbandschnäpper	1b,2	3	3	NA	NA	34	16	15	2	0	0	67	NA									NA							10,11,12
1V00V76600	Ficedula	parva		Zwergschnäpper	1b,2	*	2	NA	NA	0	0	7	0	0	0	7	NA									NA							10,11,12
1V00V42200	Gallinago	gallinago		Bekassine	1b,2	1	1	NA	NA	4380	278	901	585	122	0	6266	1	1	1	2	3	3	1	1		0	0	1	2	3	0	0	10,11,12
1V00V73100	Hippolais	icterina		Gelbspötter	1b,2	*	3	NA	NA	62	41	6	0	0	0	109	1	1	1	1	1	1	1	3		0	0	0	0	0	0	2	10,11,12
1V00V05100	Ixobrychus	minutus		Zwergdommel	1b,2	1	1	NA	NA	589	21	162	16	70	0	858	1	1	1	1	3	1	1	1		0	0	0	2	0	0	0	10,11,12
1V00V55900	Jynx	torquilla		Wendehals	1b,2	2	1	NA	NA	7	0	0	0	0	0	7	1	1	1	1	2	1	1	3		0	0	0	1	0	0	2	10,11,12
1V00V60300	Lullula	arborea		Heidelerche	1b,2	*	2	NA	NA	37	10	35	0	0	0	82	NA									NA							10,11,12
1V00V42600	Numenius	arquata		Grosser Brachvogel	1b,2	1	1	NA	NA	11420	1923	1083	819	87	5	15337	1	1	2	3	3	1	1	1		0	1	2	2	0	-1	0	10,11,12
1V00V31200	Perdix	perdix		Rebhuhn	1b,2	2	2	NA	NA	2271	1175	148	5	3	0	3602	3	1	3	2	1	1	2	1		-2	2	1	0	0	1	0	10,11,12
1V00V80300	Phoenicurus	phoenicurus		Gartenrotschwanz	1b,2	*	3	NA	NA	46	9	27	0	0	0	82	1	1	1	1	1	1	1	3		0	0	0	0	0	0	2	10,11,12
1V00V75400	Phylloscopus	sibilatrix		Waldlaubsänger	1b,2	*	2	NA	NA	15	12	24	0	0	0	51	1	1	1	1	1	1	1	3		0	0	0	0	0	0	2	10,11,12
1V00V55200	Picus canus	canus		Grauspecht	1b,2	2	3	NA	NA	1193	24	202	186	18	0	1623	1	1	1	1	1	1	1	3		0	0	0	0	0	0	2	10,11,12
1V00V01400	Podiceps	nigricollis		Schwarzhalstaucher	1b,2	*	2	NA	NA	107	1	32	27	1	4	172	1	1	1	1	3	1	1	1		0	0	0	2	0	0	0	10,11,12
1V00V33200	Porzana	porzana		Tüpfelsumpfhuhn	1b,2	1	1	NA	NA	63	5	46	4	0	0	118	1	1	1	3	3	3	1	1		0	0	2	2	2	0	0	10,11,12
1V00V33100	Rallus	aquaticus		Wasserralle	1b,2	V	3	NA	NA	443	47	91	32	0	0	613	1	1	1	1	3	2	2	1		0	0	0	2	1	0	0	10,11,12
1V00V80200	Saxicola	rubetra		Braunkehlchen	1b,2	3	1	NA	NA	2288	187	289	72	7	0	2843	1	1	3	3	2	2	1	1		0	2	2	1	1	0	0	10,11,12
1V00V82200	Spatula	querquedula		Knäkente	1b,2	2	1	NA	NA	8	4	0	0	0	0	12	1	1	1	2	3	1	1	1		0	0	1	3	0	0	0	10,11,12
1V00V82300	Spatula	clypeata		Löffelente	1b,2	3	1	NA	NA	2	0	0	0	0	0	2	NA									NA							10,11,12
1V00V48700	Sterna	hirundo		Flussseeschwalbe	1b,2	2	3	NA	NA	1	3	0	0	0	0	4	NA									NA							10,11,12
1V00V50300	Streptopelia	turtur		Turteltaube	1b,2	3	2	NA	NA	41	28	55	1	0	0	125	NA									NA							10,11,12
1V00V74300	Sylvia	curruca		Klappergrasmücke	1b,2	*	3	NA	NA	3	0	0	0	0	0	3	NA									NA							10,11,12
1V00V30600	Tetrastes	bonasia		Haselhuhn	1b,2	2	3	NA	NA	9	0	86	0	0	0	95	NA									NA							10,11,12
1V00V40200	Vanellus	vanellus		Kiebitz	1b,2	2	2	NA	NA	21999	10498	1112	235	36	11	33291	3	1	3	4	3	3	1	1		-2	2	3	2	3	-1	0	10,11,12
1V00V91600	Emberiza	schoeniclus		Rohrhammer	1b,2	*	*	NA	NA	54	7	33	29	11	0	134	1	1	1	1	3	3	1	1		0	0	0	2	2	0	0	10,11,12
	Motacilla	flava		Wiesenschafstelze	1b,2	*	*	NA	NA	Nicht durch ASK erfasst							1	1	3	3	2	3	3	1		0	2	2	1	2	2	0	10,11,12
	Summe Vögel																34	28	45	50	59	44	33	41		-6	17	22	34	21	3	13	
	Mittelwert Vögel																1.26	1.04	1.67	1.85	2.19	1.63	1.22	1.52		-0.22	0.6	0.8	1.26	0.78	0.11	0.48	

art_id	Taxa				Gefährungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)							Potentielles Vorkommen							Reaktion Landnutzungsänderung												
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL Anhang II	FFH-RL Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nass	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludikulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Exensivierung	Grünland Wstld.-Anhebung	Renaturierung Wiedervernässung	Intensivgrünland zu Paludikultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	Quelle			
<b>Heuschrecken</b>																																			
5IF0321000	Chorthippus	apricarius		Feld-Grashüpfer	1c,2	*	3	NA	NA	17	2	0	0	0	0	19	NA																5,6,12		
5IF0326000	Chorthippus	mollis		Verkannter Grashüpfer	1c,2	*	3	NA	NA	0	5	0	0	0	0	5	NA																5,6,12		
5IF0323000	Chorthippus	vagans		Steppengrashüpfer	1c,2	3	3	NA	NA	0	0	3	0	0	0	3	NA																5,6,12		
5IF0092000	Conocephalus	dorsalis		Kurzflügelige Schwertschrecke	1c,2	*	3	NA	NA	150	7	30	6	0	0	193	1	1	2	3	3	3	3	1	0	1	2	2	2	2	0		5,6,12		
5IF0121000	Decticus	verrucivorus		Warzenbeißer	1c,2	3	3	NA	NA	646	0	201	22	4	0	872	1	1	3	3	1	1	2	1	0	2	2	2	0	0	1	0		5,6,12	
5IF0316000	Myrmeleotettix	maculatus		Gefleckte Keulenschrecke	1c,2	*	3	NA	NA	0	0	3	0	0	0	3	NA																	5,6,12	
5IF0261000	Oedipoda	caerulescens		Blaufügelige Ödlandschrecke	1c,2	V	2	NA	NA	0	0	2	0	0	0	2	NA																	5,6,12	
5IF0312000	Omocestus	rufipes		Buntbäuchiger Grashüpfer	1c,2	2	2	NA	NA	16	0	10	0	0	0	26	1	1	2	1	2	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0			5,6,12	
5IF0131000	Platycleis	albopunctata		Westliche Beißschrecke	1c,2	*	3	NA	NA	10	0	0	0	1	0	11	1	1	3	2	2	1	2	1	0	2	1	1	0	1	0			5,6,12	
5IF0251000	Psophus	stridulus		Rotflügelige Schnarrschrecke	1c,2	2	2	NA	NA	5	0	2	0	0	0	7	NA																	5,6,12	
5IF0264000	Sphingonotus	caeruleus		Blaufügelige Sandschrecke	1c,2	2	1	NA	NA	5	0	0	0	0	0	5	NA																	5,6,12	
5IF0301000	Stenobothrus	lineatus		Heidegrashüpfer	1c,2	*	3	NA	NA	28	0	15	1	0	0	44	NA																		5,6,12
5IF0303000	Stenobothrus	stigmaticus		Kleiner Heidegrashüpfer	1c,2	3	2	NA	NA	4	0	4	0	0	0	8	NA																		5,6,12
5IF0267000	Stethophyma	grossum		Sumpfschrecke	1c,2			NA	NA	610	15	174	22	9	0	830	1	1	2	3	2	1	2	1	0	1	2	1	0	1	0			5,6,12	
5IF0291000	Chrysochraon	dispar		Große Goldschrecke	1c,2	*	V	NA	NA	458	37	85	9	11	0	600	1	1	2	3	3	3	3	1	0	2	2	2	2	2	0			5,6,12	
5IF0292000	Euthystira	brachyptera		Kleine Goldschrecke	1c,2	*	*	NA	NA	151	2	119	9	3	0	284	1	1	3	3	3	3	3	1	0	2	2	2	2	2	0			5,6,12	
5IF0181000	Gryllus	campestris		Feldgrille	1c,2	*	V	NA	NA	787	62	230	13	11	0	1103	1	1	3	3	2	1	2	1	0	2	2	1	0	1	0			5,6,12	
5IF0191000	Gryllotalpa	gryllotalpa		Maulwurfgrille	1c,2	*	V	NA	NA	88	41	22	0	0	0	151	1	1	3	3	2	2	2	1	0	2	2	1	1	1	0			5,6,12	
5IF0327000	Chorthippus	dorsatus		Wiesengrashüpfer	1c,2	*	V	NA	NA	393	21	134	33	0	0	548	1	2	3	3	2	2	3	1	1	2	2	1	1	2	0			5,6,12	
<b>Summe Heuschrecken</b>																																			
<b>Mittelwert Heuschrecken</b>																																			
																	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>13</b>	<b>0</b>				
																	<b>1</b>	<b>1.1</b>	<b>2.6</b>	<b>2.7</b>	<b>2.2</b>	<b>1.8</b>	<b>2.3</b>	<b>1</b>	<b>0.1</b>	<b>1.6</b>	<b>1.7</b>	<b>1.2</b>	<b>0.8</b>	<b>1.3</b>	<b>0</b>				

art_id	Taxa				Gefährdungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)						Potentielles Vorkommen						Reaktion						Quelle						
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL Anhang II	FFH-RL Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nass	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludi Kulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Exensivierung		Grünland Wstd.-Anhebung	Renaturierung Wiedervernässung	Intensivgrünland zu Paludi-Kultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	
<b>Libellen</b>																																	
51C5503000	Aeshna	subarctica		Hochmoor-Mosaikjungfer	1d,2	1	2	NA	NA	56	0	48	30	3	0	137	1	1	1	1	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	7,8,12	
51C5508000	Aeshna	isocela		Keilfleck-Mosaikjungfer	1d,2	*	3	NA	NA	15	0	2	2	5	0	24	1	1	1	1	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	7,8,12	
51C5206000	Brachytron	pratense		Früher Schilfjäger	1d,2	*	3	NA	NA	2	0	1	0	4	0	7	NA															7,8,12	
51C4503000	Coenagrion	hastulatum		Speer-Azurjungfer	1d,2	2	3	NA	NA	71	12	60	15	6	0	164	1	1	1	1	4	1	1	1	0	0	0	3	0	0	0	7,8,12	
51C4502000	Coenagrion	lunulatum		Mond-Azurjungfer	1d,2	0	0	NA	NA	21	0	13	0	8	0	42	NA															7,8,12	
51C4507000	Coenagrion	mercuriale		Helm-Azurjungfer	1d,2	2	1	II	NA	107	71	24	2	0	0	204	1	1	1	1	3	2	2	1	0	0	0	2	1	1	0	7,8,12	
51C4504000	Coenagrion	ornatum		Vogel-Azurjungfer	1d,2	2	2	II	NA	159	80	11	0	0	0	250	1	1	1	1	3	2	2	1	0	0	0	2	1	1	0	7,8,12	
51C4505000	Coenagrion	pulchellum		Fledermaus-Azurjungfer	1d,2	3	3	NA	NA	63	19	79	18	22	0	201	NA															7,8,12	
51C7506000	Cordulegaster	bidentata		Gestreifte Quelljungfer	1d,2	3	2	NA	NA	54	0	44	7	0	0	105	NA															7,8,12	
51C2401000	Lestes	barbarus		Glänzende Binsenjungfer	1d,2	*	3	NA	NA	4	0	0	2	0	0	6	NA															7,8,12	
51C2405000	Lestes	dryas		Südliche Binsenjungfer	1d,2	3	3	NA	NA	34	0	4	0	0	0	38	NA															7,8,12	
51C2403100	Lestes	virens	vestalis	Kleine Binsenjungfer	1d,2	*	2	NA	NA	14	4	35	21	3	0	77	NA															7,8,12	
51C9805000	Leucorrhinia	dubia		Kleine Moosjungfer	1d,2	3	3	NA	NA	178	0	120	18	4	0	320	1	1	1	1	3	1	1	2	0	0	0	2	0	0	1	7,8,12	
51C9809100	Leucorrhinia	pectoralis		Große Moosjungfer	1d,2	3	2	II	IV	17	0	7	14	4	0	42	1	1	1	1	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	7,8,12	
51C9402000	Orthetrum	coerulescens		Kleiner Blaupfeil	1d,2	V	3	NA	NA	150	1	54	4	0	0	209	1	1	1	1	2	2	2	1	0	0	0	1	1	1	0	7,8,12	
51C8502000	Somatochlora	alpestris		Alpen-Smaragdlibelle	1d,2	1	2	NA	NA	17	0	15	0	0	0	32	NA															7,8,12	
51C8508000	Somatochlora	arctica		Arktische Smaragdlibelle	1d,2	2	2	NA	NA	26	0	87	52	11	0	176	NA															7,8,12	
51C8507000	Somatochlora	flavomaculata		Gefleckte Smaragdlibelle	1d,2	3	3	NA	NA	502	7	72	53	26	0	660	1	1	1	3	3	3	2	1	0	0	2	2	2	1	0	7,8,12	
51C2206000	Sympetma	paedisca		Sibirische Winterlibelle	1d,2	1	2	NA	IV	35	0	32	8	16	0	91	1	1	1	1	3	2	2	1	0	0	0	3	1	1	0	7,8,12	
51C9602000	Sympetrum	flaveolum		Gefleckte Heidelibelle	1d,2	3	2	NA	NA	15	0	8	3	2	0	28	NA															7,8,12	
51C9607000	Sympetrum	pedemontanum		Gebänderte Heidelibelle	1d,2	2	2	NA	NA	1	0	0	0	0	0	1	NA															7,8,12	
	Sympetrum	depressiusculum		Sumpf-Heidelibelle	1d,2	1	1	NA	NA	Nicht durch die ASK erfasst						1	1	1	1	3	2	2	1	0	0	0	2	1	1	0	7,8,12		
51C2407000	Lestes	sponsa		Gemeine Binsenjungfer	1d,2	*	V	NA	NA	51	16	54	24	10	0	155	1	1	1	1	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	7,8,12	
51C5502000	Aeshna	juncea		Torf-Mosaikjungfer	1d,2	V	V	NA	NA	119	0	77	10	0	0	206	1	1	1	1	3	2	2	1	0	0	0	2	1	1	0	7,8,12	
51C9606000	Sympetrum	danae		Schwarze Heidelibelle	1d,2	*	V	NA	NA	128	11	73	6	2	0	220	1	1	1	1	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	7,8,12	
	<b>Summe Libellen</b>																14	14	14	16	42	22	21	15	0	0	2	29	8	7	1		
	<b>Mittelwert Libellen</b>																	1	1	1	1.14	3	1.57	1.5	1.07	0	0	0.1	2.07	0.57	0.5	0.07	

art_id	Taxa				Gefährdungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)						Potentielles Vorkommen						Reaktion						Quelle						
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL Anhang II	FFH-RL Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nass	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludi Kulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Exensivierung		Grünland Wstd.-Anhebung	Renaturierung Wiedervernässung	Intensivgrünland zu Paludi-Kultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	
<b>Laufkäfer</b>																																	
51M0018000	Carabus	menetriesi		Hochmoor-Laufkäfer	1e,2	1	1	II	NA	6	0	7	0	0	0	13	1	1	1	1	4	1	1	2	0	0	0	3	0	0	1	9.12	
51M0425000	Chlaenius	sulcicollis		Grauhaariger Sammetläufer	1e,2	1	1	NA	NA	0	0	2	0	0	0	2	NA															9.12	
	<b>Summe Laufkäfer</b>																1	1	1	1	4	1	1	2	0	0	0	3	0	0	1		
	<b>Mittelwert Laufkäfer</b>																	1	1	1	1	4	1	1	2	0	0	0	3	0	0	1	

art_id	Taxa				Gefährungsgrad				Anzahl der Vorkommenden Art (ASK)						Potentielles Vorkommen						Reaktion												
	Gattung	Art	Unterart	Deutscher Name	Quelle	RL Deutschland	RL Bayern	FFH-RL Anhang II	FFH-RL Anhang IV u. V	Grünland	Acker	Wald	Moor	Sumpf	Heide	Summe	Acker	Intensivgrünland	Extensivgrünland	Extensivgrünland nass	Offene renaturierte Moorstandorte	Paludikulturen	Moor-PV	Sekundär Moorwald	Acker zu Grünland	Grünland Exensivierung	Grünland Wstd.-Anhebung	Renaturierung Wiedervermässung	Intensivgrünland zu Paludikultur	Intensivgrünland zu Moor-PV	Sekundäre Moorwald	Quelle	
Flora																																	
9POH000100	Aconitum	variegatum		Blauer Eisenhut	1f,2	V	3	NA	NA	12	3	6	0	0	0	21	1	2	2	3	2	1	2	3	1	2	1	0	0	0	0	13.14	
51X2074Y00	Adscita	statices		Amper-Grünweiderich	1f,2	V	3	NA	NA	40	0	12	3	0	0	55	1	1	2	3	3	1	1	3	0	1	2	1	0	0	2	13.14	
9POH030900	Allium	angulosum		Kanten-Lauch	1f,2	3	3	NA	NA	169	47	92	0	0	0	308	1	1	2	3	1	1	2	2	0	1	2	1	0	1	1	13.14	
9POH023600	Allium	suaveolens		Wohrliechender Lauch	1f,2	3	3	NA	NA	118	14	39	4	0	0	175	1	1	2	3	1	1	3	3	0	1	2	1	0	2	2	13.14	
9POH031000	Allium	carinatum	s.l.	Gekielter Lauch	1f,2	3	3	NA	NA	71	0	36	10	0	0	117	1	1	3	2	1	1	1	2	0	2	1	1	0	0	1	13.14	
9POH031001	Allium	carinatum	subsp. carinatum	Gekielter Lauch	1f,2	3	3	NA	NA	111	5	64	3	0	0	183	1	1	3	2	1	1	1	2	0	2	1	1	0	0	1	13.14	
9POH041500	Anacamptis	pyramidalis		Pyramiden-Hundswurz	1f,2	3	2	NA	NA	1	0	0	0	0	0	1	NA								NA							13.14	
9POH043500	Andromeda	polifolia		Rosmarinheide	1f,2	3	3	NA	NA	77	0	37	26	0	0	140	1	1	2	3	4	1	2	2	1	1	2	3	0	1	1	13.14	
9POH046100	Antennaria	dioica		Gewöhnliches Katzenpfötchen	1f,2	3	3	NA	NA	49	0	15	9	0	0	73	1	1	3	2	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	13.14	
9POH071302	Armeria	maritima	subsp. purpurea	Purpur-Grasnelke	1f,2	1	1	NA	NA	59	0	0	59	2	0	120	1	1	2	3	3	1	2	2	0	1	2	2	0	1	1	13.14	
9POH071300	Armeria	maritima	s.l.	Strand-Grasnelke	1f,2	V	3	NA	NA	0	0	0	25	0	0	25	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	13.14	
9POH059300	Asperula	tinctoria		Färber-Meister	1f,2	3	3	NA	NA	1	0	0	0	0	0	1	NA								NA							13.14	
9POH082600	Betula	humilis		Strauch-Birke	1f,2	2	2	NA	NA	23	0	10	3	3	0	39	1	1	1	2	3	1	2	4	0	0	1	2	0	1	3	13.14	
9POH090200	Blysmus	compressus		Zusammengedrückte Quellbinse	1f,2	2	3	NA	NA	84	0	46	3	0	0	133	1	1	2	3	4	1	2	2	0	1	2	3	0	1	1	13.14	
9POH064300	Butomus	umbellatus		Schwabenblume	1f,2	*	3	NA	NA	4	0	0	1	0	0	5	NA								NA							13.14	
9POH094900	Calamagrostis	stricta		Moor-Reitgras	1f,2	3	1	NA	NA	17	5	41	34	1	0	98	1	1	1	3	3	1	1	1	0	0	2	2	0	0	0	13.14	
9POH096600	Calla	palustris		Drachenzwurz	1f,2	V	3	NA	NA	10	0	32	0	6	0	48	1	1	1	2	3	1	1	3	0	0	1	2	0	0	0	2	13.14
9POH109700	Carex	appropinquata		Schwarzschof-Segge	1f,2	3	3	NA	NA	66	4	9	3	1	0	83	1	1	1	2	3	1	3	3	0	0	1	2	0	2	2	13.14	
9POH123700	Carex	buxbaumii		Buchbaum-Segge	1f,2	2	2	NA	NA	0	0	0	3	0	0	3	NA								NA							13.14	
9POH129700	Carex	lasiocarpa		Faden-Segge	1f,2	3	3	NA	NA	33	0	15	3	0	0	51	1	1	2	3	4	1	2	2	0	1	2	3	0	1	1	13.14	
9POH133700	Carex	pseudocyperus		Schleinzypressen-Segge	1f,2	*	5	NA	NA	0	3	2	0	0	0	5	NA								NA							13.14	
9POH125000	Carex	cespitosa		Rasen-Segge	1f,2	3	3	NA	NA	27	1	0	0	0	0	28	1	1	1	2	3	1	3	3	0	0	1	2	0	2	2	13.14	
9POH125400	Carex	davalliana		Davalls-Segge	1f,2	3	3	NA	NA	268	0	72	14	0	0	354	1	1	2	3	4	1	2	2	0	1	2	3	0	1	1	13.14	
9POH125500	Carex	diandra		Dracht-Segge	1f,2	2	2	NA	NA	45	0	17	1	0	0	63	1	1	2	3	4	1	2	2	0	1	2	3	0	1	1	13.14	
9POH126500	Carex	elangata		Walzen-Segge	1f,2	*	3	NA	NA	9	0	17	0	0	0	26	1	1	1	3	4	1	3	3	0	2	3	0	2	2	2	13.14	
9POH129300	Carex	hostiana		Saum-Segge	1f,2	2	3	NA	NA	50	0	27	0	0	0	77	1	1	1	3	4	1	2	2	0	0	2	3	0	1	1	13.14	
9POH114000	Carex	pauciflora		Armbültige Segge	1f,2	3	3	NA	NA	10	0	6	0	0	0	16	1	1	1	3	4	1	2	2	0	0	2	3	0	1	1	13.14	
9POH133800	Carex	pulicaris		Floh-Segge	1f,2	2	3	NA	NA	17	1	3	0	0	0	21	1	1	1	3	4	1	2	2	0	0	2	3	0	1	1	13.14	
9POH134000	Carex	riparia		Ufer-Segge	1f,2	*	5	NA	NA	9	1	2	0	0	0	12	1	1	1	3	4	1	3	3	0	0	2	3	0	1	2	13.14	
9POH135600	Carex	vulpina		Fuchs-Segge	1f,2	V	3	NA	NA	8	6	0	0	0	0	14	1	1	1	3	3	1	2	2	0	0	2	2	0	1	1	13.14	
9POH130100	Carex	limosa		Schlamm-Segge	1f,2	2	3	NA	NA	164	0	125	25	0	0	314	1	1	1	3	4	1	2	2	0	0	2	3	0	1	1	13.14	
9POH042100	Centunculus	minimus		Zwerg-Gauchheil	1f,2	2	2	NA	NA	8	0	0	0	0	0	8	NA								NA							13.14	
9POH150700	Cicuta	virosa		Wasserschierling	1f,2	V	2	NA	NA	41	0	10	2	2	0	55	1	1	1	2	4	1	1	3	0	0	1	3	0	0	2	13.14	
9POH087700	Cirsium	tuberosum		Knollige Kratzdistel	1f,2	3	3	NA	NA	12	15	0	0	0	0	27	1	1	3	3	2	1	3	3	0	2	2	1	0	2	2	13.14	
9POH085700	Cirsium	heterophyllum		Verschiedenblättrige Kratzdistel	1f,2	V	3	NA	NA	0	0	0	3	0	0	3	NA								NA							13.14	
9POH152700	Cladium mariscus	mariscus		Binsenschnelde	1f,2	3	3	NA	NA	34	0	15	19	12	0	12	1	1	1	2	4	1	1	2	0	0	1	3	0	0	1	13.14	
9POH155600	Cochlearia	pyrenacia		Pyrenäen-Löffelkraut	1f,2	2	2	NA	NA	4	15	9	0	0	0	28	1	1	1	2	3	1	2	2	0	0	1	2	0	1	1	13.14	
9POH158500	Coeloglossum	viride		Grüne Hohlzunge	1f,2	2	3	NA	NA	24	0	23	0	0	0	47	1	1	3	2	1	1	1	1	0	2	1	0	0	0	0	13.14	
9POH426000	Comarum	palustre		Sump-Blutauge	1f,2	*	3	NA	NA	21	0	7	0	0	0	28	1	1	2	3	4	1	2	2	0	1	2	1	0	2	2	13.14	
9POH165600	Corydalis	intermedia		Mittlerer Lerchensporn	1f,2	*	3	NA	NA	7	1	4	0	0	0	12	1	1	2	3	2	1	3	3	0	1	2	1	0	2	2	13.14	
51MA07D000	Cryptocephalus	nitidulus		Großköpfiger Pippau	1f,2	3	3	NA	NA	65	0	74	48	0	0	187	1	1	2	3	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	13.14	
51X7088000	Cupido	minimus		Frühlings-Krokus	1f,2	*	5	NA	NA	3	0	0	0	0	0	3	NA								NA							13.14	
9POH183000	Cyperus	fuscus		Braunes Zypergras	1f,2	3	3	NA	NA	20	2	2	0	0	0	24	1	1	2	3	3	1	2	2	0	1	2	2	0	1	1	13.14	
9POH171803	Dactylorhiza	incarnata	subsp. incarnata	Fleischfarbendes Kabenkraut	1f,2	3	3	NA	NA	4	0	0	0	0	0	4	1	1	2	3	4	1	3	3	0	1	2	3	0	2	2	13.14	
9POH172200	Dactylorhiza	maculata	agg.	Geflecktes Kabenkraut	1f,2	V	3	NA	NA	35	0	11	3	2	0	51	1	1	2	3	4	1	3	3	0	1	2	3	0	2	2	13.14	
9POH137500	Dactylorhiza	majalis	agg.	Breitblättriges Kabenkraut	1f,2	V	3	NA	NA	93	4	45	9	0	0	151	1	1	2	3	3	1	2	1	0	1	2	2	0	1	0	13.14	
9POH137900	Dactylorhiza	maj																															





9POH428200	Primula	farinosa		Mehlprimel	1f,2	3	3	NA	NA	101	25	26	4	4	0	4	1	1	2	3	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	13.14
9POH434700	Pyrola	minor		Kleines Wintergrün	1f,2	3	3	NA	NA	0	0	1	0	0	0	1	NA									NA						13.14
9POH438800	Ranunculus	cassubicifolius		Wendelböättriger Gold-Hahnenfuß	1f,2	3	2	NA	NA	8	0	0	0	0	0	8	NA									NA						13.14
9POH444100	Ranunculus	lingua		Zungen-Hahnenfuß	1f,2	3	2	NA	NA	32	2	7	0	0	0	41	1	1	2	3	4	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	13.14
9POH453100	Rhynchospora	fusca		Braunes Schnabelried	1f,2	2	2	NA	NA	4	0	4	10	0	0	18	1	1	2	3	4	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	13.14
9POH497400	Sagina	nodosa		Knotiges Mastkraut	1f,2	2	1	NA	NA	8	0	0	0	0	0	8	NA									NA						13.14
9POH460900	Salmonus	valerandi		Salzbunge	1f,2	2	1	NA	NA	21	17	0	0	0	0	38	1	1	2	3	3	1	2	2	0	1	2	2	0	1	1	13.14
9POH506700	Schoenus	ferrugineus		Rostrottes Kopfried	1f,2	3	3	NA	NA	107	0	49	17	0	0	173	1	1	2	3	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	13.14
9POH506900	Schoenus	nigricans		Schwarzes Kopfried	1f,2	2	2	NA	NA	10	0	0	4	0	0	14	1	1	2	3	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	13.14
9POH508800	Scorzonera	humilis		Niedrige Schwarzwurzel	1f,2	3	3	NA	NA	15	0	15	3	0	0	33	1	1	3	3	2	1	2	3	0	2	2	1	0	1	2	13.14
9POH510100	Scutellaria	minor		Kleines Helmkraut	1f,2	2	2	NA	NA	0	0	8	0	0	0	8	NA									NA						13.14
9POH461700	Senecio	paludosus		Sumpfgreiskraut	1f,2	3	3	NA	NA	195	0	31	17	0	0	243	1	1	2	3	3	1	2	3	0	1	2	2	0	1	2	13.14
9POH481000	Seseli	annuum		Steppenfenchel	1f,2	3	3	NA	NA	7	1	0	0	0	0	8	NA									NA						13.14
9POH493400	Silene	otites		Ohrlöffel-Leimkraut	1f,2	3	2	NA	NA	1	0	6	0	0	0	7	NA									NA						13.14
9POH538000	Stellaria	longifolia		Langblatt-Sternmiere	1f,2	3	3	NA	NA	19	0	13	0	5	0	37	1	1	2	3	3	1	2	4	0	1	2	2	0	1	3	13.14
9POH540000	Swertia	perennis		Sumpfenzian	1f,2	2	3	NA	NA	0	0	1	1	0	0	2	1	1	2	3	2	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	13.14
9POH564100	Thalictrum	lucidum		Glänzende Wiesenraute	1f,2	3	3	NA	NA	5	3	2	0	0	0	10	1	1	2	3	3	1	2	3	0	1	2	2	0	1	2	13.14
9POH564800	Thelypteris	palustris		Sumpffarn	1f,2	V	3	NA	NA	18	0	15	0	0	0	33	1	1	1	1	1	1	1	3	0	0	0	0	0	0	2	13.14
9POH573300	Trichophorum	alpinum		Alpen-Rasenbinse	1f,2	3	3	NA	NA	66	0	17	3	0	0	86	1	1	1	2	3	1	2	2	0	0	1	2	0	1	1	13.14
9POH563400	Trifolium	fragiferum		Erdbeer-Klee	1f,2	V	2	NA	NA	5	0	0	0	0	0	5	NA									NA						13.14
9POH577300	Triglochin	palustris		Sumpfdreizack	1f,2	3	3	NA	NA	6	0	0	0	0	0	6	1	1	1	3	4	1	2	2	0	0	2	3	0	1	1	13.14
9POH582300	Trollius	europaeus		Trollblume	1f,2	3	3	NA	NA	45	1	17	4	0	0	67	1	1	2	3	3	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	13.14
9POH586200	Utricularia	minor	s.str.	Kleiner Wasserschlauch	1f,2	3	3	NA	NA	0	0	0	4	0	0	4	NA									NA						13.14
9POH586400	Utricularia	australis		Verkannter Wasserschlauch	1f,2	V	3	NA	NA	1	1	3	0	2	0	7	NA									NA						13.14
9POH586500	Utricularia	vulgaris		Gewöhnlicher Wasserschlauch	1f,2	3	2	NA	NA	5	0	0	1	0	0	6	NA									NA						13.14
9POH586300	Utricularia	vulgaris	agg.	Gewöhnlicher Wasserschlauch	1f,2	V	3	NA	NA	1	0	4	0	0	0	5	NA									NA						13.14
9POH587600	Vaccinium	oxycoccos	s.l.	Gewöhnliche Moosbeere	1f,2	3	3	NA	NA	13	0	12	0	0	0	25	1	1	1	2	3	1	2	4	0	0	1	2	0	1	3	13.14
9POH579500	Veronica	scutellata		Schild-Ehrenpreis	1f,2	*	3	NA	NA	7	0	3	4	0	0	14	1	1	1	3	4	1	2	3	0	0	2	3	0	1	2	13.14
	<b>Summe Flora</b>																<b>96</b>	<b>96</b>	<b>181</b>	<b>256</b>	<b>267</b>	<b>95</b>	<b>170</b>	<b>203</b>	<b>8</b>	<b>85</b>	<b>161</b>	<b>172</b>	<b>-1</b>	<b>74</b>	<b>107</b>	
	<b>Mittelwert Flora</b>																<b>1.01</b>	<b>1.01</b>	<b>1.91</b>	<b>2.69</b>	<b>2.81</b>	<b>1</b>	<b>1.79</b>	<b>2.14</b>	<b>0.08</b>	<b>0.9</b>	<b>1.6</b>	<b>1.81</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.78</b>	<b>1.13</b>	

## Erläuterung

**Beispiel:** Die Art wird aufgrund ihrer Lebensraumansprüche nicht betrachtet und von der Bewertung ausgenommen.

**Beispiel:** Die Art wurde aufgrund ihrer typischen Lebensraumansprüche in die Betrachtung mit aufgenommen.

NA: Die Eigenschaft der betreffenden Art ist nicht vorhanden oder es konnte bisher keine Literatur oder Experteneinschätzung zur weiteren Einschätzung gefunden werden.

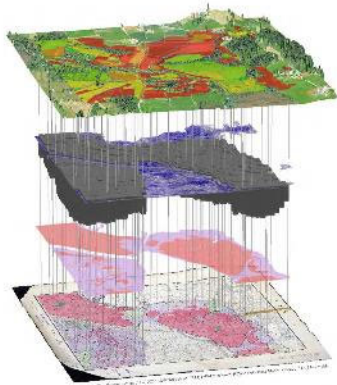
## Quellen:

Nr.		Quelle
1	a	Reinhardt, R. & Bolz, R. (2011): Rote Liste und Gesamtartenliste der Tagfalter (Rhopalocera) (Lepidoptera: Papilionoidea et Hesperioidea) Deutschlands. – In: Binot-Hafke, M., Balzer, S., Becker, N., Gruttke, H., Haupt, H., Hofbauer, N., Ludwig, G., Matzke-Hajek, G. & Strauch, M. (Bearb.): Rote Liste der gefährdeten Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 3: Wirbellose Tiere (Teil 1). – Bonn (Bundesamt für Naturschutz). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (3): 167–194.
	b	Grüneberg, C.; Bauer, H.-G.; Haupt, H.; Hüppop, O.; Ryslavý, T. & Südbeck, P. (2016): Rote Liste der Brutvögel Deutschlands. 5. Fassung, 30. November 2015. – Berichte zum Vogelschutz 52: 19–67.

c	Maas, S.; Detzel, P. & Staudt, A. (2011): Rote Liste und Gesamtartenliste der Heuschrecken (Saltatoria) Deutschlands. – In: Binot-Hafke, M., Balzer, S., Becker, N., Gruttke, H., Haupt, H., Hofbauer, N., Ludwig, G., Matzke-Hajek, G. & Strauch, M. (Bearb.): Rote Liste der gefährdeten Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 3: Wirbellose Tiere (Teil 1). – Bonn (Bundesamt für Naturschutz). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (3): 577–606.
d	Ott, J.; Conze, K.-J.; Günther, A.; Lohr, M.; Mauersberger, R.; Roland, H.-J. & Suhling, F. (2021): Rote Liste und Gesamtartenliste der Libellen (Odonata) Deutschlands. – In: Ries, M.; Balzer, S.; Gruttke, H.; Haupt, H.; Hofbauer, N.; Ludwig, G. & Matzke-Hajek, G. (Red.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands, Band 5: Wirbellose Tiere (Teil 3). – Münster (Landwirtschaftsverlag). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (5): 659-679
e	Schmidt, J.; Trautner, J. & Müller-Motzfeld, G. (2016): Rote Liste und Gesamtartenliste der Laufkäfer (Coleoptera: Carabidae) Deutschlands. – In: Gruttke, H., Balzer, S., Binot-Hafke, M., Haupt, H., Hofbauer, N., Ludwig, G., Matzke-Hajek, G. & Ries, M. (Bearb.): Rote Liste der gefährdeten Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 4: Wirbellose Tiere (Teil 2). – Bonn (Bundesamt für Naturschutz). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (4): 139–204.
f	Metzing, D.; Garve, E.; Matzke-Hajek, G.; Adler, J.; Bleeker, W.; Breunig, T.; Caspari, S.; Dunkel, F.G.; Fritsch, R.; Gottschlich, G.; Gregor, T.; Hand, R.; Hauck, M.; Korsch, H.; Meierott, L.; Meyer, N.; Renker, C.; Romahn, K.; Schulz, D.; Täuber, T.; Uhlemann, I.; Welk, E.; Weyer, K. van de; Wörz, A.; Zahlheimer, W.; Zehm, A. & Zimmermann, F. (2018): Rote Liste und Gesamtartenliste der Farn- und Blütenpflanzen (Tracheophyta) Deutschlands. – In: Metzing, D.; Hofbauer, N.; Ludwig, G. & Matzke-Hajek, G. (Red.): Rote Liste gefährdeter Tiere, Pflanzen und Pilze Deutschlands. Band 7: Pflanzen. – Münster (Landwirtschaftsverlag). – Naturschutz und Biologische Vielfalt 70 (7): 13-358.
2	Bundesamt für Naturschutz. 2019. Liste der in Deutschland vorkommenden Arten der Anhänge II, IV, V der FFH-Richtlinie (92/43/EWG)
3	R. Reinhardt, A. Harpke, S. Caspari, M. Dolek, E. Kühn, M. Musche, R. Trusch, M. Wiemers, J. Settele Verbreitungsatlas der Tagfalter und Widderchen Deutschland 2020
4	J. Klaiber, F. Altermatt, S. Birrer, Y. Chittaro, F. Dziock, Y. Gonseth, R. Hoess, D. Keller, H. Kuchler, H. Luka, U. Manzke, A. Müller, M.A. Pfeifer, C. Roesti, K. Schneider, J. Schlegel, P. Sonderegger, T. Walter, R. Holderegger, A. Bergamini, 2017. Fauna Indicativa. Tabelle der Tagfalter.
5	Bearbeitet von H. Schlumprecht, G. Waeber Heuschrecken in Bayern. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, der Deutschen Gesellschaft für Orthopterologie und dem Deutschen Verband für Landschaftspflege e.V. 1998
6	J. Klaiber, F. Altermatt, S. Birrer, Y. Chittaro, F. Dziock, Y. Gonseth, R. Hoess, D. Keller, H. Kuchler, H. Luka, U. Manzke, A. Müller, M.A. Pfeifer, C. Roesti, K. Schneider, J. Schlegel, P. Sonderegger, T. Walter, R. Holderegger, A. Bergamini, 2017. Fauna Indicativa. Tabelle der Heuschrecken.
7	Bearbeitet von K. Kuhn, K. Burbach Libellen in Bayern. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz und Bund Naturschutz in Bayern e.V. 1998
8	J. Klaiber, F. Altermatt, S. Birrer, Y. Chittaro, F. Dziock, Y. Gonseth, R. Hoess, D. Keller, H. Kuchler, H. Luka, U. Manzke, A. Müller, M.A. Pfeifer, C. Roesti, K. Schneider, J. Schlegel, P. Sonderegger, T. Walter, R. Holderegger, A. Bergamini, 2017. Fauna Indicativa. Tabelle der Libellen.

9	J. Klaiber, F. Altermatt, S. Birrer, Y. Chittaro, F. Dziock, Y. Gonseth, R. Hoess, D. Keller, H. Kuchler, H. Luka, U. Manzke, A. Müller, M.A. Pfeifer, C. Roesti, K. Schneider, J. Schlegel, P. Sonderegger, T. Walter, R. Holderegger, A. Bergamini, 2017. Fauna Indicativa. Tabelle der Laufkäfer.
10	Bearbeitet von Dr. T. Rödl, B. Rudolph, I. Geiersberger, K. Weixler, A. Görden Atlas der Brutvögel in Bayern. Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, dem Landesbund für Vogelschutz in Bayern e.V. und der Ornithologischen Gesellschaft in Bayern e.V. 1998
11	H.G. Bauer, E. Bezzel, W. Fiedler, 2012, Das Kompendium der Vögel Mitteleuropas - Ein umfassendes Handbuch zur Biologie, Gefährdung und Schutz.
12	Experteneinschätzung Prof. Dr. Christoph Moning (HSWT)
13	Experteneinschätzung Prof. Dr. Matthias Drösler (HSWT)
14	Botanischer Informationsknoten Bayern: Steckbriefe zu den Gefäßpflanzen <a href="https://daten.bayernflora.de/de/info_pflanzen.php">https://daten.bayernflora.de/de/info_pflanzen.php</a>

# 13.16 Flyer



Historische und aktuelle Daten zur Moorwasserführung, Moorprozessorient, THG-Emissionen und Landschaftsbau bilden zusammen mit der Klimamodellierung die Grundlage für Prognosen und Szenarien zu zukünftiger Wasserständen und Treibhausgasen und der Moorerosion.

gefördert durch:



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

## Verantwortliche

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf  
Institut für Ökologie und Landschaft  
Prof. Dr. Matthias Drösel  
E-Mail: matthias.droesel@hswt.de

Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement  
Prof. Dr. Ingrid Marokh Disse  
E-Mail: markus.disse@tum.de

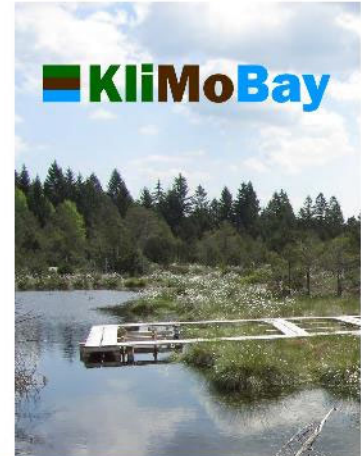
Bayer, Landesanstalt für Landwirtschaft  
Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau  
Dr. Annette Frohstner  
E-Mail: Agrarökologie@LIL.bayern.de

Ludwig-Maximilians-Universität München  
Department für Geographie  
Prof. Dr. Falk Ludwig  
E-Mail: f.ludwig@lmu.de

weitere Informationen zum Projekt unter [www.klimobay.de](http://www.klimobay.de)



Projektleitung: Johannes Klum, Thomas Blüchl, Heiko Meyer, Thomas Barmann, Julian Weiler, Alexander Grotzer, Jennifer Huber-Grotzer



# Klimaschutz und Anpassungspotenziale in Mooren Bayerns

## Klimaschutz und Anpassungspotenziale in Mooren Bayerns

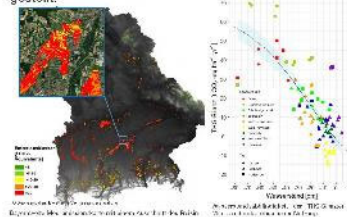
Moore rücken durch ihre natürliche Fähigkeit CO<sub>2</sub> zu speichern zunehmend in den Fokus der Klimapolitik. Allerdings haben ca. 95 % der bayerischen Moore durch Entwässerung und landwirtschaftliche Nutzung ihre CO<sub>2</sub>-Speicherfähigkeit verloren und sind im Gegenteil eine bedeutende Treibhausgasquelle.

Im KliMoBay-Verbundvorhaben werden von der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, der TU München, der LMU München und der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft die Treibhausgase der bayerischen Moorkulisse basierend auf vorhandenen Messreihen modelliert, eine dynamische Wasserstandskarte entwickelt, Bodeninformationen gesammelt und über Fernerkundung Hebung- und Sackungsprozesse bestimmt. Auf dieser Basis können für Bayern erstmals Handlungsoptionen für Wiedervernässungsprojekte aufgezeigt, Flächen priorisiert und Synergien und Restriktionen identifiziert werden. Wesentliches Ergebnis des Projekts ist die erstmalige Entwicklung von gesamtflächendeckenden Klimaschutzpotenzialkarten und Anpassungspotenzialkarten mit einer Perspektive bis 2050. Damit leistet das KliMoBay-Vorhaben einen wichtigen Beitrag zum zukünftigen Moor- und Klimaschutz in Bayern.



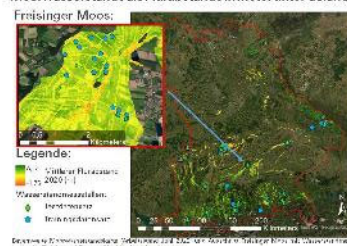
### Treibhausgase & Klimaschutzpotenzial

Über 20 Jahre THG-Messungen an 94 verschiedenen Standorten bilden die Grundlage für die Treibhausgasmodellierung der gesamten bayerischen Moorkulisse. Basierend auf der Abhängigkeit des CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>-Austauschs von Wasserstandshöhe und Landnutzung werden die Emission bayernweit berechnet und szenarienbasiert für zukünftige Nutzungsänderungen und Wasserstände dargestellt.



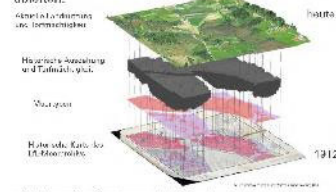
### Hydrologie & Wasserstandskarten

Das Projekt umfasst Messung und prozessbasierte Modellierung von Moorwasserständen an ausgewählten Pilotstandorten als Grundlage für eine flächendetaillierte Modellierung für alle bayerischen Moore mittels Machine Learning. Ziel ist die bayernweite Prognose monatlicher Moorwasserstände als Flurstände in Meter unter Gelände.



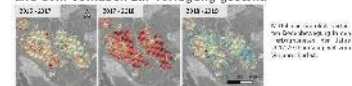
### LFL-Moorarchiv: Mit historischer Moorkulturinformation Zukunft gestalten

Als Nachfolgerin der Königlich Bayerischen Moorkulturanstalt verfügt die LfL über eine umfassende, mehr als 100 Jahre überdeckende Sammlung historischer Dokumente zu Mooren in Bayern. Durch die digitale Erschließung der historischen Information und den Abgleich mit aktuellen Nachforschungen lassen sich regionale Veränderungen analysieren und Entscheidungsgrundlagen ableiten.



### Klimamodellierung & Fernerkundung

Für die Modellierung von Treibhausgasemissionen aus Moorflächen werden räumlich differenzierte Eingangsdaten bereitgestellt. Klimaszenarien werden aus dem Projekt ClimEx werden dafür fachspezifisch aufbereitet und dem Vorhaben zur Verfügung gestellt.



Mit innovativen Methoden aus der Multispektral- und Mikrowellenfernerkundung werden Mahdtermine auf Grünflächen abgeleitet als auch morphologische Dynamiken (z.B. Sackung/Hebung) abgeschätzt. Die Ableitung der Klimaschutzpotenziale der bayerischen Moore wird so unterstützt und in einen fundierten räumlichen Kontext gesetzt.

## 13.17 KliMoBay Moorpegel Aufkleber (2019):




# KliMoBay

**Klimaschutz- und Anpassungspotentiale  
in Mooren Bayerns**


**Lehrstuhl für Hydrologie  
und Flussgebietsmanagement**

Im Rahmen des Projektes KliMoBay wird die Treibhausgasemission bayerischer Moore abgeschätzt. Fällt der Torfkörper trocken, wird er größtenteils zu CO<sub>2</sub> abgebaut. Um die Menge des emittierten CO<sub>2</sub> zu ermitteln, muss der Wasserstand mithilfe von Pegeln wie diesem präzise bestimmt werden. Für weitere Informationen besuchen sie gerne unsere Website (QR-Code):

<https://www.bgu.tum.de/hydrologie/forschung/laufende-projekte/klimobay/>



**Ansprechpartner:**  
Sebastian Friedrich  
sebastian.friedrich@tum.de



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit

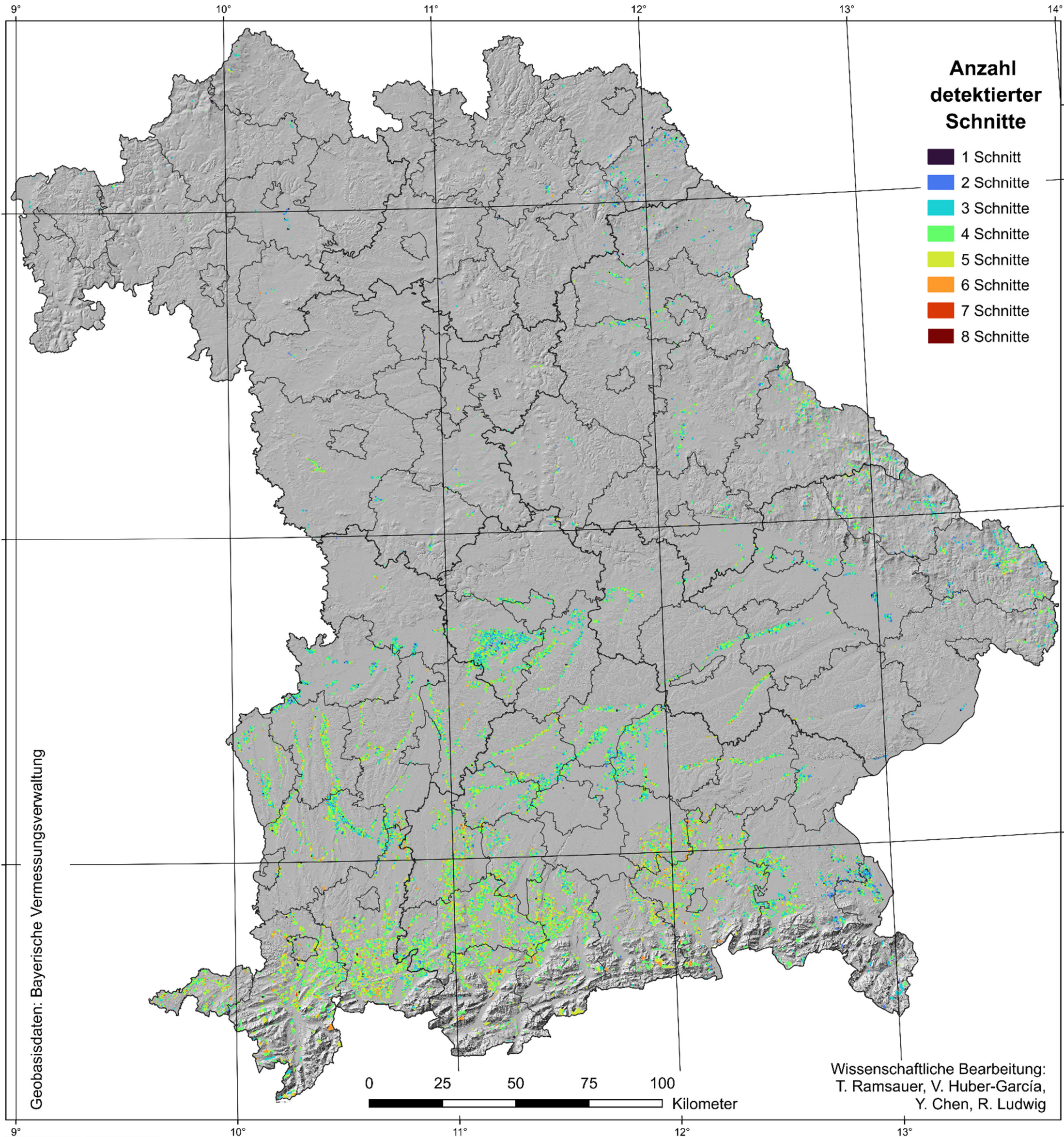


## 13.18 Karten in A3 im Maßstab 1:1.250.000

### Auflistung der folgenden A3 Karten

1. Schnitthäufigkeit von Grünlandflächen Jahr 2020
2. Flurabstandskarte 2020
3. Flurabstandskarte 2030 Nass
4. Flurabstandskarte 2030 Median
5. Flurabstandskarte 2030 Trocken
6. Flurabstandskarte 2040 Nass
7. Flurabstandskarte 2040 Median
8. Flurabstandskarte 2040 Trocken
9. Flurabstandskarte 2050 Nass
10. Flurabstandskarte 2050 Median
11. Flurabstandskarte 2050 Trocken
12. Unsicherheit der Flurabstandskarte 2020
13. Unsicherheit der Flurabstandskarte 2030 Median
14. Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2020
15. Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2030 Median
16. Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2040 Median
17. Klimatische Wasserbilanzkarte Jahr 2050 Median
18. Hydrologisch adressierbare Bereiche
19. Sozioökonomische Restriktionspotenziale
20. Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Anzahl distinkter Privateigentümer je Hektar
21. Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteil Acker
22. Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteil Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen
23. Sozioökonomische Restriktionspotenziale: Flächenanteile in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum
24. Höhenveränderung auf Moorstandorten aus landesweitem DGM-Vergleich
25. Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung
26. Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Limitierende Faktoren
27. Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Grundwasser-Flurabstand als limitierender Faktor
28. Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung: Untergrund als limitierender Faktor
29. Mooremissionskarte 2020
30. Mooremissionskarte 2030
31. Mooremissionskarte 2040
32. Klimaschutzpotenzialkarte: Maximalszenario
33. Klimaschutzpotenzialkarte: Restriktion Sozioökonomie
34. Klimaschutzpotenzialkarte: Restriktion Sozioökonomie inkl. Paludikultur
35. Klimaschutzpotenzialkarte: Durch Landnutzungsanpassung optimiertes Szenario

# Schnitthäufigkeit von Grünlandflächen 2020



**Beschreibung:**

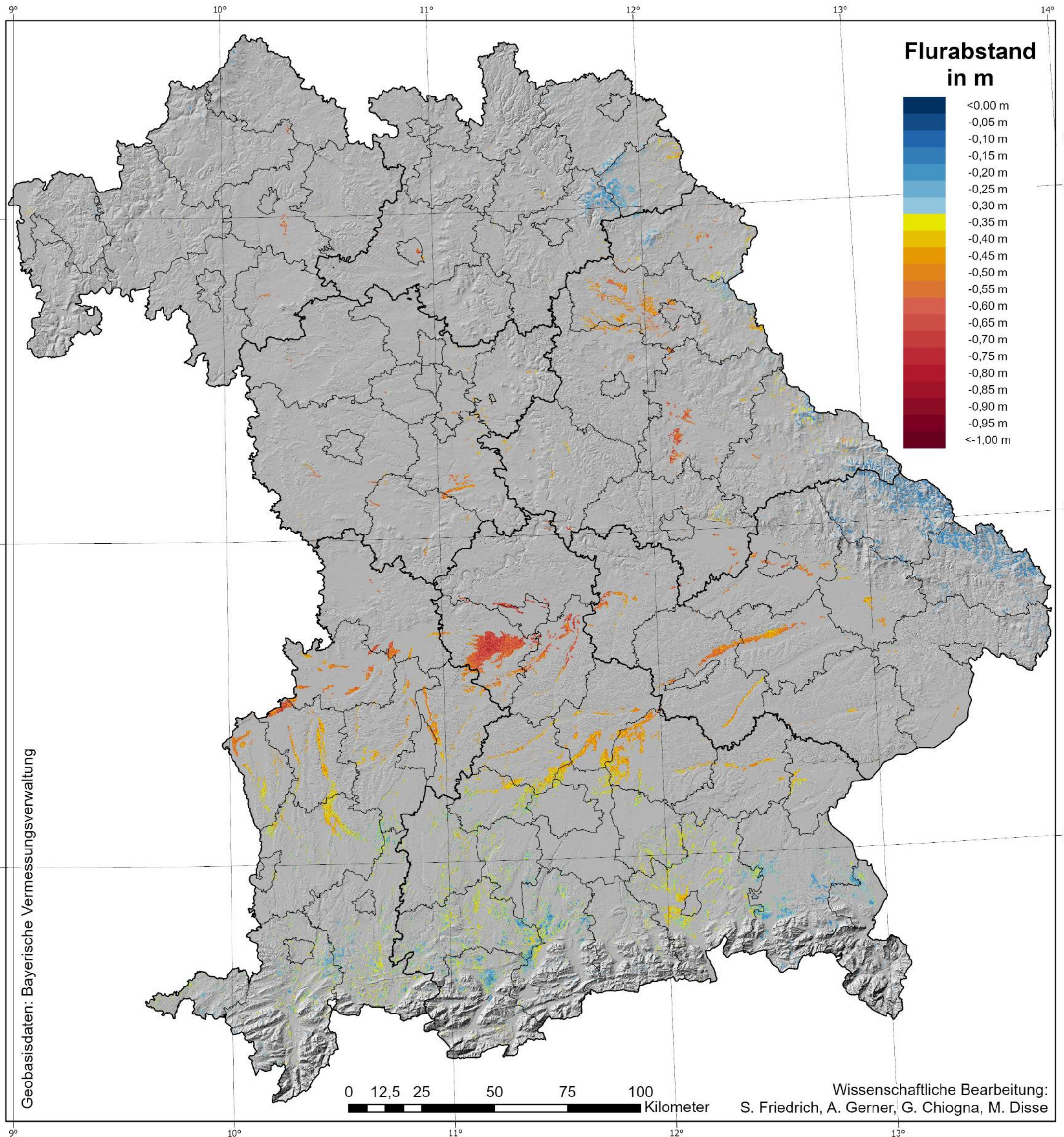
Für Grünlandflächen auf Mooren wurde bayernweit die Schnitthäufigkeit abgeleitet. Dazu wurden multispektrale und Mikrowellenfernerkundungsdaten verwendet. Die daraus generierten, feldbasierten Zeitreihen von Vegetationsindex und interferometrischer Kohärenz erlauben es Vegetationsveränderungen an der Landoberfläche zu detektieren und entsprechend Mahdereignissen zuzuschreiben.





# Flurabstandskarte

Jahr 2020

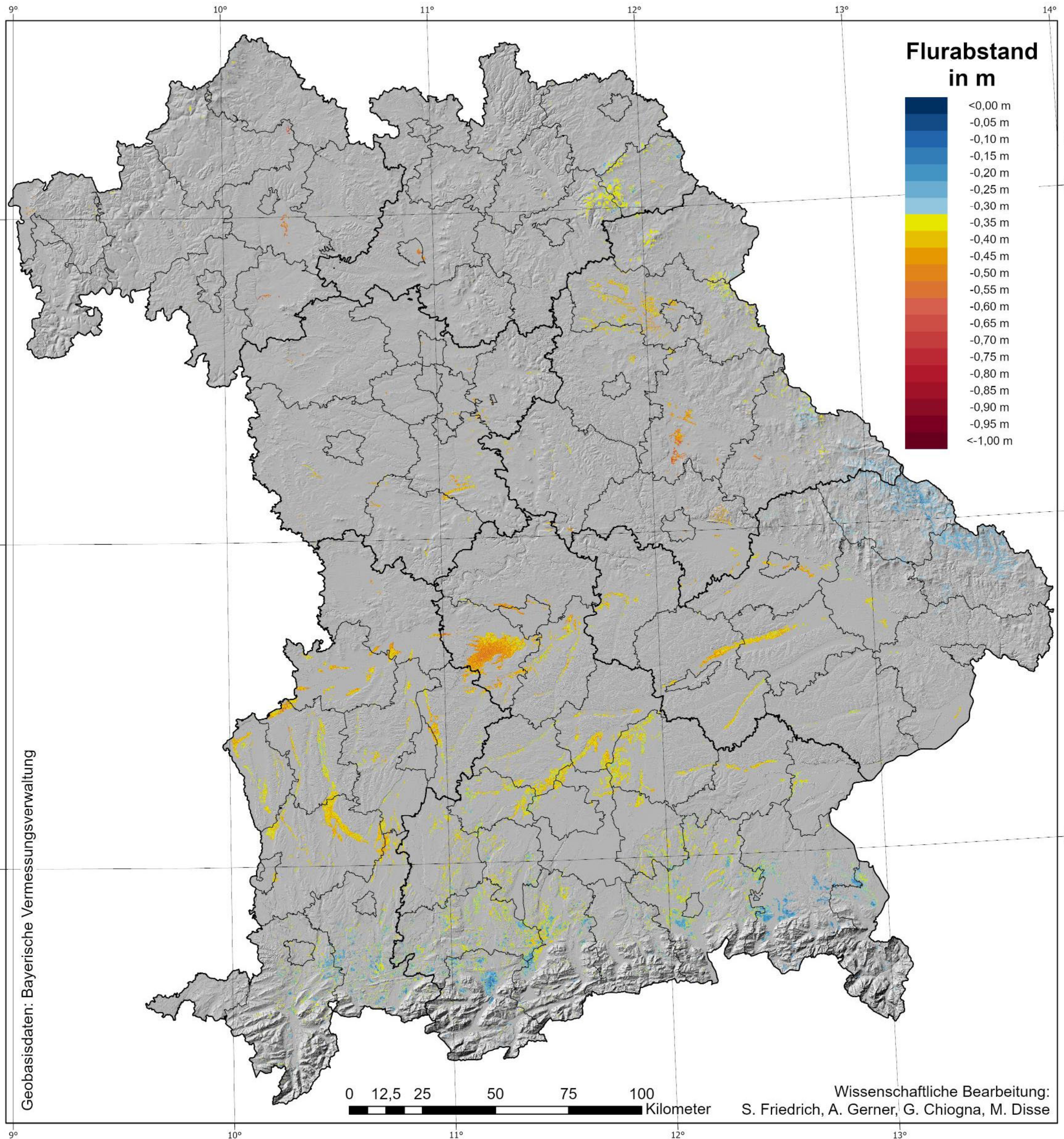


**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten des DWD, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

# Flurabstandskarte

Jahr 2030 Nass



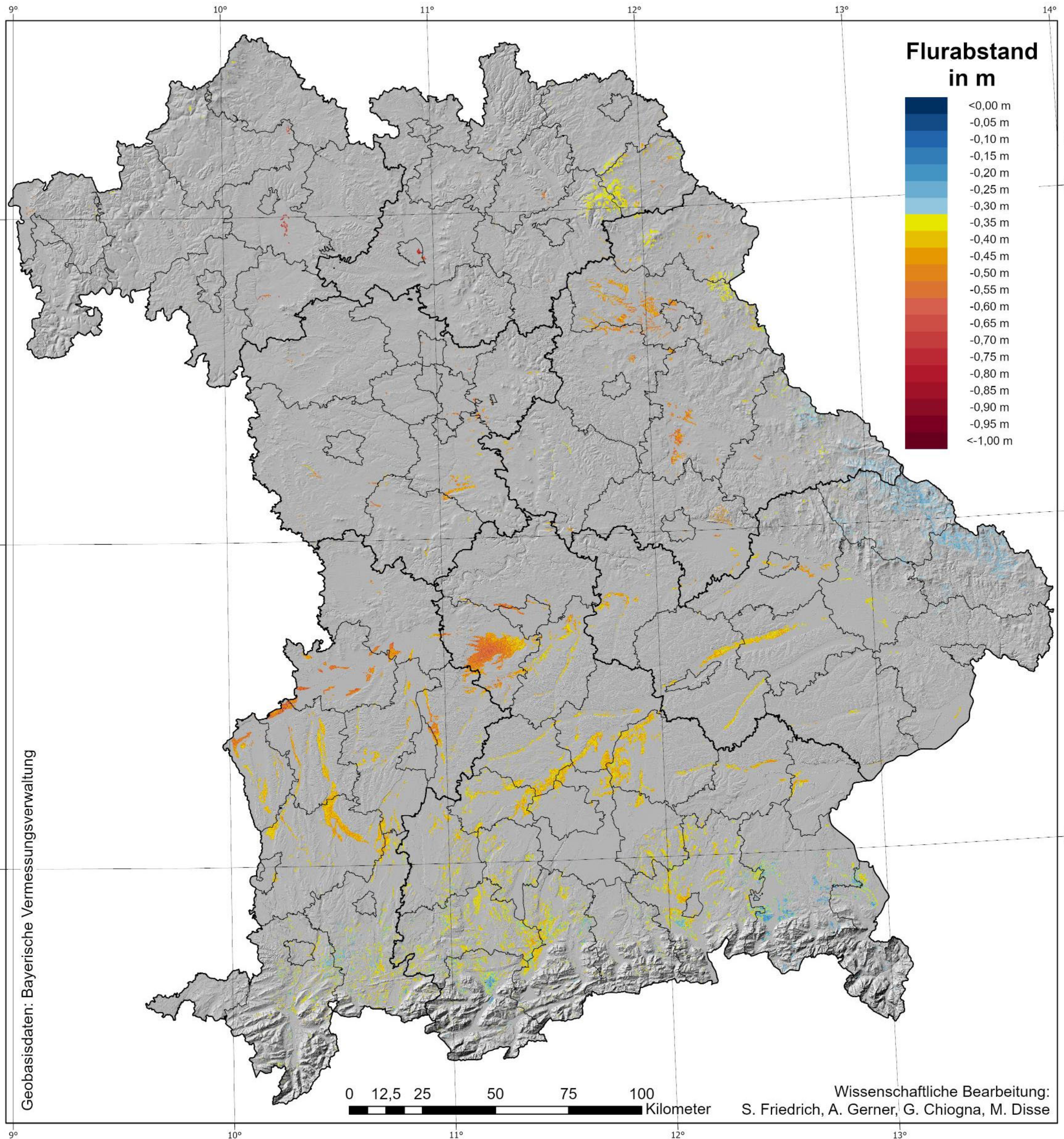
**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Nass: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 trockenere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

Jahr 2030 Median



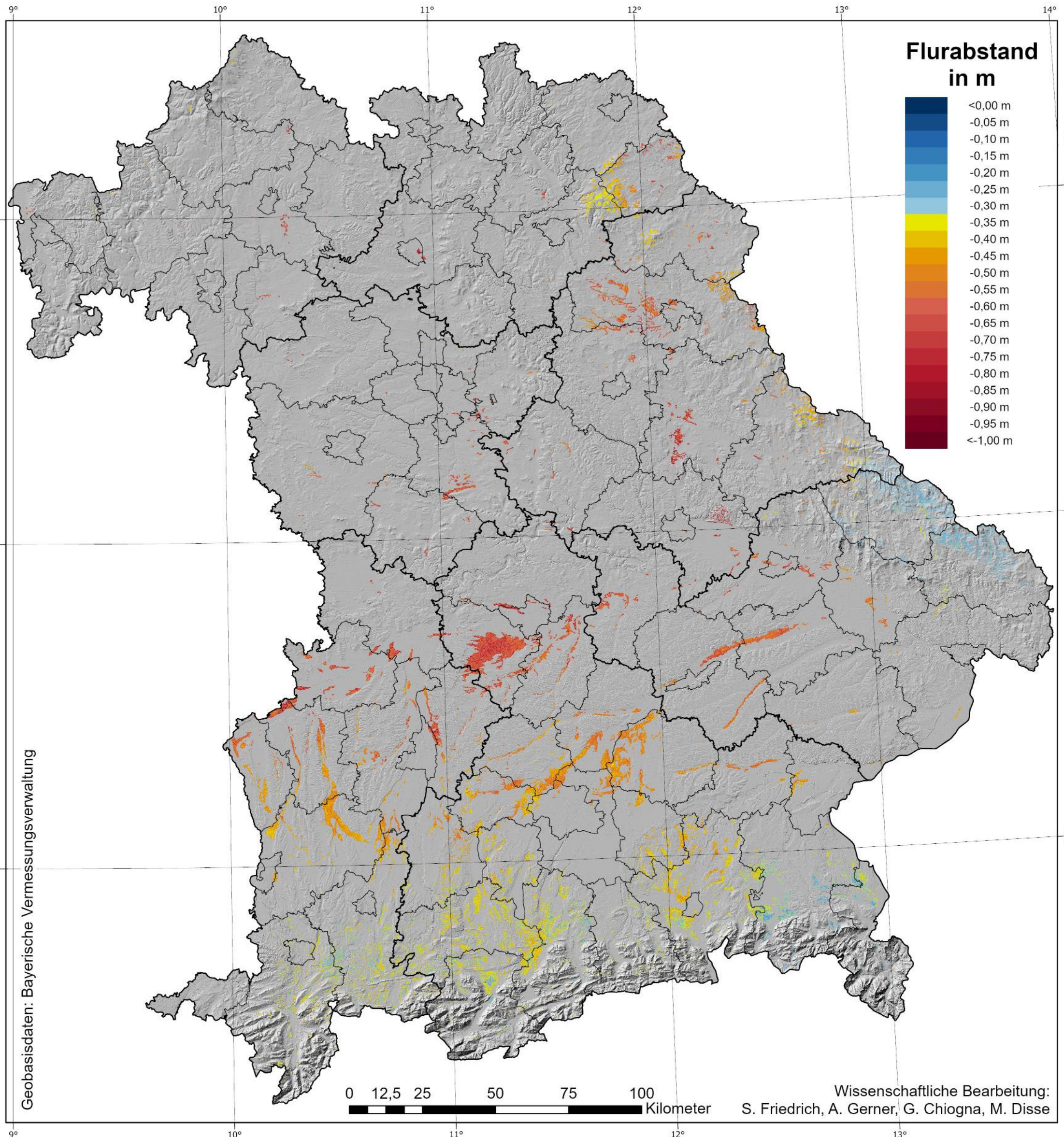
**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

## Jahr 2030 Trocken



**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Trocken: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 nassere Flurabstände vorher.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

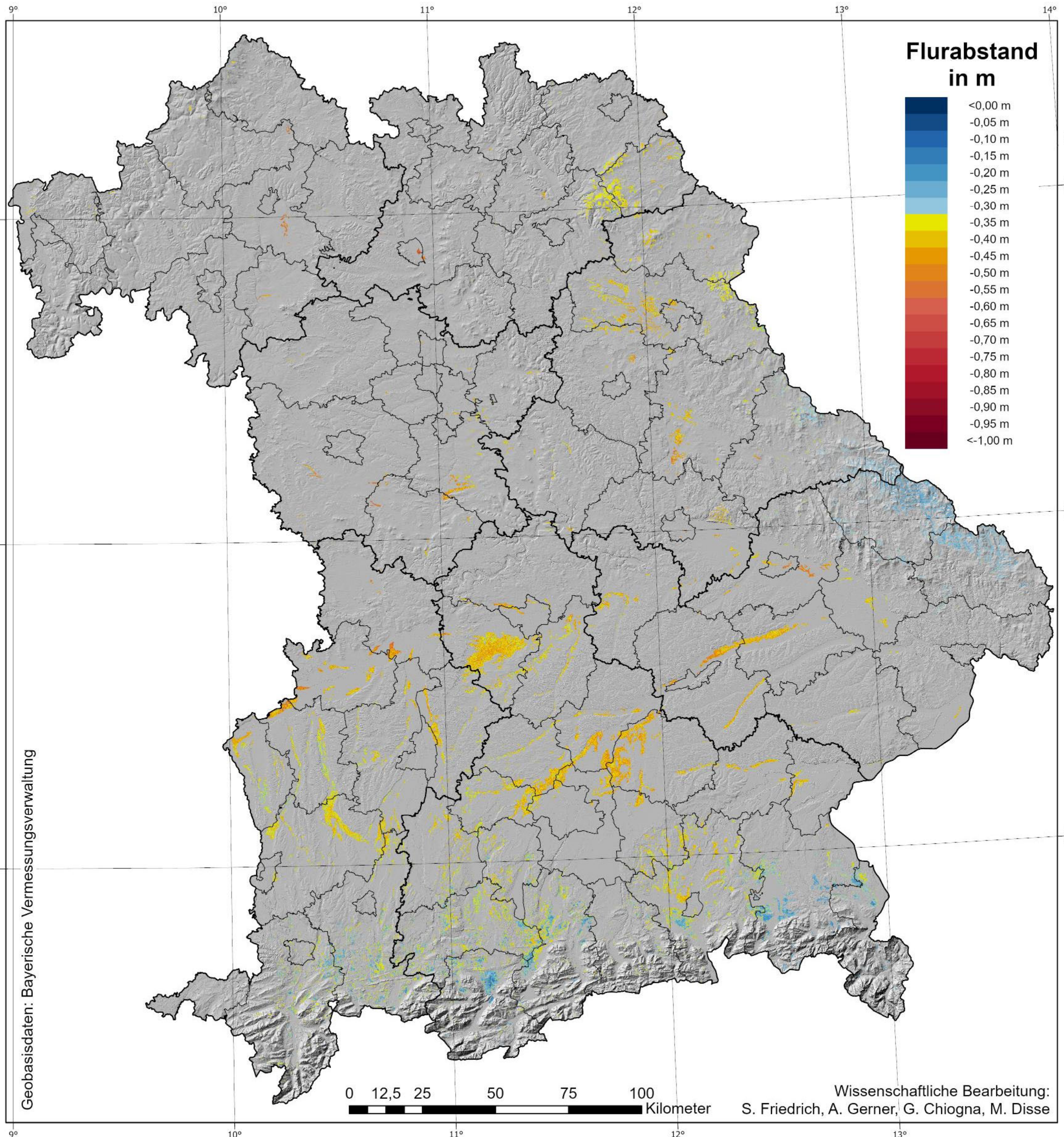


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Flurabstandskarte

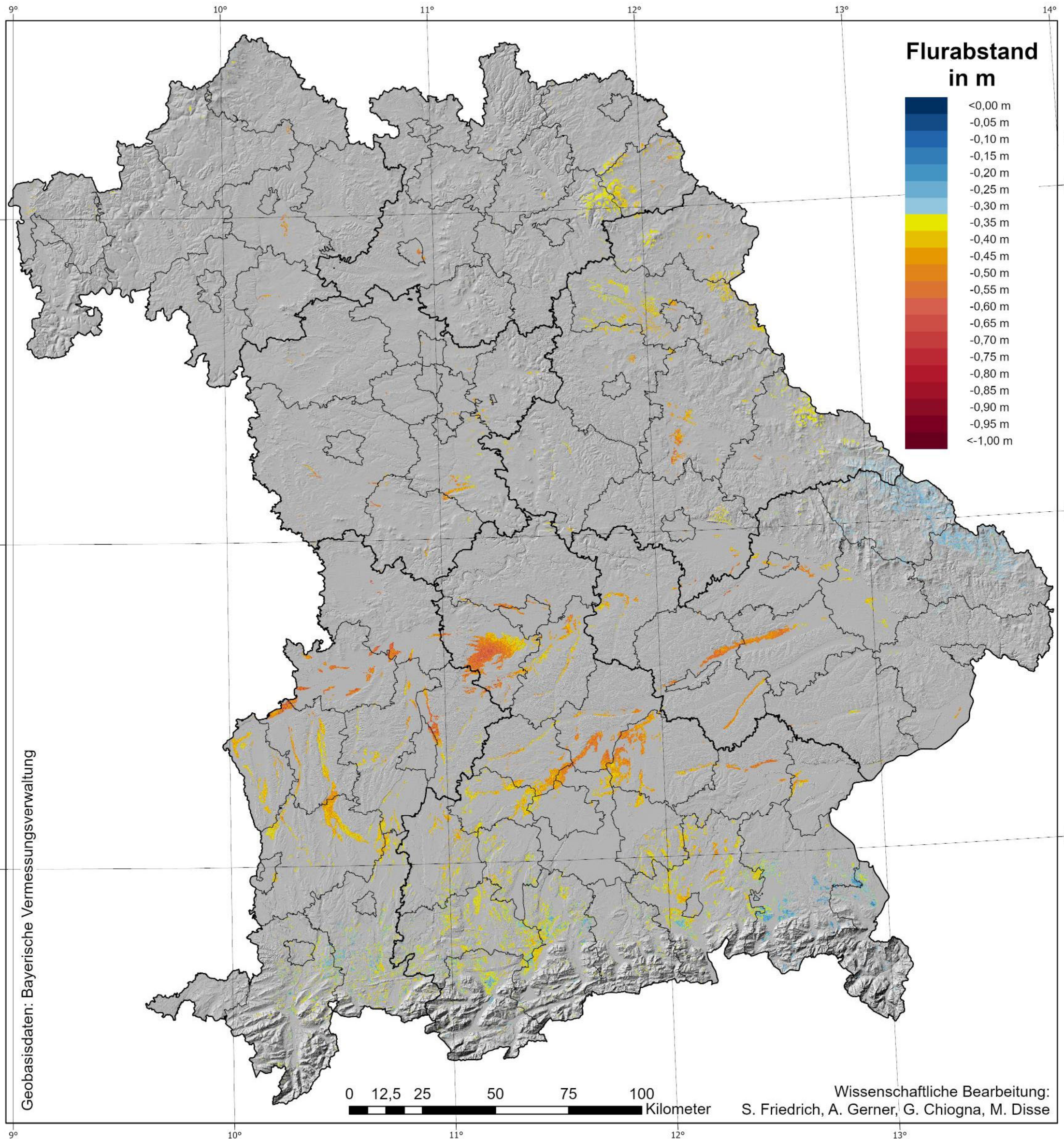
## Jahr 2040 Nass



**Beschreibung:**  
Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.  
Szenario Nass: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 trockenere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

Jahr 2040 Median



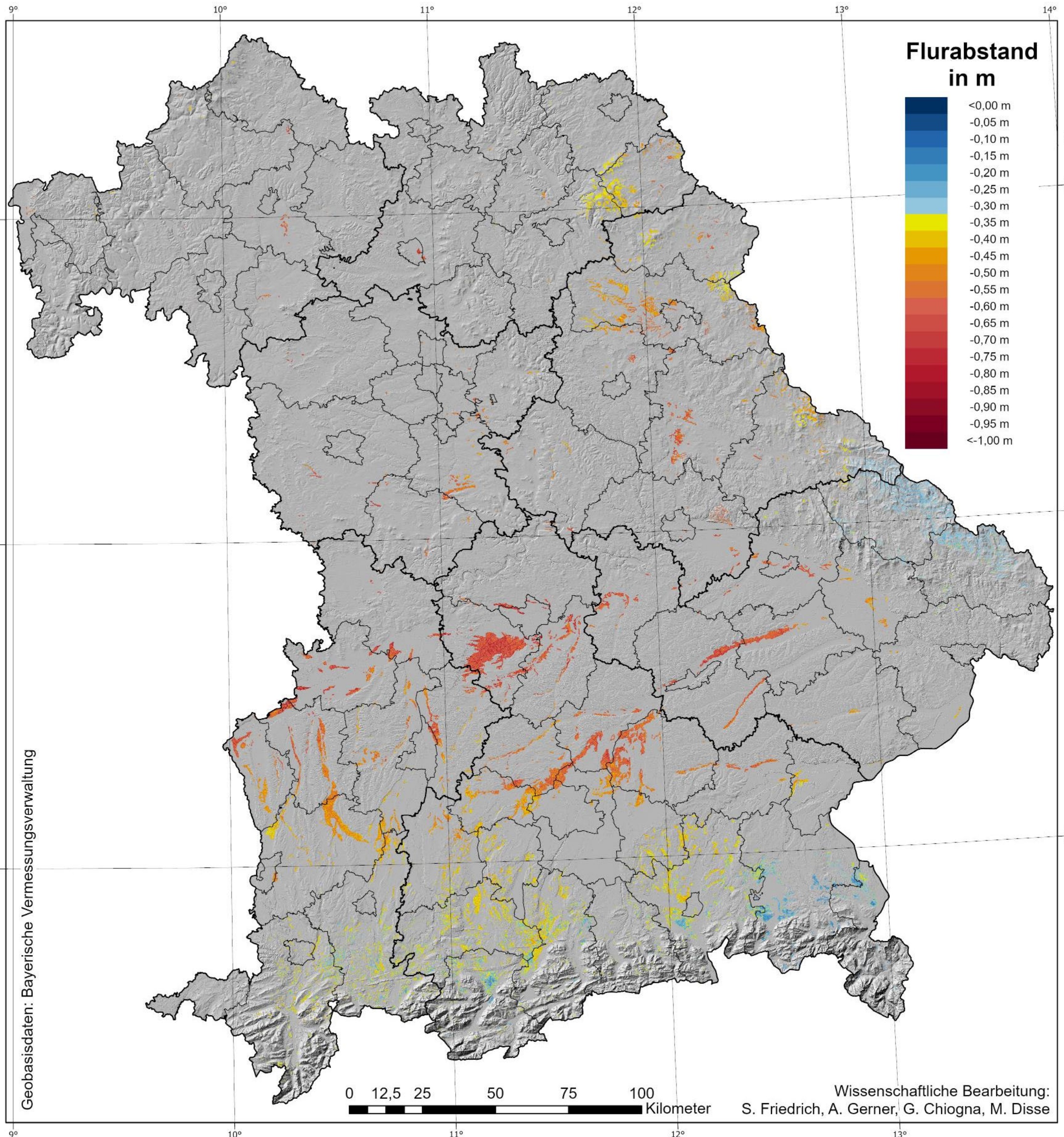
**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

## Jahr 2040 Trocken



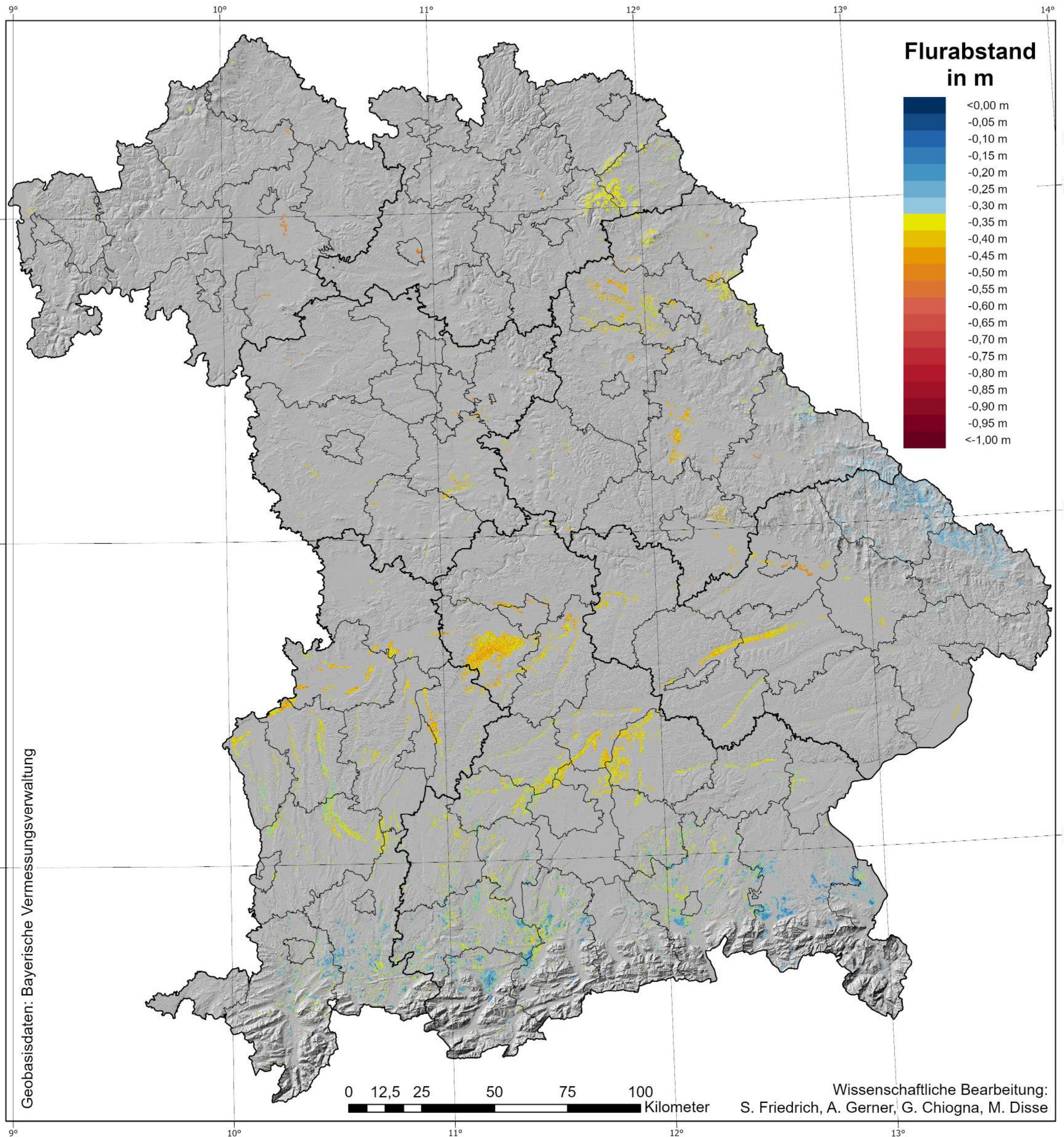
**Beschreibung:**

Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Trocken: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 nassere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

## Jahr 2050 Nass



**Beschreibung:**

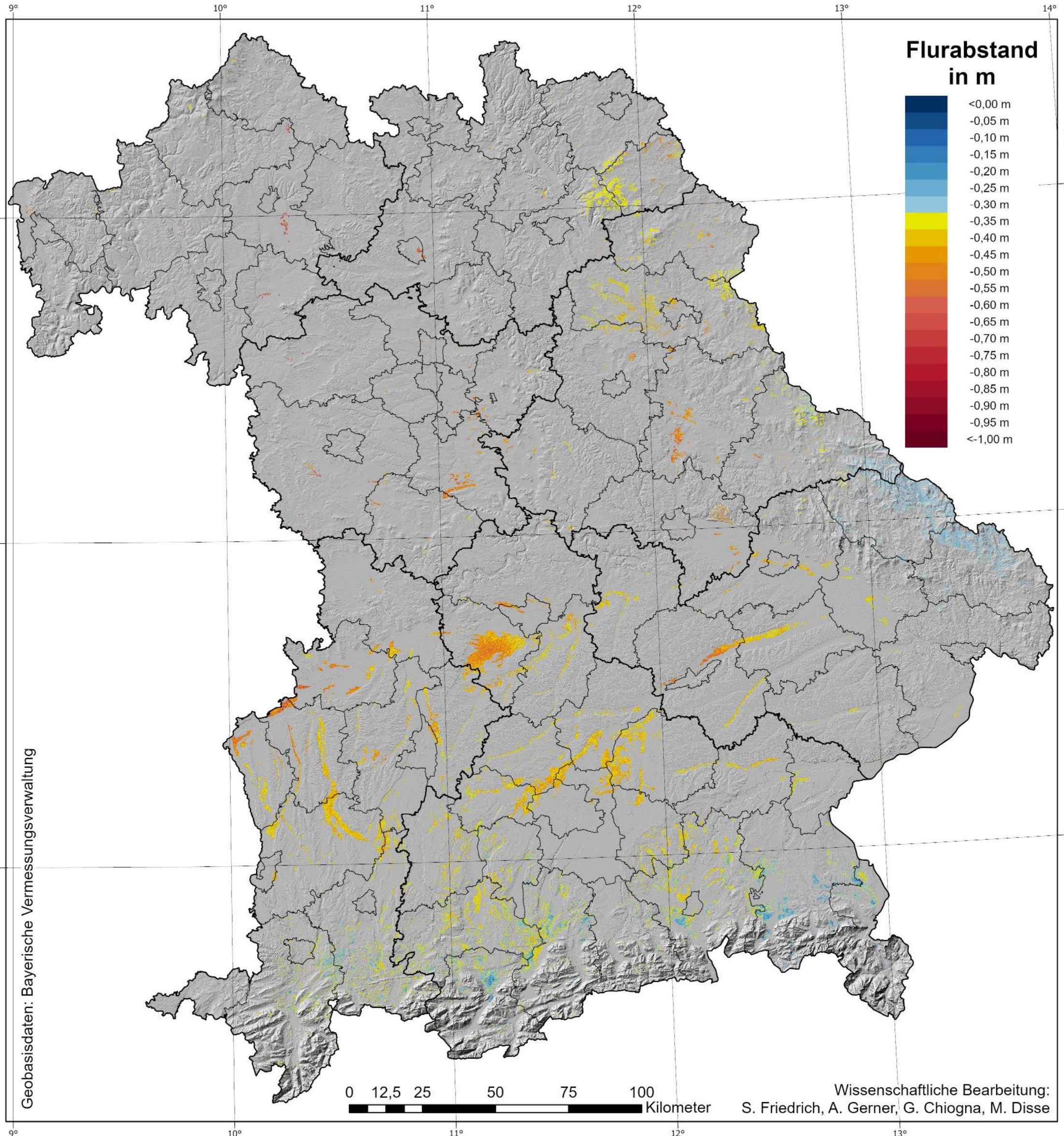
Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.

Szenario Nass: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 trockenere Flurabstände vorher.



# Flurabstandskarte

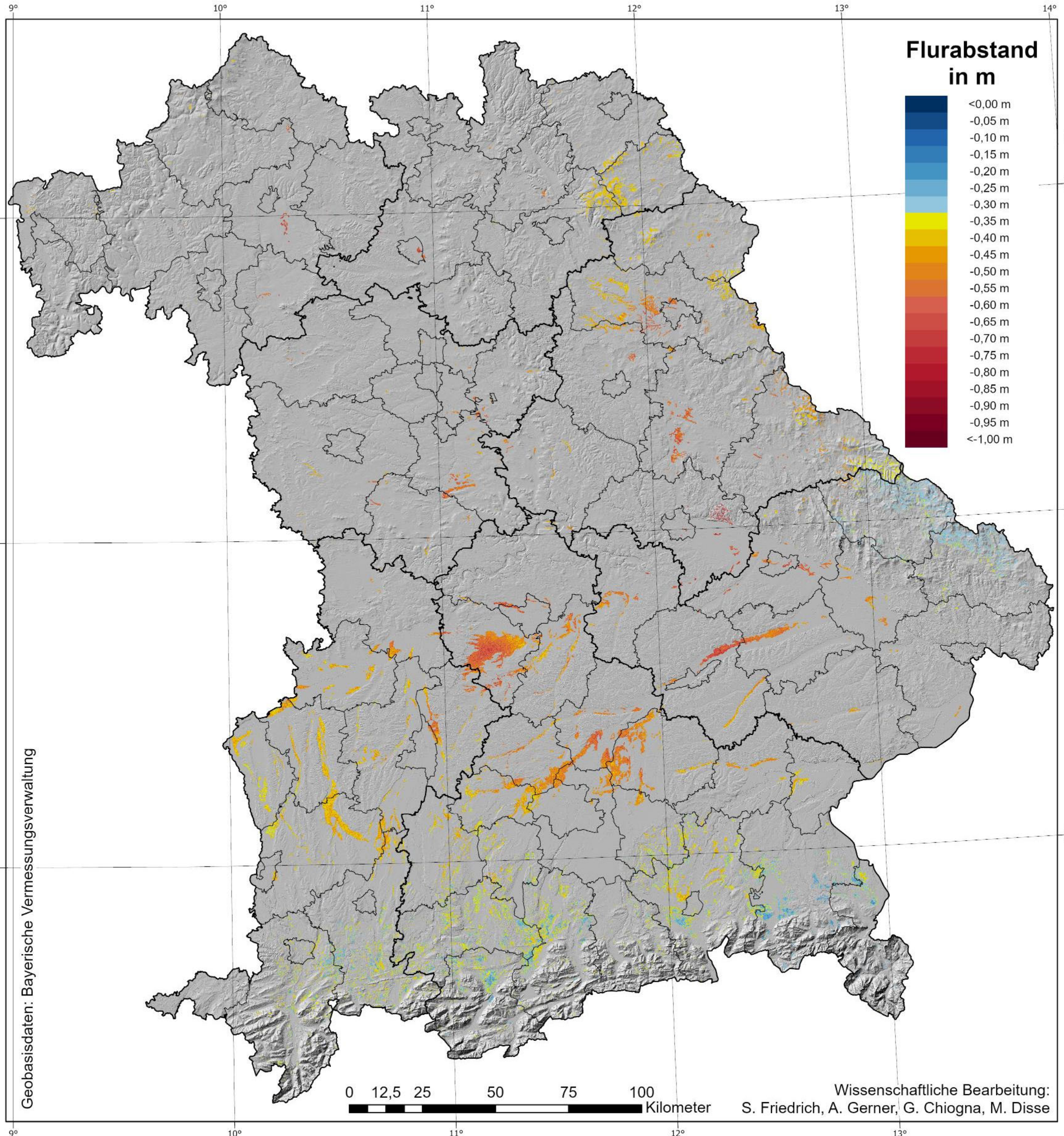
Jahr 2050 Median



**Beschreibung:**  
Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.  
Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

# Flurabstandskarte

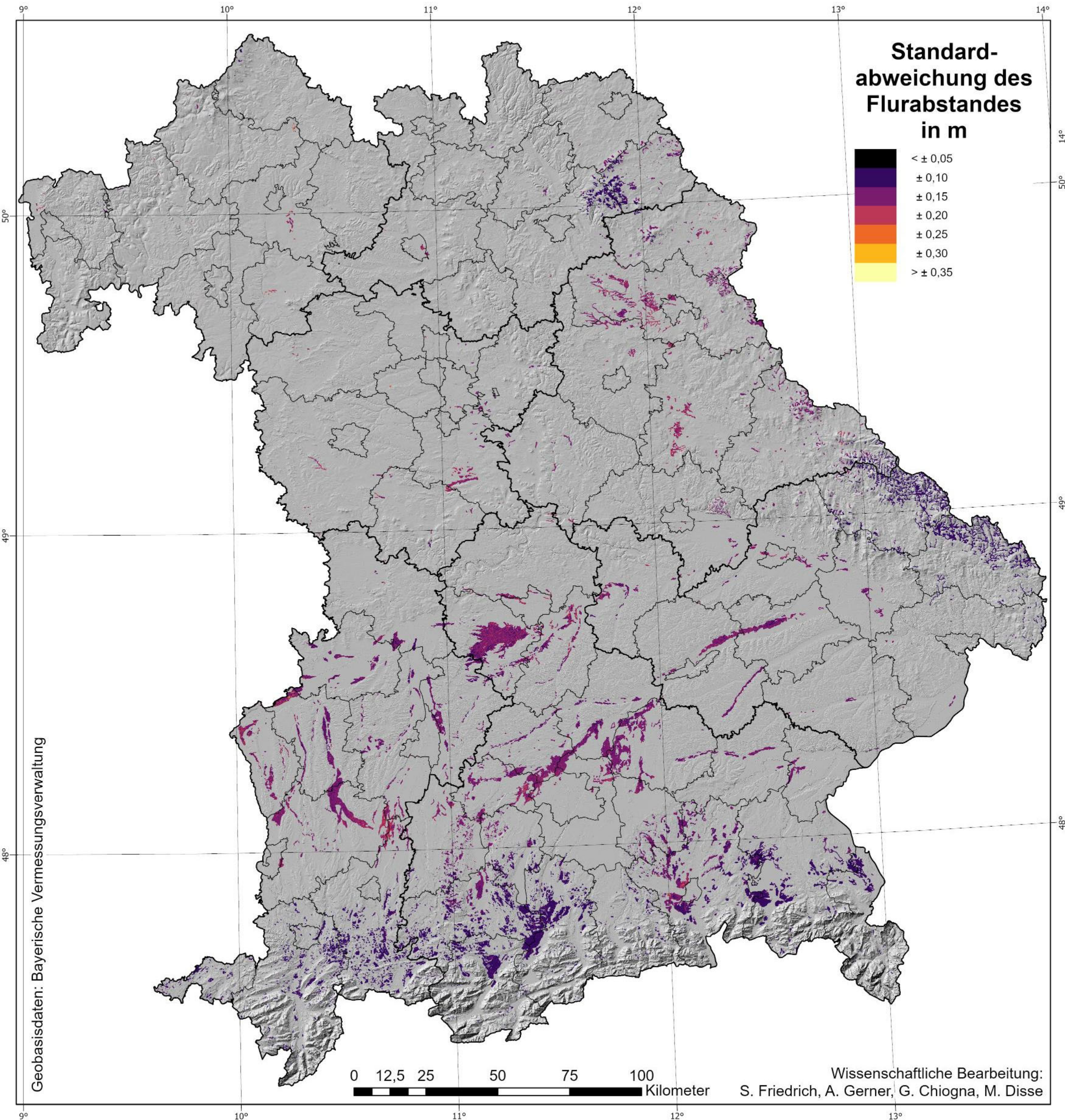
## Jahr 2050 Trocken



**Beschreibung:**  
Die Flurabstandskarte basiert auf statistischen Regionalisierungsmodellen und den Informationen aus bayernweiten Flurabstandsmessungen, Klimadaten der LMU aus dem ClimEx Projekt, Geobasisdaten der bayerischen Vermessungsverwaltung und der Landnutzungskulisse der Landesanstalt für Landwirtschaft.  
Szenario Trocken: von 10 ClimEx-Realisationen sagen 9 nassere Flurabstände vorher.

# Unsicherheit der Flurabstandskarte

Jahr 2020

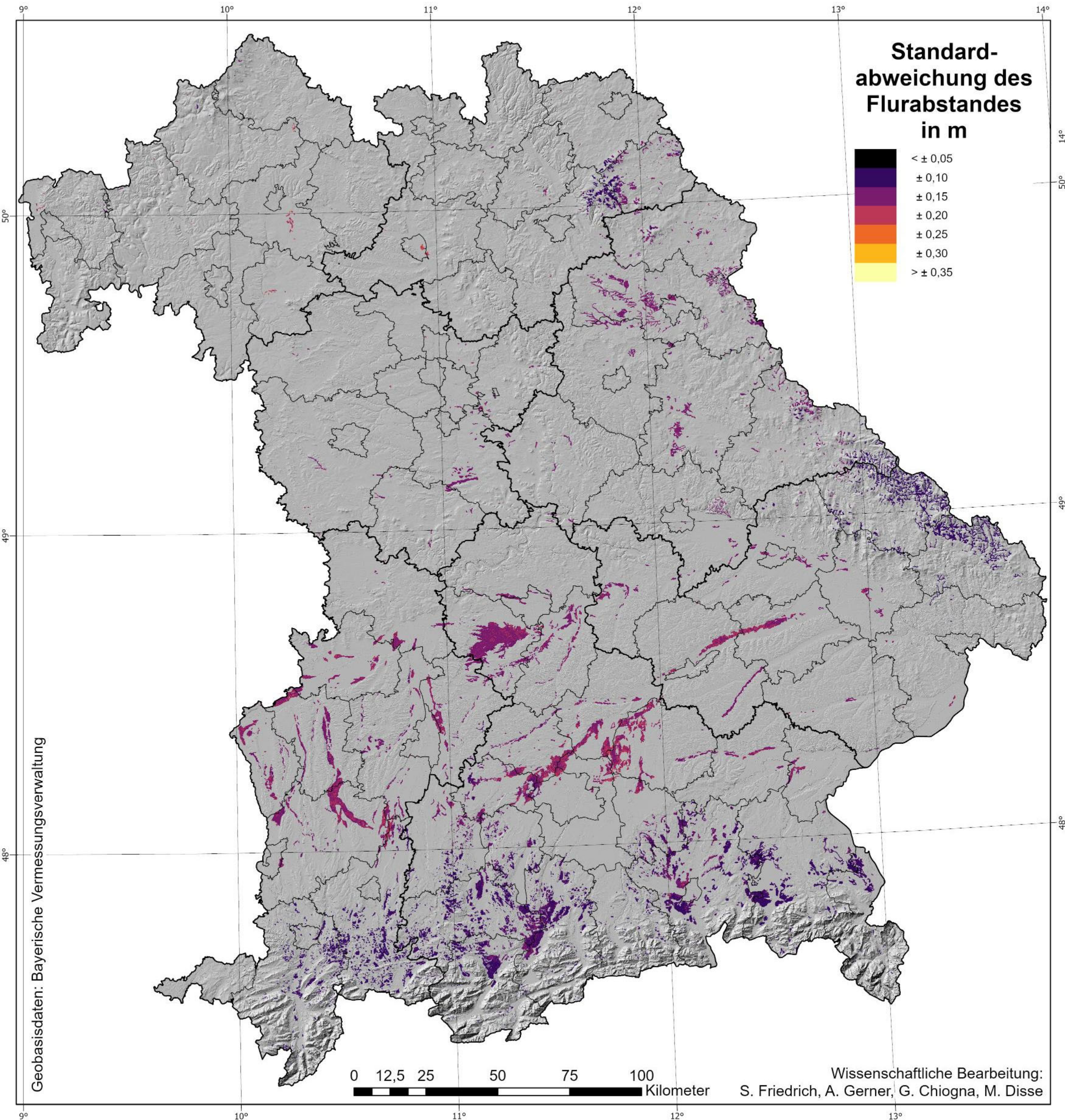


**Beschreibung:**

Die Unsicherheit in der Flurabstandskarte basiert für jeden Rasterpunkt auf der Standardabweichung der 100 statistischen Regionalisierungsmodelle. Die Karte bietet einen Anhaltspunkt, wie präzise der Flurabstand in einer Region vorhergesagt wurde.

# Unsicherheit der Flurabstandskarte

Jahr 2030 Median



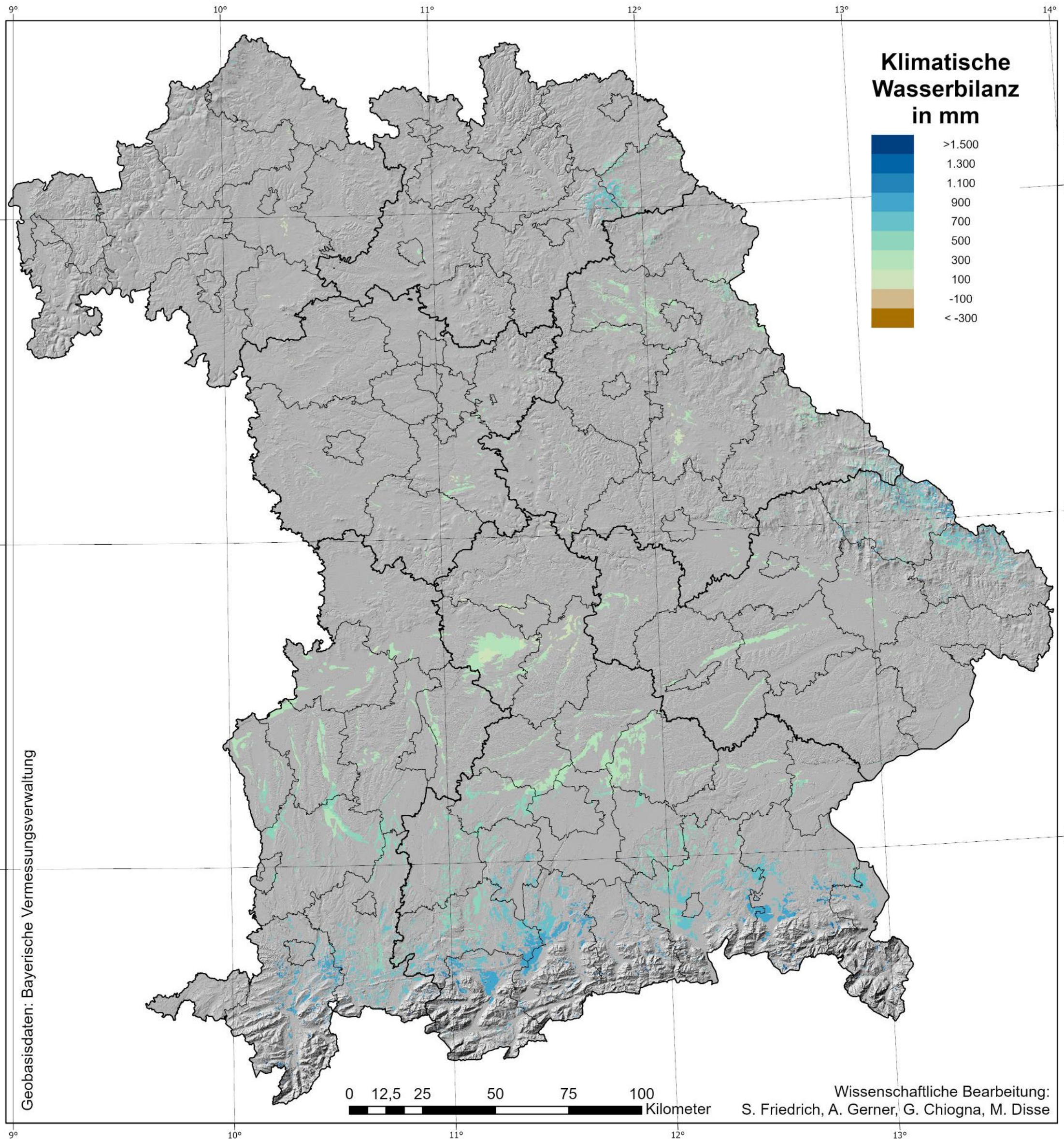
**Beschreibung:**

Die Unsicherheit in der Flurabstandskarte basiert für jeden Rasterpunkt auf der Standardabweichung der 100 statistischen Regionalisierungsmodelle. Die Karte bietet einen Anhaltspunkt, wie präzise der Flurabstand in einer Region vorhergesagt wurde.

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

# Klimatische Wasserbilanzkarte

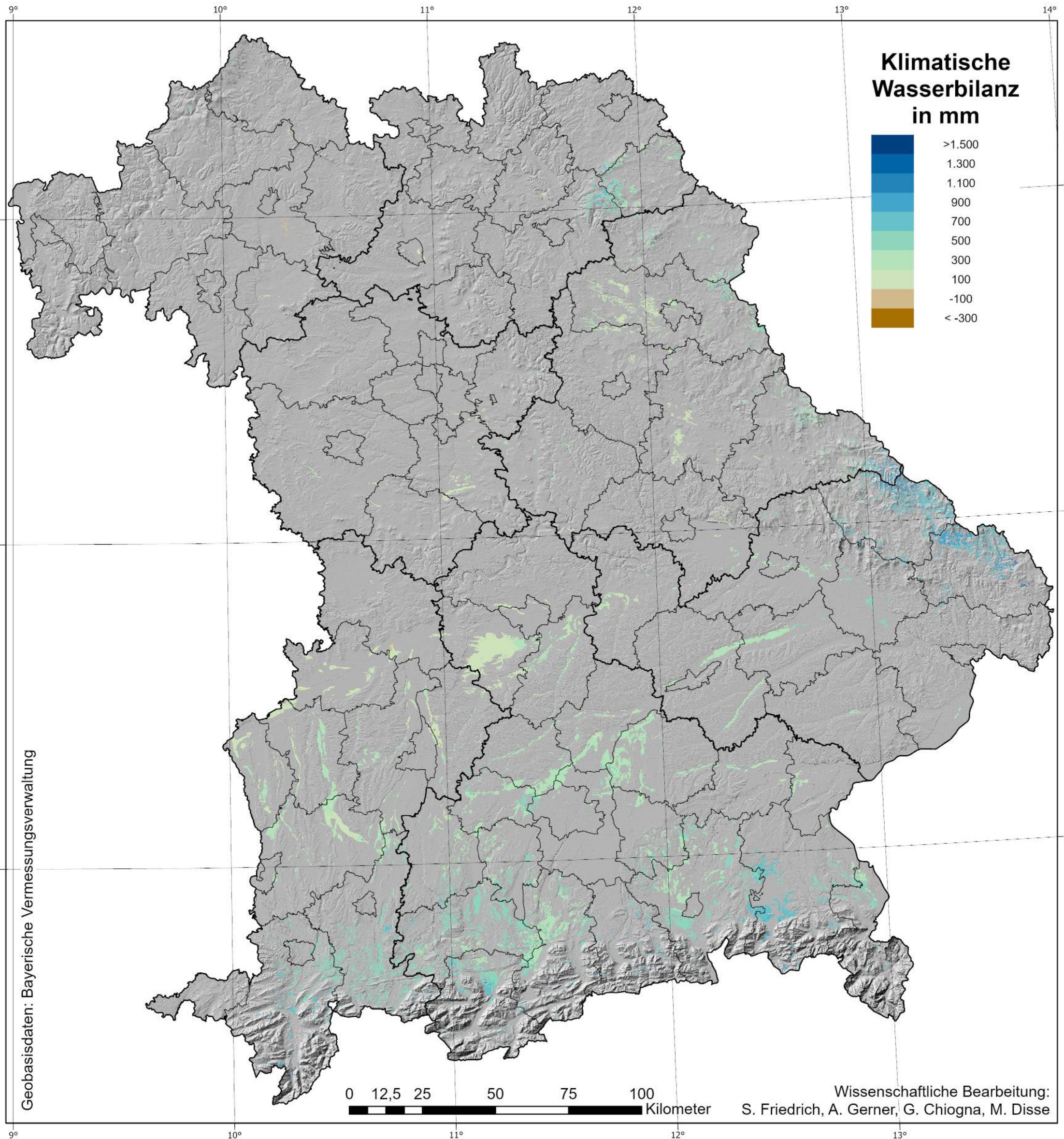
Jahr 2020



Beschreibung:  
Die Karte der Klimatischen Wasserbilanz basiert auf der Differenz aus Niederschlag und Referenzverdunstung ET<sub>0</sub> nach Penman-Monteith, basierend auf Daten des Deutschen Wetterdienstes.

# Klimatische Wasserbilanzkarte

Jahr 2030 Median



**Beschreibung:**

Die Karte der Klimatischen Wasserbilanz basiert auf der Differenz aus Niederschlag und der Referenzverdunstung ET<sub>0</sub> nach Penman-Monteith, basierend auf den Daten der LMU aus dem ClimEx Projekt.

Variante Median entsprechend der Flurabstandskarte:

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

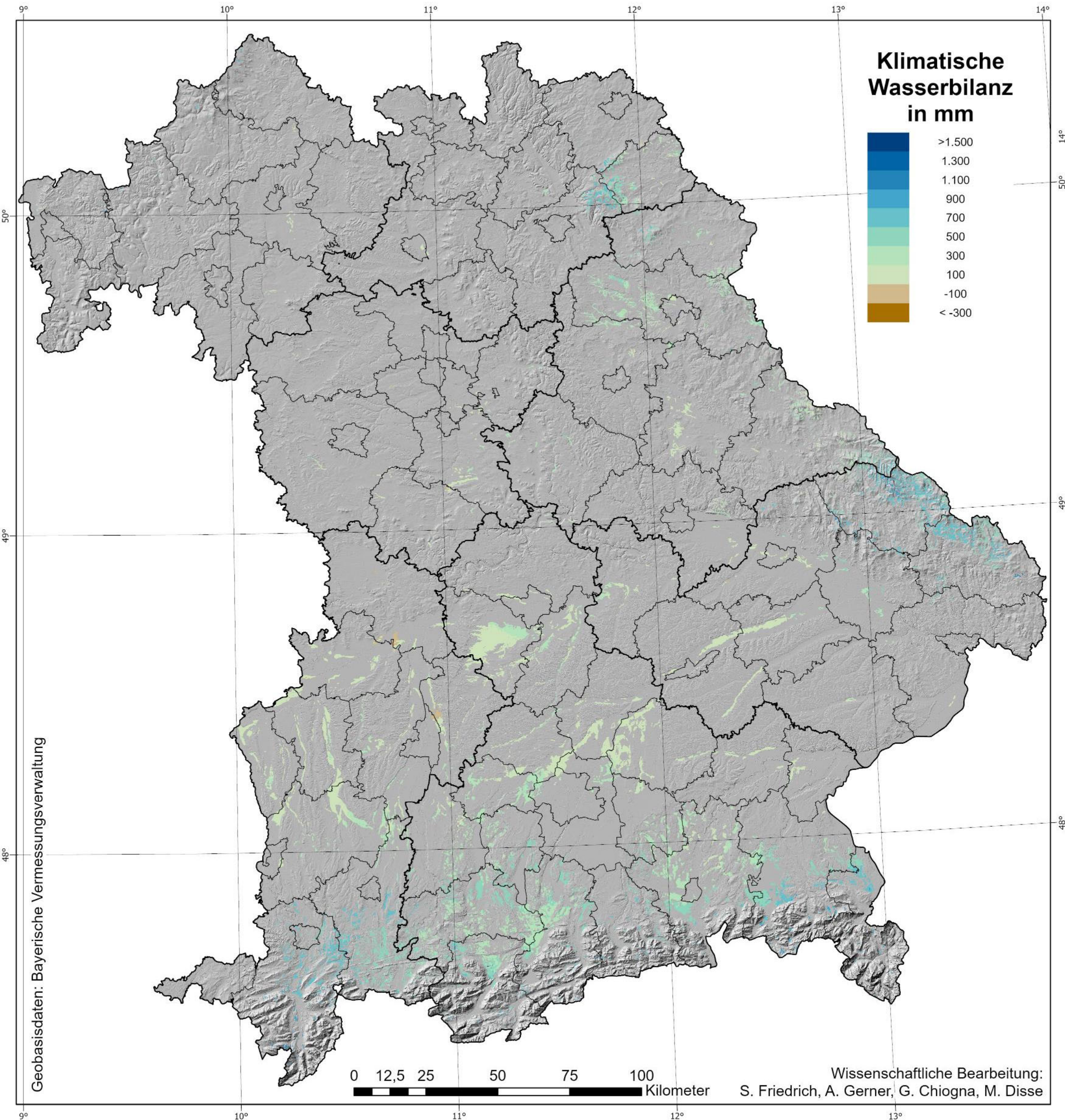


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Klimatische Wasserbilanzkarte

Jahr 2040 Median



**Beschreibung:**

Die Karte der Klimatischen Wasserbilanz basiert auf der Differenz aus Niederschlag und der Referenzverdunstung ETO nach Penman-Monteith, basierend auf den Daten der LMU aus dem ClimEx Projekt.

Variante Median entsprechend der Flurabstandskarte:

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

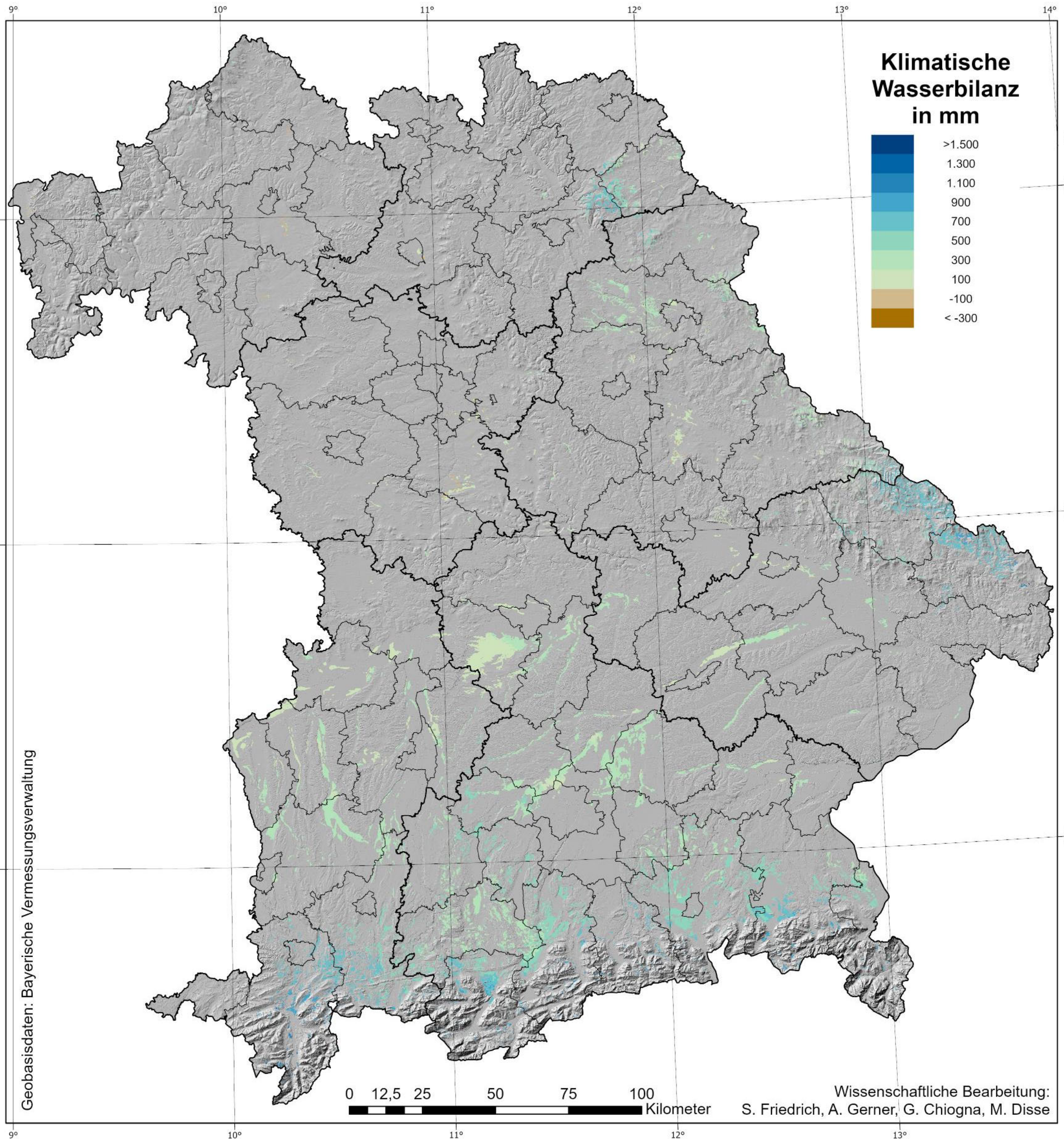


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Klimatische Wasserbilanzkarte

Jahr 2050 Median



**Beschreibung:**

Die Karte der Klimatischen Wasserbilanz basiert auf der Differenz aus Niederschlag und der Referenzverdunstung ETO nach Penman-Monteith, basierend auf den Daten der LMU aus dem ClimEx Projekt.

Variante Median entsprechend der Flurabstandskarte:

Szenario Median: von 10 ClimEx-Realisationen sagen jeweils mindestens 4 trockenere bzw. nassere Flurabstände vorher.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

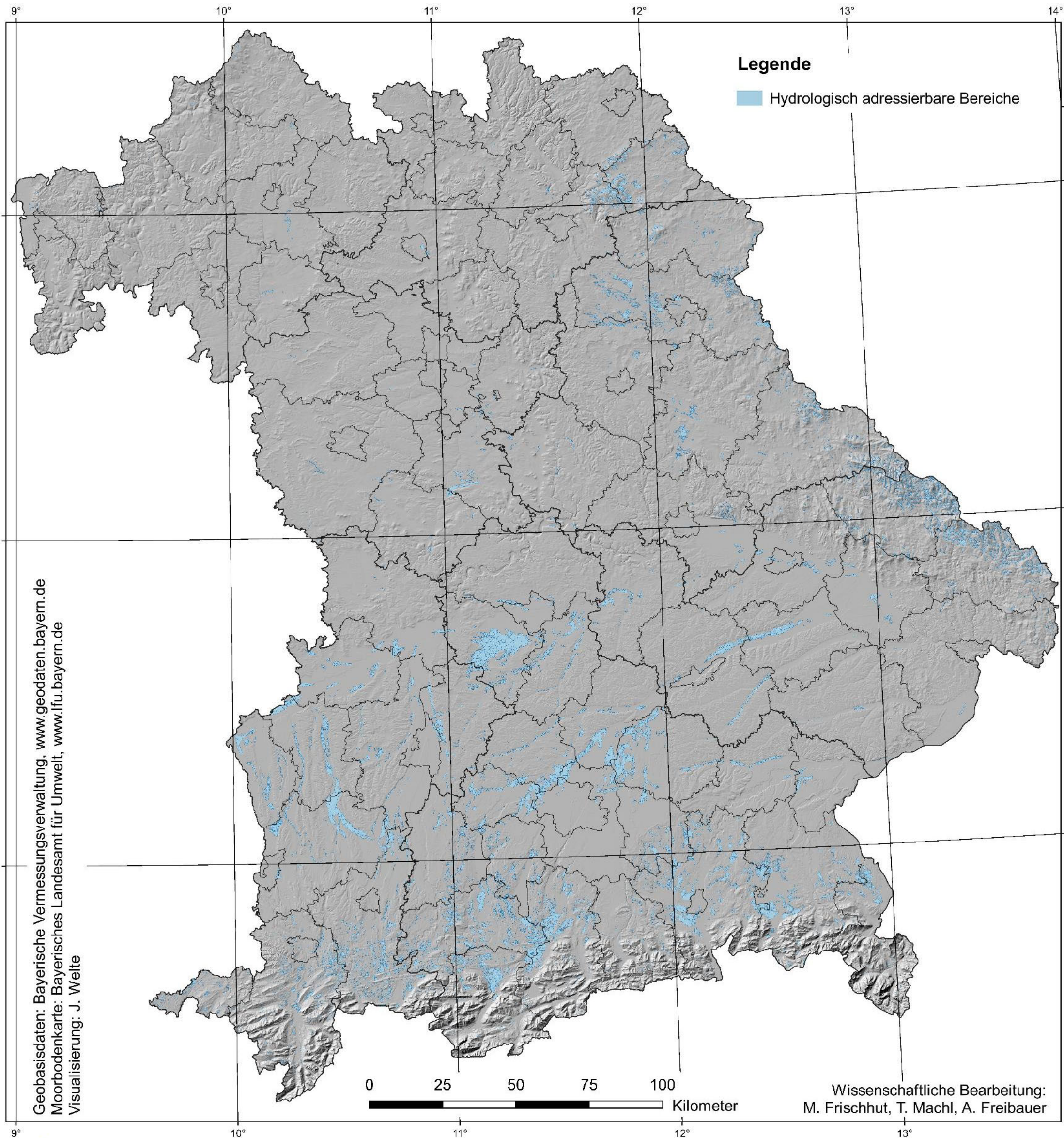


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz





# Hydrologisch adressierbare Bereiche



**Beschreibung:**

Die Karte weist hydrologische Einheiten aus, die bei Wasserstandsmaßnahmen auf Einzelflächen direkt betroffen sind bzw. die als Einheit beplant werden sollten. Datengrundlage sind die Flächen der Moorbodenkarte des LfU, die entlang von Straßen (Bundesautobahnen, Land-/Staats- oder Kreisstraßen) und Gewässerachsen (Datenquelle jeweils ATKIS) zerschnitten und dadurch in hydrologisch adressierbare Bereiche unterteilt wurden. Die Grenzen wirken als Barrieren für den horizontalen Wasseraustausch bzw. können mit einfachen Mitteln dazu gemacht werden.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



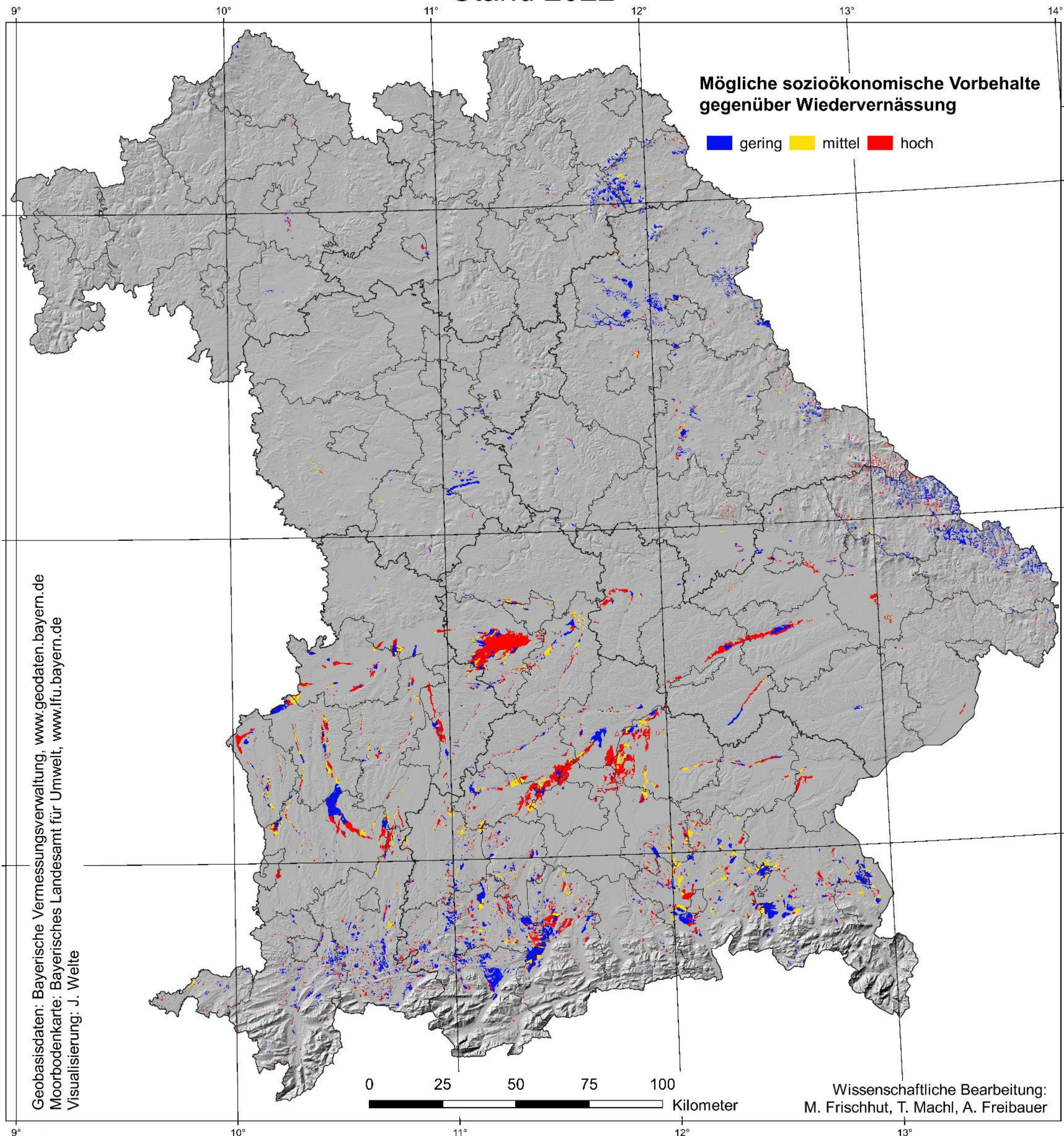
**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für  
 Umwelt und Verbraucherschutz



# Sozioökonomische Restriktionspotenziale Stand 2022



**Beschreibung:**  
 Die Karte veranschaulicht für hydrologisch adressierbare Bereiche der Moorbodenkarte mögliche Vorbehalte gegenüber einer Wiedervernässung aufgrund sozioökonomischer Restriktionspotenziale, die sich aus den folgenden Indikatoren zusammensetzen: "Anzahl der Privateigentümer je Hektar", "Anteil der Ackerflächen", "Anteil der Fläche in öffentlicher Hand" sowie "Anteil der Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen sowie Flächen gemischter Nutzung". In der Klasseneinteilung bedeutet blau = mögliche Gunsträume für eine Wiedervernässung und einen raschen Moorschutz, rot = höhere potenzielle Restriktionen, die einer Wiedervernässung entgegenstehen könnten.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

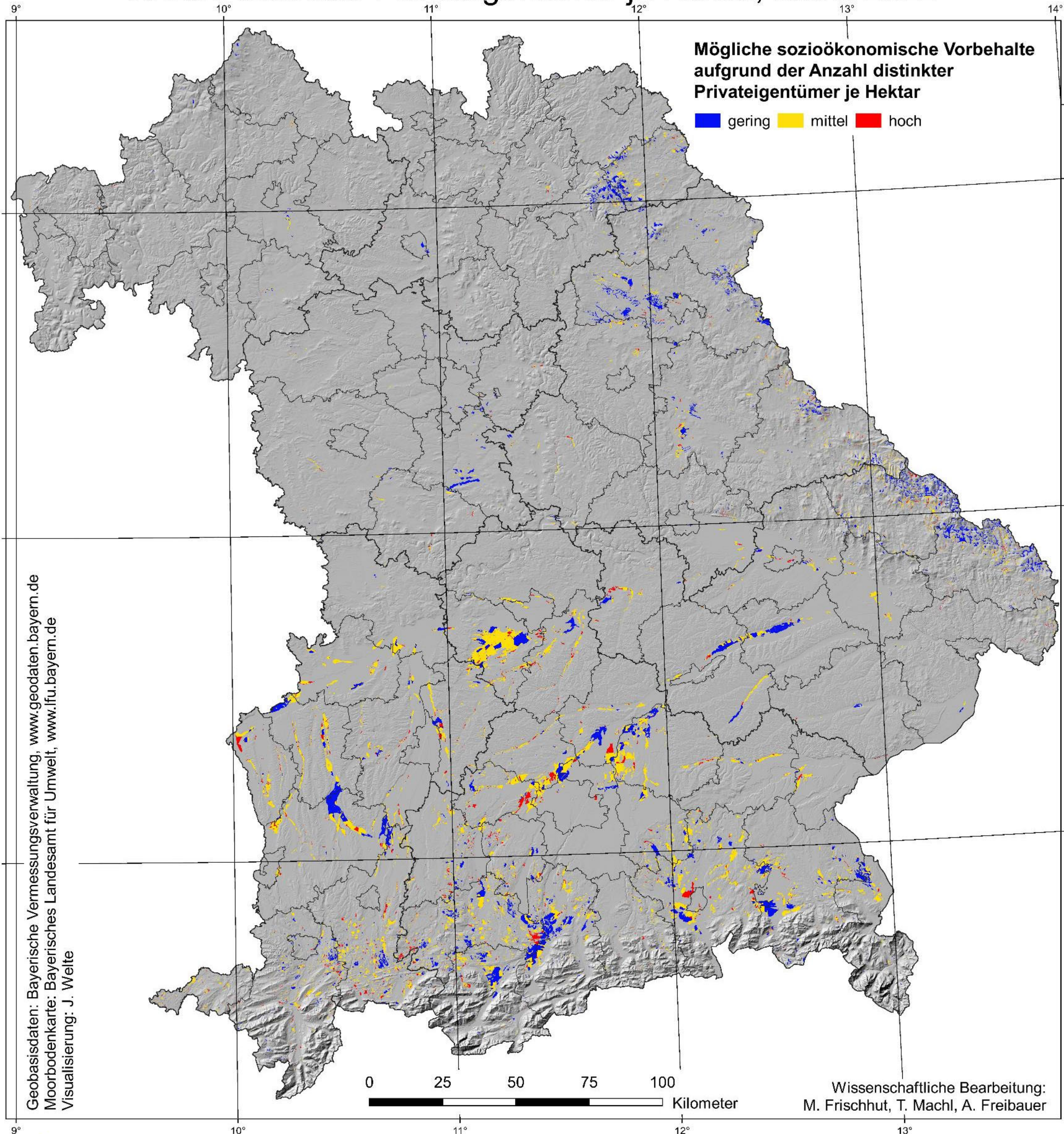


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Sozioökonomische Restriktionspotenziale

## Anzahl distinkter Privateigentümer je Hektar, Stand 2022



Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, [www.geodaten.bayern.de](http://www.geodaten.bayern.de)  
 Moorbodenkarte: Bayerisches Landesamt für Umwelt, [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)  
 Visualisierung: J. Welte



**Beschreibung:**  
 Die Karte veranschaulicht für hydrologisch adressierbare Bereiche der Moorbodenkarte mögliche Vorbehalte aufgrund der Anzahl distinkter Privateigentümer je Hektar Landfläche. Als Flächen in privatem Eigentum werden diejenigen betrachtet, deren Einträge im Eigentümerverzeichnis des ALKIS nicht auf Gemeinden, Landkreise, Bundesland, Bundesrepublik, Staatsbetriebe oder Behörden schließen lassen. Die Einteilung der Klassen ergibt sich aus den 10 % bzw. 90 % Perzentilen der Anzahl Privateigentümer für hydrologisch adressierbare Bereiche größer 1,0 ha. Konkret bedeutet das für die Klasseneinteilung: blau = wenige Privateigentümer-, rot = viele Privateigentümer je Hektar.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



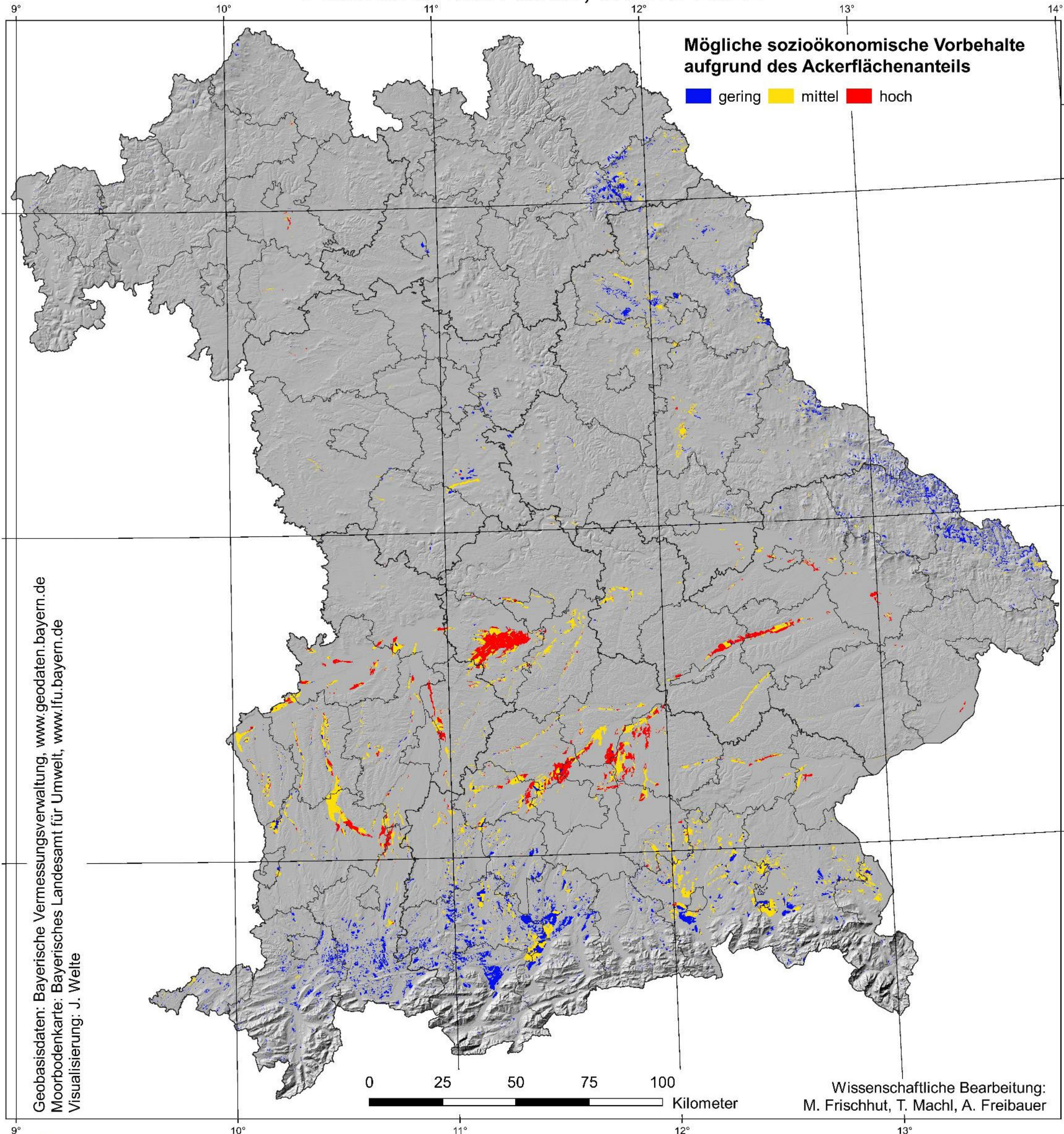
**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Sozioökonomische Restriktionspotenziale Flächenanteil Acker, Stand 2022



**Beschreibung:**

Die Karte veranschaulicht für hydrologisch adressierbare Bereiche der Moorbodenkarte mögliche Vorbehalte aufgrund des Flächenanteils unter Ackernutzung (lt. Datensatz "Tatsächliche Nutzung"). Die Klasseneinteilung ergibt sich aus den 25 % bzw. 75 % Quantilen des Flächenanteils für hydrologisch adressierbare Bereiche größer 1,0 ha.  
Konkret bedeutet das: blau = kein Acker, rot = mindestens die halbe Fläche ist Acker.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



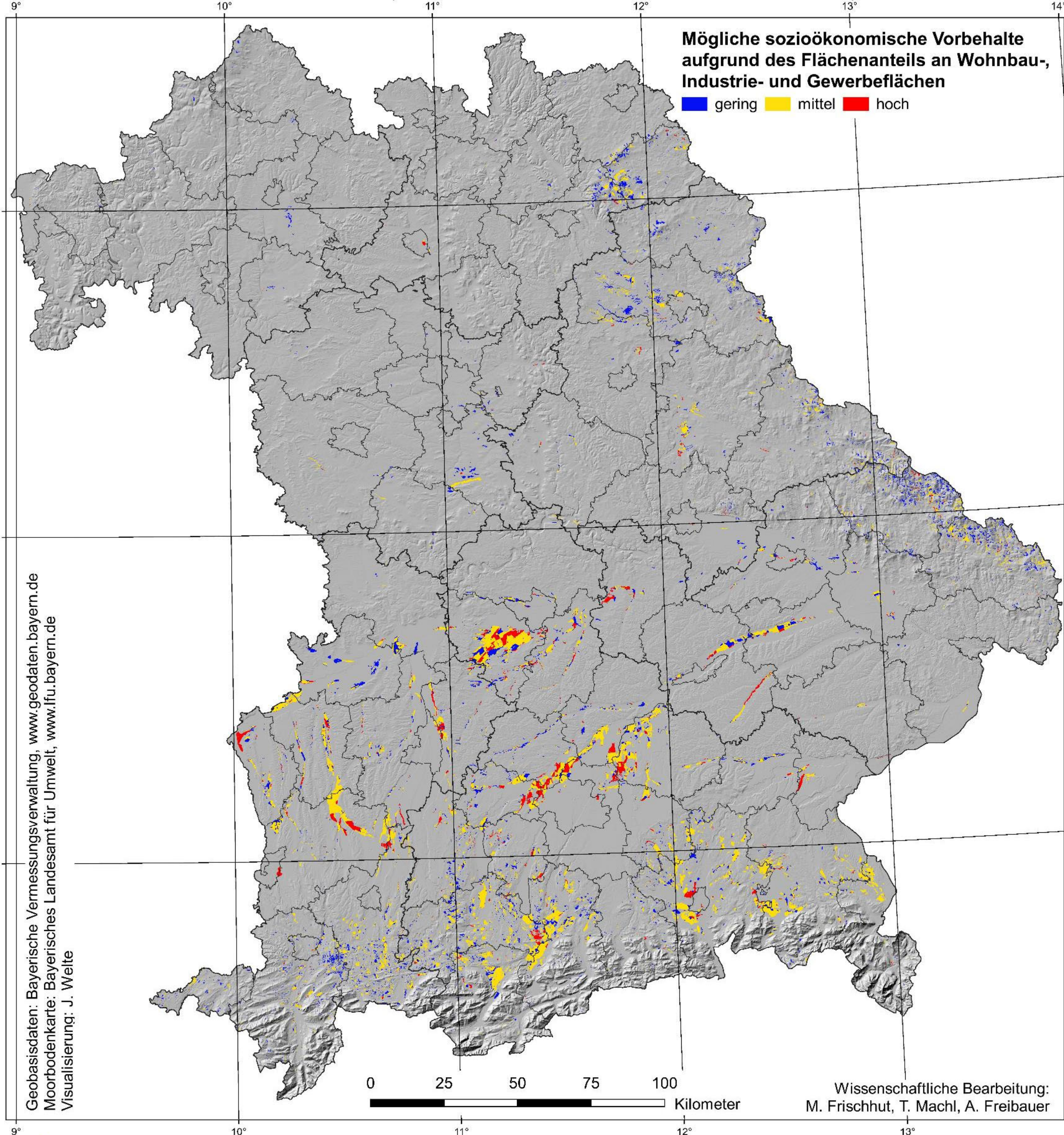
**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Sozioökonomische Restriktionspotenziale Flächenanteil Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen, Stand 2022



Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, [www.geodaten.bayern.de](http://www.geodaten.bayern.de)  
 Moorbodenkarte: Bayerisches Landesamt für Umwelt, [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)  
 Visualisierung: J. Welte



**Beschreibung:**  
 Die Karte zeigt mögliche Vorbehalte aufgrund der Anteile von Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen sowie Flächen gemischter Nutzung (lt. Datensatz "Tatsächliche Nutzung") bezogen auf die Fläche hydrologisch adressierbarer Bereiche der Moorbodenkarte. Die Einteilung der Klassen ergibt sich aus den 10 % bzw. 90 % Perzentilen des Flächenanteils für hydrologisch adressierbare Bereiche größer 1,0 ha.  
 Konkret bedeutet das: blau = 0 %, rot = > 7 % Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen sowie Flächen gemischter Nutzung.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

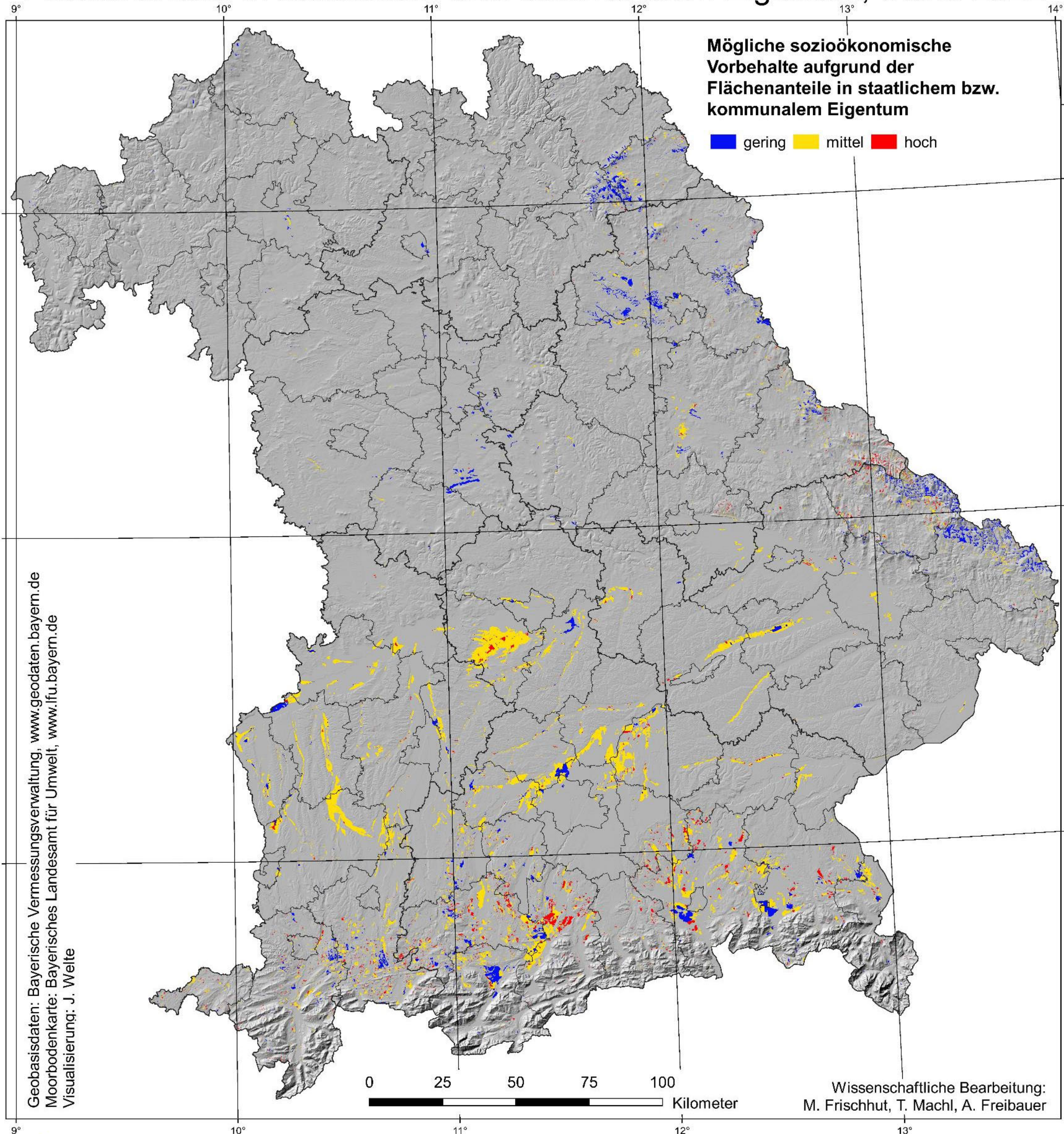


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Sozioökonomische Restriktionspotenziale

## Flächenanteile in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum, Stand 2022



Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, [www.geodaten.bayern.de](http://www.geodaten.bayern.de)  
 Moorbodenkarte: Bayerisches Landesamt für Umwelt, [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)  
 Visualisierung: J. Welte



**Beschreibung:**

Die Karte veranschaulicht für hydrologisch adressierbare Bereiche der Moorbodenkarte mögliche Vorbehalte aufgrund des Flächenanteils in staatlichem bzw. kommunalen Eigentum. Als Flächen in staatlichem bzw. kommunalem Eigentum gelten diejenigen Flurstücke, deren Einträge im Eigentümerverzeichnis des ALKIS auf Gemeinden, Landkreise, Bundesland, Bundesrepublik, Staatsbetriebe oder Behörden schließen lassen. Die Klasseneinteilung ergibt sich aus dem 25 % und 75 % Quantil des Flächenanteils für hydrologisch adressierbare Bereiche größer 1,0 ha. Konkret bedeutet das: blau = mindestens die halbe Fläche in öffentlicher Hand, rot = Fläche in öffentlicher Hand vernachlässigbar (< 1,6 %).

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

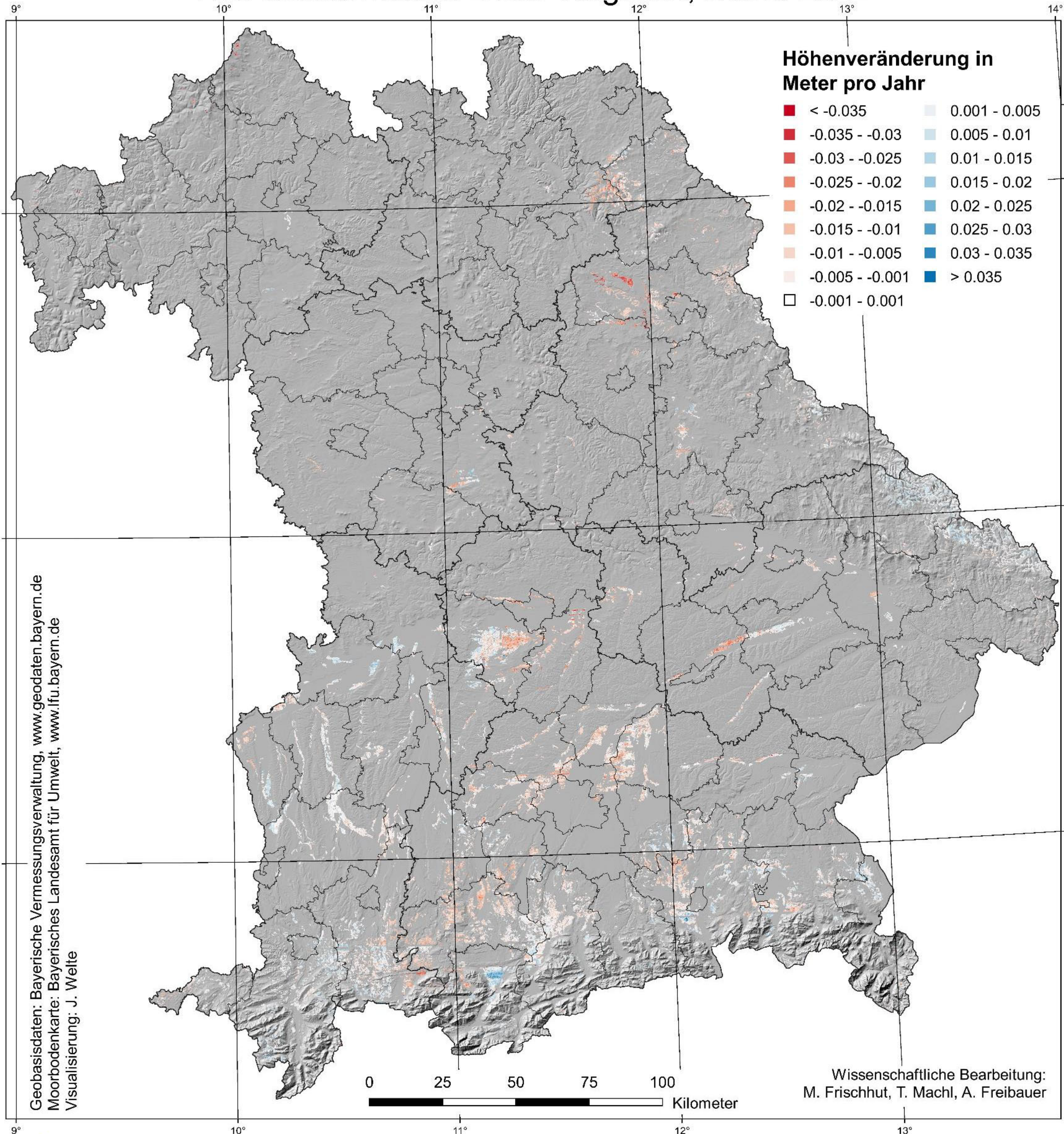


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Höhenveränderung auf Moorstandorten

## Aus landesweitem DGM-Vergleich, Stand 2022



Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung, [www.geodaten.bayern.de](http://www.geodaten.bayern.de)  
 Moorbodenkarte: Bayerisches Landesamt für Umwelt, [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)  
 Visualisierung: J. Welte



**Beschreibung:**

Die Karte zeigt die aus Vergleichen digitaler Geländemodelle (DGM) abgeleitete, mittlere Höhendifferenz zwischen zwei DGM-Aufnahmen. Die mittlere jährliche Höhendifferenz ergibt sich dabei als Quotient aus der beobachteten, absoluten Höhendifferenzen zwischen zwei Aufnahmen und dem zwischen den Aufnahmen liegenden Zeitintervall. Grundlage der Analysen sind Digitale Geländemodelle der Landesvermessung mit einer Bodenaufösung von 1 m. Für die Darstellung wurden die in einem 1 m-Raster vorliegenden, jährlichen Höhendifferenzen in ein 50 m-Raster überführt (Median).

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



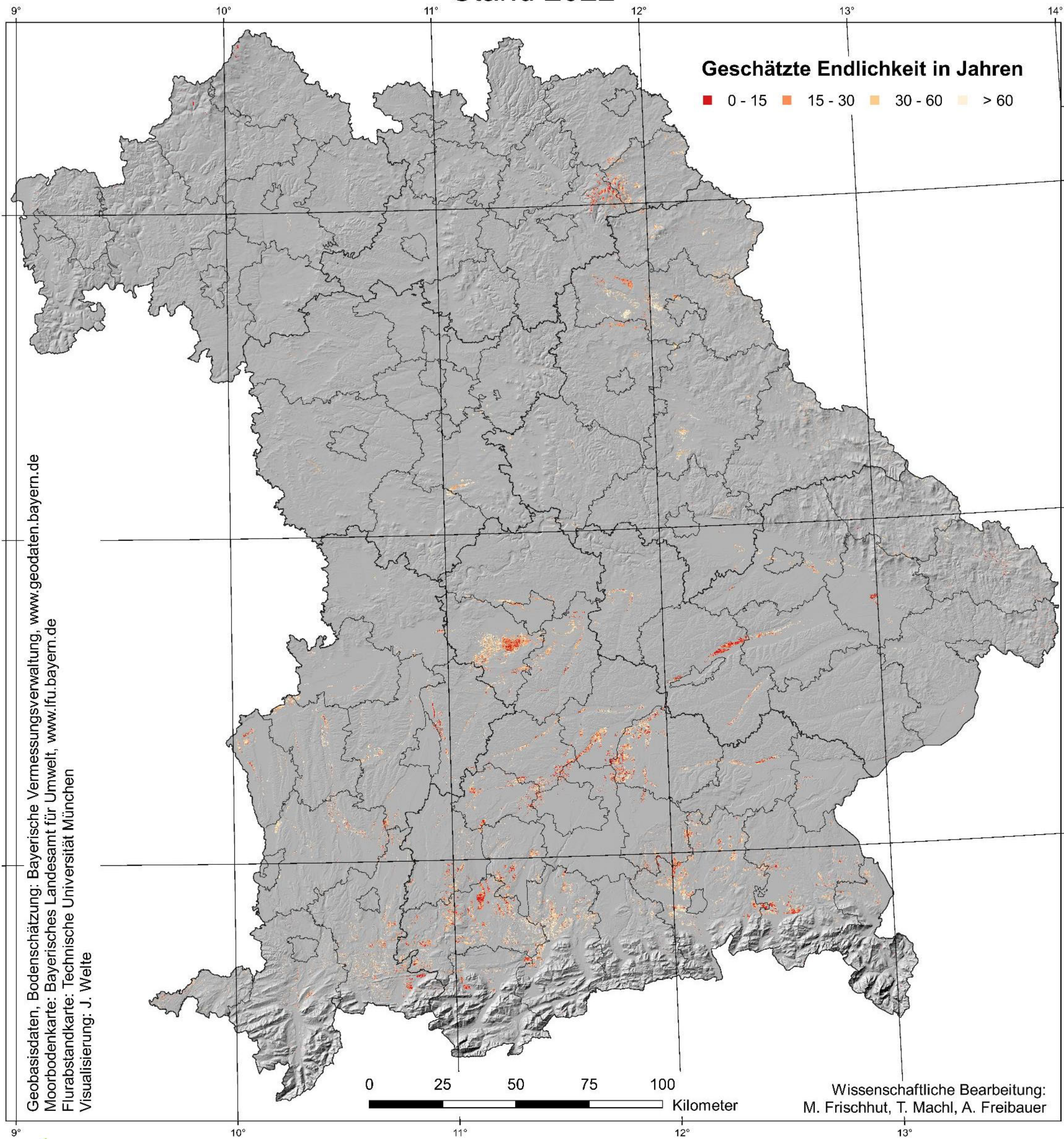
**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung Stand 2022



**Beschreibung:**

Die Karte zeigt die geschätzte Endlichkeit einer landwirtschaftlichen Nutzung in der bisherigen Form. Diese ergibt sich einerseits aus den aus DGM-Vergleichen abgeleiteten Torfsackungsraten sowie andererseits aus der landesweiten Flurabstandkarte für 2020 der Technischen Universität München bzw. den aus Daten der Bodenschätzung und der Moorbodenkarte abgeleiteten Torfmächtigkeiten.

Als Grenze für eine Bewirtschaftung von Ackerflächen wurde ein Grundwasserstand von 0,4 m, bei Grünland von 0,2 m unter Flur als kritischer Grundwasser-Flurabstand festgelegt. Für alle anderen Bereiche liegt der Grenzwert des Grundwasserstands bei 0,0 m unter Flur.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



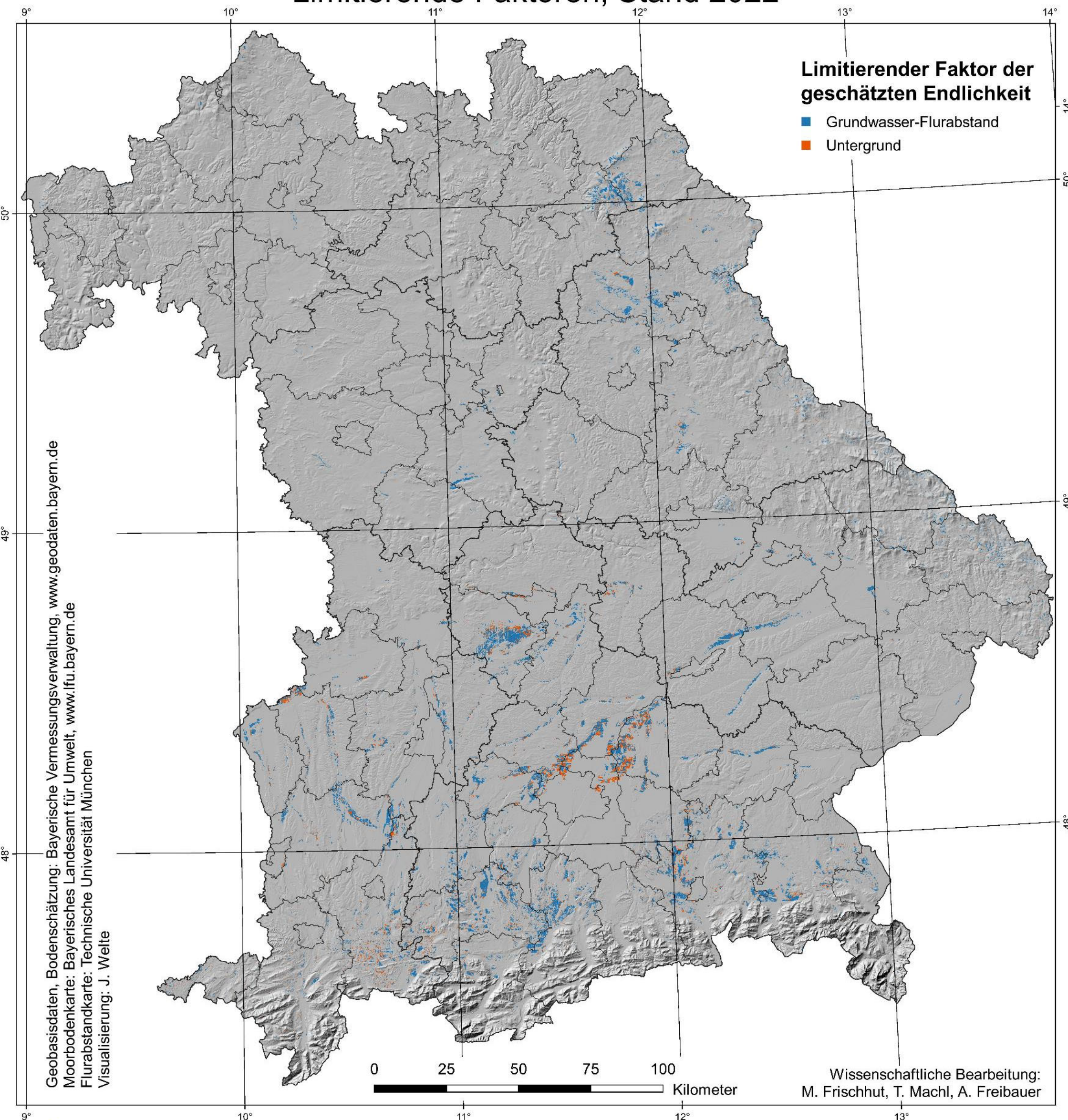
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz





# Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung

## Limitierende Faktoren, Stand 2022



### Beschreibung:

Die Karte stellt den Faktor dar, der bei einer linear andauernden Torfsackung die Nutzung bayerischer Moorböden zuerst limitiert. Grundlage sind die landesweite Flurabstandkarte für 2020 der Technischen Universität München, die aus den Daten der Bodenschätzung und aus der Moorbodenkarte abgeleiteten Torfmächtigkeiten sowie die abgeleiteten Torfsackungsraten aus den DGM-Vergleichen. Als Grenze für eine Bewirtschaftung von Ackerflächen wurde ein Grundwasserstand von 40 cm, bei Grünland von 20 cm unter Flur als Minimalabstand festgelegt. Für alle anderen Bereiche liegt der Grenzwert des Grundwasserstands bei 0 cm unter Flur. Konkret bedeutet das: blau = ein kritischer Grundwasser-Flurabstand wird zuerst unterschritten, orange = vollständiger Torfschwund bis zum Unterliegenden, dabei wird nicht unterschieden, ob dieser problematisch für die landwirtschaftliche Nutzung ist.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

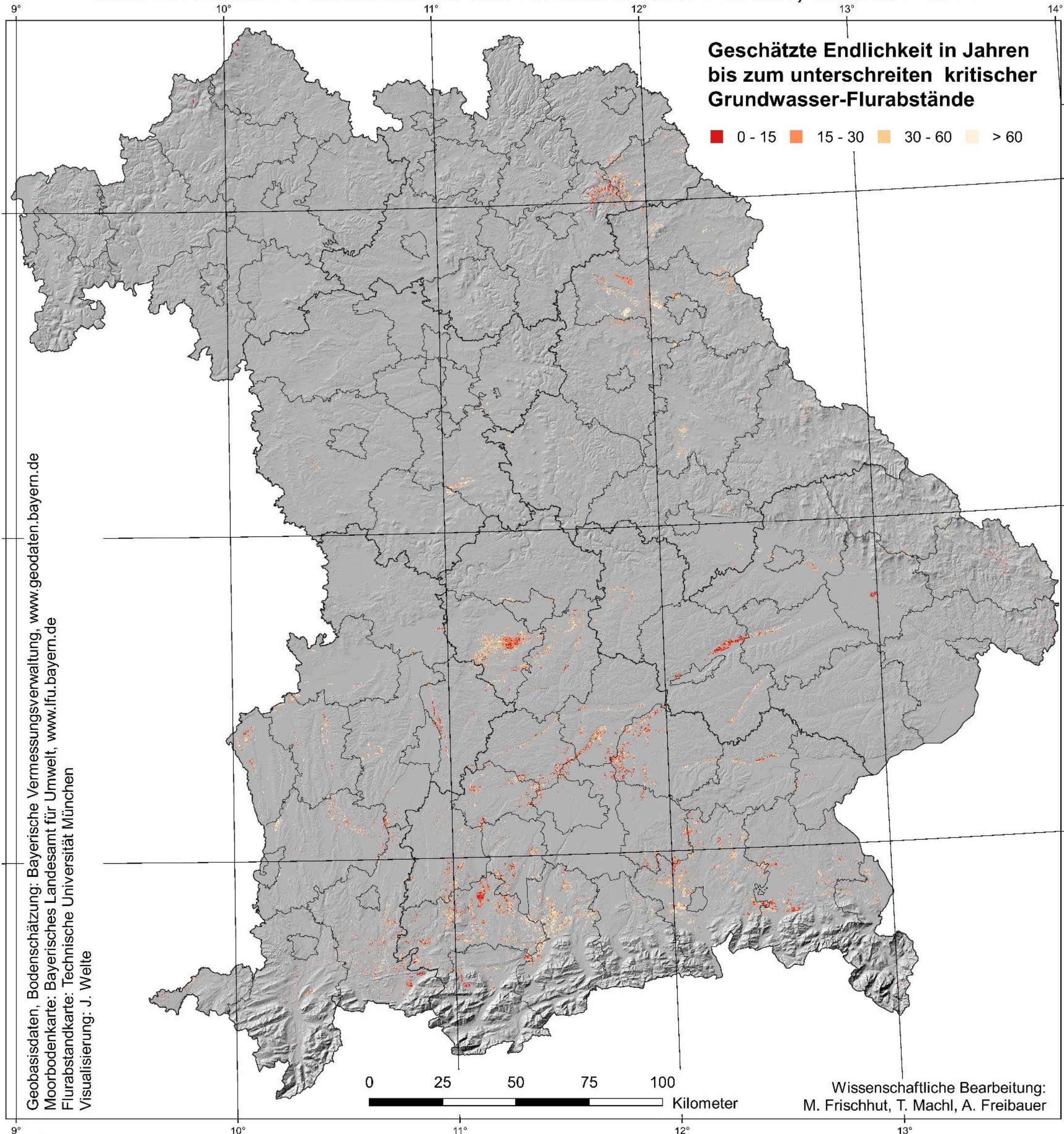


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung

## Grundwasser-Flurabstand als limitierender Faktor, Stand 2022



**Beschreibung:**  
 Die Karte zeigt die Anzahl der Jahre, bis die Geländeoberfläche durch eine linear andauernde Torfsackung eine kritische Nähe zum Grundwasser unterschreitet. Datengrundlage sind die aus den DGM-Vergleichen abgeleiteten Torfsackungsraten und die landesweite Flurabstandkarte für 2020 der Technischen Universität München. Als Grenze für eine Bewirtschaftung von Ackerflächen wurde ein Grundwasserstand von 0,4 m, bei Grünland von 0,2 m unter Flur als kritischer Grundwasser-Flurabstand festgelegt. Für alle anderen Bereiche liegt der Grenzwert des Grundwasserstands bei 0,0 m unter Flur.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

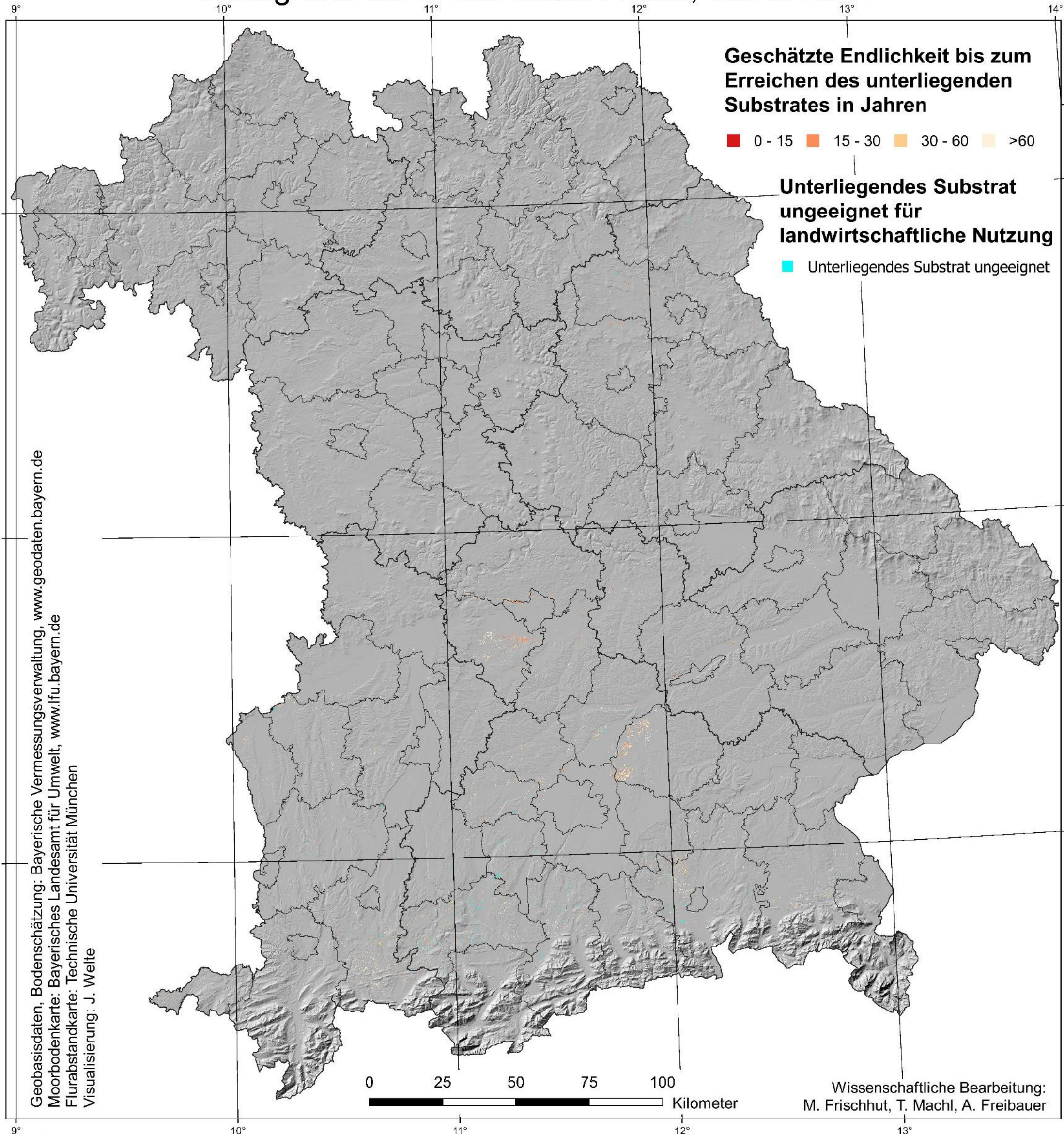


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Geschätzte Endlichkeit der bisherigen Landnutzung

## Untergrund als limitierender Faktor, Stand 2022



**Beschreibung:**  
 Die Karte zeigt die Anzahl der Jahre, bis der Torfkörper aufgezehrt ist und das unterliegende Substrat ansteht. Datengrundlage sind die im Projekt erstellte bayernweite Karte der jährlichen Torfsackungsraten, sowie die aus der Klassifikation der Bodenschätzung und der Legendeneinheiten der Moorbodenkarte ermittelte Moormächtigkeit und daraus bezogene Informationen zum unterliegenden Substrats.  
 Bereiche in denen eine landwirtschaftliche Nutzung aufgrund des nach Torfschwund zurückbleibenden Substrates nicht mehr möglich ist, sind in Türkis dargestellt. Als ungeeignetes Unterliegendes wurden Ton und schwerer Lehm definiert, was den Klassen TMo (Ton, Moor), MoT (Moor, Ton), Mo/T (Moor auf Ton), T/Mo (Ton auf Moor) und LT/Mo (Schwerer Lehm auf Moor) der Bodenschätzung entspricht.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
 Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

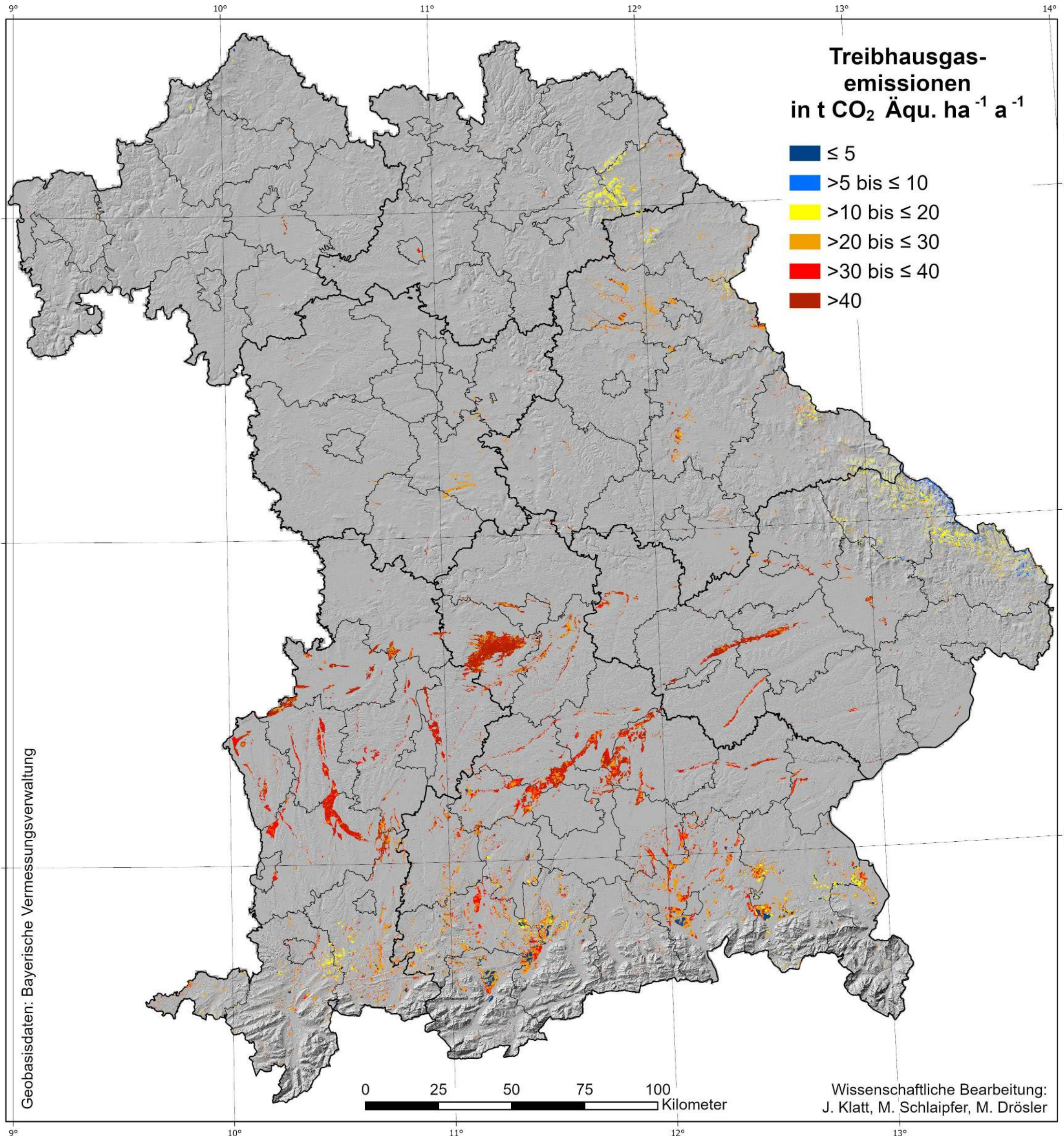


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Mooremissionskarte

Jahr 2020



**Treibhausgas-  
emissionen**  
in t CO<sub>2</sub> Äqu. ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>

- ≤ 5
- >5 bis ≤ 10
- >10 bis ≤ 20
- >20 bis ≤ 30
- >30 bis ≤ 40
- >40

Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung

0 25 50 75 100 Kilometer

Wissenschaftliche Bearbeitung:  
J. Klatt, M. Schlaipfer, M. Drösler



**Beschreibung:**

Die Mooremissionskarte für das Jahr 2020 basiert auf empirischen Treibhausgasmodellen und den Informationen aus TN-Landnutzungs-Polygonen, verschnitten mit InVeKos Daten und der Flurabstandskarte 2020 der Technischen Universität München

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

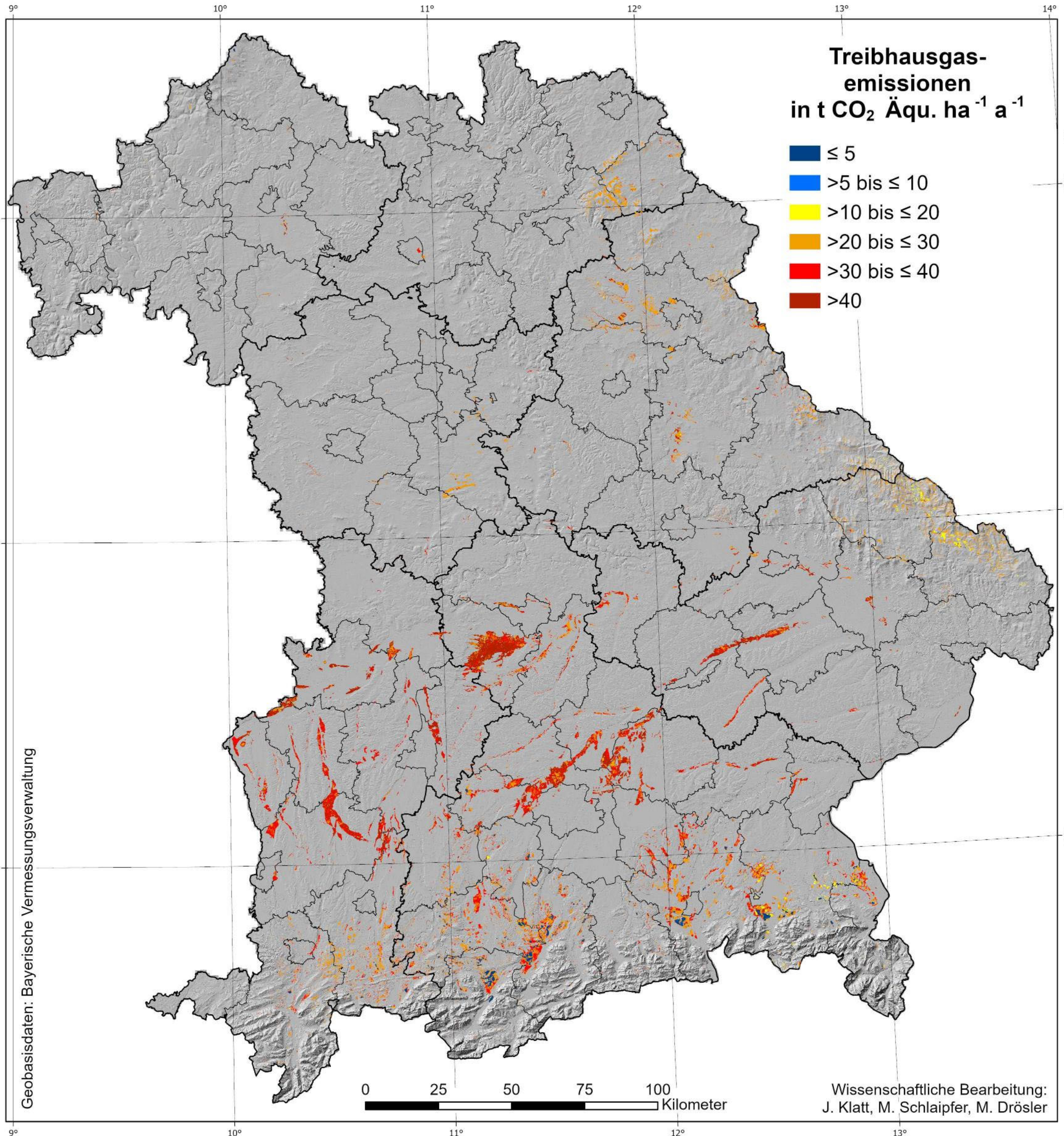


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Mooremissionskarte

Jahr 2030



Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung

Wissenschaftliche Bearbeitung:  
J. Klatt, M. Schlaipfer, M. Drösler



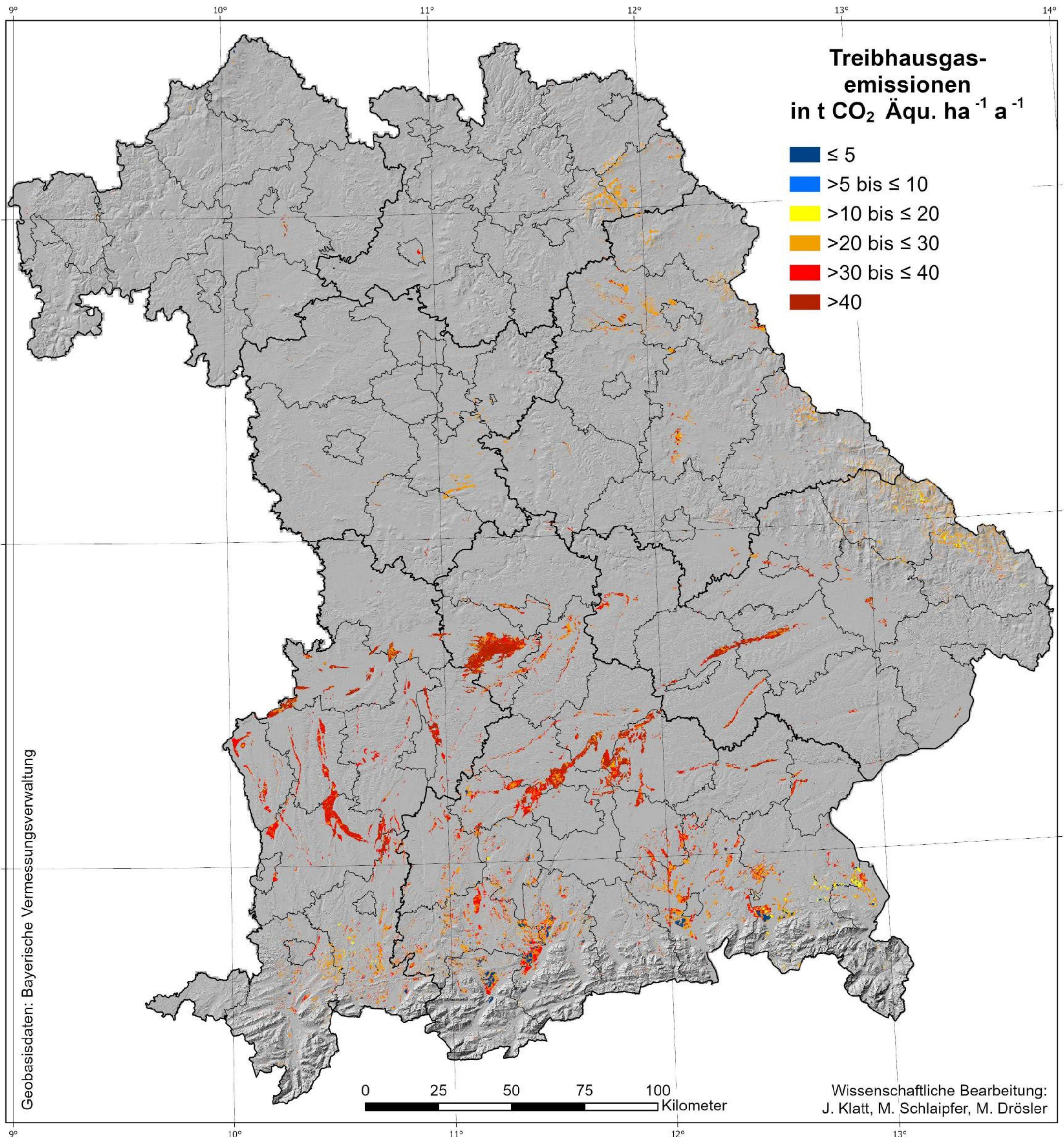
**Beschreibung:**  
Gezeigt sind die Treibhausgasemissionen der bayerischen Mooren für das Jahr 2030 (Kulisse ist das hydrologische Bayern), basierend auf der ClimEx Klimasimulationen ([www.climex-project.org](http://www.climex-project.org)).  
Landnutzungsänderungen und der Einfluss von Moorsackung ist nicht berücksichtigt.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



# Mooremissionskarte

Jahr 2040



**Beschreibung:**

Gezeigt sind die Treibhausgasemissionen der bayerischen Mooren für das Jahr 2040 (Kulisse ist das hydrologische Bayern), basierend auf der ClimEx Klimasimulationen ([www.climex-project.org](http://www.climex-project.org)). Landnutzungsänderungen und der Einfluss von Moorsackung ist nicht berücksichtigt.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

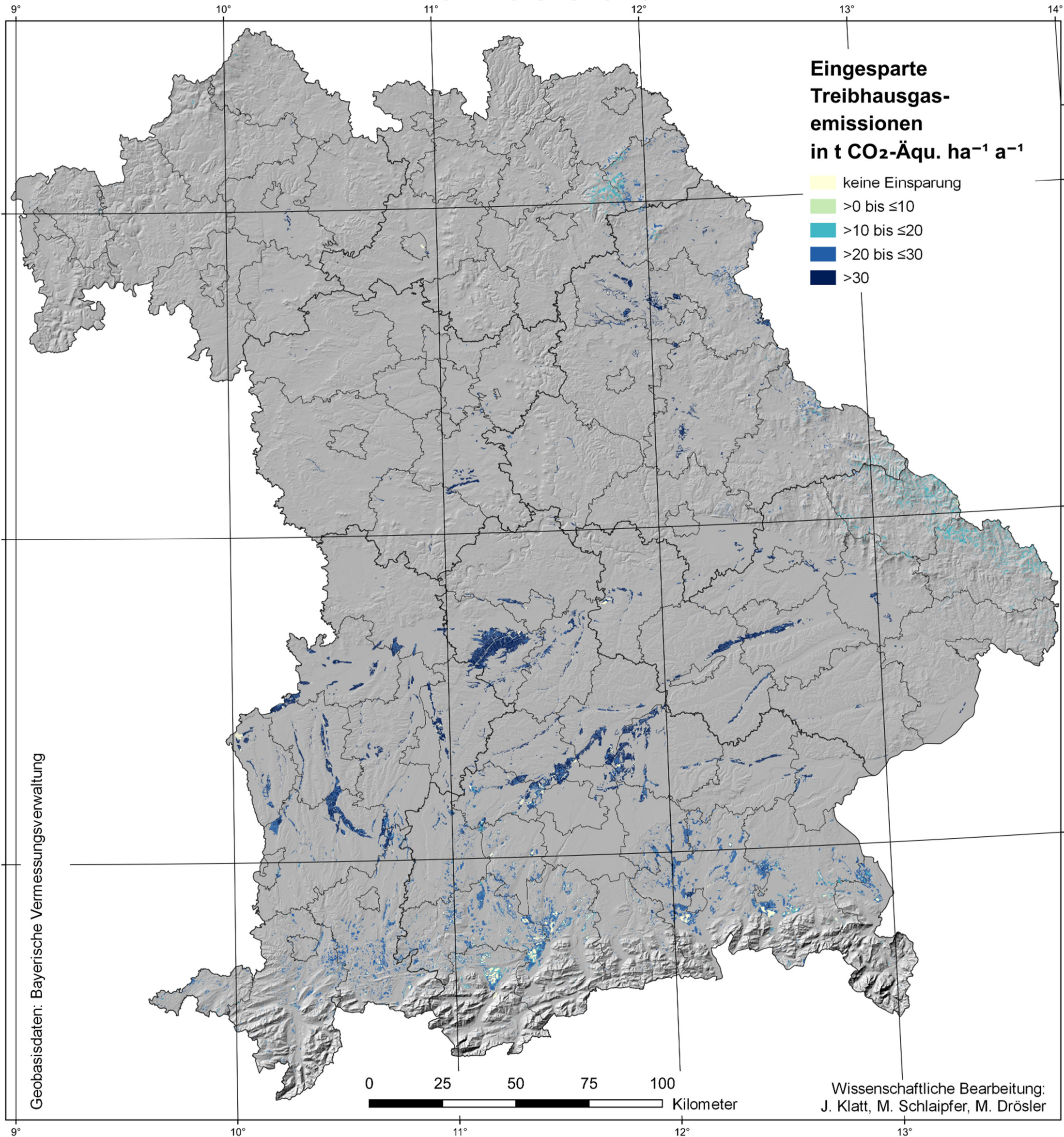


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Klimaschutzpotentialkarte

## Maximalszenario



**Beschreibung:**

Es wurde angenommen, dass alle land- und forstwirtschaftlich genutzten Moore, sowie degradierte Hochmoorheiden ohne Nutzung und Torfabbaugelände optimal wiedervernässt werden und sich ein Wasserstand von -10 cm eingestellt hat.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

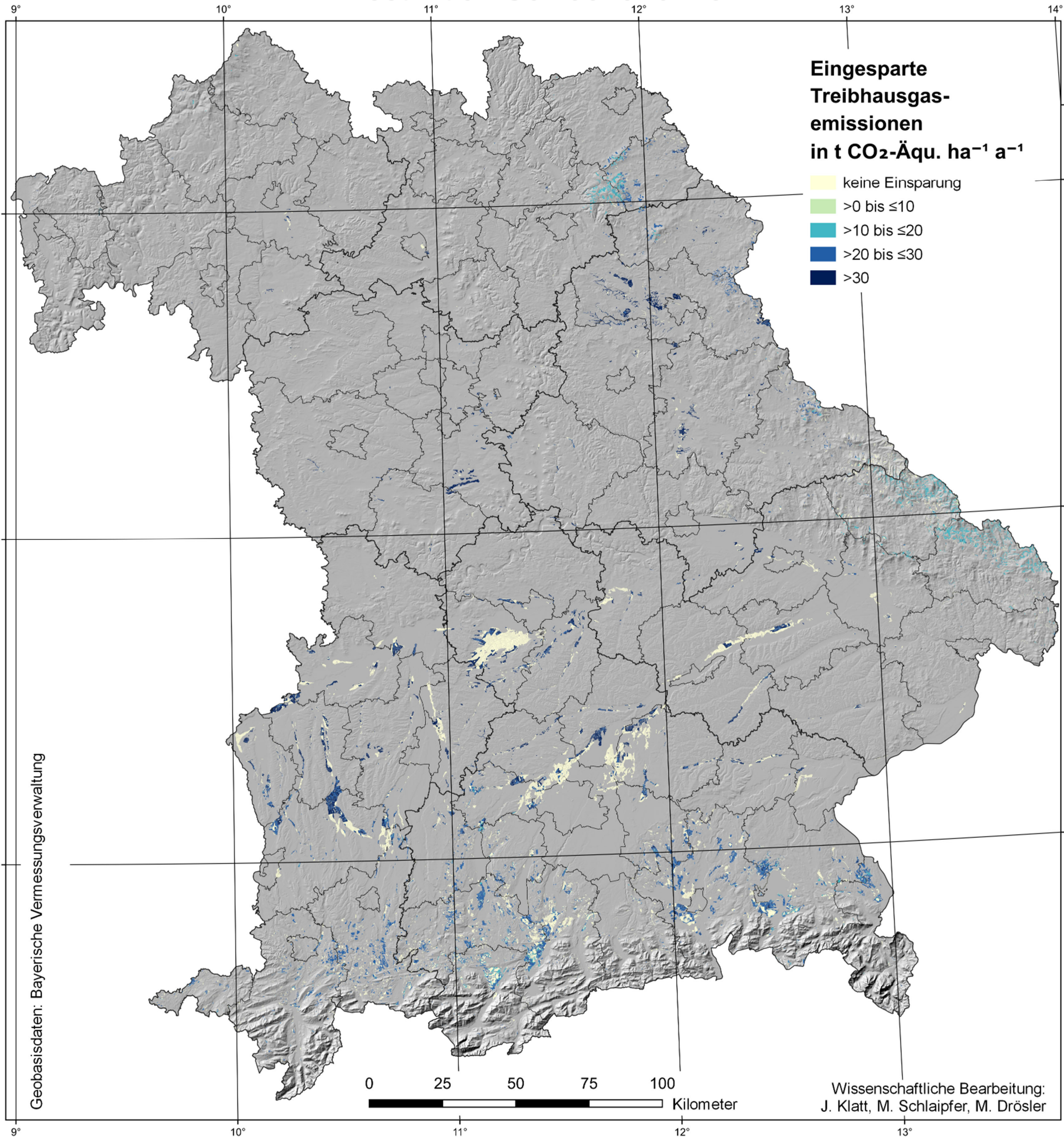


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Klimaschutzpotentialkarte

## Restriktion Sozioökonomie



**Beschreibung:**

Die sozioökonomischen Restriktionen berücksichtigen vier Indikatoren, die als entscheidend für die Ermittlung von Gunsträumen und Restriktionen für Projekte zur Wiedervernässung erachtet werden. Flächen, deren aggregierte Bewertung aus allen vier Faktoren den Klassen „gut“ oder „neutral“ entspricht, werden als wiedervernässbar angenommen.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



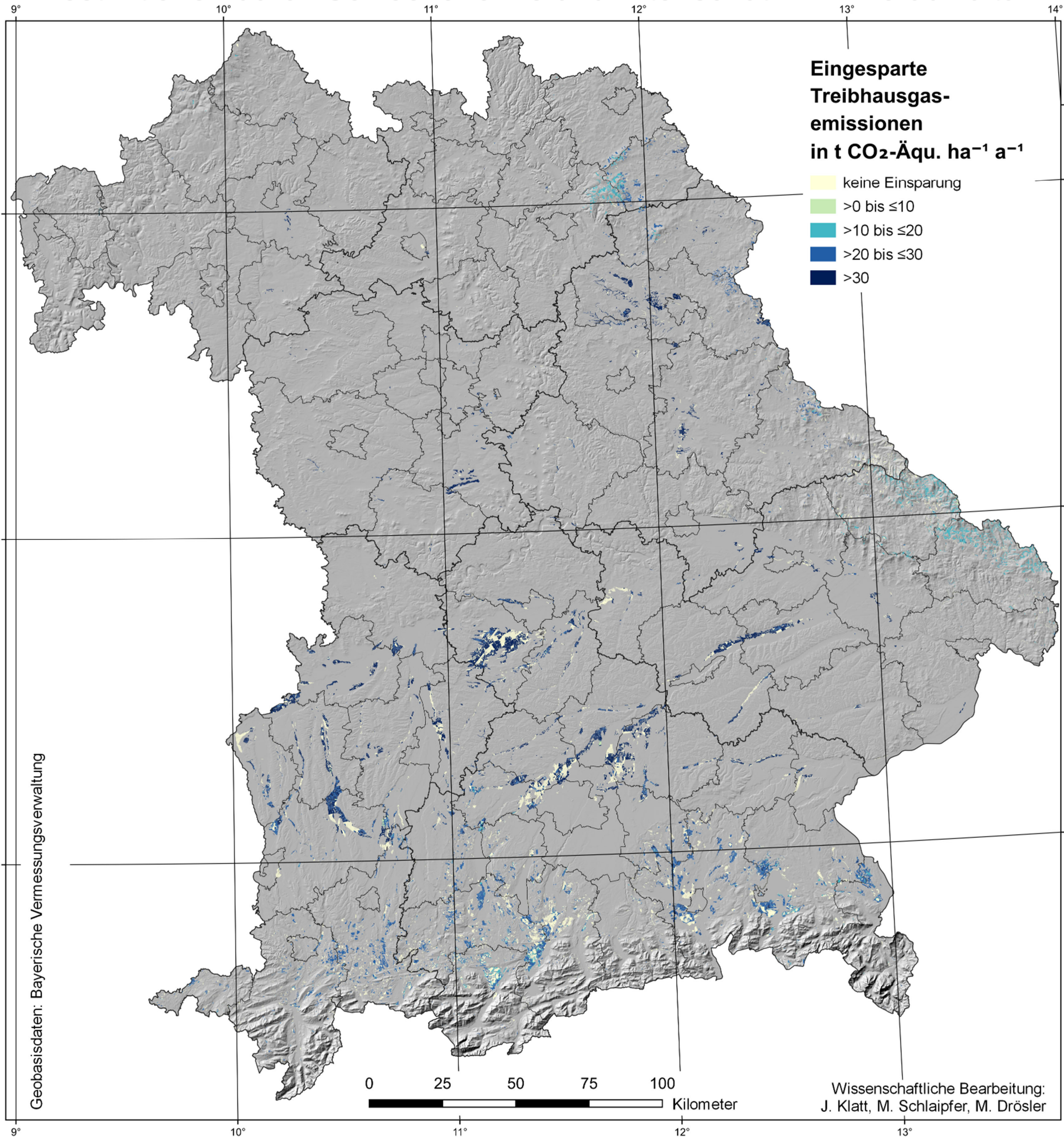
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz





# Klimaschutzpotentialkarte

## Restriktionen durch Sozioökonomie und Artenschutz inkl. Paludikultur



**Beschreibung:**

Für ~30.000 ha Ackerfläche auf organischen Böden ist der Ackerbau-Parameter das alleinige Wiedervernässungshindernis aus sozioökonomischer Sicht. Unter Berücksichtigung der Paludikultur-Potenzialkarte, die für intensive Grünländer und Ackerstandorte die Gebiete mit Schutzgutaufgaben ausweist, kann eine Umwandlung in Paludikultur vorgenommen werden.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung

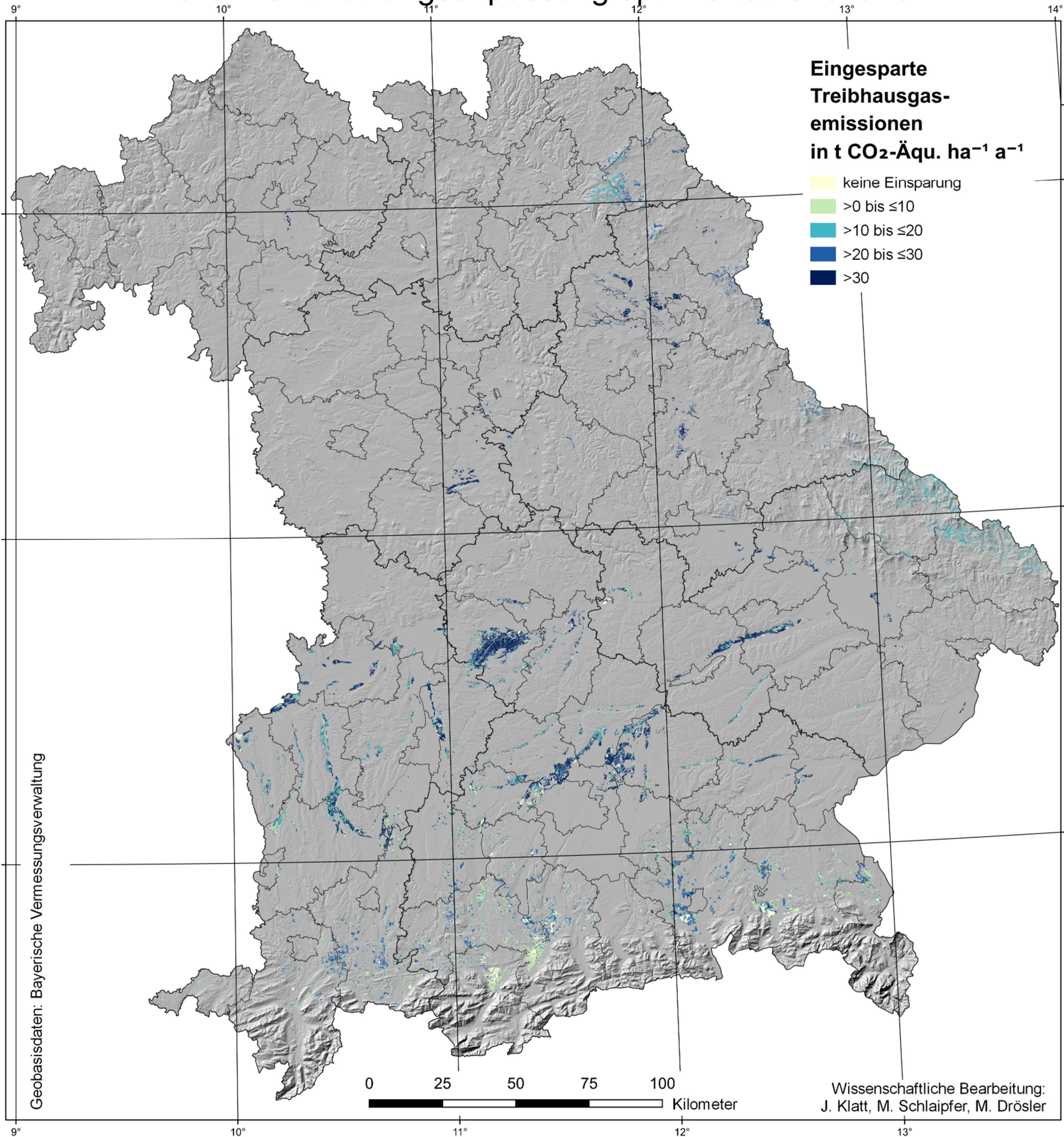


Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz



# Klimaschutzpotentialkarte

## Durch Landnutzungsanpassung optimiertes Szenario



**Beschreibung:**

Für alle Moore sollte eine moorverträgliche Nutzungsstrategie verfolgt werden, die Moorbodenschutz mit Wirtschaftlichkeit vereinbart. Strategien dazu sind die Extensivierung von Grünland in Kombination mit Wasserstandsanhhebung, das Einstellen von oberflächennahe Wasserstände an Waldstandorten und die Umwandlung von Ackerflächen zu Paludikultur.

Dieses Projekt wird finanziell aus dem EFRE und durch das StMUV unterstützt.



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für regionale Entwicklung



Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

