

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Situative Zuwässerung in Wäldern des Hessischen Rieds zur Sicherung und Wiederherstellung naturverträglich genutzter feuchter Eichen-Hainbuchen-Wälder

Zuwendungsempfänger:

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Förderkennzeichen:

2218WK24X4

Laufzeit:

01.05.2020 bis 30.06.2024

Datum der Erstellung:

11/12/2024

Autoren:

Michael Köhler, Nataliya Bilyera, Henning Meesenburg



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

SCHLUSSBERICHTⁱ

I. Ziele

1. Aufgabenstellung

Veranlassung und Projektziele

Zahlreiche Waldbestände im Hessischen Ried weisen seit Jahrzehnten erhebliche Waldschäden auf (Paar und Dammann, 2018). Ein maßgeblicher Faktor hierfür ist der im Zuge der Trinkwassergewinnung verloren gegangene Grundwasseranschluss, der bis Ende der 1960er Jahre großflächig vorhanden war und in Trockenjahren die Wasserversorgung der Bäume gewährleistet hat (Ahner et al., 2013). Besonders die Trockenperiode von 1970 bis 1977 sorgte für massive Waldschäden. Ein Effekt von Grundwasserabsenkungen auf die Vitalität, Produktivität und Mortalität von Waldbeständen wurde in zahlreichen Studien nachgewiesen (Altherr, 1972; Schmidt et al., 2015; Weissbrod und Binder, 2017; Skiadaresis et al., 2019). Durch den bereits eingetretenen und prognostizierten Klimawandel wird die Häufigkeit und Intensität von Trockenphasen zunehmen, die Phasen mit ungenügender Bodenwasserverfügbarkeit werden sich verschärfen und die Schadensprozesse werden sich beschleunigen (Sutmöller et al., 2019; Wagner et al., 2019). Im Extremfall sterben die Bäume bis hin zu ganzen Beständen ab und müssen im Rahmen von Zwangsnutzungen entnommen werden (Schmidt et al., 2015). Zahlreiche weitere Belastungsfaktoren (z.B. Stoffeinträge aus der Luft, Zerschneidungen durch Verkehrswege, Insektenfraß) kommen schadensverstärkend hinzu.

Dadurch ist der Fortbestand der nach der FFH-Richtlinie der Europäischen Union geschützten Waldlebensraumtypen, insbesondere des Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwaldes (FFH LRT 9160) stark gefährdet. Diese im hessischen Ried noch vorkommenden Lebensraumtypen sind für viele gefährdete Insekten- und Vogelarten von besonderem Wert. Darüber hinaus ist auch die Bereitstellung weiterer Ökosystemleistungen der Wälder im Hessischen Ried gefährdet, wodurch eine nachhaltige Nutzungsmöglichkeit stark in Frage gestellt wird (Ahner et al., 2013).

Neben den massiven Waldschäden wurden zahlreiche Schäden an Straßen und Gebäuden durch Setzrisse sichtbar, die auf den gesunkenen Grundwasserspiegel und die Entwässerung setzungsempfindlicher Bodenschichten zurückgeführt werden konnten. Die Schäden verstärkten sich in einer zweiten Trockenperiode von 1989 bis 1992. Um die Versorgung mit Grundwasser in der Region sicherzustellen und auch gleichzeitig die auftretenden Schäden zu bekämpfen, beauftragte die Hessische Landesregierung die Erstellung des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried (GWBP, RP Darmstadt, 1999). Der Plan sieht eine künstliche Erhöhung der Grundwasserstände durch Infiltration von aufbereitetem Rheinwasser in verschiedenen Infiltrationsorganen vor allem in Wäldern vor. Das festgelegte Grundwasserniveau wird durch mittlere und untere Grenzwerte definiert, die nicht unterschritten werden dürfen. Seit der Einführung dieser Maßnahmen sind keine durch abgesenktes Grundwasser verursachten Setzrisse an Gebäuden mehr aufgetreten. Wälder haben jedoch nur sehr bedingt von der Wiederaufspiegelung profitiert denn das für den Wald gewünschte Grundwasserniveau der 1950er und 1960er Jahre kann aus Gründen des Schutzes vor Kellervernässung in den während niedriger Grundwasserstände neu errichteten Wohngebieten nicht mehr vollständig angestrebt werden. Zusätzlich erhöhen häufigere und längere Sommertrockenheiten im Zuge des Klimawandels den Wasserbedarf für die Wälder weiter.

Vor diesem Hintergrund wurde in verschiedenen Untersuchungen und Arbeitsgruppen der Frage nachgegangen, ob der ursprünglich vorhandene Kontakt der Wälder zum Grundwasser über eine Grundwasseranhebung (Aufspiegelung), die über das bereits bestehende, für die Sicherstellung der Wassergewinnung erforderliche Maß hinausgeht, wieder hergestellt werden kann (BGS Umwelt und NW-FVA, 2011). Die Studie zum Aufspiegelungskonzept war eingebettet in das umfassende Projekt: „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische

Ried“ (Ahner et al. 2013). Der Untersuchungsansatz war modellbasiert, so dass ein komplexes Prognosewerkzeug entstanden ist, mit dem unterschiedliche Szenarien mit ihren Auswirkungen auf die Waldentwicklung simuliert werden konnten. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass dieser Ansatz technisch machbar ist, und er die Wasserversorgung der Waldbäume auf den ausgesuchten Flächen auch verbessern wird. Allerdings ist er planungsrechtlich und umsetzungstechnisch sehr zeit- und kostenintensiv, da neben dem Bau und dem Betrieb zusätzlicher Infiltrationsanlagen in den Wäldern auch umfangreiche Entwässerungs- und Schutzmaßnahmen für Siedlungen und landwirtschaftliche Flächen erforderlich würden. Kurz- und mittelfristig sind solche Maßnahmen nicht umsetzbar.

Es stellt sich daher die Frage, ob die defizitäre Wasserversorgung der Waldbestände kurzfristiger und ggf. kostengünstiger auch auf anderen Wegen, z.B. durch temporäre Zuwässerung verbessert werden kann. Über derartige Maßnahmen liegen für Waldflächen bislang nur wenige Erfahrungen vor (Hansen, 1978). In einem grundwassernahen Fichten-Kiefern-Mischbestand in Finnland wurde mittels bodennah installierten Rohren beregnet (Paavolainen et al., 2000). Abweichend von dem hier geplanten Vorhaben standen Untersuchungen der Effekte der Zuwässerung auf bodenbiologische Umsätze im Zentrum der Betrachtungen. Zudem lagen die Raten der Zuwässerung um ein Vielfaches über den hier vorgesehenen Mengen. Die Studie von (Dobbertin et al., 2010) und (Herzog et al., 2014) ist eine der wenigen, in der die Effekte einer oberflächigen Zuwässerung auf die Vitalität und Produktivität von Waldbäumen untersucht wurde. Allerdings wurde die Studie in einem inneralpinen Trockental auf grundwasserfernen Standorten am Beispiel der Baumart Kiefer durchgeführt. Sie ist daher aufgrund der standörtlichen und forstlichen Verhältnisse nur bedingt vergleichbar. In einer Studie zur oberflächigen Zuwässerung in einem Kiefernbestand im Landkreis Uelzen wird Klarwasser aus einer Kläranlage mittels perforierten Rohren mit dem Ziel einer Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate ausgebracht (Meyer und Schulz, 2014). Hier stehen Untersuchungen zur Wirkung des ausgebrachten Wassers auf die Sickerwasserqualität und auf den Boden im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Das hessische Umweltministerium berief im Jahr 2012 einen „Runden Tisch“ ein, der einen Ausgleich der Interessen von Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Naturschutz und Siedlungsgebieten herbeiführen sollte und auf dieser Basis eine Empfehlung zur Umsetzung an die politischen Entscheidungsträger abgegeben hat (Kummer et al., 2015). Dabei wurde auch vorgeschlagen, als Alternative zu einer nicht nur kostenintensiven, sondern auch planungsrechtlich sehr aufwändigen, unsicheren und erst langfristig wirksam werdenden Grundwasseraufspiegelung eine oberirdische Zuwässerung zu prüfen.

Das Vorhaben SiZuRi sollte als Demonstrationsvorhaben modellhaft die Eignung einer oberirdischen Zuwässerung als mögliche Alternative zu einer Grundwasseraufspiegelung zur Erhaltung und Revitalisierung naturverträglich genutzter Feuchtwälder (FFH Lebensraumtyp 9160: Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwald) überprüfen. Es sollte ein Verfahren entwickelt und erprobt werden, welches geeignet ist, durch Klimawandel und Grundwasserabsenkung gefährdete Waldlebensraumtypen zu sichern bzw. wiederherzustellen.

Dabei wurden folgende Ziele verfolgt:

- Technische Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur flächenhaften Zuwässerung in naturverträglich genutzten Feuchtwäldern,
- Beseitigung von Trockenstressphasen der Waldbestände durch gezielte, temporäre Zusatzwassergaben auf die Bodenoberfläche, die durch Bodenfeuchtemessungen gesteuert werden,
- Untersuchung der forstlichen und ökologischen Auswirkungen der Zuwässerung durch Implementierung eines forstökologischen Monitorings,
- Ermittlung der betrieblichen Rahmenbedingungen und des betrieblichen Aufwands einer Zuwässerung,
- Entwicklung eines gekoppelten Modellsystems, das Wasserhaushalt und Waldentwicklung in bewässerten Waldbeständen funktional verbindet, um eine räumliche und zeitliche Übertragung in die Region zu ermöglichen, geeignete Areale für eine potenzielle Ausweitung der Zuwässerungsfläche zu identifizieren und den Zuwässerungsbedarf unter veränderten klimatischen Bedingungen abschätzen zu können.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Stellenbesetzung

Die Stelle „technische Mitarbeit“ wurde im November 2020 und die Stelle „wissenschaftliche Mitarbeit“ im Dezember 2020 besetzt. Aufgrund von Wechseln der Projektmitarbeiter:innen und der Schwierigkeit, geeignetes Personal zu rekrutieren, blieb die Stelle „wissenschaftliche Mitarbeit“ von 2022 bis 2023 für 10 Monate unbesetzt. Eine neue wissenschaftliche Mitarbeiterin war anschließend für nur 8 Monate bis zum 31.03.2024 tätig. Als Übergang wurden kurzfristig zwei neue Mitarbeiter:innen vom 01.04. bis zum 30.06.2024 mit je 25% Stellenanteil eingestellt, um den weiteren Betrieb des Projektes bis zum Ende der Laufzeit sicherzustellen. Einige wichtige Projektziele konnten damit nur eingeschränkt erreicht werden. Mit der der Bereinigungssitzung vom 18.01.2024 zum Bundeshaushalt 2024 wurde eine weitere Verlängerung der Förderung des Vorhabens aus dem Waldklimafonds ausgeschlossen.

Flächenauswahl und Einrichtung der Versuchsanlage zur Zuwässerung

Nach einer ersten Flächenbegehung durch die NW-FVA im Stadtwald Gernsheim erfolgte ein Erörterungstermin im vorgesehenen Waldgebiet am 15.07.2020 mit allen Beteiligten (NW-FVA, HMUKLV, RP, Forstamt Groß-Geraus, Büro BGS Umwelt, Stadt Gernsheim). Am 09.09.2020 wurden die endgültigen Untersuchungsparzellen ausgewählt. Ein „Forschungs- und Entwicklungsvertrag“ zwischen NW-FVA und BGS Umwelt über Aufbau und Betreuung der Pilotanlage zur Zuwässerung wurde am 09.12.2020 unterzeichnet und anschließend konnte mit dem Aufbau der Bewässerungsanlagen begonnen werden. Die Aufbauarbeiten am Bewässerungssystem waren bis Ende Mai 2021 abgeschlossen.

Einrichtung von Messparzellen, Erfassung des Ausgangszustandes und Monitoring von Zuwässerungseffekten

Bodenfeuchtemessungen

Zwischen Dezember und April 2021 wurde auf jeder Parzelle ein Bereich für die Installation der Bodenfeuchtesensoren ausgewählt („Messnest“, ca. 5 x 5 m). Zum Einsatz kamen die Wassergehaltssensoren SMT100 (Firma Trübner) und die Tensiometer TEROS 32 (METER Group). Beide Sensortypen wurden in den Tiefen 20 cm, 60 cm und 100 cm mit je drei Wiederholungen pro Parzelle eingebaut. Die TEROS 32 erwiesen sich als fehleranfällig und ein großer Teil der Sensoren war schon nach wenigen Monaten beschädigt und lieferte keine plausiblen Messdaten mehr. Aus diesem Grund wurden in 2023 zusätzlich je zwei Tensiometer-Sensoren (ecoTech) pro Tiefe zur Messung des Matrixpotenzials in je einer Zuwässerung und einer Kontrollparzelle eingebaut. Zur Installation aller Sensoren wurde bis zu den entsprechenden Tiefen mit Pürckhauern vorgebohrt. Die Bohrlöcher wurden nach dem Sensoreinbau mit Bodenmaterial abgedichtet um das Einfließen von überstauendem Wasser entlang von Kabeln und Schäften der Sensoren möglichst zu verhindern.

Je zwei der so ausgestalteten Parzellen wurden mit einem Datalogger (ADL-MXmini) betrieben. Die Stromversorgung wurde mit je zwei Solarpanelen und einem Pufferakku pro Logger sichergestellt. Die Daten wurden täglich per Fernübertragung an die NW-FVA gesendet. Alle Messnester wurden mit einem Zaun zum Schutz vor Schwarzwildschäden versehen (Abbildung 1). Alle Matrixpotenzialwerte werden im Folgenden als positive Werte wiedergegeben (Saugspannung).



Abbildung 1: Loggeranlage mit Solarpanel und gezäuntes Messfeld

Bodenprofile und Bodenbeprobung

Im Frühjahr 2021 wurde auf jeder Untersuchungsparzelle ein Bodenprofil bis etwa 250 cm Tiefe gegraben. Dabei wurden horizontweise Bodenarten bestimmt und Proben für Lagerungsdichtebestimmung und die Erstellung von Wasserspannungskurven gewonnen.

Bestandesniederschlag

Zur Erfassung des Bestandesniederschlags wurden je Untersuchungsparzelle 15 LWF-Sammler auf einem regelmäßigen Raster (Rasterweite 10 x 10 m) in 1 m Höhe auf PVC Rohren installiert. Ein lokaler Beobachter wurde damit beauftragt, die Niederschlagsmengen in den Sammlern alle zwei Wochen zu bestimmen.

Phänologie

Für Eichen und Hainbuchen wurde ein Schema entwickelt, nach dem in Anlehnung an ICP Forests phänologische Einschätzungen von Belaubung, Blüh- und Fruktifikationsverhalten gemacht werden können (Raspe et al., 2020). Zur visuellen Einschätzung von Blattaustrieb und Laubverfärbung bzw. Laubfall wurden im Frühjahr und im Herbst im Abstand von 1-2 Wochen je Parzelle etwa 10 Bäume angesprochen. Längerfristig kann so eingeschätzt werden, ob sich z.B. die Belaubungsdauer zwischen Kontroll- und Bewässerungsparzelle unterscheidet.

LAI, Openness, 3D Laserscans

Im Sommer 2021 wurden mit „LAI-2200 Plant Canopy Analyzer“ über Strahlungsmessungen und optisch mit einer Fisheye-Kamera der LAI (leaf area index, Blattflächenindex) und die openness im Bestand über jedem Bestandesniederschlagssammler bestimmt. Darüber hinaus wurden mit einem Faro M70- Laserscanner (Faro Technologies Inc, Lake Mary, USA) an denselben Stellen dreidimensionale Aufnahmen des Bestandes gemacht (Abbildung 2).

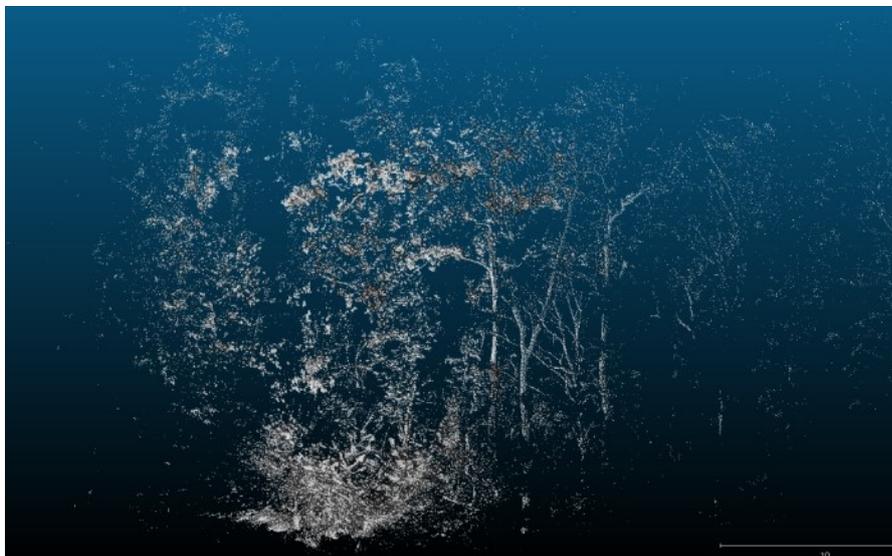


Abbildung 2: 3D-Laserscanpunktwolke des Bestandes im Umkreis um einen Niederschlagssammler

Die Gesamtbestände wurden mit dem mobilen Laserscanner Zeb Horizon (GeoSlam Ltd., Nottingham, UK), vermessen. Die Daten dienen zur Parametrisierung hydrologischer Modelle und der Beschreibung der Bestandesstruktur. Darüber hinaus soll versucht werden, Beziehungen zwischen der Bestandesstruktur und dem Bestandesniederschlag zu beschreiben. Es ist beabsichtigt, zu Versuchsende Wiederholungsaufnahmen zu machen, um eventuelle Unterschiede in der Entwicklung der Bestandesstruktur zwischen Kontrolle und bewässerten Parzellen erkennen zu können.

Zuwachsmessungen

Neben der Installation von je drei automatischen Dendrometern zur tagesaktuellen Überwachung der Baumumfangsänderung wurden noch insgesamt 140 manuell ablesbare Dendrometer an möglichst wenig geschädigten Bäumen angebracht. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Untersuchung der jährlichen Umfangsänderung von Eichen und Hainbuchen.

Stammfußkarten, Waldinventur, ertragskundliche Aufnahmen und WZE Ansprache

Im Sommer 2021 wurden alle Bäume > 7 cm BHD nummeriert und ein georeferenzierter Stammverteilungsplan für die Parzellen erstellt. Für diese Bäume wurden Höhen, Kronenansatzhöhen und Durchmesser ermittelt. Aus diesen Daten wurden Durchmesser und Höhen des Grundflächenmittelstamms bestimmt sowie Vorräte abgeleitet. Eine weitere Aufnahme ist am Ende der Versuchslaufzeit sinnvoll.

Eine Beschreibung des Gesundheitszustandes erfolgte ebenfalls. Der Bestand weist starke Trockenheitsschäden auf (Kronenverlichtung, abgängige Altbäume). Jährlich im Sommer wurde eine Kronenbonitur (WZE-Ansprache) aller Bäume der Kraft'schen Klassen 1-3 durchgeführt. Dabei wurden Variablen wie Kronenverlichtung, Vergilbung, Kronenschlussgrad, Trockenreisig, Behang, Insekten- und Pilzbefall bonitiert.

Vegetationsuntersuchungen

Jeweils im Sommer wurden auf den sechs Untersuchungsparzellen Vegetationsaufnahmen auf zufällig ausgewählten Teilflächen von 10x10 m durchgeführt (Abbildung 3). Es wurden getrennt nach Vegetationsschichten (Moosschicht, Krautschicht, Strauchschicht, Baumschicht) die Artanzahlen und Deckungsgrade aller Pflanzenarten erfasst (Canullo et al., 2020).



Abbildung 3: Teilfläche zur Vegetationsuntersuchung

3. Stand der Technik

Siehe Aufgabenstellung

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bewässerungsanlage wurde entsprechend den Erfordernissen vom Ingenieurbüro BGS Umwelt geplant und erstellt. In Absprache mit BGS Umwelt und dem Wasserverband Hessisches Ried (WHR) wurden Bewässerungsmengen und Zeiten festgelegt.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Untersuchungsfläche

Wesentliche Kriterien für die Flächenauswahl waren neben den forstlichen Merkmalen die wasserwirtschaftlichen Randbedingungen, vor allem die Nähe der Fläche zum Leitungsnetz des WHR (Abbildung 4). Abgebildet sind die Brunnen des Wasserwerks Allmendfeld, die von Hessenwasser zur Wasserversorgung im Rhein-Main-Gebiet betrieben werden, sowie die Infiltrationsorgane 10-18 und der Waldgraben, die vom WHR betrieben werden. Die Infiltration des aufbereiteten Rheinwassers erfolgt in den entsprechenden Infiltrationsorganen und Trinkwasser wird in unmittelbarer Nähe an den Brunnen des Wasserwerks gewonnen.

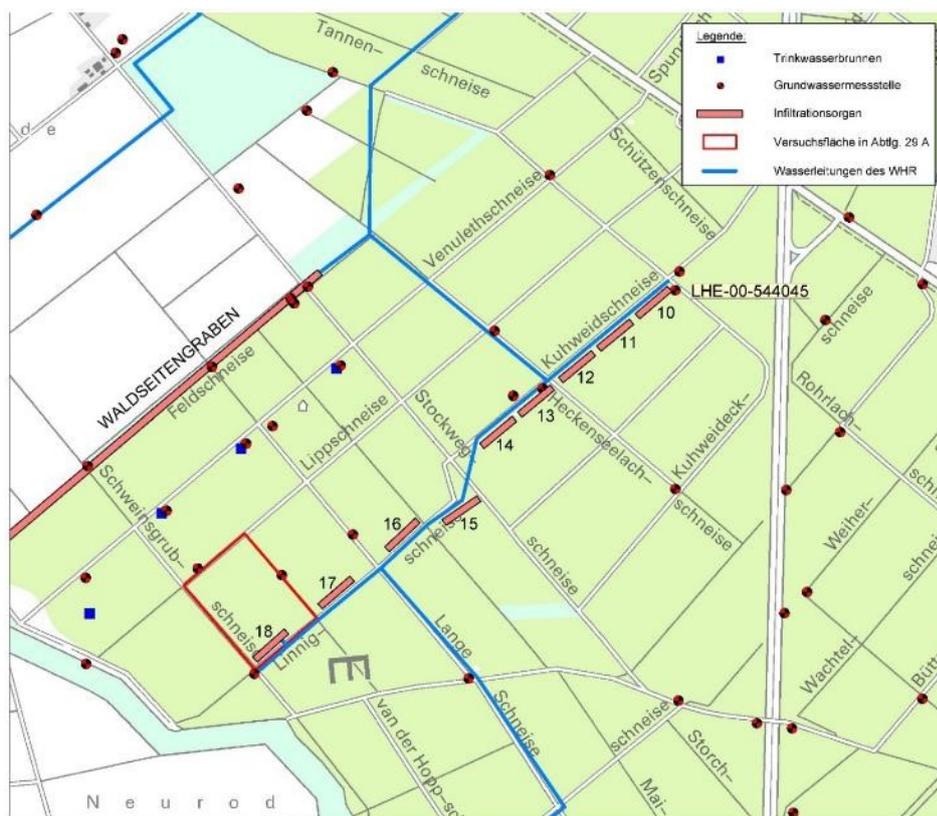


Abbildung 4: Lage der Untersuchungsfläche (rotes Viereck) nahe des Infiltrationsorgans 18 des WHR

Laut Grundwasserbewirtschaftungsplan wird die Grundwasseroberfläche zwar signifikant durch die Infiltration und die Verringerung der Netto-Entnahme angehoben, erreicht aber nicht die optimalen Flurabstände von etwa 1,5 – 2,0 m, wie sie in den 1950er Jahren noch vorhanden waren (Köhler et al., 2023b). Nordwestlich der Versuchsflächen befindet sich die Grundwassermessstelle LHE-00-544045, deren Ganglinie in Abbildung 5 dokumentiert ist. Diese zeigt neben den extremen Tiefständen zu Zeiten von Trockenheit und sehr intensiver Grundwassernutzung auch den durch die im Rahmen des Grundwasserbewirtschaftungsplan eingerichtete Infiltration deutlich angehoben heutigen Grundwasserstand. Die Tiefstände der 1970er und 1990er Jahre wurden seitdem nicht mehr erreicht. Dennoch sind die Flurabstände nicht wieder auf das Niveau der 1960er Jahre zurückgekehrt. Die Messstelle wurde erst im Juli 1963 eingerichtet und erfasste daher nicht die höheren Grundwasserstände der 1950er und frühen 1960er Jahre, die anhand reliktscher Gr-Horizonte in umliegenden Bodenprofilen auf etwa 110 - 120 cm unter GOK angenommen werden können.

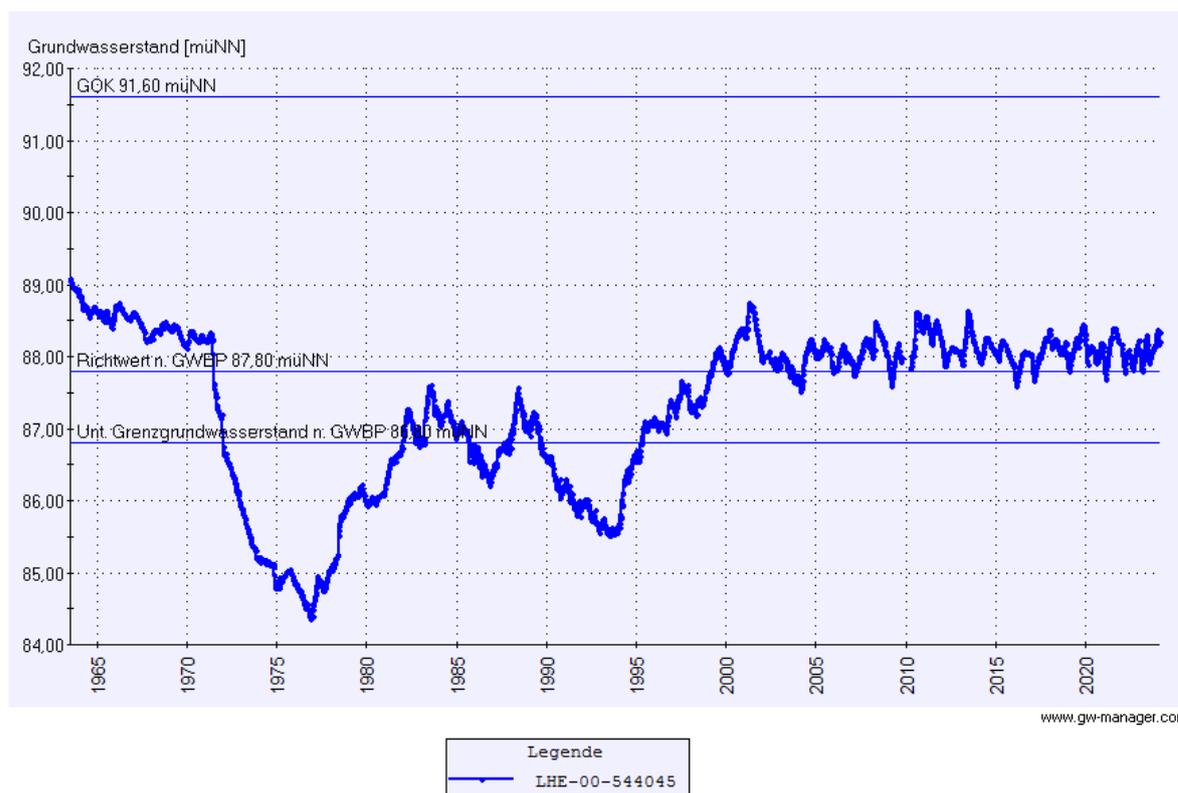


Abbildung 5: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle LHE-00-544045 (GOK: Geländeoberkante; GWBP: Grundwasserbewirtschaftungsplan)

Bei dem auf der Fläche stockenden Bestand handelt sich um einen 110 jährigen Eichenbestand mit untergepflanzter Hainbuche. Vertreten sind Eichen, Hainbuchen, Eschen und Linden (geringes bis starkes Baumholz). Die Bestände sind stark aufgelichtet, lückig und vergrast sowie stark mit Weißdorn durchsetzt. Die Bäume weisen praktisch alle deutlich Zopf- und Kronentrocknis auf. Auf allen Parzellen waren vergleichbare Bestockungsverhältnisse gegeben. Die Standortkartierung weist den Standort als wechsell trocken eutroph aus. Die Stadt Gernsheim hat die Bewirtschaftung der Bestände schon vor längerer Zeit eingestellt. Um Verkehrssicherheit herzustellen, erfolgte aber noch eine Entnahme toter Bäume.

Die Untersuchungsfläche wurden in insgesamt sechs Parzellen (drei Kontrollvarianten, drei Zuwässerungsvarianten) mit einer Größe von jeweils 0,25 ha (50 x 50 m) unterteilt. Zwischen den Parzellen bestand ein Abstand von 20-40 m.

Boden

Auf den Parzellen wurden reliktsch pseudovergleyte Auenpelosole erfasst, die von mit Rheinweißschichten durchsetzten Reliktgleyen aus fluviatil umgelagerten Flugsanden unterlagert sind (Köhler et al., 2023b). Rheinweiß ist die lokale Bezeichnung für pedogene Kalkausfällungen und beschreibt den reliktschen Schwankungsbereich des Grundwassers.

Die Humusform entspricht einem L-Mull, wobei die Humusaufgabe und der Oberboden durch die Aktivität von Wildschweinen häufig durchmischt werden. Über die gesamte Profiltiefe hinweg ist eine deutliche Aktivität von Regenwürmern erkennbar. In den trockenen Rheinweißschichten in größeren Tiefen befinden sich besonders viele Feinwurzeln, wobei das Rheinweiß kein erhebliches Hindernis für die Durchwurzelung darstellt. In den oberen 20 cm der Profile dominieren schluffige Substrate, darunter befindet sich ein extrem toniger Horizont, in dem die gesättigten Wasserleitfähigkeiten der Bodenmatrix extrem geringe Werte annehmen. Der Horizont reicht bis zu einer Tiefe von etwa 70 cm und ist stellenweise mit Kalkkonkretionen durchsetzt. Ab 70 cm Tiefe schließen sich Flugsande mit weiteren Rheinweißbänken an, in denen nur äußerst geringe Tonanteile vorhanden sind (Abbildung 6).

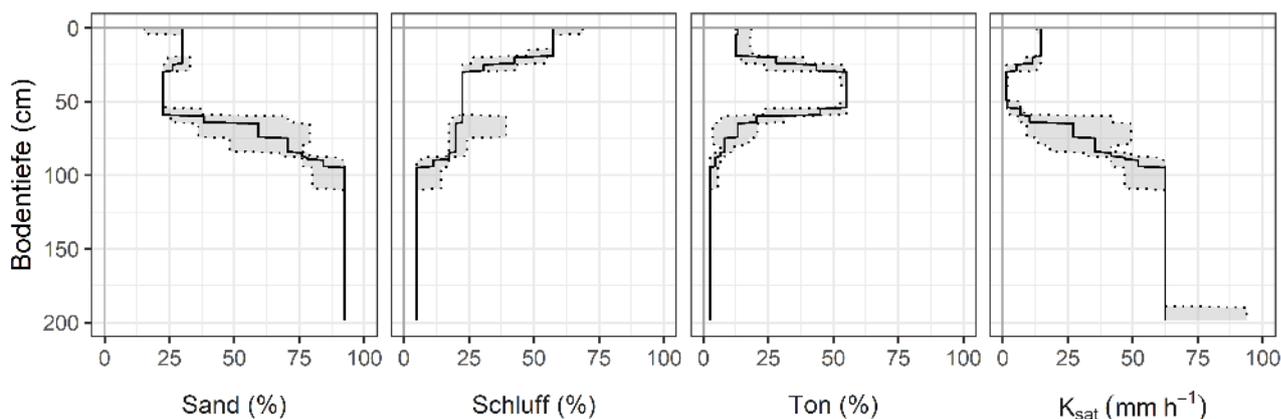


Abbildung 6: Mittlere Tiefenverläufe von Sand, Schluff und Tongehalten (%) sowie gesättigte Leitfähigkeit nach KA5 (mm h^{-1} , AG Boden 2005) der Bodenprofile auf den sechs Untersuchungsparzellen

Bewässerungsanlage

Planung und Bau der Bewässerungsanlage erforderten den Umgang mit mehreren entscheidenden Herausforderungen: Zunächst musste auf die Verlegung von flexiblen PEHD Schläuchen verzichtet werden, weil es bedingt durch die globale Coronapandemie zu Lieferschwierigkeiten und entsprechenden Kostensteigerung der Materialien kam. Daher wurde auf Schnellkupplungsrohre aus verzinktem Stahl zurückgegriffen (Abbildung 7).



Abbildung 7: Anlieferung der Rohre für die Verteilerleitungen und Anordnung der Leitungen

Da die entsprechenden Rohre eine Länge von 6 m aufwiesen und Kupplungen nur sehr kleine Winkel zwischen zwei Rohren erlauben, mussten vor der Rohrverlegung durch ein Forstunternehmen Trassen durch den Unterwuchs geschnitten und Totholz beraumt werden. Ohne die Umstellung auf Stahlrohre wären aber weder der Zeitplan mit einer ersten Bewässerung im Frühjahr 2021 noch der Kostenplan haltbar gewesen.

Des Weiteren lag an den Hydranten des WHR nur ein sehr geringer Wasserdruck an (2-3 bar), was nicht ausreichend ist, um den verlässlichen Einsatz von Sprinklern zu gewährleisten (KTBL, 2014). Der Einsatz einer Boosterpumpe war wegen des sehr hohen finanziellen Aufwandes im Vergleich zu der nur kurzen Einsatzdauern auf den relativ kleinen Flächen nicht wirtschaftlich. In Ermangelung anderer Möglichkeiten wurden die Rohrleitungen mit Bohrungen versehen. Parameter der hydraulischen Dimensionierung umfassten neben Durchmessern, Abstand und Anzahl der Bewässerungsleitung pro Parzelle auch die Anzahl und räumliche Verteilung der Bohrungen, deren Durchmesser und die berechnete Neigung des austretenden Wasserstrahls, die die Strahllänge beeinflusst (Köhler et al., 2023b). Die Bewässerungsparzelle wurden mit zwei unterschiedlichen Layouts der Bewässerungsleitungen ausgestattet, um die verschiedenen Verteilungseigenschaften an der Oberfläche zu testen (Abbildung 8).

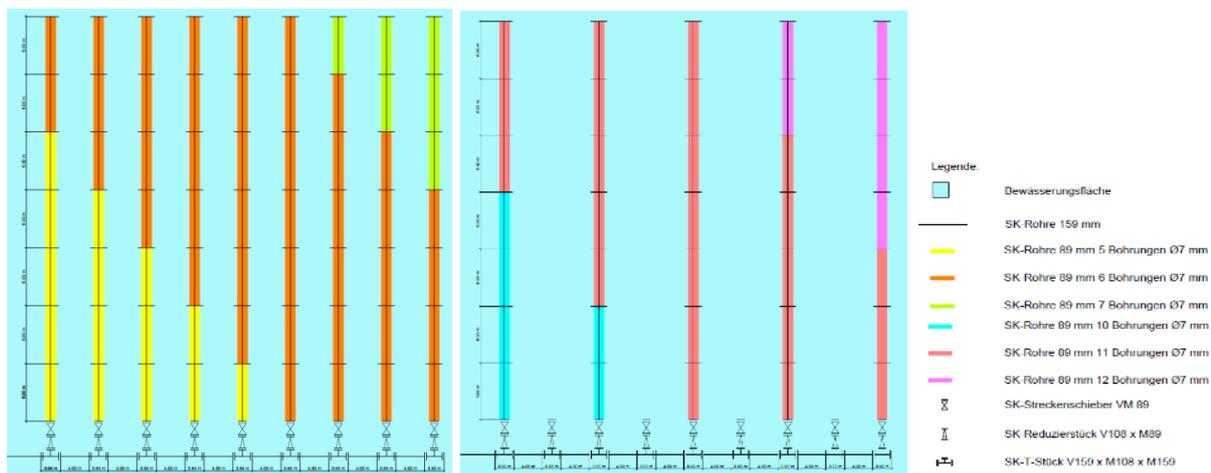


Abbildung 8: Rohrleitungspläne der Parzellen Zu2 (links) sowie Zu4 und Zu5 (rechts)

Parzelle Zu2 erhielt neun Leitungen (jeweils $7 \times 6 \text{ m} = 42 \text{ m}$ lang) mit einem Abstand von 4,64 m zueinander, während Parzelle Zu4 und Zu6 mit jeweils fünf Leitungen mit einem Abstand von 9,30 m zueinander ausgestattet wurden. Die Bewässerungsleitungen wurden entsprechend ihrer Anordnung im hydraulischen System mit Bohrungen in unterschiedlichem Abstand versehen. Es wurden Bohrungen mit einem Durchmesser von 7 mm und einem Austrittswinkel von etwa 15 Grad nach oben für alle Bewässerungsparzelle gewählt. Prinzipiell wurde ein Rohr mit umso mehr Bohrungen ausgestattet, je weiter es vom Zulauf an der Hauptleitung entfernt war. Für Parzelle Zu2 wurde die der Verteilungsleitung nächstgelegene Bewässerungsleitung mit 5 Rohren und jeweils 5 Bohrungen sowie 2 Rohren am Ende mit jeweils 6 Bohrungen ausgestattet, während die entfernteste Leitung 4 Rohre mit 6 Bohrungen und 3 Rohre mit 7 Bohrungen erhielt. Die Parzellen Zu4 und Zu6 wurden gemäß den Berechnungen mit 10 bis 12 Bohrungen pro Rohr ausgestattet (Köhler et al., 2023b). Jede Bewässerungsparzelle kann über Schieber entlang der Hauptleitung einzeln bewässert werden (Abbildung 9).

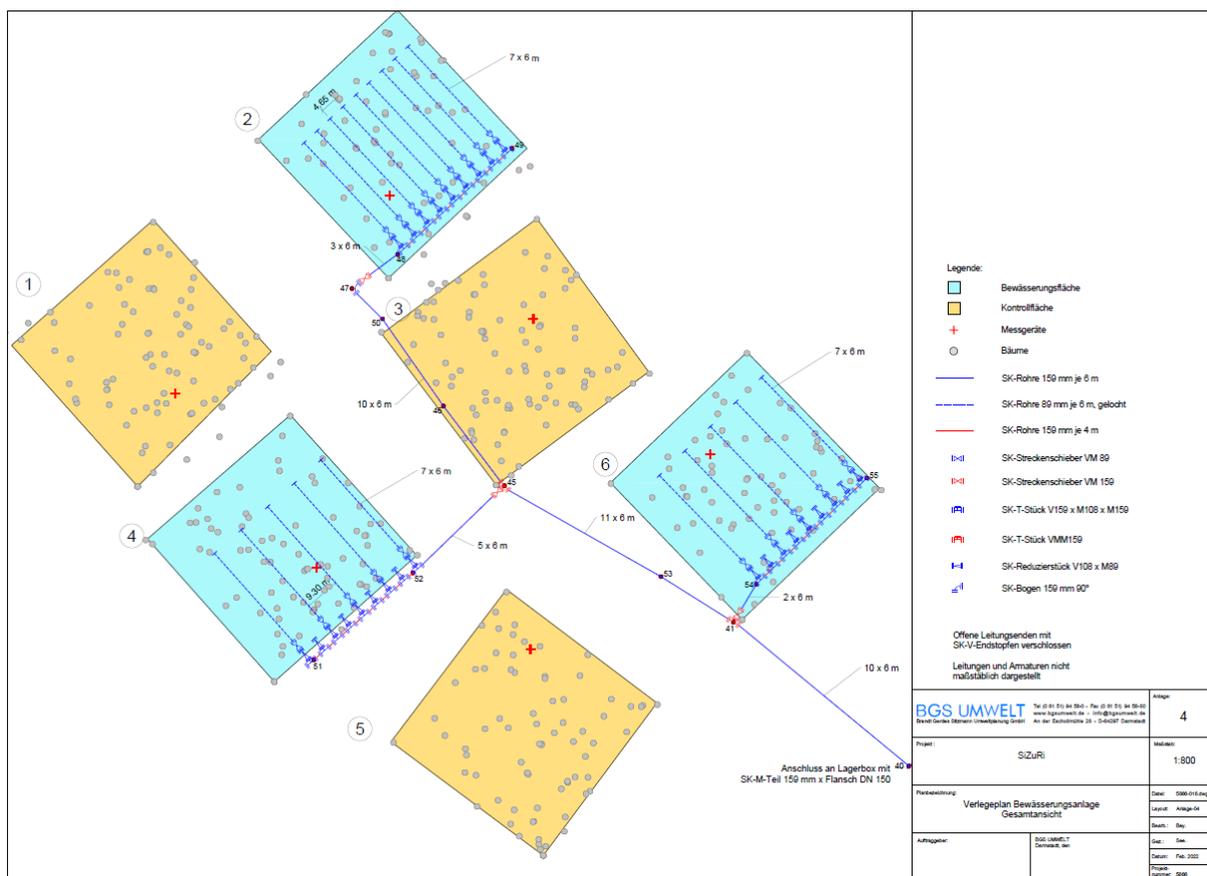


Abbildung 9: Plan der Versuchsanlage. Die Parzellen Zu2, Zu4 und Zu6 sind jeweils mit Bewässerungsleitungen versehen. Zwischen den Parzellen verläuft die Versorgungsleitung. Die Lage von Bodenfeuchtemessorten in den Parzellen ist mit roten Kreuzen gekennzeichnet.

Da in allen Parzellen eine Tonschicht mit sehr geringen gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten festgestellt wurde (je nach Lagerungsdichte für T1 bzw. Tu2 zwischen 1 und 30 mm hr⁻¹), sollte Wasser durch die relativ starken Kapillarkräfte des feinkörnigen Materials zwar rasch infiltrieren, nach Eintritt der Sättigung aber nur langsam weitergeleitet werden. Die im Vergleich zur Wirkung der Schwerkraft sehr starken Kapillarkräfte in Tonböden sollten auch dafür sorgen, dass es zu nennenswerter horizontaler Wasserbewegung in der Tonschicht kommt (Müller und Ebertseder, 2020). Darüber hinaus sollte der sich direkt unter dem sehr feinporigen Ton befindliche grobpore Sand als Kapillarsperre wirken (Stormont und Anderson, 1999). Wenn die Benetzungsfrent eines Infiltrationsereignisses von einer feinkörnigen Bodenschicht zu einer grobkörnigen Bodenschicht übergeht, kann davon ausgegangen werden, dass die Infiltrationsrate zum Zeitpunkt des Eintreffens der Benetzungsfrent an der Schnittstelle der beiden Schichten stark abnimmt, weil die Kapillarkräfte in den größeren Poren im grobkörnigeren Boden weniger stark sind als die in dem überlagernden Material mit kleineren Poren (Mohammadzadeh-Habili und Heidarpour, 2015; Berdouki et al., 2024). Die Horizontabfolge wurde also als besonders günstig für die Erreichung einer homogenen Verteilung des Bewässerungswassers angesehen. Es wurde angenommen, dass es nach anfänglicher Sättigung der Bodenoberfläche mit beginnender Beregnung sehr schnell zu Pfützenbildung und einer starken oberflächigen Ausbreitung des weiteren applizierten Wassers oberhalb der Tonschicht kommen müsse, wenn die Tiefensickerung durch die geringe hydraulische Leitfähigkeit des Tons und den Kapillarsperreneffekt des Sandes verlangsamt wird.

Zunächst erfolgte ein provisorischer Anschluss der Hauptleitungen an einen nahen Hydranten, was Durchflussraten von maximal 100 m³ hr⁻¹ erlaubte. Bezogen auf eine Fläche von 2500 m² ergibt sich unter Annahme von völlig homogener Wasserverteilung eine Applikationsrate von 40 mm hr⁻¹, was deutlich höher ist, als die geschätzte gesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Nach einem Testlauf am 19. Mai 2021 (6 mm Zusatzwasser) wurden eine weitere Bewässerung (31.05.2021-01.06.2021) mit 80 mm Zusatzwasser innerhalb von 2¼ h appliziert, was 200 m³ Wassermenge je Parzelle entsprach. Diese Bewässerungsmenge ist deutlich höher als

gängige Empfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis (Müller und Ebertseder, 2020), erscheint aber durch die große Wurzeltiefe von Bäumen gerechtfertigt. Der Boden war zum Zeitpunkt der Bewässerung praktisch nur oberflächlich leicht ausgetrocknet (Matrixpotenziale in 20 cm Bodentiefe weitgehend < 500 hPa). Zunächst war festzustellen, dass Druck und Durchflussmenge zu gering waren um große Wurfweiten der Wasserstrahlen zu erzielen. So blieben zunächst große Bereiche zwischen den Bewässerungsleitungen unbenetzt. Das Beregnungswasser und damit die oberflächige Befeuchtung konzentrierten sich eher an den Bewässerungsleitungen. Ganz entgegen den ursprünglichen Erwartungen zeigte sich außerdem eine extrem schnelle Infiltration des Wassers und keine nennenswerte horizontale Ausbreitung oder gar Pfützenbildung (Abbildung 10).



Abbildung 10: Oberflächliche Wasserausbreitung und Infiltration 20 min (oben) und 120 min (Mitte) nach Beregnungsstart und etwa 15 Minuten nach der Beregnung (unten) auf Parzelle 6 (5 Bewässerungsleitungen) am 01.06. 2021. Es wurden 80 mm beregnet. Ein ausgeklappter Zollstock senkrecht zur Bewässerungsleitung dient zum Abschätzen der Ausbreitung des Wassers.

Theoretisch sollte die applizierte Wassermenge auf jeder Parzelle ausgereicht haben, um den Oberboden vollständig mit Wasser zu sättigen, wenn keine relevante Tiefensickerung während der Beregnungszeit auftritt. Der Boden hat auf der Fläche einer Parzelle für die Tiefe von 0-30 cm (oberhalb der Tonschicht) basierend auf den Kartierungen und Abschätzungen aus der KA5 (AG Boden, 2005) ein Gesamtporenvolumen von etwa 430 m³. Nimmt man an, dass nur die Luftkapazität und 50% der Feldkapazität dieses Porenvolumens während der Bewässerung als Wasserspeicher dienen konnten, weil der Boden relativ feucht war, verbleiben ~200 m³ Porenraum, was der gesamten Zuwässerungsmenge entspricht.

Ein ausgeprägtes und persistentes Grobporensystem ermöglichte offenbar einen extrem schnellen Transport allen Wassers durch die Tonschicht hindurch in den Unterboden. Besonders ungewöhnlich ist die hohe und sich bis in große Bodentiefen erstreckende Regenwurmaktivität (hoher Kalkgehalt des Bodens), die mit einer flächendeckenden L-Mull Humusform einhergeht. Dies sorgte offenbar für ausgeprägte Grobporen, die das Tonband praktisch flächendeckend perforierten. Regenwürmer sind bekannt dafür, das Infiltrationsvermögen von Böden durch die Erzeugung von Markroporen deutlich anzuheben (Shipitalo und Bayon, 2004). Nach dem Hagen-Poiseuille-Gesetz (Pfitzner, 1976) steigt der Volumendurchfluss durch eine Pore mit der vierten Potenz ihres Radius, große Poren tragen also erheblich zum Volumenfluss bei. Das Wasser wurde demnach sehr schnell vertikal verlagert, bevor es sich wesentlich horizontal ausbreiten konnte. Daher wurden auch die Wurzelsysteme von entfernt von den Leitungen stehenden Bäumen insbesondere auf Zu4 und Zu6 nicht von der Benetzungsfront erreicht. Fast ausschließlich in den zuvor befahrenen Rückegassen auf verdichteten Böden mit wenigen Grobporen kam es dagegen zu Wasserüberstau (Abbildung 11).



Abbildung 11: Überstau in einer Rückegasse auf Parzelle 6 während des Betriebs

Unter der Annahme, dass nur etwa ein Drittel der Gesamtfläche der Parzellen tatsächlich bewässert wurde dann sind auf den benetzten Anteil der Bodenfläche mehr als dreimal so hohe Beregnungsintensitäten (> 120 mm h⁻¹) aufgetreten. Mit diesen Intensitäten sind über 2¼ h Stunden Beregnungsdauer Wassermengen appliziert worden, die sonst eher in der gesamten Vegetationsperiode anfallen (240 mm). Dennoch war selbst in den stark verdichteten Rückegassen alles stehende Wasser etwa einer Stunde nach der Bewässerung vollständig infiltriert.

Während der Bewässerung vom 31.05.2021-01.06.2021 wurden auf jeder Zuwässerungsparzelle jeweils an der ersten (zulaufnah) und letzten Bewässerungsleitung (zulauffern) in Fließrichtung der Hauptleitung in regelmäßigen Abständen von der Hauptleitung bis zum Ende der Bewässerungsleitung Messungen der Durchflussmengen mit Litermaß und Stoppuhr durchgeführt (Abbildung 12). Im Median flossen etwa 254 L h^{-1} durch jede Bohrung, was den am Hydranten ermittelten Flussraten von $91\text{-}95 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, bezogen auf die Anzahl der Bohrungen pro Parzelle (369 Bohrungen bei 9 Lateralen bzw. 385 Bohrungen bei 5 Lateralen), entspricht. An der jeweils zulaufnahen Bewässerungsleitung nimmt die Flussrate mit zunehmender Entfernung von der Hauptleitung ab. Diesem Effekt, der durch Druckverluste entsteht, wird mit einer zunehmenden Zahl von Bohrlöchern mit zunehmender Entfernung von der Hauptleitung entgegengewirkt. An der zulauffernen Bewässerungsleitung war dieser Effekt weniger deutlich. Offenbar findet hier nur noch geringerer Druckabbau statt.

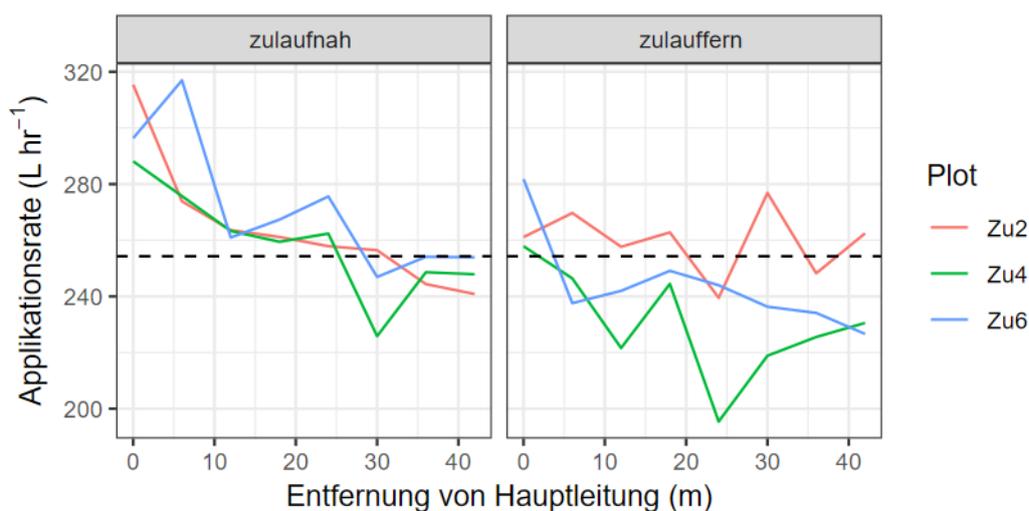


Abbildung 12: Applikationsraten an ausgewählten Punkten der dem Zulauf jeweils nächsten und fernsten Bewässerungsleitung (L hr^{-1}) in Abhängigkeit von der Entfernung zur Hauptleitung an der die Bewässerungsleitungen angekuppelt werden (Zu2; 9 Bewässerungsleitungen, Zu 4 und Zu 6 je 5 Bewässerungsleitungen).

Die teils deutlichen Sprünge in den Messungen lassen sich u.a. durch Messunsicherheiten erklären. Daneben wurden auch Schwankungen der Flussrate am Hydranten beobachtet. Außerdem unterschieden sich die Bohrungen in ihrer Qualität und ihre Lage wurde durch den Verlauf und kleine Drehungen der einzelnen Bewässerungsleitungen beeinflusst. Teilweise hatten so direkt benachbarte Bohrungen erkennbar unterschiedliche Wurfweiten und/oder Flussmengen. Solche systembedingte Inhomogenitäten treten mehr oder weniger stark bei allen Bewässerungssystemen auf (Barker et al., 2024) und müssen unter den hier gegebenen Herausforderungen für das Design akzeptiert werden.

Die inhomogene räumliche Verteilung des Wassers spiegelte sich auch in den oberflächennahen Matrixpotenzialmessungen wieder (Abbildung 13). Die erste Testbewässerung mit 6 mm am 19. Mai 2021 hat sich dort praktisch nicht auf die Messungen ausgewirkt, während ein Freilandniederschlag von 10 mm wenige Tage vorher bei fast allen Messgeräten zu einer Reduktion der Wasserpotenziale geführt hatte. Die zweite, längere Bewässerung Ende Mai (80 mm) erreichte nur zwei Messgeräte, während die starken Niederschläge von etwa 70 mm in wenigen heftigen Ereignissen in den Folgetagen zu einer flächendeckenden Wiederbefeuchtung des Oberbodens führte.

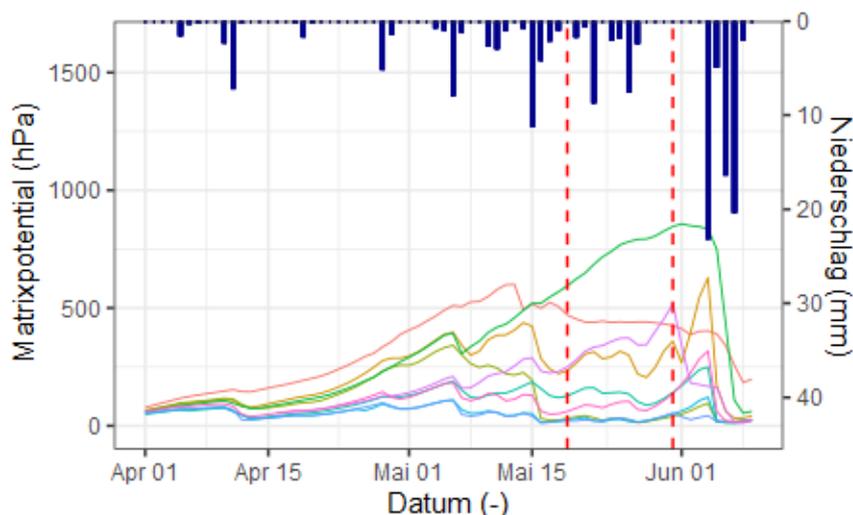


Abbildung 13: Wasserpotenziale in 20 cm Tiefe an je 3 Messstellen pro Zuwässerungsparzelle (farbige Linien) und tägliche Niederschläge (blaue Balken). Die ersten beiden Bewässerungszeitpunkte in 2021 (6 mm und 80 mm) sind durch gestrichelte rote Linien dargestellt.

Die Anzahl der Bewässerungsleitungen pro Parzelle (5 bzw. 9 Bewässerungsleitungen) wirkt sich nicht dahingehend aus, dass mehr Sensoren (auch in anderen Tiefen) auf die Zuwässerung reagierten. In 60cm Bodentiefe wurden während der zwei Beregnungen ebenfalls nur einzelne Tensiometer wiederbefeuchtet (Abbildung 14).

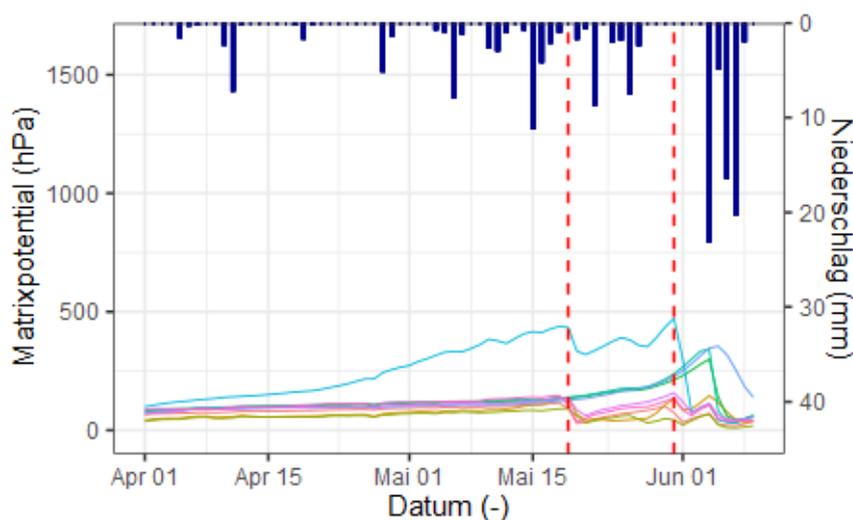


Abbildung 14: Wasserpotenziale in 60 cm Tiefe an je 3 Messstellen pro Zuwässerungsparzelle (farbige Linien) und tägliche Niederschläge (blaue Balken). Die ersten beiden Bewässerungszeitpunkte in 2021 (6 mm und 80 mm) sind durch gestrichelte rote Linien dargestellt.

In zwei weiteren Bewässerungen in 2021 mit 80 und 100 mm zeigten sich ähnliche Ergebnisse. Zur Lösung dieses Problems wurde Ende 2021 ein Direktanschluss des Bewässerungssystems an den Wasseranschluss eines Entleerungsschachtes erstellt, der im Gegensatz zum bisherigen Anschluss an einen Hydranten eine erhöhte Zuwässerungsmenge von bis zu ca. 250 m³ h⁻¹ erlaubt, was einer Beregnungsintensität von ca. 100 mm h⁻¹ unter Annahme homogener Verteilung entspricht.

Anfang April 2022 wurde ein erster Testlauf mit Applikation von etwa 100 mm in 90 min pro Zuwässerungsparzelle durchgeführt. Visuell konnte zunächst eine deutliche Erhöhung der Wurfweite festgestellt werden (Abbildung 15) und auch teilweise deutlicher Überstau, was aber hauptsächlich in der außerordentlich hohen Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Bewässerung begründet war. Ähnliche große Staueffekte ließen sich bei trockeneren Bodenbedingungen und gleicher Bewässerungsintensität im Sommer nicht mehr feststellen.



Abbildung 15: Beregnung im April 2022 mit deutlich höheren Durchflussmengen und damit größeren Wurfweiten

Vor und nach der Bewässerung wurden dabei auf den Parzellen jeweils vier Transekte quer zu den Bewässerungsleitungen begangen, in denen über die gesamte Breite der Parzellen etwa alle 100 cm die oberflächlichen Bodenwassergehalte (0-10 cm Tiefe) mit einem mobilen TDR-Gerät gemessen wurden (etwa 230 Messungen pro Parzelle). Durch die höheren Applikationsraten konnte zunächst rein visuell eine deutlich bessere oberflächliche Wasserverteilung auf den Parzellen erzielt werden, als das noch bei den Bewässerungen in 2021 der Fall war. In allen drei Zuwässerungspartellen waren die Wassergehalte des Oberbodens nach der Bewässerung signifikant erhöht (t-test, $p < 0,01$). In Parzelle 4 fiel der Effekt etwas geringer aus, weil eine sehr dichte Strauchschicht an vielen Stellen eine gute oberflächliche Wasserverteilung erschwerte (Abbildung 16). Die Varianz der Wassergehalte im Oberboden war nach der Bewässerung aber meist höher deutlich als vorher, was darauf hindeutete, dass an einer großen Anzahl Messpunkten kein Wasser angekommen war.

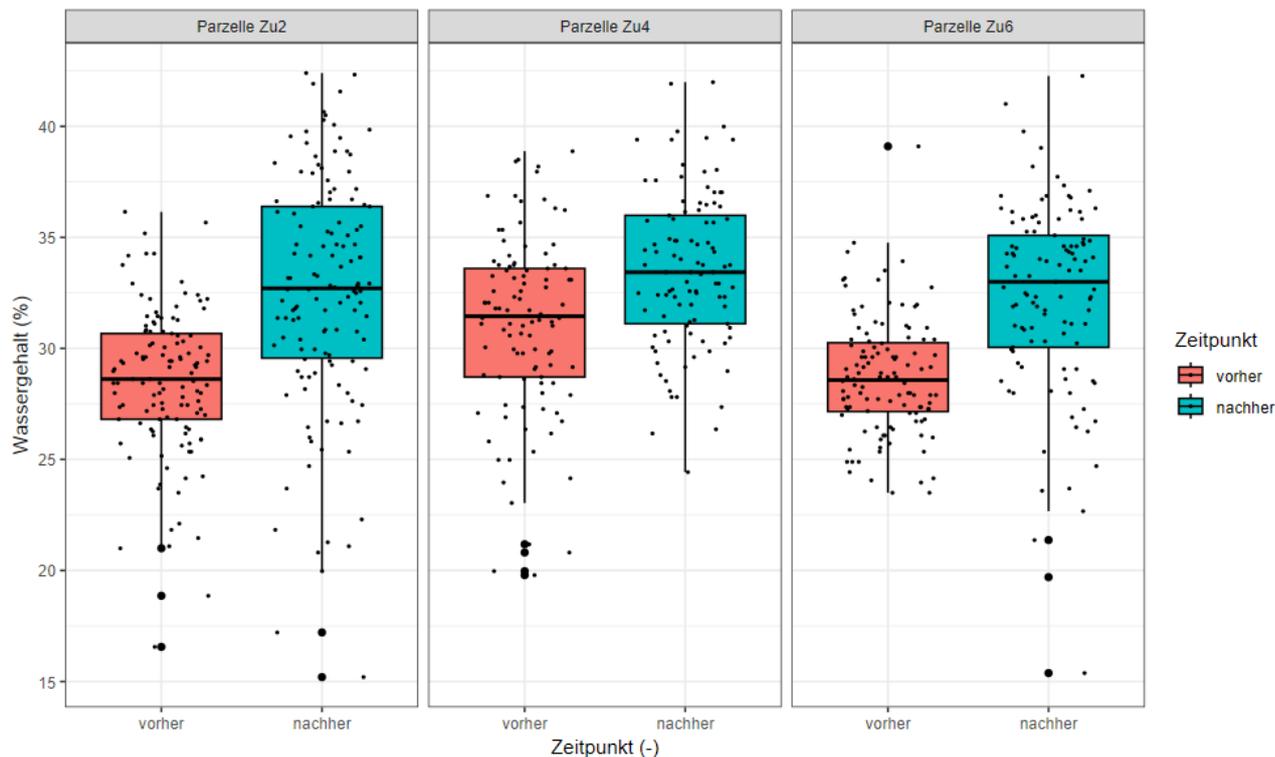


Abbildung 16: Boxplots des Wassergehaltes in 0-10 cm Bodentiefe auf den 3 Zuwässerungspartellen jeweils vor und nach der Beregnung. Einzelne Messpunkte sind als kleine Punkte mit geringfügiger Streuung in x Richtung dargestellt. Extremwerte (IQR>1.5) als fette schwarze Punkte.

Während des Testlaufs wurden auch die Messungen von Wassergehalten und –potenzialen mit den fest in den verschiedenen Bodentiefen installierten Sensoren auf mehr oder weniger abrupte Reaktionen untersucht. Einige Bodenwassergehaltssensoren (SMT 100) besonders in 20 cm und 100 cm Tiefe zeigten während der Bewässerung (ab 11:00 Uhr) deutliche Ausschläge nach oben (Abbildung 17), andere wurden offenbar gar nicht von der Befeuchtungsfront erreicht. Die Wassergehalte in der Tonschicht in 60 cm Tiefe änderten sich deutlich langsamer als in anderen Tiefen, was bei der schon beschriebenen extrem geringen Wasserleitfähigkeit nicht verwunderlich ist. Bei Sommerbewässerungen bei geringeren Bodenfeuchten ist diese Reaktionszeit noch deutlich länger (siehe unten). Nach wie vor ist also offenbar der Makroporenfluss durch die Tonschicht hindurch der dominante Transportweg für Wasser bei beginnendem Überstau. Die häufigen Bewässerungsgänge haben nicht durch Einwaschung von Bodenmaterial zum Verschluss solcher Poren geführt, wie es bei landwirtschaftlichen Böden häufig geschieht. Möglicherweise wird der Makroporenfluss im Sommer noch zusätzlich durch große Schrumpfungsrisse befördert. Die Bodenwassergehalte näherten sich im Verlauf der nächsten Stunden wieder ihrem Ausgangswert an, was daran liegt, dass der Boden zu Versuchsbeginn überall schon Wassergehalte nahe an Feldkapazität aufwies. Ein Stauereffekt der Rheinweißschicht unterhalb der tiefsten Sensoren war auch hier nicht feststellbar.

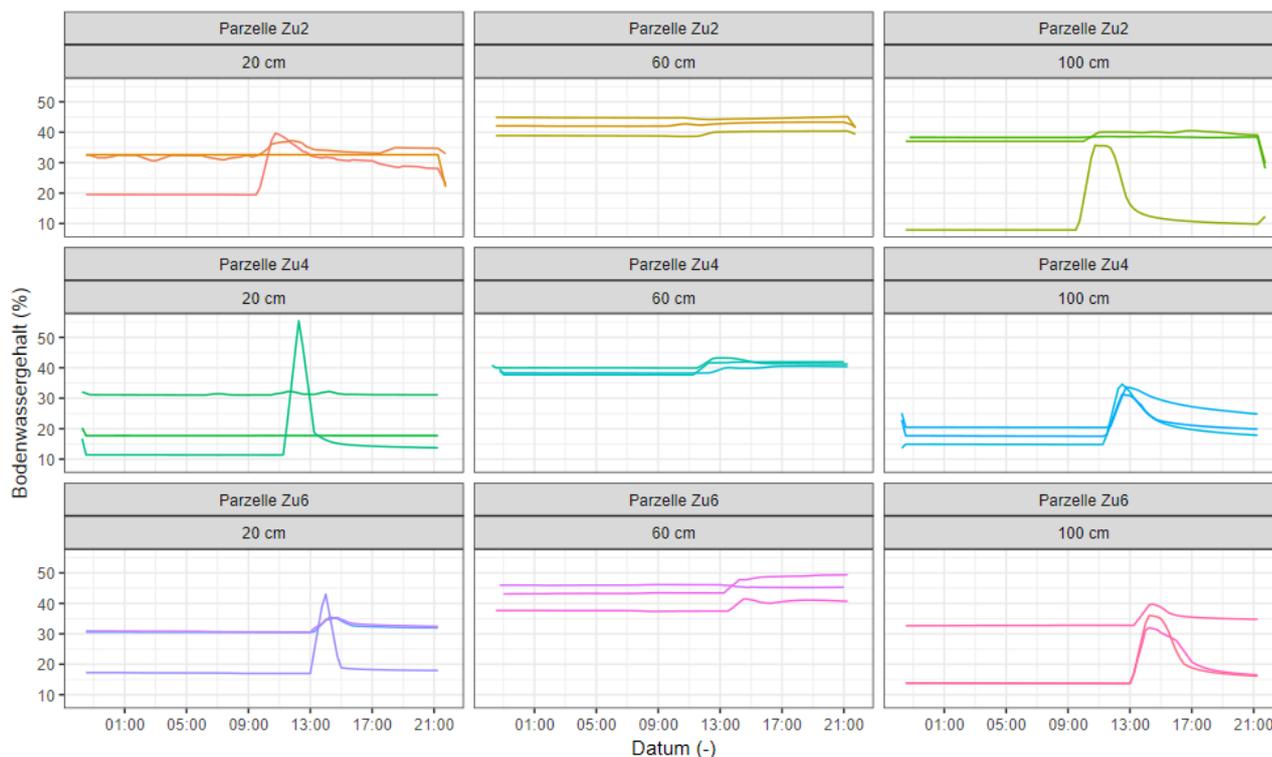


Abbildung 17: Verlauf des Bodenwassergehaltes auf den Zuwässerungspartellen während einer Bewässerung am 5. April 2022 gruppiert nach Bodentiefen (20, 60 und 100 cm) und Parzellennummer; n=3 pro Parzelle und Tiefe

Ein ähnliches Bild (mit umgekehrtem Vorzeichen) wie bei den Bodenwassergehalten zeigt sich auch bei den Wasserpotenzialen: Durch den Wasserüberstau sinken die Potenziale kurzzeitig ab, nähern sich dann aber langsam wieder ihren Ausgangswerten an. Unterhalb von 20 cm Bodentiefe reagieren alle Tensiometer auf die Bewässerung (Abbildung 18). Allerdings muss hier beachtet werden, dass sich zwischen den im Boden eingelassenen Tensiometern und der umgebenen Bodenmatrix trotz sorgfältiger Installation eine zur Atmosphäre hin offene durchgängige Makropore bilden kann, die schneller als der umgebende Boden Wasser vertikal transportieren kann. Eine dauerhaft große Benetzung des oberirdischen Teils des Tensiometerschafts könnte also für schnellen Wassertransport zum Tensiometer sorgen, der dann auch für eine entsprechend schnelle Reaktion des Tensiometers sorgt, ohne dass der Boden in direkter Nachbarschaft wesentlich befeuchtet wird. Dieses Phänomen tritt nicht bei den Wassergehaltsmessungen mit SMT-Sensoren auf, weil diese Messgeräte nicht mit einem starren Schaft, sondern mit einem flexiblen Kabel verbunden sind, das sich besser und dichter in den umgebenden Boden einfügen lässt.

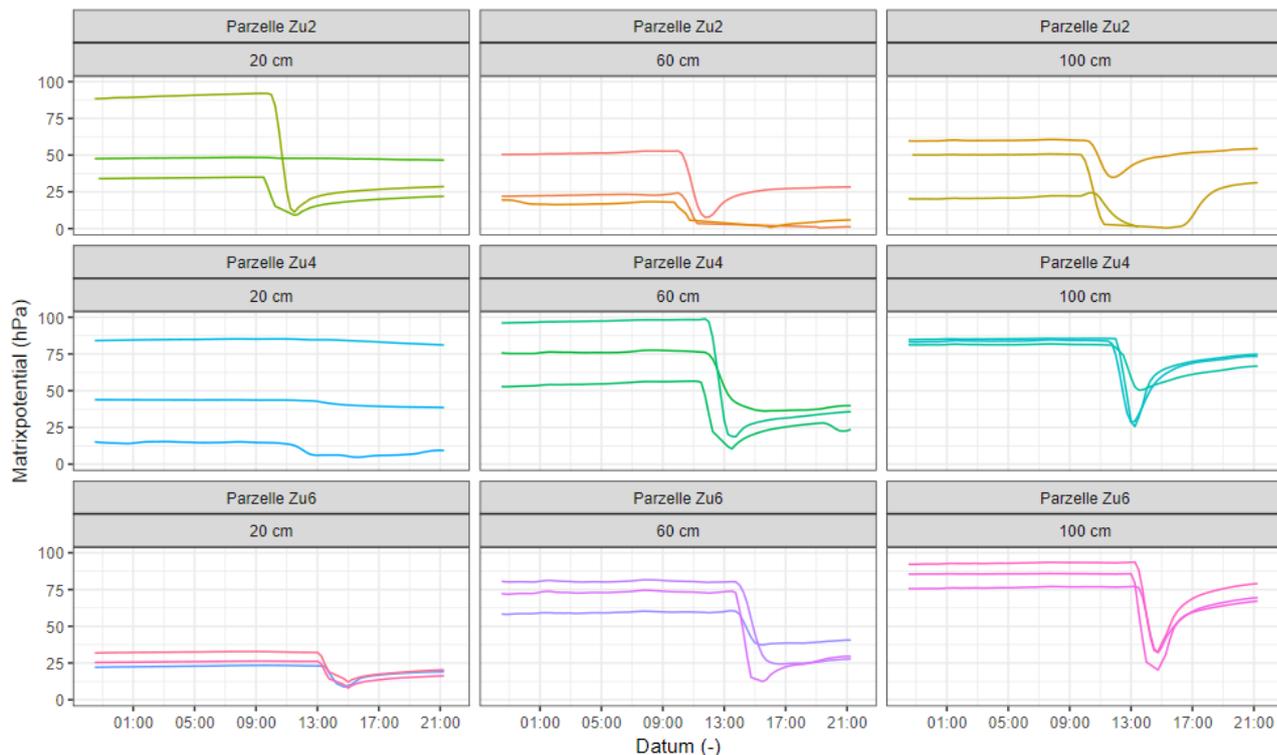


Abbildung 18: Verlauf der Bodenwasserpotenziale auf den Zuwässerungsparzellen während einer Bewässerung am 5. April 2022 gruppiert nach Bodentiefen (20, 60 und 100 cm) und Parzellennummer; n=3 pro Parzelle und Tiefe

Um zu untersuchen, ob die Anzahl der lateralen Bewässerungsleitungen pro Parzelle Einfluss auf die Effektivität der Bewässerung hat, wurden auf Zu2 und Zu6 im Zwischenraum zwischen zwei weit vom Einlass entfernten Bewässerungsleitungen oberflächliche Wassergehaltsmessungen mit einem mobilen TDR-Sensor vor und direkt nach einer weiteren Beregnung vorgenommen. Parzelle Zu2 verfügt über neun, Parzelle Zu6 nur über fünf Bewässerungsleitungen. Auf Parzelle Zu2 wurden drei parallele Transekte zwischen zwei Bewässerungsleitungen begangen, auf Parzelle Zu6 wegen des größeren Rohrabstandes vier. Entlang dieser Transekte wurde ebenfalls alle 100 cm der Bodenwassergehalt in den obersten 10 cm gemessen (44 - 45 Messungen pro Transekt). Bei den Messungen wurde darauf geachtet, vor und nach der Bewässerung möglichst an der gleichen Stellen zu messen, weshalb Maßbänder entlang der Transekte ausgelegt wurden. Basierend auf Testmessungen wurden dann Messstellen mit Wassergehaltsunterschieden > 8% als „durch eine Bewässerung oberflächlich benetzt“ gewertet. Dieses Kriterium erfüllten 46% der Messstellen der Parzelle Zu2, und etwa 60% der Parzelle Zu6 (Abbildung 19). Die Zahl der Bewässerungsleitungen ist also offenbar weniger erheblich für eine ausreichende Benetzung. Vielmehr deutet sich an, dass die Dichte der Bodenvegetation eine bedeutende Wirkung hat.

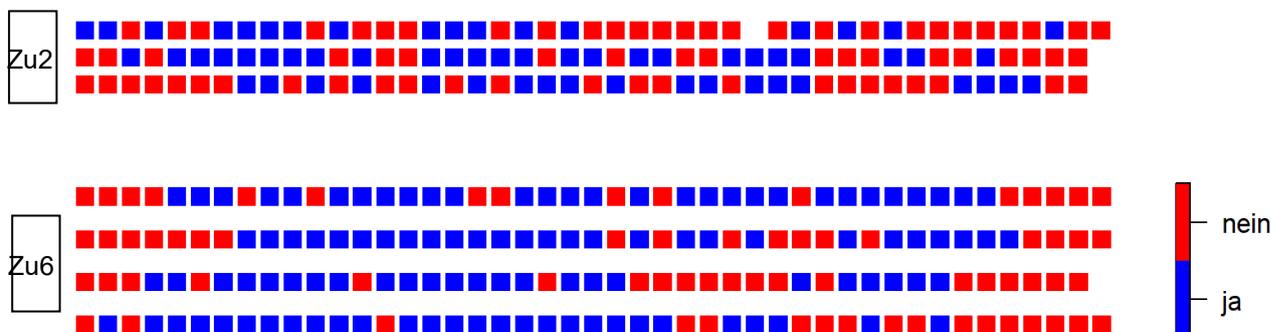


Abbildung 19: Benetzte (blau) und unbenetzte Messstellen (rot) zwischen je zwei lateralen Bewässerungsleitungen auf Parzellen Zu2 und Zu6

Die Ergebnisse deuten aber auch darauf hin, dass bei mangelnder horizontaler Verteilung des Wassers in tieferen Bodenschichten etwa 30-50% des Bodenwasserspeichers der Parzellen nicht für die Wasserspeicherung genutzt werden können. Das heißt, dass die applizierten Mengen dort, wo sie in den Boden infiltrieren, bis zu doppelt so hoch wie bei homogener Verteilung sind. An benetzten Stellen könnte also unter Umständen sehr viel Wasser als Tiefensickerung verloren gehen, wenn dort die Beregnungsmenge den aktuell freien Raum der nutzbaren Feldkapazität überschreitet.

Betrieblicher Aufwand bei Umbauten der Bewässerungsanlage

Im Hinblick auf die Bewertung unterschiedlicher Strategien für die Etablierung vergleichbarer Anlagen an anderer Stelle, bzw. für einen Umzug der Anlage im Sinne einer „wandernden“ Bewässerung jeweils besonders relevanter Waldflächen wurde Ende des Jahres 2022 am 09.12.2022 ein Umbau der Bewässerungsanlage durch BGS UMWELT vorgenommen, der nachfolgend beschrieben wird.

Die drei Versuchspartellen mit Bewässerung (Zu2, Zu4 und Zu6) verfügen jeweils über 9 Anschlüsse an die Verteilerleitung. Hierbei sind an die Parzelle Zu2 tatsächlich 9 gelochte Bewässerungsleitungen angeschlossen, während an die Verteilerleitung der Parzellen Zu4 und Zu6 nur jeweils 5 Leitungen mit größerem Abstand und anderer Lochung installiert sind. Diese Gegebenheit wurde genutzt, um versuchsweise einen Rohrstrang, der aus 7 Schnellkupplungsrohren aus verzinktem Stahl (Durchmesser 89 mm, Länge 6 m, Gewicht ca. 15 kg) besteht, vollständig ab- und wieder an anderer Stelle aufzubauen. Abgebaut wurde ein Rohrstrang auf Parzelle Zu6 und angeschlossen wurde der Strang auf Parzelle Zu4. Der Umbau wurde mit Fotos dokumentiert und die benötigte Zeit gemessen. Aus den Erfahrungen lässt sich der Arbeitsaufwand auch für den Umbau mehrerer Rohrstränge abschätzen. Die Veränderungen an der Anlage wurden anschließend wieder zurückgebaut. Aufgrund von Veränderungen in der Vegetation (zunehmende Überwachsung der Rohre) sowie Baumstürzen sind einige Rohrstränge nur schwer zugänglich (Abbildung 20).



Abbildung 20: Umgestürzter Baum über Rohrstrang auf Parzelle Zu6

Da in dem Versuch keine Freischneidarbeiten vorgesehen waren, wurde auf der Parzelle Zu6 der Rohrstrang mit dem geringsten Bewuchs für den Umbau ausgewählt. Dieser konnte leicht mit Hand von der vorhandenen Vegetation befreit werden (Abbildung 21).



Abbildung 21: Für den Versuch ausgewählter Rohrstrang auf Parzelle Zu6

Analog hierzu wurde auf der Parzelle Zu4 ein Anschluss gewählt, an dem ein Verlegen des Rohrstranges ohne zusätzliche Freischneide- oder Fällarbeiten möglich war. Dennoch wurde der Anschluss durch die hier vorhandene Vegetation deutlich erschwert. Für zukünftige Planungen bzw. Umbauten ist ein vorhergehendes Freischneiden der Leitungstrassen, wie bei der Herstellung der Bewässerungsanlage durchgeführt, zu berücksichtigen. Der Zeitaufwand kann hierbei auf ca. 1 bis 2 Stunden je Leitungsstrang für zwei Personen geschätzt werden (Freischneiden mit Motorsense und Fällarbeiten sowie Beseitigung von Totholzhindernissen mit Motorsäge).

Für den Umbau wurden die Kupplungen an dem vorhandenen Rohrstrang der Parzelle Zu6 gelöst (Abbildung 22) und die einzelnen Rohre zu Fuß zu dem freien Anschluss an Parzelle Zu4 transportiert (Entfernung ca. 200 m Fußweg über unbefestigten Waldboden).



Abbildung 22: Abgebaute Bewässerungsrohre (in dem Bild sind 6 von insgesamt 7 Rohren dargestellt)

Anschließend wurden die Rohre in korrekter Reihenfolge an dem freien Anschluss miteinander verkuppelt (Abbildung 23).



Abbildung 23: Verlegung der Bewässerungsröhre in vorhandener Vegetation auf der Parzelle Zu4

Der benötigte Arbeitsaufwand betrug für zwei Personen ca. zwei Stunden. Der Rohrstrang wurde anschließend wieder zurückgebaut.

Für den Umbau eines Rohrstranges kann bei einem Einsatz von zwei Personen inklusive Freischneidarbeiten der Arbeitsaufwand auf ca. drei Stunden geschätzt werden. Für eine Erweiterung der Bewässerung einer Parzelle (Aufstockung von 5 auf 9 Rohrstränge durch vorherigen Abbau an einer anderen Parzelle) kann entsprechend von einem Arbeitsaufwand von 12 Stunden (1,5 Arbeitstage) für zwei Personen ausgegangen werden.

Nachteilig wirkt sich aber aus, dass nicht nur für das Verlegen der Versorgungsleitung Unterwuchs sowie liegendes Totholz im Bestand beseitigt werden muss, sondern nun auch für die starren Versickerungsleitungen direkt auf den Parzellen. Flexible Rohre hätten einfach über Hindernisse hinweg verlegt werden können. Somit ist auch eine versuchsweise Verlegung des Bewässerungsfeldes in einen anderen Waldbestand kaum ohne massive Eingriffe in die dortige Vegetation zu bewerkstelligen.

Witterung und Bewässerung

Im Vergleich zu den langjährigen Perzentilen der kumulativen Grasreferenzverdunstung (Allen et al., 1998), ein Maß für den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, kann das erste Jahr der Untersuchungen (2021) als durchschnittlich gelten. Das Jahr 2022 war dagegen vor allem im Sommer von sehr hohen Temperaturen und einem extremen Strahlungsangebot geprägt. Laut DWD war der Sommer 2022 in Hessen der trockenste und sonnenscheinreichste Sommer seit Beginn der jeweiligen Messungen (Imbery et al., 2022). Die kumulative Grasreferenzverdunstung lag bis Mitte Juni meist im Bereich des 95. Perzentils und danach für den Rest des Jahres deutlich darüber (rote Linie in Abbildung 24). Das bedeutet, dass die Wälder im Projektgebiet seit mindestens 1961 einschließlich der bisherigen Extremjahre 2018 bis 2020 nicht mehr mit einem derartigen Verdunstungsanspruch konfrontiert waren wie im Jahr 2022.

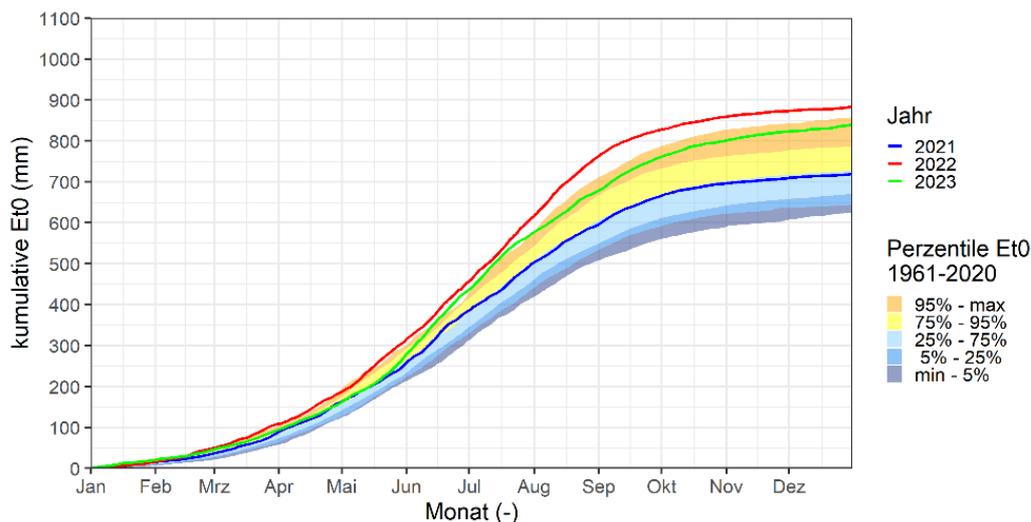


Abbildung 24: Perzentile der kumulativen Grasreferenzverdunstung (Daten aus Interpolation umliegender Stationen des DWD von 1960-2020) und Werte für die Jahre 2021-2023 (blaue, rote und grüne Linien)

Der berechnete Verdunstungsanspruch im Jahr 2023 überschritt während des Sommers zwar ebenfalls die bisherigen Maxima, lag aber gegen Ende des Jahres wieder im Extrembereich zwischen dem 95% Perzentil und dem bisherigen Maximum.

Der dem kumulativen Verdunstungsbedarf gegenüberstehende kumulative Niederschlag lag in 2021 ebenfalls im Durchschnitt der langjährigen Werte, wenngleich besonders das Frühjahr eher trocken war (Abbildung 25). Das Jahr 2022 war ebenfalls von geringen Frühjahrsniederschlägen aber auch von einem extrem regenarmen Sommer geprägt. Das Jahr 2023 war im Frühsommer sehr trocken, ab August fielen aber wieder reichlichere Niederschläge.

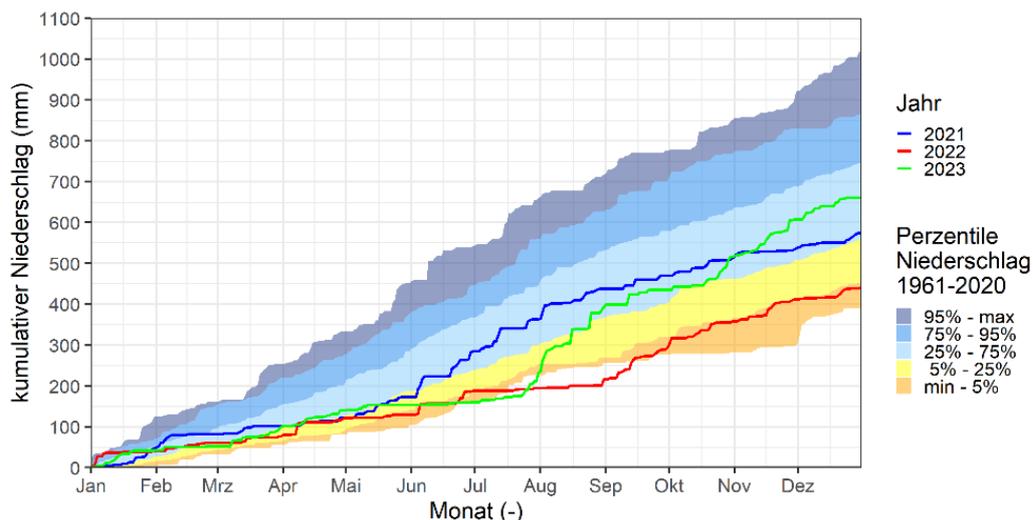


Abbildung 25: Perzentile der kumulativen Niederschläge (Daten aus Interpolation umliegender Stationen des DWD von 1960-2020) und Messwerte für die Jahre 2021-2023 (blaue, rote und grüne Linien)

In allen drei Jahren der Projektlaufzeit wurden Bewässerungsmengen verabreicht, die in Summe mit dem natürlichen Niederschlag im Vergleich zu langjährigen Niederschlagsmengen zu insgesamt feuchten bis sehr feuchten Jahren führten (Abbildung 26).

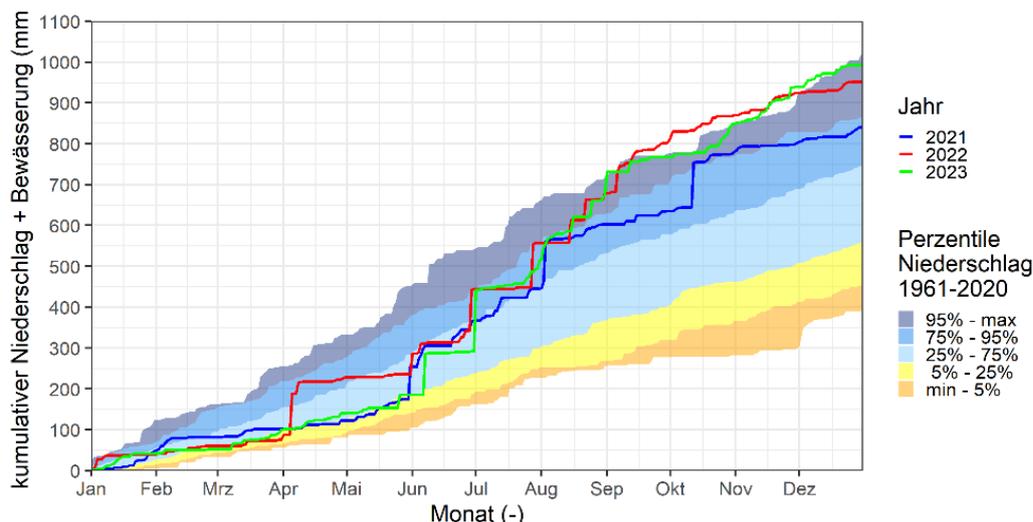


Abbildung 26: Perzentile der täglichen Niederschläge (Daten aus Interpolation umliegender Stationen des DWD von 1960-2020) und kumulative Summen der gemessenen Niederschläge und der Bewässerungsmengen für die Jahre 2021-2023 (blaue, rote und grüne Linien)

Der Freilandniederschlag reduziert sich im Mittel der Bestandesniederschlagssammler auf allen Parzellen im Sommer um etwa 20-30% durch Interzeption und darauf folgenden Evaporation von Blatt- und Rindenoberflächen (Tabelle 1). Wegen fehlender Blätter ist die interzeptierte Menge im Winter mit etwa 10-20% etwas geringer. Da das Beregnungswasser unterhalb der Baumschicht appliziert wird, entsteht hier kein Interzeptionsverlust.

Tabelle 1: Niederschläge, Bestandesniederschläge und Bewässerungsmengen auf den Parzellen in den einzelnen Jahren

<u>Jahr</u>	<u>Niederschlag</u>	<u>Bestandesniederschlag</u>	<u>Bewässerung</u>
(-)	(mm)	(mm)	(mm)
2021	574	480	266
2022	439	375	513
2023	661	564	332

Zu beachten ist, dass die Bestandesniederschlagssammler in 1 m Höhe über dem Boden angebracht sind und daher nur geeignet sind, die Interzeptionsverluste oberhalb dieser Höhe zu bestimmen. Allerdings entstehen

weitere Interzeptionsverluste sowohl des Niederschlags als auch des Beregnungswassers durch die dichte Bodenvegetation in den verbuschten und vergrasteten Beständen, die aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht ermittelt werden konnten. Zusammengenommen kann also davon ausgegangen werden, dass die Summe aus Bestandesniederschlag und Bewässerung in jedem der drei Jahre deutlich über den feuchtesten Jahren seit 1960 lag. Diese Mengen waren aber wiederum durch die Inhomogenitäten bei der Wasserverteilung nicht automatisch auch flächendeckend pflanzenverfügbar. Es kann eher davon ausgegangen werden, dass einerseits große Bereiche der Parzellen unbewässert blieben, während andere Teile überbewässert wurden und Wasser als Tiefensickerung die durchwurzelte Bodenzone verließ.

Die Bewässerungen im Jahr 2021 und zu Beginn von 2022 dienten hauptsächlich dem Zweck, die Anlage bzw. die Verbesserung der Anlage durch den veränderten Anschluss der Hauptleitung zu überprüfen und die Reaktionen der Messgeräte auf eine Bewässerung zu untersuchen. Der relativ feuchte Sommer 2021 machte weitere Bewässerungen überflüssig (Abbildung 27). In 2022 musste dagegen von April bis September (mit bis zu 150 mm im Juni) bewässert werden. In 2023 entspannte sich die fröhsommerliche Trockenheit nach hohen Niederschlägen ab Ende Juli.

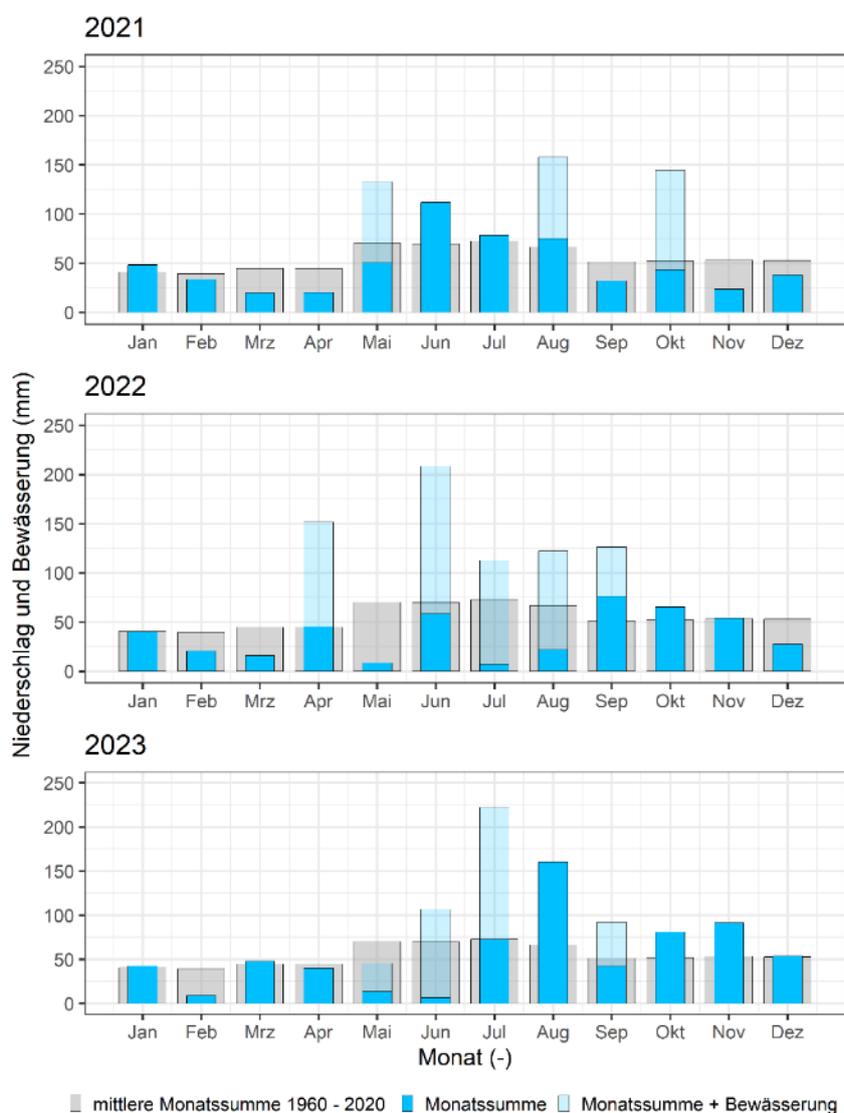


Abbildung 27: Monatsniederschläge und Bewässerung (graue Balken: Daten aus Interpolation umliegender Stationen des DWD von 1960-2020; blaue Balken: gemessene Monatsniederschläge in 2021-2023, hellblaue Balken: gemessene Monatsniederschläge + Bewässerungsmenge in 2021-2023)

Die Bewässerungssteuerung über Bodenwassergehaltmessungen erwies sich als schwierig, weil nicht alle Sensoren von der Feuchtefront erfasst wurden bzw. weil je nach Vorfeuchte des Bodens besonders intensive Bewässerungen nötig waren, damit einzelne Sensoren überhaupt von der Feuchtefront erreicht wurden. Im

Experiment war etwa während der Sommerbewässerungen bei vielen Sensoren besonders im Oberboden (20 cm) kein wesentlicher Anstieg der Wassergehalte zu erkennen (Abbildung 28). Tiefer eingebaute Sensoren reagierten oft mit einer deutlichen Verzögerung auf die Bewässerung. Die Verzögerung fällt bei geringen Bodenfeuchten deutlicher aus als bei höheren Bodenfeuchten zu Bewässerungsbeginn bzw. als bei starken Niederschlägen. Oft erreichten die Anstiege der Wassergehalte trotz der großen applizierten Mengen auch nicht die Maximalwerte des vorausgegangenen Winters. Insofern ist davon auszugehen, dass der Bodenwasserspeicher im Oberboden auf den Bewässerungspartelle aufgrund großer Heterogenität nicht adequat bestimmt werden kann.

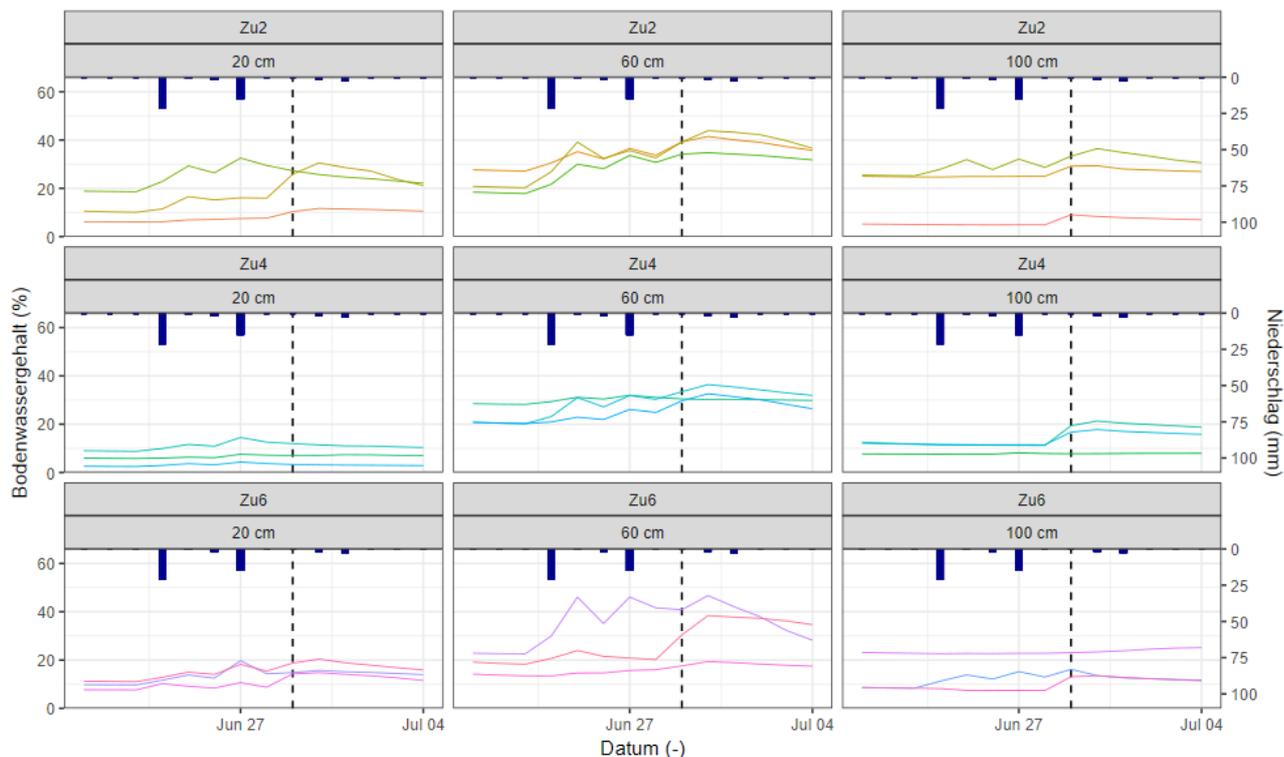


Abbildung 28: Bodenwassergehalte auf den Versuchspartellen von Ende Juni 2022 während einer Bewässerung mit 100 mm gruppiert nach Bodentiefen (20, 60 und 100 cm, n=3 pro Tiefe). Blaue Balken stellen die täglichen Niederschlagsmengen dar, die gestrichelte Linie den Zeitpunkt der Bewässerung.

Die applizierten Wassermengen wurden daher grob anhand der mittleren monatlichen Niederschläge und einem Aufschlag für die sommerliche Bodenwasserspeichernutzung geschätzt. Auch sollten sehr häufige Bewässerungen mit kleinen Mengen möglichst vermieden werden, um den Betreuungsaufwand gering zu halten und möglichst wenig Einfluss auf den Unterwuchs der Bestände auszuüben.

Wie oben erwähnt wurden bei einzelnen Bewässerungen bis zu 100 mm innerhalb einer Stunde verabreicht. Diese Zahlen lassen sich vielleicht besser einordnen, wenn man berücksichtigt, dass vergleichbare Niederschlagsmengen über einen deutlich längeren Zeitraum von 15-18 Stunden zu dem katastrophalen Hochwasser in Mitteleuropa vom Juli 2021 mit mehr als 170 Toten geführt haben (Schäfer et al., 2021). Insofern konterkariert die Notwendigkeit, große Mengen in kurzer Zeit zu applizieren, damit die Bewässerung überhaupt „messbar“ ist und damit auch die Wurzelsysteme von weiter von den Bewässerungsleitungen entfernten Bäumen erreicht werden, das Ziel einer möglichst wassersparenden Bewässerung.

Die Zeitpunkte zu denen bewässert wurde wurden mithilfe der Tensiometermessungen abgeschätzt. Tensiometer im Oberboden (20 cm) waren dafür aufgrund der oben geschilderten Problematik ungeeignet. Abgesehen von den sehr häufigen technischen Defekten lieferten die meisten Tensiometer in 100 cm Tiefe verlässliche Bodenwasserpotenzialmessungen, die auch nach Bewässerung deutlichere Reaktionen auf die Befeuchtung zeigten. Darüber hinaus haben Tensiometer den Vorteil, dass sie direkte Aussagen über die Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers unabhängig von der Bodenart und ohne Kenntnis der

Wasserspannungskurven ermöglichen. Es wurde immer dann eine Bewässerung geplant, wenn die Wasserpotenziale dieser Sensoren Werte über 50 kPa erreichten. Solche Faustzahlen für die Praxis sind aus der Bewässerungssteuerung allgemein bekannt (Beispielhaft: Anonymous 2015; Alam und Rogers 1997).

Bodenwasserhaushalt

Insgesamt konnten in allen drei Vegetationsperioden des Untersuchungszeitraums deutliche Abnahmen der Bodenwassergehalte festgestellt werden. Die Vegetationsperiode 2022 weist dabei im Mittel die stärkste Austrocknung und die längste Dauer der Bodentrockenheit auf (Abbildung 29). Während die Bäume in den Kontrollparzellen in 2021 gelegentlich von Regenereignissen profitierten, die zu nennenswerter Infiltration bis in 60 cm Bodentiefe führten, hatte nur ein Ereignis in 2022 eine solche Qualität.

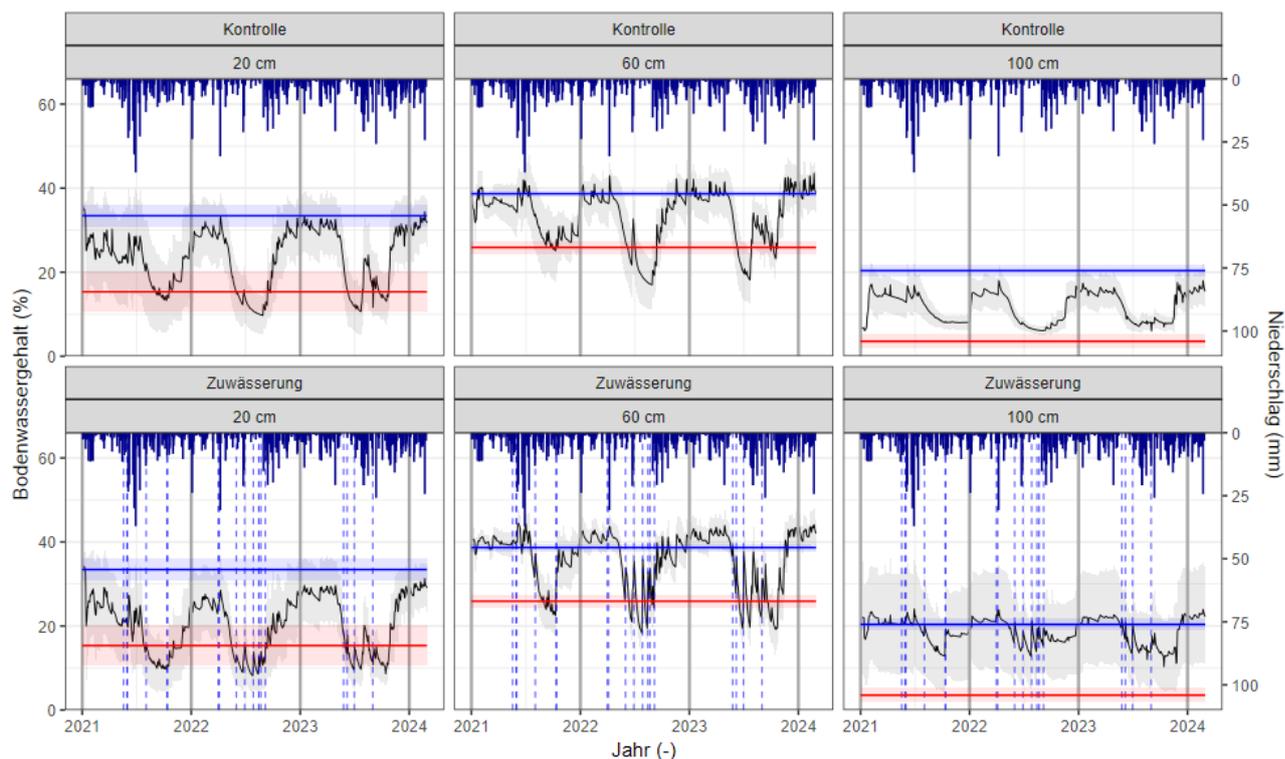


Abbildung 29: Mittelwerte und Standardabweichungen (graue Schattierung) der Bodenwassergehalte auf den Versuchspartellen gruppiert nach Bodentiefen (20, 60 und 100 cm) und Varianten (Kontrolle und Zuwässerung; n=9 pro Behandlung und Tiefe). Blaue Balken stellen die täglichen Niederschlagsmengen dar, gestrichelte blaue Linien die Zeitpunkte der Bewässerungen. Die aus den gemessenen Wasserspannungskurven ermittelten Werte für FK (blau) und PWP (rot) sowie deren Standardabweichungen wurden als horizontale Linien/Schattierungen dargestellt.

Nach jedem Anstieg der Wassergehalte infolge von Zuwässerung erfolgte eine sehr schnelle Abnahme der Bodenfeuchte was auf eine sehr intensive Wassernutzung durch die Bäume schließen lässt.

Grundwasserstände

An allen umliegenden Grundwassermessstellen war ein witterungsbedingter Jahresgang zu beobachten. Allerdings sind natürliche Fluktuationen der Grundwasserstände hier immer von der Wirkung der umliegenden Infiltrationsanlagen überprägt (Abbildung 30). Hier ist die Amplitude der Ganglinie gedämpft, die Grundwasserstände schwanken auf einem vergleichsweise stabilen Niveau etwas oberhalb des Richtwertes des Grundwasserbewirtschaftungsplans. Während der Versuchsdauer lagen die Flurabstände durchweg im Bereich von 3,00 bis 4,00 m unter GOK. Neben den Einflussgrößen der Entnahmen und Infiltration sowie der Wechselwirkung zum Winkelbach sind erwartungsgemäß keine Anzeichen erkennbar, die auf eine verstärkte Grundwasserneubildung durch die Bewässerung der Versuchsfläche hindeuten würden.

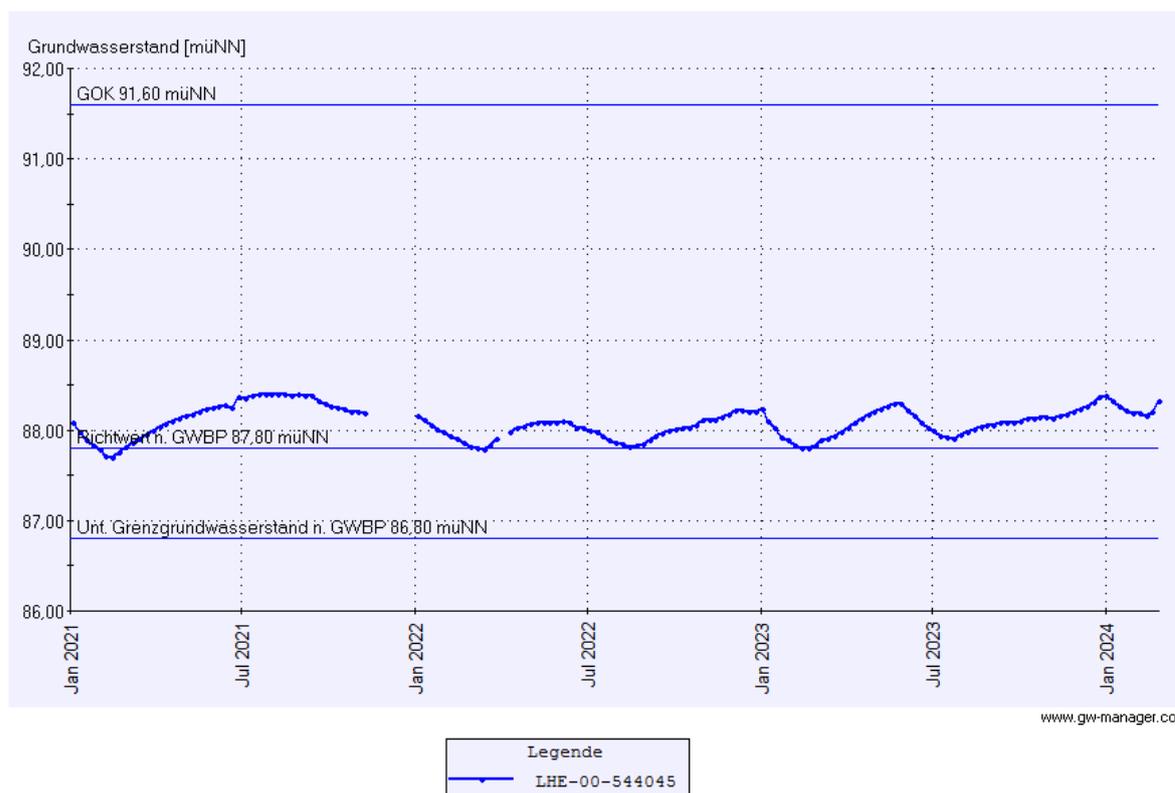


Abbildung 30: Grundwasserstandsganglinie der Messstelle 544 045 ab Januar 2021

Monitoring von Zuwässerungseffekten

In allen drei Versuchsjahren wurde in Zusammenarbeit mit dem Sachgebiet Wald- und Bodenzustand der NW-FVA der Kronenzustand aller vorherrschenden, herrschenden und mitherrschenden Bäume nach dem Verfahren der Waldzustandserhebung (WZE) beurteilt (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2023). Die Aufnahmen erfolgten jeweils im Sommer (zwischen dem 15. Juli und dem 16. August). Die WZE soll prinzipiell Auskunft über die langfristige Entwicklung des Kronenzustandes geben, wird aber natürlich auch von jahresaktuellen Witterungseinflüssen beeinflusst. Gleichzeitig sind aber auch zeitverzögerte Reaktionen auf Witterungsereignisse wie die extreme Dürre in 2022 zu erwarten. Die Auswertung erfolgte für die Hauptbaumarten Stieleiche und Hainbuche. Es ist zu berücksichtigen, dass sämtliche Bäume schon zu Versuchsbeginn deutliche Schäden aufwiesen. Die WZE kann akute Schäden in einzelnen Jahren nur dokumentieren, wenn diese bis zum Aufnahmetermin eingetreten sind. Sie ist daher eher geeignet, um Aussagen über den langfristigen Gesundheitszustand von Bäumen zu treffen. Die recht hohen Battverluste in 2021 für beide Baumarten auf beiden Untersuchungsvarianten (Abbildung 31) sind also Nachwirkungen der Dürren von 2018 bis 2020 und zeigen sich genauso auch in den WZE Ergebnissen für Wald in der Rhein-Main-Ebene. Die mittlere Kronenverlichtung älterer Eichen betrug hier von 2019 bis 2023 45 - 48% während sie im restlichen Hessen um etwa 20 Prozentpunkte niedriger lag (Paar und Klinck, 2023). Ganz ähnlich stellten sich die Ergebnisse auch für alle anderen Baumarten dar (Hainbuchen werden in WZE Berichten nicht separat ausgewertet).

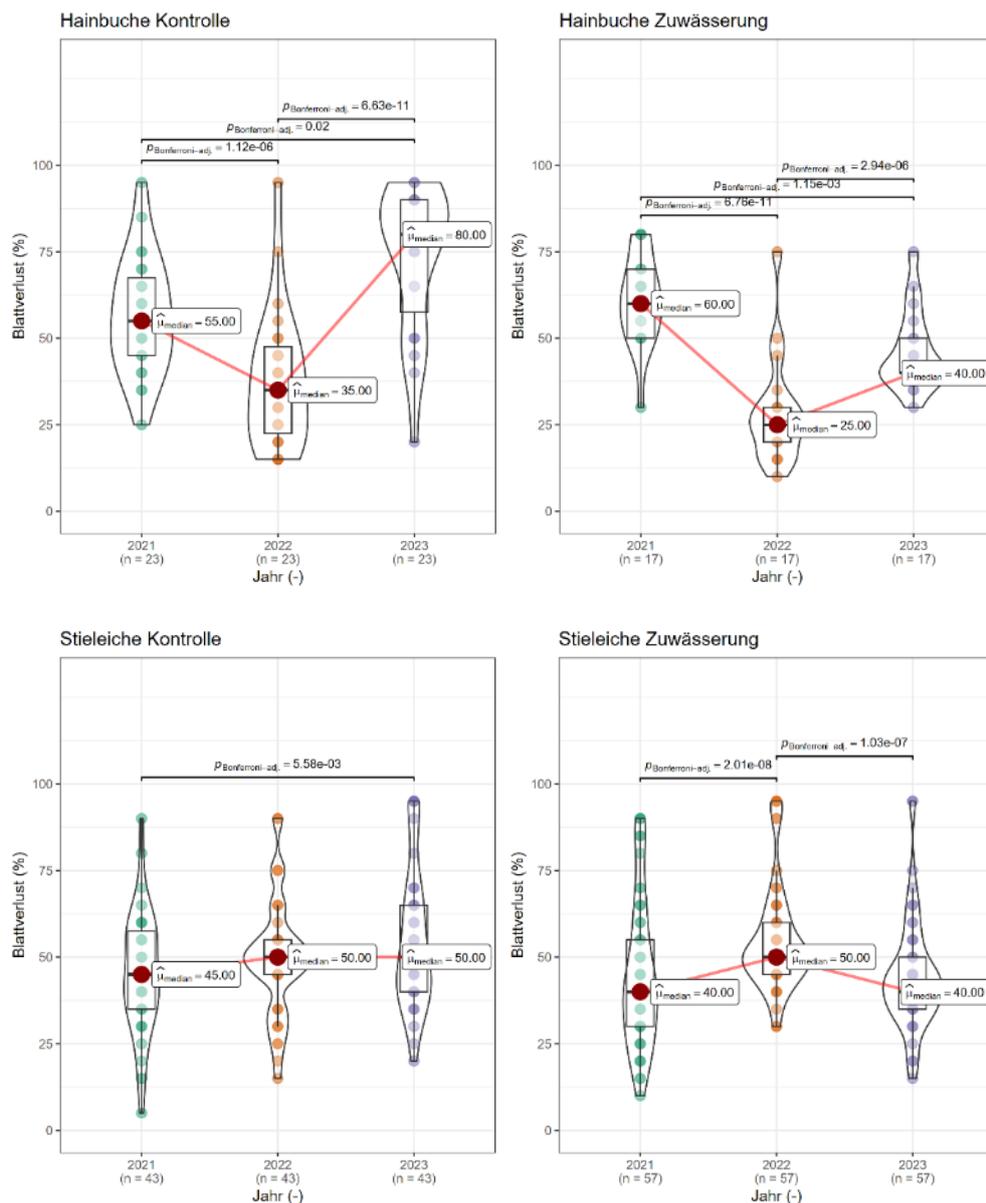


Abbildung 31: Blattverluste (%) von Hainbuchen und Stieleichen der Jahre 2021 bis 2023 in Kontroll- und Bewässerungsparzellen als kombinierte Box- und Violinplots. Dargestellt sind p-Werte des Friedman-Rangsummentests für gepaarte Stichproben, wenn die Nullhypothese abgelehnt wird ($p \leq 0,05$), die Mediane der Stichprobe und der Stichprobenumfang. Je mehr Überlappungen der Messpunkte auftreten, desto dunkler sind die Punkte dargestellt.

In 2022 erfolgten die Aufnahmen, bevor die extreme Dürre sich in starkem Blattfall manifestierte. Das erklärt auch, wieso Hainbuchen hier im Mittel den geringsten Blattverlust zeigten. Auf den Versuchsflächen war besonders bei Hainbuchen eine sehr hohe interannuelle Dynamik der Blattverluste feststellbar. Die Aufnahmen aller Jahre unterscheiden sich signifikant voneinander. Dagegen ist die Variabilität der Blattverluste der Eichen deutlich geringer.

Vergleicht man Kontroll- und Bewässerungsparzellen in den jeweiligen Jahren miteinander, ist festzustellen, dass sich die Blattverluste beider Arten weder in den Jahren 2021 noch 2022 signifikant voneinander unterscheiden (Abbildung 32). Weil wie oben erwähnt das Jahr 2021 relativ feucht war und die Erhebung im Jahr 2022 vor dem Beginn der extremen Sommertrockenheit durchgeführt wurde, manifestierten sich Unterschiede erst in den Erhebungen von 2023. Besonders bei den Hainbuchen ist der Unterschied sehr groß, hier haben sich die Blattverluste im Median halbiert. Die Eichenbelaubung reagierte weniger deutlich, der Blattverlust auf Kontrollflächen war nur 10 Prozentpunkte höher. Eine deutliche Verbesserung der Belaubungssituation der Baumarten auf das Mittel des Blattverlusts in Hessen von etwa 30% (Paar und Klinck, 2023) durch die Bewässerung ist bislang nicht abzusehen.

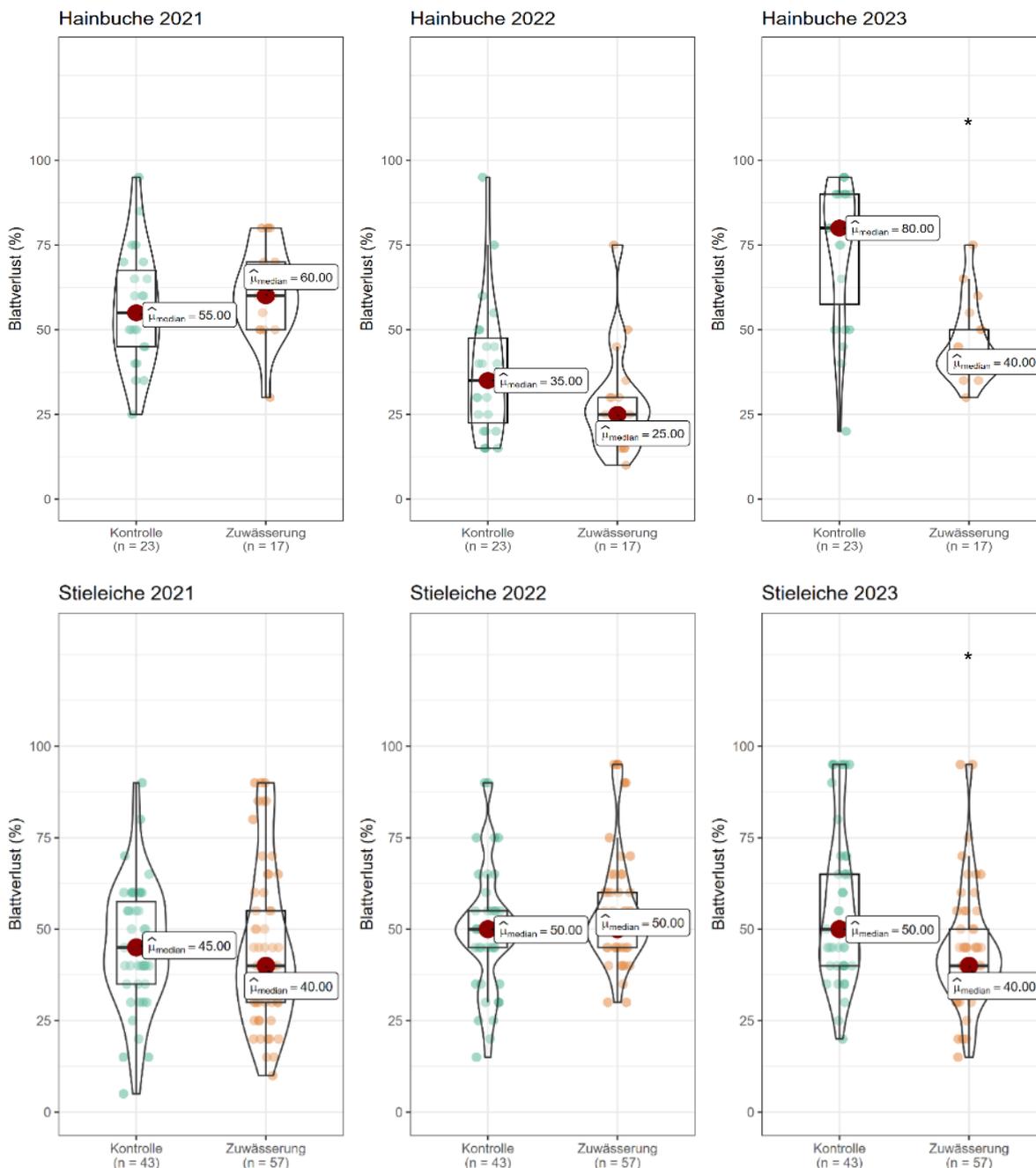


Abbildung 32: Blattverluste (%) von Hainbuchen und Stieleichen der Jahre 2021 bis 2023 in Kontroll- und Zuwässerungspartellen als kombinierte Box- und Violinenplots. Dargestellt sind signifikante Differenzen des Wilcoxon signed-rank-test (*, $p \leq 0,05$), die Mediane der Stichprobe und der Stichprobenumfang. Je mehr Überlappungen der Messpunkte auftreten, desto dunkler sind die Punkte dargestellt.

Der aus Strahlungsmessungen mit dem LAI-2200 ermittelte mittlere Blattflächenindex (LAI) war in den Kontroll- und in den Bewässerungspartellen in allen Jahren signifikant voneinander unterschieden (Abbildung 33). Zu Projektbeginn war der LAI in den Kontrollpartellen um etwa $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ höher als in den Zuwässerungspartellen. In den beiden folgenden Jahren war er etwa um den selben Betrag signifikant geringer. Da die LAI-Messungen anders als die WZE-Ansprachen auch in erheblichem Maß von der überall sehr dichten Strauchschicht beeinflusst werden, ist davon auszugehen, dass hier deutliche Veränderungen stattgefunden haben.

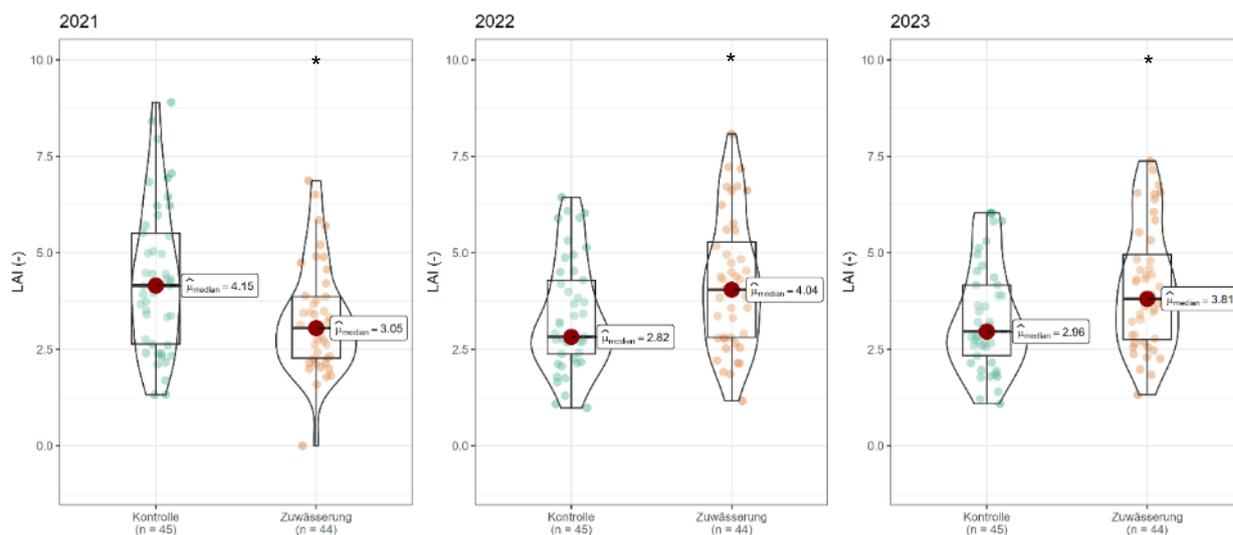


Abbildung 33: LAI (Leaf area index) (-) Messungen der Jahre 2021 bis 2023 in Kontroll- und Zuwässerungsparzellen als kombinierte Box- und Violinenplots. Dargestellt sind signifikante Differenzen des Mann-Whitney U test (*, $p \leq 0,05$), die Mediane der Stichprobe und der Stichprobengröße. Je mehr Überlappungen der Messpunkte auftreten, desto dunkler sind die Punkte dargestellt.

Während die extreme Trockenheit von 2022 in den Ansprachen des Kronenzustands nicht und in den Messungen des LAI nur ungenügend sichtbar wurde, weil die Aufnahmen jeweils frühzeitig im Jahr erfolgten, waren ihre Auswirkungen im Laufe des Spätsommers visuell wie auch in den phänologischen Ansprachen deutlich erkennbar. Fotos entlang der Rückegassen in den Parzellen zeigen, dass auch die Strauchschicht und die krautige Vegetation auf den Kontrollparzellen massiv von der Dürre betroffen waren, während auf den Zuwässerungsparzellen deutlich geringere Auswirkungen feststellbar waren (Abbildung 34).



Abbildung 34: Fotos einer Kontroll- (links) und einer Zuwässerungsparzelle (rechts) aufgenommen entlang einer Rückegasse am 07.09.2022 (Köhler et al., 2023a)

In den Phänologieansprachen der einzelnen Jahre (je 10 Bäume der Arten Eiche, Hainbuche und Esche pro Parzelle) sticht besonders der extrem frühe Laubfall heraus, der schon Anfang September 2022 auf den Kontrollparzellen begann (Abbildung 35). Zu diesem Zeitpunkt waren hier nur noch ein Viertel der Bäume vollständig belaubt (<1% Laubfall), während das für fast alle Bäume auf den Zuwässerungsparzellen galt. Dasselbe Muster setzte sich 2023 fort, wenn auch deutlich abgeschwächt. Zudem setzte der Laubfall in 2023 deutlich später als in 2022 ein.

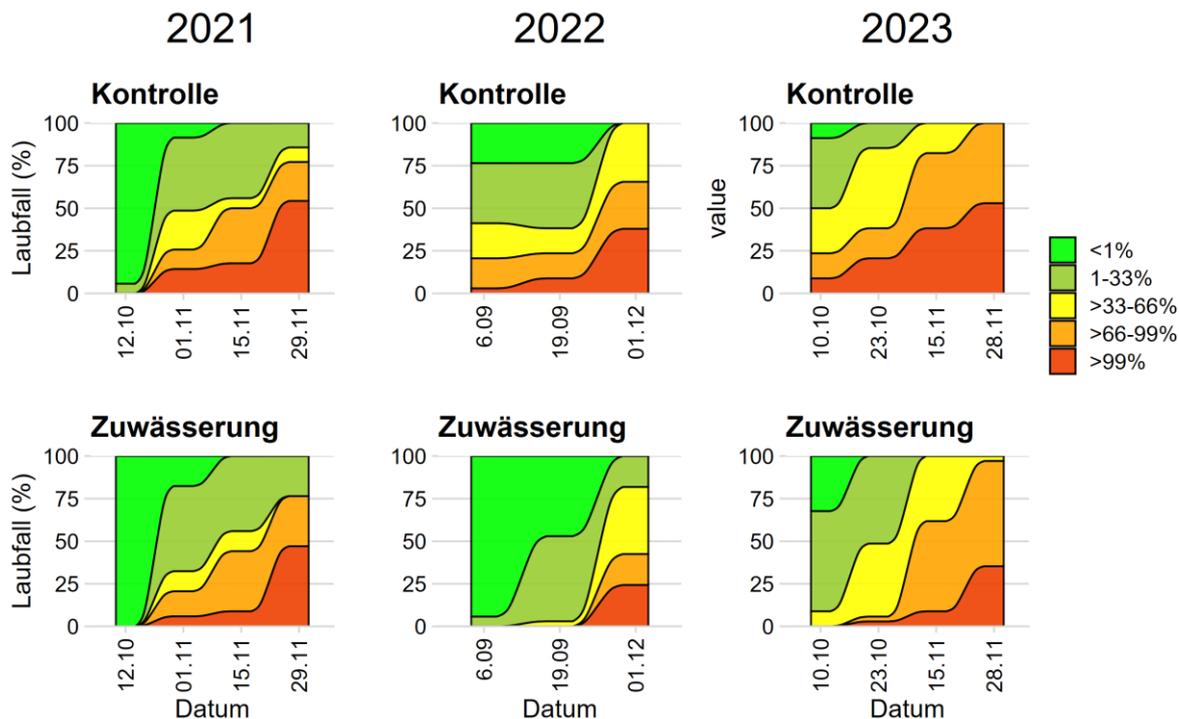


Abbildung 35: Laubfall von Stieleichen, Eschen und Hainbuchen (%) auf Kontroll- und Zuwässerungsparzellen von 2021 bis 2023. Die Prozentangaben zeigen den Grad des Laubfalls in Stufen von <1% (vollständig belaubt) bis zu >99% (vollständig entlaubt) wieder

Ebenfalls deutlicher als die Kronenzustandsansprachen reagierten auch die Durchmesserzuwächse auf die Trockenheit von 2022 (Abbildung 36). Für beide Baumarten war hier eine signifikante Abnahme der Zuwächse in Kontrollen im Vergleich zu 2021 feststellbar. Die Durchmesserzuwächse nahmen 2023 auf den Kontrollparzellen nach der extremen Trockenheit im Jahr 2022 bei beiden Baumarten weiter ab, während die Bewässerung einen ähnlichen Zuwachs der Stieleiche wie in den Vorjahren ermöglichte. Der mittlere Durchmesserzuwachs der Hainbuchen auf den Kontrollparzellen verschlechterte sich sogar mit jedem Beobachtungsjahr und ging von 5,4 mm im Jahr 2021 auf 3,3 mm im Jahr 2022 und auf 1,3 mm im Jahr 2023 zurück, was auf eine hohe Anfälligkeit für eingeschränkte Bodenwasserverfügbarkeit im Jahr der Trockenheit und auch im Folgejahr hinweist. Dieser Lag-Effekt ist bei Eichen bisher deutlich schwächer ausgeprägt. Ob die Bäume lediglich Ressourcen sparen und die Zuwächse sich in Jahren mit günstigerer Witterung wieder erholen, ist noch unklar und bedarf längerer Untersuchungszeiträume. In den bewässerten Varianten blieben die Zuwächse beider Arten dagegen annähernd auf konstantem Niveau. Das leichte Zuwachsplus der Hainbuche in 2022 gegenüber den anderen Jahren ist zwar signifikant, die sehr geringe Effektstärke und die Verteilung der Datenpunkte lassen aber eher auf ein statistisches Artefakt schließen.

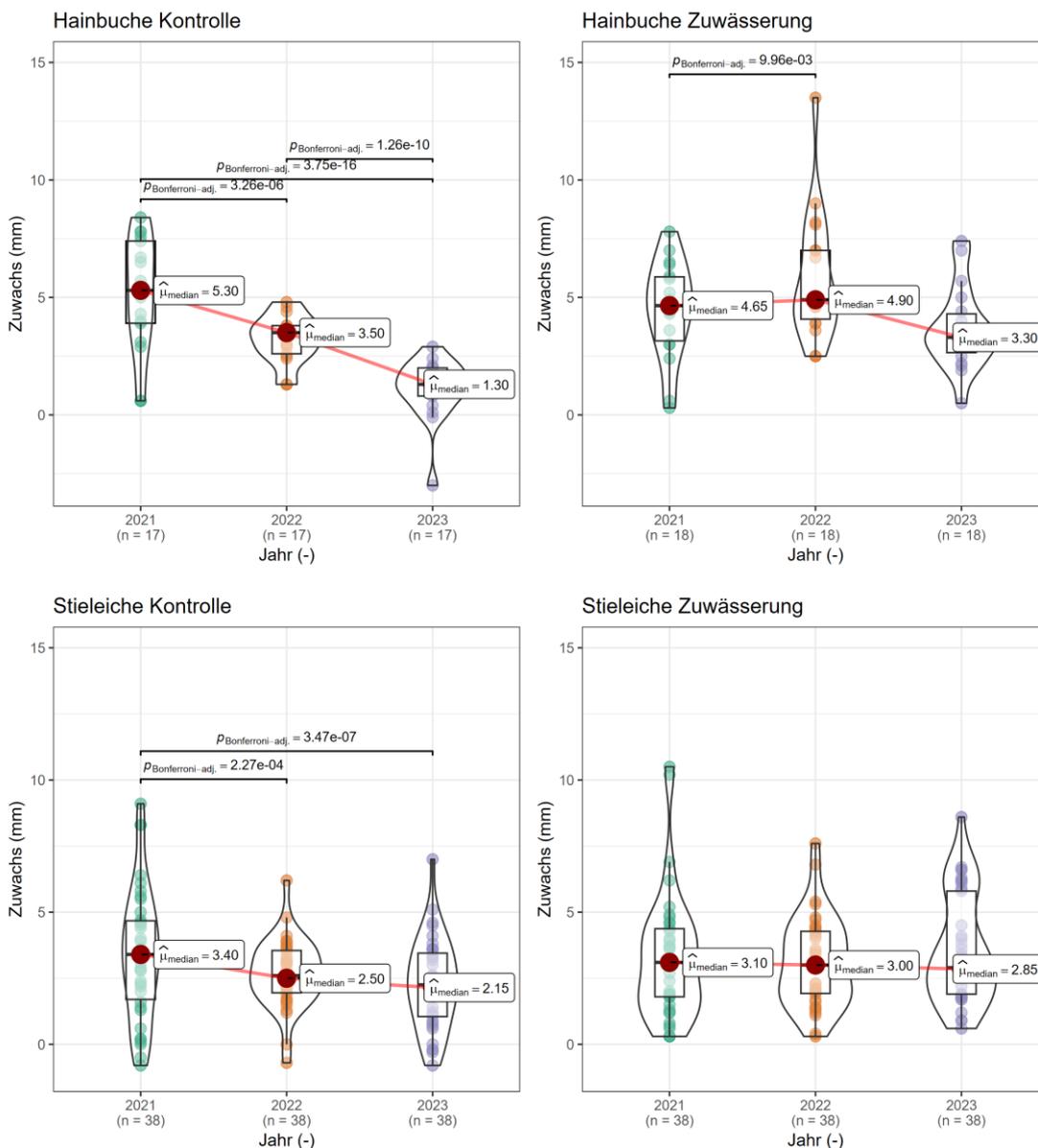


Abbildung 36: Durchmesserzuwächse (mm) von Hainbuchen und Stieleichen der Jahre 2021 bis 2023 in Kontroll- und Zuwässerungsparzellen als kombinierte Box- und Violinplots. Dargestellt sind p-Werte des Friedman-Rangsummentests für gepaarte Stichproben, wenn die Nullhypothese abgelehnt wird ($p \leq 0,05$), die Mediane der Stichprobe und der Stichprobenumfang. Je mehr Überlappungen der Messpunkte auftreten, desto dunkler sind die Punkte dargestellt. Werte, die über dem dritten Quartil plus dem 3-fachen der Interquartilsdifferenz oder unter dem ersten Quartil minus dem 3-fachen der Interquartilsdifferenz lagen, wurden als Messfehler identifiziert und entfernt. Weitere negative Zuwächse oder sehr hohe positive Zuwächse, die möglicherweise aus Messfehlern resultieren, wurden im Datensatz belassen, um keine einseitige Verzerrung der Daten zu erzeugen.

Ähnliche Aussagen lassen sich anhand der Daten der hochauflösenden permanenten Umfangmessbänder ($n=3$ Eichen pro Parzelle) treffen: Das Wachstum von Eichen auf den Kontrollparzellen in den Jahren 2022 betrug durchschnittlich nur etwa 40-50 % der Werte von 2021 (Abbildung 37). Die Daten von 2023 sind wegen vieler Störungen nicht sinnvoll auswertbar. Die Eichen auf den Bewässerungsparzellen hingegen wuchsen, mit allerdings hoher Varianz, im Jahr 2022 tendenziell noch stärker als auf den Kontrollen.

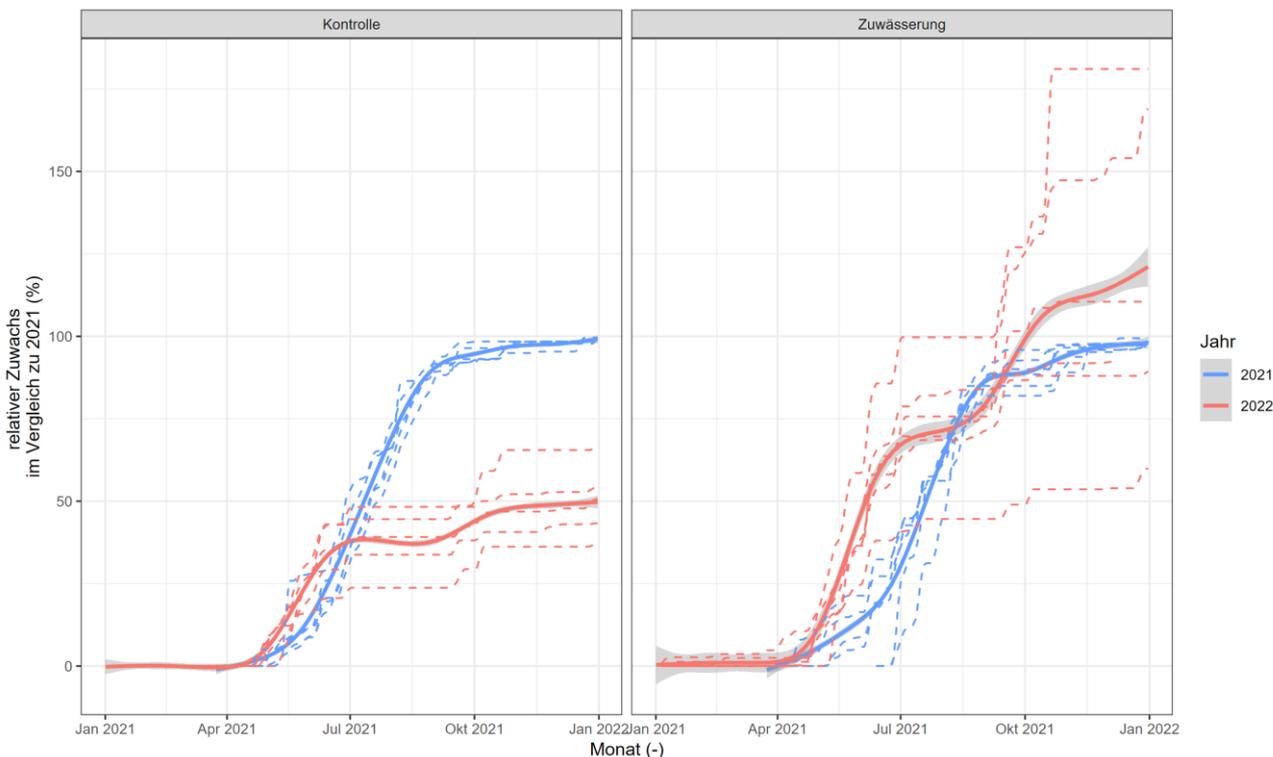


Abbildung 37: Kumulative Zuwächse von Bäumen in den Parzellen Kontrolle und Zuwässerung (%; n=8 pro Behandlung) der Jahre 2021 und 2022 als Prozentwerte ihres Zuwachses von 2021. Gestrichelte Linien entsprechen den Zuwächsen einzelner Bäume, durchgezogenen Linien sind Mittelwerte über die Varianten.

Die Mortalität wurde für die Jahre 2022 und 2023 als prozentualer Anteil neu abgestorbenen Bäume an der Gesamtzahl der lebenden Bäume im Vorjahr berechnet. Da die WZE im Jahr 2022 bis zum Beginn der Sommertrockenheit durchgeführt wurde, ist es sehr wahrscheinlich, dass die Mortalitätsrate des Waldes bei 3-5 % lag (Abbildung 38). Im Jahr nach der Dürre lag die Mortalitätsrate auf den Kontrollparzellen bei 10±2%, während in den Bewässerungspartellen keine Bäume abstarben. Obwohl nur für ein Jahr ein signifikanter Unterschied in der Mortalitätsrate zwischen Kontroll- und Bewässerungspartellen festgestellt wurde, können wir vermuten, dass die Bewässerung die Baumsterblichkeit verringert oder zumindest hinausgezögert hat. Auch hier wird deutlich, dass ein längerer Untersuchungszeitraum notwendig ist.

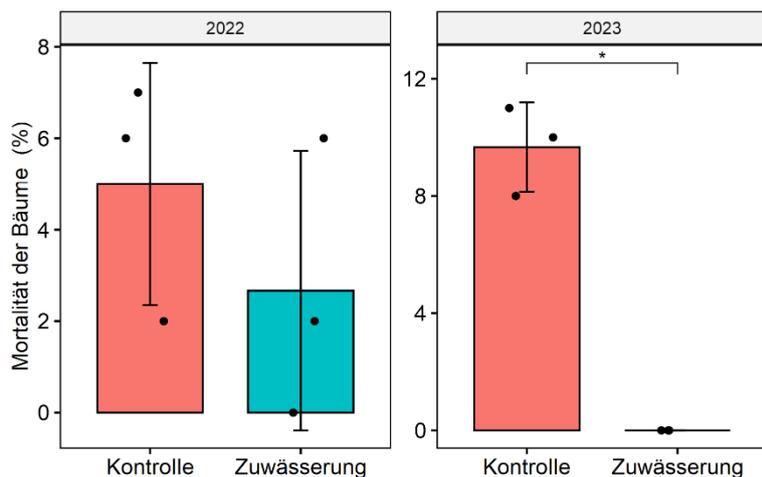


Abbildung 38: Mortalität der Bäume in den Parzellen Kontrolle und Zuwässerung (%) der Jahre 2022 und 2023 als Prozentwerte der gesamten lebenden Bäume im Vorjahr ihres Zuwachses (2021 und 2022). Die Balken zeigen den Mittelwert und die Whisker den Standardfehler (SE) an. Die Werte für jede Parzelle sind mit schwarzen Punkten dargestellt. Die Sternchen zwischen den Balken zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen an (* $p < 0,05$).

Eine weitere wichtige Fragestellung der Untersuchung war, ob sich die Bewässerung auf die Artzusammensetzung und die Deckungsgrade in einzelnen Vegetationsschichten auswirkt. Die Untersuchungsparzellen können zunächst dem feuchten Flügel des Verbandes Carpinion in der Ausbildung eines Stellario holosteeae-Carpinetum (Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwald) zugeordnet werden was dem FFH-Lebensraumtyp 9160 entspricht. Das Arteninventar war insgesamt recht typisch ausgebildet. In der Baumschicht kamen im Jahr 2023 sieben Arten vor, in der Strauchschicht (einschließlich der höherwüchsigen Baumartenverjüngung) 14 Arten, in der Krautschicht (einschließlich der niedrigwüchsigen Baumartenverjüngung) 53 Arten und in der Mooschicht 11 Arten.

Die Baumschicht wurde meist von Hainbuche, Gewöhnlicher Esche und Stieleiche gebildet, während die übrigen vier Arten (Berg- und Spitzahorn, Winterlinde, Wildbirne) in lokal unterschiedlichem Umfang beigemischt waren. In der Bodenvegetation bildete das Scharbockskraut (*Ranunculus ficaria*) einen teils großflächigen Frühjahrsaspekt aus, im Sommer dominierten die typischen Arten des Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwaldes. Auffällig waren die infolge der Trockenheitsschäden stark aufgelichtete Baumschicht, eine stellenweise dichte und auch zunehmende Strauchschicht und das regelmäßige Auftreten von Nitrophyten und Störzeigern in der Bodenvegetation. Botanische Raritäten kamen kaum vor. Einzige Art mit einer Rote-Liste-Einstufung war die Wildbirne (*Pyrus pyraster*), wobei dies nur für Niedersachsen zutrifft, nicht jedoch für Hessen oder für Deutschland insgesamt. Generell ist zu sagen, dass die qualitativen Spektren ökologisch-funktionaler Artengruppen in den drei Beobachtungsjahren mehr oder weniger konstant blieben - d. h., weder zwischen den beiden Varianten noch innerhalb der kurzen Zeitreihe gab es bemerkenswerte Unterschiede bzw. Veränderungen. Das kann so interpretiert werden, dass weder die trockenheitsbedingte Kronenverlichtung noch die unterschiedlichen Behandlungen (Kontrolle, Zuwässerung) bisher zu massiven Verschiebungen im Arteninventar geführt haben.

Auch quantitativ war keine Veränderung der Artanzahl (nicht gezeigt) oder eine Verschiebung der Deckungsgrade innerhalb der Schichten bzw. der Bodenbedeckung mit Streu oder der prozentualen offenen Bodenfläche in den Vegationsuntersuchungsflächen der einzelnen Parzellen feststellbar (Abbildung 39).

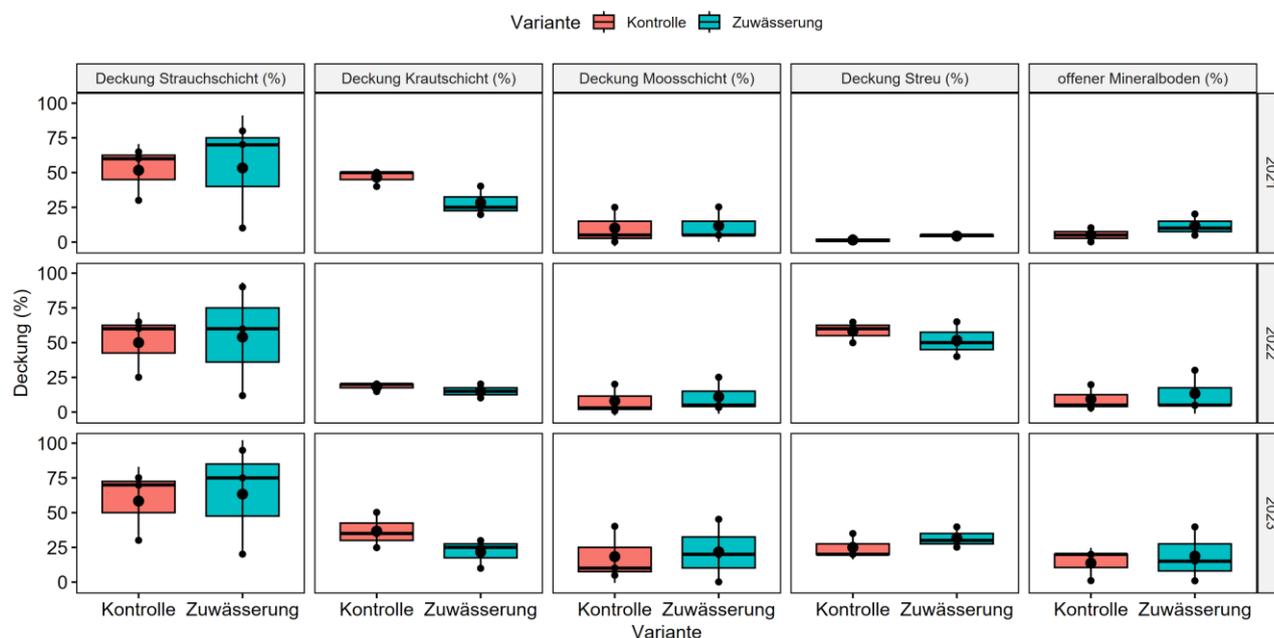


Abbildung 39: Schichtdeckungsgrade der Strauch-, Kraut- und Mooschicht in den Jahren 2021 bis 2023 auf Zuwässerungs- und Kontrollparzellen.

Zusammenfassung

Im Projekt SiZuRi wurde ein Verfahren zur flächenhaften Zuwässerung in naturverträglich genutzten Feuchtwäldern entwickelt und erprobt, um Trockenstressphasen der Waldbestände durch gezielte, temporäre Zusatzwassergaben auf die Bodenoberfläche zu verkürzen. Dabei wurden die forstlichen und ökologischen Auswirkungen der Zuwässerung durch Implementierung eines hydrologischen und forstökologischen Monitorings untersucht. Es ist gelungen, ein einfaches Bewässerungssystem in einem naturverträglich genutzten Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwald (FFH LRT 9160) im Stadtwald Gernsheim zu etablieren, das den sommerlichen Zusatzwasserbedarf der Bäume decken konnte, wenngleich eine effektive Bewässerungssteuerung unter den gegebenen Bedingungen (Verteilungsinhomogenitäten) erschwert war. Trotz hoher Bewässerungsintensitäten sorgt ein ausgeprägtes Makroporensystem auf den Untersuchungsparzellen für eine Vermeidung von Überstau und eine schnelle Weiterleitung des Wassers in tieferen Bodenhorizonte, allerdings auch für Verluste des Bewässerungswassers durch Tiefensickerung. Jedoch konnte durch alle Bewässerungsgaben eine Verbesserung der Bodenwasserverfügbarkeit erreicht werden.

Es konnte trotz häufiger Wechsel der Bearbeiter:innen und langer Zeiten, in denen die Stelle der wissenschaftlichen Mitarbeit unbesetzt war, ein sehr umfangreicher Datensatz erhoben werden, der forstliche, bestandesstrukturelle, hydrologische und botanische Charakteristika im Gernsheimer Stadtwald erfasst und ihre Reaktion auf die Zuwässerung festhält. Insgesamt ist festzustellen, dass alle Indikatoren der Baumvitalität durch die Bewässerung verbessert werden konnten. Dies gilt insbesondere für den über den Blattverlust erfassten Kronenzustand, die Entwicklung des Blattflächenindex (LAI), die Dauer des herbstlichen Blattfalls, die Durchmesserentwicklung der Bäume sowie die Baummortalität. Die Effekte waren insbesondere in dem extremen Trockenjahr 2022 nachweisbar, aber auch in dem „Normaljahr“ 2023 wurde deutliche Wirkungen der Bewässerung auf den Vitalitätszustand der Bäume beobachtet, die vorwiegend auf überjährige Wirkungen aus dem vorangegangenen Trockenjahr zurückgeführt werden. Gleichzeitig hatte die Bewässerung keine Auswirkungen auf das Arteninventar oder die Schichtdeckungsgrade in den Parzellen. Innerhalb der für forstökologische Fragestellungen kurzen Projektlaufzeit können aber bisher mittel- und langfristige Effekte sowie insbesondere auch überjährige Wirkungen von Dürreereignissen nicht zuverlässig beurteilt werden. Daher erscheint es notwendig, die Untersuchungen über einen gewissen Zeitraum fortzusetzen, um die Wirkung der Bewässerung sicher beurteilen zu können.

Im Anschluss an das Auslaufen der Förderung durch den Waldklimafonds werden die Untersuchungen durch das Hessische Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat für zwei weitere Jahre gefördert. Die in SiZuRi erhobenen Daten werden dort entsprechend weiter genutzt und ausgewertet und bisher noch nicht umgesetzte Projektziele weiterverfolgt.

2. Verwertung

Mit Erlass des HMLU vom 15.06.2020, Gz.: VI 2-088c 02.01 – 2/2020 stimmte das Hessische Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) der Verlängerung der Projektes „Situative Zuwässerung in Wäldern des Hessischen Rieds zur Sicherung und Wiederherstellung naturverträglich genutzter feuchter Eichen-Hainbuchen-Wälder (SiZuRi)“ zu. Die NW-FVA führt das Projekt bis zum 30.06.26 durch. Eine eventuelle Verlängerung des Ausführungszeitraums erfolgt im gegenseitigen Einvernehmen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Keine

4. Veröffentlichungen

Veröffentlichungen:

Köhler, M., H. Gerdes und H. Meesenburg (2023): Experimentelle Waldbewässerung im Hessischen Ried. *Wasser und Abfall* 25(4):14–21

Köhler M., Bilyera N., Gerdes H., Meesenburg H. (2023): Waldbewässerung im Rhein-Main-Gebiet: Erste Ergebnisse des Projekts „Situative Zuwässerung in Wäldern des Hessischen Rieds (SiZuRi)“. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), *Waldzustandsbericht 2023 für Hessen*. S. 31–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8430946>

Köhler, M.; Bilyera, N.; Gerdes, H.; Meesenburg, H. (2024): Effect of irrigation on tree vitality in a temperate forest in Germany, *EGU General Assembly 2024*, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-22121, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-22121>

von der Bey, S. R. (2022): Die Naturverjüngung der Eiche bei experimenteller Zuwässerung im Hessischen Ried. Bachelorarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

Hümme, J. H. (2023): Belaubungsgrad in einem trockengestressten Laubwald mit experimenteller Zuwässerung. Bachelorarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

Römermann, R. (in Bearbeitung): Die natürliche Verjüngung von Eichen im Hessischen Ried unter experimenteller Zuwässerung. Bachelorarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

Präsentationen und Exkursionen

Köhler, M., H. Gerdes und H. Meesenburg (2023): Experimentelle Waldbewässerung im Hessischen Ried während des Dürresommers 2022. Poster auf der Forstwissenschaftlichen Tagung vom 11. - 13. September 2023 in Dresden, <https://doi.org/10.25368/2024.36>

Köhler, M., H. Gerdes und H. Meesenburg (2023): Experimentelle Waldbewässerung zur Stabilisierung eines Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwaldes im Hessischen Ried während des Dürresommers 2022. Poster auf dem Tag der Hydrologie 2023 „Nachhaltiges Wassermanagement – Regionale und Globale Strategien“ an der Ruhr-Universität Bochum.

Köhler, M., H. Gerdes und H. Meesenburg (2023): Situative Zuwässerung in Wäldern des Hessischen Rieds zur Sicherung und Wiederherstellung naturverträglich genutzter feuchter Eichen-Hainbuchen-Wälder“ (SiZuRi), Sachstand 01.03.2023. Vortrag auf der Sitzung des Ausschusses für Umwelt, Land- und Forstwirtschaft der Stadt Gernsheim am 13.03.2023

Exkursion auf die Untersuchungsfläche im Rahmen der Fortbildungsveranstaltung „Wasser- und Kohlenstoffhaushalt von Wäldern im Klimawandel“ am 07. Juni 2023

Gerdes H. (2023): Wasserwirtschaft im hessischen Ried - Überblick. Vortrag auf dem NVN-Naturkundetag am 01.07.2023 in Bad Nauheim

Presseberichte:

Pressegespräch und Exkursion anlässlich des Besuchs von Staatssekretär Conz (HMUKLV) am 3.8.2021, Pressemitteilung.

Landwirtschaftliches Wochenblatt (2020): Wälder im Hessischen Ried sollen überflutet werden. LW36/2020

UmweltMagazin (2020): Wälder bewässern, UmweltMagazin 50 (08–09).

EUWID Wasser und Abwasser (2020): Pilotprojekt zur Bewässerung von Eichen- Mischwäldern im Hessischen Ried gestartet, <https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/pilotprojekt-zur-bewaesserung-von-eichen-mischwaeldern-im-hessischen-ried-gestartet-080920/>, abgerufen am 31.7.2024.

Echo Online (2021): Oberflächenbewässerung soll Gernsheimer Wald helfen, <https://www.echo-online.de/lokales/kreis-gross-gerau/gernsheim/oberflaechenbewaesserung-soll-gernsheimer-wald-helfen-1633619>, abgerufen am 31.7.2024.

Echo Online (2021): Kann eine Bewässerung den Gernsheimer Wald retten? <https://www.echo-online.de/lokales/kreis-gross-gerau/gernsheim/kann-eine-bewaesserung-den-gernsheimer-wald-retten-1866249>, abgerufen am 31.7.2024.

RiffReporter (2021): Den Preis für Frankfurts Wasser zahlen Menschen und Natur in der Ferne, <https://www.riffreporter.de/de/umwelt/frankfurt-menschen-stadt-wasser-preis>, abgerufen am 31.7.2024.

RTL Hessen (2021): Fernsehbericht über das Projekt SiZuRi am 19.10.2021

Echo Online (2023): Gernsheim hilft dem trockenen Wald, <https://www.echo-online.de/lokales/kreis-gross-gerau/gernsheim/gernsheim-hilft-dem-trockenen-wald-2388690>, abgerufen am 31.7.2024.

Literatur

- AG Boden (2005), Bodenkundliche Kartieranleitung:[KA 5]; mit 103 Tabellen und 31 Listen, Schweizerbart.
- Ahner, J. et al. (2013), Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried.
- Alam, M. und D.H. Rogers (1997), Tensiometer-Use-in-Scheduling-Irrigation.pdf, Irrigation Management Series, Kansas.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith, und others (1998), Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome 300 (9), D05109.
- Altherr, E. (1972), Das Karlsruher Wasserwerk „Hardtwald“ aus forstlicher Sicht, Teil III: Auswirkungen der Grundwasser absenkung auf den laufenden Zuwachs der Kiefer, festgestellt mit Hilfe von Bohrkernanalysen. Allgemeine Forstund Jagdzeitung jg 143.
- Anonymous (2015), Irrigation Scheduling With Tensiometers, Order No. 577.100-2, Ministry of Agriculture and Food - Province of British Columbia.
- Barker, B., S. Stewart und M. Nelson (2024), Maintaining and Improving Irrigation Application Uniformity in Sprinkler and Drip Systems, All Current Publications, 1–9.
- Berdouki, A.A., S. Besharat, K. Zeinalzadeh und C. Cruz (2024), The effect of soil texture, layering and water head on the infiltration rate and infiltration model accuracy, Irrigation and Drainage 73 (3), 846–865.
- BGS Umwelt und NW-FVA (2011), Machbarkeitsstudie zur Aufspiegelung des Grundwassers in ausgesuchten Waldbereichen des südlichen Hessischen Rieds, Auftraggeber: Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMULV), unveröff.
- Canullo, R., F. Starlinger, O. Granke, R. Fischer, D. Aamlid und J. Dupouey (2020), Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, in: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (Hrsg.), Part VII.1: Assessment of Ground Vegetation. Version 2020-1, Eberswalde, 14.
- Dobbertin, M. et al. (2010), Effect of irrigation on needle morphology, shoot and stem growth in a drought-exposed *Pinus sylvestris* forest, Tree Physiology 30 (3), 346–360.
- Hansen, E.A. (1978), Forest irrigation: a review.
- Herzog, C., J. Steffen, E.G. Pannatier, I. Hajdas und I. Brunner (2014), Nine years of irrigation cause vegetation and fine root shifts in a water-limited pine forest, PloS one 9 (5), e96321.
- Imbery, F. et al. (2022), Klimatologischer Rückblick Sommer 2022, 21. September.
- Köhler, M., N. Bilyera, H. Gerdes und H. Meesenburg (2023a), Waldbewässerung im Rhein-Main-Gebiet: Erste Ergebnisse des Projekts „Situative Zuwässerung in Wäldern des Hessischen Rieds (SiZuRi)“, in: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Hessen, 31–33.
- Köhler, M., H. Gerdes und H. Meesenburg (2023b), Experimentelle Waldbewässerung im Hessischen Ried, Wasser und Abfall 25 (4), 14–21.
- KTBL (2014), Technik der Freilandbewässerung, Darmstadt.
- Kummer, B., C. Ewen, L. Meyer, S. Alt und H. Gerdes (2015), Runder Tisch: Verbesserung der Grundwassersituation im Hessischen Ried. Abschlussbericht, Darmstadt.
- Meyer, W. und E. Schulz (2014), Bereitstellung von Beregnungswasser durch Klarwasserversickerung, in: Urban, B., J. Becker, I. Mersch, und Klimzug-Nord Verbund (Hrsg.), Klimawandel in der Lüneburger Heide: Kulturlandschaften zukunftsfähig gestalten, Berichte aus den KLIMZUG-NORD Modellgebieten 6, Bd. 6, TuTech Verl, Hamburg, 30–33.
- Mohammadzadeh-Habili, J. und M. Heidarpour (2015), Application of the Green–Ampt model for infiltration into layered soils, Journal of Hydrology 527, 824–832.
- Müller, M. und F. Ebertseder (2020), Fachliche Grundlagen zur Bewässerungs-App, Teil 2: Bodenart und Verteiltechnik bezogene Kennzahlen, Bewässerungsforum Bayern, 1–4, hg. von. ALB Bayern e.V., Freising.
- Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) (2023), Waldzustandsbericht 2023 für Hessen.
- Paar, U. und I. Dammann (2018), Wald in der Rhein-Main-Ebene, in: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2018 für Hessen, 12.

- Paar, U. und C. Klinck (2023), Wald in der Rhein-Main-Ebene, in: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Hessen, 18–19.
- Paavolainen, L., M. Fox und A. Smolander (2000), Nitrification and denitrification in forest soil subjected to sprinkling infiltration, *Soil Biology and Biochemistry* 32 (5), 669–678.
- Pfützner, J. (1976), Poiseuille and his law, *Anaesthesia* 31 (2), 273–275.
- Raspe, S., S. Fleck, E. Beuker, A. Bastrup-Birk und T. Preuhsler (2020), Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, in: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (Hrsg.), Part VI: Phenological Observations. Version 2020-3, Eberswalde, 14.
- RP Darmstadt (1999), Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried, Anlage Teil A. Grundlagen und Begründung. Darmstadt: Regierungspräsidium.
- Schäfer, A. et al. (2021), Hochwasser Mitteleuropa, Juli 2021 (Deutschland): 21. Juli 2021 – Bericht Nr. 1 „Nordrhein-Westfalen & Rheinland-Pfalz“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Schmidt, M., J. Ahner und R.-V. Nagel (2015), Modellierung der Einzelbaummortalität der Eiche unter besonderer Berücksichtigung von Grundwasserabsenkungen – Eine Untersuchung im Hessischen Ried, *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 186, 94–109.
- Shipitalo, M.J. und R.-C.L. Bayon (2004), Quantifying the Effects of Earthworms on Soil Aggregation and Porosity, *Earthworm Ecology*, 2. Auflage, CRC Press.
- Skiadaresis, G., J.A. Schwarz und J. Bauhus (2019), Groundwater Extraction in Floodplain Forests Reduces Radial Growth and Increases Summer Drought Sensitivity of Pedunculate Oak Trees (*Quercus robur* L.), *Frontiers in Forests and Global Change* 2.
- Stormont, J.C. und C.E. Anderson (1999), Capillary Barrier Effect from Underlying Coarser Soil Layer, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125 (8), 641–648.
- Sutmöller, J. et al. (2019), Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 1, *AFZ-DerWald* 74 (6), 42–46.
- Wagner, M. et al. (2019), Die extreme Trockenheit 2018 in Nordwestdeutschland, Teil 2, *AFZ-DerWald* 74 (6), 47–50.
- Weissbrod, M. und F. Binder (2017), Effect of a barrage on radial increment of pedunculate oaks (*Quercus robur* L.) at the bavarian danube, *Forstarchiv* 88, 102–110.
-