

Beitrag der forstlichen Förderung für die Wasser- qualität und -quantität

NRW-Programm Ländlicher Raum 2014 bis 2022

Friederike Rorig

5-Länder-Evaluation 1/2023



Finanziell unterstützt durch:



EUROPÄISCHE UNION

**Ministerium für Landwirtschaft
und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Publiziert:

DOI-Nr.: 10.3220/5LE1673967472000

www.eler-evaluierung.de

Der nachfolgende Text wurde in geschlechtergerechter Sprache erstellt. Soweit geschlechtsneutrale Formulierungen nicht möglich sind, wird mit dem Doppelpunkt im Wort markiert, dass Frauen, Männer und weitere Geschlechtsidentitäten angesprochen sind. Feststehende Begriffe aus Richtlinien und anderen Rechtstexten bleiben unverändert.

Thünen-Institut für Waldwirtschaft

M. Sc. Friederike Rorig

Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

Tel.: +494073962338

Fax: +494073962399

E-Mail: friederike.rorig@thuenen.de

Johann Heinrich von Thünen-Institut

Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Braunschweig, Januar 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs-, Karten- und Tabellenverzeichnis	II
0 Zusammenfassung und Summary	1
Zusammenfassung	1
Summary	1
1 Einleitung	2
2 Fragestellung	2
3 Daten und Methoden	3
4 Einfluss des Waldes auf Wasser	3
4.1 Sickerwasser	4
4.2 Grundwasser	5
4.3 Trinkwasser	5
5 Förderung waldbaulicher Maßnahmen in NRW im Rahmen des NRW-Programms und ihre Umsetzung	5
5.1 Gesetzlicher Rahmen	5
5.2 Maßnahmeninhalte	6
5.3 Inanspruchnahme	7
6 Wirkungsanalyse der Forstmaßnahmen	8
6.1 Waldumbau und Naturschutzmaßnahmen	8
6.1.1 Waldumbau	8
6.1.2 Naturschutz im Wald	12
6.2 Bodenschutzkalkung	13
7 Trockenstress – die Herausforderung der vergangenen (und kommenden) Jahre	17
8 Fazit	18
Literaturverzeichnis	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Waldflächenanteil nach Baumartengruppen in NRW	9
Abbildung 2:	N-Flüsse und -Speicher im Wald	13

Kartenverzeichnis

Karte 1:	Chemischer Zustand der Grundwasserkörper in Deutschland 2016	4
Karte 2:	Waldflächenanteile nach Regionalforstämtern	9
Karte 3:	Waldartenverteilung in NRW	10
Karte 4:	Karte zur Bodenschutzkalkung in NRW	16
Karte 5:	Klimatische Wasserbilanz in Deutschland	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zielsetzungen der Vorhabenarten der Teilmaßnahme 8.5 in den SPB	3
Tabelle 2:	Untersuchte Vorhabenarten der Teilmaßnahme 8.5 (naturnahe Waldbewirtschaftung)	7
Tabelle 3:	Output der Maßnahme 8.5 auf Basis der Auszahlungsdaten von 2015 bis 2020	7
Tabelle 4:	Detaillierter Output der Maßnahme 8.5 aufsummiert von 2015 bis 2020	8
Tabelle 5:	Innerhalb der Regierungsbezirke umgesetzte Maßnahmen 8.51 (aufsummiert von 2015 bis 2020)	12
Tabelle 6:	Innerhalb der Regierungsbezirke umgesetzte Maßnahmen 8.53 (aufsummiert von 2015 bis 2020)	17

0 Zusammenfassung und Summary

Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht werden die im Rahmen des NRW-Programms Ländlicher Raum 2014 bis 2022 angebotenen forstlichen Fördermaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Wasserqualität und -quantität behandelt. Der Berichtszeitraum umfasst die Periode 2015 (Programmstart) bis 2020. Es wird Bezug genommen auf die Bewertungsfrage 9 (Verbesserung der Wasserwirtschaft). Folgende angebotene und umgesetzte Maßnahmen wurden einer Bewertung unterzogen: Waldumbau (M8.51), Bodenschutzkalkung (M8.52) und Naturschutzmaßnahmen im Wald (M8.54). Methodisch stützt sich der Bericht auf die Auswertung der Förderdaten und auf Literaturanalysen.

Im Berichtszeitraum wurden auf 8.866 ha Waldumbaumaßnahmen durchgeführt. Bodenschutzkalkung fand auf 18.588 ha statt. Naturschutzmaßnahmen konnten auf 469 ha unterstützt werden.

Die forstlichen Maßnahmen des Waldumbaus und die Bodenschutzkalkung sind geeignet, die Verbesserung der Wasserqualität und -quantität zu unterstützen. Die umgesetzten Maßnahmen zielen insbesondere auf die Entwicklung stabiler Laub- und Mischbestände sowie die strukturelle Verbesserung der Bodenstreu, des Bodens und des Nährstoffhaushalts der Waldböden zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit und Stabilität der Wälder ab, was sich positiv auf den Wasserhaushalt und die Wasserqualität auswirkt. Einschränkend muss aber festgestellt werden, dass das Problem der Stickstoffsättigung und Versauerung von Waldböden nicht allein durch waldbauliche Methoden gelöst werden kann. Diese können nur einen kleinen Beitrag leisten. Haupteinflussfaktor sind die Immissionen aus v. a. der Landwirtschaft. Bei den Naturschutzmaßnahmen handelt es sich um spezielle Artenschutzmaßnahmen. Aufgrund des geringen Flächenumfangs resultieren keine unmittelbaren Auswirkungen auf das Wasser.

Summary

The report addresses the forestry support measures offered under the “NRW-Programm Ländlicher Raum 2014 to 2022” (Rural Development Programme) in terms of their impact on water quality and quantity. The reporting period covers the period 2015 (program start) to 2020. Reference is made to evaluation question 9 (improving water management). The following measures of investments improving the resilience and environmental value of forest ecosystems were evaluated: Waldumbau – forest restructuring (M8.51), Bodenschutzkalkung – soil conservation liming (M8.52), and Naturschutzmaßnahmen im Wald – nature conservation measures in forests (M8.54). Methodologically, the report is based on the evaluation of funding data and literature analyses.

During the reporting period, forest restructuring measures were carried out on 8,866 ha. Soil conservation liming took place on 18,588 ha. Nature conservation measures were supported on 469 ha.

The forest restructuring measures and soil protection liming are suitable to support the improvement of water quality and quantity. The implemented measures aim in particular at the development of stable deciduous and mixed stands as well as the structural improvement of soil litter, soil and nutrient balance of forest soils to increase the resilience and stability of forests, which has a positive effect on the water balance and water quality. However, it must be noted that the problem of nitrogen saturation and acidification of forest soils cannot be solved by silvicultural methods alone, these can only make a small contribution. The main influencing factor are immissions from agriculture in particular. The nature conservation measures are special species protection measures. Due to the small size of the area, there are no direct impacts on water.

1 Einleitung

Der vorliegende Bewertungsbericht ist Teil der laufenden Bewertung des NRW-Programms Ländlicher Raum 2014 bis 2022. In diesem Bericht wird der Frage nachgegangen, inwieweit die forstliche Förderung zu einer Verbesserung des Wasserhaushalts und der Wasserqualität beiträgt. Dabei wird im Rahmen einer Literaturanalyse insbesondere beleuchtet, wie sich die Bestockungsverhältnisse, Bodenschutzkalkungen und Naturschutzmaßnahmen auf die Qualität des Boden- und Sickerwassers auswirken. Diese Ergebnisse werden gespiegelt mit der Inanspruchnahme der forstlichen Fördermaßnahmen im Zeitraum 2015 bis 2020.

Kapitel 2 beschreibt die Fragestellung; Daten und Methoden werden in Kapitel 3 dargestellt.

In Kapitel 4 wird auf der Grundlage eines Literaturreviews der Einfluss des Waldes auf die Wasserqualität und -quantität erörtert. Es wird aufgezeigt, wie die Wechselwirkung Wald-Wasser zu verstehen ist, besonders in Bezug auf den Nitratgehalt im Wasser. Im Speziellen wird auf Trink-, Grund- und Sickerwasser im Wald Bezug genommen.

Dem folgt in Kapitel 5 die Beschreibung der forstlichen Maßnahmen mit deren Output während der untersuchten Periode. Es wird Bezug genommen auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die bei waldbaulichen Maßnahmen auch im Hinblick auf die Wasserqualität eingehalten werden müssen. Der gesetzliche Rahmen definiert die Baseline, auf der die forstlichen Maßnahmen aufbauen. In Unterkapiteln wird darauf eingegangen, wie sich die waldbaulichen Maßnahmen konkret auf die Wechselwirkungen Wald-Wasser auswirken, und ob diese neben einem Effekt auf die Quantität auch einen positiven Einfluss auf die Senkung des Nitratgehaltes leisten können.

Im Fazit (Kapitel 6) wird Bezug genommen auf die aktuellen Herausforderungen für den Wald aufgrund des Klimawandels.

2 Fragestellung

Im Zentrum des vorliegenden Berichts steht die Bewertungsfrage 9 des Common Monitoring and Evaluation Framework (CMEF): ***In welchem Umfang wurden durch die Interventionen im Rahmen des Programms zur Entwicklung des ländlichen Raums die Verbesserung der Wasserwirtschaft (einschließlich Düngung) und Pflanzenschutz unterstützt?***

Der Schwerpunktbereich 4B wurde im NRW-Programm formal nicht adressiert. Es wurde aber im Feinkonzept (Bathke et al., 2020) vereinbart, den Beitrag der forstlichen Förderung zu diesem Wirkungsbereich zu evaluieren, und zwar für die Vorhabenarten 8.51 Waldumbau, 8.52 Bodenschutzkalkung und 8.54 Naturschutz im Wald (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Zielsetzungen der Vorhabenarten der Teilmaßnahme 8.5 in den SPB

Code	1A	1B	1C	2A	2B	3A	3B	4A	4B	4C	5A	5B	5C	5D	5E	6A	6B	6C
8.51								p ¹	o ²	o ³					o ⁴			
8.52									o ⁵	o ⁶								
8.54								p ⁷	o ⁸									

P¹: Laubholzreiche und standortgerechte Bestände sind i. d. R. naturnäher als die nicht-standortgerechten (nadelholzdominierten) Ausgangsbestände, eine naturnähere Bestockung ist die Voraussetzung für eine naturnähere Entwicklung der gesamten Waldlebensgemeinschaft

o²: Laubholzreiche Bestände sind u. a. aufgrund der geringeren Interzeption und Deposition im Vergleich zu nadelholzdominierten günstiger in Bezug auf Wasserqualität und -quantität einzuschätzen

o³: Verbesserung/Wiederherstellung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit durch eine verbesserte Durchwurzelung des Bodens und veränderte Streuzusammensetzung laubholzreicher Bestände

o⁵: Verbesserung der Basensättigung und Ausgleich von Nährstoffungleichgewichten im Boden, Verhinderung einer weiteren Versauerung tieferer Bodenschichten

o⁶: Die Auswirkungen auf die Wasserqualität hängen eng mit den Wirkungen im Bereich Boden zusammen

P⁷: Unter anderem Förderung von Kleinststrukturen, Nutzungsverzicht bei naturnahen Strukturen

o⁸: Naturnähere Gestaltung von Still- und Fließgewässern im Wald

Quelle: Eigene Darstellung entsprechend des genehmigten EPLR (2020).

Gemäß unserer Evaluierungssystematik werden die Forstmaßnahmen als sogenannte Black-Box-Maßnahmen in den Themenfeldbericht zur Beantwortung der programmbezogenen Bewertungsfragen zum Schutzgut Wasser einfließen, der die Grundlage für die Ex-post-Bewertung in 2026 bildet.

3 Daten und Methoden

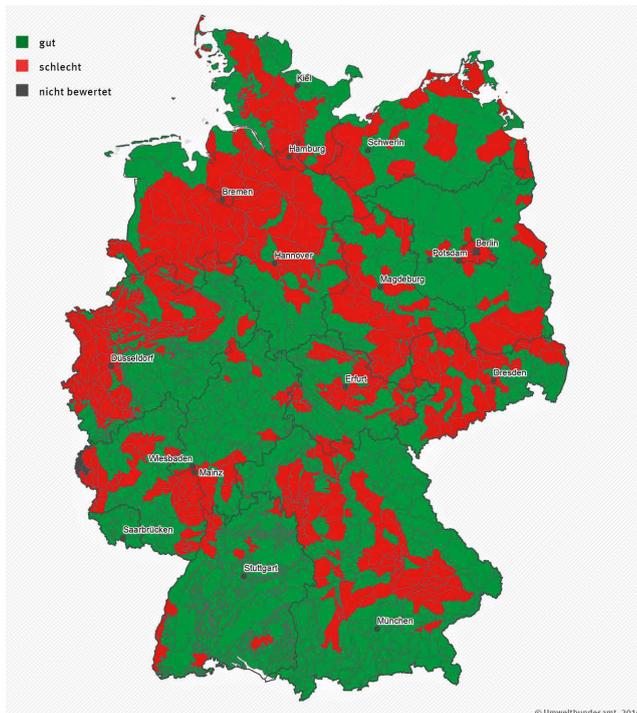
Zunächst wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Des Weiteren stützt sich der Bericht auf die Analyse der relevanten Förderdokumente. Es folgte die Aufbereitung und Auswertung der Förderdaten der forstlichen Maßnahmen. Die Förderdaten wurden für die Evaluation durch das Land NRW bereitgestellt und enthalten Informationen zu der Größe des Waldes und der Fläche, auf der eine Maßnahme umgesetzt wurde, sowie der Zuwendungshöhe. Teilweise sind in den Förderdaten zu M8.51 Waldumbau Informationen zu der Ausgangsbestockung und Zielbestockung und dem Nadelholzanteil vorhanden. Da diese jedoch nicht vollständig sind, wurde auf eine Kalkulation mit diesen Daten verzichtet. Die Auswertung umfasste zum einen die detaillierte Analyse nach Fördergegenständen, um die im Hinblick auf Wasserqualität und -quantität relevanten Anteile der Förderung zu identifizieren. Zum anderen erfolgte eine Analyse der räumlichen Verteilung der geförderten Vorhaben nach Kreisen, um zu prüfen, inwieweit die Förderung auch in Gebieten mit Handlungsbedarf erfolgt.

4 Einfluss des Waldes auf Wasser

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Wald und Wasserqualität und -quantität dargestellt. Generell ist die Trinkwasserqualität in ganz Deutschland zunehmend durch zu hohe Nitratgehalte gefährdet (BMEL und BMU, 2020). In NRW werden rund 39 % des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen (Statistische Berichte NRW, 2019). An knapp 18 % der Messstellen in Deutschland wird der in der deutschen Grundwasserverordnung festgelegte Schwellenwert von 50 mg/l Nitrat im Grundwasser überschritten. Besonders hohe Grenzwertüberschreitungen treten dabei in Gebieten mit überwiegend landwirtschaftlicher Flächennutzung auf (Sundermann et al., 2020). Im Wald befinden sich seltener hoch belastete Messstellen. Aufgrund hoher N-Vorräte im Boden und somit abnehmenden Retentionsvermögens steigt jedoch auch im Wald das Risiko der Überschreitung der Grenzwerte stark an (Kiese et al., 2011). In Karte 1 wird der chemische Zustand der Grundwasserkörper in

Deutschland dargestellt. Sie zeigt, dass 34,8 % aller Grundwasserkörper im Jahr 2016 in einem schlechten chemischen Zustand waren (UBA, 2017).

Karte 1: Chemischer Zustand der Grundwasserkörper in Deutschland 2016



Quelle: Umweltbundesamt (2017).

Die Stickstoffeinträge – überwiegend aus Hochtemperaturprozessen (Autoabgase), Verwertung von Gülle auf landwirtschaftlichen Flächen und Stallluft aus intensiver Viehhaltung stammend – sind durch die Forstwirtschaft kaum zu beeinflussen. Jedoch stellen Wälder aufgrund ihrer Höhe und der unregelmäßigen Oberfläche des Kronendachs für diese diffusen Einträge einen effektiven Filter dar, der die Atmosphäre von Einträgen entlastet, das Abflusswasser dadurch aber indirekt auch belasten kann. Der Wald als flächige Bodenbedeckung hat somit einen Einfluss auf die Ressource Wasser (Rothe und Mellert, 2004). Dabei hat der Wald als Landnutzung eine passive und eine aktive Wirkung. Die positive passive Wirkung des Waldes ergibt sich aus der im Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung extensiven Bewirtschaftung, wodurch weniger Einträge erfolgen. Aber Wald hat auch eine aktive Wirkung. Diese Wirkung bezieht sich sowohl auf die Menge des Wassers, durch das Filtern und Speichern im Boden, als auch auf die Qualität durch das Sammeln von Stickstoff aus der Luft (Hegg et al., 2004). Somit kann durch die Art der Waldbewirtschaftung beeinflusst werden, wieviel Stickstoff aus der Luft gefiltert und dementsprechend in das Ökosystem eingetragen und potenziell mit dem Wasserabfluss innerhalb des Waldes ausgetragen wird, während die Quellen der Stickstoffeinträge außerhalb des Einflussbereichs der Forstwirtschaft liegen (Rothe et al., 2002; Rothe und Mellert, 2004).

4.1 Sickerwasser

Wasser, das aus Niederschlägen oder Gewässern durch verschiedene Bodenschichten in den Untergrund strömt, wird als Sickerwasser bezeichnet. Das nicht im Boden gespeicherte oder durch Wurzeln aufgenommene Wasser sickert durch die Deckschicht in den Grundwasserleiter. Die Menge und Qualität des Sickerwassers wird im Wald aktiv durch Wasser- und Stoffflüsse beeinflusst. Aufnahme durch die Wurzeln, biochemische Umwandlung und Ionenaustauschplätze können zu einer Veränderung der Stoffkonzentrationen im Sickerwasser führen (Hegg et al., 2004). Unter natürlichen Bedingungen ist Stickstoff im Wald ein Mangel-element. Stickstoff kommt nicht in

Bodenmineralen vor und kann damit nicht durch Verwitterung freigesetzt werden. Bei Stickstoffmangel wäre Ammonium die zentrale anorganische N-Form. Sobald Ammonium aus dem im Humus organisch gebundenen Stickstoff mineralisiert worden ist, wird er von Mikroorganismen oder Pflanzen aufgenommen. Deshalb ist in der Regel kaum Nitrat im Sickerwasser unter Wald vorhanden. Erst wenn mehr Ammonium gebildet wird als von Pflanzen aufgenommen werden kann, kann sich Ammonium als Ausgangsprodukt für die mikrobielle Nitratbildung im Boden anreichern. Auch Nitrat kann von Pflanzen und Mikroorganismen aufgenommen werden.

4.2 Grundwasser

Die Grundwasserbildung wird von dem Wurzelwerk der Bäume beeinflusst. Da durch tiefreichende Wurzeln mehr Wasser dem Boden entzogen werden kann, ist die Grundwasserbildung im Vergleich zu Äckern oder Weiden tendenziell verringert. Der Wald hat zudem eine direkte Wirkung auf das vom Niederschlag gespeiste Grundwasser. Ein Teil des Niederschlages wird von Ästen, Blättern bzw. Nadeln aufgefangen, verdunstet oder gelangt verzögert als Bestandsniederschlag oder Stammabfluss auf den Boden oder wieder in die Atmosphäre. Dabei wird der Grad der Verdunstung oder des Abflusses durch die Bestandsart beeinflusst (Hegg et al., 2004). Die Qualität des Grundwassers wird durch die darüberliegenden Schichten beeinflusst. Wenn der Stickstoffbedarf einer Vegetation gedeckt ist, verbleibt der Stickstoff im Boden und wird von dort mit dem Sickerwasser ausgetragen. Unter sauerstoffarmen Bedingungen kann es auch reduziert und gasförmig an die Atmosphäre abgegeben werden (Lachgas). Die Menge des Sickerwassers nimmt somit auch Einfluss auf den Nitratgehalt des Grundwassers. Die Sickerwassermenge ist unter Laubhölzern höher als unter Nadelhölzern, somit findet in Laubwäldern eine stärkere Verdünnung der Nitratkonzentration im Sickerwasser statt (Rothe et al., 2002; Rothe und Mellert, 2004).

4.3 Trinkwasser

Der Wald bietet viele Ökosystemleistungen, darunter auch die Bereitstellung von Trinkwasser (zu großen Teilen gespeist aus Grundwasser). Es liegen über 40 % der Wasserschutzgebietsflächen im Wald, was rund 2,1 Mio. ha Waldfläche ausmacht und 18 % der Gesamtfläche des Waldes in Deutschland entspricht. 98 % der im Wald gewonnenen Wassermenge hat Trinkwasserqualität (BMEL, 2021). Grundwasser aus bewaldeten Gebieten ist weniger belastet in Bezug auf zum Beispiel Nitrat und Pestizide. Die chemische und biologische Verunreinigung des Grundwassers ist gering, da viele wassergefährdende Aktivitäten (Ausbringung von Dünger und Pestiziden) im Wald stark eingeschränkt sind (Hegg et al., 2004). Jedoch zeigte die Bodenzustandserhebung (BZE), die Auskunft über das Risiko von Überschreitungen der Grenzwerte gibt, dass in 52 % der Erhebungspunkte im Wald die kritischen Eintragsraten für Stickstoff überschritten werden (Überschreitung von bis zu zehn kg N/ha*a) (BMEL, 2018). Bei diesen Flächen liegt ein Auswaschungsrisiko vor und eine weitere Reduktion der N-Deposition ist nötig (Meesenburg et al., 2016; Fleck et al., 2019).

5 Förderung waldbaulicher Maßnahmen in NRW im Rahmen des NRW-Programms und ihre Umsetzung

5.1 Gesetzlicher Rahmen

Den grundsätzlichen Rahmen für die Waldbewirtschaftung in Deutschland gibt das Bundeswaldgesetz (BWaldG) im § 1 vor; in diesem Gesetz ist auch die Forderung nach Multifunktionalität der Wälder verankert. Das BWaldG verweist auf eine ordnungsgemäße Forstwirtschaft, in diesem Rahmen sind zum Beispiel der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Düngung unüblich und werden nur in Ausnahmefällen angewendet. Dies ist auch unter anderem in Bezug auf den Wasserhaushalt von Bedeutung. Das Bundesnaturschutzgesetz mit § 5 Absatz 3 fordert zudem, dass forstliche Nutzungen das Ziel zu verfolgen haben, naturnahe Wälder aufzubauen und nachhaltig zu bewirtschaften, was einen hinreichenden Anteil standortheimischer Forstpflanzen miteinbezieht (BMEL, 2021).

Diese Anforderungen werden auch in der Waldstrategie des BMEL aufgegriffen. Das Landesforstgesetz Nordrhein-Westfalen (LFoG NRW) konkretisiert den rechtlichen Rahmen für die Bewirtschaftung des Waldes in NRW sowie für dessen Förderung.

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) verpflichtet Bund und Länder, spätestens bei der Überschreitung von 50 mg/l Nitratkonzentration im Grundwasser geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um einen guten Zustand wiederherzustellen (Bach et al., 2021; WRRL). Für die Bestimmung des chemischen Zustands nach WRRL werden die Parameter Nitrat (NO_3) und Pflanzenschutzmittel (PSM) sowie regional unterschiedliche Schwellenwerte herangezogen. Dabei sind die Anforderungen der Grundwasserrichtlinie (RL 2006/118/EG) maßgebend.

Besonders vor dem Hintergrund der WRRL müssen die Effekte der Waldwirtschaft auf die Gewässer und den Wasserhaushalt, zur Förderung des guten ökologischen und chemischen Zustands der Oberflächengewässer sowie für den mengenmäßigen Zustand des Grundwassers stärker miteinbezogen werden.

5.2 Maßnahmeninhalte

Richtlinien, die für die naturnahe Waldbewirtschaftung greifen, sind die Richtlinien über Gewährung von Zuwendungen zur Förderung forstlicher Maßnahmen (Privatwaldrichtlinie; Körperschaftswaldrichtlinie). Die Richtlinien enthalten wesentliche Zuwendungsbestimmungen für die Zielerreichung, bzw. die Vermeidung vor allem negativer ökologischer Auswirkungen (Franz, 2019) für die drei untersuchten Maßnahmen.

Mit der Maßnahme 8.5 zur naturnahen Waldbewirtschaftung soll die Entwicklung stabiler Laub- und Mischbestände sowie die Weiterentwicklung und Wiederherstellung von naturnahen Waldgesellschaften unterstützt werden. Die Maßnahme ist in vier Vorhabenarten¹ gegliedert, von denen drei im Wirkungsbereich Wasser relevant sind: M8.51 Waldumbau von nicht-standortgerechten Beständen, M8.52 Bodenschutzkalkung und M8.54 Naturschutzmaßnahmen wie Erhalt von Alt- und Biotopbäumen, Pflege von Waldrändern und Entfernung von unerwünschter Jungbestockung (vgl. Tabelle 2). Eine ausführliche Maßnahmenbeschreibung findet sich in Franz (2019).

¹ M8.53 sonstige waldbauliche Maßnahmen (Vorarbeiten und Jungbestandespflege) wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Untersuchte Vorhabenarten der Teilmaßnahme 8.5 (naturnahe Waldbewirtschaftung)

Code	Bezeichnung	Beschreibung
8.51	Waldumbau	Umbau nicht-standortgerechter (Nadelholz-)Bestände zu standortgerechten Laub- und Mischbeständen
8.52	Bodenschutzkalkung	Bodenschutzkalkung mit dem Ziel der Wiederherstellung der natürlichen Filter- und Pufferfunktion des Waldes
8.54	Naturschutzmaßnahmen im Wald	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung, Wiederherstellung und Entwicklung von Lebensstätten gefährdeter und geschützter Arten • Gestaltung von Fließ- und Stillgewässern und Feuchtgebieten im Wald • Einbringung von Solitären und seltenen einheimischen Baum- und Straucharten zur Steigerung der Biodiversität • Erhalt von Alt- und Totholz • Bestandesumbau/Wiederaufforstung in Schutzgebieten • Anlage, Gestaltung und Pflege von Sonderbiotopen im Wald • Verbisschutz

Quelle: Eigene Darstellung entsprechend des genehmigten EPLR (2020).

5.3 Inanspruchnahme

Im Rahmen der Maßnahme 8.5 erfolgte, wie Tabelle 3 zu entnehmen ist, ein Waldumbau auf rund 9.000 ha Fläche, es wurden rund 18.600 ha Bodenfläche gekalkt. Auf rund 500 ha fanden Naturschutzmaßnahmen statt (Alt-/Biotopholz, Pflanzungen), die Jungbestandspflege wurde nicht betrachtet.

Tabelle 3: Output der Maßnahme 8.5 auf Basis der Auszahlungsdaten von 2015 bis 2020

Maßnahme	Code	Output	
		Unterstützte Flächen in ha	Öffentliche Ausgaben in Euro
Waldumbau	8.51	8.866	6.581.577
Bodenschutzkalkung	8.52	18.588	3.771.645
Naturschutz im Wald	8.54	469	1.183.924
	gesamt	27.923	11.537.146

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Förderdaten.

Tabelle 4 stellt die genauen Flächenverteilung innerhalb der Maßnahmen Waldumbau, Naturschutzmaßnahmen und Bodenschutzkalkung dar. Für die Maßnahmen 8.51 und 8.54 wird weiter differenziert nach der Lage: innerhalb und außerhalb von Schutzgebieten (SG). Insgesamt war die Inanspruchnahme deutlich geringer als geplant. So wurden bis Ende 2020 nur 33 % der geplanten öffentlichen Mittel ausgezahlt. Der Mittelansatz wurde entsprechend mit dem Änderungsantrag 2021 um ein Drittel reduziert.

Tabelle 4: Detaillierter Output der Maßnahme 8.5 aufsummiert von 2015 bis 2020

Maßnahmen	Länge / Fläche [m] / [ha]	Länge / Fläche in Schutzgebiet [m] / [ha]	Gesamt Länge / Fläche [m] / [ha]	Anteil in Prozent
Waldumbau 8.51			8.865,64	
Naturverjüngung	14,6	1,23		
Aufforstung / Waldrand / Vorbau	4.926,42	162,72		
Nachbesserung	153,85	6,36		
Wildschutz	60,52	28,43		
Anlage von Weisergattern	2.884,25	627,26		
8.51 gesamt außerhalb SG			8.039,64	91%
8.51 gesamt innerhalb SG			826	9%
Naturschutz im Wald 8.54 gesamt			468,65	
Alt-/Biotopholz	105,13	345,58		
Pflanzungen	14,71	3,63		
8.54 gesamt außerhalb SG			119,84	26%
8.54 gesamt innerhalb SG			348,81	74%
Bodenschutzkalkung 8.53			18.588,16	

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Förderdaten.

6 Wirkungsanalyse der Forstmaßnahmen

In diesem Kapitel wird auf der Grundlage eines Literaturreviews dargestellt, auf welche Art die Waldbewirtschaftung, die durch die Förderung angepasst werden soll, die Wasserqualität und -quantität beeinflusst. Abschließend wird der potenzielle Wirkungsbeitrag der forstlichen Förderung des NRW-Programms beleuchtet.

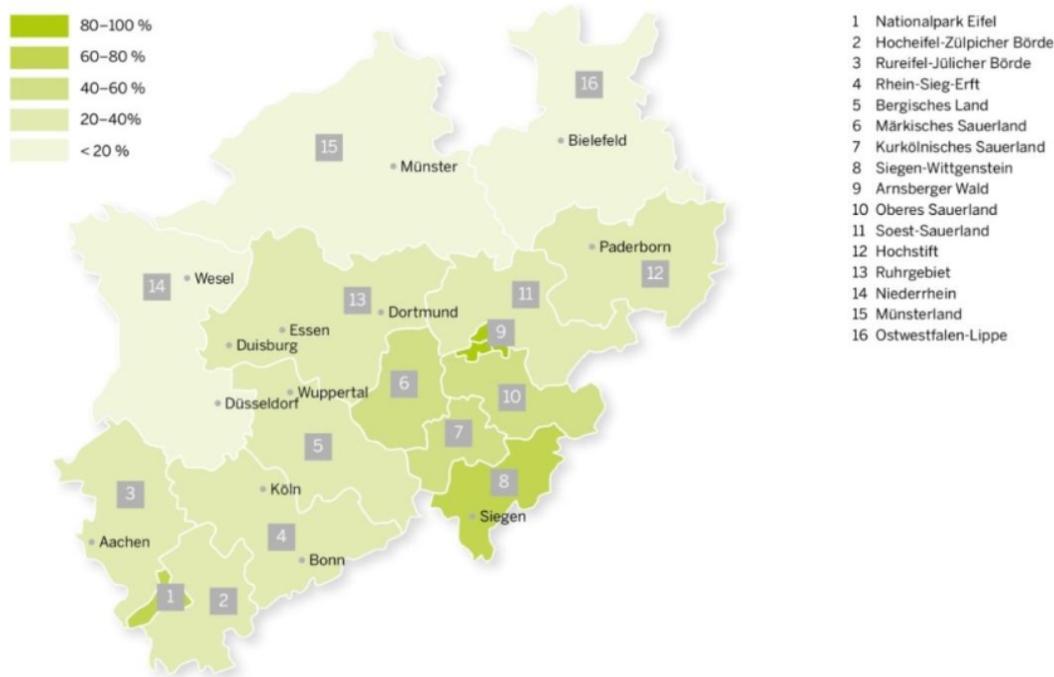
6.1 Waldumbau und Naturschutzmaßnahmen

Im Folgenden werden die Maßnahmen Waldumbau (8.51) und Naturschutz im Wald (8.54) diskutiert. Die Förderung des Waldumbaus zielt auf den Umbau nicht-standortgerechter (Nadelholz-)Bestände zu standortgerechten Laub- und Mischwaldbeständen ab. In der untersuchten Periode wurden im Bereich Naturschutz im Wald zum größten Teil der Erhalt von Alt- und Biotopholz gefördert, sodass dieser Fördergegenstand im Fokus der Untersuchung liegt. Eine Förderung von Vorhaben an Fließ- und Stillgewässern fand nicht statt.

6.1.1 Waldumbau

Rund 27 % der Landesfläche Nordrhein-Westfalens besteht aus Wald. Davon machen 58 % Laubbäume aus, zu 42 % besteht der Wald aus Nadelbäumen.

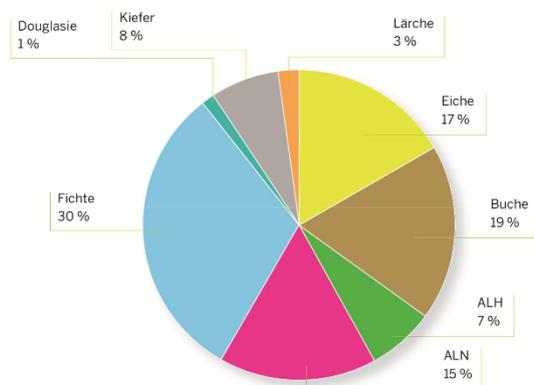
Karte 2: Waldflächenanteile nach Regionalforstämtern



Quelle: MULNV (Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) (2019).

Besonders waldreiche Gebiete befinden sich in den Mittelgebirgslagen (vgl. Karte 2). Diese Waldgebiete haben jedoch oft auch einen hohen Fichtenanteil (Regionalforstamt Kurkölnisches Sauerland [61 %]; Oberes Sauerland [55 %]; Siegen Wittgenstein [50 %]). In der Landeswaldinventur wurden 51 Baumarten bzw. Baumartengruppen erfasst; die Hauptbaumarten sind Fichte, Kiefer, Eiche, Buche, Lärche und Douglasie. Seltener Laubbaumarten werden zusammengefasst in den Sammelgruppen „andere Laubbäume mit hoher Lebensdauer“ (ALH) und „Laubbäume mit niedriger Lebensdauer“ (ALN) (MULNV, 2019).

Abbildung 1: Waldflächenanteil nach Baumartengruppen in NRW

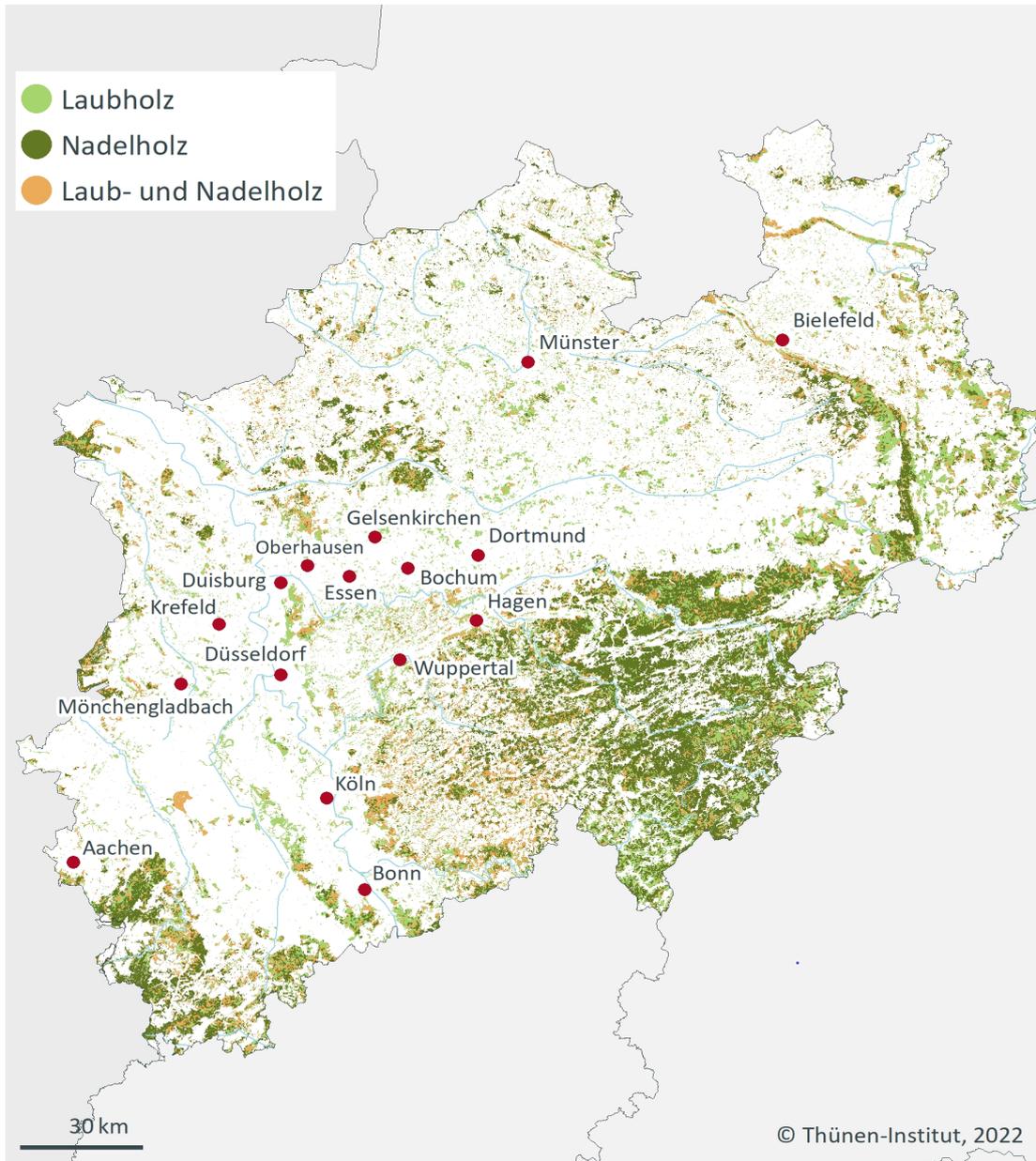


Quelle: MULNV (2019).

Nordrhein-westfälische Wälder sind insgesamt vor allem durch Fichten, Buchen, Eichen und Kiefern geprägt, Abbildung 1 stellt die Waldanteile der verschiedenen Baumarten in NRW dar. Zu erkennen ist, dass die Fichte mit 30 % die am stärksten vertretene Baumart ist. Laut des aktuellen Waldzustandsberichtes für NRW hat sich die

Fichte noch nicht von den vorherigen Trockenjahren erholt und ist von den Hauptbaumarten die am stärksten Geschädigte (MULNV, 2021). Die Waldartenverteilung in NRW ist auf der Karte 3 dargestellt. Die Mittelgebirgs-wälder in NRW sind stark nadelholzgeprägt und bestehen zum großen Teil aus Reinkulturen. Es besteht in NRW also ein Bedarf, den Umbau zu Mischwäldern hin zu unterstützen. Dadurch kann auch ein Beitrag zu Wasserqualität und -quantität geleistet werden.

Karte 3: Waldartenverteilung in NRW



Quelle: Basis-DLM, VG250, GN250 © GeoBasis-DE / BKG (2020).

Einfluss des Waldumbaus hin zu Mischwäldern auf die Wasserqualität

Die jeweilige Baumart ist eine der wichtigsten Einflussgrößen auf den Nitratgehalt des Sickerwassers. In einer Vielzahl von Studien (Hegg et al., 2004) wurden Bestände mit Buchen, Fichten, Kiefern und vereinzelt auch Eichen, Erlen und Tannen hinsichtlich der Nitratkonzentration im Sickerwasser untersucht. Nitratausträge unter Fichtenbeständen sind signifikant höher als bei vergleichbaren Standorten unter Buchen (Mellert et al., 2007). In

allen von Hegg et al. (2004) untersuchten Publikationen wurde festgestellt, dass somit auch das unter Laubbäumen produzierte Trinkwasser höherwertiger, also hier die Nitratkonzentration niedriger ist (Hegg et al., 2004). Aufgrund ihrer ganzjährigen Benadelung haben Nadelbäume mit ihrem höheren Blattflächenindex im Vergleich zu Laubbäumen eine höhere Kapazität, Luftschadstoffe auszuwaschen. Die höhere Blattfläche führt zu einer höheren Trockendeposition und somit zu einem höheren Nitratgehalt im Kronendurchlauf, was wiederum Einfluss auf das Sickerwasser nimmt und zu einem höheren Stickstoff- und Säureeintrag führt (Rothe und Mellert, 2004; Hegg et al., 2004). Der N-Gehalt durch Kronendurchlauf ist in Fichtenbeständen 1,6 mal höher als in Beständen mit Buchen (Rothe et al., 2002). Vorteile von Bepflanzungen mit Laubbäumen in Bezug auf die Wasserqualität sind zudem die größeren Durchwurzelungstiefen, durch die dem Sickerwasser Nährstoffe über eine längere Strecke, also bis in tiefere Bodenschichten, entzogen werden können, was besonders bei hohen Stickstoffeinträgen die Nitratkonzentration senkt. Der unter Laubbäumen stärker ausgeprägte Mineralbodenhumus ist in der Lage, mehr Stickstoff in stabiler Form zu speichern (im Gegensatz zu dem weniger mächtigen Boden unter Nadelwäldern). Dieser eigentlich positive Effekt der Stickstoffspeicherung erhöht jedoch auch die Gefahr von hohen Nitratausträgen im Falle eines Sturmwurfes oder nach Kahlschlag (Hegg et al., 2004).

Einfluss des Waldumbaus auf die Wasserquantität

Wasserverfügbarkeit und die Grundwasserneubildung in Laub- und Mischwäldern sind höher als in Nadelwäldern, was die Gefahr von Trockenstress verringert (BMEL, 2021). Hier hat die saisonale Belaubung eine zentrale Bedeutung, da diese die Grundwasserneubildung durch Winterniederschläge beeinflusst. Die fehlende Belaubung sorgt dafür, dass im Winter keine Transpiration von Laubbäumen stattfindet, wohingegen Nadelbäume über die Vegetationsperiode hinaus transpirieren (Reise et al., 2020). Große Unterschiede bestehen zwischen den Baumarten in Bezug auf die Sickerwassermenge und die Sickerwasserzusammensetzung und infolgedessen auch auf die Grundwasserneubildung. Durch höhere Interzeptionsverluste in den Nadelbaumbeständen resultiert eine Verringerung der Wassermenge und Erhöhung der Stoffkonzentrationen im Sickerwasser (Hegg et al., 2004). Buchenbestände haben zwar eine hohe Transpiration, jedoch eine geringe Interzeption und Evaporation. Durch ausgedunkelte Bodenschichten findet eine Evaporation im Vergleich zu Nadelbäumen im geringeren Maße statt, wodurch sich auch die hohen Sickerwasserraten erklären lassen. Durch diesen Effekt wird der Oberboden im Sommer feucht gehalten, wovon wiederum andere Baumarten profitieren können. Der Lichteinfall auf den Oberboden beeinflusst die Bodenoberflächentemperatur. Je höher die Temperatur des Bodens ist, desto höher ist der mikrobielle Humusabbau. Ein starker Humusabbau führt zur Absenkung der Wasserspeicherkapazität des Waldbodens (Reise et al., 2020).

Wirkung der geförderten Waldumbaumaßnahmen im NRW-Programm

Nach den Förderdaten liegt der Nadelholzanteil der geförderten Flächen (aufsummiert von 2015 bis 2020) bei weniger als 1 %. Insgesamt befinden sich auf 4 % der geförderten Flächen Nadelbaumbestände².

Innerhalb NRWs wurde in dem Regierungsbezirk Arnsberg mit insgesamt 572 ha über die Förderperiode im Bereich Waldumbau (8.51) am meisten Fläche gefördert. Mit 175 ha und 141 ha wurden besonders stark Umbaumaßnahmen in Gemeinden im Kreis Siegen-Wittgenstein und im Hochsauerlandkreis gefördert (vgl. Tabelle 5). Als Stellschraube für die Wasserqualität und -quantität ist die Waldbaumaßnahme 8.51 hier von Wichtigkeit, da diese Gebiete immer noch stark fichtengeprägt sind. Der nicht so waldfächenanteilsreiche Regierungsbezirk Detmold wurde mit 426 ha am zweitmeisten im Bereich des Waldumbaus gefördert. Zwar ist hier die Fichtendichte nicht so hoch wie im Regierungsbezirk Arnsberg, jedoch war dieses Gebiet in den vergangenen Jahren stärker von Trockenheit betroffen, wie auf der Karte 5 zu erkennen ist. Um eine bessere Resilienz des Waldes gegen Trockenstress und somit auch eine Förderung der Wasserqualität und -quantität zu erhalten, ist eine Förderung

² Anzumerken ist, dass nicht für alle Datensätze der Nadelholzanteil in der Zielbestockung geliefert wurde. Zum Anteil des Nadelholzes auf den Maßnahmenflächen geben nur rund 68 % der Datensätze Auskunft.

in diesem Gebiet also auch von ausschlaggebender Wichtigkeit. Wie in Karte 1 dargestellt, ist die Grundwasserqualität in Teilen der Regierungsbezirke von Düsseldorf und Münster bedenklich. Diese Gebiete haben einen eher geringeren Waldanteil und werden intensiv landwirtschaftlich genutzt, sodass Flächen kaum mit der Förderung des Waldumbaus erreicht werden können.

Tabelle 5: Innerhalb der Regierungsbezirke umgesetzte Maßnahmen 8.51 (aufsummiert von 2015 bis 2020)

Arnsberg		Detmold		Düsseldorf		Köln		Münster	
Arnsberg	2,91	Bielefeld	0,6	Düsseldorf	8,96	Aachen	6,05	Borken	64,54
Bochum	1,68	Gütersloh	25,29	Essen	11,48	Bonn	1,03	Bottrop	9,41
Dortmund	0,93	Herford	17,52	Kleve	46,79	Düren	11,53	Coesfeld	26,45
Ennepe-Ruhr-Kreis	15,5	Höxter	101,3	Krefeld	0,23	Euskirchen	9,55	Münster	15,86
Hagen	6,09	Lippe	148,42	Mettmann	15,2	Heinsberg	0,95	Recklinghausen	83,89
Hamm	6,66	Minden-Lübbecke	17,1	Mönchengladbach	6,8	Köln	3,5	Steinfurt	42,24
Herne	2,46	Paderborn	115,43	Mülheim an der Ruhr	0,36	Oberbergischer Kreis	60,01	Warendorf	77,85
Hochsauerlandkreis	140,6			Remscheid	0,09	Rhein-Erft-Kreis	2,23		
Märkischer Kreis	51,77			Rhein-Kreis Neuss	32,15	Rheinisch-Bergischer Kreis	58,43		
Olpe	37,98			Solingen	7,45	Rhein-Sieg-Kreis	54,12		
Siegen-Wittgenstein	174,73			Viersen	41,59				
Soest	103,26			Wesel	25,43				
Unna	26,97			Wuppertal	1,25				
571,54 ha		425,66 ha		197,78 ha		207,40 ha		320,24 ha	

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Förderdaten.

6.1.2 Naturschutz im Wald

Ein natürlicher Bestandteil unserer Waldökosysteme sind alte und tote Bäume, die einer Vielzahl an Tier-, Pflanzen- und Pilzarten als Lebensraum dienen. Für die Anwesenheit von seltenen Arten und den Artenreichtum generell ist das Biotopholz (Altholz, stehendes oder liegendes Totholz) als Strukturelement von hohem Stellenwert anzusehen. Besonders die Eiche als Totholz weist eine artenreiche Käferfauna mit über 500 holzbesiedelnden Käfern und etwa 500 weiteren Käferarten auf (Striepen et al., 2021). Wenig wurde bisher zu dem genauen Zusammenhang von Biotopholz auf die Wasserqualität geforscht, jedoch kann ein Zusammenhang vermutet werden, da bei Trockenperioden im Wald die Anfälligkeit der Bäume gegenüber Käferbefall steigt und durch Totholz Habitate für Fressfeinde von Schädlingen geschaffen werden, was die Resilienz des Waldes in Trockenperioden stärkt und somit Langzeitschäden und deren Einfluss auf die Wasserqualität mindert. In Gebieten mit steileren Hängen schützt Totholz, besonders die am Boden liegenden Stämme, vor Bodenerosionen. Sie stabilisieren den Boden und helfen somit bei Starkregen, eine Auswaschung des Bodens und seiner Nährstoffe zu verhindern und damit einer Versauerung entgegenzuwirken. Totholz besitzt zum einen die Fähigkeit, Kohlenstoff zu speichern, zum anderen speichert Totholz auch Wasser und beeinflusst somit nicht nur den Kohlenstoffhaushalt des Waldes positiv, sondern auch den Wasserhaushalt (Lachat et al., 2019). Durch ausreichend liegendes und stehendes Totholz wird der Humusaufbau unterstützt. Neben der Eigenschaft als wichtiger Wasserspeicher in Wäldern hat der Humusgehalt des Oberbodens eine direkte Einwirkung auf die Nitratmobilisierung ins Grundwasser, die verstärkt auftritt, wenn Wasserspeicherkapazität der Böden durch Humusabbau abnimmt. Es wird davon ausgegangen, dass bei Temperaturextremen das gespeicherte Wasser im Totholz als Puffer wirken kann (Reise et al., 2020).

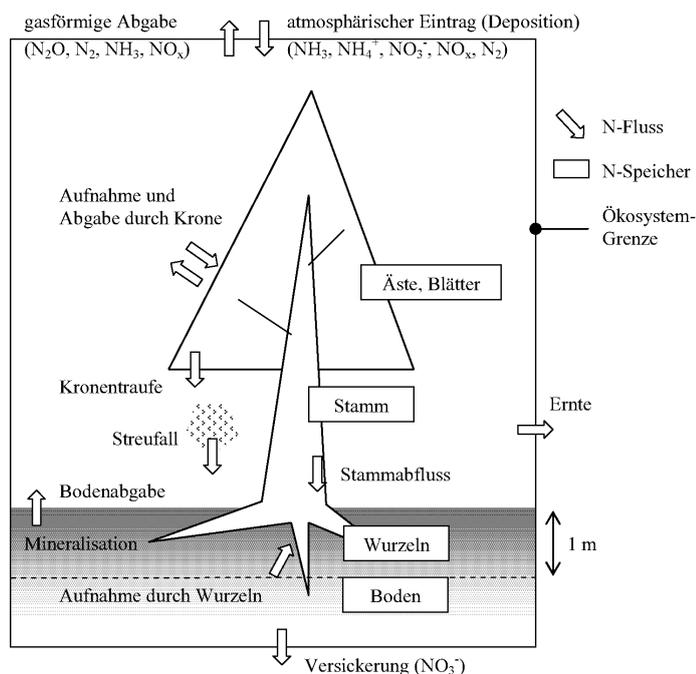
Wirkung der Naturschutzförderung im Wald im NRW-Programm

Der Naturschutz könnte die Wasserqualität und -quantität unterstützen, jedoch ist dies im Rahmen der nur auf einer geringen Fläche umgesetzten Maßnahmen nicht quantifizierbar.

6.2 Bodenschutzkalkung

Die Resilienz der Wälder wird maßgeblich vom Zustand des Bodens beeinflusst. So wird die Vitalität durch das pflanzenverfügbare Wasserangebot und durch die physikalische, chemische und die mikrobiologische Beschaffenheit des Bodens bestimmt. Somit spielt der Waldboden nicht nur eine besondere Rolle in der Trinkwasserversorgung, sondern auch für die lokalen Wasserkreisläufe und den Landschaftswasserhaushalt. Eine hohe Wasserqualität wird durch die Puffer- und Filterwirkung der Böden gewährleistet, des Weiteren ein effizientes Hochwasserrückhaltevermögen (BMEL, 2021). Der wichtige Pflanzenbestandteil Stickstoff wird in naturnahen Vegetationen zwischen Boden und Pflanze in einem Kreislauf gehalten. Sickerwasserverluste des Stickstoffes werden mittels Aufnahme durch die Luft kompensiert. In der Regel befindet sich dieser Kreislauf im Wald in einem Gleichgewicht. In Abbildung 2 ist der ungestörte Stickstoffkreislauf im Wald dargestellt. Bei Unterbrechung des Kreislaufes, oder durch erhöhte Stickstoffeinträge (zum Beispiel aufgrund von Luftverschmutzung), kann ein Ungleichgewicht im Boden entstehen. Die Folgen sind ein erhöhter Nitrateintrag im Grundwasser. Besonders anfällig für solche Störungen sind Nadelwälder, da auch im Winter partikulär gebundener Stickstoff aus der Luft gefiltert wird und der tendenziell saurere Boden unter Nadelwäldern im Vergleich zum Laubwaldboden schlechter in der Lage ist, Stickstoff aufzunehmen (Hegg et al., 2004). Als Kompensationsmaßnahmen gegen die depositionsbedingte Versauerung der Sickerwasserleiter kommen insbesondere Bodenschutzkalkungen der Wälder in Betracht (NW-FVA, 2013). Diese Kalkungen sind ein Mittel, um den chemischen Zustand des Waldbodens zu stabilisieren, zu verbessern und einer weiteren Versauerung entgegenzuwirken. Besonders bei den in den vergangenen Jahren aufgetretenen Waldschäden stellt sich die Frage, ob diese nicht nur durch die Trockenheit, sondern auch durch die unnatürlich versauerten Waldböden verursacht werden (Wilpert et al., 2020).

Abbildung 2: N-Flüsse und -Speicher im Wald



Quelle: Köchli (2005).

Bodenschutzkalkungen wirken sich auf die Fest- und Flüssigphase der Böden aus. Besonders im Oberboden zeigen sich die Auswirkungen von Kalkungen, die bis in eine Tiefe von 90 cm reichen können (Sucker et al., 2009). Kalkungen wirken sich also auch auf die Nährstoffverfügbarkeit aus. Dies zeigt sich anhand von erhöhten Basensättigungen, der Erhöhung der Magnesium- und Calciumverfügbarkeit und einer verbesserten Stickstoffspeicher-

kapazität für die Bäume (Puhlmann et al., 2021). Kalkungen können somit Einfluss auf die Calcium- und Magnesiumkonzentrationen im Sickerwasser nehmen (Sucker et al., 2009). Der Wasserbedarf einer Vegetation bzw. ihre Wassernutzungseffizienz hängt auch mit den Calciumvorräten im Boden zusammen. Je besser die Calciumversorgung der Bäume, desto effektiver funktioniert die Stomataregulation der Pflanzen (Puhlmann et al., 2021). Die Schließfunktion der Stomata ist des Weiteren stark von Kalium abhängig. Kommt es zu Kaliummangel, wird diese Schließfunktion gelähmt, dadurch kommt es zu erhöhten Transpirationsraten, was bei Bäumen zu erhöhtem Trockenstress führt und sie somit anfälliger für Trockenschäden macht (Wilpert et al., 2020). Die Aufnahme von Kalium wird durch das Feinwurzelsystem der Bäume geregelt. In versauerten Böden ist die Feinwurzeldichte vermindert und somit ist auch die Kaliumaufnahme aus der Bodenlösung reduziert. Demzufolge kann sich die Bodenschutzkalkung auch auf den Wasserverbrauch in Trockenphasen auswirken (Puhlmann et al., 2021).

Nicht nur das Feinwurzelsystem, sondern das gesamte Wurzelsystem eines Waldes reagiert auf den Säuregehalt des Bodens. So können (stark) saure pH-Werte im Boden die Durchwurzelungstiefe vermindern. Durch hohe Säurestärke werden für die Baumwurzeln toxische Aluminiumionen freigesetzt. Im humosen Oberboden entgiften gelöste Humate das Aluminium, wodurch die Durchwurzelung auf diesen Bereich beschränkt bleibt. Durch die reduzierte Durchwurzelung können die Bäume in Trockenperioden nicht auf die im tieferen Boden gespeicherten Wasser- und Nährstoffvorräte zurückgreifen (Wilpert et al., 2020). Durch Bodenschutzkalkungen nimmt die Austauschkapazität im Wurzelraum zu. Die Intensität der Durchwurzelung durch Bodenschutzkalkungen kann einerseits durch die verminderte Aluminiumionenaktivität durch erhöhte Basensättigung verbessert werden, andererseits wird durch die Basensättigung die Aggregat- und Porenbildung angeregt, die besonders von Regenwürmern geleistet wird (Wilpert et al., 2020). Indem bodenwühlende und aggregatbildende Bodenorganismen gefördert werden, verbessern sich die Infiltrationskapazitäten von Böden für Niederschläge. Die Verfügbarkeit von Phosphor und Kalium wird durch die verstärkte biologische Umgrabung und Aggregatumbildung erhöht. Diese Erhöhung resultiert daraus, dass während der Umbildung Zwischenprodukte mit leichter zugänglichen Reserven entstehen (Puhlmann et al., 2021). Die Aggregat- und Porenbildung beeinflusst die Beschaffenheit des Bodens (Porosität, Feinanteil, Mächtigkeit) und somit auch die Wasserspeicherkapazität. Kalkungen bewirken dadurch in gewissem Maße Änderungen der Abflussbildung und im Wasserhaushalt (Hegg et al., 2004; Puhlmann et al., 2021). Das Porenvolumen und die gesättigte Wasserleitfähigkeit werden durch die mit der Kalkung eingebrachten Calcium- und Magnesiumionen und deren stabilisierenden Wirkung verbessert. So können Infiltration und Speicherung von Niederschlägen verbessert, dadurch die Abflussbildung verlangsamt und Hochwasserspitzenabflüsse reduziert werden (Puhlmann et al., 2021).

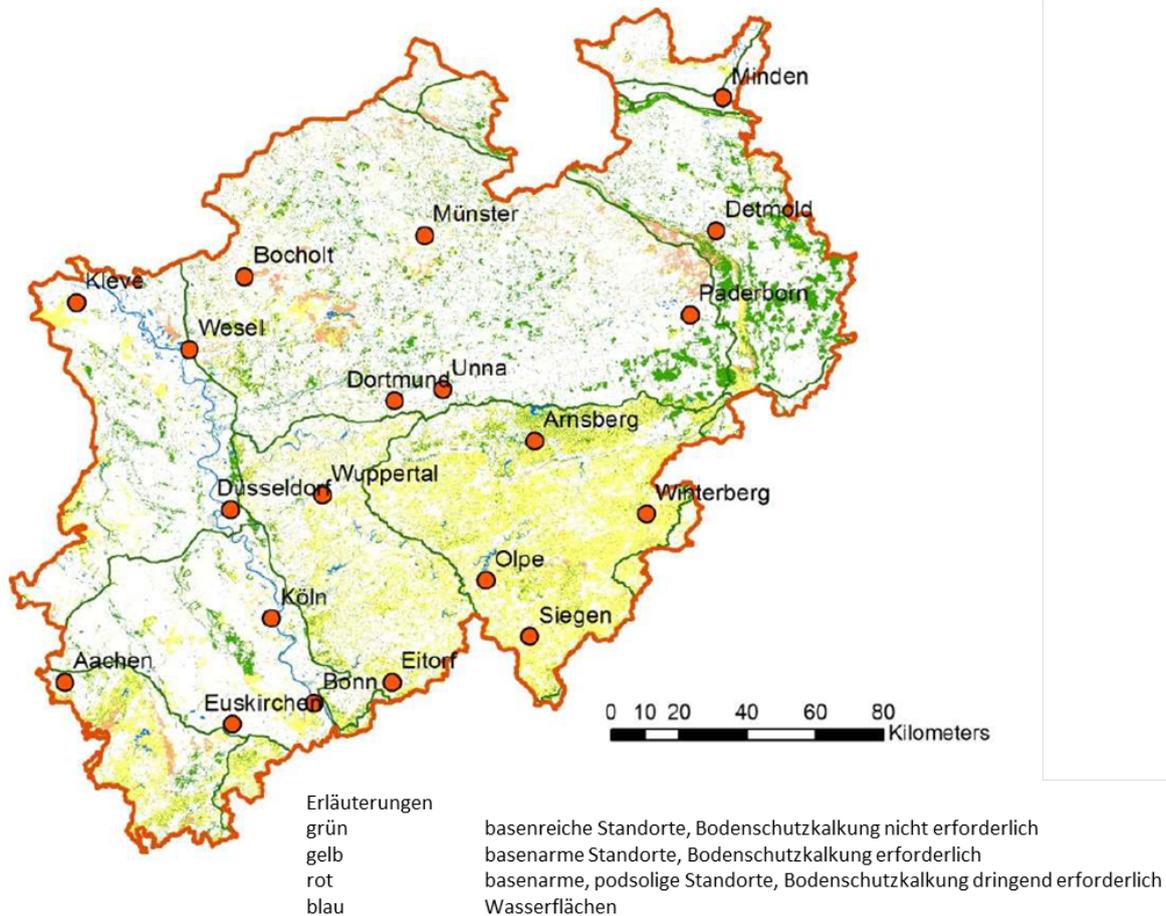
Das Bodenwasser (Wasser in Porenräumen des Bodens) weist infolge von Kalkungen höhere pH-Werte sowie eine höhere Säureneutralisationskapazität auf. Steigende pH-Werte im Boden haben zur Folge, dass Aluminium wie auch Eisen sich im Mineralboden vermehrt in Form von Oxiden stabilisieren und somit wieder Sulfat binden können. Der Schwefelumsatz im Boden nimmt durch den Einfluss höherer mikrobieller Aktivität mit zunehmendem pH-Wert zu, wodurch Sulfat schneller gebunden werden kann. Die Oxide und die mikrobielle Aktivität reduzieren nach Kalkung also die Sulfatkonzentration im Bodenwasser und gleichzeitig sinken dadurch die Konzentrationen der Metallionen (insbesondere von Aluminium) im Sickerwasser. Die Zusammensetzung der mobilen Kationen wird durch ein Zusammenspiel der Austauscherbelegung, der Protonenaktivität und des Eintrags von Nährstoffen verändert (Puhlmann et al., 2021).

Insgesamt hat die Verbesserung des Säurezustands der Waldböden einen positiven Effekt auf die Qualität von Grund- und Oberflächenwasser (Puhlmann et al., 2021). Die Topographie des Einzugsgebietes ist jedoch ausschlaggebend für die Effektivität einer Kalkung. Auf flacheren Hängen, Verebnungen und Akkumulationslagen sind Kalkungen im Allgemeinen effektiver, da hier langsamere Bodenwasserflüsse vorherrschen. Zu einer raschen Auswaschung hingegen führen steile Hänge; durch die hohen Fließgeschwindigkeiten lateraler Abflüsse. Durch die schnelle Auswaschung des Kalkes aus den Bodenzonen kann hier der Kalkungseffekt gering ausfallen (Sucker et al., 2009). Wenn eine Kalkung aus der Luft stattfindet, kann jedoch auf die Topographie kaum Rücksicht ge-

nommen werden. Nach Starkregenereignissen kurz nach der Ausbringung der Kalkung kann der Zulauf das Einschwemmen von durch Kalkmittel beeinflusstes Oberflächenmaterial zur Folge haben, was Auswirkungen auf aquatische Lebewesen und Amphibien hat (Puhlmann et al., 2021).

Kalkungen bergen also Risiken, die auch durch Aktivierung biologischer Prozesse ausgelöst werden können. Die Anhebung des pH-Wertes im Auflagehumus führt zu einer verstärkten Mineralisierung. Dieser Prozess führt zu einer Nitratverlagerung im Boden, welche die Speicherkapazität des Bodens übersteigen kann. Im Extremfall kann das zu einer Auswaschung und somit zu einer Grund- und Oberflächenwasserbelastung führen. Des Weiteren kann es zu einer temporären Verflachung der Feinwurzeln kommen, die durch verbesserte Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden ausgelöst wird (Puhlmann et al., 2021). Durch Kalkungen werden Mineralisierungsprozesse im Boden aktiviert, weshalb häufig erhöhte Nitratkonzentrationen im Bodenwasser beobachtet werden können. Dieses Risiko besteht vor allem dann, wenn die Bodenstickstoffsättigung hoch ist, oder der von der Mineralisierung freigesetzte Stickstoff von der Vegetation nicht aufgenommen werden kann (bei Kalkungen außerhalb der Vegetationsperiode oder in alten Beständen mit geringer Stickstoffaufnahme). Mineralisierung organischer Substanzen hat zur Folge, dass oft die Konzentration organischer Kohlenstoffverbindungen im Bodenwasser zunimmt (Puhlmann et al., 2021). Eine weitere mögliche negative Auswirkung – neben einer vorübergehend erhöhten Verlagerung von Nitrat – ist die Verlagerung von gelöstem organischem Kohlenstoff mit dem Sickerwasser. Somit sind Bodenschutzkalkungen nicht nur mit Chancen, sondern auch mit Risiken für Waldökosysteme verbunden (Puhlmann et al., 2021). Die Frage nach Chancen und Risiken einer Bodenschutzkalkung ist nicht pauschal beantwortbar, sondern muss unter Beachtung der speziellen Gegebenheiten – wie zum Beispiel Bestockung, Immissionen, Standorte – abgeglichen werden. Deswegen müssen innerhalb der Förderung die Zweckmäßigkeit und Unbedenklichkeit der geplanten Maßnahme vom zuständigen Forstamt bestätigt werden. Karte 4 zeigt die in NRW liegenden potenziell für Bodenschutzkalkungen geeigneten Waldflächen.

Karte 4: Karte zur Bodenschutzkalkung in NRW



Quelle: Landesbetrieb WuH (2019).

Wirkung der im NRW-Programm geförderten Bodenschutzkalkungen

Besonders die Bodenschutzkalkungen mit einer induzierten Verbesserung der Wasserspeicherung und Wasseraufnahme können die Konzentrationen von Schadstoffen im Sickerwasser verringern und somit einen Beitrag zur Verbesserung der Wasserqualität leisten.

Entsprechend der Karte 4 wurde im Rahmen des EPLR in Gebieten bzw. Regierungsbezirken mit einem Bedarf an Bodenschutzkalkungen gekalkt. Innerhalb des Regierungsbezirks Arnsbergs wurde mit insgesamt 11.734 ha am meisten gekalkt (vgl. Tabelle 6). 60 % der gekalkten Flächen liegen im Hochsauerlandkreis, welches ein stark fichtengeprägtes Gebiet ist. Des Weiteren fanden Kalkungen im südlichen Teil des Regierungsbezirks Köln und in südöstlich-gelegenen Kreisen in Düsseldorf statt. Insgesamt kann zwar von einem positiven Beitrag auf die Wasserqualität und -quantität von den geförderten Maßnahmen ausgegangen werden, die Maßnahme ist mit ihren insgesamt rund 18.000 ha gekalktem Gebiet jedoch – bezogen auf die Fläche von den Gebieten, die für Bodenschutzkalkung infrage kommen würde (vgl. Karte 4) – von zu geringer Reichweite, sodass sich die Effekte in allgemeinen Trends nicht widerspiegeln.

Tabelle 6: Innerhalb der Regierungsbezirke umgesetzte Maßnahmen 8.53 (aufsummiert von 2015 bis 2020)

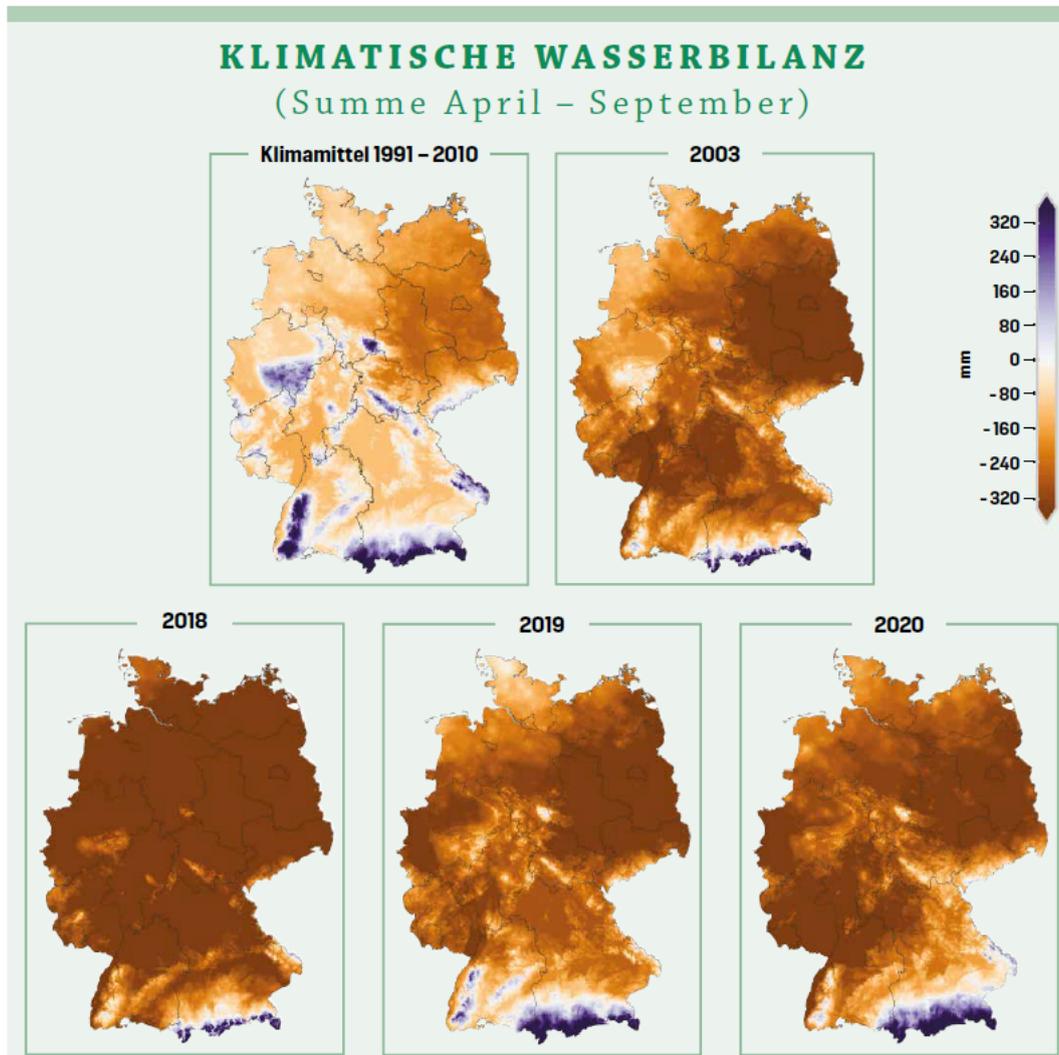
Arnsberg		Düsseldorf		Köln		Münster		Detmold	
Hochsauerlandkreis	7058,43	Duisburg	617,50	Euskirchen	1.506,47	Recklinghausen	277,37	Lippe	63,4
Märkischer Kreis	537,60	Düsseldorf	1.019,38	Oberbergischer Kreis	1.131,17				
Olpe	1958,74	Krefeld	203,00	Rheinisch-Bergischer Kreis	183,40				
Soest	2179,2	Remscheid	565,82						
		Wuppertal	436,64						
11.733,97 ha		2.842,34 ha		2.821,04 ha		277,37 ha		63,4 ha	

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage der Förderdaten.

7 Trockenstress – die Herausforderung der vergangenen (und kommenden) Jahre

Die Wälder Deutschlands werden immer stärker durch Witterungsextreme wie Hitze- und Trockenperioden und nachfolgend durch Befall von Schaderregern geschädigt und belastet. Waldbestände mit der trockenheitsempfindlichen Fichte sind hiervon besonders betroffen. Die deutschlandweite Karte 5 zeigt die Klimatische Wasserbilanz (KWB) und macht deutlich, dass die Vegetationsperiode in den vergangenen Jahren extrem trocken war und das bisherige Rekordjahr 2003 in der Intensität deutlich übertroffen hat (Bolte et al., 2021). Der Waldzustandsbericht 2021 aus NRW zählt die Fichte in Bezug auf die aus der Trockenheit resultierenden Kalamitäten als Verlierer. Somit sind die Waldgebiete im Mittelgebirge besonders gefährdet durch klimabedingte Störungen aufgrund ihrer hohen Fichtenanteile. Erhebungen des Landesbetriebes Wald und Holz Nordrhein-Westfalen weisen eine aktuelle Schadfläche von 115.000 ha Wald auf. Seit 2018 sind insgesamt rund 43 Mio. m³ Schadholz aus Dürren, Käferfraß und Stürmen angefallen. Gerade bei der Wiederbewaldung der Schadflächen hat die Vielfalt eine zentrale Bedeutung. Verschiedene Baumarten und deren mehrstufiger Anbau stärken die Wälder. Der Waldumbau kann also präventiv einen Beitrag zur Resilienz der Wälder gegenüber Trockenstress leisten, besonders im Bezug darauf, dass der Nadelholzanteil von geförderten Flächen verringert wird.

Karte 5: Klimatische Wasserbilanz in Deutschland



Quelle: Bolte et al. (2021).

8 Fazit

Besonders die in den vergangenen Jahren aufgetretenen Dürrekalamitäten zeigen auf, dass die Waldwirtschaft unter anderem die Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhaltung des Waldes sowie die Sicherstellung gegenüber Sickerwasserausträgen stärker einbeziehen muss. Erforderlich ist dies, um die Folgen des Klimawandels für die Wälder abzdämpfen sowie die Trinkwasserversorgung aus dem Wald sicherzustellen, indem die Betroffenheit von Dürreereignissen gemindert wird (BMEL, 2021).

Forstmaßnahmen sind in das Zielsystem der GAP mit einbezogen und können auch einen Beitrag zur Verbesserung der Wasserqualität und der -quantität leisten. Jedoch ist durch die geringe Inanspruchnahme die Reichweite insgesamt gering (zu den Gründen siehe Grajewski et al., 2018; Franz, 2019) und mit den Maßnahmen werden nicht zwingend die Hotspots erreicht, d. h. die Gebiete mit hohen Nährstoffeinträgen. Hinzu kommt, dass aufgrund der langsamen Wachstumsprozesse im Wald die von den Maßnahmen erwarteten Wirkungen erst Jahre bis Jahrzehnte nach der Maßnahmendurchführung eintreten werden.

Als Schwächen des Waldes in NRW wurden unter anderem der große Fichtenanteil und der schlechte Gesundheitszustand des Waldes identifiziert (Franz, 2019). Der Waldumbau ist ein zentraler Bestandteil, um die Nutz-,

Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes zu gewährleisten, wozu auch der Wasserhaushalt gezählt wird. So kann zum Beispiel durch den Waldumbau die Ökosystemleistung der Grundwasserneubildung gefördert werden (Reise et al., 2020). Bodenschutzkalkung wirkt sich im hohen Grad auf den Versauerungszustand der Böden und somit auch auf die Grundwasserqualität aus. Mit Blick auf die Versauerungszustände Deutschlands wird deutlich, dass die Umsetzung und die Weiterführung der Bodenschutzkalkungen wichtig sind, um einer fortschreitenden Bodenversauerung entgegenzuwirken. Wälder sollten dahingehend bewirtschaftet werden, dass ein geschlossener Stickstoffkreislauf erreicht und eine Versauerung im Bodensickerwasser vermieden werden kann. Dies ist aber nicht alleine durch Bodenschutzkalkung zu erreichen, da der Wald als komplexes Ökosystem von vielfältigen Faktoren beeinflusst wird, was auch die Bestandskultur, die Art der Hiebsführung und Verjüngungsstrategien mit einbezieht (Sucker et al., 2009).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Maßnahmen 8.51 (Waldumbau) und 8.52 (Bodenschutzkalkungen) in Nordrhein-Westfalen der anthropogenen Versauerung entgegenwirken und die Reduzierung der Versauerung des Grundwassers unterstützen. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist aber aufgrund ihres geringen Flächenumfangs begrenzt. Insbesondere der Waldumbau wurde nur sehr verhalten durch potenzielle Zuwendungsempfänger:innen in Anspruch genommen. Zusammengenommen wurden in NRW 3 % der Waldfläche zwischen 2015 und 2020 durch das Programm gefördert. Die generelle Honorierung der Ökosystemleistungen des Waldes ist eine Zukunftsaufgabe, die in NRW über die Grenzen der ELER-Förderung hinausgeht, da der Blick in die Zukunft immer noch Sorge bereitet und eine Häufung und Verschärfung von Extremwetterlagen wie Hitze und Trockenheit infolge des Klimawandels nicht auszuschließen ist. Aufgrund der aktuellen Epidemie mit hohem Borkenkäferbefallsdruck ist besonders bei der Fichte, auch bei kühl-feuchter Sommerwitterung in den nächsten Jahren, damit zu rechnen, dass es zu weiteren Schäden kommen wird (Bolte et al., 2021).

Literaturverzeichnis

- Asche N (2019) Bodenschutzkalkung in NRW Status und Perspektive. Lichtenau, zu finden in <https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/tests/kalk/dlg_lichtenau_boden_kalk_2019_2.pdf> [zitiert am 17.1.2022]
- Bach M, Knoll L, Kilian J, Breuer L (2021) Nicht-agrarbedingte im Vergleich zu den agrarbedingten Einflussfaktoren auf die Nitratbelastung von Grundwasserkörpern in Hessen. Universitätsbibliothek Gießen, zu finden in <<https://jilupub.ub.uni-giessen.de/handle/jilupub/254>>
- Bathke M, Bergschmidt A, Ebers H, Eberhardt W, Fährmann B, Fengler B, Flint L, Forstner B, Franz K, Grajewski R, Pollermann K, Pufahl A, Raue P, Reiter K, Roggendorf W, Sander A (2020) Feinkonzept zum Bewertungsplan: NRW-Programm Ländlicher Raum 2014 bis 2020. Version 4, Stand 01/2020 (unveröffentlicht). Braunschweig, 214 p
- BKG [Bundesamt für Kartographie und Geodäsie] (2020) Digitale Geodaten, zu finden in <<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten.html>>
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2018) Waldböden in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung, zu finden in <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/WaldboedenBodenzustandserhebung.pdf?__blob=publicationFile&v=4> [zitiert am 2.2.2022]
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2021) Waldstrategie 2050 Nachhaltige Waldbewirtschaftung – Herausforderungen und Chancen für Mensch, Natur und Klima. Bonn: BMEL, zu finden in <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Waldstrategie2050.pdf?__blob=publicationFile&v=9>
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft], BMU [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit] (2020) Nitratbericht 2020: Gemeinsamer Bericht der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie für Ernährung und Landwirtschaft. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), zu finden in <https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/nitratbericht_2020_bf.pdf> [zitiert am 6.10.2020]
- Bolte A, Höhl M, Hennig P, Schad T, Kroiher F, Seitsch B, Englert H, Rosenkranz L (2021) Zukunftsaufgabe Waldanpassung. AFZ Der Wald(76):12-16, zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn063364.pdf>
- Fleck S, Eickenscheidt N, Ahrends B, Evers J, Grüneberg E, Ziche D, Höhle J, Schmitz A, Weis W, Schmidt-Walter P, Andreae H, Wellbrock N (2019) Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils. In: Wellbrock N, Bolte A (eds) Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring, 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing; Springer: pp 123-166, zu finden in <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5>
- Franz K (2019) NRW-Programm Ländlicher Raum 2014 bis 2020: Evaluation der forstlichen Förderung. Braunschweig: Thünen-Institut für Betriebswirtschaft (TI-BW), 5-Länder-Evaluation 2/2019, zu finden in <https://www.eler-evaluierung.de/fileadmin/eler2/Publikationen/Projektberichte/5-Laender-Bewertung/2019/2_19_NRW-Berichte_aus_der_Evaluation-Forst_20190325.pdf> [zitiert am 12.5.2022]
- Grajewski R, Bathke M, Bergschmidt A, Eberhardt W, Ebers H, Fährmann B, Fengler B, Flint L, Forstner B, Franz K, Peter H, Reiter K, Roggendorf W, Sander A, Schnaut G (2018) NRW-Programm Ländlicher Raum 2014 bis 2020 – Analyse der Inanspruchnahme und Umsetzung. Braunschweig: Thünen-Institut für Ländliche Räume (TI-LR); Thünen-Institut für Betriebswirtschaft (TI-BW); Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (TI-WF); entera Umweltplanung & IT, 5-Länder-Evaluation 9/2018, zu finden in <<https://www.eler-evaluierung.de/fileadmin/eler2/Publikationen/Projektberichte/5-Laender-Bewertung/2018/Inanspruchnahme-NRW-endg20181211.pdf>> [zitiert am 12.5.2022]
- Hegg C, Jeisy M, Waldner P (2004) Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie. Birmensdorf, zu finden in <<http://www.wsl.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/6184.pdf>> [zitiert am 2.9.2019]
- Kiese R, Heinzeller C, Werner C, Wochele S, Grote R, Butterbach-Bahl K (2011) Quantification of nitrate leaching from German forest ecosystems by use of a process oriented biogeochemical model. Environ Pollut 159(11):3204-3214. doi: 10.1016/j.envpol.2011.05.004

- Köchli DA (2005) Zur Bedeutung einer multifunktionalen nachhaltigen Waldnutzung in der Region Greifensee: Darstellung und Vergleich von Waldentwicklungs-Szenarien im Schweizer Mittelland, anhand der Fallstudie "Region Greifensee", Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH). Dissertation
- Lachat T, Brang P, Bolliger M, Bollmann K, Brändli U, Bütler R, Herrmann S, Schneider O, Wermelinger B (2019) Totholz im Wald: Entstehung, Bedeutung und Förderung, hg. v. WSL. Merkblatt für die Praxis, zu finden in <<https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:20025/datastream/PDF/view>>
- LFoG NRW: Landesforstgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen, zu finden in <https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_bes_text?anw_nr=2&gld_nr=7&ugl_nr=790&bes_id=3830&aufgehoben=N&menu=1&sg=#det222781> [zitiert am 2.9.2019]
- Meesenburg H, Ahrends B, Fleck S, Wagner M, Fortmann H, Scheler B, Klinck U, Dammann I, Eichhorn J, Mindrup M, Meiwes KJ (2016) Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecological Indicators* 65:103-112. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.12.013
- Mellert KH, Genisor A, Göttlein A, Kölling C (2007) Prädiktoren des Nitrataustrags aus Wäldern – Ergebnisse der bayrischen Nitratinventur im mitteleuropäischen Vergleich. *Forstarchiv* 78:139-149
- MULNV [Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen] (2019) Landeswaldbericht 2019: Bericht über Lage und Entwicklung der Forstwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 163 p
- MULNV [Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen] (ed) (2021) Waldzustandsbericht 2021: Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in Nordrhein-Westfalen, MULNV, MULNV, zu finden in <https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/Waldzustandsbericht_NRW_2021_Langfassung.pdf>
- NW-FVA [Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt] (2013) SILVAQUA – Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, zu finden in <http://webdoc.sub.gwdg.de/univerlag/2013/NWFVA9_SILVAQUA.pdf> [zitiert am 17.9.2013]
- Puhlmann H, Hartmann P, Mahlau L, Wilpert Kv, Huber A, Moos JH, Jansone L, Drews L (2021) Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung in den Wäldern Baden-Württembergs: Evaluierung der Umsetzung und der Wirksamkeit des Kalkungsprogramms in den Jahren 2010 bis 2019, hg. v. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA), zu finden in <https://www.fva-bw.de/fileadmin/user_upload/Abteilungen/Boden_und_Umwelt/Evaluierung_Bodenschutzkalkung.pdf>
- Reise J, Urrutia C, Böttcher H, Hennenberg K (2020) Literaturstudie zum Thema Wasserhaushalt und Forstwirtschaft: Studie für den Naturschutzbund Deutschland (NABU), hg. v. Öko-Institut e.V., zu finden in <<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Wasserhaushalt-Wald-NABU.pdf>>
- WRRRL: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EG-WRRRL)
- Körperschaftswaldrichtlinie: Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung forstlicher Maßnahmen im Körperschaftswald Runderlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz – III – 3 40-00-00.30 vom 17.09.2015
- Privatwaldrichtlinie: Richtlinien über die Gewährung von Zuwendungen zur Förderung forstlicher Maßnahmen im Privatwald Runderlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz – III -3 40-00-00.30 vom 20.7.2015
- Rothe A, Huber C, Kreutzer K, Weis W (2002) Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European Beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil* 240(1):33-45. doi: 10.1023/A:1015846906956
- Rothe A, Mellert KH (2004) Effects of Forest Management on Nitrate Concentrations in Seepage Water of Forests in Southern Bavaria, Germany. *Water, Air, & Soil Pollution* 156(1):337-355. doi: 10.1023/B:WATE.0000036826.17273.b3
- Statistische Berichte NRW (2019) Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen 2016: Teil 1: Wasserversorgung, hg. v. Information und Technik Nordrhein-Westfalen, Statistisches Landesamt, zu finden in <<https://webshop.it.nrw.de/gratis/Q109%20201651.pdf>>

- Striepen K, Jungmann K, Tröltzsch P, Chmela C, Deckert T (2021) Alt- und Totholz-sicherung im Eichenwald: Erstellung und Umsetzung eines Biotopholzkonzeptes für die Villedwälder, hg. v. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Natur in NRW, zu finden in <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/5_natur_in_nrw/NaturinNRW-H3-2021-org.pdf>
- Sucker C, Puhmann H, Zirlewagen D, Wilpert Kv, Feger K-H (2009) Bodenschutzkalkungen in Wäldern zur Verbesserung der Wasserqualität – Vergleichende Untersuchungen auf Einzugsgebietsebene. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung(53):250-262, zu finden in <http://boku.forst.tu-dresden.de/Boden/pdf/HyWa_4_09_Sucker_et_al.pdf> [zitiert am 27.11.2009]
- Sundermann G, Wägner N, Cullmann A, Hirschhausen C von, Kemfert C (2020) Nitratbelastung im Grundwasser überschreitet Grenzwert seit Langem – mehr Transparenz und Kontrolle in der Düngepraxis notwendig
- UBA [Umweltbundesamt] (2017) Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung
- Wilpert Kv, Hartmann P, Puhmann H, Gaertig T, Schäfer J, Thren M (2020) Stabilisierungswirkung von Bodenschutzkalkungen im Klimawandel. AFZ Der Wald(11):72-75