

Literaturstudie zum Thema Wasserhaushalt und Forstwirtschaft

Studie für den Naturschutzbund Deutschland (NABU)

Berlin, 08.09.2020

Autorinnen und Autoren

Judith Reise, Öko-Institut e.V.

Cristina Urrutia, Öko-Institut e.V.

Dr. Hannes Böttcher, Öko-Institut e.V.

Dr. Klaus Hennenberg, Öko-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de

www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71

79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173

79100 Freiburg

Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2

13189 Berlin

Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt

Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
1 Hintergrund und Fragestellungen	5
2 Der Wald und seine Bedeutung für den Wasserhaushalt	5
3 Einfluss der Waldbewirtschaftung auf den Wasserhaushalt	7
3.1 Entwässerungsgräben und Befahrung des Waldbodens	7
3.2 Baumartenwahl, Baumalter und Durchforstungen	8
4 Bestehende Fördermaßnahmen mit Bezug zum Wasserhaushalt	13
4.1.1 Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz	13
4.1.2 Waldklimafonds	16
5 Schlussfolgerungen	16

Zusammenfassung

In den vergangenen zwei Jahren hat die anhaltende Dürre in den deutschen Wäldern zu erheblichen Schäden geführt. Laut aktueller Waldzustandserhebung war der Kronenzustand über alle Baumarten betrachtet seit 1984 noch nie so schlecht wie im Jahr 2019. Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels ist zukünftig weiter mit langanhaltenden Dürreperioden zu rechnen. Die Resilienz der Wälder gegenüber den Folgen des Klimawandels kann aber durch die Verbesserung des Wasserhaushaltes im Wald erhöht werden.

Die vorliegende Studie untersucht auf Grundlage von Informationen aus der Fachliteratur und Expertengesprächen, wie sich Entwässerungssysteme und Bodenverdichtung sowie Waldbaumaßnahmen auf den Wasserhaushalt des Waldes auswirken. Ferner bietet sie einen Überblick über die bestehenden Fördermaßnahmen im Privatwald, die einen positiven Effekt auf den Wasserhaushalt im Wald haben können. Bisherige Erkenntnisse zur Wirkung der Waldbewirtschaftung auf den Wasserhaushalt machen deutlich, dass die Forstwirtschaft ein deutliches Interesse daran haben sollte, diesen so weit wie möglich positiv zu beeinflussen.

1 Hintergrund und Fragestellungen

In den Jahren 2018 und 2019 hat die anhaltende Dürre zur Vegetationszeit in den deutschen Wäldern zu erheblichen Schäden geführt. Laut aktueller Waldzustandserhebung (BMEL 2020) war der Kronenzustand über alle Baumarten betrachtet seit 1984 noch nie so schlecht wie im Jahr 2019. Zusätzlich hinterließen Sturmereignisse im Jahr 2018 und die durch die Trockenheit ebenfalls begünstigten Borkenkäferaufkommen Schäden auf insgesamt ca. 285.000 ha¹ (2,6 %) Waldfläche.

Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels ist zukünftig weiter mit langanhaltenden Dürreperioden zu rechnen (IPCC 2019). Wälder sind nicht nur direkt betroffen, sondern können auch zur Anpassung an diese Extremereignisse beitragen, da sie einen erheblichen Einfluss auf den regionalen Wasserhaushalt haben, z. B. auf die Neubildung von Grundwasser. Außerdem kann ein Waldbau, der den waldeigenen Wasserhaushalt unterstützt, langfristig zur Resilienz der Waldbestände beitragen und die wichtigen Ökosystemleistungen des Waldes erhalten. Diese Maßnahmen können gezielt durch öffentliche Fördermaßnahmen unterstützt werden.

Laut Bundeswaldgesetz soll die Forstwirtschaft aufgrund der Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes gefördert werden (BWaldG § 41). Zu den Waldfunktionen gehören die dauerhafte Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes, das Klima und der Wasserhaushalt (BWaldG § 1). Die Förderung erfolgt für Privatwaldbesitzende im Rahmen der Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz (GAK) und zielt unter anderem auf naturnahe Waldbewirtschaftung, forstliche Infrastruktur und Vertragsnaturschutz im Wald. Die Landeswälder werden über den Landeshaushalt finanziert, bzw. über die Erlöse aus der Waldbewirtschaftung.

In der Studie sollen mit Hilfe von Informationen aus der Fachliteratur und Experteninterviews folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welche (technischen) Maßnahmen der Waldbewirtschaftung (z. B. Wegebau, Rückegassen, Entwässerung/Drainagen) wirken sich auf das Wasserregime im Wald aus?
- Wie wirkt sich Waldbau (z. B. Baumartenwahl, Umtriebszeiten) auf den Wasserhaushalt aus? Welche waldbaulichen Maßnahmen wirken positiv?
- Welche forstlichen Fördermaßnahmen bestehen, die sich auf den Wasserhaushalt beziehen und das Potenzial haben, diesen zu verbessern?
- Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus Sicht des Naturschutzes, des Landschaftswasserhaushaltes und der Waldbewirtschaftung ziehen?

2 Der Wald und seine Bedeutung für den Wasserhaushalt

Wälder spielen aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften eine große Rolle im Wasserkreislauf, worauf sich auch das Bundeswaldgesetz in seinem Schutzzweck für Wälder bezieht. Keine andere Vegetationsform kann so viel Regenwasser über die Blattoberfläche verdunsten und über den Boden aufnehmen (z.B. Zimmermann et al. 2008; Gajic et al. 2008). Somit sind Wälder ein wichtiger Hochwasserschutz, da das Wasser im Vergleich zu Ackerflächen und Siedlungen nicht so leicht abfließen kann. Eine europaweite Studie zum Wasserrückhaltevermögen von Wäldern ergab, dass Wälder in Beckenlagen mit einem Waldbedeckungsgrad von 70 % ein um 50 % gesteigertes

¹ FNR Pressemitteilung: <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/285000-hektar-wald-in-deutschland-geschaedigt>

Rückhaltevermögen gegenüber Regionen mit nur 10 % Waldbedeckung haben (EEA 2015). Die meisten hydrologischen Prozesse in europäischen Wäldern haben aufgrund der Vegetationsperiode und der damit einhergehenden Belaubung und höheren Verdunstung eine hohe saisonale Komponente, so ist das Wasserrückhaltevermögen im Sommer um 25 % höher als im Winter (EEA 2015).

Neben dem Wasserrückhalt in der Landschaft haben Wälder auch eine sehr hohe Verdunstungsleistung im Vergleich z. B. zu Wiesenflächen. Die Gesamtverdunstung von Wäldern setzt sich aus der Interzeption (Verdunstung von der Blattoberfläche), der Evaporation (Verdunstung vom Waldboden) und der Transpiration über die Blattstomata zusammen, wodurch bis zu 70 % des Jahresniederschlags wieder an die Atmosphäre zurückgegeben werden (Markart und Kohl 2009). Dadurch beeinflussen Wälder maßgeblich das Wetter und sind global durchschnittlich für 40 % der Regenfälle über dem Land verantwortlich (van der Ent et al. 2010). Entscheidende äußere Einflussfaktoren für die Intensität der Gesamtverdunstung sind die Intensität der Sonneneinstrahlung, die Feuchteaufnahmefähigkeit der Luft und die Stärke der Luftströmungen in der Grenzschicht zwischen Kronendach und Umgebungsluft. Mit steigender Sonneneinstrahlung, Trockenheit der Luft und stärkerer Luftströmung steigt auch die Verdunstung der Wälder insgesamt (Ellison et al. 2017; Kunert 2017).

Regenwasser, welches schließlich durch das Kronendach und den Stammabfluss in den Boden gelangt, trägt zunächst zum Bodenwasserspeicher bei, dessen Speicherkapazität von der Beschaffenheit des Bodens (Mächtigkeit, Feinanteil, Porosität) beeinflusst wird. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) eines Bodens sagt aus, wieviel Wasser entgegen der Schwerkraft gehalten werden kann, und somit für Pflanzen verfügbar ist. Die nFK ist bei Lehm- und Schluffböden am größten und bei sandigen Böden eher gering. Aus dem Boden nehmen Pflanzen über ihre Feinwurzeln Wasser und Nährstoffe auf. Das Sickerwasser gelangt in die tieferen Bodenschichten und trägt schließlich zur Grundwasserneubildung bei. Die Sickerwassermenge wird vor allem durch die vorherrschenden Standortsbedingungen bestimmt. Besonders hohe jährliche Grundwasserneubildungsraten (> 400 mm) befinden sich in Deutschland in den niederschlagsreichen Hochlagen (Schwarzwald, Thüringer Wald, Bayerischer Wald). In niederschlagsarmen Regionen wie Brandenburg, Sachsen-Anhalt oder dem Rhein-Neckar-Gebiet liegt die Grundwasserneubildung dagegen bis zu unter 25 mm (Thünen Institut 2016).

Neben der Niederschlagsmenge und den Bodeneigenschaften hat auch die Baumartenzusammensetzung einen Einfluss auf die Grundwasserneubildung. Unter Laubbäumen ist die Sickerwasserspende in der Regel höher als unter Nadelbäumen und kann von einem Drittel bis zur doppelten Menge betragen (Bastrup-Birk und Gundersen 2004; Prietzel und Bachmann 2011). In Deutschland werden rund 74 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser gewonnen und 15,5 % (5,5 Millionen Hektar) der Landesfläche sind als Wasserschutzgebiete ausgewiesen (BMU/UBA 2017), wobei der Wald mit einem Anteil von über 40 % (2,1 Millionen ha) eine zentrale Rolle einnimmt (BMEL 2017). Dies liegt vor allem daran, dass die Nitratbelastung des Grundwassers unter Wald im Vergleich zu gedüngten Ackerflächen deutlich geringer ist. Nur 1,7 % der Messstellen im Wald überschreiten den Nitratgrenzwert von 50 mg/l (BMUB/UBA 2016). Die Ausweisung von Wasserschutzgebieten in Deutschland erfolgt nach den Richtlinien (Arbeitsblatt W 101 „Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete“) des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW). Demnach werden Wasserschutzgebiete in 3 Zonen aufgeteilt:

- Fassungsbereich (Zone I), hier wird der Brunnen in 10 m Umkreis vor jeglicher Nutzung, Verunreinigung und Bodeneingriffen geschützt.

- In Zone II soll der hygienische Schutz gewährleistet sein. Die Größe dieser Zone hängt davon ab, ab wann eine Fließzeit von mindestens 50 Tagen gewährleistet werden kann. Dieser Zeitraum ist notwendig, um Pathogene abzutöten und hängt von der Bodenbeschaffenheit ab. Im Sandboden von Berlin umfasst diese Zone in der Regel mindestens 100 m um die Brunnenfassungsstelle. In Zone II ist jegliche Aktivität verboten, die mit einer Zerstörung der oberen Bodenschichten einhergeht und die eine dauernde Anwesenheit von Menschen und Tieren erfordert. Hier kann es durchaus auch zu Einschränkungen der Waldbewirtschaftung (z. B. Menge der Baumentnahme) kommen.
- Die Zone III soll bis zum unterirdischen Einzugsbereich des Grundwassers reichen und vor weitreichenden Beeinträchtigungen durch nicht oder nur schwer abbaubare chemische Stoffe schützen. Hier ist mit keinen Einschränkungen des Forstbetriebes zu rechnen.

In der im Jahr 2000 in Kraft getretenen Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft² (EG-WRRL) wird unter Artikel 1 ein guter ökologischer und chemischer Zustand der Oberflächengewässer und ein guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers bis zum Jahr 2027 angestrebt. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen die Mitgliedsländer in den Flusseinzugsgebieten den Status Quo und bestehende Defizite erfassen und Verbesserungsmaßnahmen formulieren und umsetzen. Daher muss auch die Forstwirtschaft und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt stärker in Betracht genommen werden.

3 Einfluss der Waldbewirtschaftung auf den Wasserhaushalt

3.1 Entwässerungsgräben und Befahrung des Waldbodens

Entwässerungsmaßnahmen, z. B. durch oberirdische Grabensysteme, haben in Deutschland eine sehr lange Geschichte und die Entwicklung der Land- und Forstwirtschaft mitgeprägt. Das Umweltbundesamt (2020) gibt in der aktuellen Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention an, dass in Deutschland 276.067 ha organische Böden bewaldet sind, von diesen gelten 213.675 ha (77,4 %) als drainiert und 62.393 ha (22,6 %) als nicht drainiert. Häufig wurden diese Standorte entwässert, um den Anbau bestimmter Baumarten, wie z. B. Kiefer oder Fichte, zu ermöglichen (z. B. Goral und Müller 2010; Müller-Kroehling und Zollner 2015). Kommt es nun in Folge des Klimawandels in vielen Regionen zu höheren Temperaturen und geringeren Niederschlägen, vor allem in der Vegetationsperiode, so können sich Entwässerungssysteme negativ auf den Wasserrückhalt in der Landschaft, die Grundwasserneubildung und den Erhalt von Feuchtgebieten auswirken.

Laut einer Untersuchung von Reimann (2006) in der Schorfheide in Brandenburg führten 470 Gräben mit einer Gesamtlänge von 265 km zu einem Abfluss von insgesamt 22- 25 Mio. m³ Wasser pro Jahr aus der Landschaft. In den Jahren 1980 bis 2000 sank der Grundwasserspiegel zwischen 0,70 m und 2,30 m in der Region ab (Goral und Müller 2010). Das Beispiel aus der Schorfheide verdeutlicht, dass Entwässerungssysteme einen erheblichen negativen Einfluss auf den Wasserrückhalt in der Landschaft und damit auch auf die Wasserfügbarkeit der Wälder haben können. Durch den Rückbau der Gräben und den sukzessiven Waldumbau (siehe Abschnitt 3.2.) profitieren vor allem auch grundwasserversorgte Ökosysteme, wie z. B. Waldmoore (Goral und Müller 2010; Müller-Kroehling und Zollner 2015; Natkhin 2011). Die

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128002b>

Effekte von Entwässerungssystemen für den Wasserhaushalt können regional sicherlich stark variieren, weshalb eine Prüfung ihrer tatsächlichen Wirkung notwendig ist. Es ist beispielsweise denkbar, dass einige Entwässerungssysteme so konstruiert sind, dass sie nur im Falle von Starkregenereignissen wirksam sind und somit nicht zur kontinuierlichen Entwässerung beitragen.

Entlang von Verkehrs- und Forstwegen finden sich ebenfalls häufig Rinnen/Gräben zur Wegeentwässerung. Um einen positiven Effekt auf den Wasserrückhalt im Wald zu erzielen, sollten diese möglichst das Wasser in den Wald hinein leiten (BfN 2019), damit es dann breitflächig über dem Waldboden versickern kann, auch damit der Schadstoffrückhalt gewährleistet werden kann (LfU 2014).

In Abschnitt 2 wurde auf die hohe Bedeutung der Bodeneigenschaften für die Wasserverfügbarkeit der Pflanzen hingewiesen. Durch die Befahrung des Waldbodens mit Erntemaschinen kann es zur Verdichtung des Bodens in bis zu 60 cm Tiefe kommen (Schäffer 2002). Dabei werden die Hohlräume des Bodens zusammengedrückt und die Aufnahmefähigkeit von Wasser und Luft durch die Wurzeln verschlechtert sich. Außerdem kann die Versickerung des Wassers in tiefere Bodenschichten beeinträchtigt sein. Das Ausmaß der Verdichtung hängt von dem Gewicht des Fahrzeuges und der Stabilität des Bodens ab. Ist der Boden eher grobkörnig (lehmig-sandig), so werden die Bodenpartikel nicht so stark zusammengedrückt wie bei einem schluffig-tonigen Boden. Generell sind Böden im feuchten Zustand besonders empfindlich und sollten deshalb möglichst nicht befahren werden (UBA 2019). Im Vergleich zu Ackerböden regenerieren sich Waldböden besonders schlecht, da sie nicht mechanisch gelockert werden, wodurch die Beeinträchtigungen noch Jahrzehnte nach der Befahrung bestehen bleiben können (Schäffer 2002). Bisher werden die Effekte und das Ausmaß der Bodenverdichtung in deutschen Waldböden nicht systematisch erfasst, z. B. durch die Bodenzustandserhebung (BMEL 2018). Um die Schäden durch Bodenverdichtung im Zuge des Maschineneinsatzes im Wald zu vermeiden, sollte nur ein festes Wegenetz verwendet werden und kein flächiges Befahren erfolgen (UBA 2019), auch nicht wenn Kalamitätsflächen aufgearbeitet werden müssen. Der Grad der Wegenetzerschließung sollte aufgrund der möglichen Folgen für die Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume und Wälder und folglich auch den Erhalt und das Wachstum so gering wie möglich sein. Häufig werden für eine vollmechanisierte Holzernte Fahrgassen im Abstand von 20 m mit einer Breite von 4 m empfohlen. Dies bedeutet, dass bis zu 20 % der Waldfläche durch Bodenverdichtung beeinträchtigt sein können (Nemestothy 2015). Dagegen erlaubt der deutsche Forest Stewardship Council (FSC) Standard das Befahren von Rückegassen auf maximal 13,6 % der Waldfläche und strebt langfristig einen Gassenabstand von 40 m an, um die Flächenbeeinträchtigung auf 10 % zu beschränken (FSC Deutschland 2018).

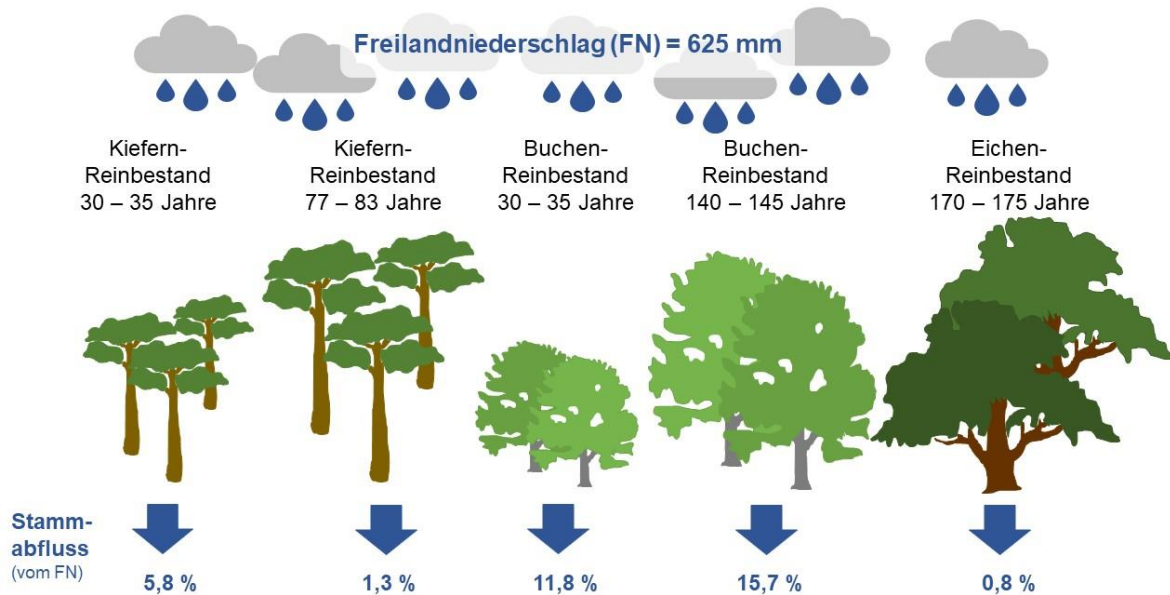
3.2 Baumartenwahl, Baumalter und Durchforstungen

In Abschnitt 2 wurde der positive Einfluss von Laubbaumarten auf die Grundwasserneubildung bereits thematisiert. Auf Sandböden in Brandenburg liegt die modellierte Grundwasserneubildung im gesamten Bestandesleben (120 Jahre) eines Kiefernwaldes bei 80.000 m³/ha. Ein Buchenwald entlässt hingegen im selben Zeitraum und unter vergleichbaren Standortsbedingungen mehr als die doppelte Wassermenge ins Grundwasser (Müller 2011b). Diese Beobachtungen decken sich mit Ergebnissen aus Bayern, wo Buchenbestände jährliche Tiefensickerspenden von bis zu 640 mm auf einzelnen Standorten erreichen, während Fichte (*Picea abies*) und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) häufig deutlich darunter liegen (bis

weniger als die Hälfte) (Prietzl und Bachmann 2011; Zimmermann et al. 2008). Dabei sind Laubbaumarten wie Eiche (*Quercus robur*, *Q. petraea*) und Buche (*Fagus sylvatica*) physiologisch betrachtet nicht unbedingt sparsamer in ihrem Wasserbedarf und reagieren sogar häufig sensibler auf Trockenstress als z. B. Kiefern oder Douglasien (Kätzel et al. 2015). Aus diesen Gründen werden Douglasien und Kiefern als trockenresistente Baumarten für an den Klimawandel angepasste Waldbestände beworben (z. B. Niedersächsische Landesforsten und NW-FVA 2019). Aus ökologischer Sicht ist es jedoch essenziell, den Wasserhaushalt im Jahresverlauf eines Waldbestandes zu betrachten und nicht nur die individuelle Reaktion einer Art auf Trockenheit. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Laub- und Nadelbäumen ist die saisonale Belaubung der Laubbäume, wodurch Winterniederschläge besser in den Boden sickern und zur Grundwasserneubildung beitragen können (Müller 2019). Darüber hinaus gibt es auch anatomische Gründe, so hat z.B. die Kiefer eine sperrigere Krone mit Nadeln, an denen im Vergleich zur Buchenkrone viel Regenwasser hängen bleiben kann und verdunstet (Interzeption). Ein 80- bis 100-jähriger Kiefernreinbestand auf sandigem Boden verdunstet im Schnitt 32 % (198 mm) und ein Buchenreinbestand 22 % (137 mm) des Jahresniederschlags (620 mm) über das Kronendach (Müller 2011a).

Die saisonal fehlende Belaubung von Laubbäumen trägt auch dazu bei, dass sie ca. 5 Monate im Jahr nicht transpirieren, während Nadelbäume auch in den immer milder werdenden Winter über die Vegetationsperiode hinaus transpirieren (Zimmermann et al. 2008). Die Transpirationsleistung eines Waldes ist auch davon abhängig wie viele Bäume in einem Bestand sind und wie viele Baumkronen eine Sonnenexposition haben. Außerdem spielt das Alter des Bestandes eine wesentliche Rolle, z. B. haben Kiefern in Nordostdeutschland mit ca. 30 Jahren die höchsten Zuwächse und transpirieren fast 50 % des Niederschlags und es findet keine Versickerung von Wasser in tiefere Bodenschichten mehr statt (Müller 2019). Buchen haben über alle Altersklassen hinweg eine konstant hohe Transpiration (ca. 50 % des Niederschlags), dafür haben sie eine geringe Interzeption (siehe oben) und geringe Evaporation durch die Ausdunkelung der Bodenschicht, wodurch sich die vergleichsweise hohen Sickerwasserraten erklären lassen (Müller 2019). Zusätzlich haben Buchen aufgrund ihrer glatten Rinde und ihrer Kronenform, die wie ein Trichter wirkt einen sehr hohen Stammabfluss, der bis um das 19-fache höher ist als bei Kiefern und Eichen und mit dem Bestandesalter zunimmt (Abbildung 3-1). Dadurch kommt es bei Buchen zu hohen winterlichen Sickerungsraten, und im Sommer wird der Oberboden im Bestand feucht gehalten, wovon auch andere Baumarten im Mischbestand profitieren können (Müller 2011a).

Abbildung 3-1 Stammabflussraten in Abhängigkeit von Jahresniederschlag, Baumart und -alter



Quelle: Eigene Darstellung nach (Müller 2019)

Somit kann der Waldumbau von Nadelreinbeständen hin zu Misch- beziehungsweise Laubholzbeständen einen positiven Effekt auf den Wasserhaushalt im Wald haben. Außerdem profitieren auch grundwasserabhängige Ökosysteme, wie z.B. Feuchtgebiete, aufgrund der höheren Grundwasserneubildung (Natkhin 2011).

In Niedersachsen wurden im Rahmen des Waldklimafondsprojektes „Wasserwald im Privatwald der östlichen Lüneburger Heide in Niedersachsen“³ Sickerwasserspenden mit Hilfe von Wasserhaushaltssimulationen in unterschiedlichen Waldentwicklungstypen im Laufe der Zeit und unter Bedingungen des Klimawandels modelliert (Schultze und Scherzer 2015). Der zum Zeitpunkt der Studie vorherrschende Kiefernreinbestand wies im Mittel eine Sickerwasserspende von ca. 111 mm/Jahr auf. Der Umbau zu Eichen- und Eichen-Kiefer-Beständen zeigte bereits nach 10 Jahren einen Sickerwassermehrertrag von durchschnittlich 57 mm/Jahr bzw. 46 mm/Jahr und erhöhte sich auf bis zu 95 mm/Jahr und 72 mm/Jahr nach 60 Jahren. Dagegen verringerte sich die Sickerwassermenge um bis zu 31 mm/Jahr in einem Douglasien-Kiefern-Mischbestand (Tabelle 3-1). Im Klimawandelszenario fallen die Muster der Sickerwassermehrerträge in den unterschiedlichen Waldentwicklungstypen ähnlich aus wie unter heutigen Klimabedingungen und unterscheiden sich maximal um +/- 9 mm/Jahr (Schultze und Scherzer 2015).

³ <https://www.waldklimafonds.de/index.php?id=13913&fkz=22WA401301>

Tabelle 3-1 Mittlerer Sickerwassermehrertrag (mm/Jahr) über alle Standorte im Gebiet unter heutigen Klimabedingungen (WET= Waldentwicklungstyp)

Sickerwassermehrertrag durch Waldumbau heutiges Klima	Erste Dekade nach Umbau (mm/Jahr)	Erste 60 Jahre nach Umbau (mm/Jahr)
WET67 (Douglasie/Kiefer)	-13	-31
WET62 (Douglasie/Buche)	15	-8
WET17 (Eiche/Kiefer)	46	72
WET10 (Eiche)	57	95

Quelle: Eigene Darstellung mit Werten aus Schultze und Scherzer 2015

In der brandenburgischen Schorfheide wurde ebenfalls mit Hilfe eines Modells untersucht, wie sich die aktuellen Kiefernbestände im Zeitraum 2005 bis 2055 im Vergleich zu einem in Richtung potenzielle natürliche Vegetation umgebauten Wald entwickeln würden (Goral und Müller 2010). Die Ergebnisse zeigen, dass in der Region bis 2055 die Grundwasserpegel um mehr als 2 m sinken könnten, wenn kein Waldumbau erfolgt. Dagegen hatte der Waldumbau zu Buchenbeständen in weiten Teilen der Schorfheide einen positiven Einfluss auf die Grundwasserneubildung. Diese ist vor allem für die grundwasserabhängigen Seen und Moore der Region wichtig, da sie in den Sommermonaten ihren Wasserbedarf häufig nicht allein über Niederschläge decken können. Laut Untersuchungen von Natkhin (2011) lässt sich durch den Waldumbau das weitere Absinken der Seewasserstände für die nächsten Jahrzehnte entweder kompensieren oder zumindest deutlich reduzieren.

Das Potenzial für Waldumbau in Deutschland ist noch immer sehr hoch. Laut Ergebnissen der letzten Bundeswaldinventur (BWI 3; BMEL 2012) nehmen reine Nadelwaldbestände vom Kiefern-Typ noch immer ca. 52 % (1,3 Millionen ha) der Kiefernbestände ein, wobei knapp die Hälfte davon in Brandenburg zu finden ist. In den Fichtenbeständen sind noch ca. 45 % (1,4 Millionen ha) Reinbestände, von denen sich knapp die Hälfte in Bayern befindet.

Der Waldumbau ist eine sehr langfristige Maßnahme, was in akuten Wassermangelsituationen durchaus problematisch sein kann. Daher wird die Reduzierung des Bestockungsgrades als unmittelbar wirksame Waldbaumaßnahme angewandt, um den Wasserverbrauch des Bestandes zu reduzieren und die Konkurrenz der Bäume um Bodenwasser abzumildern (Gebhardt et al. 2014; Sohn et al. 2013). Insbesondere bei trockenheitsanfälligen dichten Fichtenbeständen kann eine stärkere Durchforstung hilfreich sein, um kurzfristig eine Entlastung des Wasserhaushalts für die verbliebenen Bäume herbeizuführen und sie resistenter z. B. gegenüber Borkenkäferbefall zu machen (Gebhardt et al. 2014; Kohler et al. 2010). Allerdings zeigen verschiedene Studien auch, dass Durchforstungseingriffe vor allem in geschlossenen Waldbeständen zwar kurzfristig zu einem geringeren Gesamtwasserbedarf führen, da weniger Wasser durch Bäume transpiriert wird und durch Interzeption verdunstet. Dafür steigt aber die Transpiration des einzelnen Baumes an (Gebhardt et al. 2014; Ringgaard et al. 2012; Kunert et al. 2015). Die Öffnung des Kronendachs in einem dänischen Fichtenbestand führte zu einer Erhöhung der Transpiration um 30 % im Vergleich zu einem geschlossenen Bestand (Ringgaard et al. 2012). Ein wesentlicher Grund für diesen Effekt ist, dass durch die löchrige Kronenstruktur mehr Luftströmungen in der Kronenschicht auftreten können, die zu einer höheren Transpiration der Bäume führen (Kunert 2017). Das Auflichten von Buchenbeständen in einer Studie von Mausolf et al. (2018) in Norddeutschland verursachte eine um

50 % vergrößerte Krone bei den verbliebenen Bäumen im Vergleich zu Bäumen in nicht bewirtschafteten Buchenbeständen. Dies fördert in Jahren mit einer ausreichenden Niederschlagsversorgung den Radialzuwachs der Baumart, aber macht sie durch den ansteigenden Wasserbedarf einer großen Krone sensibler gegenüber Trockenheit.

Ein zusätzliches Problem für die Wasserverfügbarkeit der Bäume kann auftreten, wenn sehr große, tiefwurzelnende Bäume aus dem Bestand entfernt werden. Diese verteilen tiefer gelegenes Bodenwasser durch ihre Wurzeln in trockenere Bodenschichten, von denen wiederum flachwurzelnende Bäume profitieren können (Burgess et al. 1998). Außerdem besteht die Möglichkeit, dass durch das Auflichten des Bestandes die sehr schnell aufkommende Bodenvegetation die Gesamtevapotranspiration (Baum, Boden, Bodenvegetation) der Fläche auf das ursprüngliche Niveau ansteigen lässt. Untersuchungen von Müller (2002) im nordostdeutschen Tiefland ergaben, dass in einem Himbeer-Drahtschmielen-Kiefernforst (84 Jahre) der Anteil der Evapotranspiration von Boden und Bodenvegetation an der Gesamtevapotranspiration des Bestandes bei ca. 44 % lag, während der Anteil in einem Schattenblumen-Buchenwald (101 Jahre) bei 12 % lag. In stark aufgelichteten Wäldern oder auch auf den aktuellen durch Sturm und Borkenkäfer verursachten Kalamitätsflächen könnte die krautige Bodenvegetation demnach in starker Wasserkonkurrenz vor allem zu gepflanzten noch jungen Bäumen stehen.

Neben der Lichtregulation bewirkt ein geschlossenes Kronendach ein spezifisches Waldmikroklima, welches signifikante Pufferwirkungen gegenüber Temperaturextremen hat (Norris et al. 2011). Eine aktuelle Studie von Thom et al. (2020) in Deutschland bestätigt die Beobachtung, dass Wälder ohne Störung im Kronendach die steigenden Sommertemperaturen um 20 % abmildern konnten. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass bereits sehr kleinflächige Störungen auf 2.500 m² und 25 % der vorhandenen Basalfläche zu erheblichen Veränderungen des Mikroklimas beitragen können. So führt eine Erhöhung des Lichteinfalls auf den Boden um 10 % zu einer durchschnittlichen Erhöhung der Temperaturen um 0,42°C.

Durch eine höhere Bodenoberflächentemperatur steigt der mikrobielle Humusabbau, was die Wasserspeicherfähigkeit der Böden langfristig herabsenken und zu Nitratmobilisierung ins Grundwasser führen kann. In Deutschland weisen Wälder unter forstlicher Nutzung im Schnitt einen Humusgehalt von 2-8 % auf, was deutlich über den Humusgehalten von Böden unter Ackernutzung (1-4%), aber unter denen von Grünland (4-15 %) liegt (Düwel und Utermann 2008). Somit sollte der Humusaufbau als wichtiger Wasser- und Kohlenstoffspeicher in Wäldern mehr gefördert werden, indem ausreichend viel Totholz auf der Fläche belassen wird und Bodenstörungen sowie größere Auflichtungen vermieden werden (Kohlpaintner und Göttlein 2009). Der mikroklimatische Effekt von liegendem und stehendem Totholz ist eine bisher noch nicht ausreichend untersuchte Fragestellung. Eventuell könnte sich durch die Wasserspeicherung im Totholz und durch die Bodenbeschattung auf gestörten Waldflächen ein positiver Effekt für die aufkommende Verjüngung ergeben. Allerdings konnten Thom et al. (2020) in Buchenwäldern nur einen sehr geringen, nicht signifikanten positiven Effekt auf die Pufferung der Temperaturextreme durch das Belassen von stehendem und liegendem Totholz gegenüber keinem Totholz zeigen.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass großflächige Störungen in Wäldern selbst zum Zwecke des Waldumbaus vermieden werden sollten. Stattdessen sollte darauf geachtet werden, dass das kontinuierliche Einbringen von Mischbaumarten, wie z. B. Buche, über die Entwicklung einer zweiten Bestandesschicht erfolgt und die überstehenden Baumbestände nur mäßig durchforstet werden, um eine geschlossene Waldstruktur zu erhalten. Langfristig wirken sich Mischbestände, z. B. von Buche und Kiefer, positiv auf den Bestandeswasserhaushalt aus (Müller 2019). In einer globalen

Metastudie von Jactel et al. (2018) bestätigten sich die positiven Auswirkungen von Mischwäldern, die im Schnitt eine um 15 % höhere Produktivität im Vergleich zu Reinbeständen der jeweiligen Arten aufweisen. Mischbestände von Eichen und Buchen zeigten sogar eine um 30 % gesteigerte Produktivität im Vergleich zu Reinbeständen (Pretzsch et al. 2013b). Eine Erklärung für diese Beobachtung ist die sogenannte Facilitation, die eine Artinteraktion beschreibt, bei der zumindest eine Art profitiert und andere Arten nicht geschädigt werden. So zeigten Buchen in Mischwäldern mit Eiche eine höhere Resilienz gegenüber Trockenheit, die wahrscheinlich auf den unterschiedlichen Wasserstressreaktionen beider Baumarten beruht. Dabei profitiert die Buche von dem passiven Wasserfluss der tief reichenden Eichenwurzeln in höhere nicht wassergesättigte Bodenschichten („hydraulic lift“) (Pretzsch et al. 2013a). Allerdings ist die Biodiversität-Produktivitäts-Beziehung abhängig von den Standortfaktoren. Denn auf gut nährstoffversorgten Standorten scheint die Konkurrenz zwischen den Baumarten zu überwiegen und die Produktivität liegt unter der von Reinbeständen (bis zu -27 % bei Eiche und -8 % bei Buche). Auf mittleren Standorten zeigte sich kein Vorteil gegenüber Reinbeständen (Pretzsch 2013). In Buchen-Fichten-Mischbeständen zeigt sich ein ähnliches Muster. Hier profitiert die Fichte auf armen Standorten, da die Buche durch ihre gut zersetzbare Laubstreu die Wasserspeicherfähigkeit und die Nährstoffversorgung der Böden verbessert (Pretzsch et al. 2010). Dieses Reaktionsmuster bestätigt die Stress-Gradient-Hypothese (Callaway und Walker 1997), nach der mit zunehmendem Stresslevel die Facilitation zwischen Arten gegenüber der Konkurrenz zunimmt (Callaway und Walker 1997).

4 Bestehende Fördermaßnahmen mit Bezug zum Wasserhaushalt

4.1.1 Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz

Waldumbau, bodenschonende Erntemaßnahmen und die Renaturierung von Feuchtgebieten im Wald sind sinnvolle Maßnahmen, um den Wasserhaushalt im Wald und der Landschaft zu fördern. Allerdings sind diese für private Waldbesitzende häufig mit erheblichen Kosten verbunden, die nicht unbedingt mit dem Erlös aus der Holzernte finanziert werden können.

Die nationale Agrarstrukturförderung „Gemeinschaftsaufgabe Agrarstruktur und Küstenschutz“ (GAK) bildet den inhaltlichen und finanziellen Rahmen der jeweiligen Programme für Privatwaldbesitzende der Bundesländer. Im Förderbereich 5 „Forsten“⁴ werden seit 2019 Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel gefördert, wogegen es keine direkte Nennung von Maßnahmen für die Regeneration des Wasserhaushaltes im Wald gibt. Allerdings existieren in 13 Bundesländern (außer Bremen, Berlin und Hamburg) bereits Programme zur Förderung des Waldumbaus. So können Privatwaldbesitzende Kostenzuschüsse zwischen 70 % und 85 % für Mischkulturen (≥ 30 % Laubholz) erhalten. In Baden-Württemberg, Bayern und Niedersachsen wird zusätzlich die Naturverjüngung von Laubholz gefördert.

In Tabelle 4.1. sind weitere Fördermaßnahmen von Bundesländern zusammengefasst, die einen positiven Effekt auf den Wasserhaushalt haben können. Dazu gehören z. B. die bodenschonende Holzernte mit Seilkränen und Rückepferden. Außerdem können in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und Thüringen Förderungen für die Entwicklung und den Erhalt von Waldbiotopen, wie z. B. Mooren, Feuchtgebieten, Erlenbruch- und Auwäldern beantragt werden. Im Rahmen des Vertragsnaturschutzes einiger Bundesländer sollen die Lebensräume von wildlebenden Tier- und

⁴ <https://www.bmel.de/DE/themen/laendliche-regionen/foerderung-des-laendlichen-raumes/gemeinschaftsaufgabe-agrarstruktur-kuestenschutz/gak-foerdergrundsaeetze.html#doc12900bodyText7>

Pflanzenarten im Wald wiederhergestellt und erhalten werden. Dabei sind neben einer naturverträglichen Bewirtschaftung und Pflege auch der Verzicht auf eine forstliche Nutzung förderfähig. Dies könnte vor allem für Privatwaldbesitzende interessant sein, die z. B. Moorwälder, gewässerbeeinflusste Feuchtwälder und Erlenbruchwälder oder sehr naturnah strukturierte Laub- und Mischwälder dauerhaft erhalten möchten. In Bayern und Brandenburg kann der vollständige Nutzungsverzicht auf einer Waldfläche durch eine Einmalzahlung von bis zu 8.000 € je ha gefördert werden. Allerdings ist dieser Verzicht in Bayern auf 12 Jahre beschränkt. In Thüringen kann der Verzicht auf eine Endnutzung von Altbeständen ausgewiesener Waldlebensraumtypen gefördert werden, was gegebenenfalls sinnvoll ist, um das Kronendach geschlossen zu halten und ein natürliches Waldinnenklima zu sichern. Darüber hinaus wird in Brandenburg und Bayern auch der Verbleib von Totholz im Wald gefördert, was eine wichtige Grundlage für die Humusbildung im Wald ist und Wasser speichern kann (siehe Abschnitt 3.2).

Tabelle 4-1 Maßnahmen und Zuwendungen der Bundesländer mit potenziell positiver Wirkung auf den Waldwasserhaushalt (WLT = Waldlebensraumtyp, Efm = Erntefestmeter).

Maßnahmenbeschreibung	Baden-Württemberg	Bayern	Brandenburg	Hessen	Nordrhein-Westfalen	Thüringen
Bodenschonende Holzernte mit Seilkran	10 €/Efm	10 €/Efm		≤ 50 %		
Vorrücken mit Pferden	2 €/Efm	3 €/Efm		≤ 50 %	5 €/Efm	
Neuanlage, Entwicklung und Sicherung von Waldbiotopen	bis 10.000 € (Zweckbindung 10 Jahre)					90 %
Gestaltung von Fließ-, Stillgewässern und Feuchtgebieten im Wald					≥ 80 %	
Erhalt von Biberlebensräumen		150 €/ha/a				
Vollständiger Nutzungsverzicht		1.200 - 2.300 €/ha (Zweckbindung 12 Jahre)	8.000 €/ha (in bestimmten WLT)			
Belassen von Totholz (≥ 21 m ³ /ha) in bestimmten WLT			800 €/ha			
Belassen von Totholz (≥ 41 m ³ /ha) in bestimmten WLT			800 €/ha			
Belassen von Totholz (≥ 40 cm Durchmesser) in bestimmten WLT		90 €/Totholz (Zweckbindung 12 Jahre)				
Verzicht auf Baumartenwechsel, insb. Nadelholzanbau in ausgewiesenen Waldlebensräumen						50 €/ha/Jahr
Einschränkung Endnutzung von Altbeständen ausgewiesener Waldlebensräume						200 €/ha/Jahr

Quelle: Eigene Darstellung,

Baden-Württemberg (https://foerderung.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/mlr/Foerderungswegweiser/NWW_F/Recht/VwV_NWW_novelliert.pdf);

Bayern (<http://www.waldbesitzerportal.bayern.de/048720/index.php>);

Brandenburg (<https://forst.brandenburg.de/fb/de/struktur/bewilligungsbehoerde-forst/foerderung-vertragsnaturschutz-und-extremwetterereignisse/>);

Hessen (https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmueiv/30.04.2018_rl_forstliche_foerderung_veroeffentlichung.pdf);

Nordrhein-Westfalen (https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Waldbesitz/Dokumente/Foerdermassnahmen/0-Foerderung/02_broschuere_mkulnv_auszug_forst_seite_48-56.pdf);

Thüringen (https://infrastruktur-landwirtschaft.thueringen.de/fileadmin/Forst_und_Jagd/RiLi_Forstfoerderung_2019_konsolidierte_Fassung.pdf)

4.1.2 Waldklimafonds

Der Waldklimafonds⁵ wurde im Jahr 2013 auf Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch Initiative des Bundesumweltministeriums (BMU) und des Bundeslandwirtschaftsministeriums (BML) eingeführt. Er ist Bestandteil des Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“ (EKF) und soll das Erreichen der nationalen, europäischen und internationalen Klimaschutzziele unterstützen. Das jährliche Fördervolumen betrug im Jahr 2019 24,5 Mio. Euro. Im Bereich der Forstwirtschaft können Privatwaldbesitzende (natürliche und juristische Personen) und forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse gefördert werden. Im Rahmen des Förderschwerpunktes 1 „Anpassung der Wälder an den Klimawandel“ können bereits Maßnahmen zur Wiederherstellung eines ausgeglichenen, naturraumtypischen Landschaftswasserhaushalts gefördert werden. Außerdem können Moore im Wald erhalten oder renaturiert werden.

5 Schlussfolgerungen

Allein aufgrund der hohen Bedeutung von Wäldern für die Niederschlagsbildung, die Pufferung von Temperaturextremen, den Wasserrückhalt und die Grundwasserneubildung sollte der Erhalt und die Mehrung von Wäldern als zentrale Anpassungsmaßnahme für den Klimawandel im Fokus der politischen Bemühungen stehen. Bisher gibt es auf mitteleuropäischer Ebene noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse darüber, welche Rolle die Größe von Waldflächen, ihr Fragmentierungsgrad und ihre Naturnähe für diese wichtigen Ökosystemleistungen spielen. Dieses Wissen könnte auch dabei helfen, die Renaturierung von Wäldern im Rahmen der Europäischen Biodiversitätsstrategie zu unterstützen.

Auch vor dem Hintergrund der Wasserrahmenrichtlinie müssen sich die Mitgliedsstaaten stärker als bisher mit den Effekten der Waldbewirtschaftung auf die Gewässer beschäftigen. Ein hoher Anteil von Laubwäldern und eine Bewirtschaftungsform, die ohne Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Entwässerungssystemen auskommt, ist eine Voraussetzung dafür, dass der gute Zustand von Oberflächengewässern und Grundwasserkörpern erreicht werden kann. Die Studien aus der Schorfheide (Abschnitt 3.2) zeigen sehr deutlich, dass der Waldumbau zu Laubmischwäldern eine notwendige Maßnahme ist, um die Grundwasserversorgung in trockenen Regionen langfristig sicherzustellen. Außerdem trägt er wesentlich dazu bei, die naturschutzfachlich wertvollen Moore und andere Feuchtlebensräume zu erhalten. In dem Zusammenhang sollte auf regionaler Ebene die Wirkung von bestehenden Entwässerungssystemen im Wald geprüft werden, und wenn sie die Wasserverfügbarkeit der Bäume und der umliegenden Ökosysteme negativ beeinträchtigen, sollten diese entfernt werden. Eine Alternative könnte die Einrichtung von steuerbaren Entwässerungssystemen sein, um beispielsweise Starkregenereignisse besser regulieren zu können.

Für den Wasserhaushalt des Waldes und seiner Wirkung auf die Grundwasserneubildung sind zunächst die Standortbedingungen, vor allem Niederschlagsmengen und Bodeneigenschaften, entscheidend. Die Literaturstudie ergab, dass Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur ebenfalls eine Wirkung haben, welche durch eine entsprechende Waldbewirtschaftung positiv beeinflusst werden kann. Die wesentlichen Erkenntnisse dazu sind:

⁵ Förderrichtlinie des Waldklimafonds
https://www.waldklimafonds.de/fileadmin/wkf/dateien/downloads/WKF_F%C3%B6rLi_2017-03-20.pdf

- Laubbäume wie Buche und Eiche haben zwar eine saisonal hohe Transpiration, aber aufgrund ihrer im Vergleich zu Nadelbaumarten (Fichte, Kiefer, Douglasie) geringen spezifischen Blattoberfläche eine sehr geringe Interzeptionsverdunstung. Dies führt insgesamt zu einer geringeren Gesamtverdunstungsrate des Bestandes und einer höheren Sickerungsrate.
- Aufgrund der geringeren Gesamtverdunstung und der Anatomie von Buchen hat diese Baumart eine besonders positive Wirkung auf den Wasserhaushalt, da sie den größten Stammabfluss hat und so maßgeblich zur Grundwasserneubildung im Bestand beiträgt. Aufgrund ihrer Schattenwirkung reduziert sie das Aufkommen von Bodenvegetation, die in lichten Nadelwäldern maßgeblich zur Evapotranspiration beitragen und somit eine Konkurrenz für die Verjüngung im Wald darstellen kann.
- Der Waldumbau zu Misch- und Laubwäldern ist aus hydrologischer Sicht zentral, wobei sich die Buche aufgrund ihrer positiven hydrologisch wirksamen Eigenschaften und ihrer großräumigen natürlichen Verbreitung besonders eignet. Neben der Verbesserung der Grundwasserneubildung scheint sie ebenfalls über Facilitation andere Baumarten, wie die Fichte, in ihrer Vitalität zu unterstützen und könnte somit zur Vitalität von Baumarten beitragen, die für die Forstwirtschaft von hoher Bedeutung sind.
- Für die Grundwasserneubildung sind das Alter der Baumarten und die Bestandesdichte ebenfalls bedeutend. Vor allem in den Phasen des schnellen Wachstums (< 60 Jahre) benötigen Bäume viel Wasser und Nährstoffe. Aufgrund der oben genannten Eigenschaften der Buche weist diese in allen Altersphasen eine höhere Grundwasserneubildung auf als z. B. Kiefer.
- Ein geschlossenes Kronendach bewirkt, dass sich ein relativ kühles, feuchtes Mikroklima im Wald bildet und Temperaturschwankungen dadurch abgepuffert werden. Das Ausmaß der Öffnung des Kronendachs durch Holzernte sollte somit in Abwägung des Einflusses eines sich ändernden Mikroklimas auf die Vitalität des Restbestandes erfolgen.
- Bodenverdichtung führt zu einer langfristigen Einschränkung der Wasser- und Nährstoffaufnahme von Bäumen und beeinträchtigt somit ihre Vitalität. Bereits das einmalige Befahren von Waldboden kann diese Schädigung verursachen. Daher sollte auch auf Kalamitätsflächen nicht flächig mit schweren Maschinen gefahren werden. Außerdem sollte der Dichtegrad des Forstwegenetzes so gering wie möglich gehalten werden, um die nutzbare Fläche für Wälder zu erhalten, bzw. zu erhöhen.
- Entwässerungsgräben im Wald sollten auf ihre Auswirkungen auf den Waldwasserhaushalt hin geprüft werden. Wenn die Entwässerung dem Schutz von Infrastruktur dient, so könnte es sinnvoll sein, das Wasser in den Wald zu leiten, damit es dort versickern kann.

Aus naturschutzfachlicher Sicht werden durch die hydrologische Forschung wesentliche Ziele eines naturnahen Waldbaus unterstützt. Dies ist vor allem der Fokus auf Laub- und Mischwälder mit angepassten Durchforstungsintensitäten, die die mikroklimatischen und strukturellen Eigenschaften eines naturnahen Waldes, inklusive Boden, nicht maßgeblich stören. Die Ergebnisse untermauern die herausragende Stellung der Buche unter den Laubbaumarten für einen Waldbestand, der die aufkommenden Niederschläge besonders effizient in den Boden weiterleiten und die Evapotranspiration in geschlossenen Beständen regulieren kann. Daher wird deutlich, dass die Wahl der Baumart für die zukünftigen Mischbestände nicht allein aus ökonomischer Sicht getroffen werden

sollte. Zukünftig sollten noch mehr die Effekte unterschiedlicher Mischungsanteile auf den Wasserhaushalt im Wald im Fokus der Untersuchungen stehen. Außerdem gibt es bisher nur wenige Erkenntnisse zu den Schwellenwerten von Kronenöffnung in unterschiedlichen Waldtypen und den damit einhergehenden Folgen für die Resilienz der Waldbestände. Dieses Wissen ist notwendig, um die Stärke eines forstlichen Eingriffes besser planen zu können.

Bisher gibt es auch noch keine ausreichenden Erkenntnisse über die Rolle von Totholzstrukturen für den Wasserhaushalt. Sicher ist, dass sie für die Humusbildung wichtig sind und somit die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens positiv beeinflussen. Darüber hinaus gibt es Vermutungen, dass vor allem große Totholzmengen als „Kühl- und Feuchteaggregat“ dienen und somit die Stressanfälligkeit des Baumbestandes gegenüber Trockenheit puffern können.

Der Waldumbau ist bereits ein zentraler Bestandteil in der Förderung des Privatwaldes. Allerdings unterscheiden sich die Anforderungen an den Mischungsverhältnissen für Laubbäume in den Bundesländern teilweise deutlich voneinander. So können in Niedersachsen Mischbestände von mindestens 30 % Laubbäumen gefördert werden, während im Saarland mindestens 50 % Laubbäume vorhanden sein müssen. Dabei ist nicht bekannt, auf Grundlage welcher Kriterien diese Grenzwerte entstanden sind. Laut der meisten Landeswaldgesetze hat die Waldbewirtschaftung die Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes zu gewährleisten, wozu auch der Wasserhaushalt zählt. Inwiefern die gute fachliche Praxis hierzu genau einen Beitrag zu leisten hat, ist nicht näher definiert. Sie stellt aber eine wichtige Grundlage dafür dar, um entscheiden zu können, ob beispielsweise die Ökosystemleistung Grundwasserneubildung gefördert werden könnte und in welchem Ausmaß dies geschieht.

Durch die bisherigen Erkenntnisse zur Wirkung von Waldbeständen auf den Wasserhaushalt wird deutlich, dass die Forstwirtschaft diesen positiv beeinflussen kann, auch wenn dies gegebenenfalls bedeutet, weniger ertragsreiche Baumarten im Bestand zu halten. Dafür stellen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit langfristig positive Effekte für die Resilienz von Beständen gegenüber den Folgen des Klimawandels ein.

6 Literaturverzeichnis

- Bastrup-Birk, A.; Gundersen, P. (2004): Water quality improvements from afforestation in an agricultural catchment in Denmark illustrated with the INCA model. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8 (4), S. 764–777. Online verfügbar unter <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00304961/>.
- BfN (2019): Wälder im Klimawandel: Steigerung von Anpassungsfähigkeit und Resilienz durch mehr Vielfalt und Heterogenität. Bundesamt für Naturschutz. Online verfügbar unter https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/landwirtschaft/Dokumente/BfN-Positionspapier_Waelder_im_Klimawandel_bf.pdf.
- BMEL (2012): Ergebnisdatenbank der Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://bwi.info/>, zuletzt geprüft am 31.08.2017.
- BMEL (2017): Waldbericht der Bundesregierung 2017. Bonn.
- BMEL (2018): Waldböden in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung.
- BMEL (2020): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2019, zuletzt geprüft am 20.05.2020.
- BMU/UBA (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland. Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Dessau-Roßlau.
- BMUB/UBA (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie – Deutschlands Gewässer 2015. Bonn, Dessau.
- Burgess, S. S.; Adams, M. A.; Turner, N. C.; Ong, C. K. (1998): The redistribution of soil water by tree root systems. In: *Oecologia* (115), S. 306–311.
- Callaway, R. M.; Walker, L. R. (1997): Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities. In: *Ecology* (78/7), S. 1958–1965.
- Düwel, O.; Utermann, J. (2008): Humusversorgung der (Ober-)Böden in Deutschland – Status Quo. IN: Hüttl, R., Bens, O., Prechtel (Hrsg.): Zum Stand der Humusversorgung der Böden in Deutschland. Hg. v. Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung.
- EEA (2015): Water-retention potential of Europe's forests. A European overview to support natural water-retention measures. Luxembourg (13).
- Ellison, David; Morris, Cindy E.; Locatelli, Bruno; Sheil, Douglas; Cohen, Jane; Murdiyarso, Daniel et al. (2017): Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. In: *Global Environmental Change* (43), S. 51–61.
- FSC Deutschland (2018): Rückegassen. Mit Abstand mehr nachhaltige Wertschöpfung. Online verfügbar unter <https://www.fsc-deutschland.de/preview.fsc-themenpapier-rckegassen.a-1377.pdf>.
- Gebhardt, Timo; Häberle, Karl-Heinz; Matyssek, Rainer; Schulz, Christoph; Ammer, Christian (2014): The more, the better? Water relations of Norway spruce stands after progressive thinning. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 197, S. 235–243. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.05.013.
- Goral, F.; Müller, J. (2010): Auswirkungen des Waldumbaus im Waldgebiet der Schorfheide auf die Entwicklung der Grundwasserhöhen und den Zustand der Waldmoore. Hg. v. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg (19(3)).
- IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and

greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/srccl/>.

Jactel, H.; Gritti, E. S.; Drössler, L.; Forrester, D. I.; Mason, W. L.; Morin, X. et al. (2018): Positive biodiversity–productivity relationships in forests: climate matters. In: *Biology Letters* 14 (4), zuletzt geprüft am 20.07.2020.

Kätzel, R.; Zander, M.; Löffler, S. (2015): Wenn der Durst kommt–Eiche, Buche, Kiefer und Douglasie im Trockenstresstest. Hg. v. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe (59).

Kohler, M.; Sohn, J.; Nägele, G.; Bauhus, J. (2010): Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? In: *Eur J Forest Res* 129 (6), S. 1109–1118. DOI: 10.1007/s10342-010-0397-9.

Kohlpaintner, M.; Göttlein, A. (2009): Mit dem Wald verschwindet auch der Humus. In: *LWF aktuell* (71), S. 22–24.

Kunert, N. (2017): Einschlag zur kurzfristigen Reduzierung von Trockenstress? Hg. v. AFZ DerWald (22).

Kunert, N.; Aparecido, L., M., T.; Higuchi, N.; dos Santos, J.; Trumbore, S. (2015): Higher tree transpiration due to road-associated edge effects in a tropical moist lowland forest. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 213, S. 183–192. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.06.009.

LfU (2014): Forstwegebau und Holzernte im Wasserschutzgebiet. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Merkblatt Nr. 1.2/10).

Markart, G.; Kohl, B. (2009): Wie viel Wasser speichert der Waldboden? Abflussverhalten und Erosion. In: *BFW-Praxisinformation* (19), S. 25–26.

Mausolf, K.; Wilm, P.; Härdtle, Werner; Jansen, Kirstin; Schuldt, Bernhard; Sturm, Knut et al. (2018): Higher drought sensitivity of radial growth of European beech in managed than in unmanaged forests. In: *Science of the Total Environment* 642, S. 1201–1208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.065.

Müller, J. (2002): Verdunstung der Baumvegetation und Tiefenversickerung in Kiefern-, Buchen- und Eichenökosystemen in Abhängigkeit von Boden- und Bestandesstruktur und von der Witterung (Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Einfluss von Niederschlagsarmut und erhöhtem Stickstoffeintrag auf Kiefern-, Eichen- und Buchen- Wald- und Forstökosysteme des nordostdeutschen Tieflandes).

Müller, J. (2011a): Die Anwendung von Lysimetern zur Ermittlung des Wasserhaushaltes in Wäldern des nordostdeutschen Tieflands. In: *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* (12), S. 37–46, zuletzt geprüft am 21.07.2020.

Müller, J. (2011b): Wasser das "blaue Gold" des Waldes. In: *Forschungsreport* 1, S. 16–19.

Müller, J. (2019): Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland. Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven. (Habilitationsschrift). Hg. v. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Universität Rostock. Rostock (SchrR Umweltingenieurwesen 91).

Müller-Kroehling, S.; Zollner, A. (2015): Moorschutz im Wald – gestern, heute, morgen. Moor und Wald schließen sich keineswegs aus. Und: Moorzäpfe sind ganz besonders schützenswerte Landschaftselemente. Hg. v. LWF aktuell.

- Natkhin, M. (2011): Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Veränderungen der Waldwirtschaft und des Klimas auf den Wasserhaushalt grundwasserabhängiger Landschaftselemente. (Dissertation). Online verfügbar unter <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2011/5062>.
- Nemestothy, N. (2015): Bedeutung der Bodenverdichtung für Ertrag und Nachhaltigkeit. In: *BFW-Praxisinformation* (39), S. 8–13.
- Niedersächsische Landesforsten; NW-FVA (2019): Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten (Aus dem Walde - Schriftenreihe Waldentwicklung Niedersachsen, 61).
- Norris, Catherine; Hobson, Peter; Ibisch, Pierre L. (2011): Microclimate and vegetation function as indicators of forest thermodynamic efficiency. In: *Journal of Applied Ecology* 102, no-no. DOI: 10.1111/j.1365-2664.2011.02084.x.
- Pretzsch, H. (2013): Facilitation and competition in mixed-species forests analyzed along an ecological gradient. In: *Nova Acta Leopoldina* (114(391)), S. 159–174.
- Pretzsch, H.; Block, J.; Dieler, J.; Dong, P.,H.; Ulrich Kohnle, Jürgen Nagel, Hermann Spellmann, Andreas Zingg-1mm (2010): Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. In: *Ann. For. Sci.* (67), zuletzt geprüft am 20.07.2020.
- Pretzsch, H.; Schütze, G.; Uhl, E. (2013a): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. In: *Plant Biology* (15), S. 483–495, zuletzt geprüft am 16.07.2020.
- Pretzsch, Hans; Bielak, Kamil; Block, Joachim; Bruchwald, Arkadiusz; Dieler, Jochen; Ehrhart, Hans-Peter et al. (2013b): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. In: *Eur J Forest Res* 132 (2), S. 263–280. DOI: 10.1007/s10342-012-0673-y.
- Prietzl, J.; Bachmann, S. (2011): Verändern Douglasien Wasser und Boden? In: *LWF aktuell* (84), zuletzt geprüft am 09.07.2020.
- Reimann, S. (2006): Wasser für die Schorfheide – Ursachenanalyse eines veränderten Landschaftswasserhaushaltes und mögliche Handlungsfelder zu dessen Stabilisierung. Diplomarbeit. Universität Lüneburg.
- Ringgaard, Rasmus; Herbst, Mathias; Friberg, Thomas (2012): Partitioning of forest evapotranspiration. The impact of edge effects and canopy structure. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 166-167, S. 86–97. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.001.
- Schäffer, J. (2002): Befahren von Waldböden – ein Kavaliersdelikt? In: *Der Waldwirt* (29), S. 21–23.
- Schultze, B.; Scherzer, J. (2015): Wasserhaushaltssimulationen, Versickerungstabellen und Versickerungskarten. Waldklimafondprojekt "Wasserwald im Privatwald der östlichen Lüneburger Heide in Niedersachsen" (Abschlussbericht).
- Sohn, Julia A.; Gebhardt, Timo; Ammer, Christian; Bauhus, Jürgen; Häberle, Karl-Heinz; Matyssek, Rainer; Grams, Thorsten E.E. (2013): Mitigation of drought by thinning. Short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). In: *Forest Ecology and Management* 308, S. 188–197. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.048.

Thom, Dominik; Sommerfeld, Andreas; Sebald, Julius; Hagge, Jonas; Müller, Jörg; Seidl, Rupert (2020): Effects of disturbance patterns and deadwood on the microclimate in European beech forests. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 291, S. 108066. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108066.

Thünen Institut (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Hg. v. Nicole Wellbrock, Andreas Bolte, Heinz Flessa (eds) (Thünen Report 43).

UBA (2019): Bodenverdichtung - Ein Problem. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/verdichtung>.

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018. CLIMATE CHANGE 22/2020. Dessau-Roßlau, Germany.

van der Ent, Rudi J.; Savenije, Hubert H. G.; Schaefli, Bettina; Steele-Dunne, Susan C. (2010): Origin and fate of atmospheric moisture over continents. In: *Water Resources Research* 46 (9), S. 61. DOI: 10.1029/2010WR009127.

Zimmermann, L.; Raspe, S.; Schulz, C.; Grimmeisen, W. (2008): Wasserverbrauch von Wäldern. In: *LWF aktuell* (66), S. 16–20.