



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Technischer Leitfaden zur Wasserstands-anhebung in landwirt- schaftlich genutzten Niedermooren



LfL-Information

Dieser Leitfaden wurde im Rahmen des Projekts „Entwicklung moorverträglicher Bewirtschaftungsmaßnahmen für landwirtschaftlichen Moor- und Klimaschutz“ an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft erarbeitet. In den Leitfaden sind zahlreiche Hinweise und Korrekturvorschläge eingegangen. Ein besonderer Dank gilt dem Landesamt für Umwelt, dem Landkreis Ostallgäu, dem Peatland Science Centre der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, den Bayerischen Staatsgütern sowie der EDR GmbH für ihre fachliche Unterstützung.

Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Agrarökologie und Biologischen Landbau
Eva Schmidt (IAB 2d)
Lange Point 12, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: Agraroeekologie@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-3640

1. Auflage: November 2024

Druck: Saxoprint GmbH, 01277 Dresden

Schutzgebühr: 5,00 Euro

© LfL

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einführung..... 4
2	Fachliche Grundlagen..... 5
2.1	Allgemeines..... 5
2.1.1	Moorboden 5
2.1.2	Moortypen 5
2.2	Wasserbilanz in Mooren..... 7
2.2.1	Nutzung 7
2.2.2	Auswirkung der Entwässerung..... 8
2.3	Ziele und Folgen einer Wasserstandshebung 9
3	Auswahl von Maßnahmen zur Wasserstandshebung..... 10
3.1	Planung..... 10
3.1.1	Standortcharakterisierung..... 11
3.1.2	Synergien und mögliche Konflikte mit dem Naturschutz..... 12
3.1.3	Nutzungsansprüche lokaler Akteure 12
3.1.4	Auswahl geeigneter Maßnahmen 12
3.1.5	Wasserrechtlicher Antrag..... 14
3.1.6	Monitoring und Beweissicherung 14
3.1.7	Finanzierung und Ressourcen 15
4	Umsetzung von Maßnahmen zur Wasserstandshebung..... 15
4.1	Auswahl einer geeigneten Wiedervernässungsmaßnahme 15
4.1.1	Grabenan-/einstau durch Stauwehr und Staudamm..... 16
4.1.2	Dränagenverschluss..... 27
4.1.3	Dränagenanstau mit Schacht 27
4.1.4	Unterflurbewässerung 28
4.2	Bauarbeiten im Moor 29
5	Erfahrungen mit Maßnahmen zur Wasserstandshebung..... 30
5.1	Versuchsstation Karolinenfeld 32
5.2	Klosterland Benediktbeuern 39
5.3	Altbayerisches Donaumoos 43
6	Weitergehende Informationen 48
7	Literaturverzeichnis..... 49

1 Einführung

In Bayern sind rund 134.000 Hektar Moorfläche für landwirtschaftliche Zwecke entwässert worden. Durch die Absenkung des Wasserstandes in Moorböden tritt verstärkt Sauerstoff in den Torf ein und es kommt zu einer Zersetzung der organischen Substanz. Die Folgen sind eine Bodendegradierung und Bodensackungen von ca. 1 cm pro Jahr, sodass die landwirtschaftliche Nutzung auf entwässerten Moorstandorten endlich und nicht nachhaltig ist. Der im Torf enthaltene Kohlenstoff wird vor allem in CO₂ umgewandelt. Im Durchschnitt emittieren entwässerte Moore im Schnitt bis zu 30 bis 40 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar und Jahr.

Durch Anhebung des Wasserstandes nahe Geländeoberkante kann der Torfkörper geschont und effektiver Klimaschutz betrieben werden. Dabei muss die landwirtschaftliche Nutzung der Moorflächen nicht aufgegeben werden – Nassgrünland oder der Anbau von Paludikulturen stellen mögliche Nutzungsalternativen dar. Gemäß dem Bayerischen Klimaschutzprogramm ist die Förderung moorverträglicher Bewirtschaftungsformen auf 20.000 Hektar Fläche bis zum Jahr 2029 vorgesehen. Bei der Wiedervernässung mit dem Ziel einer klimaverträglichen landwirtschaftlichen Folgenutzung wird eine Wasserregelbarkeit angestrebt, um die Bewirtschaftung gewährleisten zu können.

Der vorliegende technische Leitfaden konzentriert sich auf die Planung und Umsetzung der Wiedervernässungsmaßnahmen. Er bietet Informationen zu den Grundlagen der Moorhydrologie einschließlich der (teilweise irreversiblen) Auswirkungen der Entwässerung. Die Ergebnisse der Evaluierung verschiedener Wasserregelungstechniken dienen als Basis für Empfehlungen zur Auswahl geeigneter Techniken je nach Standort. Wesentliche geotechnische und bodenphysikalische Grundlagen werden erläutert, um die Staueinrichtungen optimal an die Standortbedingungen anzupassen. Beispiele aus Forschungsprojekten geben einen Einblick in die praktische Planung und Umsetzung von Maßnahmen. Die im Leitfaden angesprochenen Maßnahmen sind vorrangig auf Niedermoore ausgerichtet, da die landwirtschaftlich genutzten Flächen in Bayern vorrangig auf Niedermoorflächen liegen beziehungsweise durch Abtorfung der Hochmoore nur noch der Niedermoorkörper vorhanden ist.

Der Leitfaden richtet sich in erster Linie an die Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (ÄELF) als Ansprechpartner für den landwirtschaftlichen Moorbodenschutz, die Ämter für ländliche Entwicklung (ÄLE) sowie interessierte Flächeneigentümer und -bewirtschaftler und Planungsbüros. Ein Schwerpunkt liegt auf der Vermittlung von Fachkenntnissen, um eine gründliche Planung und erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur Moorwiedervernässung zu gewährleisten.

2 Fachliche Grundlagen

2.1 Allgemeines

2.1.1 Moorboden

Moore sind Landschaften, in denen Torf gebildet wird oder oberflächlich ansteht (Succow 2001). Moorböden zeichnen sich durch einen Torfhorizont ($\geq 30\%$ Organikanteil) oder als Übergangsform durch einen anmoorigen Horizont ($> 15\%$ Organikanteil) aus (Scheffer et al. 2010).

Die Bildung von Torf erfolgt durch die Ablagerung unvollständig zersetzter Pflanzenreste, bedingt durch einen verlangsamten Abbau organischer Substanz durch Bodenorganismen wie Bodentiere, Pilze und Bakterien im wassergesättigten Bereich. Die jährliche Torfbildung in naturnahen Mooren beträgt bis zu 1 mm (vgl. Heinrich-Böll-Stiftung et al. 2023). Moore können auf verschiedene Weisen entstehen, wobei stets ein Niederschlagsüberschuss oder ein hoher Grundwasserstand erforderlich ist. Da die meisten Moorböden in Bayern heutzutage entwässert sind, findet kaum mehr Torfbildung statt.

Die genaue Beschreibung und Festlegung, was als Moorboden einzustufen ist, ist je nach Kontext und Rechtgrundlage unterschiedlich. In Zusammenhang mit einer flächenbezogenen Förderung für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung (KULAP-Maßnahmen) ist derzeit die Moorbodenkulisse GLÖZ 2 im Maßstab 1:5.000 (1. Säule *Guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand von Flächen* im Rahmen der *Gemeinsamen europäischen Agrarpolitik*) gemäß der GAPKondV und in Bayern der BayGAPV bindend. Ergänzende Informationen können der Übersichtsmoorbodenkarte des LfU (1:25.000) entnommen werden.

2.1.2 Moortypen

Die Herkunft des Wassers beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit und den pH-Wert, was zur Unterteilung in Hoch-, Übergangs- und Niedermoore führt (Luthardt et al. 2015; Succow 2001). Hochmoore werden vorwiegend durch leicht saures, nährstoffarmes Regenwasser gespeist, während Niedermoore durch mineralstoffreiches Grundwasser beeinflusst werden (Timmermann et al. 2009). Dadurch unterscheiden sie sich in ihrer Vegetation – in Niedermooren dominieren beispielsweise Schilf und Seggen, während im Hochmoor vermehrt Torfmoose und Wollgras anzutreffen sind.

Eine Zwischenform bilden die Übergangsmoore, da sich Hochmoore meistens auf Niedermooren bilden. Moore bilden in Abhängigkeit von dem Klima, der Geologie, dem Boden, dem Relief, der Vegetationsbedeckung und den hydrologischen Bedingungen einen charakteristischen Profilaufbau aus und können in unterschiedliche hydrogenetische Moortypen unterteilt werden (Timmermann et al. 2009). Für Bayern werden die Moortypen im Moorentwicklungskonzept Bayern beschrieben und für größere Moorkomplexe eingeteilt (Ringler und Dingler 2005).

Die wesentlichen hydrogenetischen Moortypen, die in Bayern vorkommen, sind:

1. **Verlandungsmoore** entstehen in Stillgewässern durch die Ablagerung von Mudde¹ und Torf. Dadurch wachsen die offenen Gewässer zu (Timmermann et al. 2009). Aufgrund der geringen Wasserbewegung im Torfkörper sind die Wasserspiegelschwankungen im Jahresverlauf relativ gering (Luthardt et al. 2015).
2. **Versumpfungsmoore** entstehen bei hohen Grundwasserständen im Bereich von kaum geneigten Lagen entweder durch einen langsamen Grundwasseranstieg bei wasser-durchlässigen Schichten oder durch oberflächennah zufließendes Wasser auf stauenden Schichten. Im Gegensatz zu Verlandungsmooren bilden sich Versumpfungsmoore nicht in offenen Gewässern, sondern in periodisch überstauten Gebieten aus (Luthardt et al. 2015).
3. **Quellmoore:** Die Wasserzufuhr erfolgt durch mineralstoffreiches gespanntes Grundwasser aus tiefer gelegenen Grundwasserleitern was zu einer ganzjährigen hohen Wasserzufuhr unter natürlichen Bedingungen führt. Durch den hohen Sauerstoffgehalt des nach Quellaustritt aufgesättigten, zufließenden Wassers und die häufigen Wasserstandsabsenkungen ist ein hoher Zersetzungsgrad natürlich bedingt, wodurch das Wasser nur die Oberfläche überrieselt (Luthardt et al. 2015; Timmermann et al. 2009). Quellmoore können Teil einer Abfolge verschiedener Moortypen sein und etwa am Rand von Durchströmungsmooren in Flusstälern vorkommen (Timmermann et al. 2009).
4. **Durchströmungsmoore:** Dieser Moortyp zeichnet sich durch eine konstante Wasserdurchströmung aus, da diese Moore gewöhnlich in der Nähe von Fließgewässersystemen liegen. Der Wasserstand ist weniger stark von Niederschlägen oder Trockenperioden abhängig.
5. **Hochmoore:** Hochmoore wachsen auf dem Torfkörper auf und sind vom Grundwasser entkoppelt. Sie werden durch Niederschlagswasser gespeist und tendieren zur Nährstoffauswaschung (Detrophierung) (Luthardt et al. 2015).

Besonders in Südbayern entstanden Moore als Versumpfungs- und Verlandungsmoore aus Toteisseen nach der letzten Eiszeit. Diese Seen verlandeten im wärmeren Boreal (ca. 7 000 Jahre v. Chr.) durch vermehrtes Pflanzenwachstum und entwickelten sich seit dem Atlantikum (ca. 5 500 Jahre v. Chr.) zu Moorflächen (Scheffer et al. 2010). In den Randbereichen der Stillgewässer kam es zur Moorbildung durch Verlandung und in den flacheren Senken durch Versumpfung. Im Alpenvorland bilden die Verlandungs- und Versumpfungsmoore sehr häufig Komplexe. Ausführlichere Informationen sind in Kapitel 5 zu finden.

Die Wasserströmung im Torfkörper und damit der hydrogenetische Moortyp werden unter anderem durch das Relief beeinflusst. Flächen mit geringer oder kaum vorhandener Neigung beherbergen häufig Verlandungs- oder Versumpfungsmoore, während bei geneigten Flächen Durchströmungs- oder Quellmoore zu finden sind, in Abhängigkeit von der Gleichmäßigkeit des Grundwasserangebots oder der Häufigkeit von Wasserstandsabsenkungen (Timmermann et al. 2009). Der charakteristische Profilaufbau beeinflusst die vertikale und horizontale Wasserbewegung, und eine Veränderung des Wasserstandes kann durch einen höheren Wasserrückhalt oder vermehrte Wasserverfügbarkeit erfolgen. Eine ganzheitliche

¹ Mudde ist der Sammelbegriff für sedimentäre Seeablagerungen, die einen deutlichen Anteil an organischer Substanz (> 5 %) besitzen. Je nach Zusammensetzung wird zwischen organischen Mudden (> 30 % org. Substanz, < 70 % Silikatanteil) und organomineralischen Mudden (5 bis 30 % organische Substanz, < 95 % Silikatanteil) unterschieden (Hartmann et al. 2024). Je nach den ergänzenden mineralischen Anteilen werden organomineralische Mudden u. a. in Sand-, Schluff- und Tonmudden unterteilt. Dadurch wird die Wirkung als Grundwasserleiter, -nichtleiter oder -stauer beeinflusst. In Abhängigkeit von dem hydrogenetischen Moortyp kann auch keine Muddeschicht vorhanden sein, und das Moor direkt auf der mineralischen Schicht entstanden sein (Luthardt et al. 2015).

Betrachtung des Moores und seiner Einbindung in den Landschaftswasserhaushalt ist insbesondere bei großen Flächen von Bedeutung (Timmermann et al. 2009). So können bereits ohne genauere Kenntnisse über die Hydrologie erste Annahmen bezüglich der Wasserverfügbarkeit und der saisonalen Schwankungen getroffen werden – und das Wiedervernäsungspotenzial abgeschätzt werden.

2.2 Wasserbilanz in Mooren

Die Wasserbilanz in einem Moor ist der maßgebliche Faktor für den Grundwasserstand. Sie setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen, darunter Zufluss, Niederschlag, Verdunstung, Versickerung in tiefere Grundwasserleiter und Abfluss. Die Speicheränderung (positive oder negative Wasserbilanz) macht sich in dem schwankenden Grundwasserstand und der Bodenfeuchte bemerkbar. Der Moorwasserstand wird als obere Grenze des gesättigten Bereichs betrachtet und entspricht im Fall eines Niedermoores dem Grundwasserstand. Die Wasserhaushaltsgrößen sind bis auf den Niederschlag schwer zu bestimmen und durch anthropogene Eingriffe oft verändert und weiterhin veränderbar.

Die Abgrenzung des oberirdischen Einzugsgebiets, das sich vom unterirdischen Einzugsgebiet unterscheiden kann, ist für die Bestimmung des Zuflusses besonders relevant und kann annähernd durch das Relief oder bei abgetorften Flächen durch die unterliegende mineralische Schicht erfolgen. Die Entwässerungseinrichtungen beeinflussen den Abfluss, indem sie eine schnellere Ableitung des Niederschlags bewirken (Tiemeyer et al. 2017). Die Grundwasserneubildung in Mooren ist oft gering, da entweder ein hoher Grundwasserstand vorliegt oder die Versickerung in den Untergrund aufgrund stauender Schichten minimal ist. Moore mit niedrigen Wasserständen haben im oberen Bereich durch die Zersetzung kleinere Poren und ein geringeres Gesamtporenvolumen als intakter Torf. Dadurch kommt es zu stärkeren Wasserspiegelschwankungen (Timmermann et al. 2009) sowie einer geringeren Infiltrationsrate bei Niederschlagsereignissen und somit (in Abhängigkeit von der Topographie) zu vermehrten oberirdischen Abfluss oder Staunässe.

Zwischen der Vegetation und den hydrologischen Prozessen besteht eine Wechselwirkung: Die Oberflächenrauigkeit der Vegetation trägt zur Verzögerung der Abflussbildung bei, während die Verdunstung und die Porosität des abgestorbenen Pflanzenmaterials einen Einfluss auf den Wasserstand haben. Dadurch kann die torfbildende Pflanzenart auch signifikante Auswirkungen auf die vertikale und horizontale hydraulische Leitfähigkeit² haben (Hájek et al. 2011; Beckwith et al. 2003; Morris et al. 2019).

2.2.1 Nutzung

Im 18. Jahrhundert begann die großflächige Trockenlegung von Mooren, zunächst primär zur Gewinnung von Torf als Energiequelle. Im späten 19. Jahrhundert wurden Moorflächen zunehmend für landwirtschaftliche Zwecke erschlossen (Ellenberg und Leuschner 2010). Dafür wurden zur Entwässerung Gräben angelegt oder später Dränagen verlegt. Anfangs

² Die hydraulische Leitfähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines porösen Mediums wie Boden, Flüssigkeiten passieren zu lassen und wird von Faktoren wie Porengröße, Porenverteilung, Bodenstruktur sowie der Viskosität der Flüssigkeit beeinflusst. In gesättigten Böden, in denen alle Poren mit Wasser gefüllt sind, ist die hydraulische Leitfähigkeit maximal. In ungesättigten Böden hingegen sind einige Poren mit Luft gefüllt, die die Kontinuität des Wasserflusses stören. Zusätzlich dazu wirken in einem ungesättigten Boden Kapillarkräfte, die das Wasser zurückhalten. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist aufgrund der Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden schwer zu bestimmen. Vereinfachend wird in diesem Leitfaden deshalb nur von der hydraulischen Leitfähigkeit gesprochen (Scheffer et al. 2010).

wurden vor allem Niedermoore aufgrund ihres Nährstoffreichtums entwässert, um sie landwirtschaftlich nutzbar zu machen. Gezielte Meliorationsmaßnahmen, wie die Lockerung des Bodens durch Sandzusätze und die Erhöhung des pH-Werts in Hochmooren durch Kalkzugaben, dienten der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit (Scheffer et al. 2010).

Derzeit erfolgt die landwirtschaftliche Nutzung vor allem in Niedermooeren, hauptsächlich als Grünland oder Acker. Die intensive Bewirtschaftung erfordert dabei i. d. R. eine tiefe Entwässerung.

2.2.2 Auswirkung der Entwässerung

Die Auswirkungen der Entwässerung auf Bodeneigenschaften sind vielfältig und beeinflussen maßgeblich den Wasserhaushalt sowie die Struktur des Moores. Der Zersetzungsgrad spielt eine entscheidende Rolle in diesem Zusammenhang und wird in der Regel nach der **von-Post-Skala** eingeteilt (siehe Tabelle *Übersicht zur Bestimmung der Zersetzungsgrade für Torfe* in Teil C in Luthardt et al. 2015). Dabei wird im Feld eine händische Quetschprobe einer etwa eigroßen, frischen Torfprobe durchgeführt und der Zersetzungsgrad anhand von Merkmalen wie Trübung und Farbe des austretenden Wassers sowie der Konsistenz des Rückstandes bestimmt. Der Grad der Zersetzung reicht von *H1* bis *H10*, wobei *H1* den geringsten und *H10* den höchsten Zersetzungsgrad darstellt.

Infolge der Entwässerung kommt es zu einem Torfschwund durch Sackung und Mineralisierung aufgrund des fehlenden Auftriebs beziehungsweise der erhöhten mikrobiellen Aktivität unter aeroben Bedingungen. Es kommt parallel zur **Humifizierung** und **Mineralisation**. Bei der Mineralisation wird die organische Substanz vollständig in ihre anorganischen Bestandteile zerlegt, während bei der Humifizierung die organische Substanz nur teilweise abgebaut wird. Diese niederpolymeren Substanzen bilden gemeinsam mit vorhandenen Strukturen die Bausteine für Huminstoffe. Der Torfschwund führt dazu, dass der Grundwasserflurabstand mit der Zeit abnimmt, sodass die Entwässerungseinrichtungen vertieft werden müssten, um die Entwässerung weiter zu gewährleisten.

Durch die Torfmineralisation und -sackung verändern sich die bodenphysikalischen Parameter:

- **Wasserretention und -leitfähigkeit:** Es kommt zu einer Abnahme der Grobporen (50 – 10 µm) und Mittelporen (10 bis 3 µm), was zu stärkeren Moorwasserspiegelschwankungen und einer geringeren hydraulischen Leitfähigkeit führt. Die Veränderung des Bodengefüges ist besonders bei einem degradierten Oberboden durch die Bildung eines vererdeten oder vermulmten Horizonts spürbar und kann bereits bei Feldkapazität zu Luftmangel führen, was die Durchwurzelung und das Pflanzenwachstum hemmt (Succow 2001). Die kapillare Aufstiegshöhe ist bei stärker zersetzten Torf ebenfalls verringert und wirkt sich bei ausbleibendem Regen sowie hohem Grundwasserflurabstand negativ auf das Pflanzenwachstum aus (Schwärzel 2000; Gnatowski et al. 2002; Succow 2001). Weiterhin kann sich infolge der Befahrung mit schweren Maschinen ein plattenartiges Gefüge ähnlich eines „Pflughorizontes“ in 15 bis 25 cm Tiefe ausbilden (Bastian et al. 2023). In ackerbaulich genutzten Mooeren kann der so entstandene Verdichtungshorizont auch tiefer auftreten. Durch die verdichtete Schicht ist die hydraulische Leitfähigkeit reduziert und es kann zu Überstauereignissen kommen. Wenn das Wasser auf entwässerten Moorflächen steht, liegt das in der Regel nicht an einem erhöhten Grundwasserstand, sondern an der reduzierten Infiltrationsrate in den Moorboden.
- **Benetzbarkeit:** Entwässerte Moore sind schwer benetzbar, da die Zersetzung organischer Substanz in nicht wasserlösliche Bestandteile wie Huminstoffe, Fette und

Wachse erfolgt (Scheffer et al. 2010) und die Luft aus kleinen Poren schwerer zu verdrängen ist. Dieser Umstand kann wie die Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit zu einer reduzierten Infiltration und damit zu Überstauereignissen führen.

- **Wärmespeicherkapazität:** Die fehlende Wärmespeicherkapazität des entwässerten Bodens führt zu einem raschen Temperaturanstieg, was die biologische Aktivität erhöht. In klaren Strahlungs Nächten kann der Boden hingegen sehr stark abkühlen. Das kann einerseits zu hohen Temperaturschwankungen im Tagesverlauf als auch ersten Bodenfrösten im August führen und dadurch den Aufwuchs der Ansaat beeinträchtigen (Succow 2001).
- **Veränderungen in der Moormächtigkeit:** Die Entwässerung führt zu Sackung durch Wasserentzug, Schrumpfung der einzelnen Teilchen und Torfschwund durch Mineralisation. Diese Effekte reduzieren die Moormächtigkeit, was die Struktur und die hydrologischen Eigenschaften des Moors beeinflusst (Ellenberg und Leuschner 2010). Der Moorschwund durch Sackung und oxidativen Torfabbau führt zu einem jährlichen Rückgang der Torfmächtigkeit von 5 bis 10 mm bei Grünlandnutzung beziehungsweise 12 bis 20 mm bei Ackernutzung (Succow 2001).

Die aeroben Verhältnisse haben Einfluss auf die Mobilisierung und Immobilisierung verschiedener chemischer Elemente und Verbindungen. Die erhöhte Sauerstoffverfügbarkeit fördert die Mineralisierung von organischen Substanzen im Moor. Dabei werden Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor freigesetzt, deren erhöhte Konzentration negative Auswirkungen auf die Wasserqualität, einschließlich der potenziellen Gefahr der Nährstoffanreicherung (Eutrophierung) haben kann. In einigen Fällen kann die Entwässerung dazu führen, dass Schadstoffe wie Schwermetalle vermehrt mobilisiert werden. Dies geschieht oft in Verbindung mit Veränderungen im Redoxpotenzial und der Löslichkeit von Schwermetallen im Bodenwasser.

2.3 Ziele und Folgen einer Wasserstandsanhhebung

Der vorrangige Effekt der Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten Moorflächen besteht in der Reduktion von Treibhausgasemissionen. Während beim aeroben Abbau der organischen Substanz vor allem Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Lachgas (N_2O) entstehen, wird unter anaeroben Bedingungen (besonders bei Überstau) Methan (CH_4) produziert. Daher sollte der Wasserstand idealerweise im Jahresmittel etwa 7 cm unterhalb der Geländeoberfläche liegen, um die Summe der CO_2 -Äquivalente zu minimieren (Eickenscheidt et al. 2024). Ein weiterer bedeutender Vorteil der Wiedervernässung liegt in der Verhinderung weiterer irreversibler Verschlechterungen der bodenhydraulischen Eigenschaften sowie eines vollständigen Verlustes des Torfbodens, der im Gegensatz zum häufig unfruchtbaren, anstehenden mineralischen Untergrund bewirtschaftet werden kann.

Weiterhin kann die Wasserstandsanhhebung zu einem ausgeglichenen Landschaftswasserhaushalt beitragen, indem Retentionsflächen erhalten werden und die Wasserqualität durch die Filterung von Schadstoffen verbessert wird. Obgleich die Veränderung der Torfeigenschaften durch die Entwässerung größtenteils irreversibel ist, können beispielweise Wurzeln der Nasskulturen zu einer Regeneration der Bodenstruktur beitragen (Bastian et al. 2023). Wie genau Moore zu einem Wasserrückhalt bei Starkregenereignissen beitragen können, ist von vielen Faktoren abhängig: Am relevantesten ist die Aufnahmekapazität (Ausgangswasserstand) des Moores und das Abflussverhalten im oder auf dem Torfkörper, welches von den spezifischen Torfeigenschaften abhängt. Ebenso spielen die Lage im Einzugsgebiet, das

Relief (Hangneigung, Senken) und die Vegetation (Verdunstung, Verlangsamung des Oberflächenabflusses durch Rauigkeit) eine Rolle (Price et al. 2016; Tiemeyer et al. 2017). Bei besonders stark degradierten Oberböden ist die hydraulische Leitfähigkeit im Allgemeinen so stark reduziert, dass kaum Wasser, unabhängig vom Ausgangswasserstand und Anfangswassergehalt, infiltrieren kann. Zusätzlich verliert das Moor durch die Verringerung des Porenvolumens, insbesondere der Grobporen, seine Retentionsfähigkeit. Das bedeutet, dass ein degradiertes Moorkörper nicht mehr in der Lage ist, Wasser effektiv aufzunehmen und zu speichern. Eine Wiedervernässung kann diesen negativen Effekt stoppen und hat bei degradierten Oberböden bezogen auf den verfügbaren Wasserspeicher bei Starkniederschlagsereignissen wenig Auswirkungen, da die Infiltrationsrate in den degradierten Oberboden gering ist. Bei stark zersetzten Torfhorizonten kann es nach der Wasserstandsanhhebung außerdem anfänglich zu einem Austrag von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) sowie von Phosphor und Ammonium kommen (Zak und Gelbrecht 2007).

3 Auswahl von Maßnahmen zur Wasserstandsanhhebung

Im folgenden Kapitel werden die Schlüsselfaktoren bei der Auswahl und Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen vorgestellt. Ziel ist es, eine fundierte Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur Wasserstandsregulierung zu schaffen. Dies umfasst die Standortcharakterisierung, die Betrachtung von ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen sowie die Auswahl geeigneter Techniken für das Wassermanagement.

In Zusammenhang mit den aktuellen Vorgaben zur Flächenförderung im Rahmen des Bayerischen Kulturlandschaftsprogramms – Teil Moorbauernprogramm (KULAP M) wird ein Zielwasserstand von 10 cm beziehungsweise 20 cm unter Flur gefordert. Eine Veränderung des Zielwasserstandes ist nur auf Antrag in Ausnahmefällen zulässig (Stand 2024). Durch die Wasserregelungstechniken kann nach erfolgter Genehmigung im Bedarfsfall für jeden Standort gezielt auf saisonale und lokale Gegebenheiten wie vorhandene Maschinen, Verwertung der angebauten Kulturen (Schnittzeitpunkte und -häufigkeit) und natürliche saisonale Wasserstandsschwankungen reagiert werden. Zu den Optionen einer [moorbodenschonenden Bewirtschaftung](#) zählen vor allem Nassgrünland und Paludikulturen.

3.1 Planung

Die Planung eines Projekts zur Wasserstandanhebung ist stark von dessen Komplexität abhängig und erfordert bei großen Gebieten eventuell die Nutzung eines hydrologischen Modells für das Projektgebiet. Dieser Abschnitt konzentriert sich ausschließlich auf die Planung der regelbaren Wasserstandsanhhebung einzelner entwässerter, landwirtschaftlich genutzter Flächen. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass ein maximaler Flächenwasserstand angestrebt wird, der gegebenenfalls durch das Wasserregelungssystem abgesenkt werden kann. In zahlreichen Leitfäden wird die Planung von Moorschutz-Projekten ebenfalls thematisiert (vgl. Kapitel 6.1).

Vor der Umsetzung der Maßnahmen muss geprüft werden, ob eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich ist. Sofern dies zutrifft, werden naturschutzrechtliche Aspekte von der verfahrensführenden Behörde (Kreisverwaltungsbehörde) unter Einbeziehung der unteren Naturschutzbehörde mitgeprüft. Sollte keine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich sein, sind die naturschutzrechtlichen Aspekte unabhängig davon zu prüfen (LfL 2024). Die frühzeitige Einbindung der zuständigen Behörden (Kreisverwaltungsbehörde) wird dringend empfohlen, um den zeitlichen und organisatorischen Aufwand abschätzen zu können.

Bei der Planung handelt es sich um einen iterativen Prozess, sodass die Abfolge der Schritte nicht streng chronologisch betrachtet werden kann.

3.1.1 Standortcharakterisierung

Zur Standortcharakterisierung gehören die Beschreibung der Geographie, Hydrogeologie, Topographie, des Moorkörpers, der Wasserhaushaltsgrößen sowie relevante Informationen über das Entwässerungssystem sowie der Anrainer. Die Gebietscharakterisierung bildet die Grundlage für die Abgrenzung von planungsrelevanten Raumeinheiten und Teileinzugsgebieten.

3.1.1.1 Erfassung von Primär- und Sekundärdaten

Relevante Informationen für die Planung können insbesondere/beispielsweise aus Karten über den Moorkörper, die derzeitige Nutzung, Schutzgebiete, Vegetation, Dräneinrichtungen und Geologie sowie Bohrungsdaten, digitalen Geländemodellen und Luftbildern gewonnen werden. Die Förderfähigkeit des betroffenen Feldstücks und seiner Umgebung kann in der [Moorbodenkulisse \(GLÖZ 2\)](#) eingesehen werden. Weiterhin sind Informationen über die Wasserhaushaltsgrößen wie Niederschlag, Verdunstung und Versickerung in tiefere Grundwasserleiter relevant. Über weitere Bilanzgrößen wie Zu- und Abfluss ist meistens nichts bekannt. Durch die Abgrenzung des ober- und unterirdischen Einzugsgebiets, sowie Informationen über den mineralischen Untergrund und den Zersetzungsgrad des Moorkörpers können erste Abschätzungen über diese Wasserhaushaltsgrößen getroffen werden. Weiterhin ermöglichen Informationen über den hydrogenetischen Moortyp Rückschlüsse auf die Heterogenität des Moorkörpers und den mineralischen Untergrund sowie die zu erwartenden saisonalen Schwankungen durch den Wasserzufluss. Die Flächenwasserbilanz wird analysiert, um festzustellen, ob der Rückhalt von Niederschlagswasser oder Grundwasser ausreichend ist, oder ob zusätzlich Wasser zugeführt werden muss. Hierbei werden auch die Entwässerungseinrichtungen erfasst, sofern keine Informationen darüber vorliegen. Besitzverhältnisse, insbesondere der Anrainer, werden dokumentiert, um potenzielle Nutzungskonflikte von Anfang an mitzudenken.

Vorhandene Quellen für Primär- und Sekundärdaten werden im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vorgestellt.

3.1.1.2 Vorerkundung

Neben der Analyse bereits vorhandener Daten ist die Vor-Ort-Begehung für die Maßnahmenplanung erforderlich. Dabei wird überprüft, ob die relevanten Informationen aus den Karten korrekt sind. Insbesondere die Entwässerungseinrichtungen und in Frage kommende Positionen für Stauanlagen müssen im Feld begutachtet werden. Die Erfassung von Dränagen kann sich aufgrund von fehlendem, ungenauen oder unvollständigen Kartenmaterial als schwierig erweisen. Zur Verifizierung des Dränagensystems kann das digitale Geländemodell in GIS-Programmen überhöht oder auf Luftbildern anhand von Unterschieden in der Vegetationsperiode erkannt werden. Der Erfolg vom Einsatz geophysikalischer Verfahren hängt sowohl von dem Material der Dränagen als auch dem Mineralstoffgehalt des Moorwassers ab und ist bei Tondränagen nicht effektiv. Das Georadarverfahren stellt eine geeignete geophysikalische Methode dar, um PVC- und Eisenrohre zu detektieren. Bei dem Verfahren wird elektromagnetische Strahlung an Grenzflächen mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften reflektiert. Die Reflexionszeit ermöglicht die Bestimmung der Tiefe von Reflexionshorizonten. Die Untersuchung torfiger Böden gestaltet sich bei hohem Wassergehalt und möglichen Störungen durch Ionen (z. B. nach Düngungsmaßnahmen)

schwierig. Die Georadar-Methode kann aber auch effektiv sein, um die mineralische Schicht zu detektieren (Proulx-McInnis et al. 2013). Die Mündungen von aktiven Dränagen in Gräben können, während der Dränperiode, durch sicht- und hörbaren Dränabfluss lokalisiert werden. Erkundungen durch Baggerarbeiten sollten als letztes Mittel eingesetzt werden.

3.1.2 Synergien und mögliche Konflikte mit dem Naturschutz

Wiedervernässungsmaßnahmen können Lebensräume für eine Vielzahl von Pflanzen- und Tierarten schaffen oder wiederherstellen, die an feuchte Bedingungen angepasst sind. Dies umfasst insbesondere spezialisierte Moorpflanzen, Amphibien, Vögel und Insekten. Vor allem gefährdete, auf Moorlebensräume angewiesene Arten können von der Wiedervernässung profitieren, ebenso wie Arten wie Wiesenbrüter von der damit einhergehenden Extensivierung. Es können sich jedoch auch Zielkonflikte in Zusammenhang mit einer Wiedervernässung ergeben. Um die naturschutzfachlichen Belange vor Ort einzuordnen sind die zuständigen Naturschutzbehörden frühzeitig mit einzubeziehen.

Das Landesamt für Umwelt arbeitet derzeit an einem Handlungsleitfaden mit weiterführenden Informationen zum Umgang mit aquatischen Zielkonfliktarten im Moorschutz.

3.1.3 Nutzungsansprüche lokaler Akteure

Die Berücksichtigung sozioökonomischer Aspekte beinhaltet die Analyse der landwirtschaftlichen Nutzung, potenzieller Auswirkungen auf Anwohner sowie die Identifizierung relevanter Beteiligter. Hierbei werden verschiedene Parameter detailliert betrachtet, darunter die Anzahl der privaten Eigentümer pro Hektar, der Anteil der Flurstückfläche im staatlichen oder kommunalen Besitz, der Flächenanteil von Ackerland im Verhältnis zur Gesamtfläche und angrenzende Siedlungen. Diese Informationen sind wesentlich, um sicherzustellen, dass mögliche Maßnahmen im Einklang mit den Bedürfnissen und Interessen der lokalen Bevölkerung stehen. Eine umfassende Identifizierung aller Beteiligten ermöglicht es zudem, alle relevanten Akteure in den Planungsprozess einzubeziehen und sicherzustellen, dass ihre Perspektiven angemessen berücksichtigt werden.

3.1.4 Auswahl geeigneter Maßnahmen

Abbildung 1 zeigt einen Entscheidungsbaum zur Auswahl geeigneter Maßnahmen, die von den vorhandenen Entwässerungsstrukturen abhängen. Dabei spielen auch die klimatischen Bedingungen und die hydrologische Konnektivität des Torfkörpers in der Landschaft eine entscheidende Rolle. Diese Faktoren bestimmen, ob es ausreicht, die Entwässerung zu beenden und den Wasserstand anzuheben („Anstau“), oder ob zusätzliches Wasser aus angrenzenden Oberflächengewässern oder Grundwasserkörpern benötigt wird („Einstau“). Die konkrete Umsetzung dieser Maßnahmen wird im Kapitel 4 detailliert erläutert.



Abbildung 1: Auswahl geeigneter Maßnahmen in Abhängigkeit von den vorhandenen Entwässerungseinrichtungen. Gräben können durch Stauwehre oder -dämme verschlossen werden. In Kombination mit einer (rohrlosen) Unterflurbewässerung oder einer hangparallelen Überrieselung kann die Effektivität dieser Maßnahmen erhöht werden. Dränagen können an ihrer Mündung in den Gräben durch einen Aufsatz oder, falls der Anstau auf der Fläche erfolgen soll, durch einen Schacht angestaut werden [verändert nach (LfL 2024)].

Bei großflächig abgesenkten Wasserständen ist entscheidend, ob eine Stauschicht vorhanden ist, die eine Anhebung des Wasserstands auf einer einzelnen Fläche ermöglicht. Dies gilt auch, wenn auf einer Fläche keine umfunktionierbaren Entwässerungsstrukturen für den Rückstau vorhanden sind. In solchen Fällen wäre nur durch eine großflächige Anhebung des Wasserstands eine Wiedervernässung der Fläche möglich.

Eine häufig angewandte Maßnahme ist das Anstauen eines Grabens durch ein Stauwehr oder einen Staudamm. Allerdings ist die Flächenwirkung eines solchen Anstaus in der Regel begrenzt. Wenn der Wasserstand im Graben hoch genug ist, kann das Wasser durch die Umfunktionierung über in den Graben mündende Dränagen oder durch eine rohrlose Unterflurbewässerung in die Fläche gelangen.

Im Allgemeinen folgt die Grundwasserströmung dem Gefälle des Oberflächenreliefs in Richtung Vorflut. Durch den Rückstau des Grundwassers können die Grundwasserflurabstände in der Nähe der Maßnahmen verringert werden. Der Einfluss dieses Rückstaus nimmt jedoch mit zunehmendem Abstand ab. Daher sollte auf geeigneten Flächen nach einer bestimmten Höhendifferenz ein erneuter Rückstau erfolgen.

Die Bestimmung des Grundwasserstandes in Moorflächen erfordert die Berücksichtigung vieler Faktoren, die die Wasserbilanz beeinflussen (siehe Kapitel 3.1.1). Das Digitale Geländemodell (DGM) kann insbesondere in Gebieten mit unzureichenden Daten über andere Faktoren aufgrund seiner detaillierten topographischen Informationen und breiten Verfügbarkeit als relevanter Indikator dienen, um potenzielle Grundwasserstände abzuschätzen.

Für eine erfolgreiche Anhebung des Wasserstands ist eine präzise Analyse der Topografie erforderlich, um die besten Standorte für die Staulemente zu bestimmen. Mithilfe einer DGM-Analyse können einzelne Teileinzugsgebiete abgegrenzt und Fließpfade ermittelt werden. Je nach gewünschtem Anstauziel muss bei bestimmten Höhenunterschieden eine geeignete Stauposition gewählt werden, sofern entsprechende Strukturen vorhanden sind. Das tatsächlich erreichte Anstauziel im Jahresmittel ist schwer vorherzusagen und hängt von vielen Faktoren wie Zufluss, Hangneigung und Torfzersetzungsgrad ab (vgl. Kapitel 5). Die Topographie bietet dabei eine grobe Orientierung. Die Auswirkungen einzelner Wiedervernässungsmaßnahmen sind auch mithilfe eines hydrologischen Modells nur bedingt vorhersagbar und unterliegen saisonalen Schwankungen.

3.1.5 Wasserrechtlicher Antrag

Die Nutzung von Gewässern wird vor allem im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und im Bayerischen Wassergesetz (BayWG) geregelt. Nach dem Bayerischen Wassergesetz benötigen Maßnahmen, die mit der Benutzung von Wasserkörpern verbunden sind, grundsätzlich einen wasserrechtlichen Erlaubnis. Bei Gewässern von **wasserwirtschaftlich untergeordneter Bedeutung** kommt nur ein Teil der wasserrechtlichen Vorgaben des WHG zum Tragen, so dass nicht immer ein wasserrechtliches Verfahren erforderlich sein muss.

In Absprache mit der Kreisverwaltungsbehörde (KVB) wird vorab geklärt, ob die Maßnahmen so umsetzbar und genehmigungspflichtig sind sowie welche Unterlagen eingereicht werden müssen. Die KVB holt sich zur fachlichen Beurteilung die Stellungnahme vom Wasserwirtschaftsamt und ggf. weiteren Akteuren wie der unteren Naturschutzbehörde ein. Auch die Gemeinde oder der Wasser- und Bodenverband werden beteiligt, da diesen die Unterhaltungspflicht von Gewässern 3. Ordnung obliegt. Gegebenenfalls sind neben den wasserrechtlichen auch naturschutzrechtliche Aspekte sowie Aspekte der Umweltverträglichkeitsprüfung zu beachten. Weiterführende Informationen zur Genehmigungspflicht einzelner Maßnahmen, dem Erstellen eines wasserrechtlichen Antrags sowie zu potentiellen Ansprechpartnern sind in der [Arbeitshilfe zur Beantragung einer wasserrechtlichen Genehmigung](#) zu finden (LfL 2024).

3.1.6 Monitoring und Beweissicherung

Monitoring und Beweissicherung können aus fachlicher Sicht, sowie aus Sicht der Behörden wichtige Instrumente in Zusammenhang mit Wasserstandsanhhebungen sein. Sie sind kein direkter Bestandteil des Moorbauernprogramms. Sofern im Rahmen von konkreten Verfahren entsprechende Auflagen erteilt werden, sind die technischen Möglichkeiten und Erfordernisse im Einzelfall zu klären.

3.1.7 Finanzierung und Ressourcen

Für Maßnahmen zur Wasserstandsanhebung fallen Planungs- sowie Umsetzungskosten an. Planungskosten entstehen vor allem bei komplexeren Vorhaben und fließen in der Regel als Stundensätze externer Kräfte in die Kalkulation ein. Die *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)* regelt die Honorare für planerische und ingenieurtechnische Leistungen im Bauwesen, einschließlich die des Wasserbaus. In der HOAI sind für verschiedene Fachdisziplinen und Leistungsphasen bestimmte Prozentanteile der anrechenbaren Kosten eines Bauvorhabens als Honorar festgelegt. Bei öffentlichen Aufträgen ist es üblich, dass die Sätze der HOAI zur Anwendung kommen.

Für die Umsetzungskosten werden Materialkosten, Arbeitszeit sowie der Materialtransport im Gelände berücksichtigt. Für die Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Fläche können noch keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. In Kapitel 5 werden anhand der im Verlauf des Projektes „Moorverträgliche Bewirtschaftungsmaßnahmen“ durchgeführten Maßnahmen Kostenabschätzungen getroffen.

Im Rahmen des Moorbauernprogramms werden Planungs- und Infrastrukturkosten über die [Instrumente der Ländlichen Entwicklung](#) gefördert. Zu den Möglichkeiten informieren die ÄELF und ÄLE.

4 Umsetzung von Maßnahmen zur Wasserstandsanhebung

Bei der Umsetzung steht die Auswahl geeigneter Techniken, die Berücksichtigung ökologischer und hydrologischer Faktoren sowie die Integration einer ökologischen Baubegleitung im Fokus.

Im Rahmen der Umsetzung von Wiedervernässungsmaßnahmen in Moorlandschaften ist eine sorgfältige Planung und Durchführung der Bauarbeiten von entscheidender Bedeutung. Idealerweise sollten die Bauarbeiten während Phasen niedriger Moorwasserstände erfolgen, um die Wasserhaltung zu erleichtern. Es ist ratsam, die Funktion der Bauwerke regelmäßig zu überprüfen, insbesondere nach Starkniederschlagsereignissen oder während Trockenperioden, um ihre Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Falls im wasserrechtlichen Antrag das zuständige Personal für die Techniken noch nicht benannt wurde, sollte mindestens eine Person für die Regelung und Überwachung der technischen Einrichtungen bestimmt werden.

Bei Baugruben mit einer Tiefe von etwa 1,2 Metern bis 3 Metern sind, abhängig von den Bodenverhältnissen und der Art der Bauarbeiten, Sicherungsmaßnahmen notwendig. Hierbei kommen verschiedene Methoden wie das Anlegen von Böschungen, der Einsatz von Verbauwänden, Spundwänden oder anderen stabilisierenden Konstruktionen in Betracht.

Eine ökologische Baubegleitung ist erforderlich, wenn Bauvorhaben in sensiblen Ökosystemen oder Naturschutzgebieten durchgeführt werden, um eine umweltfreundliche Umsetzung zu gewährleisten. Die Bauarbeiten sollten sich zudem an den Lebenszyklen von Tieren wie Wiesenbrütern oder Amphibien orientieren, um mögliche Störungen zu minimieren. Der Einsatz schwerer Gerätschaften sollte auf ein Minimum beschränkt werden.

4.1 Auswahl einer geeigneten Wiedervernässungsmaßnahme

Im folgenden Kapitel sind die in Abbildung 1 aufgeführten Wasserregelungstechniken näher erläutert.

4.1.1 Grabenan-/einstau durch Stauwehr und Staudamm

Eine gängige Maßnahme zur Wasserstandsanhhebung ist das Anstauen eines Grabens durch ein Stauwehr oder einen Staudamm. Die Flächenwirkung eines Grabenanstaus kann allerdings begrenzt sein, da der radiale Zustrom durch eine geringe hydraulische Leitfähigkeit gehemmt ist oder ein hoher Eintrittswiderstand an Grabenböschung und -sohle durch Ablagerung von Feinmaterial in Porenräumen (Kolmation) besteht (Succow 2001). Durch die Umfunktionierung bestehender Dränagen kann die Flächenwirkung erhöht werden. Dazu fließt das Wasser bei hohem Wasserstand aus dem Graben in die Fläche. Sind keine Dränagen vorhanden kann eine rohrlose Unterflurbewässerung mithilfe eines Pflugaufsatzes (siehe Kapitel 4.1.4) gezogen werden. Im Gegensatz zur Renaturierung sollen die Gräben nicht irgendwann vollständig verlanden, vielmehr setzt eine landwirtschaftliche Nutzung eine Wasserregelbarkeit und somit ausreichende Tiefe des Grabens voraus. Wird (zum Beispiel in Trockenzeiten) zusätzliches Wasser in den Graben eingeleitet, spricht man von einem Grabeneinstau statt von einem Grabenanstau.

An das technische Bauwerk zum Grabenstau sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Die Unter- und Umströmung soll so gering sein, dass der gewünschte Wasserspiegel auf der stauenden und nicht-stauenden Seite im Graben gehalten werden kann.
- Die äußere Standsicherheit (Kippen, Gleiten, hydraulischer Grundbruch) muss insbesondere bei Starkniederschlagsereignissen gewährleistet sein.
- Der Schieber beziehungsweise Rohrdurchlass muss so konzipiert sein, dass der Hochwasserdurchfluss abgeführt beziehungsweise die Bewirtschaftung schnell erfolgen kann. Um ein Ausuferen auf der stauenden Seite zu verhindern, bietet es sich an den Schieber nicht bis an die Geländeoberkante zu dimensionieren beziehungsweise auf dem Staudamm eine „Abflussrinne“ zu modellieren.

Dabei ist die Dimensionierung und bautechnische Prüfung der Staubauwerke vom Niedrig- und Hochwasserdurchfluss sowie von der Geologie abhängig. Da Torf ein instabiler Baugrund ist, sollten die Stauwehre zur Verankerung möglichst in die mineralische Schicht eingebunden werden. Dadurch wird auch die Gefahr von Kippen und Gleiten minimiert. Für die Berechnung der äußeren Standsicherheit sowie der Unter- und Umströmung werden Bodenkennwerte benötigt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über die Bodenkennwerte von Torf. ¹Die Wichte unter Auftrieb kann bei abnehmenden Porenvolumen (geringerer Volumenanteil an Wasser) deutlich höher liegen (EAU 1990).

Bodenkennwert		
Eigengewicht von Torf	Feuchter Boden γ	11 kN/m ³
	Unter Auftrieb γ'	1 kN/m ³ - 3 kN/m ³ ¹
Innere Reibung φ		15 °
Kohäsion c		5 kN/m ³
Steifemodul E_S		0,7 MN/m ²
Eigengewicht des Wassers γ_w		9,81 kN/m ³
gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_f		1 · 10 ⁻⁷ m/s bis 1 · 10 ⁻⁵ m/s (in Abhängigkeit vom Torfzersetungsgrad)

Um Staueinrichtungen an Gewässern planen beziehungsweise dimensionieren zu können, werden Daten zum Abfluss benötigt. Für kleine Einzugsgebiete liegen häufig keine Abflussdaten vor oder die Datenreihen sind zu kurz, um sie statistisch auszuwerten. Eine grobe Abschätzung des Bemessungshochwasserscheitelzuflusses, der der größte Durchfluss ist, für den die wasserbaulichen Anlagen ausgelegt werden sollte, kann mittels des Verfahrens „Kurven nach WUNDT“ getroffen werden gemäß DWA-Regelwerk M 522 (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2015):

$$HQ = 13,8 A_E^{0,6} \quad (1)$$

A_E ... Einzugsgebietsgröße in km^2

HQ ... abgeschätzter Hochwasserzufluss in m^3/s .

Bayernweit stehen die Einzugsgebiete für Fließgewässer bis Stufe 15 als Geodaten („Innerbayerische[n] Einzugsgebiete der Fließgewässer im Bezugsmaßstab 1:25.0000“) zur Verfügung. Bis Stufe 6 können diese im WMS-Layer „Grundlagen Fließgewässer“ eingelesen werden. Die Einzugsgebietsgröße kann auch mit Hilfe von GIS-Tools ermittelt werden. Dazu werden die kleinen Senken im DGM aufgefüllt, das Strömungsnetz bestimmt und das Einzugsgebiet abgegrenzt.

ArcGIS (10.8.2): Fill → Flow Direction → Basin

QGIS (3.28): r.fill.dir → r.watershed → r.water.outlet

Da Dränagen, sofern sie nicht das Relief beeinflusst haben, die Einzugsgebiete signifikant verändern, sollten die Einzugsgebiete unter Berücksichtigung der Ausmaße der Dränagen modifiziert werden. Gleiches gilt für Gebiete mit flacher Topografie, in denen die Abgrenzung der Einzugsgebiete zu prüfen ist.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Betrachtung nach Wundt eine stark vereinfachte Methode darstellt. Abgesehen von der Größe des Einzugsgebiets werden viele wichtige hydrologische Faktoren wie die Form und Lage des Gebiets, die Landnutzung, die Eigenschaften der Gewässer und die Hochwassergenese nicht berücksichtigt. Deshalb wird die von Wundt in den Jahren 1950 und 1956 veröffentlichte Methode heutzutage hauptsächlich zur Überprüfung der Plausibilität verwendet. Erfahrungen aus der Wasserwirtschaftsverwaltung zeigen, dass die nach Wundt ermittelten HQ100-Werte oft um den Faktor 3 bis 5 überschätzt werden, insbesondere in sehr kleinen Einzugsgebieten. Wer mehr über die aktuellen Hochwasserkennwerte erfahren möchte, kann sich in der Regel an das zuständige Wasserwirtschaftsamt wenden. Dort sind Informationen zu finden, die aus Regionalisierungsprodukten, älteren Gutachten oder den Pegeldaten in der Umgebung stammen, sofern diese verfügbar sind.

einen hydraulischen Grundbruch zu vermeiden, muss ein Sicherheitsbeiwert überschritten werden (für eine permanente Belastungssituation bei ungünstigem Untergrund nach DIN 1054 $f = 1,80$, bei günstigem Untergrund $f = 1,35$) (Deutsches Institut für Normung 2022).

Es ist auch möglich aus dem festgelegten Sicherheitsbeiwert die Mindestlänge des Sickerwegs auszurechnen. Wird darauf basierend das Stauwehr dimensioniert, muss die Sickerweglänge L , die sich durch die Höhe der Staueinrichtung ableiten lässt (siehe Abbildung 4), länger als der errechnete kürzeste Sickerweg l_{min} sein. Die genaue Bestimmung der Sickerwasserlänge würde eine detaillierte Analyse der Bodenbedingungen und des Strömungspfad des benötigen.

Die Sickerwasserlänge lässt sich überschlägig wie folgt berechnen: Ein Stauwehr, das 2 Meter in den Boden reicht, hat eine vertikale Sickerwasserlänge von 2 x 2 Metern. Allerdings kann die tatsächliche Sickerwasserlänge länger sein, da auch horizontale und geneigte Fließwege berücksichtigt werden müssen. Überschlägig kann dafür 1 Meter dazugerechnet werden, sodass sich für das Beispiel eine Gesamt-Sickerwasserlänge von 5 Metern ergibt.

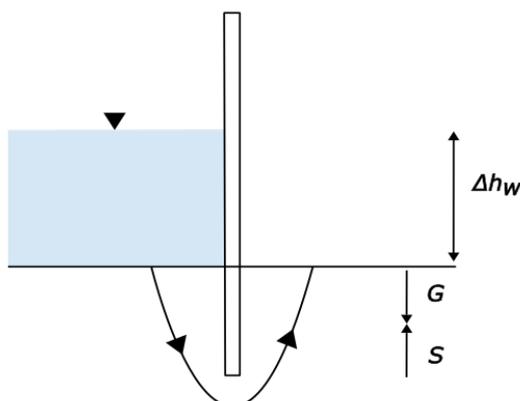


Abbildung 3: Zu einem hydraulischen Grundbruch kommt es, wenn die Strömungskraft des Wassers (S) größer ist als die Gewichtskraft des Bodens unter Auftrieb (G). Eine besonders kritische Stelle stellt der Punkt direkt nach dem Stauwehr auf der nicht-stauenden Seite dar. Durch die Verlängerung des Sickerweges wird der Unterschied im hydraulischen Potential (Δh_w) über eine längere Strecke abgebaut und der hydraulische Gradient als Antrieb der Strömungskraft kann reduziert werden.

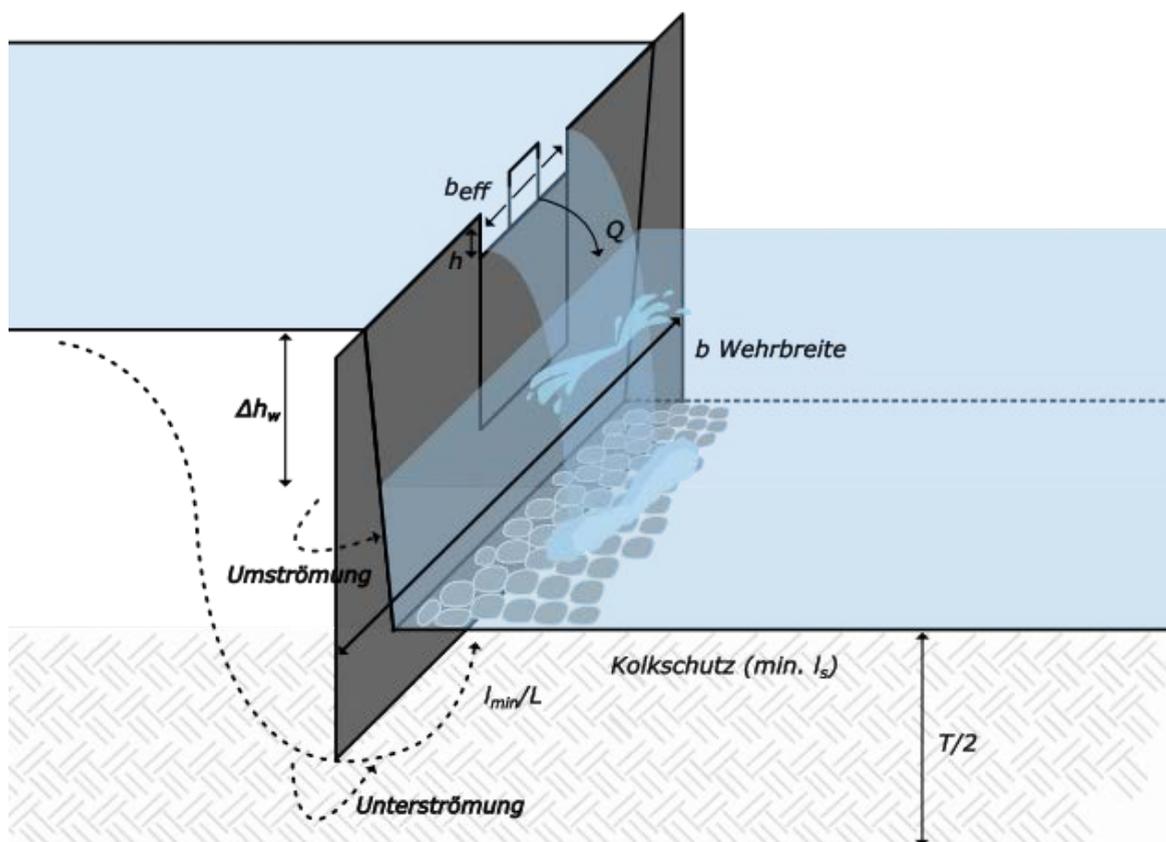


Abbildung 4: Die wichtigsten Größen, um die Dimensionierung eines Stauwehrs inklusive Schieber zu berechnen.

b) Dimensionierung und Konstruktion des Schiebers:

Eine Dimensionierung des Schiebers zum Erreichen eines bestimmten Abflusses bei Öffnen von diesem ist zumeist für die Regelung des Grabenwasserstandes nicht unbedingt erforderlich. Allerdings sollte im Hochwasserfall der maximale Durchfluss (siehe Formel 3) auch bei geschlossenem Schieber möglichst ohne Ausuferen abgeführt werden. Die Überfallhöhe h ist der Wasserstand oberhalb des Schiebers. Deswegen muss der Schieber der maximalen Überfallhöhe entsprechend unter der Grabenschulter enden. Ob über dem Schieber genügend Durchfluss abgeführt werden kann, wird mithilfe der Poleni-Formel berechnet:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b_{eff} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \quad (3)$$

Dabei ist μ der Überfallbeiwert (überschlägig 0,64 für ein scharfkantiges Wehr), b_{eff} [m] die durch Seitenkontraktion (und Einschränkung durch die Spindel oder den Heber des Schiebers) verringerte Überfallbreite, g die Gravitationsbeschleunigung [m/s^2] und h [m] die Überfallhöhe. Nach der Überfallhöhe umgestellt ergibt sich folgende Gleichung:

$$h = \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{\mu \cdot b_{eff} \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{2/3} \quad (4)$$

Je nach Hochwasserdurchfluss müsste der Schieber rein rechnerisch weiter unten angesetzt werden, hier sollte eine Abwägung zwischen der Verhinderung des Ausuferns und dem Erreichen eines mittleren hohen Grabenwasserstands getroffen werden.

Im Wasserbau und in der Abwasserbewirtschaftung kommen standardmäßig Absenkschütze oder Steckschütze zum Einsatz. Beide Schiebervarianten sind 3-seitig dichtend und werden auf der wasserstauenden Seite montiert. Der Vorteil eines Steckschützes gegenüber eines Absenkschützes ist neben den deutlich geringeren Kosten der Entfall der Mechanik, weshalb diese ohne regelmäßige Wartung bzw. Bewegung auskommen. Ein Nachteil sind die hohen Zugkräfte, um den Schieber zu öffnen.



Abbildung 5: Beispiel für einen Steckschütz (Büsch Technology GmbH)

c) Kolkenschutz

Da über den Schieber ablaufendes Wasser als Strahl abfließt, kann es zu unerwünschter Erosion (Kolkbildung) im unterliegenden Gewässerbett kommen. Als Kolkenschutz eignen sich Wasserbausteine beziehungsweise größere Schroppen, welche die Erosion von Sediment auf der nicht-stauenden Seite verhindern. Die Reichweite des Strahles l_s [m] wird über die sogenannte Drop-Nummer N_d berechnet. Dabei ist $N_d = \frac{Q^2}{g \cdot h^3}$ (5) und vom Durchfluss Q [m^3/s] sowie der Überfallhöhe h [m] abhängig. Die Reichweite des Strahls l_s berechnet sich mithilfe der Formel: $l_s = 4,3 \cdot h \cdot N_d^{0,27}$ (6). Dementsprechend länger muss der Kolkenschutz sein. Alternativ ist es möglich, ein Blech als Tosschutz einzusetzen. Dieses erfüllt allerdings keine gleichwertige Funktion bei der Vermeidung eines hydraulischen Grundbruches.

d) Unter- und Umströmung der Wehre:

Um den gewünschten Grabenwasserstand für die Wasserstandsanhhebung auf der Moorfläche halten zu können, muss der Zufluss über den Graben größer als eine mögliche Unter- oder Umströmung des Stauwehres sein. Durch eine vertikale Einbindung des Stauwehres in die mineralische Schicht kann die Unterströmung in der Regel begrenzt werden. Falls die Konstruktion nicht in die mineralische Schicht einbindet oder diese durchlässig ist, kann die

Unterströmung der Wehre nach der Potentialnetztheorie oder vereinfacht mithilfe der Formel nach Lane berechnet werden (Zanke 2013):

$$Q = b \cdot k \cdot T \cdot \frac{\Delta h_w}{L} \quad (7)$$

Dabei ist b [m] die Wehrbreite, k [m/s] die Sickergeschwindigkeit des Bodens, T [m] die Dicke der durchströmten Bodenschicht, Δh_w [m] der Druckunterschied von Unter- und Oberwasser und L [m] die gesamte Sickerlänge. Der letzte Term entspricht dem hydraulischen Gradienten i [m/m].

Die Umströmung des Wehrs kann auf ähnliche Weise berechnet werden: Dabei ist L der mittlere Sickerweg (von der Mitte des Grabens bis zum Wehr – hin und zurück) und T die Dicke der durchströmten Bodenschicht (Torfmächtigkeit unterhalb des Grundwasserspiegels). Für die genaue Bestimmung der durchflossenen Fläche ($b \cdot T$) muss b , die horizontale Länge, auf der die Umströmung stattfindet, abgeschätzt werden. Vereinfacht wird hier davon ausgegangen, dass die Umströmung in einem Abstand vor dem Stauwehr beginnt, der der Hälfte der Wehrbreite entspricht.

Als Vergleichswert dient der Zufluss über das Grabensystem, der beispielsweise mit der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler abgeschätzt werden kann. Die empirisch ermittelten Strickler-Beiwerte k_{st} [$m^{1/3}/s$] charakterisieren die hydraulische Rauigkeit und reichen von 0 (rau) bis 100 (glatt). Für Gräben mit geradem Verlauf und ohne Untiefen wird in Abhängigkeit vom Material der Gewässersohle in der Literatur ein Wertebereich von 30 bis 40 angegeben. Für die Bestimmung des hydraulischen Radius r_{hy} [m] muss das Querprofil A [m²] als auch der benetzte Umfang l_u [m] bestimmt werden (vgl. Formel 9). Das Sohlgefälle I_{so} [m/m] gibt den Höhenunterschied der Gewässersohle auf einem bestimmten Abschnitt an. Mithilfe der aus Formel 8 ermittelten Geschwindigkeit und der durchflossenen Querschnittsfläche A_d [m²] lässt sich der Durchfluss bestimmen (Formel 10) (Zanke 2013).

$$v = k_{st} \cdot r_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_{so}} \quad (8)$$

$$r_{hy} = A/l_u \quad (9)$$

$$Q = v \cdot A_d \quad (10)$$

e) Sonstiges

Bei niedrigen pH-Werten im aeroben Milieu kann Metall zersetzt werden und zu einer Funktionsuntüchtigkeit der Schieber oder Schütze führen. Korrosionsbeständige Legierungen wie Edelstahl (Legierung mit Chrom; natürliche Passivierungsschicht), Verzinkung, Beschichtungen oder Anstriche können die Korrosion verhindern. Um eine galvanische Korrosion zu verhindern, müssen die Kontaktfläche zwischen dem Schieberrahmen und der Stahlplatte mithilfe einer Flachgummidichtung galvanisch isoliert werden. Auch an weiteren Verbindungspunkten zweier metallischer Werkstoffe wie an Löchern und Schrauben sollte Kontaktkorrosion vermieden werden.

Für den erleichterten Einbau des Stauwehres sollte die untere Seite leicht angeschrägt sein. Das Stauwehr kann beispielsweise durch einen Schaufelbagger innerhalb weniger Minuten

in den Boden gerammt werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der Druck durch die Baggerschaufel an den verstärkten Enden erfolgt und nicht an den Schwachstellen, da es sonst zu Verformungen des Stauwehres kommen kann.

4.1.1.2 Staudamm

a) Komponenten eines kleinen Staudamms

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einen Staudamm in einem Graben zu konstruieren. Im Folgenden wird sich auf Erddämme konzentriert, die hauptsächlich aus Bodenmaterial aufgebaut sind. Es wird zwischen dem homogenen Erddamm und dem Zonendamm unterschieden. Der **homogene Erddamm** (vgl. Abbildung 6) besteht aus einheitlichem und bindigen, für den Dammbau geeigneten Bodenmaterial. Bindiges Bodenmaterial zeichnet sich durch einen hohen Ton- und Schluffanteil aus, wodurch dieses oft kohäsive Eigenschaften und eine hohe innere Reibung aufweist. Andererseits werden bindige Böden bei Feuchtigkeit oft plastisch und verformbar. Dadurch weisen sie ein ausgeprägtes Schrumpfungs- und Quellverhalten auf, das zu Setzungen führen kann. Bei dem homogenen Erddamm übernimmt der Dammkörper Stütz- und Dichtungsfunktion zugleich. Bei nicht ausreichend dichtem Material kann in einem **Zonendamm** (vgl. Abbildung 7) durch einen Dichtkörper im Kern wie eine Spundung die Dichtigkeit erhöht werden: Als Spundungsmaterial eignen sich insbesondere Kunststoffspundwände oder Nadelhölzer aus Fichte, Lärche, Robinie und Douglasie sowie Eiche als fest verbundene Bretterlagen oder Nut- und Federbretter. Die Materialien sollten eine gute Widerstandsfähigkeit aufweisen, indem sie eine hohe Dichte und eine natürliche Resistenz (Harze) gegen Verrottung haben. Filter (mineralisch oder aus Geotextilien) trennen Bereiche stark unterschiedlicher Körnung in einem Zonendamm voneinander ab, um diesen erosions- und suffusionsstabil zu machen. Die Auswahl eines geeigneten Filters soll die ständige Entwässerung des Dichtungskörpers und innere Stabilität garantieren, um den Boden vor Ausspülung zu schützen. Bei Bauvorhaben mit kleinen Abmessungen bieten homogene Dämme gegenüber Stauwehren klare Vorteile in Bezug auf Bauzeit, Kosten und Setzungsverhalten.

Staudämme werden lageweise geschüttet und verdichtet. Die Grundidee bei einem Staudamm ist es, die Durchlässigkeit gering zu halten und gleichzeitig eine hohe Stabilität aufzuweisen. Dazu wird ein dichtes Material verwendet, das auch einen hohen Reibungswinkel aufweist. Besonders bei dem homogenen Damm ist die Durchlässigkeit und gegebenenfalls der Dränkörper so zu dimensionieren, dass die Sickerwasserlinie in keinem Lastfall auf der luftseitigen Böschung austritt.

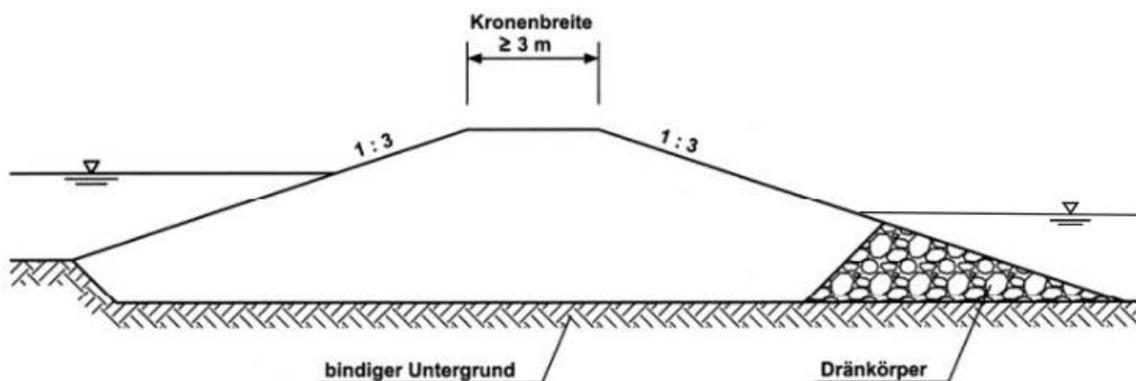


Abbildung 6: Schema eines homogenen Damms mit Dränfuß. Falls Lastfall 1 – Einseitiger Stau im Oberwasser - nicht auftreten kann, ist auch kein Dränkörper notwendig [aus DWA-Merkblatt 522].

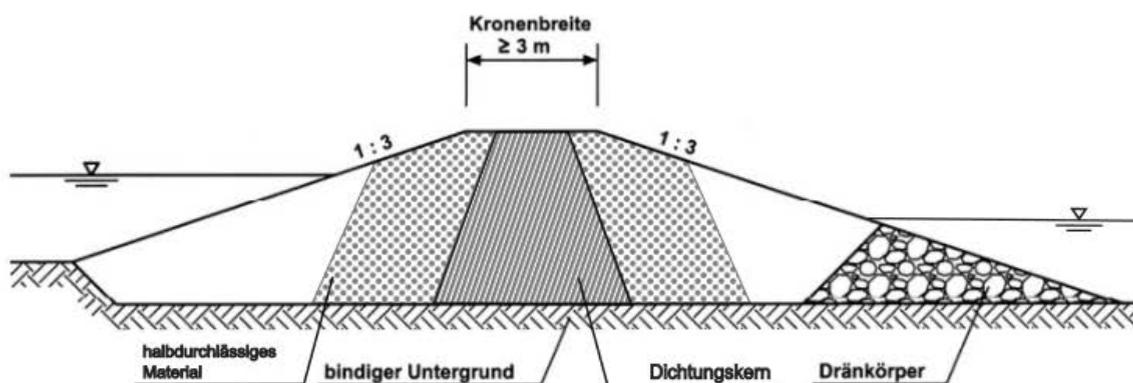


Abbildung 7: Bei einem Zonendamm nimmt die Durchlässigkeit zu den Böschungen hin zu. Falls Lastfall 1 – Einseitiger Stau im Oberwasser - nicht auftreten kann, ist auch kein Dränkörper notwendig [verändert nach DWA-Merkblatt 522, (Striegler 1998)].

Die Krone ist leicht überhöht (Freibord³ ca. 0,3 m) und weist ein leichtes Quergefälle auf. Die luftseitige Böschung kann mit einer Grasnarbe bepflanzt werden. Für die Wasserseite bietet eine Steinschüttung Schutz vor Erosion. Weiterhin sollte der Damm von Anfang an mit einer hohen Überlast geschüttet werden, um Setzungen, die bei Torf als Untergrund auftreten, vorzubeugen. Daher sollten Staubauwerke im Idealfall auf dem mineralischen Untergrund aufsetzen.

Die Stabilität des Damms wird durch Erosion und Suffosion gefährdet, bei denen Bodenpartikel durch Wasser transportiert werden. Äußere Erosion betrifft die Oberfläche, innere Erosion den Dammkörper. Suffosion, als Form der inneren Erosion, tritt bei ungleichförmigen Böden auf, wodurch nur ein Bodenskelett zurückbleibt, was zu einer erhöhten Durchlässigkeit führt. Eine geeignete Körnungslinie des Bodenmaterials ist entscheidend, um diese Prozesse zu verhindern (vgl. Kapitel b) Absatz 5).

³ Der Freibord bei Staudämmen bezeichnet den vertikalen Abstand zwischen der Wasseroberfläche des gestauten Wassers und der Oberkante des Damms. Es stellt einen Sicherheitsabstand dar, der dafür sorgt, dass bei hohen Wasserständen oder plötzlichen Zuflüssen das Wasser nicht über den Damm strömt und diesen überflutet.

b) Konstruktive Anforderungen an Erddämme

1. Standsicherheitsnachweis

Für kleinste Staubauwerke, mit einer Höhe von bis zu 2 m über den luftseitigen Böschungsfuß kann der Standsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung der spezifischen Geometrie entfallen, solange die grundlegenden konstruktiven Anforderungen und Sicherheitsvorschriften eingehalten werden, um eine langfristige Stabilität zu gewährleisten (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2015).

2. Standortbetrachtung

Der Standort sollte hinsichtlich des Bodentyps, der Tragfähigkeit, des Setzungsverhaltens und weiterer geologischer Eigenschaften des Untergrundmaterials bewertet werden. Das Absperrbauwerk und der Untergrund sind als eine gemeinsame Tragstruktur zu betrachten. Daher ist es ideal, Staudämme in den Untergrund einzubinden. Sollte dies nicht möglich sein, empfiehlt sich der Einsatz einer möglichst unvollkommenen Dichtung vor oder unter der Gründungssohle des Bauwerks, um den Sickerweg zu verlängern. Vertikale Dichtungselemente sollten aufgrund der Erosionsgefahr nicht in Bereichen mit größeren Inhomogenitäten im Untergrund enden. Die Beschaffenheit des Untergrunds ist entscheidend für die Stabilität des Staudammes, sodass keine erheblichen Unterschiede im Setzungsverhalten auftreten dürfen.

3. Hydrologische Bewertung

Der mittlere und der maximale Durchfluss sind entscheidende Parameter für die Dimensionierung des Staudamms (siehe auch Kapitel 4.1 und 4.1.1.1 Absatz d). Eventuell ist eine befestigte Mulde auf der Oberfläche notwendig, in der Wasser bei Hochwasserdurchfluss kontrolliert abfließen kann, ohne dass der Damm überströmt und die Struktur destabilisiert wird.

4. Staudammgeometrie

Die gewünschte Höhe, Länge und Breite des Staudamms muss festgelegt werden. Die Geometrie beeinflusst direkt die Stabilität und Kapazität des Damms. Ein flaches Böschungsprofil (1:3) reduziert die Geschwindigkeit des Wasserflusses und mindert die Erosion. Dabei gilt die Faustregel, dass die Böschungsneigung viel geringer sein muss als der Reibungswinkel, der von der Bodenart abhängig ist. Eine ausreichende Dimensionierung garantiert weiterhin, dass die Sickerwasserlinie unterhalb des luftseitigen Dammfußes austritt. Bei Zonendämmen tritt die Sickerlinie aufgrund der Abdichtung tiefer aus als bei einem homogenen Damm. Aufgrund der Setzung von organischem Untergrund sollte eine Überlastschüttung von 20 bis 25 % der Dammhöhe gewählt werden.

5. Bodenmaterial

Es wird empfohlen, bevorzugt autochthone Materialien zu verwenden, sofern das verfügbare Bodenmaterial vor Ort geeignet ist. Dabei sollten Materialien mit geringer Durchlässigkeit und hoher Scherfestigkeit in Betracht gezogen werden, um den entgegenwirkenden Kräften standzuhalten. In der Regel ist mineralischer Boden vorzuziehen, während Torf vermieden werden sollte.

Das ausgewählte Bodenmaterial sollte eine Körnungskurve aufweisen, die eine kontinuierliche und gut abgestufte Verteilung der Korngrößen mit einem hohen Ungleichförmigkeitsgrad zeigt. Neben der Korngröße beeinflussen auch der Porenwasserdruck und frühere Belastungen, die die Setzungseigenschaften verändern, die Scherfestigkeit des Materials.

Darüber hinaus spielt das Bodenmaterial eine entscheidende Rolle in der Durchströmungssituation, insbesondere hinsichtlich der Sickerwasserlinie und der Porenwasserdrücke.

Wo bekomme ich geeignetes Bodenmaterial her?

Firmen müssen i. d. R. eine Eignungsprüfung für das Bodenmaterial vorlegen. Die Anforderungen der DIN 19700 (u. a. bzgl. Reibungswinkel, Kohäsion, Wichte) sind in der Eignungsprüfung nachzuweisen.

6. Maßnahmen zum Erosionsschutz:

Es können verschiedene Maßnahmen zur Anwendung kommen, um die Langlebigkeit des Damms zu verbessern. Eine **Bepflanzung der Dammoberfläche** mit geeigneter Vegetation wie etwa einer Grasnarbe, trägt dazu bei die Bodenpartikel festzuhalten, die Wassergeschwindigkeit zu reduzieren und die Erosion zu minimieren. Der Bewuchs mit Gehölzen ist auf Staudämmen sowie deren Schutzstreifen nicht zulässig, da durch die Durchwurzelung die Stabilität gefährdet ist. Das Hinzufügen von **Abdichtungsschichten oder wasserdichten Materialien (Lehmschlag)** auf der Oberfläche des Damms kann das Eindringen von Wasser in den Damm verhindern und somit auch Erosion reduzieren. Eine dauerhafte Oberflächendichtung muss Witterungseinflüssen (Hitze, Frost, Strahlung) sowie mechanischen Beanspruchungen (z. B. Wellen, Eis, Steinschlag) und chemischen Angriffen durch das gestaute Wasser widerstehen. Das Einbringen eines **Geotextils** zwischen dem Dammkörper und dem Untergrund kann dazu beitragen, die Suffosion zwischen den beiden Bodenschichten zu verhindern und gleichzeitig ein gleichmäßigeres Setzungsverhalten zu erreichen.

c) Umsetzung eines wasserregelbaren Staudamms

Um den Staudamm regelbar zu gestalten, kann zum Einstellen der Stauhöhe ein PVC-Rohr in den Dammkörper gesteckt werden (vgl. Abbildung 8). Dieses PVC-Rohr wird durch Drehen an die Stauhöhe angepasst. Der notwendige Durchmesser des Rohres kann über den mittleren Durchfluss bestimmt werden.

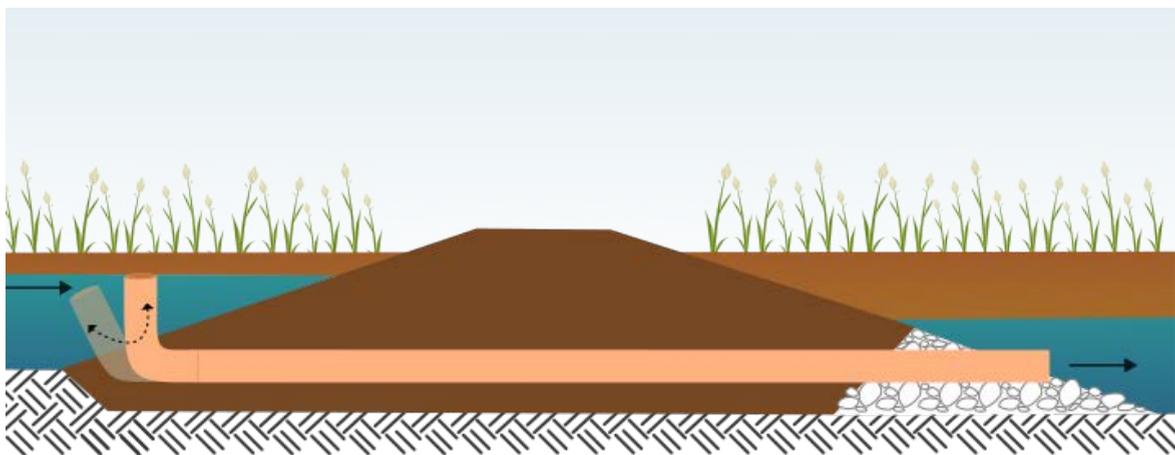


Abbildung 8: Schema eines regelbaren Staudamms

Es sollte darauf geachtet werden, dass das Rohr nicht durch Sedimente oder Treibgut verstopft wird. Es empfiehlt sich daher die Funktionalität des regelbaren Rohres regelmäßig zu überprüfen. Außerdem sollte die Verbindung zwischen Rohr und Dammkörper geschlossen sein, damit kein „innerer Kanal“ entsteht und es nicht zur Fugenerosion an der Bauteilkante kommt. Gegebenenfalls kann dem eine Lehmschicht oder ein „Kragen“ entgegenwirken. Denn besonders bei einem großen Unterschied bezüglich der hydraulischen Leitfähigkeit von Materialien kann es zu einer Erosion entlang der Materialschichten und damit zur Instabilisierung des Damms kommen. Weitere Probleme können durch Tieraktivitäten (Biber, Bismarckratte) oder mangelnde Wartung auftreten.

4.1.2 Dränagenverschluss

Beim Dränagenverschluss erfolgt der Anstau einer Rohrdränage an der Dränmündung im Graben beispielsweise durch einen (schwenkbaren) Rohraufsatz (siehe Abbildung 9). Die Maßnahme bietet sich vor allem auf Moorflächen an, wo viele einzelne Dränstränge (Sauger) ohne Sammler vorliegen, die gut auffindbar in einem Graben münden. Auch für auf Moorflächen, die an einem Gewässer liegen, in das aus Gewässerschutzgründen kein Querbauwerk installiert werden kann, bietet sich der Dränverschluss als mögliche Anstaumaßnahme an.

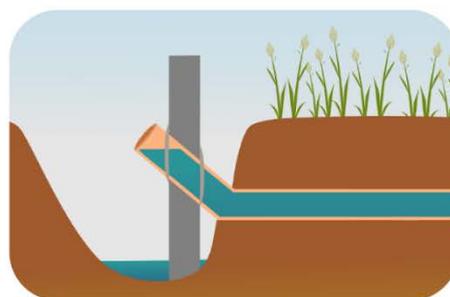


Abbildung 9: Dränagenverschluss

In der Praxis sollte darauf geachtet werden, dass der Rohraufsatz gut befestigt wird, damit er einem erhöhten Durchfluss bei Starkregenereignissen standhalten kann. Weiterhin sollte der Dränverschluss gut sichtbar gekennzeichnet werden, damit es nicht zu Schäden während der Gewässerunterhaltung (z. B. beim Mähen) kommt. Es empfiehlt sich die Umsetzung dieser Maßnahmen mit dem Gewässerunterhaltungspflichtigen (z.B. Gemeinde, Wasser- und Bodenverband) abzustimmen.

4.1.3 Dränagenanstau mit Schacht

Liegt ein weit verzweigtes Rohrdränagesystem aus Saugern und Sammlern vor, kann es sinnvoll sein, an Knotenpunkten des Systems Schächte für den Anstau zu setzen. Der Wasserstand im Schacht wird durch einen Rohrbogen, Rohraufsatz oder Schieber geregelt. Bei der Planung muss der unterschiedliche Durchmesser der (Ton)dränagen und der Kunststoffrohre (KG-Rohre) beachtet werden, da die Rohre nahtlos aufeinander anschließen müssen (siehe Abbildung 10). Da häufig Probleme mit Sedimentzusetzung und Verockerung auftreten, sollten die Systeme spülbar sein. Wichtig ist die Wahl des Standortes, des Materials, der Abdichtung, die Wartung und die Einhaltung der Bauvorschriften beim Einbau. Es können dabei Beton- und Kunststoffschächte zum Einsatz kommen.

Schachtringe aus Beton sind kostenintensiv. Wenn der Beton nicht richtig verfugt ist, kann Wasser über Kapillaren und Risse eindringen. Der Beton muss gegenüber Wasser und Chemikalien resistent sowie frostbeständig sein. Der Vorteil besteht gegenüber Kunststoff in der geringen Gefahr von Aufschwimmen.

Schächte aus Kunststoff (PVC-U, PP) sind deutlich weniger anfällig gegenüber äußeren Einflüssen. Sie sind außerdem günstiger und weniger voluminös. Probleme kann es mit Aufschwimmen im Leerzustand geben. Wenn dieser Zustand zu erwarten ist, sollten die Schachtunterteile präventiv mit Füllbeton eingegossen werden.

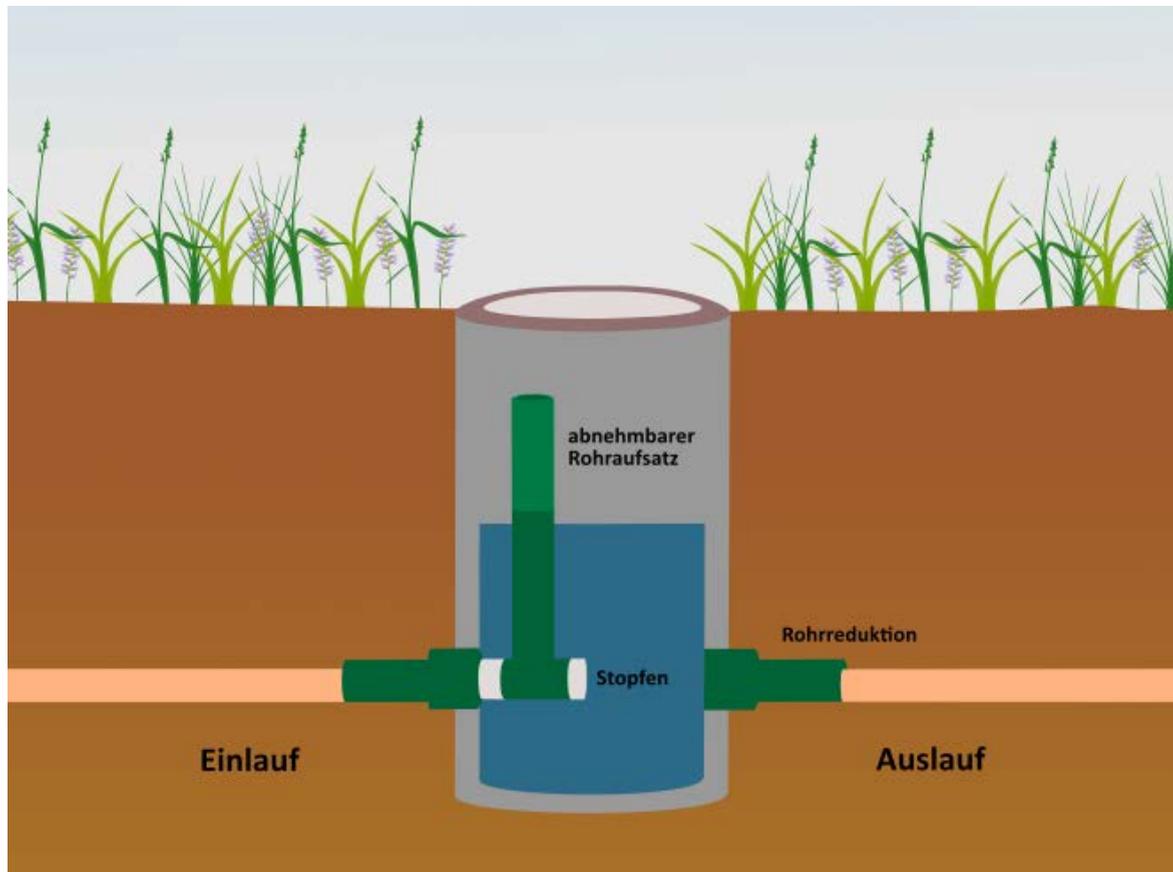


Abbildung 10: Schema für einen Anstauschacht: Durch eine Rohrreduktion wird die Tondränage mit dem Eingang des Schachtes und dem Rohrsystem verbunden. Ein abnehmbarer Rohraufsatz ermöglicht bei Bedarf eine Absenkung des Wasserstands für die Bewirtschaftung. Denkbar ist hier auch der Einsatz von Teleskoprohren.

4.1.4 Unterflurbewässerung

Um die Flächenwirkung des Grabenanstaus zu erhöhen, kann über einen höheren Wasserstand im Graben Wasser über die Unterflurbewässerung in die Fläche geleitet werden. Sind keine Dränagen vorhanden, können mithilfe eines Pflugaufsatzes Hohlgänge gezogen werden. Die Hohlgänge müssen erfahrungsgemäß innerhalb weniger Jahre erneuert werden.

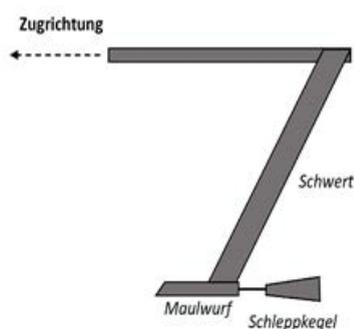


Abbildung 11: Aufsatz zum Ziehen der rohrlosen Unterflurbewässerung. Durch den Maulwurf werden die Hohlgänge gezogen und durch den Schleppkegel verfestigt.

4.2 Bauarbeiten im Moor

Bei der Durchführung von Bauarbeiten im Moor sollte Folgendes beachtet werden:

1. Einsatz von Baumaschinen:

Bei den Maschinen sollte Wert auf ein geringes Eigengewicht gelegt werden. Die Maschinen sollten keinen hohen Schwerpunkt und einen Kettenantrieb besitzen. Raupenbagger, Raupenfahrzeuge, Planiertraupen und Amphibienbagger sind besonders geeignet für den Einsatz in feuchten Gebieten wie Mooren. Die breiten Raupen verteilen das Gewicht der Maschinen über eine größere Fläche, wodurch die Belastung empfindlicher Böden reduziert wird und die Maschinen überhaupt auf dem weichen Boden operieren können. Zusätzlich können einige konventionelle Bagger mit speziellen Bodenschutzplatten ausgestattet werden, um den Bodendruck zu verringern. An dieser Stelle wird auf die DIN 19639 *Bodenschutz bei Planung und Durchführung von Bauvorhaben* (Kap. 6.3.3.2 Bodenschutz bei Baumaßnahmen auf organischen Böden, Beuth Verlag) hingewiesen.

2. Umgang mit Bodenmaterial:

Anfallendes Bodenmaterial ist möglichst auf der Fläche zu verwerten. Beim Ausbau sind die trockenen, feinen Oberschichten von tieferen, nassen Torfschichten zu trennen. Sollte überschüssiges organisches Bodenmaterial anfallen, ist eine möglichst [hochwertige Verwertung](#) anzustreben (z. B. Verbesserung von mineralischen Böden, Wiederherstellung von Moorböden vgl. auch [FAQ: Umgang mit Bodenmaterial](#)). Außerdem können insbesondere in südbayerischen Mooren natürlicherweise erhöhte Arsengehalte auftreten, die eine [Verwertung](#) erschweren können.

3. Geotextilien und Matten:

Die Verwendung von Geotextilien und Matten für temporäre Fahrwege oder Arbeitsplattformen kann die Bodenverdichtung minimieren und gleichzeitig eine Oberflächenstabilisierung bieten.

4. Einhalten umweltverträglicher Praktiken:

Die Bauarbeiten sollten während Trockenperioden durchgeführt werden, um die Auswirkungen auf den Boden zu minimieren. Zudem sollte auf die Vermeidung von Verschmutzungen und die Minimierung von Störungen für die Tier- und Pflanzenwelt geachtet werden. Daher sind die Bauarbeiten außerhalb der Laich- und Nistzeiten von Amphibien beziehungsweise Vögeln durchzuführen. Liegt für die Umsetzung einer Maßnahme zur Wasserstandsanhebung ein wasserrechtlicher Bescheid vor, trägt die untere Naturschutzbehörde in der Regel die zu beachtenden Schonzeiten in den Bescheid ein.

5 Erfahrungen mit Maßnahmen zur Wasserstandsanhhebung

Im Rahmen des Projekts „[Moorverträgliche Bewirtschaftungsmaßnahmen](#)“ (Laufzeit Januar 2021 bis Dezember 2024) wurden verschiedene Wasserregelungstechniken unter Berücksichtigung der Variabilität der klimatischen Wasserbilanz im langjährigen Mittel evaluiert. Es hat sich gezeigt, dass der Erfolg von Wiedervernässungsmaßnahmen hauptsächlich von den Standortfaktoren abhängig ist (siehe Abbildung 12). Unterschiede durch die Wahl der Wasserregelungstechnik ergeben sich primär bei dem Vorhandensein von flächigen Dränagesystemen, die eine zielgenauere Einstellung des Flächenwasserstandes ermöglichen.

Der Flächenwasserstand ist ein wesentlicher Bestandteil der Wasserbilanz in Niedermooren und in erster Linie durch Zufluss, Abfluss und die Versickerung in tiefere Grundwasserleiter beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2). Während der Zufluss von der Witterung und dem Einzugsgebiet abhängt und somit nur begrenzt steuerbar ist, kann der Abfluss durch die umliegenden Flächenwasserstände signifikant beeinflusst werden. Daher sollten Wiedervernässungsmaßnahmen möglichst immer großflächig erfolgen. Die Versickerung in tiefere Grundwasserleiter ist vom (in der Regel mineralischen) Untergrund abhängig und daher kaum beeinflussbar. Positiv wirkt sich in der Bilanz jedoch auch hier die Reduzierung schneller Abflusskomponenten durch den verstärkten Wasserrückhalt in der Fläche aus. Es erfolgt aber auch weiterhin eine natürliche Entwässerung durch das Bodengefüge.

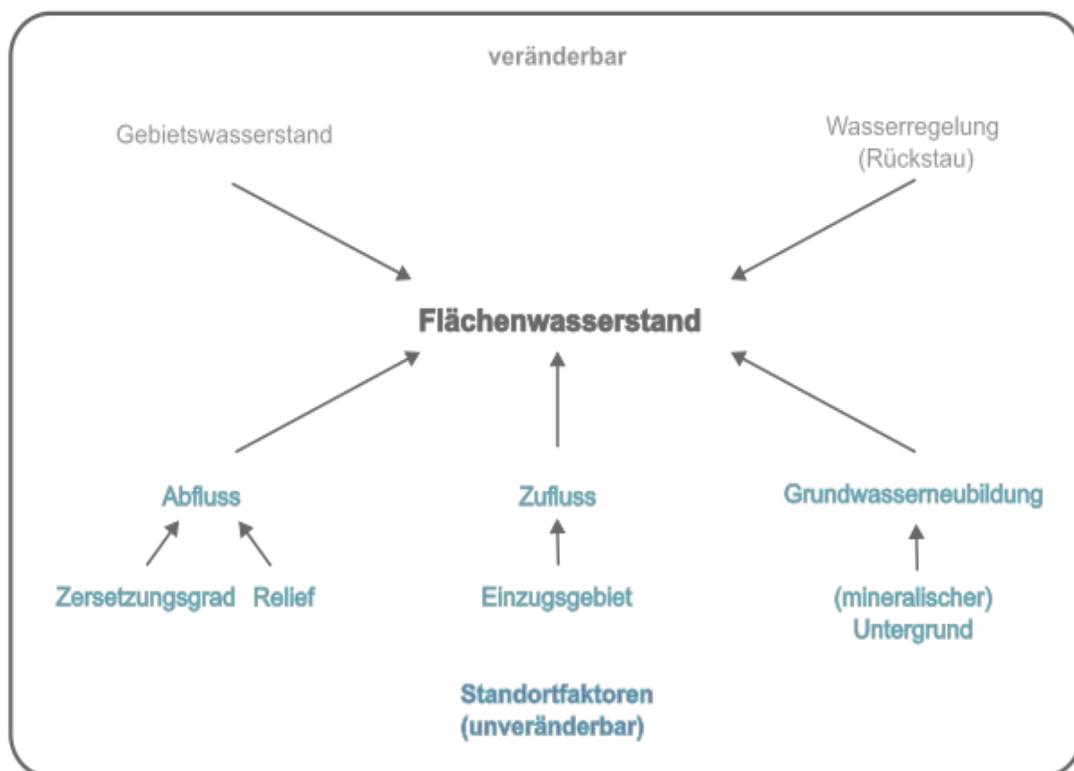


Abbildung 12: Die wichtigsten Faktoren, die den Flächenwasserstand beeinflussen. Mit der Grundwasserneubildung ist hier in erster Linie die Versickerung in tiefere Grundwasserleiter gemeint.

Der **Wasserrückhalt** durch Stauvorrichtungen auf den Untersuchungsflächen war bei genügend Zufluss (**Wasserverfügbarkeit**) meistens erfolgreich. Durch welche Technik der Wasserrückhalt erfolgt, spielt eine untergeordnete Rolle – die Methode des Anstaus bleibt

im Wesentlichen ähnlich. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich dadurch, ob ein großflächiger Anstau durch vorhandene flächige Dränagensysteme möglich ist oder nicht. Diese erlauben eine gezieltere Regulierung des Wasserstands auf größeren Flächen. Durch die „Unterflurbewässerung“ werden die Flächenwasserstände zumeist bis auf Höhe der Dränaugen ausgeglichen. Der tatsächlich resultierende Wasserstand in der Fläche hängt aber in erster Linie vom Zufluss ab. Da die Verlegung von (neuen) Rohrdränaugen verboten und nicht sinnvoll ist, kann die rohrlose Unterflurbewässerung eine Alternative sein. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass die Hohlgänge nicht sehr stabil sind.

Die natürliche Entwässerung durch das Bodengefüge wird durch den Volumenfluss bestimmt: Dieser erhöht sich u. a. durch eine hohe Neigung und ein hohes Porenvolumen. Der Wasserrückhalt reicht daher nicht immer aus, um den Zielwasserstand zu erreichen. Der Zielwasserstand wurde meistens im Winter auch schon vor der Wiedervernässung erreicht. Der Haupteffekt auf allen Untersuchungsflächen betraf das Verkürzen und Minimieren der sommerlichen Perioden mit Niedrigwasserständen.

Aufgrund der Standortfaktoren und Rückgriff auf die vorhandene Entwässerungseinrichtungen kann keine Wasserregelungstechnik „per se“ empfohlen werden. Für jede/n Standort, Nutzung und Bewirtschaftung ist eine individuelle Einschätzung nötig, welche Maßnahme zur Wasserstandsanhhebung eingesetzt werden sollte. Dabei sollten Flächen priorisiert werden, die eine ausreichende Wasserverfügbarkeit aufweisen. Durch die Berücksichtigung von Standortfaktoren können die Auswirkung der Wiedervernässungsmaßnahmen (Wasserrückhalt) besser eingeschätzt werden, sowie mögliche Anpassungen an der Planung vorgenommen werden wie zum Beispiel die Staupositionen engmaschiger oder zusätzliche Wasserzuleitungen zu planen. Für die grobe Planung der Wiedervernässungsmaßnahmen ist eine DGM-Analyse, als wichtigster Faktor, der den Flächenwasserstand bestimmt, ausreichend. Für größere Flächen sollten hydrologische Modelle verwendet werden, um den Einfluss der (weiteren) Standortfaktoren auf die Wasserbilanz zu simulieren.

Eine genaue Quantifizierung der einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts, insbesondere der technisch bedingten Entwässerung bzw. des Abflusses, ist – wie bereits mehrfach erwähnt – ohne ein hydrologisches Modell nur eingeschränkt möglich. Die Geschwindigkeit, mit der der Wasserstand einer Fläche vor Bewirtschaftungsmaßnahmen kurzfristig abgesenkt werden kann, hängt von mehreren Faktoren ab. Dazu gehört die Differenz des Wasserspiegels zwischen dem offenen (Ausgangsgrundwasserstand) und geschlossenen Zustand (Tiefe der Drainage) sowie der Abstand der Entwässerungseinrichtungen. Darüber hinaus beeinflusst auch die natürliche Wasserbilanz den Flächenwasserstand. Daher sind die ermittelten Werte für die Wasserstandsabsenkung nur bedingt auf andere Flächen übertragbar. Für die untersuchten Flächen wurden Absenkungsraten zwischen 10 cm/Tag und 20 cm/Tag ermittelt. Der Zeitraum, der nach der Bewirtschaftung notwendig ist, damit der Wasserstand wieder in dem Bereich des Zielwasserstands liegt, hängt auch von der natürlichen Wasserbilanz ab und ist daher sehr variabel.

Im Folgenden werden im Rahmen von Projekten erfolgreich durchgeführte Maßnahmen zur Wasserstandsanhhebung vorgestellt, um einen Einblick darüber zu bekommen, wie Maßnahmen geplant werden können. Dabei wird sich an dem in Kapitel 3.1 vorgestellten Planungsschritten orientiert.

5.1 Versuchsstation Karolinenfeld

Lage: Die Flächen (ca. 150 ha im Kernbereich) liegen 5 km nordwestlich von Rosenheim. Der Niederschlag ist mit 1.091 mm, aufgrund der Lage im Alpenvorland, deutlich höher als im deutschlandweiten Mittel. Die Niederschlagsmaxima treten in den Sommermonaten auf. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8,3 °C. Alle meteorologischen Werte beziehen sich auf die DWD Messstation Rosenheim und das langjährige Mittel von 1961 bis 1990.



Abbildung 13: Die Grünland-Untersuchungsfläche konnte mithilfe des Schacht-Anstaus wieder vernässt werden.

Entstehung: Die Flächen sind Teil der Rosenheimer Stammbeckenmoore, die sich durch die Verlandung und Versumpfung des Rosenheimer Sees, der neben dem „Ur-Chiemsee“ existierte, bildeten. Vor etwa 20.000 Jahren, auf dem Höhepunkt der letzten Kaltzeit, war das Rosenheimer Gebiet von dem Inn-gletscher bedeckt. In dem anstehenden weichen mineralischen Untergrund (Molasse) schürfte der Gletscher eine bis zu 300 m tiefe Mulde und lagerte End- und Seitenmoränen ab. In dieser Mulde bildete sich nach der letzten Kaltzeit der Rosenheimer See aus Toteisblöcken. Vor mehr als 12.000 Jahren durchbrach der Inn die Endmoränenwälle nördlich von Wasserburg am Inn, wodurch der See auslief. Durch die Gletscherbäche aus den Alpen, Erosion im Flussbett des Inns und von umliegenden Flächen wurde Geschiebe herangebracht, das auf dem (ehemaligen) Seegrund sedimentierte. In Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit sind so in der Hauptströmungsrinne grobkörnige Ablagerungen (Kiese und Sande) zu finden und auf den angrenzenden Flächen feinkörnige Schluffe und Tone. In dem Gebiet der Rosenheimer Stammbeckenmoore sind daher sehr unterschiedliche Mischböden aus Sand, Ton und Schluff anzutreffen, die eine Mächtigkeit von bis zu 150 m aufweisen. Die Bezeichnung „Seeton“ bezieht sich im Allgemeinen auf feinkörnige Sedimente. Es handelt sich also nicht ausschließlich um reinen Ton, wie es der Begriff vermuten lassen könnte (Cudmani et al. 2022). In dem Gebiet der Versuchsstation steht eine Bodenart mit hohem Tongehalt an, nach Westen hin nimmt der Schluffgehalt zu. Die stauende Schicht verhinderte, dass nach dem Auslaufen des Sees das Regenwasser versickern konnte. In dem Gebiet entstanden Versumpfungs- und Verlandungsmoore. Bei dem Gebiet der Versuchsstation handelt es sich um ein Versumpfungsmoor. Dadurch ist das Gebiet auch heutzutage nur zeitweise überflutet, da der Zufluss saisonalen Schwankungen unterliegt. Mit der Zeit wuchs auf dem Niedermoorkörper ein Hochmoor aus Torfmoosen auf.

Nutzung: Bis ca. 1900 wurde ein Jahrhundert lang Torf gestochen. Nach dem Bau einer Eisenbahnlinie 1852 wurde Torf in industriellen Maßstab als Brennmaterial für die Saline in Rosenheim abgebaut. Dadurch wurde das Hochmoor größtenteils abgetragen. Anschließend fand im Bereich der jetzigen Versuchsstation Karolinenfeld eine Umwandlung in landwirtschaftliche Nutzflächen statt. 1940 wurden die ersten Dränagen verlegt, die zu einem späteren Zeitpunkt nochmal tiefergelegt wurden. Im Rahmen der Hochmoorkultur wurde das verbliebene Moor durch die Hinzugabe von Sand und Kalk urbar gemacht. Teilweise wurden Kunststoff-Dränagen in den 1980er Jahren verlegt, die in einen zentralen Vorfluter entwässern. Da die Pläne für die älteren Dränagen ungenau sind, wurde versucht, den Dränagenplan mithilfe von Luftbildern und Bodenaufschlüssen nachzuvollziehen. Als Teil der

Bayerischen Staatsgüter wird die Versuchsstation seit 2021 auf eine moorverträgliche Bewirtschaftung umgestellt. Dazu wurde die Ackernutzung und Viehhaltung 2020 aufgegeben. Derzeit sind auf der Versuchsstation 20,5 ha der Flächen Feuchtwald und 120 ha Dauergrünland.

Momentan werden auf verschiedenen, schon wiedervernässten Teilflächen wissenschaftliche Untersuchungen zur moorverträglichen Bewirtschaftung durchgeführt. In naher Zukunft soll die gesamte Versuchsstation auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie wiedervernässt werden.

Standort: Die Flächen der Versuchsstation haben ein kleines Einzugsgebiet, was bedeutet, dass der Grundwasserzufluss stark von der Witterung abhängt. Charakteristisch für den Standort ist die starke anthropogene Überprägung, die sowohl das ursprüngliche Moorrelief als auch den Zustand des noch vorhandenen Torfkörpers stark verändert hat. Durch die intensive Nutzung in der Vergangenheit ist nur noch der Niedermoorkörper und auf manchen Flächen nur noch vererdeter oder vermulmter Torf vorhanden. Die Torfmächtigkeit beträgt zwischen 56 cm und 271 cm (Hoyer 2021). In der Senke, in der sich auch der zentrale Vorfluter Erlbach befindet, ist die Torfmächtigkeit am höchsten. Der Zersetzungsgrad reicht von H6 bis H10, wobei die unteren Horizonte weniger stark zersetzt (H6) sind. Unter dem Torf steht Tonmudde an, die einen hohen Schluffanteil enthält, also entgegen der Bezeichnung als Seeton nicht als undurchlässige Schicht betrachtet werden kann.

Ökosystemanalyse/Nutzungsansprüche: Auf der Fläche sind vereinzelt Biotope vom Typ „Sonstiger Feuchtwald (inkl. degenerierte Moorstandorte)“ kartiert. Durch die Wiedervernässung der Flächen wird das ehemals intensiv genutzte Ackerland in ökologischer Hinsicht profitieren.

Die Flächen haben wenige Anrainer, diese besitzen ihre Fläche als „Lohn“ für die Mitarbeit bei der Dränagenverlegung in den 1940er-Jahren. Das aktuelle Bestreben ist, durch freiwilligen Flächentausch eine größere einheitliche Fläche zu schaffen. Dies erleichtert Wiedervernässungsmaßnahmen, welche großflächig geplant und durchgeführt werden müssen.

Auswahl geeigneter Maßnahmen:

Auf der Versuchsstation werden im Rahmen des Projekts „Moorverträgliche Bewirtschaftungsmaßnahmen“ verschiedenen Wasserregelungstechniken erprobt (siehe Abbildung 14):

- Fläche 1 (Nassgrünland zur Futterproduktion): Schacht-Dränagen-System, da kein Vorfluter in der Nähe vorhanden ist (Evaluierung der Maßnahmen vgl. Abbildung 15)
- Fläche 2 (Nassgrünland für Befahrbarkeitstest landwirtschaftlicher Maschinen): Kaskaden-Schacht-Dränagen-System, da die Fläche geneigt ist (Planung der Maßnahmen vgl. Abbildung 16)
- Fläche 3 (Etablierung von Seggen als Paludikultur): Planungen zur Wasserstandsanehebung wurden stark verzögert, u. a. durch eine Gasleitung und nicht vorhandene Drainagepläne
- Grabenanstau des zentralen Vorfluters (Erlbach) sowie Dränverschlüsse an einzelnen Sammlern

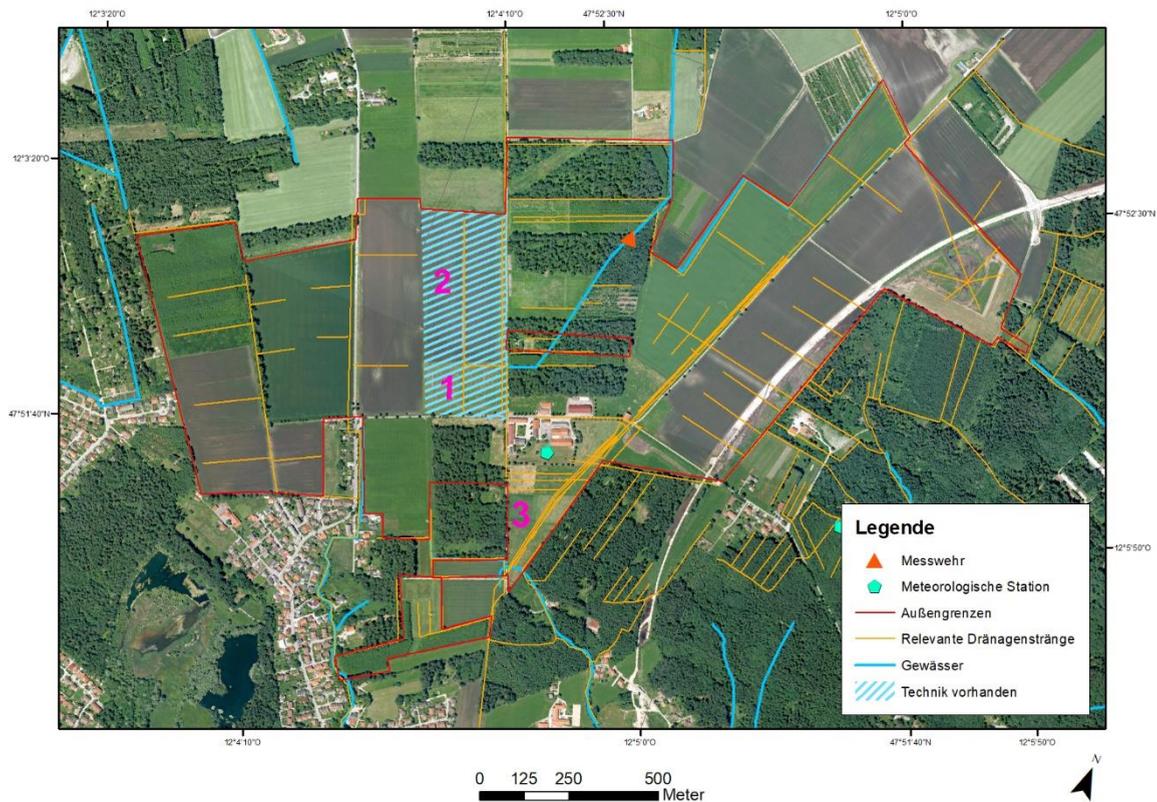


Abbildung 14: Überblick über die Untersuchungsflächen (violett markiert, Fläche 1, 2 und 3) auf der Versuchsstation Karolinenfeld (BaySG). Für die Flächen 1 und 2 ist bisher eine Wasserregelungstechnik vorhanden. Der zentrale Vorfluter Erlbach (östlich von Fläche 1 und 2) wird durch ein Stauwehr verschlossen. Ebenfalls wurden die Dränagen, die in den Vorfluter münden, durch Aufsätze verschlossen. Mit Hilfe einer Machbarkeitsstudie werden wirksame Maßnahmen für weitere Flächen evaluiert. Dazu wurde u. a. mit Hilfe von Abflussdaten, meteorologischen Daten und Grundwasserganglinien ein hydrologisches Modell aufgestellt. Das Ziel ist es eine großflächige Wasserstandsanhhebung auf der Versuchsstation zu erreichen.

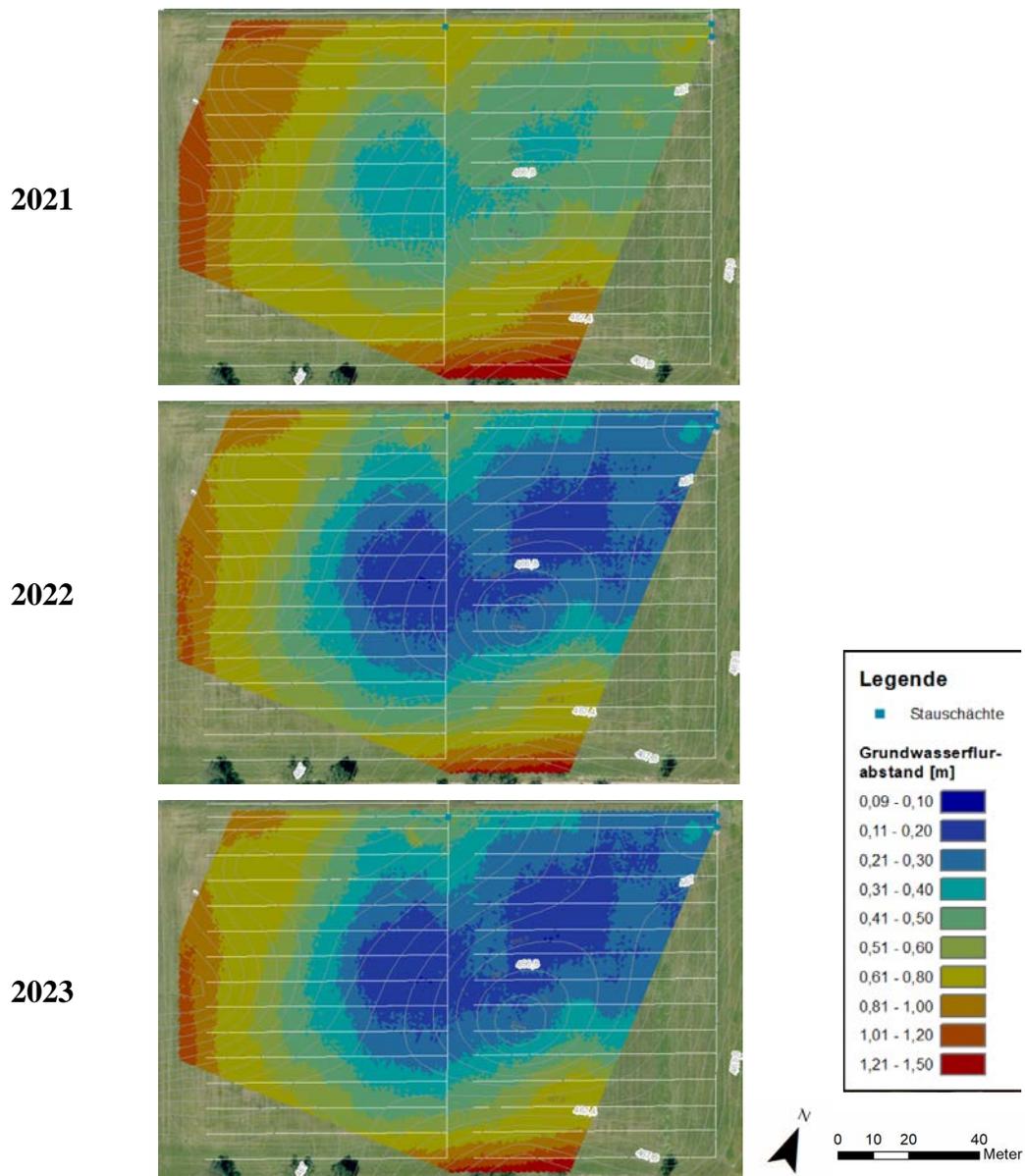
Jahr **Median des Grundwasserflurabstandes eines Hydrologischen Jahres
(Nov. – Okt.)**

Abbildung 15: Durch eine langanhaltende Trockenperiode im Jahr 2023 war die Fläche I trotz eines höheren akkumulierten Niederschlags geringfügig trockener als im Vorjahr. Durch die geringe Neigung der Fläche und damit geringfügige Ausprägung des hydraulischen Gradienten ist der Wasserstand in der Nähe der Stau­einrichtungen annähernd genau einstellbar.



Abbildung 16: Auswahl einer geeigneten Maßnahme für die Fläche 2. Aufgrund der Hangneigung wurden alle 30 bis 40 cm Höhendifferenz an Knotenpunkten (weiß, Entwässerungssystem), an denen früher Sedimentschächte verbaut waren, Anstauschächte (schwarze Quadrate) eingebaut. So ist es theoretisch möglich die einzelnen Teilflächen auf Zielwasserstand anzustauen.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wird ermittelt, welche Maßnahmen sich auf den restlichen Flächen eignen. Als erster Schritt wird versucht, den Zielwasserstand mithilfe von Dränverschlüssen zu erreichen, falls dies nicht möglich ist, werden weitere und gegebenenfalls auch wassereinleitende Maßnahmen geplant. Da auf den Flächen wenig Gräben zum Anstau vorhanden sind, müssen die bestehenden Dränagensysteme voraussichtlich an zentralen Schächten angestaut werden.

Genehmigungspflicht der Maßnahmen und weitere Restriktionen: Da der zentrale Vorfluter Erlbach aufgrund der angrenzenden Biotope ein Gewässer 3. Ordnung darstellt, und damit von wasserwirtschaftlicher Bedeutung ist, stellt der Anstau eine Benutzung nach § 9 WHG dar. Da es sich um ein größeres Pilotprojekt handelt, wurde im wasserrechtlichen Bescheid ein begleitendes Monitoring u. a. mit Hinblick auf den Hochwasserabfluss bei Starkregenereignissen gefordert.

Auf der Fläche verläuft eine Gasleitung mit Dränagen, die nicht durch Betonreiter vor Auftrieb geschützt ist. Da durch die Wiedervernässung die Wichte⁴ (unter Auftrieb) des überliegenden Bodens abnimmt, war ein geotechnisches Gutachten erforderlich. Durch die starke Degradierung des Bodens ist das Porenvolumen gering, so dass der Volumenanteil von Wasser im gesättigten Zustand nicht so hoch ist wie normalerweise bei Torfböden und die Wichte unter Auftrieb deutlich über den Normalwerten liegt. Von einer Wiedervernässung geht für die Gasleitung also keine Gefahr aus, da das Gegengewicht durch den aufliegenden Boden hoch genug ist.

Kostenansatz: *Alle Angaben beziehen sich auf die Brutto-Kosten. Für die Umsetzungskosten werden Materialkosten, Arbeitszeit sowie der Materialtransport im Gelände berücksichtigt.* Die Auswahl der verwendeten Wasserregelungstechniken macht sich an den vorhandenen Entwässerungseinrichtungen fest. Für die Flächen mit Schächten ist deren Anzahl durch die Höhendifferenz der Fläche und der Anzahl der Sammler-Stränge festgelegt. Um den Zielwasserstand auf allen Teilflächen zu erreichen, ist das Setzen eines Schachtes alle 30 bis 50 cm Höhendifferenz erforderlich.

- Pro Beton-Schacht wird mit 6 Arbeitsstunden gerechnet (Moorbagger + 3 AK, insgesamt 2.500 €/h). Die Aufgaben umfassen das Ausheben der Grube, die Wasserhaltung, das Betonieren des Fundaments sowie das Verbinden der Betonringe. Die Materialkosten belaufen sich pro Betonring (1.000 mm Durchmesser, 500 mm Höhe) auf ca. 50 €. Für die Betonschächte beliefen sich die Kosten pro Schacht (inklusive Bodenring und Abdeckung sowie Teleskoprohr-Schieber-System) auf 2.200 €. Für die 9 ha große Fläche waren 7 Schächte notwendig. Die Kosten beliefen sich für die Fläche 2 insgesamt auf **2.200 €/ha**. Da für die Fläche 1 nur 2 Schächte notwendig waren, beliefen sich die Kosten auf **1.100 €/ha**.
- Das Stauwehr (L: 10 m x H: 2 m) kostete 6.000 € (inklusive Materialtransport und Einbau). Für den Einbau waren 2 Arbeitsstunden notwendig (Moorbagger + 1 AK). Es ergeben sich insgesamt Kosten von **6.200 €**

Ergebnisse: Die Versuchstation Karolinenfeld weist durch die intensive Ackernutzung stark degradierte Oberböden auf. In diesen ist die hydraulische Leitfähigkeit herabgesetzt. Das führt u. a. dazu, dass sich ein höherer hydraulischer Gradient ausbilden kann und der Rückstau länger bestehen bleibt – der insofern wichtig ist, als das für die Fläche mittels der beschriebenen Techniken ein bestimmter Wasserstand eingestellt werden kann.

Im langjährigen Mittel zeigen die Untersuchungsjahre nur im Jahr 2023 einen Anstieg der Niederschlagsmenge (1388 mm – Agrarmeteorologie-Station Karolinenfeld). Auffallend ist hierbei, dass in den vergangenen Sommern (z. B. 2023) vermehrt Starkniederschläge vor oder nach langanhaltenden Trockenperioden auftraten. Für die Wiedervernässung ist ein kontinuierlicher Grundwasserzustrom entscheidend. Deswegen ist der mittlere Jahreswasserstand des hydrologischen Jahres 2022 im Vergleich zu 2023, trotz einer geringeren akkumulierten Niederschlagsmenge, höher. Die Temperatur hat durch den Verdunstungsanspruch von Vegetation und Atmosphäre einen Einfluss auf den Grundwasserstand, wobei der kapillare Aufstieg durch die starke Degradierung begrenzt sein sollte. Für alle Jahre war

⁴ Ähnlich wie der Unterschied zwischen Masse und Gewicht in der Physik ist die Wichte eine spezifische Eigenschaft eines Materials, die angibt, wie viel Masse pro Volumeneinheit vorhanden ist, unter Berücksichtigung der Gravitationskraft. Es beschreibt also die Dichte eines Materials in Bezug auf seine Volumeneinheit und wird in der Regel in Newton pro Kubikmeter (N/m³) angegeben.

die mittlere Lufttemperatur in der Vegetationsperiode ähnlich, daher sollte der Einfluss der Verdunstung auf den mittleren Flächenwasserstand gering sein.

Vor der Wiedervernässung fielen die Grundwasserstände auf der Fläche 1 im Sommer auf bis zu 120 cm unter Flur ab. Durch die Maßnahmen können die sommerlichen Grundwasserflurabstände im Mittel auf 60 cm unter Flur angehoben werden. Da es sich hauptsächlich um den Rückstau des Grundwasserzustroms handelt, kann der Grundwasserstand in Jahren mit besonders stark ausgeprägten Trockenperioden (2022, 2023) zeitweise stärker abfallen. Eine aktive Bewässerung durch den Schacht ist nur in der unmittelbaren Umgebung möglich. Durch den Schacht kann sich das Flächenwasserstand bei genügend Zufluss auf der gewünschten Höhe einpendeln (vgl. Abbildung 19).

Die Fläche 2 ist eine geneigte Fläche mit einem kleinen Einzugsgebiet. Durch den geringen Zufluss konnte der Grundwasserstand im Jahresmittel nur geringfügig erhöht werden: So zeigte sich nach einem Niederschlagsereignis ein kurzfristiger Rückstau von ca. 5 Tagen. Danach fiel die Fläche, sofern kein weiterer Niederschlag folgte, wieder trocken. Vor der Wiedervernässung fiel der Grundwasserstand hingegen nach einem Tag wieder. Nur Teile der tiefergelegenen südlichen Fläche wiesen einen höheren Grundwasserstand auf.

Die Umsetzung der Wiedervernässung einzelner Flächen ist wichtig, jedoch interagiert der Wasserstand auf einer einzelnen Fläche immer mit den angrenzenden Flächen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, großflächige Wiedervernässungsmaßnahmen anzustreben, ebenso wie es mit einer Machbarkeitsstudie für die Versuchsstation geplant wird. Die Wasserbewegung in der gesättigten Zone wird entsprechend dem Darcy-Gesetz vom hydraulischen Gradienten und der hydraulischen Leitfähigkeit angetrieben, d. h. entwässerte Flächen stromabwärts einer wiedervernässten Fläche führen zur Ausbildung eines höheren hydraulischen Gradienten. Der hydraulische Gradient kommt durch Unterschiede im hydraulischen Potential zustande, das bei horizontalen Wasserströmungen in erster Linie von der Lage, und damit u. a. vom Oberflächengefälle, abhängt.

Projektinitiatoren	Bayerische Staatsgüter (BaySG), Hochschule Weihenstephan-Triesdorf – Peatland Science Centre (HSWT - PSC), Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Planung	BaySG, HSWT – PSC, LfL
Umsetzung	ortsansässiger Landwirt, BaySG, HSWT – PSC, LfL
Kosten	Je nach Technik und Standort: 750 €/ha – 1.200 €/ha
Weitere Informationen	https://www.baysg.bayern.de/zentren/freising/246564/index.php

5.2 Klosterland Benediktbeuern

Lage: Die Fläche liegt nordwestlich von Benediktbeuern in den Loisach-Kochelsee-Mooren (vgl. Abbildung 17). Der Jahresniederschlag ist aufgrund der Lage im Alpenvorland mit 1.300 mm deutlich höher als im deutschlandweiten Mittel. Wobei die Niederschlagsmaxima in den Sommermonaten (LfU Messstation Schlehdorf 2013 – 2023) liegen. Die Temperatur liegt in Benediktbeuern im Jahresdurchschnitt bei 8,5 °C (Agrarmeteorologie-Station LfL Steingaden 2018–2023). Für diesen Ort sind die nächstgelegenen DWD-Messstationen, mit einer ausreichend langen Referenzperiode zu weit entfernt, um Rückschlüsse auf die meteorologischen Daten vor Ort ziehen zu können.

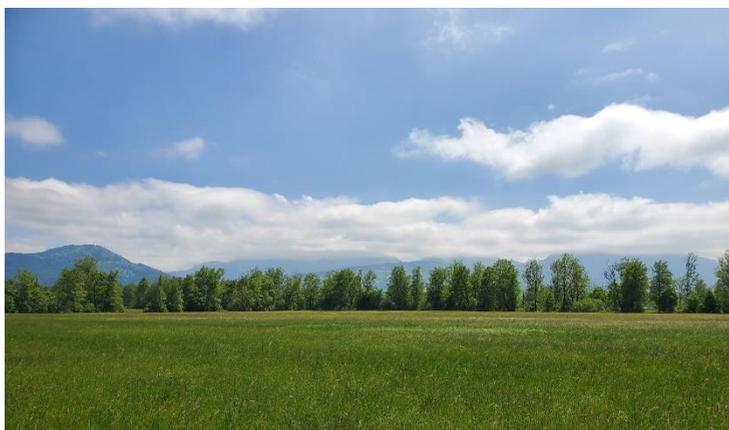


Abbildung 17: Blick von der Projektfläche Richtung Südosten.

Entstehung: Die Loisach-Kochelsee-Moore liegen im Bereich des Stammtrichters des Loisach-Isargletschers und weisen je nach Lage unterschiedliche hydrogenetische Moortypen auf: An den Rändern sind Hangmoore verbreitet und in der Mitte hat sich eine Zwischenform aus Versumpfungs- und Verlandungsmoor gebildet.

Nutzung: Im Klosterland Benediktbeuern wurden die meisten Flächen bis in die 1980er Jahre intensiv genutzt. Seit 1992 wird auf den ehemals intensiv bewirtschafteten Grünland- und Waldflächen des Klosterlandes Benediktbeuern eine extensive Bewirtschaftung praktiziert, so dass heute 200 Hektar als extensive Futterwiesen genutzt werden. Die für die Wasserstandsanehebung ausgewählten Flächen wurden hingegen seit jeher extensiv (zweischürig) bewirtschaftet.

Auffallend ist, dass sich die Vegetationsbedeckung und -zusammensetzung sehr schnell ändern kann und über die Vegetationsperiode variiert.



Standort: Im Vergleich zum natürlichen Zustand zeigt sich eine deutliche Absenkung des Wasserspiegels im gesamten Gebiet und in der angrenzenden Loisach. Der Standort wird durch Dränagen entwässert, die in einen Graben beziehungsweise Sammelschacht münden. In Abständen von 10 m beziehungsweise 15 m durchziehen Dränagen die Flächen in etwa 90 cm Tiefe (vgl. Abbildung 18, Abbildung 19). Die Gräben auf der Projektfläche haben eine Tiefe von ca. 1 m. Die beiden Flächen

Abbildung 18: Während der Vegetationsperiode ist der Verlauf der Dränagen deutlich durch Unterschiede in der Vegetation zu erkennen.

Die Gräben auf der Projektfläche haben eine Tiefe von ca. 1 m. Die beiden Flächen

(jeweils ca. 4 ha) weisen ein Südost-Nordwest-Gefälle von ca. 1 m beziehungsweise 3 m auf.



0 50 100 200
Meter



Abbildung 19: Übersicht über Maßnahmen zur Wasserstandsanhhebung. Aufgrund der Vielzahl an Dränsträngen, wurde nur abwechselnd jede zweite Dränage alle 30 bis 40 cm Höhendifferenz durch einen Schacht angestaut. Vereinzelt konnten die Dränagen nicht detektiert werden, sodass sich kein konsistentes Muster ergibt. Auf der östlichen Fläche münden die Dränagen in einen Graben, der ursprünglich mit einem Stauwehr am Auslass verschlossen werden sollte, bevor der Biber seine Dämme errichtet hat. Auf der westlichen Fläche münden die Dränagen in einen Sammler. Da der Anstau durch die Schächte nicht ausreicht, sollen in Zukunft an den restlichen Staupunkten die Dränagen gekappt werden.

Der Torfkörper wird partiell von dünnen mineralischen Schichten durchzogen, die jedoch keine hydraulisch wirksamen Trennschichten darstellen. Kartographische Aufzeichnungen aus dem Moorarchiv belegen, dass die Torfmächtigkeit am Standort im Bereich von 3 bis 8 Metern variiert. Der Torfzersetzungsgrad ist gering, so wurde der Torf nach der **von-Post-Skala** mit maximal H 7, abgesehen von dem vererdeten Oberboden, angesprochen.

Das Einzugsgebiet der Fläche beträgt ca. 8 km². Daher ist davon auszugehen, dass der Zufluss im Sommer ausreichend hoch ist und bis jetzt nur der Rückhalt fehlte. Allerdings werden stromabwärts weiterhin Flächen entwässert, weshalb sich wahrscheinlich ein verstärktes hydraulisches Gefälle ausbilden wird.

Genehmigungspflicht der Maßnahmen und Restriktionen: Aufgrund der Schachteinbauten liegt eine Benutzung nach § 9 WHG vor. Der wasserrechtliche Bescheid umfasste aufgrund der Lage im Natura2000-Gebiet „Loisach-Kochelsee-Moore“ ebenfalls eine Einschätzung der unteren Naturschutzbehörde (uNB). Weiterhin befinden sich entlang der Gräben Biotopflächen. Eine Wiedervernässung wird von Seiten der uNB unterstützt, da durch

den Anstau (bei gleichbleibender Bewirtschaftung) potenziell noch artenreichere Feuchtwiesengesellschaften wiederhergestellt werden können. Dies könnte dazu beitragen, feuchtigkeitsliebende Pflanzen- und Tierarten zu fördern und das Artenangebot langfristig zu verbessern. Feuchtezeiger (z. B. Kohldistel, verschiedene Binsen und Seggen) sind flächig verteilt vorhanden und bestätigen, dass die Fläche potenziell von einer Wiedervernässung profitieren kann.

Von der Kreisverwaltungsbehörde wurde im Rahmen des wasserrechtlichen Bescheids eine ökologische Baubegleitung gefordert.

Auswahl geeigneter Maßnahmen: Die Flächen weisen eine Höhendifferenz von über 1 m auf. Um den Zielwasserstand von mindestens 30 cm unter Flur zu erreichen, musste deshalb alle 30 bis 40 cm Höhendifferenz angestaut werden. Da die Sauger entlang des Gefälles verlegt wurden, musste der Anstau an jeder einzelnen Drainage erfolgen, sodass ein hoher Aufwand entstand. Zuerst musste die Dränagentiefe ermittelt werden, da die Schächte zugeschnitten werden sollten, um mit der Geländeoberkante abzuschließen. Es wurde nur jede zweite Drainage verschlossen, da die Installation von den einzelnen Schächten zeitintensiv und kostenaufwendig ist. Die Dränagenmündungen in den Gräben konnten lokalisiert, aber kein Dränverschluss umgesetzt werden, da diese verschüttet sind. Da durch die Aktivität der Biber im Jahr der Umsetzung die Gräben angestaut wurden, wurde auf einen technischen Grabenanstau verzichtet.

Die Schächte bestehen aus mehreren Komponenten:

Einem Schachtboden, in dem ein Schachtrohr (vgl. Abbildung 20, orange) eingelassen ist, auf das ein Teleskop-Deckel aufgesetzt wird. Die Schachtrohre wurden ebenso wie das Steigrohr (vgl. Abbildung 20, grün) entsprechend der spezifischen Dränagentiefe zugeschnitten. Das Rohr-System wurde so konzipiert, dass es noch nachträglich verschiebbar und anpassbar wäre. Da die Tondränagen einen geringeren Durchmesser als die Anschlüsse des Schachtbodens hatten, mussten die nahtlosen Verbindungen mithilfe von Rohr-Reduzierungen realisiert werden. Überschieb- oder Steckmuffen eignen sich, um Rohrteile gleichen Durchmessers miteinander zu verbinden. Außerdem sollte die Möglichkeit bestehen, die Dränagen durchspülen zu können, weshalb die horizontale Rohr-Verlängerung der Drainage durchströmbar, aber im Normalfall mit einem Stopfen verschlossen ist. Zu Bewirtschaftungszwecken kann der Rohraufsatz (L: 40 cm) entfernt werden.

Nachdem die Baugrube ausgehoben war, wurden die Dränagenstücke entfernt und der Schacht eingesetzt. Da die Tondränagen sechseckig sind und es keine feste, abdichtende Verbindung zwischen Tondränage und Rohrreduzierung gibt, sind diese so eng wie möglich aneinandergesetzt worden. Gegebenenfalls bietet es sich an, bis die Grasnarbe gebildet wird, ein Geotextil zur Befestigung des lockeren Bodens, um den Schacht aufzulegen, da sonst Bodenmaterial in den Schacht fallen kann. Weiterhin ist unbedeckter Boden anfällig für Wasser-Greiskraut, was die Ernte und vor allem die Verwertbarkeit des Futters für Tiere beeinträchtigen kann.



Abbildung 20: Ein Kunststoffschacht bestehend aus einem Schachtrohr und Steigrohr zur Regulierung des stromaufwärts gelegenen Flächenwasserstandes.

Kostenansatz: Die notwendige Anzahl der Schächte ergibt sich aus dem Höhenunterschied innerhalb der Fläche und der Anzahl der Dränagen. Um den Zielwasserstand auf allen Teilflächen zu erreichen ist das Setzen eines Schachtes alle 30 bis 50 cm Höhendifferenz erforderlich. Für die insgesamt 8 ha großen Flächen wurden insgesamt 26 Schächte gesetzt. Pro Schacht sind Materialkosten von 500 € anzusetzen. Da das Schacht-Rohrsystem erst zugeschnitten werden muss, ist inklusive des Einbaus mit 1 Personenstunde zu rechnen zzgl. Bagger (für 1/2 Stunde). Die Kosten beliefen sich somit auf **2.000 €/ha**. Einzelne Kunststoffschächte sind günstiger als die Betonschächte. Da die Dränagen auf der Fläche dem Gefälle nach verlaufen, mussten die einzelnen Dränagen (im Gegensatz zu Fläche 2 in Karolinenfeld) aber an mehr Stellen unterbrochen werden.

Ergebnisse: Der Praxisversuch zeigt, dass der Dränagenanbau zu einem signifikanten Rückhalt des Wassers im Torfkörper beiträgt. Während Trockenperioden ist dieser Effekt besonders gut ersichtlich, nimmt jedoch mit zunehmendem Abstand zu den angestauten Dränagen ab.

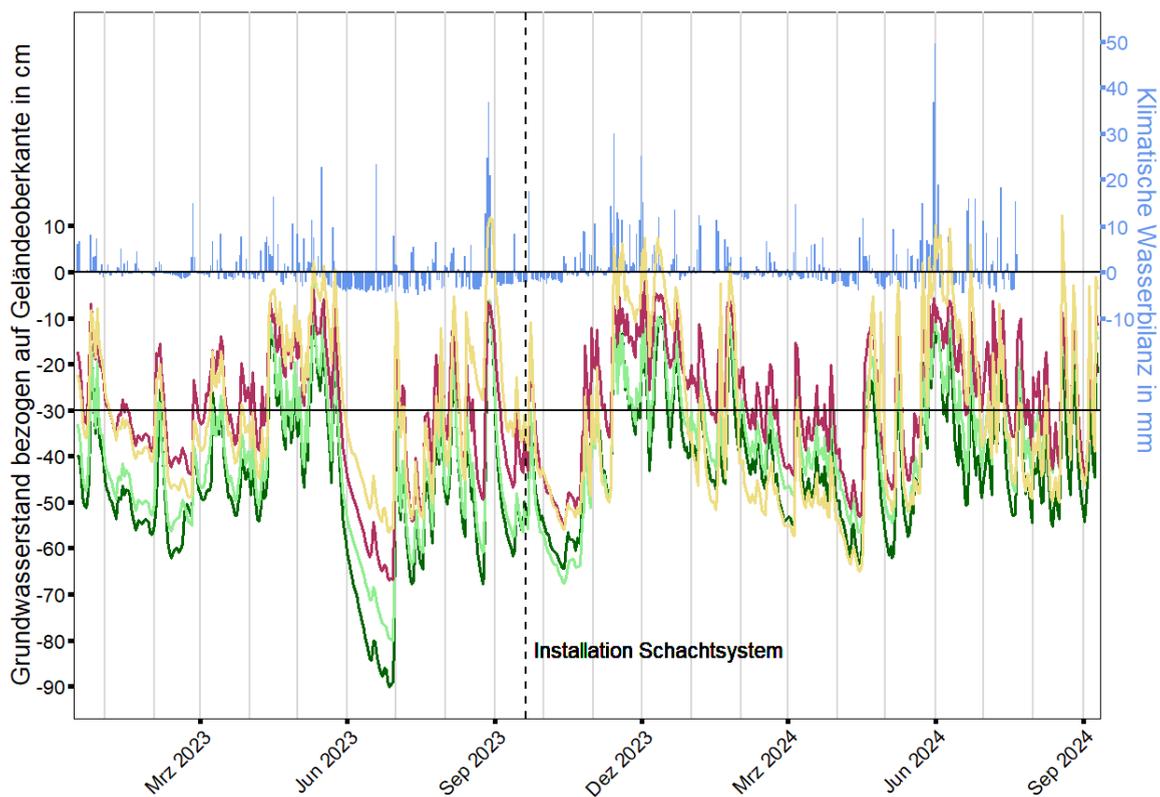


Abbildung 21: Die grün markierten Grundwassermessstellen befinden sich in Bereichen, die aufgestaut wurden, wodurch die Erhöhung des Wasserstandes besonders gut sichtbar ist. Wie üblich sinkt der Wasserstand während Trockenphasen, bleibt aber durch den Anstau auf einem höheren Niveau als ohne Maßnahmen. Die Messstelle im Norden des Gebiets (goldene Grundwasserganglinie) zeigt die geringsten Veränderungen, da sich dort eine Senke befindet, die schon vor den Maßnahmen einen hohen Grundwasserstand hatte. Auch in Bereichen, die nicht direkt an aufgestaute Entwässerungskanäle angrenzen (rote Linie), ist ein Effekt erkennbar – wenn auch schwächer, zeigt sich dennoch eine allgemeine Erhöhung des Wasserstandes. Ab Ende Juli ist die meteorologische Station, die die Werte der Klimatischen Wasserbilanz liefert, ausgefallen.

In Zeiten mit hohem Zufluss ist der Unterschied auch sichtbar: So weisen angestaute Dränagenstränge eine deutliche Geländewölbung auf und zeigen, dass das Moor noch oszilliert. Das deutet darauf hin, dass die Bodenmatrix durch das hohe Porenvolumen am Standort weiterhin in einem relevanten Ausmaß durchströmt wird. Auf geneigten Flächen mit intaktem Torf ist der Volumenfluss besonders hoch. Diese Beobachtung hängt stark vom Zufluss ab und der Dränagenanstau reduziert primär die schnelle Abflusskomponente über die Entwässerungseinrichtungen. Die Notwendigkeit einer Wasserregelungstechnik wird dabei durch den höchsten Wasserstand während der Bewirtschaftungszeiten bestimmt. Es könnte ausreichen, nur die Dränagen zu entfernen, solange während der Bewirtschaftung die Fläche befahren werden kann. Da bisher nicht jeder Staupunkt mit einem Schacht versehen wurde, sollen an den verbleibenden Punkten die Dränagen gekappt werden, um eine flächige Wasserstandsanehebung zu erreichen.

Projektinitiatoren	Zentrum für Umwelt und Kultur (ZUK), Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Planung	Crystal Geotechnik, LfL
Umsetzung	ortsansässiger Landwirt, ZUK, LfL
Kosten	2.000 €/ha
Weitere Informationen	https://www.zuk-bb.de/Naturschutz

5.3 Altbayerisches Donaumoos

Lage: Die 4 ha große Untersuchungsfläche liegt im Westen des Altbayerischen Donaumoos nördlich von Hollenbach bei Ehekirchen im Gewanne „Im Langenweiher“ (vgl. Abbildung 22). Das Donaumoos liegt in einer Beckenlandschaft und weist ein spezielles Klima auf. Durch die häufige Inversionswetterlage mit Nebel- oder Dunstbildung ist die Strahlungsbilanz und damit die Verdunstung im Vergleich zur Umgebung niedriger. Die jährliche Niederschlagsmenge im langjährigen Mittel liegt bei 705 mm, mit Niederschlagsmaxima in den Sommermonaten. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei 9,5 °C (Agrarmeteorologie-Messstation LfL Ainertshofen – Referenzperiode von 1992 bis 2021).



Abbildung 22: Die Fläche an einem für den Standort typischen Tag mit Inversionswetterlage

Entstehung: Das Altbayerische Donaumoos bildete sich in einer natürlichen Senke, durch die einst die Donau floss. Nach der Verlagerung des Flusslaufes Richtung Norden und der

Ablagerung von Kiesbänken südlich des Flusslaufes, wurde der Abfluss der Donaumoosbäche aus dem Gebiet des heutigen Donaumooses verhindert. Im Laufe der nächsten 10.000 Jahre konnten sich Niedermoortorfe bilden (Pfadenhauer et al. 1991). Die Landschaft fällt nach Nordosten ab. Im Untergrund steht Molassegestein und quartärer Schotter an. Unter Molassegestein wird eine Vielzahl an Sedimenten verstanden, die während der Entstehung der Alpen erodiert wurden. Das umfasst tertiäre Sande und Kiese der oberen Süßwassermolasse, die teilweise durch Sande, Schluffe und Tone fluviatiler Herkunft überdeckt sind. Der anstehende durchlässige mineralische Untergrund hat Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung. Entsprechend dem Moorentwicklungs-Konzept Bayern (Ringler und Dingler 2005) kann das „Altbayerische Donaumoos“ als Talrand-Stauwasser-moor und Randsenkenmoor eingeordnet werden. In den Randbereichen dominieren dabei Quellmoore.



Abbildung 23: Die an die Flächen grenzenden Gräben werden durch Stauwehre und Staudämme angestaut.

Nutzung: Ab 1790 wurde das Donaumoos auf Initiative des Kurfürsten Karl Theodor für die Landwirtschaft und Ansiedlung trockengelegt. Dazu wurden bis heute 473 km Gräben gebaut. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts intensivierte sich die Landwirtschaft durch den Kartoffel- und Roggenanbau. Die ständige Entwässerung führt dazu, dass der Moorboden seither um 3 m abgesackt ist (Koch 2014; Sorg 2020). Seit 1991 arbeitet der Donaumoos-Zweckverband an der Umsetzung des Donaumoos-Entwicklungskonzepts. Darin sind Bereiche für die Renaturierung und den Hochwasserschutz vorgesehen. Weiterhin soll die landwirtschaftliche Nutzung extensiviert werden und Wiesenbrüter geschützt werden.

Die Untersuchungsfläche wurde vor der Wasserstandsanhhebung als extensives Grünland (Rasenschmielen-Bestand) genutzt. Ziel war es auf der Fläche Nassgrünland mit futterbaulich verwertbaren Beständen zu etablieren.

Standort: Die Fläche liegt am westlichen Rand des Donaumooses. Durch die Nähe zu Hanglagen ist der Grundwasserzustrom konstant hoch im Jahresverlauf. Die Torfmächtigkeit beträgt ungefähr 3 m. Der Torf wird besonders im südlichen Teil oberflächennah von mineralischen Schichten aus Lehm durchzogen, die auf eine gelegentliche Überflutung während der Entstehung des Torfkörpers schließen lassen. Der Torf weist eine Zweigliederung auf: So ist der Oberboden vererdet, darunter folgt ein Horizont wenig stark zersetzten Torfs (H5-H6) gefolgt von einem Horizont mit einem höheren Zersetzungsgrad (H8). Der anstehende mineralische Untergrund ist sehr heterogen: So wurden sowohl Tonablagerungen als auch Feinsand und Kiese gefunden.

Auswahl geeigneter Maßnahmen: Im Gewanne „Langenweiher“ wurde in Kooperation mit dem Donaumoos-Zweckverband ein Maßnahmenkonzept zur Wiedervernässung von 20 ha extensiv bewirtschafteten Grünland umgesetzt. Die 4 ha große Untersuchungsfläche liegt mittig. Da die Untersuchungsfläche nach Nordwesten abfällt, wurden ca. alle 30 cm Höhendifferenz Stauwehre und -dämme geplant (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24). Diese sind

regelbar, um ein Absenken des Graben- beziehungsweise Flächenwasserstandes beispielsweise für Bewirtschaftungszwecke sicherzustellen.

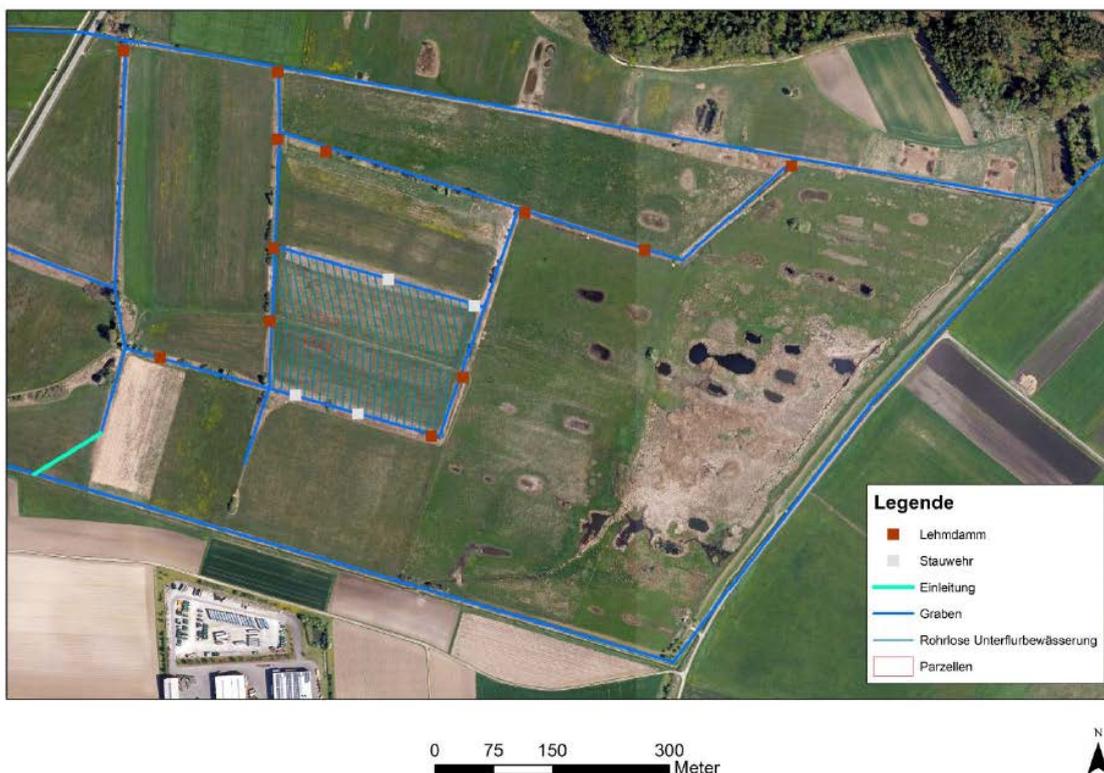


Abbildung 24: Planung der Wiedervernässungsmaßnahmen in Langenweiher, Altbayerisches Donaumoos. Das Grabensystem wurde wieder intakt gesetzt und zusätzliches Wasser über eine Einleitung eingespeist. Für die Untersuchungsfläche (schraffiert) wurden Stauwehre eingesetzt, damit der Flächenwasserstand bei Bedarf abgesenkt werden kann.

Die Stauwehre wurden mithilfe bautechnischer und hydraulischer Berechnungen konzipiert (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Die übrigen Staupositionen wurden als Staudamm umgesetzt, die in den Torfkörper eingebaut wurden (vgl. Abbildung 26). Um die Stabilität zu gewährleisten, wurde die Oberfläche mit Kokosmatten befestigt und eine Überlaufmulde auf der Oberfläche modelliert (vgl. Abbildung 25). Die Wasserstandsregelung auf der stauenden Seite ist durch Schwenken eines Rohraufsatzes möglich.

Die Projektfläche grenzt stromabwärts an eine Fläche, die als Hochwasserrückhaltebecken genutzt wird. Diese ist auch bei mittlerem Durchfluss mit einem Grundwasserstand nahe Geländeoberkante zu nass. Die dort weidenden Murnau-Werdenfelder-Rinder waren aufgrund der „sumpfigen“ Bedingungen in ihrer Mobilität eingeschränkt und wiesen ein erhöhtes Risiko für Klauenkrankheiten auf. Um die nasse Fläche zu entlasten und gleichzeitig in Trockenperioden mehr Wasser über den Graben in die Untersuchungsfläche leiten zu können, wurde eine Rohrleitung verlegt, um Wasser aus dem Hauptgraben abzuleiten.



Abbildung 26: Der Einbau des Dammes muss in den Torfkörper erfolgen, dafür wird Torf seitlich und in der Tiefe entfernt. Bei dem Einsatz von Maschinen muss auf ein geringes Eigengewicht geachtet werden.



Abbildung 25: Umsetzung eines Dammes aus Lehmmaterial. Der Dammkörper ist durch Kokosmatten an der Oberfläche vor Erosion geschützt. Eine Mulde auf der Oberfläche ermöglicht den Abfluss im Hochwasserfall und garantiert so die Stabilität des Dammes.

Genehmigungspflicht der Maßnahmen und Restriktionen: Der Grabeneinstau stellt nach § 9 WHG eine Benutzung dar, die Staudämme und -wehre einen Gewässerausbau nach § 67 WHG. Da keine besonderen öffentlichen Interessen beeinträchtigt werden, war nur ein Plangenehmigungsverfahren statt eines Planfeststellungsverfahrens notwendig. Da der südliche Graben in dem Biotop „Feuchtvegetation in einer Quellmulde und entlang von Gräben nordöstlich von Hollenbach“ liegt, handelt es sich um ein Gewässer von wasserwirtschaftlicher Bedeutung. Weiterhin grenzt und liegt die Fläche in dem FFH-Gebiet 7233-373 "Donnaumoosbäche, Zucheringer Wörth und Brucker Forst". Entsprechend §34 BNatSchG muss das Projekt vor seiner Zulassung auf seine Verträglichkeit mit den Erhaltungszielen des FFH-Gebietes geprüft werden. In einer FFH-Verträglichkeitsabschätzung wurde festgestellt, dass keine erheblichen Beeinträchtigungen des FFH-Gebietes zu erwarten sind und von einer FFH-Verträglichkeitsprüfung abgesehen werden kann.

Kostenansatz: *Alle Angaben beziehen sich auf die Brutto-Kosten. Für die Umsetzungskosten werden Materialkosten, Arbeitszeit sowie der Materialtransport im Gelände berücksichtigt.*

Die Umsetzung der Staupositionen dauerte insgesamt 5 Tage. Es wurden 17 Staudämme (davon 5 Stück um die Fläche) und 4 Stauwehre gesetzt.

Für die Staudämme wurde Lehm aus einer nahen Baustelle verwendet, da sich Torf nicht für Staudämme in Fließgewässern eignet (siehe Kapitel b)). Pro Staudamm wurden 10 m³ Lehm verbaut. Zusätzlich dazu wurden Kokosmatten als Erosionsschutz und ein Rohrsystem für die Wasserregelbarkeit eingesetzt. Für den Einbau und Modellierung kann 1 Person stunde angesetzt werden. Die Kosten pro Staudamm beliefen sich somit auf ca. 300 €.

Für ausgewählte Staupositionen wurden Stauwehre eingesetzt: Die Kosten pro Stauwehr (inkl. Fertigung, Transport und Einbau) beliefen sich auf 4.500 €. Die hohen Kosten für die Stauwehre kamen durch die Prototyp-Fertigung und dem Mangel an nahen Schlossereien, die solche Aufträge ausführen, zustande.

Somit beliefen sich die Kosten des kombinierten Systems für die Projektfläche auf **4.800 €/ha**.

Ergebnisse: Im Jahr 2022 sind die Niederschläge im Juli und August geringer ausgefallen als im Jahr 2023 und waren dafür im September und Oktober höher. Dennoch zeigen beide Jahre eine ähnlich lange Trockenperiode mit einer negativen klimatischen Wasserbilanz von ca. 3 Monaten. Durch das Anstauen der Entwässerungsgräben konnte der Grundwasserstand im Sommerhalbjahr 2023 im Vergleich zum Jahr 2022 von bis zu 110 cm auf 70 cm unter Flur angehoben werden. Im Winterhalbjahr stand das Grundwasser schon vor den Maßnahmen oberflächennah an (vgl. Abbildung 27).

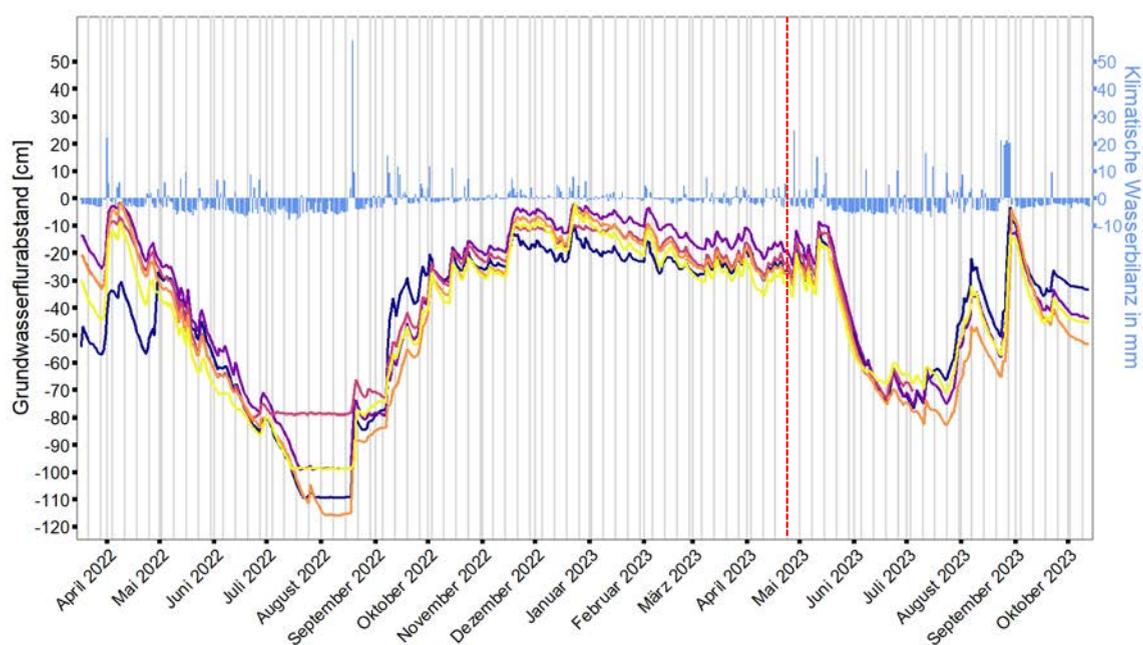


Abbildung 27: Die Wirksamkeit des Grabenanstaus (seit April 2023, rote gestrichelte Linie) macht sich in der Verkürzung und Minimierung der sommerlichen Trockenperiode bemerkbar. Die Grundwassermessstellen stehen jeweils in der Mitte eines Quadranten der Untersuchungsfläche. Der Rückstau erfolgt primär durch den quer zur Richtung der Grundwasserströmung verlaufenden Graben am Auslass der Fläche. Da diese nach Osten verläuft, ist der östliche Graben mit Süd-Nord-Ausrichtung entscheidend für Staumaßnahmen. Der Rückstau wirkt über die ganze Fläche fort, sodass sich ein annähernd gleicher Grundwasserflurabstand ausbildet.

Durch die Rohrleitung kann dem Grabensystem konstant Wasser zugeführt werden und der Grabenwasserstand auch in Trockenperioden auf der gewünschten Höhe gehalten werden. Ebenfalls kann ein höherer Flächenwasserstand stromabwärts den hydraulischen Gradienten und damit den Abfluss aus der Fläche verringern.

Auf der Fläche im Altbayerischen Donaumoos konnte durch gezielte Maßnahmen, wie das Anstauen der Entwässerungsgräben, der Grundwasserstand im Sommerhalbjahr 2023 im Vergleich zum Jahr 2022 deutlich angehoben werden. Während in beiden Jahren eine Trockenperiode von etwa drei Monaten mit negativer Wasserbilanz auftrat, lag der Grundwasserstand im Sommer 2023 durch die Maßnahmen höher. Der hohe Wasserzufluss durch eine Rohrleitung aus einem nahegelegenen Graben trug dazu bei, den Grabenwasserstand auch in Trockenperioden auf der gewünschten Höhe zu halten.

Projektinitiatoren	Donaumoos Zweckverband (DMZV), Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Planung	DMZV, LfL, EDR GmbH
Umsetzung	ortsansässiger Landwirt, DMZV, LfL
Kosten	4.800 €/ha
Weitere Informationen	https://www.donaumoos-zweckverband.de/im-langenweiher

6 Weitergehende Informationen

Allgemeines

BayernAtlas: Der BayernAtlas bietet die Möglichkeit verschiedene Geodaten (z. B. das DGM) in einer Karte darzustellen.

<https://geoportal.bayern.de/bayernatlas>

Umweltatlas Bayern: Im Umweltatlas Bayern können Fließgewässer sowie deren Einzugsgebiete dargestellt werden. Weiterhin ist es möglich sich die Moorbodenkarte anzeigen zu lassen.

<https://www.umweltatlas.bayern.de/mapapps/resources/apps/umweltatlas/index.html?lang=de>

Boden

Bodenansprache von organischen (Moor)böden unter Berücksichtigung von sekundären Bodenbildungsprozessen:

[Steckbrief der Moorsubstrate \(Luthardt et al. 2015\)](#)

[WIKIMooS - Wissens- & Kartierungs Indikatorenset MoorSubstrate](#)

Bodenkundliche Kartieranleitung: Die in Deutschland gängige Grundlage zur Beschreibung von Böden. Neben der Klassifikation von Bodenarten finden sich auch Kennwerttabellen zu bodenphysikalischen Parametern.

ARBEITSGRUPPE BODEN (2024): Bodenkundliche Kartieranleitung, 6. Aufl.-Hannover

Hydrologie

Hydrologischer Atlas Deutschland: Die Bundesanstalt für Gewässerkunde stellt u. a. Daten über die Hydrogeologie und wasserwirtschaftliche Größen zur Verfügung.

<https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de>

Das Landesamt für Umwelt Bayern stellt verschiedene WMS-Layer bereit:

[Grundlagen Fließgewässer: https://www.lfu.bayern.de/gdi/wms/wasser/grundlagen_fliessgewaesser/](https://www.lfu.bayern.de/gdi/wms/wasser/grundlagen_fliessgewaesser/)

Leitfäden zur Renaturierung von Moorstandorten (siehe auch Literaturverzeichnis):

Deutschland:

- Moorschutz in Deutschland - Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen: Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren, Bundesamt für Naturschutz (Tiemeyer et al. 2017)

Bayern:

- Leitfaden der Niedermoorrenaturierung in Bayern, LfU Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2005)
- Leitfaden der Hochmoorrenaturierung in Bayern, LfU Bayern (Siuda und Zollner 2002)
- Moorrenaturierung kompakt: Handlungsschlüssel für die Praxis, LfU Bayern (Siuda und Thiele 2011)
- Leitfaden zu „Handlungsempfehlungen für Moorschutzpraktiker im Umgang mit geschützten Arten: aquatisch gebundene Arten“, LfU Bayern (in Planung)

Brandenburg:

- Leitfaden zur Renaturierung von Feuchtgebieten in Brandenburg, LfU Brandenburg (Landgraf 2004)

Meteorologische Daten

Agrarmeteorologie LfL: Meteorologische Daten und die Möglichkeit diese zu visualisieren stehen unter folgendem Link bereit:

<https://www.lfl.bayern.de/service/agrarwetter/204408/index.php>

DWD: Meteorologische Daten können vom FTP-Server des Climate Data Centers (CDC) unter ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/ heruntergeladen werden.

Naturschutz

FIN-Web: Das Bayerische Landesamt für Umwelt stellt weiterführende Geofachdaten mit Bezug zum Naturschutz zur Verfügung.

https://www.lfu.bayern.de/natur/fis_natur/fin_web/index.htm

Rechtliche Grundlagen

[LfL Bayern: Arbeitshilfe zur Beantragung einer wasserrechtlichen Genehmigung](#)

7 Literaturverzeichnis

Bastian, Julia; Luthardt, Vera; Zeitz, Jutta (2023): Wurzelverteilungsmuster im stauwasser geprägten Niedermoorgrünland und Möglichkeiten einer Gefügesanierung durch Wurzeln. DOI: 10.23689/fidgeo-5976.

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2005): Leitfaden Niedermoorrenaturierung in Bayern. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Beckwith, Clive W.; Baird, Andrew J.; Heathwaite, A. Louise (2003): Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements. In: *Hydrol. Process.* 17 (1), S. 89–101. DOI: 10.1002/hyp.1116.
- Cudmani, Roberto; Premstaller, M.; Rebstock, D.; Vogt, Stefan (2022): Geotechnische in situ Charakterisierung von Seeton am Beispiel des Rosenheimer und Salzburger Beckens.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015): Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. Stand: Mai 2015. Hennef (Sieg): Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, M 522).
- Deutsches Institut für Normung (2022): Eurocode 7. Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Oktober 2022. Berlin (Deutsche Norm EN, DIN EN 1997-1 Entwurf).
- EAU (1990): Empfehlung des Arbeitskreises Ufereinfassung (EAU). Hg. v. Verlag von W. Ernst und Sohn. Berlin.
- Ellenberg, Heinz; Leuschner, Christoph (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 203 Tabellen. 6., vollst. neu bearb. und stark erw. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB, 8104).
- Gnatowski, Tomasz; Szatylowicz, Jan; Brandyk, T. (2002): Effect of peat decomposition on the capillary rise in peat-moorsh soils. In: *International Agrophysics* 16.
- Hájek, Tomáš; Ballance, Simon; Limpens, Juul; Zijlstra, Mink; Verhoeven, Jos T. A. (2011): Cell-wall polysaccharides play an important role in decay resistance of Sphagnum and actively depressed decomposition in vitro. In: *Biogeochemistry* 103 (1-3), S. 45–57. DOI: 10.1007/s10533-010-9444-3.
- Hartmann, K.J.; Bauriegel, A.; Dehner, U.; Eberhardt, E.; Hesse, S.; Kühn, D. et al. (Hg.) (2024): Bodenkundliche Kartieranleitung KA6 in 2 Bänden. Band 1: Grundlagen, Kennwerte und Methoden. Band 2: Geländeaufnahme und Systematik. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Nägele und Obermiller; AG Boden, BGR Hannover. komplett überarbeitete und erweiterte. Stuttgart: Schweizerbart'sche, E (Monographien von BGR und LBEG).
- Heinrich-Böll-Stiftung; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland; Michael Succow Stiftung zum Schutz der Natur (2023): Mooratlas. Daten und Fakten zu nassen Klimaschützern. Berlin, Greifswald: Heinrich-Böll-Stiftung; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V; Michael Succow Stiftung Partner im Greifswald Moor Centrum. Online verfügbar unter <https://www.boell.de/de/die-atlantien-der-heinrich-boell-stiftung>.
- Hoyer, Aaron (2021): Bewertungsparameter zur Abschätzung des Restitutionspotenzials von Mooren - am Beispiel des Staatsguts Karolinenfeld. Masterarbeit. TU München.
- Koch, Friedrich (2014): Das Donaumoos, eine Kulturgeschichte des oberbayerischen Donaumooses., S. 51–67.
- Landgraf, Lukas (2004): Leitfaden zur Renaturierung von Feuchtgebieten in Brandenburg. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA) (Studien und Tagungsberichte).
- LfL (2024): Maßnahmen zur Wasserstandsanhhebung für eine moorbodenverträgliche Landwirtschaft. Beantragung einer wasserrechtlichen Genehmigung. Hg. v. Bayerische

- Landesanstalt für Umwelt. Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/massnahmen-wasserstandsanhebung-moorbodenvertraegliche-landwirtschaft_lfl-information.pdf.
- Luthardt, Vera; Schulz, Corinna; Meier-Uhlher, Ron (2015): Steckbriefe Moorsubstrate, 2. Auflage. Unter Mitarbeit von FID GEO: Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Hrsg.).
- Morris, Paul J.; Baird, Andy J.; Eades, Phil A.; Surridge, Ben W. J. (2019): Controls on Near-Surface Hydraulic Conductivity in a Raised Bog. In: *Water Resour. Res.* 55 (2), S. 1531–1543. DOI: 10.1029/2018WR024566.
- Pfadenhauer, Jörg; Krüger, Gerd-Michael; Muhr, Eva (1991): Ökologisches Gutachten Donaumoos. Konzept zur künftigen Landschaftsentwicklung ; Kurzfassung. München: Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Schriftenreihe / Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 109).
- Price, Jonathan; Evans, Chris; Evans, Martin G.; Allott, T. E. H.; Shuttleworth, Emma (2016): Peatland restoration and hydrology. In: Aletta Bonn, Tim Allott, Martin Evans, Hans Joosten und Rob Stoneman (Hg.): *Peatland Restoration and Ecosystem Services*. United Kingdom: Cambridge University Press, S. 77–94.
- Proulx-McInnis, Sandra; St-Hilaire, André; Rousseau, Alain N.; Jutras, Sylvain (2013): A review of ground-penetrating radar studies related to peatland stratigraphy with a case study on the determination of peat thickness in a northern boreal fen in Quebec, Canada. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 37 (6), S. 767–786. DOI: 10.1177/0309133313501106.
- Ringler, Alfred; Dingler, B. (2005): Moortypen in Bayern. Moorentwicklungskonzept Bayern ; [MEK]. Augsburg: LFU (Bayern / Landesamt für Umweltschutz: Schriftenreihe, H. 180).
- Scheffer, Fritz; Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Schwärzel, Kai (2000): Dynamik des Wasserhaushaltes von Niedermooren: Univ. Berlin.
- Siuda, Cornelia; Thiele, Alexander (2011): Moorrenaturierung kompakt. Handlungsschlüssel für die Praxis. Stand: Dezember 2010. Augsburg: LFU (UmweltSpezial).
- Siuda, Cornelia; Zollner, Alois (2002): Leitfaden der Hochmoorrenaturierung in Bayern. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg. Online verfügbar unter https://www.lfu.bayern.de/publikationen/get_pdf.htm?art_nr=lfu_nat_00062, zuletzt geprüft am 24.01.2024.
- Sorg, Ulrich M. (2020): Im Moor zählt jeder Tropfen Wasser - Ein Tagungsrückblick. In: ANLiegen Natur, Bd. 42, S. 47–50. Online verfügbar unter www.anl.bayern.de/publikationen.
- Striegler, Werner (1998): Dammbau in Theorie und Praxis. völlig neu bearb. 2. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen.
- Succow, Michael (Hg.) (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. Mit 136 Tabellen. 2., völlig neu bearb. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart.
- Tiemeyer, Bärbel; Bechtold, Michel; Belting, Susanne; Freibauer, Annette; Förster, Christoph; Schubert, Elisabeth et al. (2017): Moorschutz in Deutschland. Optimierung des

Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen ; Bewertungsinstrumente und Erhebung von Indikatoren. Bonn - Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz (BfN-Skripten, 462).

Timmermann, Tiemo; Joosten, Hans; Succow, Michael (2009): Restaurierung von Mooren. In: Stefan Zerbe und Gerhard Wiegleb (Hg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa, Bd. 2. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, S. 55–93.

Zak, Dominik; Gelbrecht, Jörg (2007): The mobilisation of phosphorus, organic carbon and ammonium in the initial stage of fen rewetting (a case study from NE Germany). In: *Biogeochemistry* 85 (2), S. 141–151. DOI: 10.1007/s10533-007-9122-2.

Zanke, Ulrich (2013): *Hydraulik für den Wasserbau*. 3. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink Bücher). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-05489-1>.