

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Nachhaltige, flexible Grundwasserbewirtschaftung in Ballungszentren auf Basis eines Wassersystemmodells am Beispiel der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main – Modellierung, Maßnahmen, Governance (WaRM); Teilprojekt 6: Ermittlung von Grundwasserneubildungsraten, Stickstoffdeposition und Stickstoffeinträgen in das Grundwasser für verschiedene Waldentwicklungsszenarien

Förderkennzeichen: 02WGW1669F



in der Fördermaßnahme

„Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung (LURCH)“

Autor:innen

Angela Morales, Henning Meeseburg, Bernd Ahrends

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt,
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen,
zentrale@nw-fva.de

Projektlaufzeit: 01.03.2023 – 28.02.2026

Erstellungsdatum: 31.08.2026

Projektpartner

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Projektleitung),
Technische Universität Darmstadt,
Hessenwasser GmbH & Co. KG,
Brandt-Gerdes-Sitzmann Umweltplanung GmbH (BGS Umwelt),
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG),
GICON Resources GmbH.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzfassung	4
I.1 Aufgabenstellung	4
I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	4
I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick.....	4
II. Teil II Eingehende Darstellung	6
II.1 Motivation und Aufgabenstellung	6
II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	7
II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
II.3.1 Der Wald im Hessischen Ried: Untersuchungsgebiet und Datenquellen .	7
II.4 Erzielte Ergebnisse	13
II.4.1 Grundwassermenge	13
II.4.2 Grundwasserqualität.....	23
II.4.3 Maßnahmenoptionen.....	29
II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	38
II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse 38	
II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes....	39
II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.	39
II.9 Literaturverzeichnis	40
II.10 Anhang.....	44
II.10.1 Vergleich Simulation der Grundwasserneubildung mit LWF-Brook90 und MIKE-SHE.....	44

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Das Teilprojekt soll einen integrierten Überblick über die vergangene, aktuelle und potenzielle zukünftige Entwicklung der Grundwasserressourcen unter Wald im Hessischen Ried geben. Es befasst sich mit regionalen Besonderheiten, bestehenden und erwarteten Konflikten bei der Wassernutzung sowie der Rolle des Waldes und seiner verschiedenen Baumarten innerhalb des regionalen Wasserhaushalts. Anhand von mit dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 erzeugten Simulationsergebnissen und unter Berücksichtigung zukünftiger Klima- und Waldumwandlungsszenarien soll die Entwicklung und Umsetzung umfassender, langfristiger Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwasser- und Ökosystemmanagement in der Region unterstützt werden.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Das Hessische Ried zeichnet sich durch sein tief gelegenes, fruchtbares Land mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung aus, welches darüber hinaus große Waldflächen mit hohem ökologischem und naturschutzfachlichem Wert aufweist. Die Waldgebiete des Hessischen Rieds sind ein Hotspot der Biodiversität und dienen als wichtiger Naherholungsraum. Das Hessische Ried ist ein Gebiet mit ergiebigen Grundwasservorkommen, die zur Deckung eines Teils des Trinkwasserbedarfs der Bevölkerung und zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen in der Metropolregion genutzt werden. Daher spielt das Hessische Ried eine entscheidende Rolle für die Wasserversorgung eines großen Teils der Metropolregion, in der Nutzungskonflikte schon jetzt spürbar sind. Das Hessische Ried wurde aufgrund der hohen Sommertemperaturen und der zunehmenden Häufigkeit von Dürren als Hotspot des Klimawandels identifiziert.

Das Ziel des Teilprojekts bestand in der quantitativen und qualitativen Bewertung der Grundwasserneubildung unter aktuellen und zukünftigen Waldbewirtschaftungsszenarien. Dies wurde durch die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung unter Wald mit dem Modell LWF-Brook90 als auch durch die Bereitstellung hochauflösender Umweltdaten aus dem Waldmonitoring gewährleistet. Darüber wurde Expertise zur Parametrisierung und Kalibrierung des MIKE-SHE-Modells in Waldgebieten zur Verfügung gestellt. Es wurden wichtige Beiträge zum zentralen WaRM-Wassersystemmodell für vergangene und zukünftige Klimabedingungen und evidenzbasierte Entscheidungshilfen für die Wald- und Wasserwirtschaft unter Berücksichtigung verschiedener forstlicher Maßnahmenoptionen in der Region bereitgestellt.

Darüber hinaus wurde die Stickstoffdeposition und der Stickstofftransport in das Grundwasser unter den Waldgebieten der Untersuchungsregion geschätzt. Die Integration von Modellierungsergebnissen sowohl für die Grundwassermenge als auch für die Stickstoffbelastung des Grundwassers schuf eine methodische Schnittstelle zwischen forsthydrologischen Simulationen und der Modellierung der Nitratauswaschung. Auf dieser Grundlage entwickelte die NW-FVA Waldbewirtschaftungsszenarien und Maßnahmenoptionen, die sich auf die Auswahl klimaresilienter Baumarten, Strategien zum Waldumbau sowie den Schutz und die Revitalisierung von Eichen-Hainbuchenwäldern durch Oberflächenbewässerung konzentrierten.

Schließlich wurden Szenario-Kombinationen entwickelt und mit Hilfe verbesserter Grundwassermodelle bewertet, wie sich Veränderungen der Grundwasserneubildung in Zukunft auf wasserabhängige Waldökosysteme auswirken können. Für besonders sensible Standorte wurden auf der Grundlage früherer Forschungsarbeiten Schätzungen zum Wasserbedarf für eine mögliche Bewässerung abgeleitet.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Die modellierten Wasserbilanzen veranschaulichen sowohl die zeitliche Dynamik der Bodenwassernutzung durch die Vegetation als auch die artspezifischen Reaktionen auf die Wasserverfügbarkeit, wobei Kiefern den ausgeglichensten Wasserhaushalt aufweisen und Buchen und Eichen in trockenen Perioden deutliche Anzeichen von saisonalem Wasserstress zeigen. Die Modellgüte wurde an

forstlichen Intensivmonitoringplots im Hessischen Ried bewertet, und zeigte für die verwendeten Validierungsmetriken eine gute Übereinstimmung bezüglich der simulierten Kronentraufe und Bodenfeuchte.

In den beiden untersuchten historischen Zeiträumen ist ein deutlicher Rückgang sowohl der Niederschlagsmenge als auch insbesondere der Grundwasserneubildung unter Wald im Hessischen Ried zu erkennen. Dies kann auf eine Verschiebung im Niederschlagsregime und einen erhöhten Evapotranspirationsbedarf zurückgeführt werden. Bei den Waldflächen mit Grundwasseranbindung weisen Nadelbäume eine sehr ähnliche bzw. etwas größere Grundwasserneubildung als Buchen und eine deutlich größere Grundwasserneubildung als Eichen und Laubbäume im Allgemeinen auf. Obwohl die Grundwasserneubildung unter allen Baumarten in den letzten Jahrzehnten stark von den klimatischen Bedingungen beeinflusst wurde, ist sie bei Eichen stark reduziert, wenn ihre Wurzeln Zugang zum Grundwasser haben. Die Waldbestände im Hessischen Ried sind vielerorts stark geschädigt und weisen daher meist eine geringere Blattfläche auf. Dadurch wird die Transpiration verringert, was eine erhöhte Grundwasserneubildung zur Folge hat.

In den Projektionen für die nahe und ferne Zukunft werden für die Buche die höchsten Grundwasserneubildungsraten für Standorte ohne Grundwasseranschluss simuliert, gefolgt von der Eiche, während die Kiefer die geringsten Neubildungsraten aufweist. Für Standorte mit Grundwasseranschluss sind für die Eiche die geringsten Neubildungsraten zu erwarten, während für Kiefer und Buche etwa gleiche Flussraten simuliert werden. Bei der Eiche werden die größten Unterschiede zwischen Standorten mit und ohne Grundwasseranschluss erwartet.

Die Nitratausträge unter dem Wald im Hessischen Ried liegen nach den Modellergebnissen zwischen 0 und 2 kg ha⁻¹ a⁻¹ und sind damit als sehr gering einzuschätzen. Die Simulation der zukünftigen Nitratausträge bis 2100 lassen erwarten, dass unter den angenommenen Einträgen über die Stickstoffdeposition die Nitratausträge gering bleiben. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimaprojektionen sind sehr gering ebenso wie die Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten. Ein langfristig geringes Nitrataustragsrisiko belegen auch die Beobachtungen auf Waldmonitoringflächen im Hessischen Ried. Somit kann von sehr geringen Nitratreinträgen in das Grundwasser unter den Wäldern im Hessischen Ried ausgegangen werden. Erhöhte Nitrat-Konzentrationen in der Bodenlösung der Waldmonitoringflächen zwischen 2019 und 2023 wurden durch starke Störungen wie Mistelbefall (Kiefer) sowie Pilz- und Insektenbefall (Buche und Eiche) verursacht.

Der Waldumbau ist ein zentraler Bestandteil der Waldbewirtschaftungsstrategien im Hessischen Ried. Aus einem Katalog von 34 klimaangepassten Waldentwicklungszielen wurden die jeweils klimastabilsten ausgewählt. Ferner wurde eine Priorisierung der zum Umbau anstehenden Waldbestände anhand des aktuell zu erwartenden Trockenstress vorgenommen. Die Orientierung am Trockenstress führte zu einer starken Konvergenz mit gleichen Empfehlungen für große Flächen (vorwiegend Kiefer-Eiche oder Eiche-Birke/Kiefer), was darauf hindeutet, dass nur eine begrenzte Anzahl von Artenzusammensetzungen unter den prognostizierten zukünftigen Klimabedingungen im Hessischen Ried durchgehend robust ist. Die Umsetzung dieser Waldentwicklungsziele würden zu einer Verminderung der künftigen Grundwasserneubildung führen. Neuere Erkenntnisse lassen allerdings erwarten, dass die Klimarobustheit der Kiefer bisher zu hoch eingeschätzt wurde und alternative Baumarten wie Roteiche, Zerreiche und Schwarzkiefer vermehrt angebaut werden sollten.

Als alternative Maßnahme für großräumige Grundwasseraufspiegelungen wurde eine oberflächliche Bewässerung betrachtet. Im Rahmen des Pilot-Projekts wird seit 2021 in einem Eichen-Hainbuchen-Bestand eine Bewässerung erprobt, um grundwasserabhängige Eichen-Hainbuchenwälder im Hessischen Ried zu revitalisieren. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine Bewässerung den Vitalitätszustand des Bestands verbessern konnte. Der Bewässerungsbedarf für Bestände des FFH-Lebensraumtyps 9160 Eichen-Hainbuchenwälder von ca. 420 ha im Hessischen Ried wurde aus einer Analyse des Transpirationsdefizits abgeleitet. Danach ist der Bewässerungsbedarf in der Vergangenheit bereits angestiegen und wird auch in der Zukunft noch deutlich zunehmen. Die benötigten Bewässerungsmengen sind jedoch auch bei einer geringen Effizienz der Bewässerung gering gegenüber den benötigten Wassermengen bei einer Grundwasseraufspiegelung.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die Metropolregion Frankfurt und das Hessische Ried sind durch wirtschaftliche Aktivitäten, gemeinsame Infrastruktur und insbesondere durch Wasserressourcen eng miteinander verbunden. Als eines der wichtigsten Grundwasserreservoirs in Hessen spielt das Hessische Ried eine zentrale Rolle bei der Trinkwasserversorgung des dicht besiedelten Ballungsraums und bietet gleichzeitig wichtige Standorte für die Land- und Forstwirtschaft, die Industrie und wertvolle Ökosysteme. Diese enge Verknüpfung zwischen städtischem Bedarf und ländlicher Ressourcenversorgung verdeutlicht die starke gegenseitige Abhängigkeit beider Regionen und unterstreicht die Notwendigkeit integrierter und nachhaltiger Wasserbewirtschaftungskonzepte.

Die wasserbezogenen Belastungen im Hessischen Ried sind bereits heute offensichtlich und werden sich voraussichtlich in Zukunft noch verstärken. Die zunehmende Grundwasserentnahme zur Deckung des wachsenden kommunalen industriellen und landwirtschaftlichen Bedarfs wird in Verbindung mit den projizierten Auswirkungen des Klimawandels wie steigenden Temperaturen und geringeren Niederschlägen während der Vegetationsperiode wahrscheinlich zu einer Verschärfung der Wasserknappheit führen. Diese Entwicklungen stellen erhebliche Herausforderungen für die Aufrechterhaltung der Grundwasserressourcen, der Gesundheit der Ökosysteme und der Produktivität der Landnutzung dar und verschärfen bestehende Konflikte zwischen konkurrierenden Nutzungen.

Aus hydrogeologischer Sicht reagiert das Hessische Ried besonders empfindlich auf Veränderungen der Grundwasserneubildung. Sein Untergrund besteht überwiegend aus hochdurchlässigen Sand- und Kiesablagerungen, die zwar die Versickerung und Grundwasserspeicherung begünstigen, das System aber auch anfällig für veränderte Neubildungsbedingungen und Schadstoffeinträge machen. Um dem abgesenkten Grundwasserspiegel entgegenzuwirken, wird in der Region bereits eine intensive Wasserbewirtschaftung betrieben, darunter die Begrenzung von Entnahmemengen und die künstliche Grundwasseranreicherung durch Versickerung von aufbereitetem Rheinwasser. Darüber hinaus wurden experimentelle Maßnahmen wie die situative Waldbewässerung implementiert, um Trockenstress in Waldökosystemen während längerer Trockenperioden zu mildern.

Wälder bedecken fast 30 % des Hessischen Rieds und sind eng mit der regionalen Wasserwirtschaft verbunden. Wälder sind einerseits direkt von der Grundwasserentnahme und sinkenden Grundwasserspiegeln betroffen, dienen aber auch als wichtige Neubildungsgebiete und Standorte für Infrastrukturen zur Grundwasserentnahme und -anreicherung. Obwohl die Grundwasserneubildungsraten unter Wäldern aufgrund der höheren Interzeption und Evapotranspiration im Allgemeinen niedriger sind als unter landwirtschaftlichen Flächen (Ahrends et al. 2018a; Teuling 2018; Wessolek et al. 2008; Zang et al. 2001), tragen Waldgebiete in der Regel erheblich zur Grundwasserqualität bei (Caldwell et al. 2023). Die Waldböden fungieren als natürliche Filter, entsprechend entnehmen Trinkwasserversorger das Wasser bevorzugt aus Waldgebieten (Goldscheider & Roques 2026). Ein fundiertes Verständnis der hydrologischen Prozesse im Wald ist daher für eine zuverlässige regionale Grundwassermodellierung und für die Entwicklung nachhaltiger Wasserbewirtschaftungsstrategien unerlässlich.

Vor diesem Hintergrund soll dieses Teilprojekt einen integrierten Überblick über die vergangene, aktuelle und potenzielle zukünftige Entwicklung der Grundwasserressourcen unter Wald im Hessischen Ried geben. Es befasst sich mit regionalen Besonderheiten, bestehenden und erwarteten Konflikten bei der Wassernutzung sowie der Rolle des Waldes und seiner verschiedenen Baumarten innerhalb des regionalen Wasserhaushalts. Anhand von mit dem forsthydrologischen Modell LWF-Brook90 erzeugten Simulationsergebnissen und unter Berücksichtigung zukünftiger Klima- und Waldumwandlungsszenarien soll die Entwicklung und Umsetzung umfassender, langfristiger Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwasser- und Ökosystemmanagement in der Region unterstützt werden.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Um die Ziele des Forschungsprojekts Wassersystemmodell Rhein-Main (WaRM) zu erreichen, wurden zehn Arbeitspakete (AP) definiert. Innerhalb des übergreifenden WaRM-Verbunds spielte das von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) bearbeitete Teilprojekt eine zentrale Rolle bei der Bewertung des Beitrags von Waldökosystemen zur Grundwassermenge und -qualität im Hessischen Ried sowie bei der Entwicklung und Bewertung integrierter Maßnahmen.

Der Beitrag der NW-FVA zu WaRM bestand in der quantitativen und qualitativen Bewertung der Grundwasserneubildung unter aktuellen und zukünftigen Waldbewirtschaftungsszenarien. Dies umfasste sowohl Modellierungsaktivitäten als auch die Bereitstellung hochauflösender Umweltdaten aus dem forstlichen intensiven Waldmonitoring. Durch diese Arbeit lieferte die NW-FVA wichtige Beiträge zum zentralen WaRM-Grundwassermodell und stellte evidenzbasierte Entscheidungshilfen für die Akteure der Wald- und Wasserwirtschaft in der Region bereit.

Ein wichtiger Bestandteil des Teilprojekts war die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung (AP1). Mit dem Modell LWF-Brook90 (Hammel & Kennel 2001), welches sich besonders gut für die Untersuchung komplexer hydrologischer Fragestellungen in Wäldern eignet (Schmidt-Walter et al., 2019, 2020), wurden Simulationen des Wasserhaushalts der Wälder im Hessischen Ried durchgeführt. Darüber hinaus stellte die NW-FVA ihre Expertise zur Parametrisierung und Kalibrierung des MIKE-SHE-Modells in Waldgebieten zur Verfügung und unterstützt durch Langzeit-Monitoringdaten. Die Ergebnisse der Grundwasserneubildung aus LWF-Brook90 für vergangene und zukünftige Klimabedingungen sowie unter Berücksichtigung verschiedener forstlicher Maßnahmenoptionen wurden als Input in das WaRM-Wassersystemmodell integriert.

Darüber hinaus wurde die Stickstoffdeposition und der Stickstofftransport in das Grundwasser in den Waldgebieten der Untersuchungsregion geschätzt (AP2). Zu diesem Zweck wurden regionalisierte Depositionsdaten durch Beobachtungen an drei etablierten Intensivmonitoringstandorten mit Buchen-, Eichen- und Kiefernbeständen ergänzt.

Das Teilprojekt unterstützte die Integration von Modellierungsergebnissen sowohl für die Grundwassermenge als auch für die Stickstoffbelastung des Grundwassers und schuf eine methodische Schnittstelle zwischen forsthydrologischen Simulationen und der Modellierung der Nitratauswaschung. Auf dieser Grundlage entwickelte die NW-FVA Waldbewirtschaftungsszenarien und Maßnahmenoptionen, die sich auf die Auswahl klimaresilienter Baumarten, Strategien zum Waldumbau sowie den Schutz und die Revitalisierung von Eichen-Hainbuchenwäldern durch Oberflächenbewässerung konzentrierten.

Schließlich trug die NW-FVA zur Entwicklung von Szenario-Kombinationen innerhalb des integrierten WaRM-Projekts bei. Mit Hilfe verbesserter Grundwassermodelle wurde bewertet, wie sich Veränderungen der Grundwasserneubildung – beispielsweise durch den Klimawandel – in Zukunft auf wasserabhängige Waldökosysteme auswirken könnten. Für besonders sensible Standorte wurden auf der Grundlage früherer Forschungsarbeiten Schätzungen zum Wasserbedarf für eine mögliche Bewässerung abgeleitet. Die Ergebnisse des Teilprojekts einschließlich der überarbeiteten Waldentwicklungsziele wurden über die Online-Plattformen LURCH und WaRM sowie auf internationalen und nationalen Konferenzen an Interessengruppen und die Öffentlichkeit verbreitet und unterstützen so den Wissensaustausch nicht nur in Hessen, sondern potenziell auch in anderen Bundesländern, in denen vergleichbare Bedingungen herrschen.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

II.3.1 Der Wald im Hessischen Ried: Untersuchungsgebiet und Datenquellen

Die Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main liegt im Zentrum Europas und erstreckt sich über die drei Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz und Bayern. Die Region erstreckt sich über wichtige städtische und ländliche Gebiete Hessens, darunter das Hessische Ried, ein Teil der Oberrheinischen Tiefebene östlich des Rheins und südlich von Frankfurt (Abbildung 1). Das Hessische Ried zeichnet sich durch sein tief gelegenes, fruchtbares Land mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung aus, welches darüber

hinaus große Waldflächen mit hohem ökologischem und naturschutzfachlichem Wert aufweist. Die Waldgebiete des Hessischen Rieds beherbergen eine vielfältige Flora und Fauna. Sie dienen als wichtiger Naherholungsraum innerhalb der größeren Metropolregion. Das Hessische Ried ist ein Gebiet mit ergiebigen Grundwasservorkommen, die zur Deckung eines Teils des Trinkwasserbedarfs der Bevölkerung in der Metropolregion genutzt werden. Darüber hinaus werden die Grundwasserressourcen aus dem Hessischen Ried zur Bewässerung landwirtschaftlich genutzter Flächen genutzt. Daher spielt das Hessische Ried eine entscheidende Rolle für die Wasserversorgung eines großen Teils der Metropolregion.

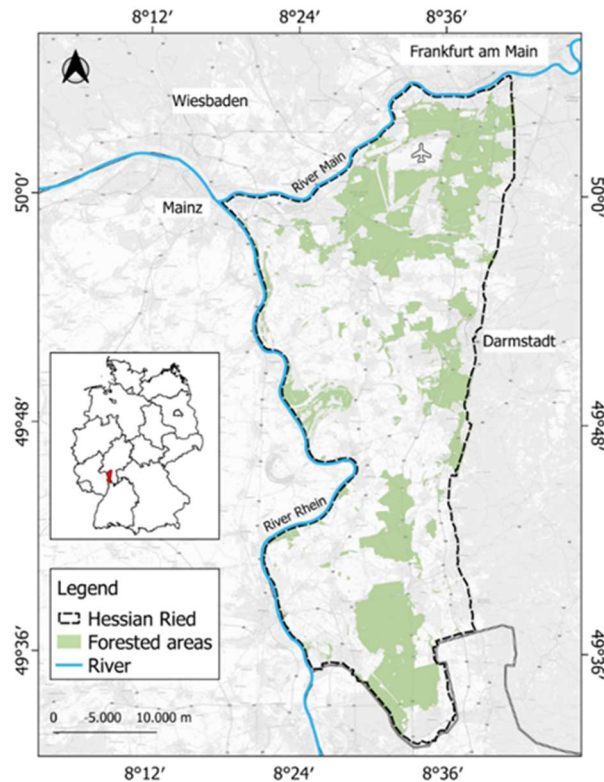


Abbildung 1. Untersuchungsgebiet: Hessisches Ried im Süden Hessens. Die grün dargestellten Flächen bilden die Waldflächen ab.

Das Hessische Ried gehört zu einer der wärmsten und trockensten Klimazonen Mitteleuropas und wurde aufgrund der hohen Sommertemperaturen und der zunehmenden Häufigkeit von Dürren als Hotspot des Klimawandels identifiziert (Fachzentrum Klimawandel Hessen im HLNUG, 2017). Die langfristige Klimanormalperiode für den Zeitraum 1961–1990 weist für die Region eine mittlere Jahrestemperatur von 10 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von 675 mm auf (Daten nur aus bewaldeten Gebieten, berechnet aus der Interpolation historischer Daten von Klimastationen). Im Gegensatz dazu stiegen die Temperaturen im jüngeren Referenzzeitraum 1991–2020 auf 11 °C, während die jährliche Niederschlagsmenge auf 627 mm zurückging, was den anhaltenden Klimawandel widerspiegelt, von dem weite Teile der Oberrheinischen Tiefebene betroffen sind.

Geologisch liegt das Hessische Ried im nördlichen Oberrheingraben und besteht unterirdisch vorwiegend aus quartären Lockersedimenten (Sand und Kies), die durch fluviatile Prozesse abgelagert wurden (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), 2021). Diese Sedimentschichten erreichen eine durchschnittliche Mächtigkeit von etwa 100 Metern und bilden einen hochporösen und durchlässigen Grundwasserleiter, der für die regionale Grundwasserspeicherung und -neubildung von entscheidender Bedeutung ist (Wasserverband Hessisches Ried). Die Böden im Hessischen Ried besteht größtenteils aus sandigen bis lehmigen Substraten, darunter sandiger Lehm, lehmiger Sand, schluffig-sandiger Lehm und sandig-toniger Lehm. Aufgrund dieser groben Textur

weisen diese Böden in der Regel eine relativ geringe Feldkapazität auf, was wichtige Auswirkungen sowohl auf den Wasserrückhalt als auch auf die Nährstoffauswaschung hat (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), 2024).

Das Teilprojekt konzentriert sich auf die bewaldeten Teile des Hessischen Rieds, die sich über eine Fläche von etwa 28.000 ha erstrecken, von denen etwa 51 % als Staatswald, 44 % als Gemeindewald und etwa 5 % als Privat- oder Bundeswald bewirtschaftet werden (Ahner et al. 2013). Die Waldbestände werden von Stieleiche (*Quercus robur*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*) und Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) dominiert, die zusammen die Waldstruktur der Region prägen und eine zentrale Rolle für die Grundwasserneubildung, die Bereitstellung von Lebensräumen und weitere Ökosystemleistungen spielen.

Die NW-FVA betreibt in ihren vier Trägerländern etwa fünfzig intensive Waldbeobachtungsflächen. Auf jeder Fläche werden umfassende Langzeitbeobachtungen zu Klima, Bodenwasser- und Nährstoffdynamik, Nährstoffversorgung der Bäume und Waldwachstum durchgeführt. Das übergeordnete Ziel dieses Beobachtungsprogramms ist es, Umwelteinflüsse auf Wälder und deren Veränderungen im Laufe der Zeit zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten (ForUmV-AG 2016). In Hessen führt die NW-FVA intensive Umweltbeobachtungen auf sieben europäischen Level-II-Flächen durch, die von Buchen, Kiefern und Eichen dominiert werden. Das Level-II-Beobachtungsprogramm erfasst standardmäßig Daten zu dreizehn Erhebungsbereichen. Hierzu gehören Langzeitmessungen des Kronenzustands, des Baumwachstums, des Ernährungszustands, der Phänologie, der Bodenvegetation, der atmosphärischen Deposition, der Streufallmenge und -qualität, der Bodenwassermenge und -qualität, der Bodenchemie, der Meteorologie und der Luftqualität. Für die vorliegende Studie wurden zwei Langzeitdatensätze von Level-II-Flächen im Hessischen Ried mit Buchen und Eichen sowie ein Datensatz aus einem im Rahmen der Waldökosystemstudie Hessen (WÖSSH) überwachten Kiefernbestand verwendet. Die Datensätze umfassen u.a. kontinuierliche und hochauflösende Messungen des Bestandsniederschlags und des Bodenwassergehalts in verschiedenen Tiefen.

Das digitale Landschaftsmodell ATKIS® (Basis-DLM) (<https://hvb.g.hessen.de>) wurde in Kombination mit von HessenForst bereitgestellten Daten aus der Forsteinrichtung verwendet. Die Polygonattribute des Basis-DLM beschränken sich auf den Waldtyp (Misch-, Laub- oder Nadelwald) und enthalten daher keine spezifischen Informationen über Baumarten. Die Forsteinrichtung hingegen umfasst unter anderem Angaben zu Baumarten, Alter, Derbholzvolumen und Ertragsklasse. Für diese Studie wurden nur die Daten aus der letzten Forsteinrichtung (2012 – 2019) und für die oberste Bestandsschicht berücksichtigt. Da die Forsteinrichtung für etwas mehr als 50 % der Waldflächen im Privat- und Kommunalbesitz nicht vorliegt, wurden hier die im Basis-DLM enthaltenen Informationen verwendet. Die wichtigsten Baumarten im Hessischen Ried sind Kiefer (18,6 %), Eiche (12,3 %) und Buche (9,2 %). Sonstige Baumarten sind vorwiegend Ahorn, Erle, Esche, Birke, Douglasie, Lärche, Linde, Pappel, Roteiche, Fichte und Weymouth-Kiefer.

Um eine genauere Schätzung der Flächen zu erhalten, die von den wichtigsten Baumarten Buche, Eiche und Kiefer eingenommen wird, wurde die Verteilung der Waldfläche neu berechnet. Bei diesem Ansatz wurde die Hälfte der Laubwaldfläche aus dem Basis-DLM der Buche und der Eiche zugeordnet, und ein Drittel der Mischwaldfläche wurde zu gleichen Teilen der Buche, der Eiche und der Kiefer zugewiesen. Die sich daraus ergebende Verteilung betrug 8.165 ha (27,2 %) für die Buche, 9.088 ha (30,3 %) für die Eiche und 10.408 ha (34,7 %) für die Kiefer.

Das Modell LWF-Brook90 benötigt den maximalen Blattflächenindex (LAI) und den Stammflächenindex (SAI) als wichtige Eingabeparameter für die Simulation von Komponenten des Wasserhaushaltes (Interzeption, Transpiration). Zur Schätzung von LAI und SAI wurden allometrische Funktionen verwendet, die von Weis et al. (2023) entwickelt wurden (Gl. 1, 2):

$$\text{LAI} = \text{SLA} \cdot N \cdot \exp(l_0 + l_1 \cdot \ln(\text{Dg}) + l_2 \cdot \ln(\text{Hg}) + l_3 \cdot \ln(A)) \div 10000 \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{SAI} = N \cdot \exp(s_0 + s_1 \cdot \ln(\text{Dg}) + s_2 \cdot \ln(\text{Hg}) + s_3 \cdot \ln(A)) \div 10000 \cdot \pi \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei SLA die Blatt-/Nadelfläche in m^2 ist, l_0 bis l_3 und s_0 bis s_3 Modellanpassungsparameter sind, N die Anzahl der Bäume pro Hektar (N ha^{-1}), Dg der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (Dg in cm), Hg die Höhe des Grundflächenmittelstammes (Hg in m) und A das Bestandesalter (A in Jahren). Je nach Datenverfügbarkeit können die Schätzmodelle entweder nur mit dem Dg, mit dem Dg und Hg oder mit Hilfe des Dg, Hg und des Alters parametrisiert werden (vgl. Weis et al. 2023). Die Ergebnisse des LAI-Schätzmodells für die Kiefer wurden mit dem Faktor 1,77 korrigiert, da Vergleiche mit anderen LAI-Schätzfunktionen (Ahrends et al. 2018b) und Streufallmodellen (Ahrends et al. 2010) auf eine systematische Unterschätzung hindeuten.

Die Funktionen (Gl. 1 und 2) standen für die dominanten Baumarten in Deutschland (Eiche, Buche, Kiefer, Douglasie und Fichte) zur Verfügung. Um LAI und SAI für weitere Arten im Hessischen Ried zu schätzen, wurde eine Zuordnung auf der Grundlage ähnlicher biologischer Merkmale vorgenommen, die sich an Hansen & Nagel (2014) orientiert. Um die erforderlichen Werte für N, Dg, Hg und A abzuleiten, wurden die ertragskundlichen Daten für die Polygone, die Informationen aus der Forsteinrichtung über Baumalter, Ertragsklasse und Artenzusammensetzung enthielten (Polygone der Forsteinrichtung) je nach Ertragsklasse aus baumartenspezifischen Ertragstafeln (Albert et al. 2024) abgeleitet.

Die Wälder im Hessischen Ried weisen aufgrund extremer Wetterbedingungen und Grundwasserabsenkung seit Jahren zunehmende Schäden auf. Dies lässt sich anhand der Waldzustandsaufnahmen erkennen, die seit 1984 jährlich erhoben werden und einen höheren Schädigungsgrad als im übrigen Hessen aufweisen (Paar & Klinck, 2025). Um die tatsächlichen Bestockungsverhältnisse im Modell zu berücksichtigen und somit die Grundwasserneubildung realistisch quantifizieren zu können, wurde die aus den Ertragstafeln abgeleitete Bestandesdichte (N) unter Verwendung des Bestockungsgrades als Skalierungsfaktor gewichtet. Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Bestockungsgrade aus der Forsteinrichtung. Nur die Roteiche weist einen mittleren Bestockungsgrad von über 1,0 auf, während die meisten Baumarten einen mittleren Bestockungsgrad zwischen 0,6 und 1,0 haben. Schließlich wurden die allometrischen Funktionen auf die extrahierten und korrigierten Daten für jedes Polygon angewendet, um den LAI und den SAI zu schätzen.

Waldgebiete ohne Angabe der Baumarten (d. h. Basis-DLM-Daten) wurden entsprechend der Verteilung der Baumarten in der jeweiligen Region klassifiziert: Der Laubwaldanteil wurde als Kombination aus Eiche und Buche behandelt, der Nadelwaldanteil als Kiefer und der Mischwaldanteil als Kombination aus Eiche, Buche und Kiefer. Daher wurden für diese Gebiete die SAI- und LAI-Werte verwendet, die aus den allometrischen Funktionen für diese Arten geschätzt wurden.

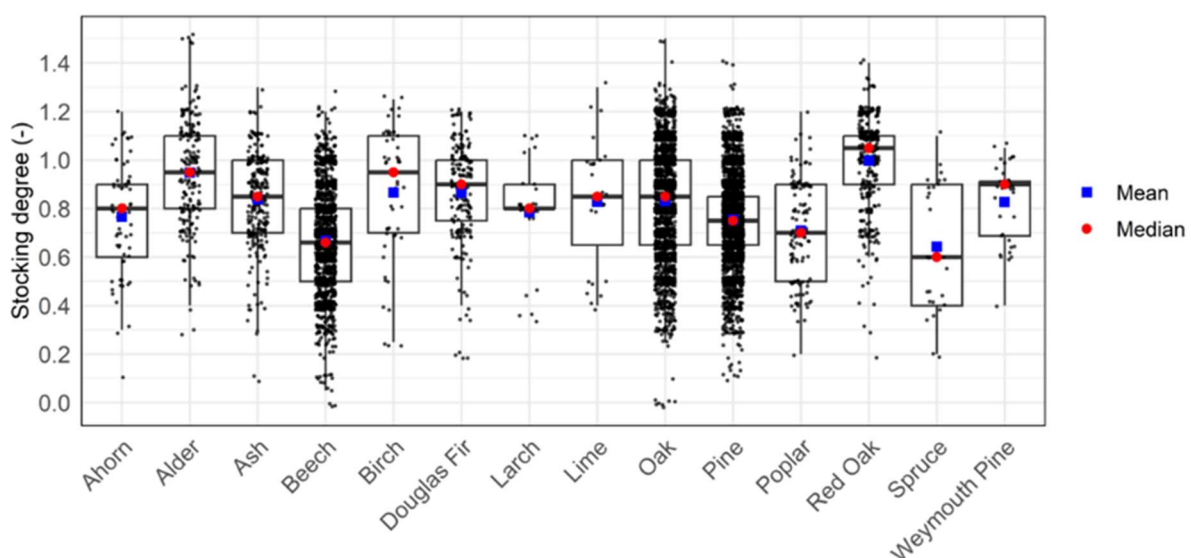


Abbildung 2. Bestockungsgrad (Stocking degree) nach den Daten der Forsteinrichtung für verschiedene Baumarten im Hessischen Ried (Mean: Mittel, Ahorn: Ahorn, Alder: Erle, Ash: Esche,

Beech: Buche, Birch: Birke, Douglas Fir: Douglasie, Larch: Lärche, Lime: Linde, Oak: Eiche, Pine: Kiefer, Poplar: Pappel, Red Oak: Roteiche, Spruce: Fichte, Weymouth Pine: Weymouthkiefer).

Die Bodeninformationen wurden den Bodenflächendaten von Hessen im Maßstab 1:50.000 (BFD50) (<https://www.hlnug.de>) entnommen. Auf der BFD50-Karte werden die Bodeneinheiten als Polygone dargestellt. Die Eigenschaften der Bodeneinheiten auf der BFD50-Karte werden in zusätzlichen Attribut-Dateien gemäß dem Hessischen Datenerfassungsstandard horizontweise bis zu einer Tiefe von 200 cm aufgeschlüsselt (<https://bodenviewer.hessen.de>). Die Beschreibung umfasst die Klassifizierung der Bodenart, die Humusform, den Kohlenstoffgehalt, die Bodendichte und den Grobbodengehalt gemäß Ad-hoc-AG Boden (2005). Aus diesen Informationen wurden die für die hydrologischen Simulationen mit LWF-Brook90 notwendigen bodenhydraulischen Parameter abgeleitet. Die Mächtigkeit des Auflagehumus wurden in Abhängigkeit von der in der BFD50 hinterlegten Humusform nach Ahner et al. (2013) abgeschätzt.

Die Modellgüte von LWF-Brook90 verbessert sich, wenn die Bodenprofile in möglichst kleine Schichten diskretisiert werden (Hammel & Kennel 2001). Die Bodenprofile wurden mit einer vertikalen Auflösung von 5 cm in den oberen 100 cm diskretisiert, um steile Gradienten der Bodenfeuchte und der Wasseraufnahme der Wurzeln im Oberboden erfassen zu können. Unterhalb einer Tiefe von 1 m, wo die vertikalen Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften weniger abrupt verlaufen, wurde eine gröbere Auflösung von 10-cm-Schichten bis zur maximalen Bodentiefe von 5 m angewendet. Diese ungleichmäßige Diskretisierung mit dünneren Schichten an der Oberfläche und dickeren Schichten in der Tiefe folgt den Empfehlungen der Literatur (z. B. Fichtner et al., 2025) und schafft einen Ausgleich zwischen numerischer Genauigkeit und Recheneffizienz.

Die bodenhydraulischen Parameter der Richards-Gleichung (Restwassergehalt (θ_r , m^3/m^3), Sättigungswassergehalt (θ_s , m^3/m^3), der inverse Lufttrittspunkt (α , $1/\text{cm}$), der Porengrößenverteilungsparameter (n , dimensionslos) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (m/s)) wurden schichtbezogen mit Hilfe der Pedotransferfunktionen von Wessolek et al. (2009) ermittelt. Die bodenhydraulischen Parameter für Torfhorizonte wurden aus Wösten et al. (1999) für jeden Parameter abgeleitet.

Die mittlere Exposition der Bodenoberfläche an jedem Bodenprofil und die Neigung für die Berechnung der Evapotranspiration und der Schneeschmelze (eslope, in Grad) wurden an LWF-Brook90 übergeben, um topografische Einflüsse auf Strahlung, Energiebilanz und mikroklimatische Bedingungen zu berücksichtigen.

Der Grundwasserflurabstand wurden vom Projektpartner BGS Umwelt für das Untersuchungsgebiet aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Aufbereitung erfolgt jeweils für zwei jährliche Termine, April und Oktober. Für die vorliegenden Simulationen wurde der Grundwasserspiegel vom Oktober 1960 als Anfangsbedingung verwendet, und die Modellergebnisse wurden ab Januar 1961 ausgewertet. BGS-Umwelt stellte auch ein DGM zur Verfügung, das zur Umrechnung der absoluten Grundwasserstände in die Grundwasserflurabstände verwendet wurde. Die gleichen Verarbeitungsschritte wurden auf die Grundwasserdaten aus dem Jahr 2013 angewendet, um einen zeitlichen Vergleich zu ermöglichen. Diese historischen Messungen zeigen in den letzten Jahrzehnten einen fortschreitenden Verlust der Grundwasseranbindung für die Wälder in Teilen des Hessischen Ried (Abbildung 3).

Die Waldflächen wurden nach ihrer Grundwasseranbindung klassifiziert. Waldflächen mit Grundwasseranbindung sind solche, bei denen der Grundwasserflurabstand zu Beginn des Simulationszeitraums (Oktober 1960) 10 cm oder weniger unter der maximalen Wurzeltiefe lag. Insgesamt war unter diesen Ausgangsbedingungen etwa 26 % der Waldfläche angebunden; für die übrigen Flächen wurde keine Grundwasseranbindung angenommen. Obwohl im Laufe der Jahre weitere Waldflächen ihre Anbindung verloren haben, simuliert das Modell keine dynamischen zeitlichen Veränderungen des Grundwasserspiegels.

Die Studie umfasst den Zeitraum von 1960 bis 2100 und ermöglicht eine Bewertung des Wasserhaushalts der Wälder im Hessischen Ried unter vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen. Es wurden historische tägliche meteorologische Daten (1960–2023) und Projektionen auf der Grundlage des Szenarios „Representative Concentration Pathway“ (RCP) 8.5 verwendet. RCP8.5 steht für einen „weiter-so-wie-bisher“-Pfad, der durch weiter steigende Treibhausgasemissionen gekennzeichnet ist (Sutmöller et al. 2021). Die generierten täglichen Datensätze umfassen die Variablen: Minimumtemperatur (°C), Höchsttemperatur (°C), Durchschnittstemperatur (°C), Dampfdruck (hPa), Windgeschwindigkeit (m s^{-1}), relative Luftfeuchtigkeit (%), Globalstrahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{Tag}^{-1}$), Niederschlag (mm) und Referenz-Evapotranspiration (mm). Zur Generierung von bias-korrigierten täglichen Stationsdaten wurde die Quantile-Mapping-Methode angewendet (Sutmöller et al. 2021).

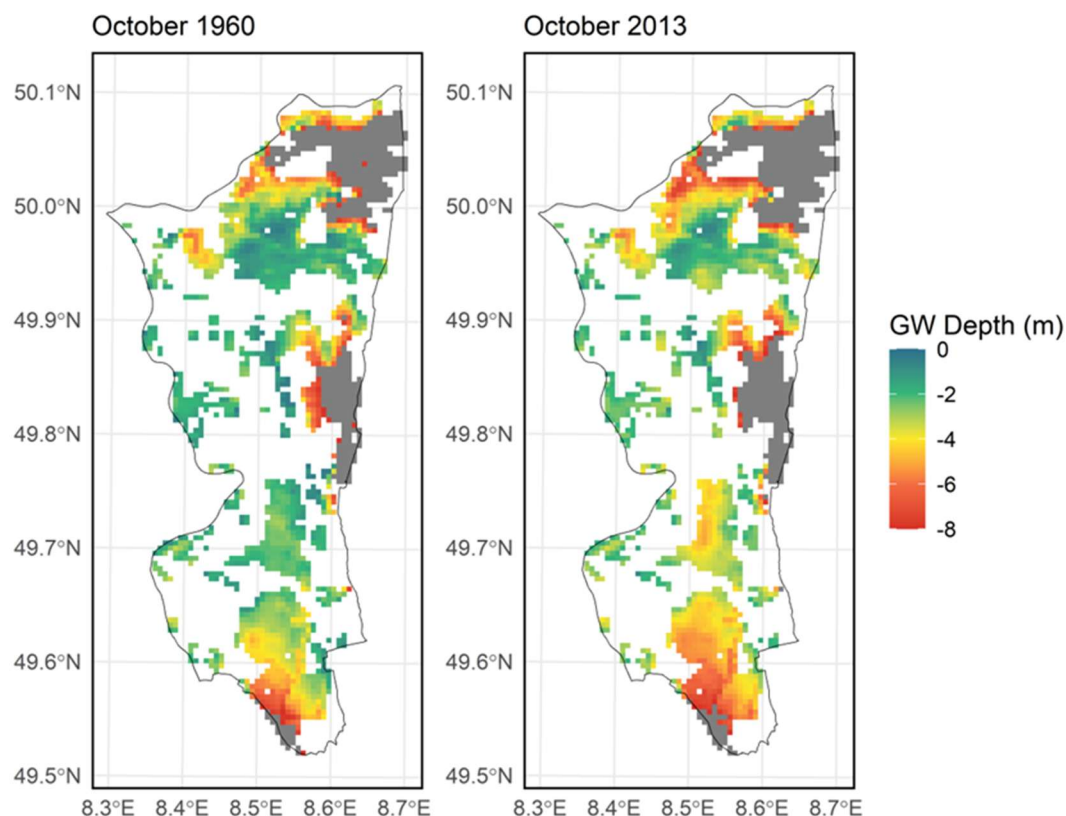


Abbildung 3. Grundwasserflurabstand (GW Depth) unter Waldflächen im Hessischen Ried im Oktober 1960 und im Oktober 2013 (graue Flächen kennzeichnen Areale mit Grundwasserflurabstand > 8 m)

Das verwendete Ensemble von Klimaprojektionen umfasst vier Kombinationen aus globalen (GCM) und regionalen (RCM) Klimamodellen aus dem RCP 8.5-Szenario (Tabelle 1). Jedes Ensemblemitglied liefert Einblicke in die regionale Klimaentwicklung unter RCP8.5; zusammen bilden sie die Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung ab (wärmere, feuchtere Winter und heißere, trockenere Sommer), wobei für Hessen bis zum Ende des Jahrhunderts gleichzeitig eine Zunahme klimatischer Extreme projiziert wird.

Tabelle 1. Ensemble der Klimaprojektionen für das RCP 8.5-Szenario

Name	GCM (globales Klimamodell)	RCM (regionales Klimamodell)
EC-EARTH r12_rcp85_RACMO	ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E
MIROC5 r1_rcp85_CCLM	MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17
HadGEM2 r1_rcp85_WETTREG	MOHC-HadGEM2-ES (r1)	WETTREG2018
MPI-ESM r1_rcp85_WRF	MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H

Trotz Modellunterschieden zeigen alle Klimaprojektionen einen konsistenten Anstieg der potenziellen Evapotranspiration aufgrund steigender Temperaturen, während die Niederschlagstrends in Umfang und Richtung zwischen den Modellen variieren (Abbildung 4).

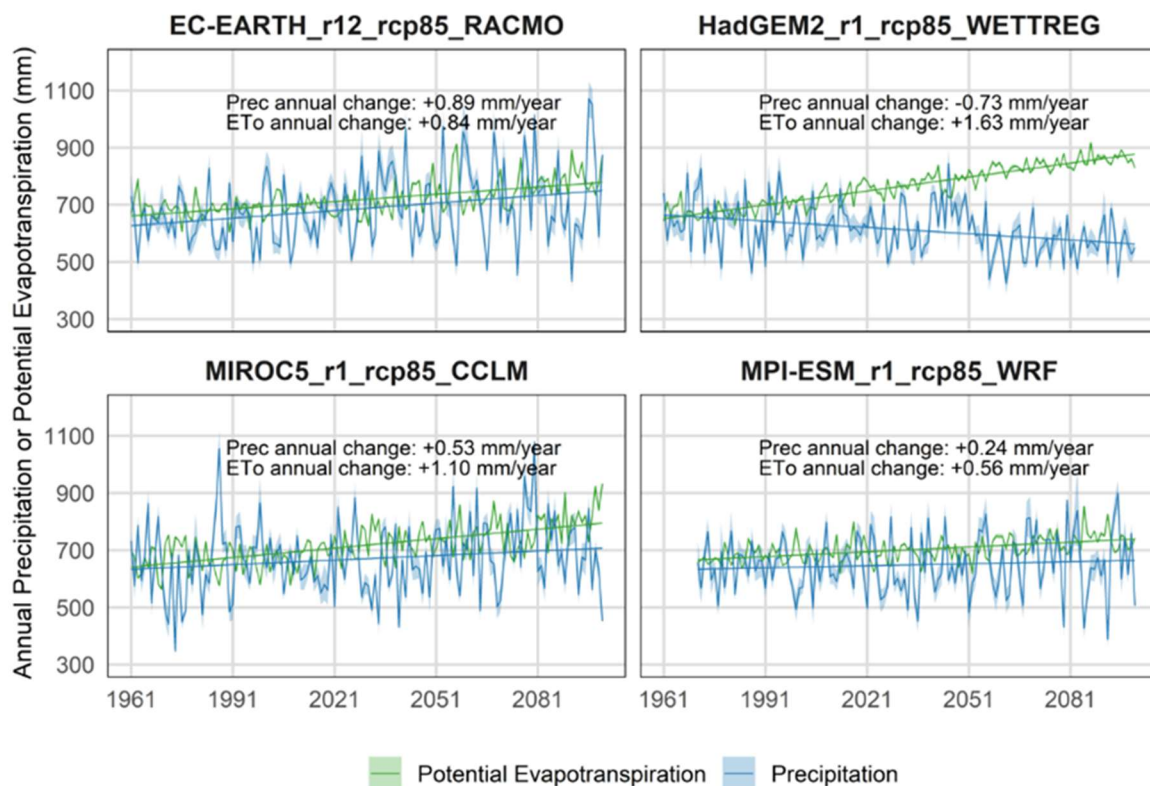


Abbildung 4. Jährlicher Niederschlag (Annual Precipitation, Prec, blau) und potenzielle Evapotranspiration (Potential Evapotranspiration, ETo, grün) für die vier Klimaprojektionen (s. Tabelle 1) unter RCP8.5. Lineare Trendlinien zeigen die jährlichen Änderungsraten (annual change, mm/year) für beide Variablen im gesamten Zeitraum.

Einige der hier vorgestellten Auswertungen wurden auf Basis eines 30-jährigen Mittels durchgeführt. Der historische Zeitraum bezieht sich auf die Klimanormalperiode 1961–1990 und der Referenzzeitraum auf 1991–2020. Aus Gründen der Kompatibilität mit den Ergebnissen im Rahmen des WaRM-Projekts beziehen sich die Ergebnisse für die nahe Zukunft auf den Zeitraum 2021–2050 und die Ergebnisse für die ferne Zukunft auf den Zeitraum 2071–2100. Die Klimaprojektionen EC-EARTH_r12_rcp85_RACMO, HadGEM2_r1_rcp85_WETTREG und MPI-ESM_r1_rcp85_WRF wurden von allen Teilprojekten verwendet, um die Bandbreite der zukünftigen Klimaentwicklung zu beschreiben. Die Klimaprojektion MIROC5_r1_rcp85_CCLM wurde in diesem Teilprojekt zusätzlich betrachtet, um eine weitere Variante abzubilden.

II.4 Erzielte Ergebnisse

II.4.1 Grundwassermenge

II.4.1.1 Modellanwendung

Das LWF-Brook90R-Paket wurde verwendet (Schmidt-Walter et al., 2020), um die historische und zukünftige Bodenwasserdynamik und ihre Auswirkungen auf die Grundwasserressourcen im Untersuchungsgebiet zu untersuchen. LWF-Brook90 ist ein physikalisch basiertes 1D-Wasserhaushalts-

modell für Boden-Vegetation-Atmosphäre-Transfer (SVAT), das zur Simulation der täglichen Evapotranspiration, der Bodenfeuchtedynamik, der Versickerung und anderer Prozesse in Waldökosystemen entwickelt wurde (Hammel & Kennel, 2001). In seiner neuesten Version (LWF-Brook90R 0.6.0) berücksichtigt es auch den Kapillaraufstieg.

Alle Eingabedatensätze einschließlich Baumarten, LAI, SAI, Bodenprofile, Höhenlage und Grundwasserflurabstand wurden räumlich zu einem einheitlichen Raster von 500 m × 500 m aggregiert. Dies ergab insgesamt 2048 Zellen, denen jeweils ein repräsentativer Satz von Attributen zugewiesen wurde. Die Modelleingaben für jede Zelle wurden mit dem LWF-BrookUtils-Paket generiert. Die mit diesem Paket berechneten Parameterwerte orientieren sich an der Parametrisierung, die von Weis et al. (2023) anhand der Bestände des intensives, waldökosystemarisches Dauerbeobachtungsprogramm in Deutschland (Level-II-Monitoring) abgeleitet wurden.

Für den Vegetationsdatensatz wurden jeder Rasterzelle der mittlere LAI, SAI, das Alter und die Höhe zugewiesen, die der dominierenden Baumart entsprechen. Für Laubwälder wurden artspezifische Parameter aus Buche und Eiche gemittelt, für Mischwälder aus Buche, Eiche und Kiefer und für Nadelwälder wurden die Parametrisierung für Kiefer verwendet. In der Parametrisierungsroutine wurden diejenigen Parameter, für die standortspezifische Werte vorliegen, durch diese ersetzt: maxlai, sai_ini, age_ini, height_ini, max_rootdepth, eslope, aspect und water_table_depth.

Die rasterbasierte Diskretisierung bot einen effektiven und rechenzeiteffizienten Ansatz zur Darstellung der räumlichen Variabilität von Bodenwasserdynamik und Grundwasserneubildung für ein eindimensionales (1D) Modell wie LWF-Brook90. Jede Rasterzelle fungiert als unabhängige vertikale 1D-Säule, ohne laterale Wasserströme zu simulieren, was die Rechenzeit im Vergleich zu dreidimensionalen (3D) Modellen erheblich reduziert. Aufgrund der weitgehend ebenen Lage der Wälder im Hessischen Ried wird die Bedeutung lateraler Prozesse jedoch gering eingeschätzt. Insgesamt wird die rasterbasierte Struktur als angemessener Kompromiss einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Recheneffizienz und räumlicher Detailgenauigkeit erachtet. Der Modellierungsansatz stellt somit ein robustes, anpassungsfähiges und skalierbares Werkzeug für die Modellierung aktueller Bedingungen und die Abbildung der Projektion zukünftiger Umweltszenarien dar.

II.4.1.2 Modellergebnisse

Tabelle 2. Validierung der Modelgüte anhand Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE), Kling-Gupta-Effizienz (KGE), quadratischen Mittelwertfehler (RMSE) und Bestimmtheitsmaß (R^2) für Bodenwassergehalte in verschiedenen Bodentiefen an drei Intensivmonitoringplots (Buche, Eiche, Kiefer) im Hessischen Ried.

Baumart /Plot	Tiefe (cm)	NSE	KGE	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	R ²
Buche	10	-0.29	0.59	0.060	0.66
	20	-1.48	0.43	0.083	0.74
	30	0.45	0.74	0.038	0.65
	40	0.27	0.69	0.043	0.61
	60	-0.52	0.63	0.065	0.50
	100	-0.52	0.61	0.067	0.44
Eiche	10	0.05	0.60	0.055	0.80
	20	0.57	0.74	0.037	0.69
	30	0.65	0.71	0.034	0.67
	40	0.53	0.77	0.039	0.72
	60	-1.09	0.63	0.089	0.69
	100	-4.36	0.49	0.116	0.40
Kiefer	10	0.34	0.59	0.033	0.73
	20	0.33	0.54	0.033	0.72
	30	0.21	0.62	0.036	0.58
	40	-0.54	0.41	0.050	0.49
	60	-0.57	0.49	0.050	0.43
	100	-1.20	0.06	0.068	0.28

Die Modellgüte wurde an Intensivmonitoringplots im Hessischen Ried bewertet, indem der täglich gemittelte simulierte Bodenwassergehalt aus LWF-Brook90 mit dem Mittelwert der täglichen Beobachtungen mittels drei Sensoren pro Tiefe (10, 20, 30, 40, 60 und 100 cm) in jeder Parzelle (Buche, Eiche und Kiefer) verglichen wurde. Die Validierungsmetriken umfassten die Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE), die Kling-Gupta-Effizienz (KGE), den quadratischen Mittelwertfehler (RMSE) und das Bestimmtheitsmaß (R^2) (Tabelle 2). Insgesamt variierte die Modellgüte je nach Tiefe und Baumart. Trotz Einschränkungen deuten die KGE-Werte in den meisten Tiefen (0,60–0,77) darauf hin, dass das Modell die zeitliche Gesamtdynamik des Bodenwassergehalts angemessen wiedergegeben hat. Insgesamt hat LWF-Brook90 die Bodenfeuchtedynamik in den oberen und mittleren Bodenschichten gut wiedergegeben, während die Performanz in Richtung der tieferen Horizonte abnahm. Diese Ergebnisse unterstreichen die Empfindlichkeit der Modellvalidierung gegenüber Messgenauigkeit, Tiefendiskretisierung und Datenvollständigkeit, insbesondere bei heterogenen Waldböden.

Die Kronentraufe wurde im Modell als Differenz zwischen Niederschlag und Interzeption berechnet und mit den Beobachtungen der Kronentraufe auf jeder der drei Parzellen verglichen. Das Modell konnte die wichtigsten Maxima der im Feld beobachteten Kronentraufe gut erfassen. Der quantitative Vergleich anhand von Regressionsanalysen ergab eine gute Übereinstimmung zwischen modellierter und beobachteter Kronentraufe (Abbildung 5). Die Regressionsanalysen zeigten eine systematische Unterschätzung bei allen Arten, d. h. Steigungen der Regressionsfunktion unter 1. Die Verzerrung war bei Eiche gering, bei Kiefer und Buche jedoch ausgeprägter, was darauf hindeutet, dass das Modell die Kronentraufe für diese Arten unterschätzte.

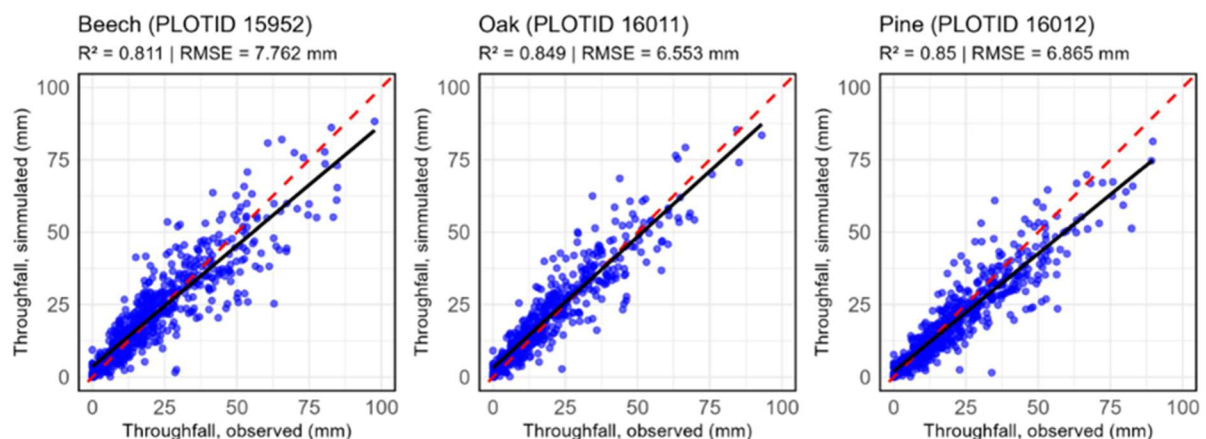


Abbildung 5. Regressionsanalyse für simulierte und beobachtete kumulative Kronentraufe an Intensivmonitoringplots im Hessischen Ried (14-tägige Sammelintervalle).

Die monatliche Wasserbilanz für Buchen-, Eichen- und Kiefernflächen wurde für den Zeitraum 2010–2022 analysiert und zeigt Niederschlag (P), Transpirationsdefizit (Td), tatsächliche Transpiration (Ta), Interzeption (Ei), Bodenverdunstung (Es, beinhaltet die Interzeption und Transpiration der Bodenvegetation), Oberflächenabfluss (R) und Grundwasserneubildung (GWR, die bei positiven Werten einen Aufwärtsfluss und bei negativen Werten einen Abwärtsfluss darstellt). Bei Buche und Eiche ist im Laufe der Jahre ein deutlicher Anstieg des Transpirationsdefizits (Td) zu verzeichnen, was auf einen zunehmenden saisonalen Wasserstress hinweist (Abbildung 6). Die simulierten Kiefernbestände hingegen zeigen nur in 2018 und 2022 geringen Wasserstress, wobei das Transpirationsdefizit niedrig bleibt.

Die Wasserbewegung findet ausschließlich in vertikaler Form als Grundwasserneubildung statt, wobei zeitweise auch ein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser stattfindet. Nach Jahren mit geringen Niederschlägen werden minimale oder fehlende Grundwasserneubildungsraten im folgenden Jahr registriert, was die starke Kopplung zwischen jährlichen Niederschlägen und der Bodenwasserdynamik widerspiegelt. So fallen beispielsweise die Trockenjahre 2011 und 2018 mit einer nahezu ausbleibenden Grundwasserneubildung in den folgenden Jahren zusammen.

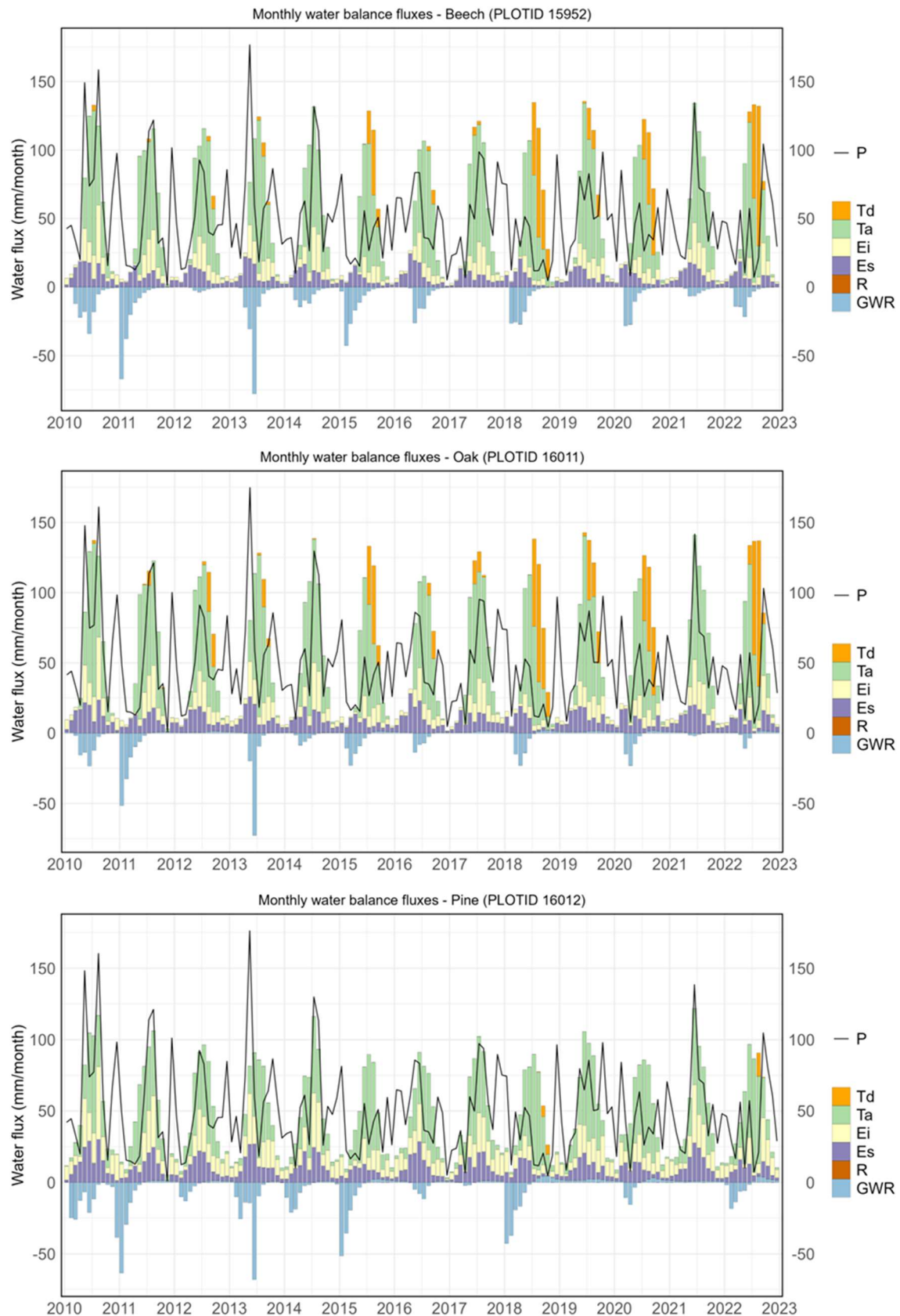


Abbildung 6. Komponenten der Wasserbilanz an drei Intensivmonitoringflächen (oben: Buche, Mitte: Eiche, unten: Kiefer) im Hessischen Ried (P: Niederschlag, Td: Transpirationsdefizit, Ta: Transpiration (real), Ei: Interception, Es: Bodenverdunstung, R: Oberflächenabfluss, GWR: Grundwasserneubildung)

Insgesamt veranschaulichen die Wasserbilanzen sowohl die zeitliche Dynamik der Bodenwassernutzung durch die Vegetation als auch die artspezifischen Reaktionen auf die Wasserverfügbarkeit, wobei Kiefern den ausgeglichensten Wasserhaushalt aufweisen und Buchen und Eichen in trockenen Perioden deutliche Anzeichen von saisonalem Wasserstress zeigen.

In den beiden untersuchten historischen Zeiträumen ist ein deutlicher Rückgang sowohl der Niederschlagsmenge als auch der Grundwasserneubildung unter Wald im Hessischen Ried zu erkennen (Abbildung 7). Die Niederschläge gingen von $675 \pm 135 \text{ mm a}^{-1}$ (1961–1990) auf $627 \pm 106 \text{ mm a}^{-1}$ (1991–2023) zurück. Etwas stärker sank die mit LWF-Brook90 simulierte durchschnittliche jährliche Netto-Grundwasserneubildung von $132 \pm 85 \text{ mm a}^{-1}$ im Zeitraum 1961–1990 auf $64 \pm 56 \text{ mm a}^{-1}$ im Zeitraum 1991–2023. Die Verringerung der Standardabweichung um den mittleren Niederschlag zeigt, dass Jahre mit sehr hohen Niederschlagsmengen seltener geworden sind, was eine Auffüllung der Grundwasserspeicher beeinträchtigt. Somit könnte die Verschiebung im Niederschlagsregime eine Ursache für die verringerte Grundwasserneubildung zu sein. Darüber hinaus dürfte auch ein erhöhter Evapotranspirationsbedarf diesen Trend verstärken.

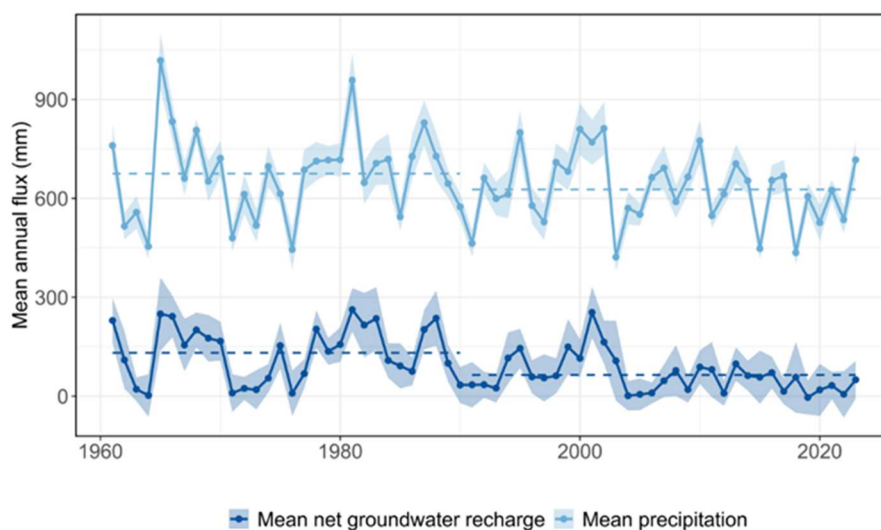


Abbildung 7. Mittlerer jährlicher Niederschlag (Mean precipitation) und mittlere jährliche Grundwasserneubildung (Mean net groundwater recharge) unter Wald im Hessischen Ried 1961–2023; gestrichelte Linien stellen mittlere Raten für die Perioden 1961–1990 und 1991–2023 dar; Bänder um die Zeitreihen zeigen die Standardabweichung der jährlichen Raten.

Die hier vorgestellten simulierten Grundwasserneubildungsraten sind in ihrer Größenordnung weitgehend mit den Schätzungen aus dem Projekt „Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried“ vergleichbar (Ahner et al. 2013), in dem mit dem Modell WaSiM eine Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1984 bis 1993 von 129 mm a^{-1} geschätzt wurde. Die Ergebnisse sind auch mit den anhand von Lysimeter-Messungen als auch anhand numerischer Grundwassermodellierungen angegebenen langfristigen Schätzungen der Grundwasserneubildung vergleichbar (Althoff et al., 1996). Für den Zeitraum 1971–1990 (Lysimeter) und 1961–1993 (Modellsimulationen) wurde die mittlere jährliche Grundwasserneubildung für das Hessische Ried auf 166 bzw. 164 mm a^{-1} geschätzt. Diese Werte stellen Durchschnittswerte für das Hessische Ried dar, einschließlich landwirtschaftlicher, städtischer und bewaldeter Gebiete, und liegen daher etwas höher als die Simulationen für reine Waldgebiete in der vorliegenden Studie. Dennoch liegen sie in einer ähnlichen Größenordnung wie die hier mit LWF-Brook90 erzielten Ergebnisse für 1961–1990 und stützen die Annahme, dass die Grundwasserneubildung in der Region in früheren Jahrzehnten wesentlich höher als derzeit war (Abbildung 8).

Die Waldbestände im Hessischen Ried sind vielerorts stark geschädigt und weisen daher meist einen geringeren Bestockungsgrad auf als Bestände, für die LWF-Brook90 parametrisiert wurde. Der Bestockungsgrad ist wiederum eine wichtige Größe bei der Schätzung des LAI und SAI von Beständen unter nicht idealen Bedingungen. Der Unterschied zwischen der Grundwasserneubildung unter

Berücksichtigung des Bestockungsgrades für geschädigte Bestände und ohne Berücksichtigung ist in Abbildung 9 für die Zeiträume 1961–1990 und 1991–2023 dargestellt. Wenn der Bestockungsgrad nicht berücksichtigt wird, beträgt der Anteil des Niederschlags, der versickert und unter Buchen, Eichen und Kiefern ohne Grundwasserverbindung zur Grundwasserneubildung führt, etwa 19 %, 18 % bzw. 12 % des jährlichen Niederschlags im Zeitraum 1961–1990 und 12 %, 10 % bzw. 4 % des jährlichen Niederschlags im Zeitraum 1991–2023. Unter Berücksichtigung des Bestockungsgrades liefert die Simulation für Waldflächen ohne Grundwasseranbindung jedoch Werte von etwa 25 %, 21 % und 20 % des jährlichen Niederschlags (1961–1990) bzw. 18 %, 13 % und 11 % des jährlichen Niederschlags (1991–2023) für Buche, Eiche und Kiefer. Die Grundwasserneubildung ist unter den geschädigten Waldflächen des Hessischen Rieds höher, da die Parameter LAI und SAI, die die Interzeption und Transpiration steuern, im Bestand reduziert sind.

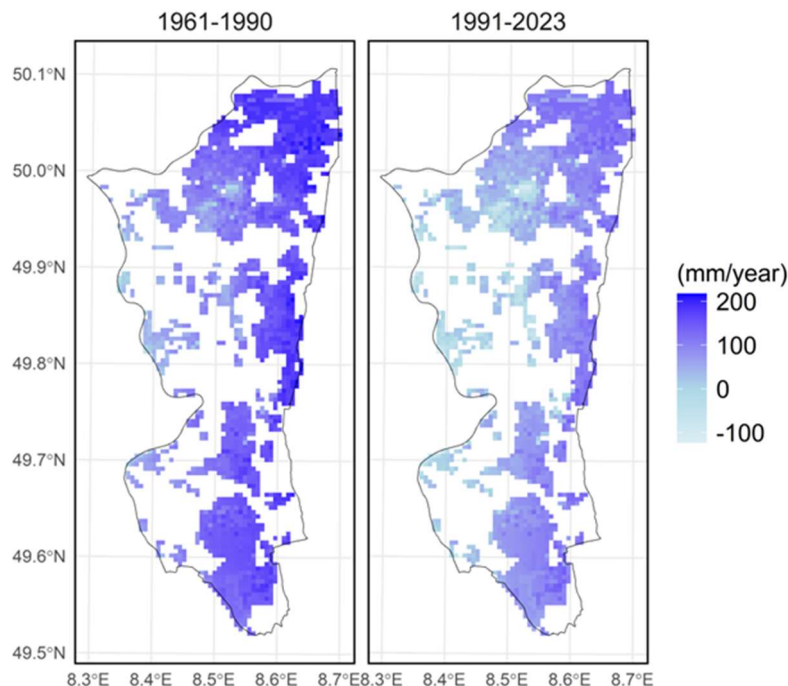


Abbildung 8. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung unter Wald im Hessischen Ried für die Zeiträume 1961–1990 (links) und 1991–2023 (rechts), berechnet mit LWF-Brook90.

Bei Wäldern ohne Grundwasseranbindung ist die Buche die Baumart mit dem größten Beitrag zur Grundwasserneubildung, gefolgt von Eiche und Kiefer, die unter den Bedingungen dieser Studie ähnliche Grundwasserneubildungsraten ermöglichen. Die Grundwasserneubildungsraten unter Buche, Eiche und Kiefer für den Zeitraum 1991–2023 betrugen 111 mm a^{-1} , 81 mm a^{-1} bzw. 76 mm a^{-1} und entsprechen in ihrer Größenordnung den Werten, die in den 1990er Jahren unter Lysimetern in Nordostdeutschland ($P = 620 \text{ mm a}^{-1}$) gemessen wurden (Müller, 2009, Anders et al., 2002).

Bei den Waldflächen mit Grundwasseranbindung weisen Nadelbäume (d. h. Kiefern) eine sehr ähnliche bzw. etwas größere Grundwasserneubildung als Buchen und eine deutlich größere Grundwasserneubildung als Eichen und Laubbäume im Allgemeinen auf. Obwohl die Grundwasserneubildung unter allen Baumarten in den letzten Jahrzehnten stark von den klimatischen Bedingungen beeinflusst wurde (die Niederschlagsmenge ging um durchschnittlich $36\text{--}42 \text{ mm a}^{-1}$ zurück), ist sie bei Eichen stark reduziert, wenn ihre Wurzeln Zugang zum Grundwasser haben. Die Grundwasserneubildung unter Eichen und unter Mischwald betrug zwischen 1991 und 2023 durchschnittlich nur 2 mm a^{-1} .

Schluffreiche Böden in einigen Bereichen des Hessischen Rieds ermöglichen einen guten hydraulischen Kontakt zwischen der Wurzelzone und dem Grundwasserspiegel und somit den kapillaren Aufstieg in die Wurzelzone. Dieser Aufwärtsfluss wird durch die hydraulischen Eigenschaften des Bodens, die Wurzelarchitektur und -dichte sowie den Transpirationsbedarf der Vegetation gesteuert.

In dieser Studie wurden diese strukturellen Veränderungen durch die Verwendung reduzierter LAI- und SAI-Werte auf der Grundlage des aktuellen Bestockungsgrades berücksichtigt, der häufig deutlich unter 1 liegt und somit den degradierten Zustand der heutigen Bestände widerspiegelt. Diese reduzierten LAI- und SAI-Werte wurden jedoch während des gesamten Simulationszeitraums ab 1961 konstant gehalten. Folglich repräsentiert die simulierte Wasserbilanz keine vitalen Wälder, sondern den aktuellen, geschwächten Waldbestand. Das Modell überschätzt somit vermutlich die Grundwasserneubildung im Zeitraum 1961–1990, da die Waldbestände in dieser Periode noch vitaler waren und damit höhere Interzeptions- und Evapotranspirationsraten erreichten. Daher kann die in dieser Studie simulierte Verringerung der Grundwasserneubildung zwischen den Zeiträumen 1961–1990 und 1991–2023 nicht auf strukturelle Veränderungen des Waldes zurückgeführt werden. Stattdessen muss der Rückgang der Grundwasserneubildung in erster Linie als Folge veränderter klimatischer Bedingungen interpretiert werden, insbesondere in einer Erhöhung des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre.

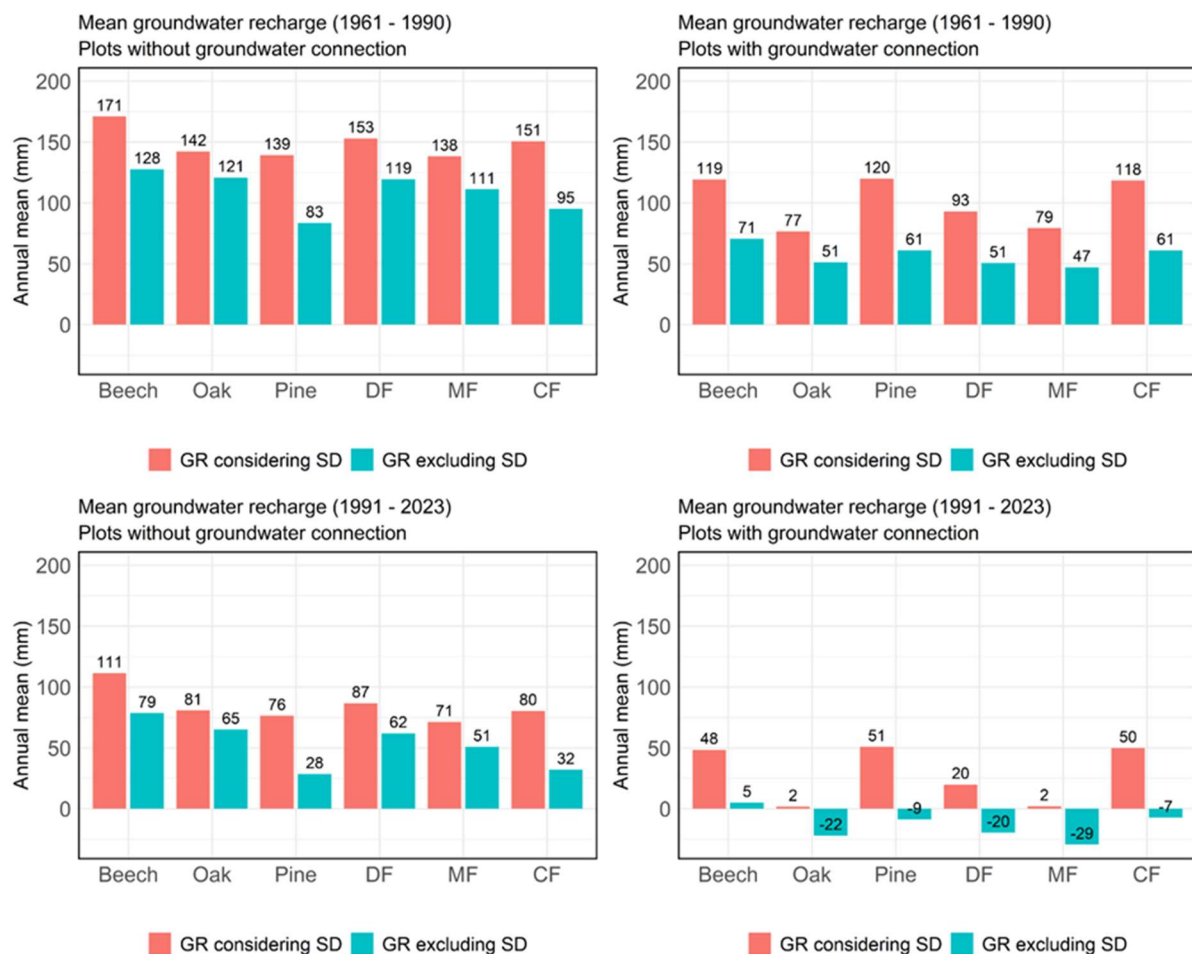


Abbildung 9. Grundwasserneubildung (GR) für die Perioden 1961-1990 (oben) und 1991-2023 (unten) für Waldflächen ohne (links) bzw. mit (rechts) Grundwasseranschluss bei verschiedenen Baumarten bzw. Waldtypen mit bzw. ohne Berücksichtigung des aktuellen Bestockungsgrades (SD). DF: Laubwald, MF: Mischwald, CF: Nadelwald.

Insgesamt ist in der Periode 1991-2023 ein Rückgang der Niederschläge zu beobachten. Dagegen hat die Transpiration aller Baumarten in der zweiten Periode im Vergleich zur ersten Periode als Reaktion auf den gestiegenen atmosphärischen Bedarf zugenommen.

Die LWF-Brook90-Simulationen wurden analysiert, um die langfristige Entwicklung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung im Rhein-Main-Gebiet für den historischen Zeitraum und den projizierten Zeitraum jeder der verwendeten Klimaprojektionen unter RCP8.5 zu bewerten (Abbildung 10). Die Zeitreihen zeigen eine hohe interannuelle Variabilität und bemerkenswerte Unterschiede

zwischen den Ensemblemitgliedern, was die Unsicherheit widerspiegelt, die durch die verschiedenen GCM-RCM-Kombinationen entsteht.

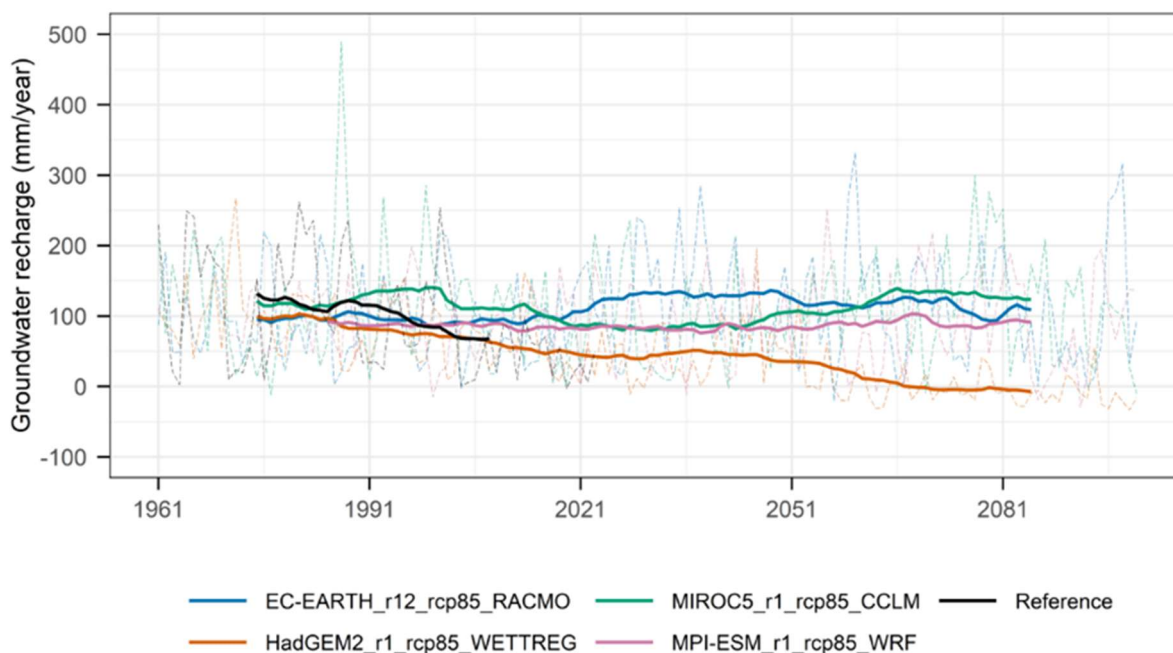


Abbildung 10. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (Groundwater recharge) im Hessischen Ried für die historische Periode (Reference) sowie verschiedene Klimaprojektionen (gestrichelte Linien) und 30-jährige zentrierte gleitende Mittelwerte (durchgezogene Linien).

Tabelle 3. Mittelwert und Median der jährlichen Grundwasserneubildung (mm/yr) im Hessischen Ried für die Referenz- und die Projektionsperioden. Δ -Werte zeigen die absolute und relative Abweichung der Projektionen gegenüber der Referenzperiode (1991–2020).

Period	Climate data set	Mittel (mm a ⁻¹)	Δ vs.Ref (mm a ⁻¹)	Δ vs.Ref (%)	Median (mm a ⁻¹)	Δ vs.Ref (mm a ⁻¹)	Δ vs.Ref (%)
1991-2020	Referenz (Ref)	67,2	—	—	78,8	—	—
2021 - 2050	EC-EARTH_RACMO	138,4	+71,2	+106 %	151,4	+72,6	+92 %
	MIROC_CCLM	90,5	+23,3	+35 %	96,9	+18,1	+23 %
	HadGEM_WETTREG	53,7	-13,5	-20 %	61,5	-17,3	-22 %
	MPI-ESM_WRF	80,9	+13,7	+20 %	89,8	+11,0	+14 %
2071 - 2100	EC-EARTH_RACMO	109,3	+42,1	+63 %	118,2	+39,4	+50 %
	MIROC_CCLM	128,4	+61,2	+91 %	139,5	+60,7	+77 %
	HadGEM_WETTREG	-5,8	-73,0	-109 %	5,1	-73,7	-94 %
	MPI-ESM_WRF	88,5	+21,3	+32 %	99,5	+20,7	+26 %

Der Vergleich der Mittelwerte und Mediane verdeutlicht die absoluten Raten und die Richtung der Veränderungen der jährlichen Grundwasserneubildung unter Annahme der verschiedenen Klimaprojektionen (Tabelle 3). Die Unterschiede gegenüber dem Referenzzeitraum zeigen, dass zwar bereits für den Zeitraum 2021–2050 einige Zuwächse prognostiziert werden – insbesondere unter EC-EARTH_RACMO, die größten Veränderungen jedoch in der fernen Zukunft (2071–2100) auftreten, mit erheblichen Zuwächsen bei den meisten Modellen, wie beispielsweise MIROC_CCLM (+91 % im Mittel, +77 % im Median) und EC-EARTH_RACMO (+63 % bzw. +50 %). Dagegen prognostiziert HadGEM_WETTREG einen starken Rückgang (-109 % und -94 %), was auf eine ausgeprägte modellabhängige Variabilität hindeutet und die zunehmende Unsicherheit in den langfristigen Klimaprojektionen zeigt. MPI-ESM_WRF ist das stabilste Modell und zeigt sowohl in der nahen wie der fernen

Zukunft einen ähnlichen Anstieg der Mittel- und Medianwerte. Die Medianwerte liefern ein räumlich repräsentatives Maß für die Veränderungen der Grundwasserneubildung im gesamten Untersuchungsgebiet, während die arithmetischen Mittelwerte empfindlicher auf schiefe Verteilungen und Ausreißer reagieren, dafür aber die Gesamtgröße der künftig zur Verfügung stehenden Grundwasserressourcen besser widerspiegeln.

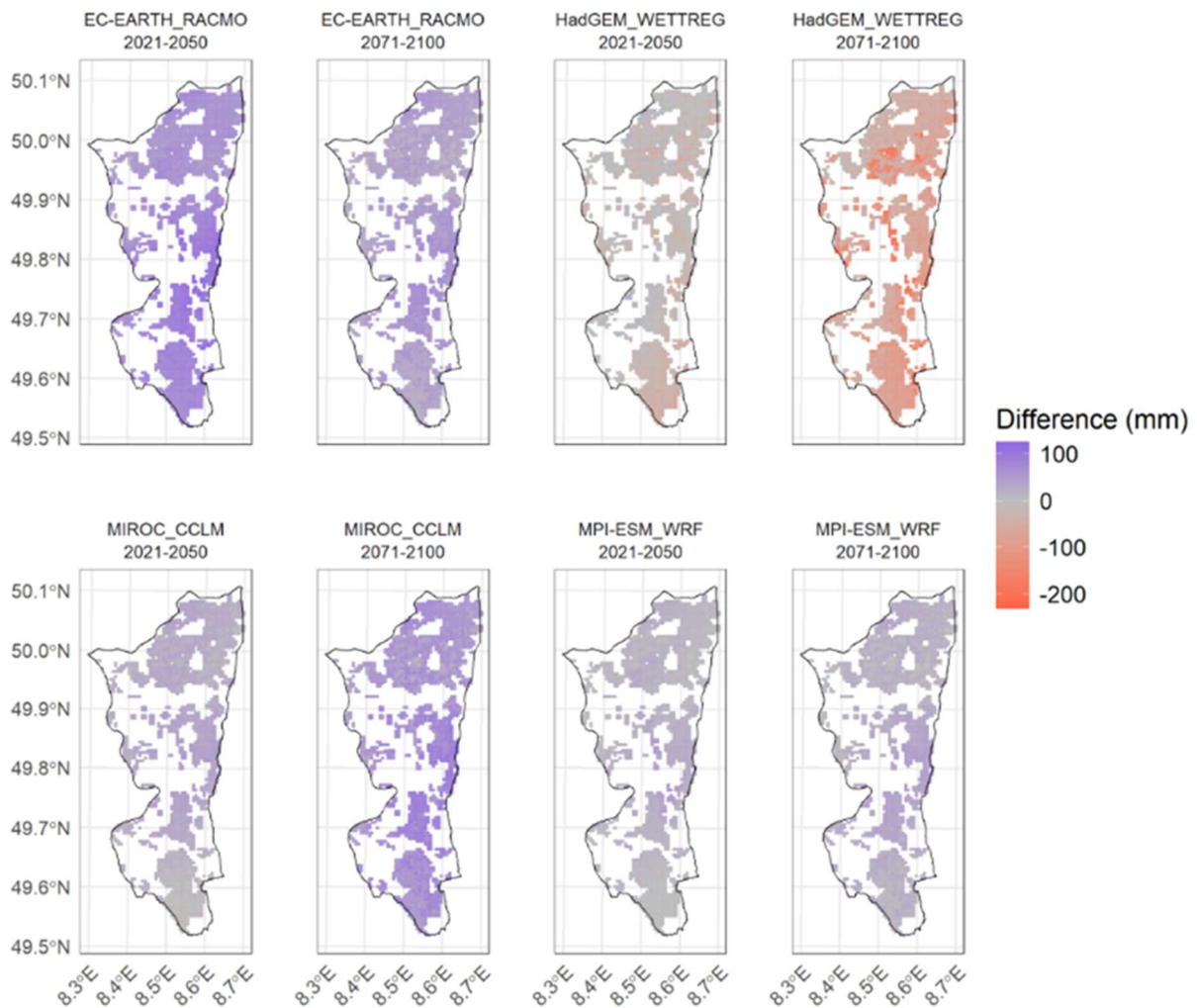


Abbildung 11. Räumliche Variabilität der simulierten absoluten Änderungen der Grundwasserneubildung im Hessischen Ried für die nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft, bezogen auf die Referenzperiode (1991–2020). Jede Karte zeigt die Differenzen für eine Klimaprojektion und eine Periode. Positive Werte (blau) weisen auf eine Zunahme hin, negative Werte (rot) eine Abnahme der Grundwasserneubildung.

Die räumlichen Verteilungen der projizierten absoluten Veränderungen der Grundwasserneubildung, ausgedrückt als Differenz der Jahresmittelwerte zwischen dem Referenzzeitraum (1991–2020) und den Zukunftszeiträumen (2021–2050 und 2071–2100) zeigen gegensätzliche Trends zwischen den Modellen EC-EARTH_RACMO und MIROC_CCLM (Abbildung 11). Ersteres zeigt größere positive Veränderungen in der nahen Zukunft, wobei die Unterschiede gegen Ende des Jahrhunderts abnehmen, während Letzteres in der nahen Zukunft geringere Unterschiede aufweist, die in der fernen Zukunft deutlicher werden. Im HadGEM_WETTREG-Szenario zeigen sich die größten Rückgänge der Grundwasserneubildung gegen Ende des Jahrhunderts im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets auf Standorten, die Anschluss an das Grundwasser aufweisen. Im Gegensatz dazu bleiben die vom MPI-ESM_WRF prognostizierten Unterschiede über das gesamte Jahrhundert hinweg relativ stabil.

In den Projektionen für die nahe und ferne Zukunft werden für die Buche die höchsten Grundwasserneubildungsraten für Standorte ohne Grundwasseranschluss simuliert, gefolgt von der

Eiche, während die Kiefer die geringsten Neubildungsraten aufweist (Abbildung 12). Für Standorte mit Grundwasseranschluss sind für die Eiche die geringsten Neubildungsraten zu erwarten, während für Kiefer und Buche etwa gleiche Flussraten simuliert werden. Bei der Eiche werden die größten Unterschiede zwischen Standorten mit und ohne Grundwasseranschluss erwartet.

Die für die verschiedenen Klimaprojektionen geschätzte jährliche Grundwasserneubildung wurde mit den von BGS-Umwelt für das Hessische Ried erstellten Simulationsergebnissen des MIKE-SHE-Modells verglichen. Der Vergleich ist im Anhang A1-A3 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen trotz Unterschieden bei der Modellstruktur und der Modellparametrisierung insgesamt eine gute Übereinstimmung.

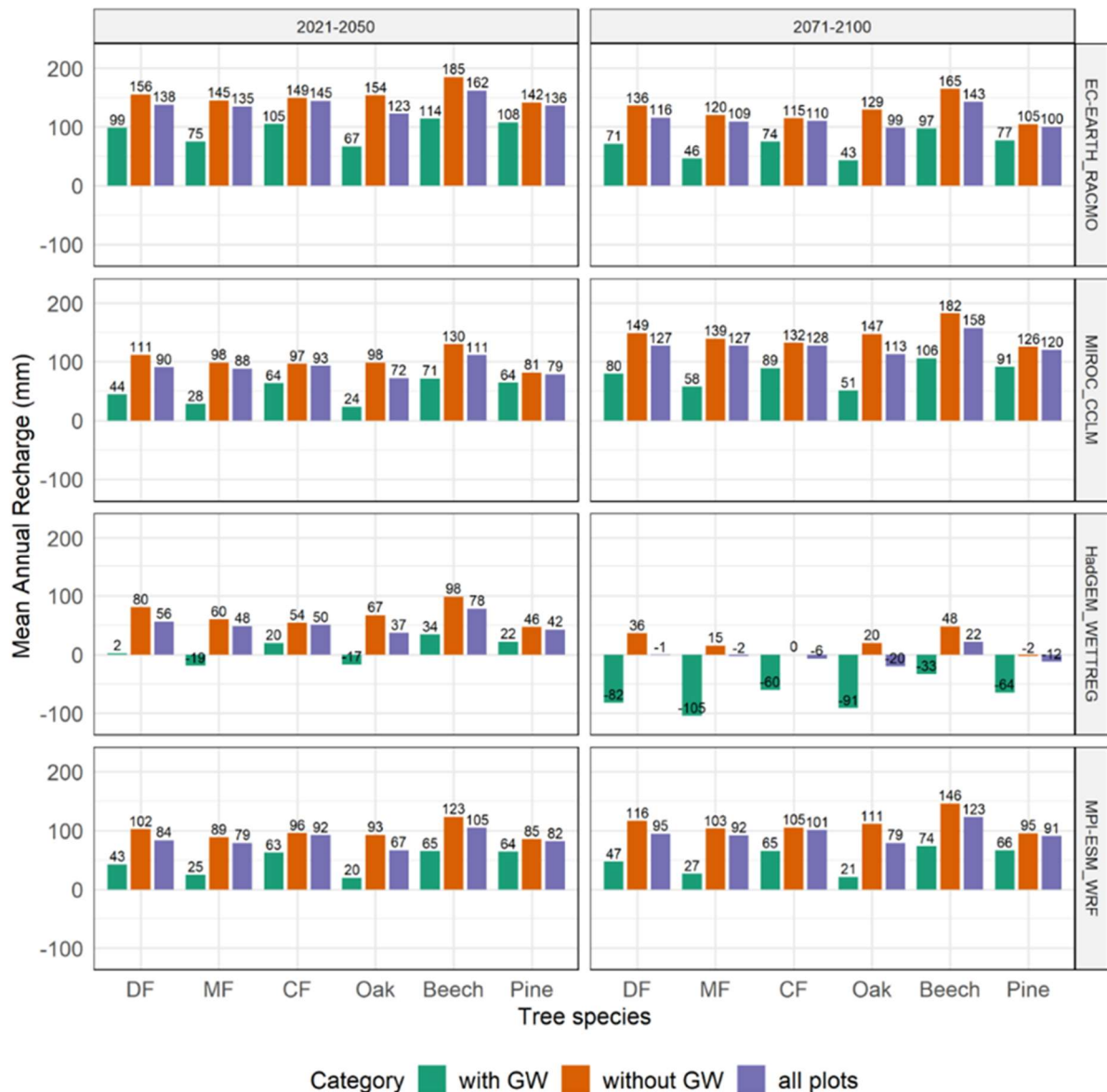


Abbildung 12. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (Mean Annual Recharge, mm) im Hessischen Ried unter verschiedenen Waldtypen/Baumarten (DF: Laubwald, MF: Mischwald, CF: Nadelwald, Oak: Eiche, Beech: Buche, Pine: Kiefer) für verschiedene Klimaprojektionen in der nahen (2021-2050) und fernen (2071-2100) Zukunft.

II.4.2 Grundwasserqualität

II.4.2.1 Modellanwendung

Zur Abschätzung des Stickstoffeintrags aus Waldböden in das Grundwasser des hessischen Rieds wurde ein verallgemeinertes gemischtes additives Modell (GAMM) angewendet. Der Modellierungsansatz basiert auf Methoden, die für flächendeckende Bewertungen des Stickstoffaustrags aus Waldböden verwendet wurden (Borken & Matzner 2004; Fleck et al. 2019; Waldner et al. 2019) und wurde an die spezifischen Bedingungen des Untersuchungsgebiets angepasst und entspricht dem in Fleck et al. (2019) verwendeten Ansatz. Nach wie vor wird ein erheblicher Anteil des in Waldökosysteme eingetragenen Stickstoffs in Waldböden immobilisiert (Ahrends et al. 2021; DWA 2020; Evers et al. 2019). Ein signifikanter Nitrataustrag tritt meist nur an gestörten Standorten auf, beispielsweise nach Sturmschäden, Borkenkäferbefall oder intensiver Waldbewirtschaftung (Beudert et al. 2015; Löfgren et al. 2011, 2014; Waldner et al. 2019).

Für die Stickstoffausträge wird vereinfacht angenommen, dass Ammonium (NH_4^+) innerhalb der Wurzelzone vollständig nitrifiziert und entzogen wird (Posch et al., 2015), und der Austrag sich auf Nitrat (NO_3^-) beschränkt. Zur Ermittlung der Austräge wurden eine Schätzfunktion verwendet, die mit Hilfe der an den Standorten der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) ermittelten Stickstoffausträge (Fleck et al. 2019) angepasst wurden (Wellhausen et al. 2026).

Die Stickstoffaustrag mit dem Sickerwasser (NSW, $\text{kg ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$) wurde hierbei wie folgt geschätzt:

$$N_{\text{SW}} = \exp(s(TN_{\text{DEP}}) + s(\text{CN}) + s(\text{MAP}) + s(pH_{\text{H}_2\text{O}}) + \text{Intercept} + \frac{0,0000120417^2}{2} + \frac{0,00004730588^2}{2}) \quad (\text{Gl. 3})$$

wobei das Modell glättende Funktionen (s) für die vier Schlüsselprädiktoren enthält. Die hierdurch ausgedrückten nichtlinearen Effekte der jeweiligen Prädiktoren werden mit den folgenden Gleichungen beschrieben. Der Effekt des Gesamtstickstoffdeposition (TN_{DEP}) wird wie folgt beschrieben:

$$s(TN_{\text{DEP}}) = 0,0731341038184426 * TN_{\text{DEP}} - 1,33188339186098 \quad (\text{Gl. 4})$$

Das C/N-Verhältnis der organischen Auflage (Oh, Of) oder des mineralischen Oberbodens (Ah-Horizont) bei Mullböden wird wie folgt berücksichtigt:

$$s(\text{CN}) = -8,01534528976997E-08 * \text{CN}^5 + 1,38687267768749E-05 * \text{CN}^4 - 0,000870209575697139 * \text{CN}^3 + 0,0221751119222168 * \text{CN}^2 - 0,233525331224263 * \text{CN} + 0,96588776696567 \quad (\text{Gl. 5})$$

Der Effekt der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge (MAP, mm), mit der folgenden Gleichung:

$$s(\text{MAP}) = -9,42615731771316E-16 * \text{MAP}^5 + 7,4680911166869E-12 * \text{MAP}^4 - 2,13038848153551E-08 * \text{MAP}^3 + 2,45355088357748E-05 * \text{MAP}^2 - 0,00717894495228613 * \text{MAP} - 1,90613221283599 \quad (\text{Gl. 6})$$

Und der Effekt des pH-Wertes im Unterboden (60-90 cm; pH-Wert(H_2O)):

$$s(pH_{\text{H}_2\text{O}}) = -0,000280455241957078 * pH_{\text{H}_2\text{O}}^5 + 0,0049801316336116 * pH_{\text{H}_2\text{O}}^4 - 0,0114828609036065 * pH_{\text{H}_2\text{O}}^3 - 0,155879897839211 * pH_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 0,638091613470975 * pH_{\text{H}_2\text{O}} - 0,206715957647074 \quad (\text{Gl. 7})$$

Der Intercept im Model beträgt 1,17211.

Die zur flächenhaften Anwendung des Schätzmodells notwendigen Eingangsdaten wurden wie folgt ermittelt: Die pH-Werte im Unterboden (bzw. die H^+ -Ionenkonzentrationen) wurden unter Verwendung eines GAM in Anlehnung an Heitkamp et al. (2021) geschätzt. Die C/N-Verhältnisse der organischen Auflage (für Mull: von 0–5 cm) wurden ebenfalls nach Heitkamp et al. (2021) ermittelt. Beide

bodenchemischen Variablen (C/N und pH (H₂O)) wurden als zeitlich konstant bei den Modellierungen betrachtet.

Die drei Depositionspfade (nass, trocken und okkult) der Gesamtstickstoffdeposition wurden mit Hilfe verschiedener Verfahren ermittelt. Die nass und die okkulte Deposition wurden nach dem in Wellhausen et al. (2026) beschriebenen Verfahren ermittelt. Für die Trockendepositionsmodellierung von Ammonium und Nitrat wurde der Ansatz von Kirchner et al. (2014) in der von Ahrends et al. (2020) angepassten und erweiterten Variante verwendet. Dieses Verfahren basiert auf der Inferenzmethode, auch als Konzentrationsmethode bezeichnet (z.B. Peters und Eiden, 1992). Der Fluss der Trockendeposition (DD) berechnet sich hierbei als Produkt der Konzentration in der Umgebungsluft in einer bestimmten Bezugshöhe (z) und einer Proportionalitätskonstante, der Depositionsgeschwindigkeit (v_d ; cm s^{-1}), gemäß der Grundgleichung nach Wesely und Hicks (2000).

Die Luftkonzentrationen (NH₃ und NO₂) wurden dem EMEP-Datensatz (co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe - <https://www.emep.int/> - Hjellbrekke 2024) entnommen. Die EMEP-Luftkonzentrationsdaten sind in der EBAS-Datenbank frei verfügbar (<https://ebas.nilu.no>). Die Depositionsgeschwindigkeiten wurden aus dem Review von Zhang et al. (2023) abgeleitet. Hierbei wurden die mittleren landnutzungsunabhängigen Depositionsgeschwindigkeiten der Elemente NO₂ und NH₃ mit Korrekturfaktoren in die Landnutzungen Nadel-, Laub- und Mischwald umgerechnet. Die landnutzungsspezifischen Korrekturfaktoren wurden aus Schaap et al. (2018) abgeleitet. Mit den beschriebenen Methoden wurden die verschiedenen Depositionspfade für Stickstoff modelliert und zur Gesamtdeposition aufsummiert. Um auch Gesamtdepositionen für die jeweiligen Klimaszenarien und Referenzperioden abschätzen zu können wurden relative Entwicklungen der Gesamtdeposition als Grundlage für eine Skalierung angewandt (Ahrends et al. 2022). Diese wurden für Stickstoff für das RCP-Szenarien 8.5 aus der Arbeit von Engardt et al. (2017) abgeleitet. Entsprechend liegen die TN_{DEP}-Projektionen für die Perioden 1961–1990, 1991–2020, 2021–2050 und 2071–2100 vor (Abbildung 13).

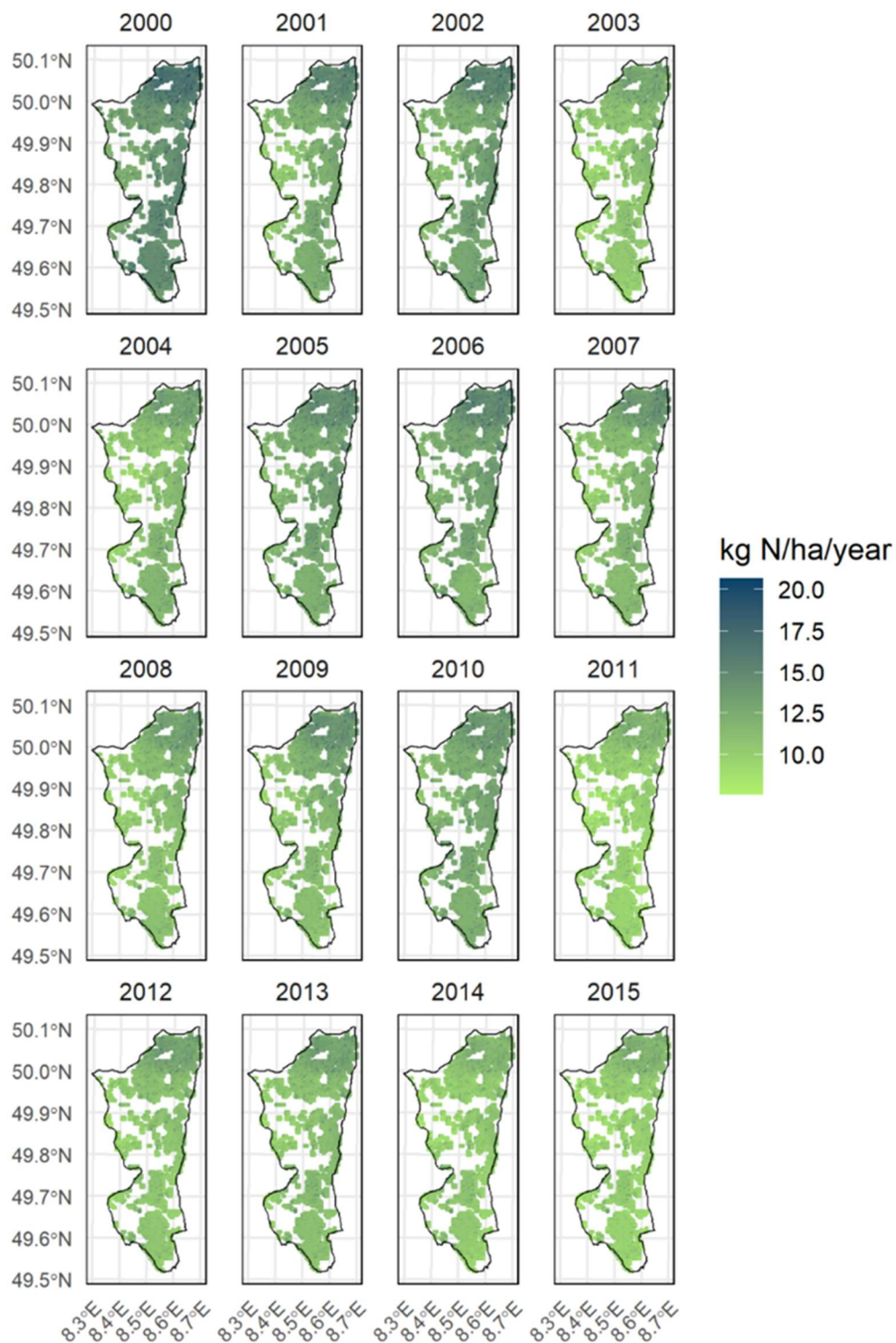


Abbildung 13. Modellerte Stickstoffgesamtdeposition (TN_{DEP} , $kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$) für die Wälder im Hessischen Ried für den Zeitraum von 2000 bis 2015.

II.4.2.2 Modellergebnisse: Nitrateintrag ins Grundwasser unter Wald

Im Rahmen des europäischen Waldmonitorings unter ICP Forest sowie der Verordnung zum forstlichen Umweltmonitoring (ForUmV-AG) werden repräsentative Waldökosysteme hinsichtlich der Auswirkungen von Umwelteinflüssen beobachtet. Drei Waldmonitoringflächen mit den Hauptbaumarten Buche, Eiche und Kiefer repräsentieren die wichtigsten Waldökosysteme im Hessischen Ried. Neben Erhebungen zur Vitalität und zum Wachstum der Waldbestände stehen Beobachtungen der wichtigsten Wasser-

und Stoffflüsse in die Wälder und aus den Wäldern heraus im Mittelpunkt des Waldmonitorings, so auch der Austrag von Nitrat aus den Waldökosystemen ins Grundwasser.

Die Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung unter dem Wurzelraum der Monitoringflächen war im Beobachtungszeitraum seit 2007 meist sehr gering, oft unter der Bestimmungsgrenze. Somit kann von sehr geringen Nitratreinträgen in das Grundwasser unter den Wäldern im Hessischen Ried ausgegangen werden.

Die erhöhten Nitrat-Konzentrationen in der Bodenlösung der Waldmonitoringflächen im Hessischen Ried zwischen 2019 und 2023 wurden durch starke Störungen wie Mistelbefall (Kiefer) sowie Pilz- und Insektenbefall (Buche und Eiche) verursacht. Zeitweise lagen die Nitratkonzentrationen unter Buche über dem Trinkwassergrenzwert von $11,3 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ (Abbildung 14). Dies zeigt, dass die Stickstoffpools in Waldökosystemen durch Störungen mobilisiert werden. Modellierungen des Nitrataustrags für das Hessische Ried zeigen, dass die Waldflächen im Durchschnitt N-Austräge zwischen 0 und $2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aufweisen (Ahner et al. 2013).

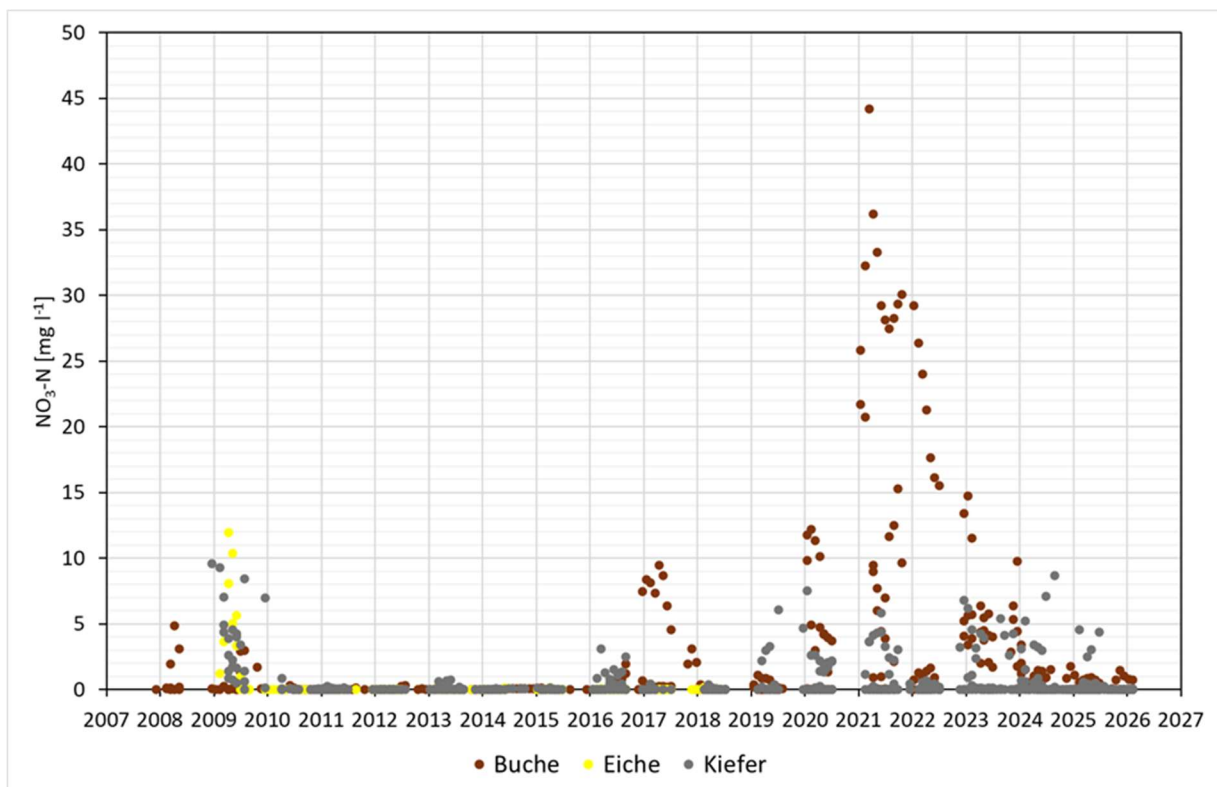


Abbildung 14: Nitrat-Konzentrationen ($\text{mg l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$) in der Bodenlösung in 150 cm Bodentiefe von Monitoringflächen im Hessischen Ried (Buche, Eiche, Kiefer).

Die Simulation der Nitratausträge aus Waldböden im Hessischen Ried bis 2100 lassen erwarten, dass unter den angenommenen Einträgen über die Stickstoffdeposition die Nitratausträge gering bleiben. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Klimaprojektionen sind sehr gering ebenso wie die Unterschiede zwischen verschiedenen Baumarten (Abbildung 16).

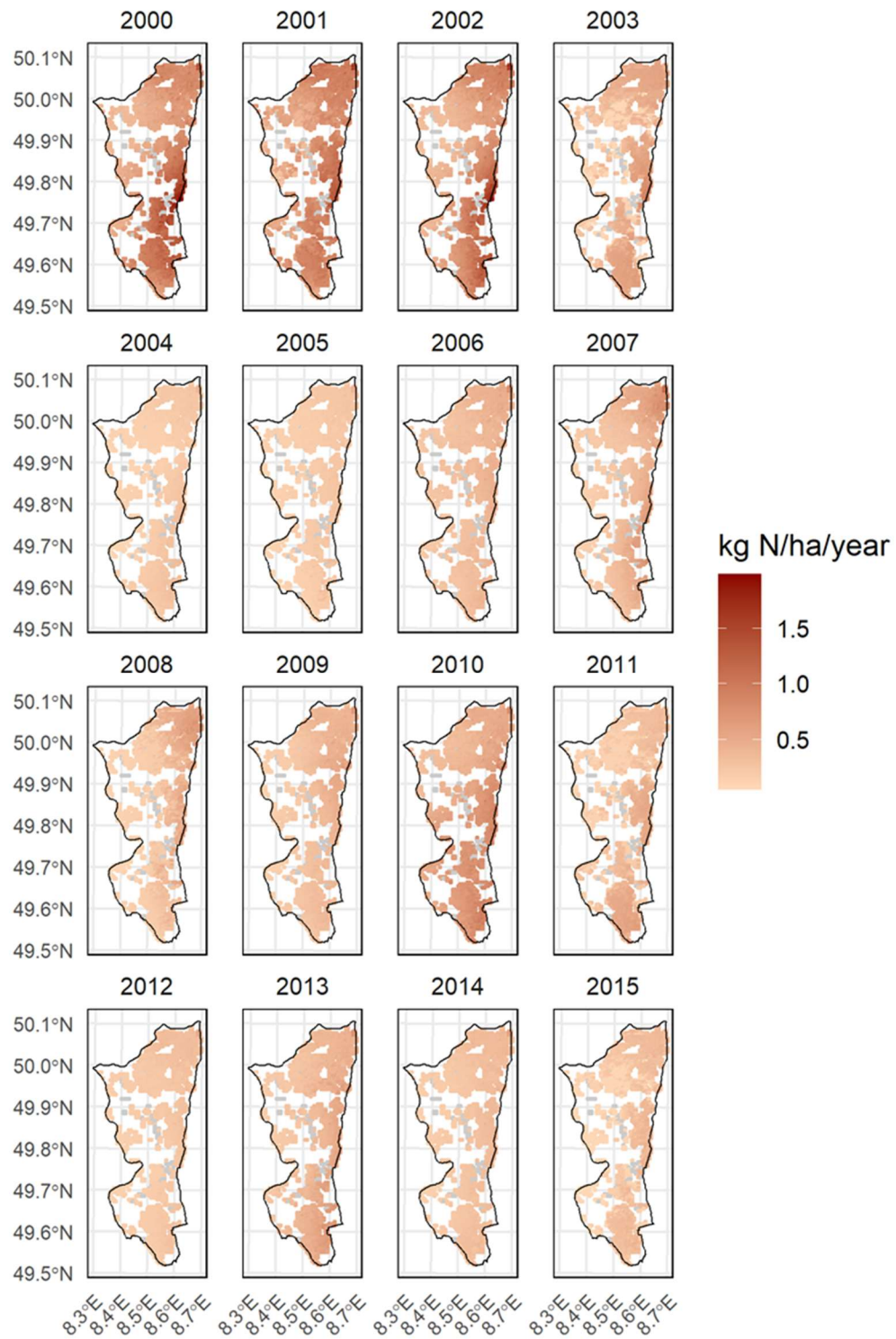


Abbildung 15. Modellierter Stickstoffaustrag aus Waldböden im Hessischen Ried zwischen 2000 und 2015.

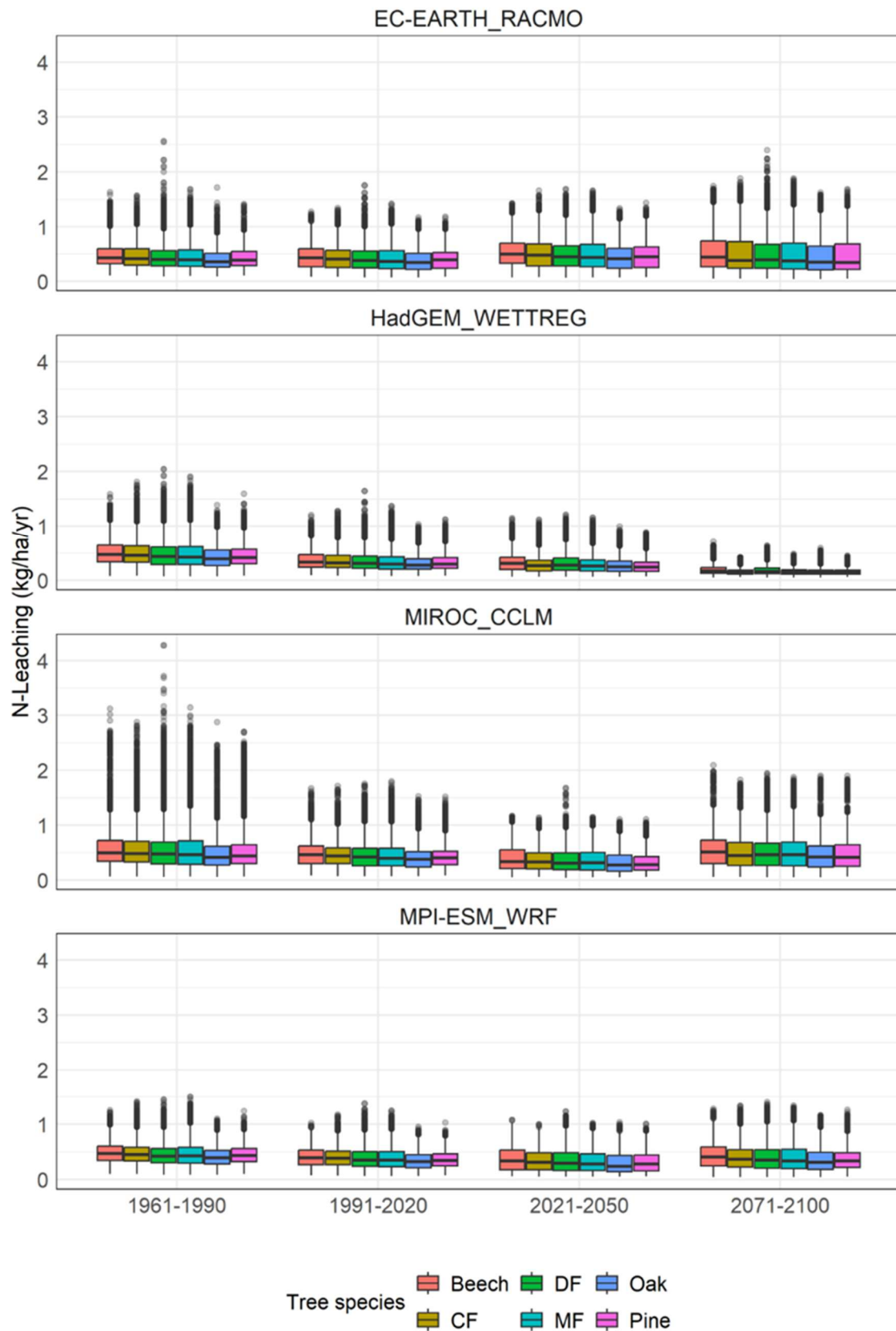


Abbildung 16. Nitrataustrag ($N\text{-Leaching}$, $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) aus Waldböden im Hessischen Ried für verschiedene Baumarten sowie verschiedene Klima- und Depositionsszenarien.

II.4.3 Maßnahmenoptionen

II.4.3.1 Maßnahme Waldumbau

Der Waldumbau ist ein zentraler Bestandteil der Waldbewirtschaftungsstrategien im Hessischen Ried. In diesem Zusammenhang wird unter Waldumbau die langfristige Umwandlung bestehender, oft gefährdeter oder klimasensibler Waldbestände in strukturell vielfältige, standortangepasste Mischwälder, die besser in der Lage sind, mit zunehmendem Trockenstress und sich verändernden klimatischen Bedingungen umzugehen, verstanden. Für Hessen wurde von der NW-FVA ein Katalog von klimaangepassten Waldentwicklungszielen (WEZ) entwickelt (Döbbeler et al. 2025). Im Rahmen des WaRM-Projekts wurden für die Waldflächen des Hessischen Rieds die jeweils klimastabilsten WEZ aus den vorliegenden Standortinformationen abgeleitet sowie das aktuelle und zukünftige Trockenstressrisiko abgeschätzt, um eine Priorisierung der zum Umbau anstehenden Waldbestände vornehmen zu können.

II.4.3.1.1 Methodik: Waldentwicklungsziele für das Hessische Ried

Die WEZ sind strategische Planungsinstrumente, die als Leitlinien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden klimatischen Bedingungen dienen. Sie definieren die angestrebte Struktur und Zusammensetzung künftiger Waldbestände, indem sie ökologische, wirtschaftliche und funktionale Ziele miteinander verbinden. Die WEZ fördern ökologisch verträgliche Baumartenmischungen, die auf die wesentlichen Standortmerkmale – insbesondere den Wasserhaushalt und die Nährstoffversorgung – zugeschnitten sind, um Bestandstypen zu bilden, die sich an Umweltveränderungen anpassen können. Jedes WEZ wird durch ein Leitbild charakterisiert, welches die angestrebte Waldstruktur einschließlich möglicher Sukzessionswege beschreibt, und die Waldfunktionen benennt, z.B. Schutz- und Erholungsfunktionen sowie Ziele für die Holzproduktion. Baumarten werden nach ihrer Eignung für die jeweiligen Standortbedingungen – insbesondere hinsichtlich ihres aus dem Wasserhaushalt des Standorts abgeleiteten Risikos für Trockenstress – als Leit-, Misch- oder Begleitbaumarten klassifiziert. Durch die Abstimmung der Baumartenauswahl und der Bestandsstruktur auf diese Umweltbedingungen bieten die WEZ einen Rahmen für eine widerstandsfähige und nachhaltige Waldentwicklung unter künftigen Klimabedingungen.

Das aktuelle WEZ-Konzept, das von der NW-FVA in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband entwickelt wurde, umfasst 34 Standard-Bewirtschaftungsziele sowie zwei zusätzliche Ziele für Fichten- und Buchenwälder mit hohem Risiko (Döbbeler et al. 2025). Diese Ziele legen Mischungsarten und Artenanteile fest, die an die ökologischen Gegebenheiten des jeweiligen Standorts angepasst sind. Die Eignung der Baumarten wird in erster Linie anhand der Standortwasserbilanz (SWB) bewertet, welche den Niederschlag, die Evapotranspiration und die Bodenwasserspeicherkapazität (nutzbare Feldkapazität, nFK) berücksichtigt, um das Trockenstressrisiko zu bestimmen. Auf der Grundlage dieser Bewertungen definieren die WEZ sowohl die Zusammensetzung als auch die räumliche Anordnung der Baumarten, von kleinräumigen Gruppen- oder Klumpenmischungen bis hin zu femelartigen Strukturen mit vertikaler Differenzierung. Quantitative Artenanteile unterstützen die Verjüngungsplanung und geben die langfristige Bestandsentwicklung vor; so empfiehlt beispielsweise WEZ 10 (Eiche–Buche/Hainbuche) 60–80 % Eiche und 10–20 % Buche bzw. Hainbuche.

Der vollständige WEZ-Katalog und die standortspezifischen Eignungskarten sind über einen Web-Service der NW-FVA (<https://www.nw-fva.de/BaEm/map.jsp?he=1>) zugänglich, der die Grundlage für die in dieser Studie untersuchten Baumartenempfehlungen und Waldumbauszenarien bildet.

Jede der 500 m × 500 m großen Rasterzellen wird für die jeweiligen Standorts- und Klimaverhältnisse hinsichtlich der möglichen WEZ bewertet. Dieses Verfahren basiert auf artspezifischen Grenzwerten für die Trockenstressgefährdung, die quantifizieren, innerhalb welcher Grenzen jede Baumart unter der projizierten Standortwasserbilanz (SWB) vitale Waldbestände entwickeln kann. Für jede Modellzelle und jede in einem WEZ enthaltene Art wurden für sieben Klimaprojektionen des ReKliEs-De-Ensembles (RCP 8.5, 2071–2100, Suttmöller et al. 2021) berechnet, ob die jeweilige Baumart anbaueeignet oder nicht anbaueeignet ist.

Aus diesen Eignungswerten wurde eine Frequenz (freq) abgeleitet, die angibt, wie viele der sieben Projektionen eine Anbaueignung nahelegen (z. B. bedeutet „freq = 5“, dass fünf Projektionen die Art als geeignet einstufen). Diese wurden wiederum zu vier sogenannten Robustheitsklassen zusammengefasst:

- 3: sehr klimarobust, freq = 6–7
- 2: klimarobust, freq = 5
- 1: wenig klimarobust, freq = 3–4
- 0: ausgeschlossen, freq = 1–2

Da WEZ als Mischbestände definiert sind, wurden die Werte auf Artenebene zu Eignungswerten auf WEZ-Ebene aggregiert. Für jedes WEZ wurden die gewichteten Eignungswerte auf der Grundlage der im WEZ-Katalog angegebenen Mischungsverhältnisse berechnet. Für jede Rasterzelle wurde das WEZ mit dem höchsten Eignungswert als primäre Empfehlung ausgewählt, um sicherzustellen, dass die Zuordnung das robusteste WEZ in Bezug auf die Klimaprojektionen widerspiegelte. Dies führte zu einer starken Konvergenz zu gleichen Empfehlungen für große Flächen (vorwiegend WEZ 71 Kiefer-Eiche). Da dieser Ansatz das Risiko einer sehr einheitlichen WEZ-Verteilung barg, wurde ein zusätzlicher Verfeinerungsschritt durchgeführt. Für jede Rasterzelle wurden die beiden bestplatzierten WEZ-Optionen verglichen, und das zweitplatzierte WEZ wurde dann ausgewählt, wenn der Unterschied in den Eignungswerten zwischen der ersten und der zweiten Option weniger als 10 % des Spitzenwerts betrug und wenn es eine gleiche Robustheitsklasse aufwies. Dies ermöglichte eine begrenzte Diversifizierung der Empfehlungen, während die Klimaresilienz weiterhin im Vordergrund stand. In der Praxis waren die Eignungsunterschiede zwischen den Spitzenkandidaten jedoch gering, und sowohl das Schwellenwert- als auch das Robustheitskriterium filterten die meisten Alternativen heraus. Folglich wurden die endgültigen Zuordnungen weitgehend von WEZ 71 (Kiefer-Eiche) und WEZ 14 (Eiche–Birke/Kiefer) dominiert, was darauf hindeutet, dass nur eine begrenzte Anzahl von Artenzusammensetzungen unter den projizierten zukünftigen Klimabedingungen im Untersuchungsgebiet durchgehend robust ist (Abb. 17).

Tabelle 4. Baumartenzusammensetzung und deren Zielanteile für WEZ 71 WEZ 14 und WEZ 10.

WEZ	Führende Baumart (F)	Mischbaumart (M)	Begleitende Baumarten	Zielanteil F (%)	Zielanteil M (%)	Begleitarten (%)
71	Waldkiefer (KI)	Eiche (Stiel- und Traubeneiche)	Birke, Eberesche, Aspe, andere optionale Laubbäume	60–70	20–30	bis 20
14	Eiche (EI)	Waldkiefer, Birke	Optional: Buche, Hainbuche, andere Laubbäume	50–60	20–40	bis 20
10	Eiche (EI)	Buche, Hainbuche	Bergahorn Spitzahorn, Eberesche, Birke, Aspe, Weide	60–80	10–20	bis 20

Quelle: Döbbeler et al. (2025)

Die wichtigsten Waldentwicklungsziele im Hessischen Ried werden durch die Baumarten Kiefer und Eiche dominiert (Döbbeler et al. 2025, Tabelle 4). Das WEZ 71 umfasst vorwiegend einschichtige, in kleinen Gruppen bis fleckig verteilte Mischwälder, in denen die Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) eine führende Rolle spielt, begleitet hauptsächlich von Stiel- oder Traubeneiche (*Quercus robur* / *Q. petraea*) und gegebenenfalls anderen Laubbäumen wie Roteiche, Weißeiche, Edelkastanie sowie Pionierarten wie

Birke und Eberesche. WEZ 14 umfasst vorwiegend mehrschichtige, von Eiche dominierte Wälder mit Birke und Waldkiefer als Beimischungen sowie optionalen Laubbaumarten wie Buche und Hainbuche. Beide WEZ integrieren natürliche Verjüngung und gruppenweise Mischungen, fördern die Biodiversität und erfüllen forstwirtschaftliche Ziele, während sie gleichzeitig standortspezifische ökologische Bedingungen widerspiegeln.

Um die in den ausgewählten WEZ definierten Artenmischungen widerzuspiegeln, wurden alle Rasterzellen jeweils mit Kiefer und Eiche als vorherrschende Arten mit LWF-BROOK90 simuliert. Die simulierte Grundwasserneubildung aus diesen beiden Durchläufen wurde anschließend entsprechend den in den einzelnen WEZ festgelegten Mischungsverhältnissen kombiniert. Für Parzellen, die der WEZ 71 (Kiefer–Eiche) zugeordnet waren, wurden 70 % der Grundwasserneubildung aus der Kiefern-Simulation und 30 % aus der Eichen-Simulation herangezogen. Für Parzellen, die der WEZ 14 (Eiche–Birke/Kiefer) zugeordnet waren, wurden 60 % der Grundwasserneubildung aus der Eichen-Simulation und 40 % aus der Kiefern-Simulation herangezogen. Dieser Ansatz stellt sicher, dass die resultierende Wasserbilanz die von der WEZ vorgegebene zukünftige Mischbestandsstruktur widerspiegelt und nicht die Parametrisierung mit einer einzigen Leitbaumart, die die aktuellen Bestandsbedingungen charakterisiert. Da nur eine Parzelle der WEZ 10 zugeordnet wurde, wurde sie als WEZ 14 analysiert.

Die als „Flora Fauna Habitat“ (FFH) klassifizierten Gebiete und insbesondere der Lebensraumtyp 9160 „Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwälder“ wurden vom Umbau auf die WEZ ausgeschlossen. Für 48 von 2048 Rasterzellen konnte aufgrund von Hydromorphie oder geometrischer Probleme kein WEZ bestimmt werden (NA in Abb. 17).

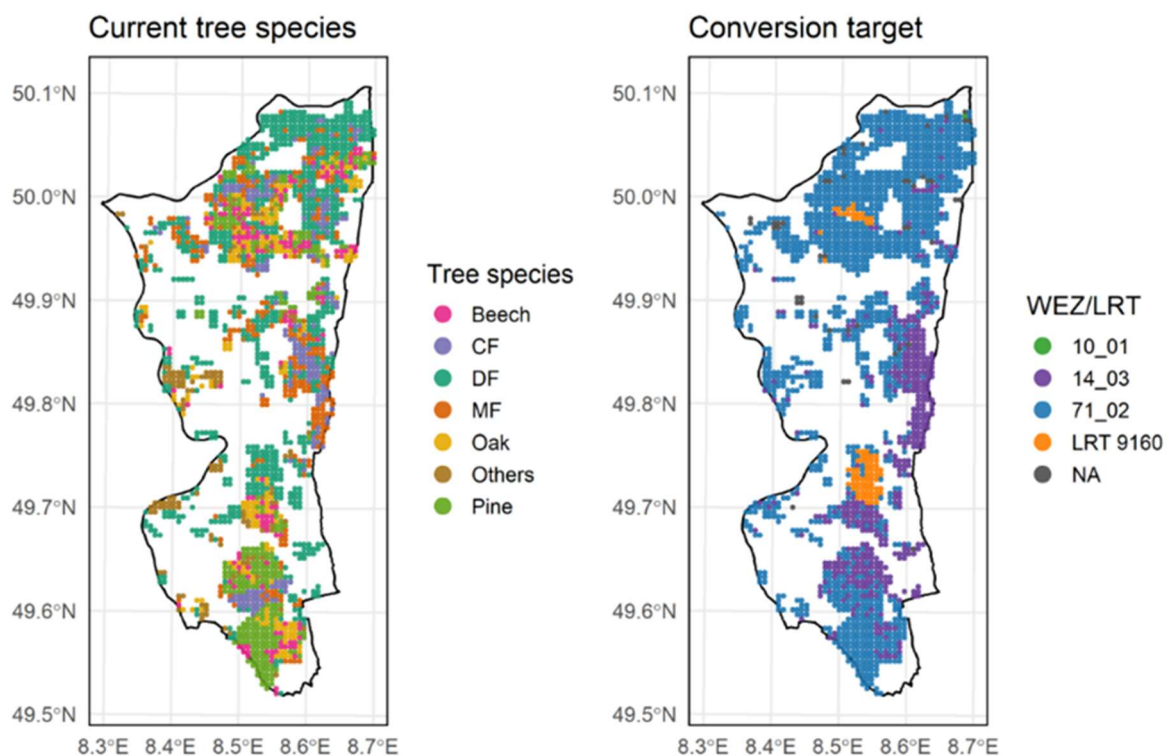


Abbildung 17. Aktuelle Baumartenzusammensetzung (Current tree species) im Hessischen Ried und Waldentwicklungsziele (Conversion target, WEZ). Für Waldflächen des LRT 9160 Eichen-Hainbuchen-Wälder wird kein Waldumbau vorgesehen (Beech: Buche; CF: Nadelwald; DF: Laubwald; MF: Mischwald; Oak: Eiche; Others: andere Baumarten; Pine: Kiefer; WEZ: s. Tab. 4; NA: WEZ konnte nicht bestimmt werden).

II.4.3.1.2 Bestimmung von vulnerablen Waldflächen anhand von Dürreindikatoren

Zur Ermittlung der durch Trockenstress gefährdeten Waldflächen wurden verschiedene Dürreindikatoren herangezogen. Die Waldflächen wurden entsprechend ihrem Gefährdungsgrad eingestuft, der anhand eines zusammengesetzten Indikators ermittelt wurde, der sowohl die Intensität der verschiedenen Indikatoren als auch die Dauer der Überschreitung von Schwellenwerten berücksichtigt.

Alle Dürreindikatoren wurden aus täglichen Simulationen des forsthydrologischen Modells für die Vegetationsperiode (April–Oktober) über den gesamten Zeitraum von 1961 bis 2023 abgeleitet. Die Verwendung von Tageswerten stellte sicher, dass kurzfristige Dürreereignisse, zeitliche Häufungen von Stresslagen und extreme Trockenperioden angemessen erfasst wurden. Für jede Rasterzelle und jedes Jahr wurden die tatsächliche Transpiration, die potenzielle Transpiration, das Transpirationsdefizit, die Bodenfeuchte (ausgedrückt als relatives verfügbares Wasser, REW) und andere hydrologische Variablen zu saisonalen Zusammenfassungen aggregiert, was eine konsistente Charakterisierung der Wasserverfügbarkeit ermöglichte.

Die Dürreindikatoren folgen dem von Schmidt-Walter et al. 2019, von Wilpert et al. (2016) und Puhlmann et al. (2019) beschriebenen konzeptionellen Rahmen, in dem Trockenstress als Kombination aus seiner Häufigkeit, Intensität und Dauer beschrieben wird. Der erste Schlüsselindikator ist das Transpirationsverhältnis (T_{ratio}), definiert als (Gl. 8):

$$T_{ratio} = \frac{\text{tatsächliche Transpiration}}{\text{potenzielle Transpiration}} \quad (\text{Gl. 8})$$

der angibt, inwieweit der Wasserbedarf der Atmosphäre durch die Bodenwasserversorgung gedeckt wird. Um physiologische Unterschiede zu berücksichtigen, wurden artspezifische Dürreschwellenwerte einbezogen. In Anlehnung an Speich (2019) wurde davon ausgegangen, dass Dürrestress auftritt, wenn T_{ratio} bei dürrerotoleranten Arten unter 0,6 und bei empfindlicheren Arten unter 0,8 fällt.

Der zweite Indikator war das relative verfügbare Wasser (REW), das im Modell LWF-Brook90 wie folgt berechnet wurde (Gl. 9):

$$REW = \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}} \quad (\text{Gl. 9})$$

wobei θ die tatsächliche Bodenfeuchte und θ_{wp} sowie θ_{fc} den Bodenwassergehalt beim Welkepunkt bzw. bei der Feldkapazität bezeichnen. Es wurde ein Schwellenwert von 0,4 angewendet, an dem typischerweise die Stomata-Regulierung durch die Begrenzung der Bodenwasserverfügbarkeit einsetzt (Granier et al. 1999).

Für jede Rasterzelle und jedes Jahr wurden die täglichen Werte zu jährlichen Dürreindikatoren zusammengefasst, die die Häufigkeit und Dauer von physiologischem Stress und Bodentrockenheit während der Vegetationsperiode charakterisieren. Ein Tag wurde als T_{ratio} -Stress gezählt, wenn (Gl. 10):

$$T_{ratio}(t) < T_{threshold} \quad (\text{Gl. 10})$$

wobei $T_{threshold} \in \{0,6, 0,8\}$ je nach Art. Die jährliche Anzahl der T_{ratio} -Stresstage zwischen Beginn und Ende der Vegetationsperiode ($TageTr$) wurde somit wie folgt berechnet (Gl. 11):

$$TageTr = \sum_{t=1}^n T_{ratio}(t) < T_{threshold} \quad (\text{Gl. 11})$$

Die maximale Dauer der Stressphase wurde aus der längsten Abfolge aufeinanderfolgender Tage abgeleitet, die diese Bedingung erfüllten, d. h. aus der längsten ununterbrochenen Abfolge von Trockenheitstagen pro Rasterzelle und Jahr.

Der Bodentrockenheit wurde anhand des Schwellenwerts für REW von 0,4 quantifiziert, das den Übergang von leicht verfügbarem zu limitierendem Bodenwasser markiert (Puhlmann et al. 2019). Die Häufigkeit und Dauer von REW-basierten Dürreindikatoren wurden analog unter Verwendung der in den Gleichungen 10 und 11 dargestellten indikatorbasierten Ausdrücke quantifiziert, wobei der Schwellenwert durch den entsprechenden REW-Schwellenwert von 0,4 ersetzt wurde. Somit entsprechen REW-

Tage der Anzahl der Tage, an denen der REW-Wert unter 0,4 fiel, und die REW-Dauer spiegelt die längste ununterbrochene Abfolge solcher Tage wider.

Diese jährlichen Stressdeskriptoren wurden durch das Transpirationsdefizit (T_{diff}) ergänzt, das für die Vegetationsperiode zusammengefasst und zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit auf 100 Tage normiert wurde. Das Transpirationsdefizit (T_{diff}) liefert ein Maß für die durch atmosphärische und bodenspezifische Trockenheit bedingte Begrenzung der Transpiration der Bäume. Für jeden Tag stellt T_{diff} die Differenz zwischen potenzieller und tatsächlicher Transpiration dar. Das jährliche kumulative Defizit wurde durch die Dauer der Vegetationsperiode (n) normiert, um die Vergleichbarkeit über die Jahre hinweg zu gewährleisten (Gl. 12):

$$T_{diff_{100}} = \frac{\sum_{t=1}^n T_{diff}(t)}{n/100} \quad (Gl. 12)$$

Zusammen bilden diese Indikatoren (i) die jährliche Anzahl der T_{ratio} -Stresstage und die maximale Stressdauer, (ii) die jährliche Anzahl der Tage mit einem $REW < 0,4$ sowie die maximale Stressdauer und (iii) das normalisierte jährliche Transpirationsdefizit das strukturelle Dürreregimes für jede Rasterzelle ab. Die über den Beobachtungszeitraum 1961–2023 berechneten linearen Trends zeigten zudem, ob sich die Stressbedingungen im Laufe der Zeit verschärften. Diese jährlichen und langfristigen Deskriptoren dienen als Grundlage für die auf Perzentilen basierende Vulnerabilitätsbewertung.

Der abschließende Klassifizierungsansatz konzentrierte sich auf die Extreme der Dürreverteilung. Für jede Parzelle wurden die 90. Perzentile ($P90$) der jährlichen Dürreindikatoren ermittelt, darunter $P90$ der T_{ratio} -Stresstage, der maximalen T_{ratio} -Stressdauer, der REW -basierten Stresstage und maximalen Dauern sowie $P90$ des Transpirationsdefizits. Dieser aus Perzentilen abgeleitete kumulative Stressindex hob Rasterzellen hervor, auf denen wiederholt schwere Dürrebedingungen auftraten, wodurch wiederkehrenden Hochstressbedingungen ein größeres Gewicht beigemessen wurde als gelegentlichen moderaten Ereignissen. Das Perzentil-Screening jährlicher Stresskennzahlen (hier $P90$) wird in Umweltstudien häufig angewendet, um wiederkehrende Extreme zu isolieren (Sutanto et al. 2020) sowie bei forstwirtschaftlichen Bewertungen extremer Bodentrockenheit (Shekhar, 2023) verwendet. In dieser Studie wurden alle $P90$ -Werte mithilfe von z -Scores standardisiert, um Skalenunterschiede zwischen den Variablen zu vermeiden. Die standardisierten Werte wurden anschließend summiert, um pro Rasterzelle einen einzigen Wert (PS) zu generieren (Gl. 13):

$$PS = z(P90_{days_{Tr}}) + z(P90_{maxrun_{Tr}}) + z(P90_{days_{REW}}) + z(P90_{maxrun_{REW}}) + z(P90_{T_{diff}}) \quad (Gl. 13)$$

Dieser Index stellt eine Erweiterung des bestehenden Rahmens zur Bewertung von Trockenstress dar, da er verschiedene Aspekte des Stresses – physiologische Einschränkungen, Bodenfeuchtedefizite und die Schwere der Dürre – zu einem einheitlichen Maß für die Anfälligkeit zusammenfasst. Der daraus resultierende kumulative Wert wurde anschließend in Terzile unterteilt, woraus sich die drei endgültigen Anfälligkeitsklassen („Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“) ergaben. Diese Klassen bilden die Grundlage für die Priorisierung von Gebieten für den Umbau von Waldflächen oder für ein adaptives Management (Abbildung 18). Als „Hoch“ eingestufte Parzellen stellen Standorte dar, an denen der Trockenstress in den vergangenen Jahrzehnten sowohl schwerwiegend als auch wiederholt aufgetreten ist und an denen der Bedarf an Anpassungsmaßnahmen daher am dringendsten ist, während die Klasse „Niedrig“ Standorte mit einer vergleichsweise stabilen und weniger extremen Bodenwasserverfügbarkeit widerspiegelt.

Der Waldumbau wurde in drei verschiedenen Intensitätsstufen simuliert, die 1 %, 2 % bzw. 5 % der Waldfläche pro Jahr entsprachen. Der Umbau erfolgte mit einer Priorisierung auf der Grundlage der Gefährdung der Waldbestände durch Trockenstress, beginnend mit den am stärksten gefährdeten Rasterzellen. Innerhalb jedes Intensitätsszenarios wurden zunächst Parzellen aus den Kategorien mit höherer Anfälligkeit ausgewählt, um die gegenüber Klima- und Trockenstress empfindlichsten Gebiete im Umbauprozess vorrangig zu berücksichtigen. Dieser Ansatz ermöglichte eine schrittweise, risikoorientierte Umsetzung der Waldumbaustrategie in der gesamten Untersuchungsregion.

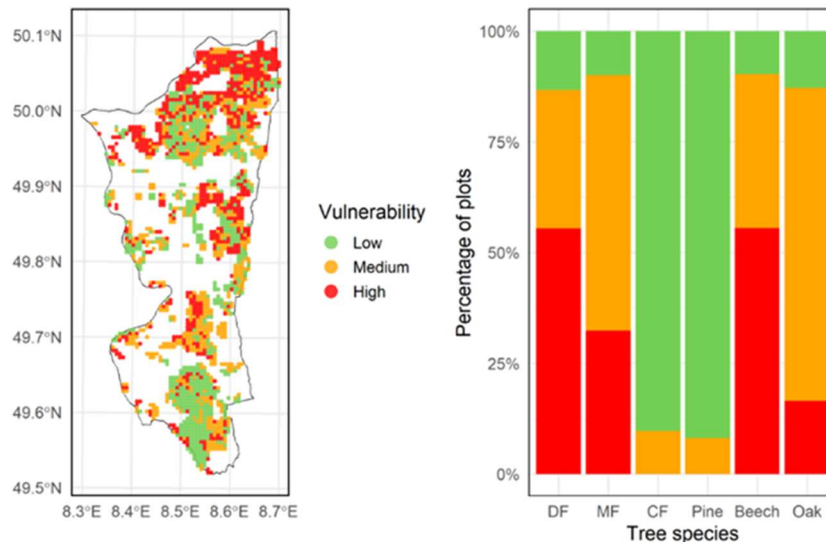


Abbildung 18. Karte der relativen Gefährdung durch Trockenstress (Vulnerability) in Wäldern im Hessischen Ried (Low: Niedrig; Medium: Mittel; High: Hoch) und Verteilung der Gefährdungsklassen auf die verschiedenen Baumarten/Waldtypen (DF: Laubwald; MF: Mischwald; CF: Nadelwald; Pine: Kiefer; Beech: Buche; Oak: Eiche).

II.4.3.1.3 Wirkung des Waldumbaus auf die Grundwasserneubildungsmenge

Die im Hessischen Ried angewandten WEZ wurden unabhängig von diesem Projekt entwickelt und basieren auf Standortmerkmalen sowie der Eignung und Risikobewertung der Baumarten (Döbbeler et al. 2025). In dieser Studie dienen diese vordefinierten WEZ als alternative Waldumbauszenarien, die eine Beurteilung der Wirkungen klimaangepasster Baumartenmischungen auf hydrologische Prozesse – insbesondere die Grundwasserneubildung – unter vergangenen und zukünftigen Klimabedingungen ermöglichen (Abb. 19).

Zwar zielen die WEZ in erster Linie darauf ab, die Stabilität und Widerstandsfähigkeit der Wälder gegenüber Klimabelastungen zu verbessern, doch können ihre Auswirkungen auf den Wasserhaushalt variieren und werden daher hier im Rahmen der Gesamtbewertung von Waldumwandlungsmaßnahmen analysiert. Ziel dieser Bewertung ist nicht eine ökonomische Analyse, sondern wissenschaftliche Grundlagen für das Verständnis potenzieller Zielkonflikte zwischen klimaresilienter Waldbewirtschaftung und hydrologischen Ökosystemfunktionen im Hessischen Ried zu schaffen.

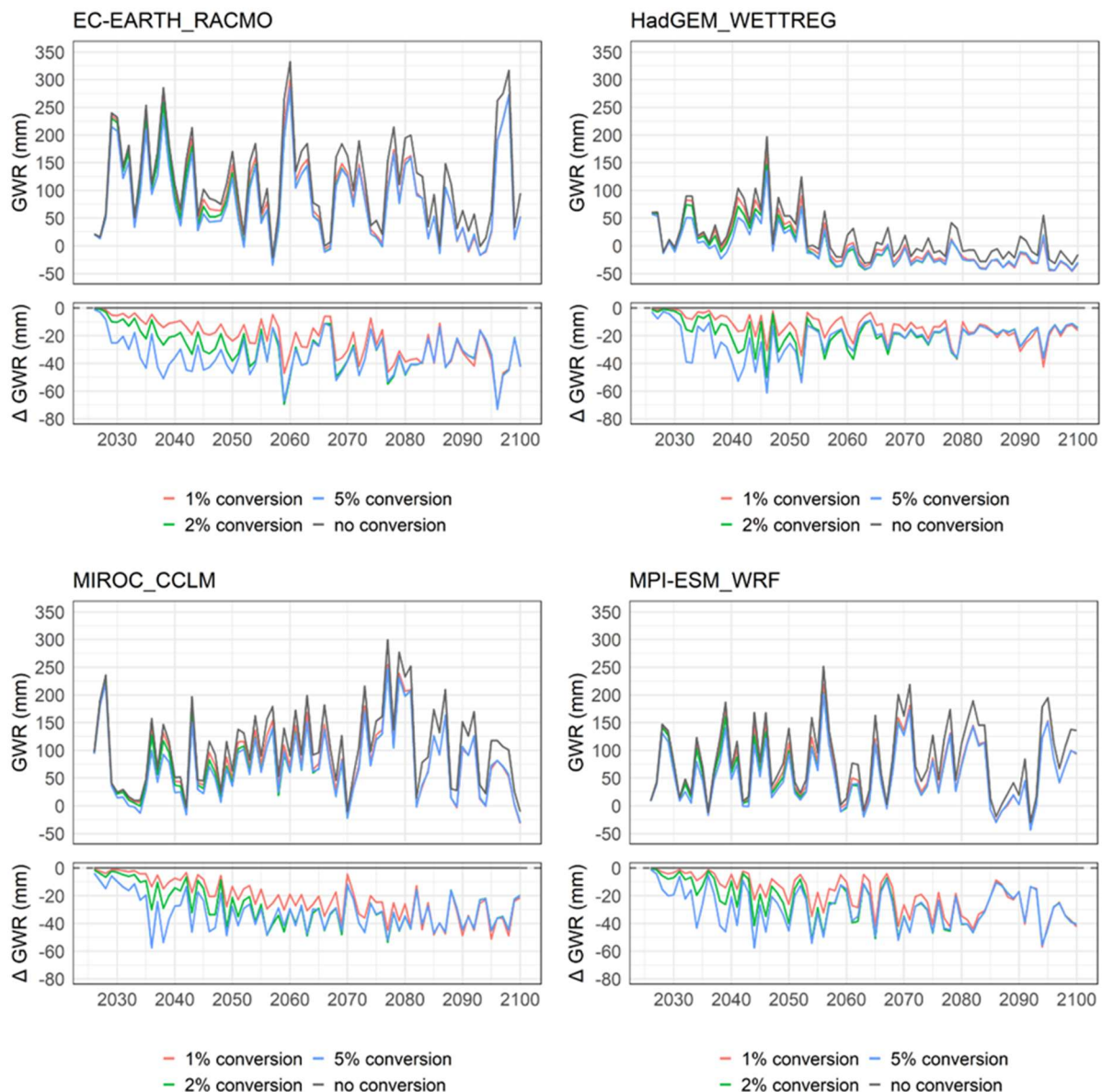


Abbildung 19. Jährliche Grundwasserneubildung für Waldumbauszenarien (jeweils 1%, 2% und 5% Umbau der Waldfläche pro Jahr) unter vier verschiedenen Klimaprojektionen im Hessischen Ried. Die obere Grafik zeigt jeweils die absolute jährliche Grundwasserneubildung (GWR mm), die untere Grafik die Differenz (Δ GWR mm) zu einem Szenario ohne Waldumbau (no conversion).

II.4.3.2 Maßnahme Oberflächenbewässerung im Wald

Zur Bewertung der möglicher Bewässerungsmaßnahmen wurde die zuvor mit LWF-Brook90 simulierte Wasserbilanz, die auf historischen Klimabedingungen sowie auf vier Klimaprojektionen basiert, weiter analysiert. Der Modellierungsansatz ermöglicht die Abschätzung der Wasserbilanzen auf Bestandsniveau und die Ableitung des Bewässerungsbedarfs unter sich ändernden klimatischen Bedingungen. Die Waldflächen für eine potenzielle Bewässerung wurden auf Bestände beschränkt, die zum europäischen Schutzgebietssystem Flora-Fauna-Habitat (FFH) gehören und dem FFH-Lebensraumtyp 9160 (Lebensraumtyp LRT 9160: Sternmieren-Eichen-Hainbuchenwälder) zugeordnet sind. Für diese Gebiete wurde der jährliche Netto-Bewässerungsbedarf aus der simulierten Wasserbilanz durch Ermittlung der Transpirationsdefizite berechnet. Zur Annäherung an die Brutto-Bewässerungsmengen wurden empirische Daten aus dem SiZuRi-Pilotprojekt herangezogen, da diese Werte die Bewässerungsverluste unter praktischen Feldbedingungen berücksichtigen (Köhler et al. 2023). Die Ergebnisse liefern

eine Grundlage für die Abschätzung des künftigen Wasserbedarfs in sensiblen Waldgebieten und unterstützen die anschließende Entwicklung von Waldbewirtschaftungsempfehlungen.

FFH-Gebiete in Deutschland sind Teil des Natura-2000-Netzwerks, das im Rahmen der FFH-Richtlinie der EU (Richtlinie 92/43/EWG) eingerichtet wurde. Dabei handelt es sich um Schutzgebiete, die zur Erhaltung bestimmter natürlicher Lebensraumtypen und wildlebender Arten von gemeinschaftlichem Interesse ausgewiesen wurden. Diese Gebiete unterliegen Schutzmaßnahmen, die darauf abzielen, einen „günstigen Erhaltungszustand“ für Lebensräume und Arten zu erhalten oder wiederherzustellen (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt 2020).

Der Lebensraumtyp 9160 umfasst subatlantische und mitteleuropäische Eichen-Hainbuchenwälder (Stellario-Carpinetum), die sich auf zeitweise oder dauerhaft feuchte bis nasse Böden mit hohem Grundwasserstand entwickeln. Diese Standorte können vorübergehend überflutet werden und sind aufgrund der saisonalen Wassersättigung für Buchen ungeeignet. Die Wälder kommen vorwiegend auf vergleyten, lehmreichen Auenböden oder Pseudogleyböden mit ausgeprägtem Grundwassereinfluss vor. Der LRT 9160 ist in Hessen nur noch in relativ kleinen und fragmentierten Vorkommen vorhanden, wobei sich die größten verbleibenden Bestände im Hessischen Ried befinden. Aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung stehen LRT 9160-Gebiete unter dem Schutz der EU-Habitatrichtlinie und an Auenstandorten zudem unter § 30 Abs. 2 BNatSchG (HLNUG, 2022).

Da diese Wälder auf dauerhaft feuchte Bodenverhältnisse angewiesen sind, reagieren sie besonders empfindlich auf Grundwasserabsenkungen, die für die Wälder des Hessischen Rieds eine große Beeinträchtigung darstellen (Ahner et al. 2013). Ein Verlust des Anschlusses der Baumwurzeln an das Grundwasser kann die Vitalität der Wälder beeinträchtigen und z.B. die natürliche Verjüngung behindern. Zur historischen Reduktion ihres Verbreitungsgebiets hat auch die Umwandlung der Waldflächen in den Auengebieten für eine landwirtschaftliche Nutzung oder für die Besiedlung beigetragen (HLNUG, 2022).

In dieser Studie wurden 81 Rasterzellen des LRT 9160 mit einer Fläche von etwa 422 ha betrachtet. Von den 81 Zellen hatten 63 im Jahr 2013 keine Verbindung zum Grundwasser (BGS-Umwelt, pers. Mitt.). Angesichts ihrer funktionalen Abhängigkeit von einem hohen Grundwasserspiegel ist dieser Lebensraumtyp bei der Bewertung von Bewässerung oder zusätzlicher Wasserversorgung als Schutzmaßnahme von unmittelbarer Bedeutung. Bewässerungsmaßnahmen oder Maßnahmen zur Grundwasseraufspiegelung können dazu beitragen, bei klima- oder entnahmebedingten Grundwasserabsenkungen eine ausreichende Bodenwasserverfügbarkeit aufrechtzuerhalten.

II.4.3.2.1 Bewässerungsbedarf

Der Bewässerungsbedarf im Wald wurde aus einer Analyse des Transpirationsdefizits (T_{diff}) für die 81 priorisierten Zellen abgeleitet. T_{diff} stellt die Wassermenge dar, die der Wald zusätzlich benötigt, um Wasserstress zu vermeiden. T_{diff} wurde anhand der Wasserbilanzvariablen aus den LWF-Brook90-Simulationen berechnet. Die kumulative Summe für jede Vegetationsperiode wurde als jährlicher Bewässerungsbedarf definiert. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um Nettobeträge handelt, die weder die Bewässerungseffizienz noch Systemverluste berücksichtigen. Folglich ist eine weitere Analyse dieser Faktoren erforderlich, um den Gesamt- oder Bruttobewässerungsbedarf zu ermitteln. Abbildung 20 zeigt das jährliche T_{diff} in jeder der Zellen sowie den Median aller 2048 in dieser Studie untersuchten Zellen.

Der anhand der simulierten Wasserbilanz geschätzte Bewässerungsbedarf hängt stark von den sehr dynamischen atmosphärischen Bedingungen im Wald ab (Abb. 21). Der Bewässerungsbedarf in der nahen Zukunft (2021–2050) ähnelt dem Bewässerungsbedarf des Referenzzeitraums (1991–2020), mit Ausnahme der Projektion aus dem HadGEM_WETTREG-Modell, welche deutlich höhere Bedarfe annimmt. In der fernen Zukunft (2071–2100) ist der Anstieg jedoch auch in den übrigen Zukunftsprojektionen deutlicher zu erkennen.

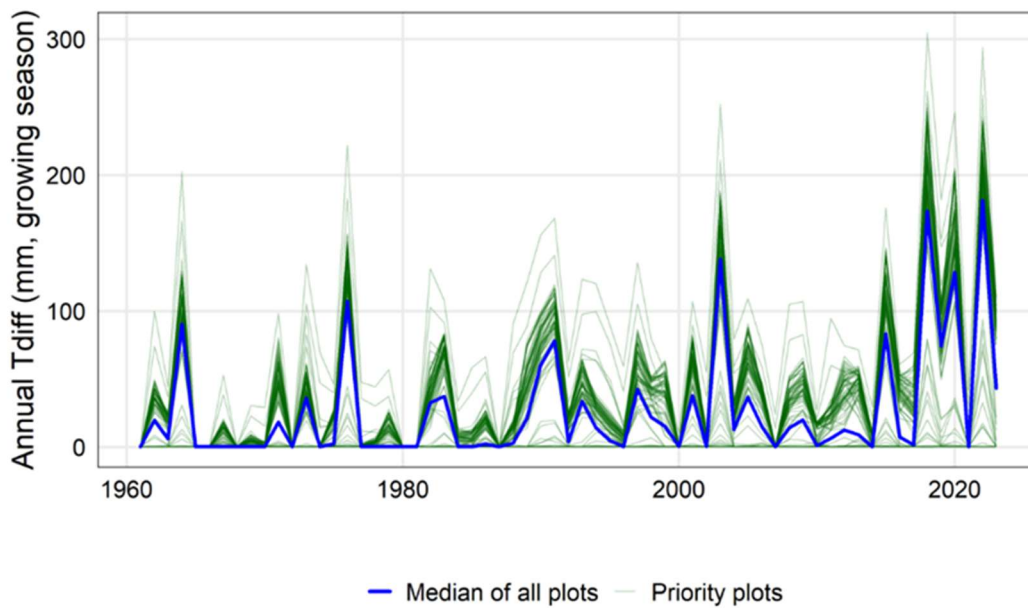


Abbildung 20. Jährliches Transpirationsdefizit in der Vegetationsperiode (Annual Tdiff growing season) für die LRT 9160-Flächen (grün, 81 Priority plots) und Median für alle 2048 Parzellen (blau) im Zeitraum 1960 bis 2023.

Im Rahmen des Pilot-Projekts wird seit 2021 in einem Eichen-Hainbuchen-Bestand im Stadtwald Gernsheim in dreifacher Wiederholung eine Bewässerung erprobt, um grundwasserabhängige Eichen-Hainbuchenwälder im Hessischen Ried zu revitalisieren (Köhler et al., 2023). Das eingesetzte System besteht aus oberirdischen Rohren mit gebohrten Auslässen, durch die das Wasser auf der Fläche verteilt wird. Die zwischen April und Oktober ausgebrachten Bewässerungsmengen betrugen 266 mm im Jahr 2021, 513 mm im Jahr 2022 und 332 mm im Jahr 2023. Die Bewässerungsmengen sind vergleichsweise hoch und übersteigen den berechneten Bewässerungsbedarf um ein Mehrfaches.

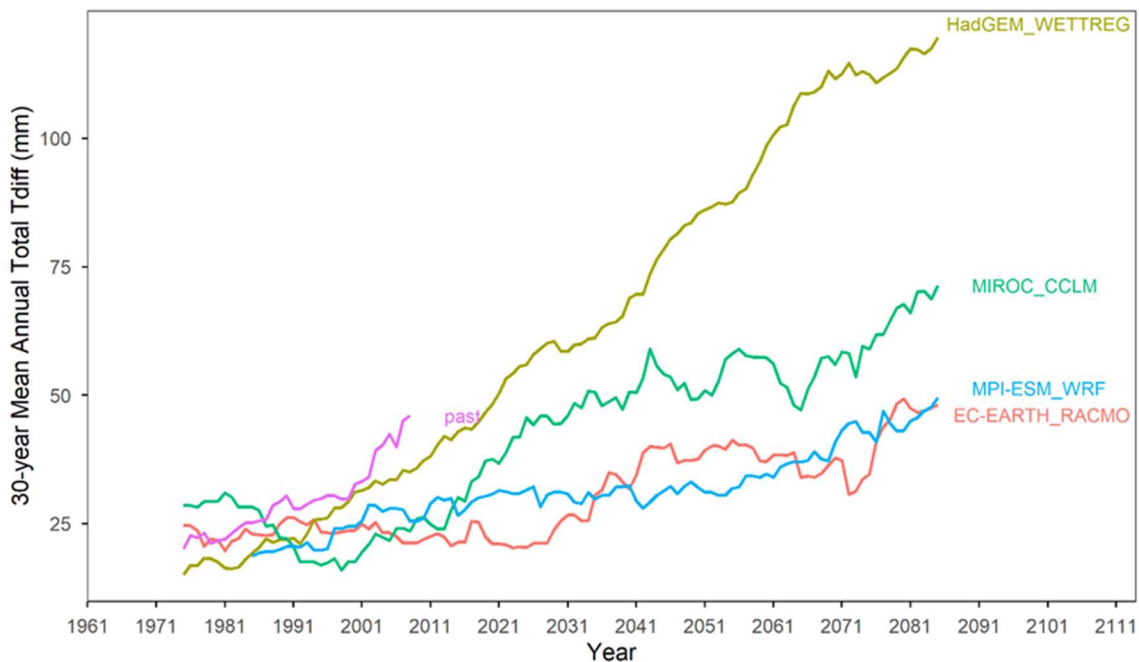


Abbildung 21. 30-jähriges gleitendes Mittel des Bewässerungsbedarfs (30-year Mean Annual Total Tdiff, mm) für beobachtetes Klima und für vier verschiedene Klimaprojektionen für die LRT 9160-Flächen im Hessischen Ried.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Die simulierten Maßnahmen zum Waldumbau basieren auf der derzeitigen Veröffentlichung des Katalogs der Waldentwicklungsziele (WEZ) (Döbbeler et al. 2025). Das aktuelle WEZ-Konzept, das von der NW-FVA in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband entwickelt wurde, umfasst 34 Bewirtschaftungsziele, die in den meisten Fällen für das Hessische Ried die Kiefer als Leit- oder Mischbaumart empfehlen. Neuere Untersuchungen legen jedoch eine zu günstig eingeschätzte Trockenstressbewertung der Kiefer nahe. Andererseits liegen jetzt Einschätzungen der Anbauwürdigkeit von alternativen Baumarten vor (Lieven et al. 2025), nach denen für sehr trockene Standorte wie vielerorts im Hessischen Ried mehrere Baumarten zu empfehlen sind, darunter die Roteiche, die Zerreiche und die Schwarzkiefer. Zukünftig wird der WEZ-Katalog um WEZ erweitert, die auf extrem trockenen Standorten Anwendung finden sollen (Döbbeler & Axer, 2026). Dieses sind die WEZ 12 mit Eiche und alternativen Baumarten und WEZ 77 mit Schwarzkiefer, Eiche und Zeder.

Für die Planung der Waldumbaumaßnahmen im Hessischen Ried bedeutet dies, dass anstatt des jetzt auf dem größten Teil der Waldfläche geplanten WEZ 71 die neu hinzugekommenen WEZ 12 und 77 empfohlen werden können. Für die zukünftige Grundwasserneubildung würden sich bei einem höheren Anteil von Eichen und alternativen Baumarten vermutlich höhere Raten ergeben. Insbesondere unter Roteiche wurden im Hessischen Ried hohe Grundwasserneubildungsmengen beobachtet, die über denen der Kiefer lagen (Brechtel 1977). Wo die bei Brechtel (1977) angegebenen Unterschiede im Vergleich zu anderen Angaben aus der Literatur sehr groß erscheinen.

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das LWF-Brook90-Modell ist, wie alle prozessbasierten Modelle, von der Parametrisierung (Bodeneigenschaften, Wurzelverteilung und Bestandseigenschaften) und den Eingabedaten (Klima, Niederschlagsverteilung) abhängig. Da eine direkte Messung der Grundwasserneubildung nur sehr schwer möglich ist (z. B. mittels Lysimetern), ist eine Validierung der Modellergebnisse schwierig. Da zudem vergleichbare Studien, die sich ausschließlich auf bewaldete Abschnitte des Rieds konzentrieren, rar sind (Ahner et al. 2013), stützen sich unsere Vergleiche auf Datensätze, die einen größeren Raum umfassen oder anders modelliert wurden. Der rasterbasierte Ansatz bietet eine effiziente Möglichkeit, die räumliche Variabilität mit einem eindimensionalen Modell wie LWF-Brook90 darzustellen. Jede Rasterzelle fungiert dabei als unabhängige vertikale Boden-Vegetations-Säule, was realistische lokale Simulationen ermöglicht und gleichzeitig den Rechenaufwand für die Modellierung lateraler Wasserbewegungen vermeidet. Starke laterale Flüsse sind aufgrund der weitgehend ebenen Lage des Hessischen Rieds nicht zu erwarten. Die einheitliche Gitterstruktur unterstützt eine konsistente Integration mit GIS- und Fernerkundungsdaten und erleichtert skalierbare, großflächige Simulationen. Obwohl dieser Ansatz laterale hydrologische Wechselwirkungen oder feinskalige Heterogenität innerhalb der Zellen nicht erfasst, bietet er ein praktisches Gleichgewicht zwischen räumlicher Detailgenauigkeit und Recheneffizienz für regionale ökohydrologische Analysen.

Der in der vorliegenden Studie simulierte Rückgang der Grundwasserneubildung hat erhebliche Implikationen für die zukünftige Grundwasserbewirtschaftung. Für die Wasserwirtschaft könnte ein Rückgang der Grundwasserneubildung die nachhaltige Entnahme einschränken, zumal das Hessische Ried bereits jetzt durch vielfältige Nutzungsansprüche stark belastet. Für Waldökosysteme kann eine verminderte natürliche Grundwasserneubildung mit damit einhergehenden sinkenden Grundwasserständen zu einem Verlust des Grundwasseranschlusses für weitere Waldbestände führen. Insbesondere während längerer Trockenperioden kann dies zu einer weiteren Verschlechterung des Vitalitätszustandes der Waldökosysteme führen. Daher unterstützt die hessische Landesregierung bereits Maßnahmen zur Anpassung der Grundwasserbewirtschaftung an Klimastress (z. B. eine Machbarkeitsstudie https://hessen.de/presse/pressearchiv/400000-euro-fuer-klimaangepassten-grundwasserbewirtschaftung-im-hessischen-ried?utm_source=chatgpt.com). Es sind jedoch eine Vielzahl von Maßnahmen und Beiträge aller Akteure erforderlich, um die Grundwasserressourcen in der

Region und deren Nutzbarkeit zu stabilisieren. Die vorliegende Studie unterstützt die Machbarkeitsstudie durch eine quantitative Bewertung der Maßnahmenoptionen. Das entwickelte Modellierungssystem kann darüber hinaus für vielfältige andere Aufgaben im Bereich der quantitativen und qualitativen Beurteilung der Grundwasserressourcen im Hessischen Ried genutzt werden.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Das Webportal zur klimaangepassten Baumartenwahl in Hessen wird durch regelmäßige Schulungen und Lehrgänge sowie durch Erklärvideos und Broschüren unterstützt (<https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem/hessen>).

Regelmäßiger Austausch mit den Projektpartner:innen (Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung, Thünen-Institut für Waldökosysteme, Julius Kühn-Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt) im Waldklimafonds-Projekt „Trockenheitsrisiken im Wald unter Klimawandel TroWaK“, insbesondere zur Weiterentwicklung des Modells LWF-Brook90.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

- Köhler, M.; Gerdes, H.; Meeseburg, H. (2023): Experimentelle Waldbewässerung im Hessischen Ried. *Wasser und Abfall* 25(4), 14-21.
- Morales-Santos, A.; Köhler, M.; Fleck, S.; Scheler, B.; Wagner, M.; Meeseburg, H. (2024): Modelling water balance components in a temperate forest in Germany: A comparative analysis of pine, oak, and beech, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-17088, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-17088>.
- Köhler, M.; Bilyera, N.; Gerdes, H.; Meeseburg, 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>.
- Morales-Santos, A.; Köhler, M.; Fleck, S.; Scheler, B.; Wagner, M.; Meeseburg, H. (2024): Modelling water balance components in a temperate forest in Germany: A comparative analysis of pine, oak, and beech. 14. Gemeinsame Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“, 24.04. – 26.04.2024, Göttingen.
- Morales, A. G.; Köhler, M.; Sutmöller, J.; Ahrends, B.; Meeseburg, H. (2025): Modelling Climate Change Effects on Soil Water Dynamics and Groundwater Recharge in Temperate Forests in Germany, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-14995, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-14995>.
- Morales, A. G., Köhler, M., Sutmöller, J., Ahrends, B., Meeseburg, H. (2025): Modelling Climate Change Effects on Soil Water Dynamics and Groundwater Recharge in Temperate Forests in Germany, LURCH Summer School 2025.
- von Rudorff, L.; Köhler, K.; Bilyera, N.; Gerdes, H.; Meeseburg, H.; Ahrends, B. (2025): Effects of irrigation on declining forest stands in the Hessian Ried. Book of Abstracts, GfÖ 2025 54th GfÖ Annual Meeting, Würzburg, Germany, September 1-5 2025, "Ecological Systems Under Pressure: Challenges and Solutions, 583.
- von Rudorff, L.; Köhler, K.; Bilyera, N.; Gerdes, H.; Meeseburg, H.; Ahrends, B. (2025): Tree recovery and forest ecosystem response under experimental irrigation in the Hessian Ried. Forstwissenschaftliche Tagung 2025, 29.9.-2.10.2025, Freiburg.
- Meeseburg, H.; Morales, A.; Köhler, M.; Ahrends, B. (2026): Maßnahmen zur Stärkung des Wasserrückhalts und der Grundwasserressourcen in Wäldern des Hessischen Rieds. Abstractband Fachtagung Wald und Wasser, S. 15, https://www.fva-bw.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Veranstaltungen/2026/15._Fachtagung_Wald_und_Wasser/Abstractband_FachtagungWW.pdf
- Meeseburg, H.; Morales, A.; Köhler, M.; Ahrends, B. (2026): Maßnahmen zur Stärkung des Wasserrückhalts und der Grundwasserressourcen in Wäldern des Hessischen Rieds. Fachtagung Wald und Wasser „Böden, Stoffflüsse und Wasserhaushalt im Klimawandel verstehen und steuern“, Freiburg, 22.-24.4.2026, <https://www.fva->

bw.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Veranstaltungen/2026/15._Fachtagung_Wald_und_Wasser/Vortraege_und_Poster/260422_Meesenburg_et_al_WaRM.pdf.

von Rudorff, L.; Köhler, M.; Sennhenn-Reulen, H.; Bilyera, N.; Gerdes, H.; Meeseburg, H.; Ahrends, B. (2026): Auswirkungen experimenteller Waldbewässerung auf die Baumvitalität und das Waldökosystem im Hessischen Ried. Abstractband Fachtagung Wald und Wasser, S. 42, https://www.fva-bw.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Veranstaltungen/2026/15._Fachtagung_Wald_und_Wasser/Abstractband_FachtagungWW.pdf

II.9 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung (5. Aufl.). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Ahrends B., Meeseburg H., Döring C., Jansen M. (2010). A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. In: Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March-2 April 2009), IAHS Publications, Bd. 336. S. 32–37.
- Ahrends, B.; Suttmöller, J.; Schmidt-Walter, P. u. Meeseburg, H. (2018a): Beitrag von Waldflächen zur Sickerwasserbildung in Niedersachsen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 39.18, 169-180.
- Ahrends, B.; Schmidt-Walter, P.; Fleck, S.; Köhler, M. u. Weis, W. (2018b): Wasserhaushalts-simulationen und Klimadaten. Freibg. Forstl. Forsch., 101, 74-94.
- Ahrends, B.; Schmitz, A.; Prescher, A.-K.; Wehberg, J.; Geupel, M.; Andreae, H. u. Meeseburg, H. (2020): Comparison of Methods for the Estimation of Total Inorganic Nitrogen Deposition to Forests in Germany. Front. For. Glob. Change, 3, (103): doi: 10.3389/ffgc.2020.00103.
- Ahrends B., Scheler B., Wagner M., Fleck S., Fortmann H., Meeseburg H. (2021). Trends der Nährstoffbilanzen forstlich genutzter Intensiv-BDF in Niedersachsen. In: Höper H., Meeseburg H., Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (Hrsg.), 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, GeoBerichte, Bd. 39. Hannover, S. 40–54.
- Ahrends, B.; Fortmann, H. u. Meeseburg, H. (2022): The Influence of Tree Species on the Recovery of Forest Soils from Acidification in Lower Saxony, Germany. Soil Systems, 6, (2): 40.
- Albert M., Nagel J., Schmidt M., Nagel R.-V., Spellmann H. (2024): Eine neue Generation von Ertragstafeln für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer in Nordwestdeutschland. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 22. Universitätsverlag Göttingen. [IV] 113 S. <https://doi.org/10.17875/gup2024-2636>
- Althoff, S., Berthold, G., Brahmmer, G., von Pape, W.-P., Toussaint, B. (1996). Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Hessischen Ried: Teilmodell des mathematischen Grundwassermodells Hessisches Ried. Wiesbaden: Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.).
- Ahner, J.; Ahrends, B.; Engel, F.; Hansen, J.; Hentschel, S.; Hurling, R.; Meeseburg, H.; Mestemacher, U.; Meyer, P.; Möhring, B.; Nagel, J.; Pape, B.; Rohde, M.; Rumpf, H.; Schmidt, M.; Schmidt, M.; Spellmann, H.; Suttmöller, J. (2013): Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried: Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushalts- und Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem Europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000. Beitr. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, 10, 398 S., <https://doi.org/10.17875/gup2013-259>.
- Beudert, B., Bässler, C., Thorn, S., Noss, R., Schröder, B., Dieffenbach-Fries, H., Foullois, N., Müller, J. (2015). Bark Beetles Increase Biodiversity While Maintaining Drinking Water Quality. Conservation Letters, 8, 272-281. <https://doi.org/10.1111/conl.12153>.
- Brechtel, H. M. (1973). Ein methodischer Beitrag zur Quantifizierung des Einflusses von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen auf die Grundwasserneubildung in der Rhein-Main-Ebene. Zeitschr. Deutsche Geol. Ges., 124, 593–605. <https://doi.org/10.1127/zdgg/124/1973/593>
- Döbbeler H., Axer M. (2026). Der Mischwald von morgen. BDFaktuell 67(5), 10–11.

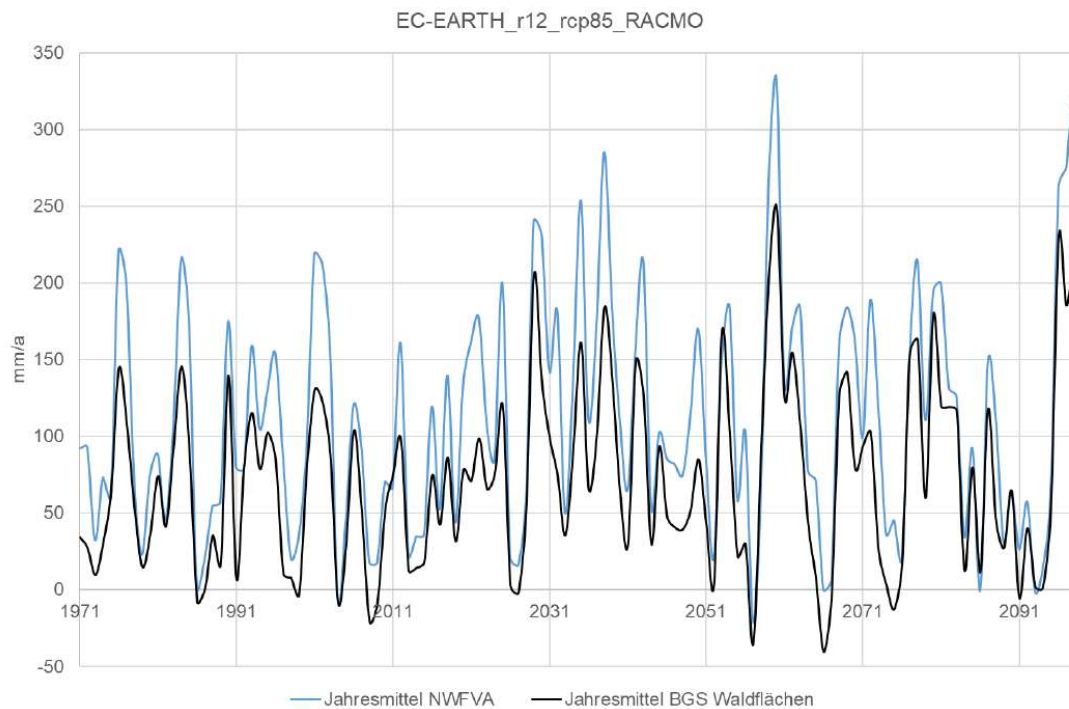
- Döbbeler, H., Lieven, S., Nagel, R. V., & Hamkens, H. (2025). Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald: Empfehlungen der NW FVA in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), 51 S.
- DWA (Hrsg.) (Beisecker, R.; Bittersohl, J.; Blankenburg, J.; Evers, J.; Ihling, H.; Mauden, R.; Meesenburg, H.; Meissner, R.; Rupp, H.; Schrautzer, J.; Walther, W.) (2020). Diffuse Stoffeinträge in Gewässer aus Wald und naturnahen Nutzungen. DWA-Themen T1/2020, 127 S., ISBN: 978-3-88721-901-7
- Engardt, M.; Simpson, D.; Schwikowski, M. u. Granat, L. (2017): Deposition of sulphur and nitrogen in Europe 1900–2050. Model calculations and comparison to historical observations. *Tellus Ser. B*, 69, (1): 1328945.
- Evers, J., Ahrends, B., Weis, W. (2019). Stickstoffstatus in der Bodenlösung und Stickstoffbilanz. In Evers J., Dammann I., König N., Paar U., Stüber V., Schulze A., Schmidt M., Schönfelder E., Eichhorn J. (2019): Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen: Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beitr. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, 19, 488 S. <https://doi.org/10.17875/gup2019-1162>.
- Fachzentrum Klimawandel Hessen im HLNUG (2017). Klimawandelbedingte Änderungen des Wasserbedarfs und der Stickstoff-Düngung für den Gemüseanbau im Hessischen Ried – Abschlussbericht Geisenheim Hochschule / Fachzentrum Klimawandel Hessen im HLNUG.
- Feigenwinter, I., Kotlarski, S., Casanueva, A., Fischer, A.M., Schwierz, C., & Liniger, M. (2018). Exploring quantile mapping as a tool to produce user tailored climate scenarios for Switzerland. Technical Report MeteoSwiss, 270, 44 pp
- Fleck, S.; Eickenscheidt, N.; Ahrends, B.; Evers, J.; Grüneberg, E.; Ziche, D.; Höhle, J.; Schmitz, A.; Weis, W.; Schmidt-Walter, P.; Andreae, H. u. Wellbrock, N. (2019): Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils. In: Wellbrock, Nicole u. Bolte, Andreas: Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring. Springer International Publishing. Cham. S. 123-166.
- Fichtner, T., Aguilar Avila, Y. J., Hartmann, A., Seeger, S., Maier, M., & Raspe, S. (2025). Effects of spatial soil moisture variability in forest plots on simulated groundwater recharge estimates [Preprint]. EGUsphere Preprint, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4025>.
- ForUmV-AG (Bund-Länder-AG zur Umsetzung der Verordnung über Erhebungen zum forstlichen Umweltmonitoring, J. Eichhorn; A. Bolte, I. Chmara, H.-P. Dietrich, S. Fleck, J. Gehrmann, T. Kirchner, N. König, H. Meesenburg, S. Raspe, H. Schmidtke, G. Schütze, S. Strich, U. Sukopp) (2016). Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland: Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.), 40 S.
- Goldscheider, N. & Roques, C. (2026): Wald und Grundwasser. *Grundwasser*, 31, (2): 133-134.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol. Modelling*, 116, 269-283, [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1).
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80-91, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- Hammel, K., & Kennel, M. (2001). Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. München: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LfW).
- Hansen, J., & Nagel, J. (2014). Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGroSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen / Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Beitr. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, 11.
- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., & Meesenburg, H. (2021). Spatial 3D mapping of forest soil carbon stocks in Hesse, Germany. Heitkamp, F.; Ahrends, B.; Evers, J.; Meesenburg, H. (2021): Spatial 3D modelling of forest soil carbon stocks in Hesse, Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 184, 635–656, <https://doi.org/10.1002/jpln.202100138>.

- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., Steinicke, C., Meesenburg, H. (2020). Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: Regionwide application for stakeholders of Hesse, Germany. *Geoderma Regional* 23, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00340>.
- Hjellbrekke, A.-G. (2024). Data Report 2022. Particulate matter, carbonaceous and inorganic compounds (EMEP/CCC-Report 1/2024). Kjeller: NILU.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2022). Hessische Lebensraum- und Biotopkartierung (HLBK) – Kartieranleitung. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Naturschutzskripte 8, 468 S.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2021). Geologie, Boden, Georessourcen und Geogefahren – Band 1: Rhein-Main-Gebiet. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (2024). Klimareport Hessen 2024: Das Klima in Hessen – gestern, heute und in der Zukunft. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2015). Quantifizierung des Nitratabbauvermögens in den Grundwasserkörpern des Hessischen Rieds und Lokalisierung von Risikogebieten. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Kirchner, M.; Fegg, W.; Römmelt, H.; Leuchner, M.; Ries, L.; Zimmermann, R.; Michalke, B.; Wallasch, M.; Maguhn, J.; Faus-Kessler, T. u. Jacobi, G. (2014): Nitrogen deposition along differently exposed slopes in the Bavarian Alps. *Sci. Total Environ.*, 470-471, 895-906.
- Lieven, S., Schmidt, D., Nagel, R.-V. (2025). Anbauwürdigkeit und ökologische Zuträglichkeit alternativer Baumarten in Nordwestdeutschland. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 316 S. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17129915>.
- Löfgren, S., Aastrup, M., Bringmark, L., Hultberg, H., Lewin-Pihlblad, L., Lundin, L., Pihl Karlsson, G., Thunholm, B. (2011). Recovery of Soil Water, Groundwater, and Streamwater from Acidification at the Swedish Integrated Monitoring Catchments. *AMBIO* 40, 836–856, <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0207-8>
- Löfgren, S., Fröberg, M., Yu, J., Nisell, J., Ranneby, B. (2014). Water chemistry in 179 randomly selected Swedish headwater streams related to forest production, clear-felling and climate. *Environ. Monit. Assess.* 186, 8907–8928, <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4054-5>
- Müller, J. (2009). Forestry and water budget of the lowlands in northeast Germany - consequences for the choice of tree species and for forest management. *J. Water Land Dev.* No. 13a: 133–148, DOI: 10.2478/v10025-010-0024-7.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 282–290.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie u. Klimaschutz (2020). FFH-Richtlinie und gemeldete Gebiete. https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/natur_amp_landschaft/natura_2000/ffh_richtlinie_und_gemeldete_gebiete/ffh-richtlinie-und-gemeldete-gebiete-8632.html
- Paar, U. & Klinck, C. (2025). Wald in der Rhein-Main-Ebene. In *Waldzustandsbericht 2025 für Hessen*, 20–22, Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17370272>
- Peters, K. u. Eiden, R. (1992): Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest. *Atmos. Environ.*, 26A, (14): 2555-2564.
- Posch, M.; Vries De, W. u. Sverdrup, H. (2015): Mass Balance models to derive critical loads of nitrogen and acidity for terrestrial and aquatic ecosystems. In: Vries de, W.; Hettelingh, J.-P. u. Posch, M.: *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments*. Environmental Pollution, 25. Springer. Dordrecht, Heidelberg, New York, London. S. 171-205.
- Puhlmann, H., Schmidt-Walter, P., Hartmann, P., Meesenburg, H., & von Wilpert, K. (2019). Soil water budget and drought stress. In: N. Wellbrock; A. Bolte (eds.): *Status and dynamics of forests in Germany*. *Ecol. Studies* 237, 55-91, https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_3.
- Schaap, M.; Hendriks, C.; Kranenburg, R.; Kuenen, J.; Segers, A.; Schlutow, A.; Nagel, H.-D.; Ritter, A. u. Banzhaf, S. (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015

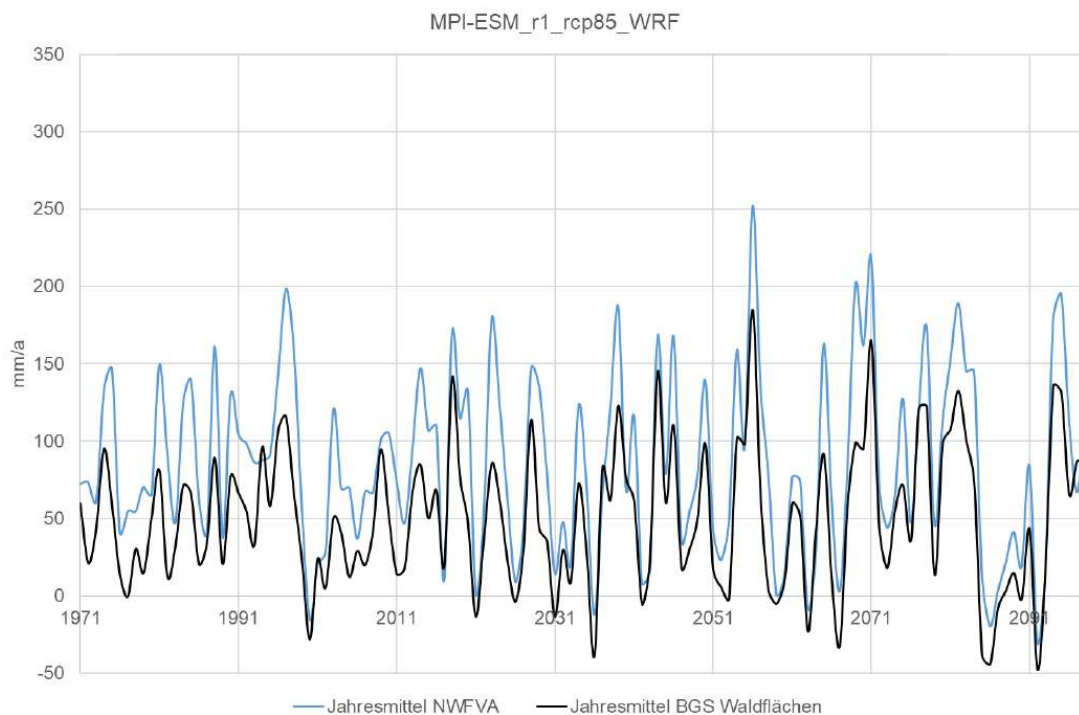
- zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. Texte Umweltbundesamt, 79, 149.
- Schmidt-Walter, P.; Ahrends, B.; Mette, T.; Puhlmann, H. u. Meesenburg, H. (2019): NFIWADS: The water budget, soil moisture, and drought stress indicators database for German National Forest Inventory (NFI). *Ann. Forest Sci.*, 76, 39. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0822-2>:39.
- Schmidt-Walter, P., Trotsiuk, V., Meusburger, K., Zacios, M. & Meesenburg, H. (2020). Advancing simulations of water fluxes, soil moisture and drought stress by using the LWF-Brook90 hydrological model in R. *Agricultural Forest Meteorol.* 291, 108023, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108023>
- Shekhar, A. (2023). Forest vulnerability to extreme dryness stress. Zürich: ETH Zürich, ETH Library, Research Collection.
- Speich, M.J.R. (2019). Quantifying and modeling water availability in temperate forests: a review of drought and aridity indices. *iForest* 12: 1-16. doi: 10.3832/for2934-011.
- Sutanto, S. J., Vitolo, C., Di Napoli, C., D'Andrea, M., & Van Lanen, H. A. (2020). Heatwaves, droughts, and fires: Exploring compound and cascading dry hazards at the pan-European scale. *Environment International*, 134, 105276.
- Teuling, A. J. (2018): A Forest Evapotranspiration Paradox Investigated Using Lysimeter Data. *Vadose Zone Journal*, 17, (1): 170031.
- von Wilpert, K., Hartmann, P., Puhlmann, H., Schmidt-Walter, P., Meesenburg, H., Müller, J., & Evers, J. (2016). Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: Wellbrock, N.; Bolte, A.; Flessa, H. (Hrsg.): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, Thünen Report 43, 343-386, DOI:10.3220/REP1473930232000 urn:nbn:de:gbv:253-201609-dn057211-6.
- Waldner, P., Braun, S., & Rihm, B. (2019). Schlussbericht des Projekts Nitrate leaching risk mapping (NitLeach II): Kartierung des Risikos von erhöhtem Nitrataustrag im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Birmensdorf / Witterswil / Bern: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL); Institut für Angewandte Pflanzenbiologie; Meteotest AG.
- Weis, W., Ahrends, B., Fleck, S., Habel, R., & Wellpott, A. (2023). Modellparameter zur Abbildung des Standortswasserhaushalts mit LWF-Brook90. In: *Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel*, Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 224. Förderverein Zentrum Wald Forst Holz Weißenstephan e.V., Freising, 22–52.
- Wellhausen, K.; Hippler, S.-M.; Mette, T.; Plettenbacher, T.; Garnreiter, S.; Ahrends, B.; Weiken, S.; Von Rudorff, L.; Schirrmeister, F.; Talkner, U.; Vonderach, C.; Lutz, F.; Hartmann, P.; Osterholt, L.; Puhlmann, H.; Adler, P.; Ziche, D.; Viert, V. u. Riek, W. (2026): Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald: Klima - Nährstoffe - Wasserhaushalt (StWM-KPW). Abschlußbereich des Forschungsvorhabens, 217 S.
- Wesely, M. L. u. Hicks, B. (2000): A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmos. Environ.*, 34, 2261-2282.
- Wessolek, G.; Duijnisveld, W. H. M. u. Trinks, S. (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *J. Hydrol.*, 356, 17-27.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., & Renger, M. (2009). Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. Berlin: *Bodenökologie und Bodengenese* Heft 40.
- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A., & C Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185, [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3).
- Zhang, L.; Dawes, W. R. u. Walker, G. R. (2001): Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37, (3): 701-708.
- Zhang, L.; He, Z.; Wu, Z.; Macdonald, A. M.; Brook, J. R. u. Kharol, S. (2023): A database of modeled gridded dry deposition velocities for 45 gaseous species and three particle size ranges across North America. *Journal of Environmental Sciences*, 127, 264-272.

II.10 Anhang

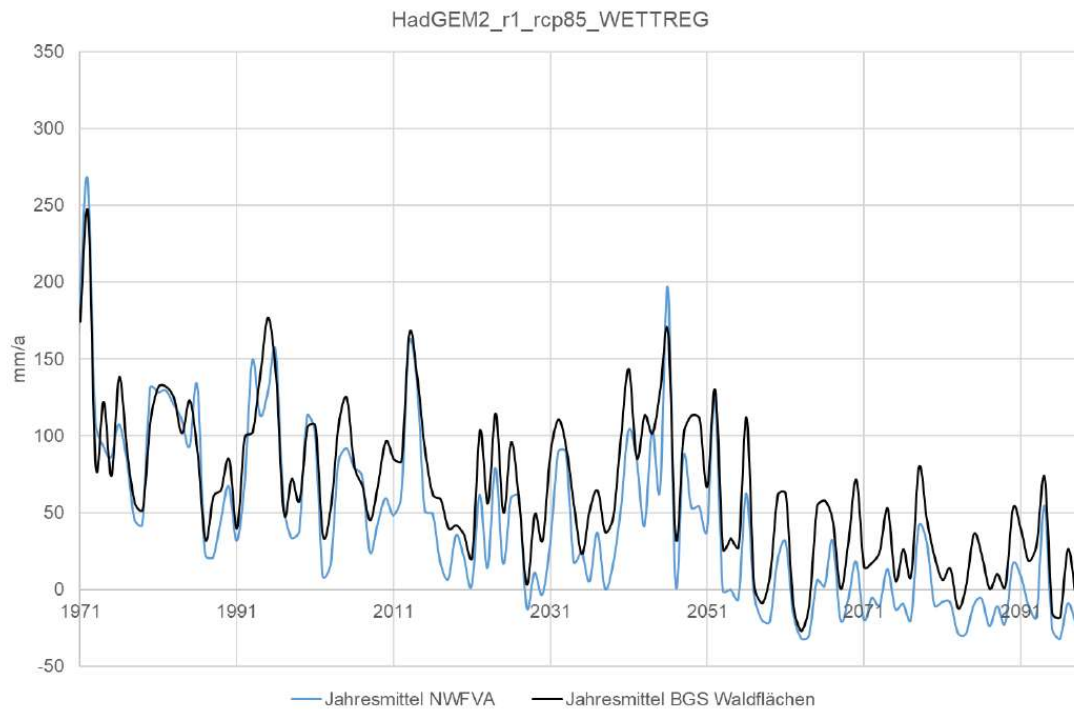
II.10.1 Vergleich Simulation der Grundwasserneubildung mit LWF-Brook90 und MIKE-SHE



Anhang A1. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (mm) in Wäldern des Hessischen Rieds, simuliert mit dem Modell MIKE-SHE (BGS-Umwelt) und dem Modell LWF-Brook90 (NW-FVA) für das Klimamodell EC-EARTH_RACMO.



Anhang A2. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (mm) in Wäldern des Hessischen Rieds, simuliert mit dem Modell MIKE-SHE (BGS-Umwelt) und dem Modell LWF-Brook90 (NW-FVA) für das Klimamodell MPI-ESM_WRF.



Anhang A3. Mittlere jährliche Grundwasserneubildung (mm) in Wäldern des Hessischen Rieds, simuliert mit dem Modell MIKE-SHE (BGS-Umwelt) und dem Modell LWF-Brook90 (NW-FVA) für das Klimamodell HadGEM_WETTREG.