



NW-FVA

Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt ¹

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Aufbau eines flächendeckenden Informationssystems zur Bereitstellung von Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen für den Wald in Niedersachsen (Wuchs-Risiko-NI)

Datum der Veröffentlichung:

31. Dezember 2024

Autoren:

Thorsten Zeppenfeld, Andreas Sommerfeld, Matthias Schmidt

Zuwendungsempfänger:

**Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt,
Abteilung Waldwachstum**

Projektlaufzeit:

01.04.2022 – 31.3.2024

Förderung:

**Durch das Land Niedersachsen im Rahmen des Sondervermögens „Wirtschaftsförderfonds – Ökologischer Bereich“ (Maßnahmenpaket Stadt.Land.Zukunft-SLZ),
Maßnahme: Forschung zur Anpassung klimaresilienter Wälder**



GESELLSCHAFTSVERTRAG
Stadt.Land.Zukunft.

I Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Sondervermögens „Wirtschaftsförderfonds – Ökologischer Bereich (Maßnahmenpaket „Stadt.Land.Zukunft – SLZ“) und hier der Maßnahme „Forschung und Anpassung klimaresilienter Wälder“ wurden im Teilprojekt „Aufbau eines flächendeckenden Informationssystems zur Bereitstellung von Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen für den Wald in Niedersachsen“ (Wuchs-Risiko-NI) Grundlagen für eine verbesserte Bewertung wichtiger Baumarten im Klimawandel erarbeitet. Diese umfangreichen Datengrundlagen sollen ab 2025 für die Trägerländer der NW-FVA in das Entscheidungsunterstützungssystem zur klimaangepassten Baumartenwahl (BaEm) integriert werden. Ein derartiges multikriterielles BaEm kann die Baumartenwahl in optimaler Weise unterstützen, da nur so die Vulnerabilität der Wälder im Klimawandel unter Berücksichtigung der verschiedenen Waldfunktionen bewertet werden kann. Im Projekt Wuchs-Risiko-NI wurden Grundlagen für den Teilbereich einer umfassenden Vulnerabilitätsbewertung und Abschätzung der zukünftigen Wuchsleistung erarbeitet.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) führt regelmäßig Drittmittelprojekte durch und verfügt über alle personellen, technischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung und verwaltungstechnische Abwicklung dieses Projektes.

Für die Bearbeitung der Projektaufgaben wurde während der Laufzeit des Vorhabens für 7 Monate eine Projektstelle mit 75 % Stellenanteilen und für 17 Monate eine Projektstelle mit 25 % Stellenanteilen eingerichtet. Es erfolgte eine deutliche Reduktion der Personalmittel gegenüber der ursprünglichen Projektplanung, da das ursprünglich eingeplante wissenschaftliche Personal ab 01.11.2022 schwerpunktmäßig in einem alternativen Projekt mit längerer Laufzeit gebunden war. Die komplexen Modellprojektionen konnten zu großen Anteilen fachlich nur durch den ursprünglich eingeplanten Wissenschaftler durchgeführt werden. Für den Mitarbeiter wurde an der NW-FVA die notwendige Infrastruktur (Arbeitsplatz, Computer, Telefon) bereitgestellt. Weiterhin konnte der Mitarbeiter uneingeschränkt auf die umfangreichen Datengrundlagen der NW-FVA zugreifen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die angepasste Projektlaufzeit umfasste den Zeitraum vom 01.04.2022 bis zum 31.03.2024.

Tabelle 1: Angepasster Projektablauf nach einzelnen Arbeitsschwerpunkten

Tätigkeiten	2022			2023			2024		
Regionalisierungen der Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit und der Jahres-Stickstoff-Deposition									
Projektion der Wuchsleistung									
Projektion des Sturmschadensrisikos									
Risikoprojektionen für Kalamitätsholz durch Borkenkäfer für Fichte									
Projektionen der Evapotranspiration in der Vegetationszeit									
Abschlussbericht									

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die erarbeiteten umfangreichen Datengrundlagen wurden an das Niedersächsische Forstplanungsamt geliefert. Für eine einfachere technische Handhabung wurden die Ergebnisse der 7 Ensembleprojektionen zu Mittelwerten aggregiert.

5. Veröffentlichungen und Vorträge

Die wissenschaftlichen Grundlagen für die flächendeckenden Projektionen für die Waldfläche Niedersachsens sind in anderen Projekten oder auf Planstellen erarbeitet worden, sodass hier keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen aufgeführt werden. Die Veröffentlichungen zu diesen wissenschaftlichen Grundlagen sind in der umfassenden Darstellung des Projektes bzw. in der Literaturliste aufgeführt.

II Umfassende Darstellung

1. Begründung der Notwendigkeit des Projektes

Im Rahmen des Sondervermögens „Wirtschaftsförderfonds – Ökologischer Bereich (Maßnahmenpaket „Stadt.Land.Zukunft – SLZ“) und hier der Maßnahme „Forschung und Anpassung klimaresilienter Wälder“ wurden im Teilprojekt „Aufbau eines flächendeckenden Informationssystems zur Bereitstellung von Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen für den Wald in Niedersachsen“ (Wuchs-Risiko-NI) Grundlagen für eine verbesserte Bewertung wichtiger Baumarten im Klimawandel erarbeitet. Diese umfangreichen Datengrundlagen sollen ab 2025 für die Trägerländer der NW-FVA in das Entscheidungsunterstützungssystem zur klimaangepassten Baumartenwahl (BaEm) integriert werden. Ein derartiges multikriterielles BaEm kann die Baumartenwahl in optimaler Weise unterstützen, da nur so die Vulnerabilität der Wälder im Klimawandel unter Berücksichtigung der verschiedenen Waldfunktionen bewertet werden kann. Im Projekt Wuchs-Risiko-NI wurden Grundlagen für den Teilbereich einer umfassenden Vulnerabilitätsbewertung und Abschätzung der zukünftigen Wuchsleistung erarbeitet.

1.1 Ausgangslage

Das derzeitige in Niedersachsen eingesetzte BaEm berücksichtigt die Standortwasserbilanz (SWB) zur Abschätzung des Geländewasserhaushaltes und die Trophie zur Abschätzung der Nährstoffversorgung eines Standortes. Die SWB ist die Summe aus Klimatischer Wasserbilanz (KWB) und nutzbarer Feldkapazität (nFK), die KWB ist die Differenz aus Niederschlag und Evapotranspiration. Mit Hilfe der SWB lassen sich Wasserdefizit bzw. -überschuss eines Standortes für beliebige Bilanzierungszeiträume einschätzen. Aktuell wird die SWB jahresspezifisch für eine dynamisch hergeleitete Vegetationszeit (Nuske 2017) bilanziert und anschließend der Mittelwert eines 30-jährigen Zeitraumes bestimmt. Auf der Grundlage von Expertenwissen wurden baumartenspezifische Grenzwerte für die SWB definiert, so dass eine baumarten-spezifische Einschätzung der allgemeinen Trockenstressgefährdung möglich ist (Spellmann et al. 2015). Die zurückliegende Trockenstressgefährdung eines Standortes kann auf der Basis rezenter Klimadaten eingeschätzt werden. Für die Einschätzung der zukünftigen Gefährdung wird die SWB auf der Grundlage von modellierten Klimaprojektionen berechnet.

Die SWB hat sich als relativ einfach herzuleitende Größe bei der Abschätzung der Baumarteneignung grundsätzlich bewährt. Allerdings weist der Ansatz des aktuellen BaEm auch Schwachstellen auf, so dass das System derzeit umfassend überarbeitet wird. Die folgenden

Bereiche sind identifiziert worden: I) die baumartenspezifischen Grenzwerte der SWB, da diese auf Expertenwissen basieren und keine Datengrundlagen für eine statistische Herleitung verwendet wurden. Die geplante Verbesserung des BaEm beinhaltet daher eine Überarbeitung der Grenzwerte der SWB auf der Grundlage von Artverbreitungskarten II) die aktuell in Niedersachsen umgesetzte Version des BaEm basiert auch noch auf einem einzigen veralteten Klimalauf während beispielsweise in Schleswig-Holstein ein Ensembleansatz auf der Grundlage des ReKliEsDE-Kernensembles (Hübener et al. 2017) implementiert ist. Alle notwendigen Grundlagendaten wurden daher in Wuchs-Risiko-NI 7-fach auf Basis der 7 Klimäläufe des ReKliEsDE-Kernensembles projiziert, um auch für Niedersachsen mittelfristig einen Ensembleansatz umsetzen zu können III) eine weitere grundsätzliche Problematik ergibt sich daraus, die Vulnerabilität nur auf Basis eines einzigen Parameters (SWB) zu beschreiben. Diese sehr starke Abstraktion führt zu einer nicht optimal differenzierten Bewertung, da verschiedene Risikofaktoren subsummiert werden. Soll zusätzlich auch die Wuchsleistung oder Kohlenstoffsenkenleistung berücksichtigt werden, ist die Trennung der verschiedenen Effekte auf die Baumarteneignung und eine objektive Nachvollziehbarkeit in der derzeitigen Version des BaEm nicht möglich. Aktuell wird deshalb der Ansatz eines multikriteriellen BaEm konzipiert und entwickelt. Die SWB als Grundlage für eine Trockenstresseinschätzung in Kombination mit überarbeiteten baumartenspezifischen Grenzwerten zur Bewertung der Trockenheitstoleranz der Baumarten wird aber auch weiterhin eine wichtige Komponente im multikriteriellen BaEm bleiben. Die für die Umsetzung notwendigen Grundlagendaten, die im Rahmen von Wuchs-Risiko-NI erzeugt wurden, wurden auch dem Niedersächsische Forstplanungsamt (NFP) in einer vereinfachten Version zur Verfügung gestellt, um sie schon vor der Fertigstellung des multikriteriellen BaEm als Entscheidungsgrundlagen im Sinne einer "Brückentechnologie" verfügbar zu machen.

2. Methoden

Im Folgenden werden die Modell- und Datengrundlagen, die für die Risiko- und Wuchsleistungsprojektion verwendet wurden, in vereinfachter Form vorgestellt. Deutlich differenziertere Beschreibungen finden sich in den zitierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen.

2.1 Projektion der Wuchsleistung

Die zukünftige Wuchsleistung wurde für das Bezugsjahr 2050 (Bestandesbegründung 1950) durch eine Prognose der Mittelhöhenbonität im Alter 100 (Hg100) und darauf aufbauend der

Leistungsklasse (dGZmax) für die 7 Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Weißtanne, Douglasie, Kiefer und Europäische Lärche in einer räumlichen Auflösung von 50x50 m für die Waldfläche Niedersachsens projiziert. Dazu wurde ein klimasensitives Standort-Leistungs-Modell (Schick et al. 2023, Schmidt 2020) mit Daten der forstlichen Standortkartierung (Wasserhaushaltsziffer, Nährstoffversorgung), rezenten Klimadaten des DWD und Klimadaten zukünftiger Projektionen des ReKliEsDE-Kernensembles (Emissionsszenario RCP 8.5, Hübener et al. 2017) initialisiert. Ein weiterer Modellparameter ist die atmosphärische Stickstoffdeposition, die einen deutlichen Effekt auf die Wuchsleistung hat. Die Stickstoffdeposition wurde aus Daten des Umweltbundesamtes (Schaap et al. 2018) bzw. darauf aufbauenden Zeitreihenanalysen (Alveteg et al. 1998, Tarrasón und Nyíri 2008, Höhle et al. 2016) abgeleitet. Ab dem Jahr 2023 wurden 7 Klimäläufe aus dem ReKliEs-DE-Kernensemble zur Initialisierung des Standort-Leistungs-Modells verwendet, die Parameter Hg100 und dGZmax geschätzt und anschließend gemittelt. Der dGZmax wurde dabei anhand der Übergangstabellen der Schober'schen Ertragstafelsammlung (Schober 1995) aus der Hg100 berechnet. Zusätzlich wurden die Hg100 und der dGZmax auch für das Jahr 2000 geschätzt, um eine rezente Referenz zur Projektion des Jahres 2050 abzuleiten. Die gemittelten Wuchsleistungsparameter wurden dem NFP für die Waldfläche Niedersachsens als Rasterdaten in 50x50 m Auflösung zur Verfügung gestellt. Die Mittelwerte bedeuten gegenüber dem zukünftig angestrebten Ensembleansatz einen Informationsverlust, sie lassen sich allerdings technisch deutlich einfacher innerhalb eines BaEm umsetzen. Anhand eines Transektes durch Niedersachsen werden die Projektionen der Hg100 und des dGZmax exemplarisch für Buche, Fichte und Douglasie und für die beiden Zeitpunkte 2000 und 2050 unter verschiedenen Standortbedingungen verglichen (Abb. 1). Es wird deutlich, dass sich die Bonitäten für alle 3 Baumarten ausschließlich verbessern, wobei die Verbesserungen von Douglasie deutlicher sind als die von Buche und Fichte. Allerdings zeigen bspw. Projektionen für das Jahr 2100, dass sich die Bonitäten von Fichte und Buche in weiten Bereichen des Transektes und insbesondere im Tiefland verschlechtern werden (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, & Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2021, S. 36 ff).

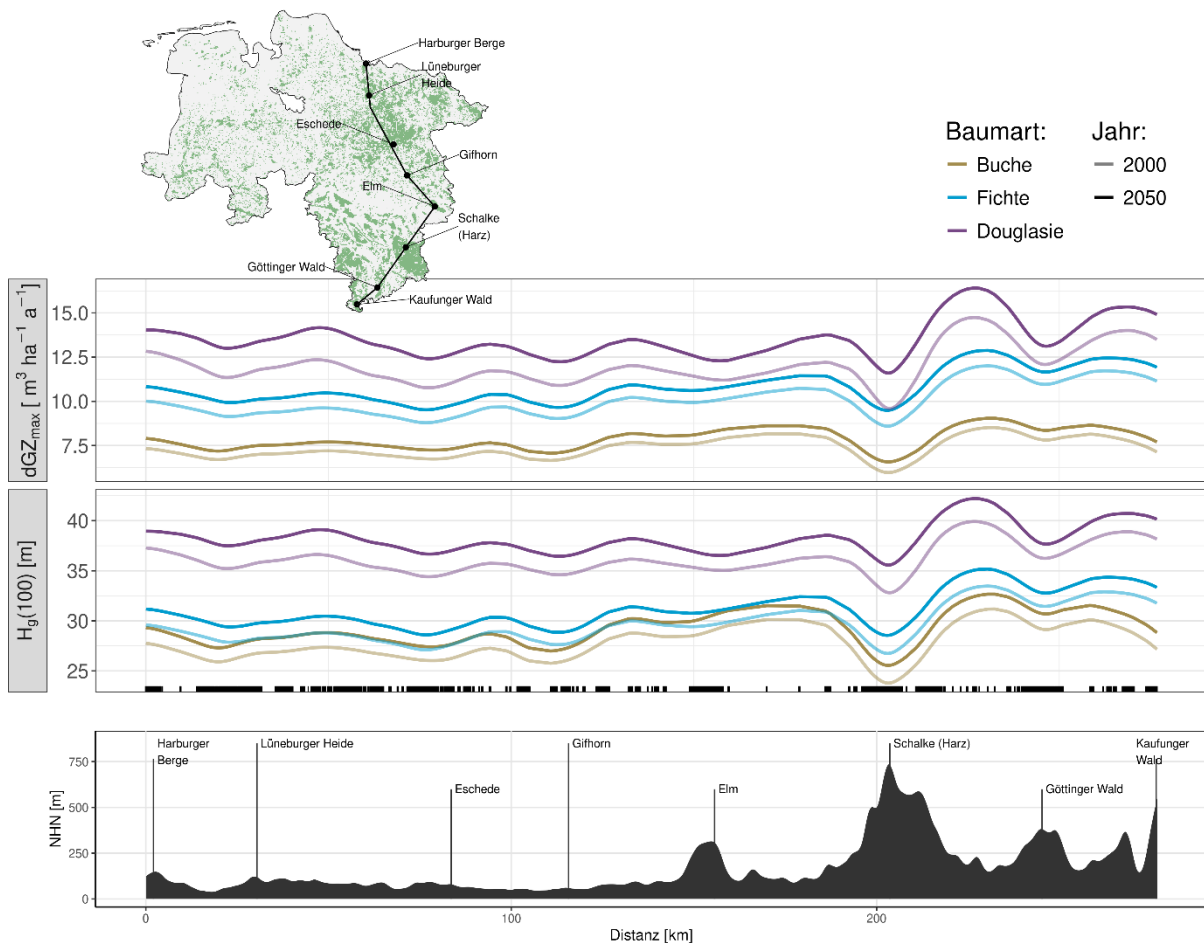


Abbildung 1: Leistungsprojektionen entlang eines Transektes durch Niedersachsen. Dargestellt sind Leistungsklasse (dGZ_{max}) und Mittelhöhenbonität ($H_g(100)$) für die Baumarten Buche, Fichte und Douglasie in den Jahren 2000 und 2050. Die Leistungsprojektionen aus sieben Klimäläufen des ReKliEsDE-Kernensembles wurden gemittelt.

2.2 Projektion des Sturmschadensrisikos

Das Sturmschadensrisiko wurde mit Hilfe eines statistischen Modells (Zeppenfeld et al. 2023) projiziert. Das Modell berücksichtigt Parameter zur Charakterisierung von Bestockung, Boden, Topographie sowie die maximale Böengeschwindigkeit als direkte Schadursache. Das Risiko für einen Sturmschaden wurde für simulierte Fichtenreinbestände, die im Jahr 1950 begründet wurden, bei einer Zielstärke (ZST) von 45 cm in einer räumlichen Auflösung von 50x50 m für die Waldfläche Niedersachsens projiziert. Das Sturmschadensrisiko wurde für Fichte projiziert, da diese das höchste Risiko aller Baumarten aufweist und sich die Standorte so besonders fein differenzieren lassen. Das Sturmschadensrisiko wurde zusätzlich für Douglasie bei einer ZST von

70 cm und für Buche bei einer ZST von 60 cm projiziert. Grundsätzlich kann das Sturmschadensrisiko aber für weitere Baumarten-Zielstärken-Kombinationen projiziert werden. Die Wachstumssimulation zur Ableitung der Bestockungsparameter erfolgte mit dem klimasensitiven Standort-Leistungs-Modell (s. 2.1). Als Bestockungsparameter gehen der Grundflächenmittelstamm (D_g) und die zugehörige Mittelhöhe (H_g) zu dem Zeitpunkt in das Sturmschadensmodell ein, bei dem 10% der Stämme im Bestand mindestens die ZST von 45 cm erreicht haben. Dazu wurden mit dem Standort-Leistungs-Modell Wachstumsverläufe von D_g und H_g auf jeder Rasterzelle berechnet. Die Verläufe beinhalten Schätzungen in 10-jährigen Abständen von Bestandesalter 30 bis 130 (Buche 150), was dem Zeitraum 1980-2080 entspricht. Auf Basis der D_g - und H_g -Werte wurde für jeden 10-Jahreszeitpunkt die zugehörige Durchmesserverteilung mittels einer baumartenspezifischen Weibull-Verteilung (Nagel & Biging 1995) bestimmt. Aus dieser Verteilung wurde dann das 90%-Quantil selektiert. Dieses Quantil entspricht dem Durchmesser, der von den 10% stärksten Stämmen im Bestand erreicht oder übertroffen wird. Die 10-Jahres Schritte dieser Quantile wurden linear interpoliert und das Jahr ermittelt, in dem die definierte Zielstärke von 45 cm erreicht worden ist. Für diesen Zeitpunkt wurden anschließend der D_g und die H_g ebenfalls mittels linearer Interpolation aus den Projektionen berechnet. Diese klimasensitiven Bestandesgrößen wurden für jeden der 7 Klimäläufe des ReKliEs-DE-Kernensembles berechnet und im Sturmschadensmodell als Eingangsgröße verwendet. Der durchwurzelbare Bodenraum wurde aus der Wasserhaushaltsziffer der forstlichen Standortkartierung abgeleitet. Dazu wurden die niedersächsischen Kartiereinheiten vier modellspezifischen Kategorien zugeordnet: "terrestrisch", "flachgründig terrestrisch", "stauwasserbeeinflusst" und "grundwasserbeeinflusst". Für die Standorte der Kategorien: "flachgründig" und "stauwasserbeeinflusst" wird unter sonst gleichen Nebenbedingungen das höchste Sturmschadensrisiko projiziert. Die Exponiertheit eines Standortes wurde mittels einer Variante des Topographischen Index to Distance (ToptoDis) beschrieben. Beim ToptoDis wird für eine bestimmte Himmelsrichtungen und eine definierte Maximaldistanz der Winkel zwischen der Horizontalen und einer gedachten Linie zum Horizont bestimmt. Befindet sich der Horizont weiter entfernt als die definierte Maximaldistanz wird stattdessen die Linie zwischen dem Standpunkt und dem Punkt bei Maximaldistanz verwendet. Es wurde eine Maximaldistanz von 1000 m verwendet, die in der Modellselektion als beste Variante verschiedener geprüfter Distanzen identifiziert wurde (Schmidt et al. 2010). Grundlage der Berechnung war ein Digitales Geländemodell (DGM) mit 50 m Auflösung. Negative Winkel kennzeichnen exponierte und positive Werte geschützte Standorte. Bei der im Sturmschadensmodell verwendeten Variante (Zeppenfeld et al. 2023) werden drei Paare von

ToptoDis verwendet, wobei je 2 Einzelwerte addiert werden. Es sind dies die ToptoDis die a) einen Winkel von 30 Grad aufspannen, der der Windrichtung des Sturms zugewandt ist (luv), b) die einen Winkel von 30 Grad aufspannen, der der Windrichtung abgewandt ist (lee) und c) die einen Winkel von 90 Grad zur Hauptwindrichtung des Sturms aufspannen. Mit Hilfe dieser ToptoDis lassen sich unterschiedlichste Geländeformen bzgl. ihrer Sturmschadensgefährdung und z.B. Düseneffekte einschätzen. Das Sturmschadensrisiko wird für die zwei potentiellen Windrichtungen West und Süd-West projiziert. Als direkter Schadfaktor wird die maximale Böengeschwindigkeit im Modell berücksichtigt. Hier wurde eine räumlich hoch-aufgelöste Projektion des 30-jährigen Mittels der Jahre 2070-2100 im RCP 8.5 Emissionsszenario des EURO-CORDEX Ensembles als Eingangsparameter (Jung & Schindler 2021) verwendet. Die Werte entsprechen einem Sturmereignis mit einer 20-jährigen Wiederkehrwahrscheinlichkeit.

Insgesamt wurde auf dem Raster der Waldfläche Niedersachsens für jedes Dg-Hg-Paar bei ZST, jeden der 7 Klimäläufe des ReKliEs-De und für jede der beiden Sturmwindrichtungen eine Sturmschadenswahrscheinlichkeit berechnet. Die Projektionen der 7 Klimäläufe wurden für eine vereinfachte Verwendung durch das NFP je Windrichtung gemittelt. Abschließend wurden die windrichtungsspezifischen Wahrscheinlichkeiten nach den Gesetzen der Kombinatorik zu einem Wert aggregiert ($P(W/SW) = P(W) + P(SW) - (P(W) \cdot P(SW))$). Dabei sind $P(W)$ und $P(SW)$ die Mittelwerte der Sturmschadenswahrscheinlichkeit für die Windrichtungen West bzw. Südwest und $P(W/SW)$ ist ihre gemeinsame Sturmschadenswahrscheinlichkeit unter der Annahme das beide Windrichtungen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Die Sturmschadenswahrscheinlichkeit beschreibt das Schadausmaß für einen Fichtenbestand mit dem Begründungsjahr 1950 zum Zeitpunkt des Erreichens der ZST von 45 cm unter Berücksichtigung seiner spezifischen topographischen Exponiertheit und Bodenverhältnisse bei einem Sturmereignis mit 20-jährigem Wiederkehrintervall. Zusätzlich wurden die Sturmschadensrisiken nach der beschriebenen Methodik auch für Buche bei 60 cm ZST und für Douglasie bei 70 cm ZST für 1950 begründete Bestände projiziert. Die gemittelten Sturmschadenswahrscheinlichkeiten für Fichte wurden dem NFP für die Waldfläche Niedersachsens als Rasterdaten in 50x50 m Auflösung zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Projektionen für Buche und Douglasie können bei Bedarf nachgeliefert werden. Anhand der Projektion des Sturmschadensrisikos für den Niedersächsischen Harz wird vor allem der Effekt der Topographie deutlich (Abb. 2).

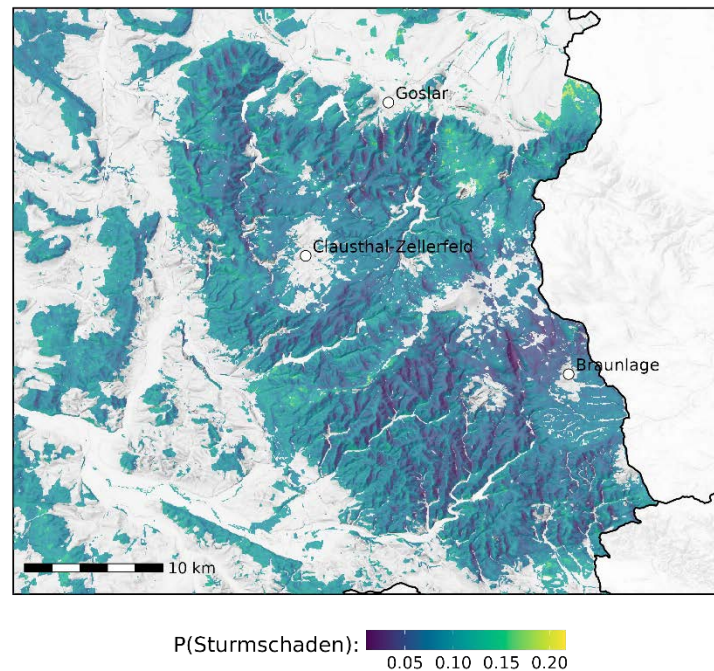


Abbildung 2: Sturmschadensprojektionen für den Niedersächsischen Harz und das Harzvorland für potentielle, 1950 begründete Fichtenbestände bei Erreichen einer Zielstärke von 45 cm.

2.3 Risikoprojektionen für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer für Fichte

Auf der Grundlage von Holzeinschlags-, Forsteinrichtungs-, Standorts- und Witterungsdaten in jährlicher Auflösung wurde an der NW-FVA ein Modell zur Abschätzung des Risikos für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer (RKB) an Fichte entwickelt. Der Modellansatz ist eine Weiterentwicklung des Modells von Overbeck und Schmidt (2010). Deutliche Verbesserungen wurden durch die Umstellung von einer 10-jährigen auf eine 1-jährige Risikobetrachtung und die räumliche Erweiterung der Datenbasis vom Niedersächsischen Berglandbereich auf den gesamten Berglandbereich der Trägerländer der NW-FVA erreicht. Die jährliche Auflösung ermöglicht es, in der Modellierung Witterungseffekte abzubilden und damit die Modellsensitivität stark zu erhöhen. Allerdings sind in der Modellbildung, die auch die Grundlage für die Projektionen in Wuchs-Risiko-NI sind, nur die Jahre bis 2017 berücksichtigt. Derzeit wird das Modell umfassend überarbeitet, um zusätzlich Daten der Extremjahre 2018 und 2019 zu berücksichtigen. Die Extremjahre ab 2020 werden nicht verwendet, da unter den Bedingungen der vorschreitenden säkularen Kalamitätsentwicklung keine geordnete Forstwirtschaft mit der für die Modellbildung unabdingbaren bestandesscharfen sowie zeitnahen

Aufarbeitung und Holzverbuchung mehr möglich war. Das RKB beschreibt den Anteil von Kalamitätsnutzungen an den Gesamtnutzungen. Kalamitätsholz tritt hier definitionsgemäß dann auf, wenn mindestens 1% des Jahreseinschlags als Kalamitätsholz aufgrund von biotischen Schäden verbucht wurde. In der Datenbasis treten ganz überwiegend reine Kalamitätsnutzungen oder reine reguläre Nutzungen bzw. Kalamitätsholzanteile von 100 bzw. 0% auf, d.h. dass in einem Bestand nur selten sowohl Kalamitätsholz als auch reguläre Nutzungen innerhalb eines Jahres auftreten. Das projizierte RKB wird durch die Bestandesparameter Fichtenmischungsanteil und Grundflächenmittelstamm der Fichte im Hauptbestand, den Fichtenmischungsanteil im Hauptbestand innerhalb einer Umgebung von 500 m sowie die Witterungsparameter Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit im Jahr und im Vorjahr der Einschlagsverbuchung bestimmt. Weitere Parameter sind das Auftreten von Sturm- bzw. Borkenkäferschäden im Vorjahr der Holzverbuchung und die nutzbare Feldkapazität (nFK). Um Unterschiede in der Bewirtschaftung berücksichtigen zu können, über die keine Informationen vorliegen, wurde das Modell als sogenanntes gemischtes Modell mit Zufallseffekten auf Revierebene parametrisiert. Zur Erfassung der auftretenden großräumigen Autokorrelation wurde zusätzlich ein räumlicher Glättungsterm im Modell integriert. Die stärksten Effekte auf das RKB haben die Witterungsparameter während die Effekte der Bestandesparameter und der nFK deutlich schwächer sind. Vorschädigungen im Vorjahr durch Stürme erhöhen das RKB moderat und durch Borkenkäfer deutlich. Somit kommt der Wahl geeigneter Standorte für den Fichtenanbau eine überragende Bedeutung zu, da das RKB durch waldbauliche Maßnahmen wie die Absenkung des Dg oder die Reduktion des Fichtenanteils nur in begrenztem Umfang reduziert werden kann.

Das RKB wurde für 1950 begründete Fichtenbestände und für unterschiedliche Fichtenanteile im Bestand für den Zeitraum zwischen Alter 30 und dem Erreichen einer ZST von 45 cm projiziert. Die Herleitung des Zeitpunktes der ZST ist in Kapitel 2.2 beschrieben. Das RKB wurde dabei für den betrachteten Zeitraum in 1-Jahresschritten geschätzt, wobei ab dem Jahr 2023 die 7 Klimäläufe aus dem ReKliEs-DE-Kernensemble (Hübener et al. 2017) zur Initialisierung verwendet wurden. Die jährlichen RKB wurden anschließend über den Zeitraum bis zum Erreichen der ZST gemittelt. Für eine leichtere technische Handhabbarkeit wurden die 7 Projektionen auf Grundlage der Klimäläufe abschließend nochmals gemittelt. Die Werte des Risikos für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer (RKB) an Fichte wurden dem NFP für die Waldfläche Niedersachsens als Rasterdaten in 50x50 m Auflösung zur Verfügung gestellt. Anhand der Projektion des Risikos für das Auftreten von Kalamitätsholz durch

Borkenkäfer für den Niedersächsischen Harz wird der Effekt der Höhenlage deutlich (Abb. 3). Mit steigender Höhenlage nehmen die Temperatursummen ab und die Niederschlagssummen zu, was beides zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer führt. Allerdings kann es auch einen gegenläufigen Trend geben, wenn sehr ungünstige Standortbedingungen dazu führen, dass die ZST erst zu einem späteren Zeitpunkt erreicht wird, zu dem der Klimawandel schon deutlich weiter fortgeschritten ist.

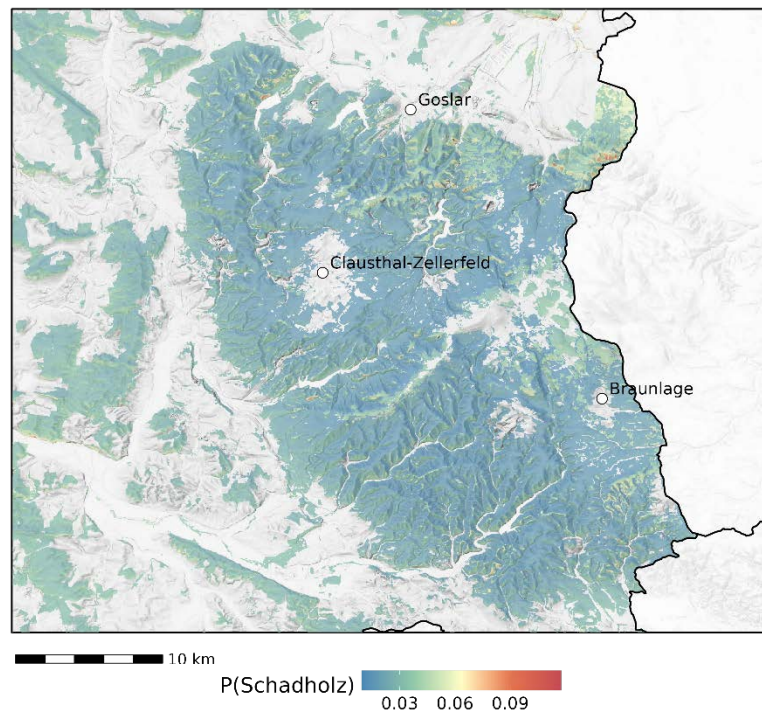


Abbildung 3: Projektionen für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer für potentielle, 1950 begründete Fichtenreinbestände bei Erreichen einer Zielstärke von 45 cm.

2.4 Projektionen der Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit sowie der Jahresstickstoffdeposition

Grundlage der Projektionen der Wuchsleistung und der Risiken durch Winterstürme und Fichtenborkenkäfer sind u.a Temperatur- und Niederschlagssummen in der Vegetationszeit sowie die Jahresstickstoffdeposition. Witterungsparameter wurden an der NW-FVA bisher durch die Abteilung Umweltkontrolle in täglicher Auflösung regionalisiert und anschließend für die Vegetationszeit aufsummiert. Diese Vorgehensweise ist sehr rechenaufwendig, so dass im Sachgebiet Wachstums- und Risikomodellierung in Zusammenarbeit mit der Abteilung

Umweltkontrolle eine alternative Methode entwickelt worden ist, um die klimatischen Grundlagen für die Wuchsleistungs- und Risikomodellierungen mit sehr viel geringerem Rechenaufwand flächendeckend in 50x50 m Auflösung direkt zu regionalisieren. Der Ansatz bietet auch die Möglichkeit, Werte bereits ab 1900 mit allerdings geringerer Projektionsgüte zu schätzen, was mit den bisherigen Ansätzen nicht möglich war. Die Projektion ab 1900 war aber die Voraussetzung für die Entwicklung der Standort-Leistungs-Modelle und damit auch für die Anwendung der Risikomodelle, da letztere Hg bzw. Dg-Werte als Eingangsparameter benötigen (s. 2.2 u. 2.3). Die Klimaparameter wurden für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m räumlicher und in 1-jähriger zeitlicher Auflösung ab 1900 regionalisiert, wobei ab 2023 jeweils 7 Werte auf der Grundlage des ReKliEs-DE-Kernensembles (Hübener et al. 2017) projiziert wurden. Die Projektionen gelten für ebene Lagen, so dass die Temperatursumme zur Berücksichtigung des Effektes der Globalstrahlung abschließend modellbasiert in Abhängigkeit von der Exposition und Hangneigung korrigiert wurde. Für die Regionalisierung der Jahresstickstoffdeposition wurden ähnliche Modellansätze wie für die Regionalisierung der Klimaparameter entwickelt. Die Klima- bzw. Depositionsparameter sind in Wuchs-Risiko-NI als Hilfsgrößen für die Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen zu sehen. Die Werte könnten dem NFP bei Bedarf aber in der beschriebenen räumlichen und zeitlichen Auflösung zur Verfügung gestellt werden.

2.5 Projektionen der Evapotranspiration in der Vegetationszeit

Die Modellkonzeption, die für die Regionalisierung der Klimaparameter entwickelt wurde, wurde im Rahmen von Wuchs-Risiko-NI auf die Projektion der Evapotranspiration in der Vegetationszeit ausgedehnt, wobei auch hier eine Strahlungskorrektur erfolgt. In Kombination mit den Projektionen der Niederschlagssumme (s. 2.4) lässt sich die klimatische Wasserbilanz (KWB) somit auch über den modelltechnisch effektiveren Ansatz regionalisieren. Bei Vorliegen einer forstlichen Standortkartierung bzw. der auf ihrer Grundlage abgeleiteten nFK kann abschließend die Standortwasserbilanz in der Vegetationszeit (SWB) in jährlicher Auflösung berechnet werden. Im Rahmen von Wuchs-Risiko-NI konnte die Evapotranspiration aus Gründen mangelnder Arbeitskapazitäten bisher nur für den Zeitraum 1952-2022 regionalisiert werden. Die Regionalisierung auf der Grundlage der 7 Klimaläufe aus dem ReKliEs-DE-Kernensemble (Hübener et al. 2017) soll kostenneutral in 2025 erfolgen.

Eine über die Regionalisierung von Tageswerten abgeleitete SWB liegt bereits flächendeckend für die 7 Klimaläufe aus dem ReKliEs-DE-Kernensemble für die standortskartierte Waldfläche

Niedersachsens in 50x50 m Auflösung als Mittelwert der Klimanormalperioden 1961-1990, 1991-2020 und 2041-2070 vor. Abschließend soll daher ein Vergleich zwischen den in Wuchs-Risiko-NI erarbeiteten Projektionen und dem bisher verwendeten Verfahren erfolgen. In diesem Zusammenhang soll auch eine alternative Verwendung der Werte aus Extremjahren anstelle 30-jähriger Mittelwerte von Klimanormalperioden geprüft werden.

3. Ergebnisse

Die innerhalb von Wuchs-Risiko-NI erarbeiteten Datengrundlagen umfassen:

1. Wuchsleistungsprojektionen für Buche, Eiche, Fichte, Kiefer, Weißtanne, Europäische Lärche, Douglasie für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m Auflösung für die Zeitpunkte 2000 und 2050, wobei ab 2023 Werte der 7 Klimäläufe des ReKliEs-De-Kernensembles des Emissionsszenarios RCP 8.5 zur Modellinitialisierung verwendet wurden. Für das Niedersächsische Forstplanungsamt wurde für eine leichtere technische Handhabbarkeit nur der Mittelwert der 7 Klimäläufe bereitgestellt.
2. Projektionen des Sturmschadensrisikos für Fichte, Buche und Douglasie bei Zielstärke (ZST). Für Fichte wurde eine ZST von 45 cm, für Buche von 60 cm und für Douglasie von 70 cm unterstellt. Die Projektionen für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m räumlicher Auflösung gelten für potentielle Bestände die 1950 begründet wurden, wobei ab 2023 Daten der 7 Klimäläufe des ReKliEs-De-Kernensembles zur Modellinitialisierung verwendet wurden. Für das Niedersächsische Forstplanungsamt wurde aktuell nur das Sturmschadensrisiko der Fichte und für eine leichtere technische Handhabbarkeit nur der Mittelwert der 7 Klimäläufe bereitgestellt. Bei Bedarf können die entsprechenden Projektionen für Buche und Douglasie nachgeliefert werden.
3. Risikoprojektionen für Kalamitätsholz durch Borkenkäfer für Fichtenbestände mit variierenden Fichtenanteilen, die 1950 begründet wurden, für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m Auflösung, wobei ab 2023 Daten der 7 Klimäläufe des ReKliEs-De-Kernensembles zur Modellinitialisierung verwendet wurden. Für das Niedersächsische Forstplanungsamt wurde für eine leichtere technische Handhabbarkeit nur der Mittelwert der 7 Klimäläufe bereitgestellt.
4. Regionalisierungen der Temperatur- und Niederschlagssumme in der Vegetationszeit und der Jahres-Stickstoff-Deposition für den Zeitraum 1900-2022 und auf der Grundlage von Klimaprojektionen bis 2100 (ReKliEs-De-Kernensemble) für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m räumlicher Auflösung und 1-jähriger zeitlicher Auflösung. Die regionalisierten

Klimaparameter, die als Eingangsdaten für die Anwendung der Wuchsleistungs- und Risikomodelle benötigt werden, können dem Niedersächsischen Forstplanungsamt bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden.

5. Regionalisierungen der Evapotranspiration und der Klimatischen Wasserbilanz für den Zeitraum 1952-2022 für die Waldfläche Niedersachsens in 50x50 m räumlicher Auflösung und 1-jähriger zeitlicher Auflösung als Grundlage für baumarten-spezifische Trockenstress-einschätzungen. Entsprechende Regionalisierungen der Klimaprojektionen bis 2100 (ReKliEs-De-Kernensemble) werden erst 2025 nach Projektabschluss kostenneutral erarbeitet. Die projizierten Trockenstressweiser können dem Niedersächsischen Forstplanungsamt bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden.

4. Umsetzung im betrieblichen WebGIS der Niedersächsischen Landesforsten (NLF)

Im betrieblichen WebGIS der NLF ist derzeit ein auf einem einzigen veralteten Klimalauf basierendes Entscheidungsunterstützungssystem zur Baumartenwahl im Klimawandel (BaEm) umgesetzt. Die zugrundeliegende Methodik wurde als erste Version eines BaEm an der NW-FVA für Niedersachsen erarbeitet. Die Implementierung eines BaEm erfolgte in Schleswig-Holstein als letztem der Trägerländer. Somit konnte hier der methodische Fortschritt mit der Umstellung auf einen Ensembleansatz berücksichtigt und implementiert werden.

Die umfassenden Datengrundlagen, die in Wuchs-Risiko-NI für die Waldfläche Niedersachsens erarbeitet wurden, sollen ab 2025 in einem umfassend erweiterten multikriteriellen BaEm als Informationsbasis genutzt werden. Die Datengrundlagen beinhalteten die beschriebenen Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen und alternative Regionalisierungen der Evapotranspiration und der Klimatischen Wasserbilanz, letztere liegen in jährlicher Auflösung und damit auch für Extremjahre vor. Um die Datengrundlagen bis zum Vorliegen des multikriteriellen BaEm zumindest in stark vereinfachter Form nutzen zu können, wurden diese an das Niedersächsische Forstplanungsamt geliefert. Aktuell ist die Projektion des Sturmschadensrisikos der Fichte bei einer ZST von 45 cm in einer digitale Karte zur Unterstützung der Baumartenempfehlung umgesetzt worden (Abb. 4).

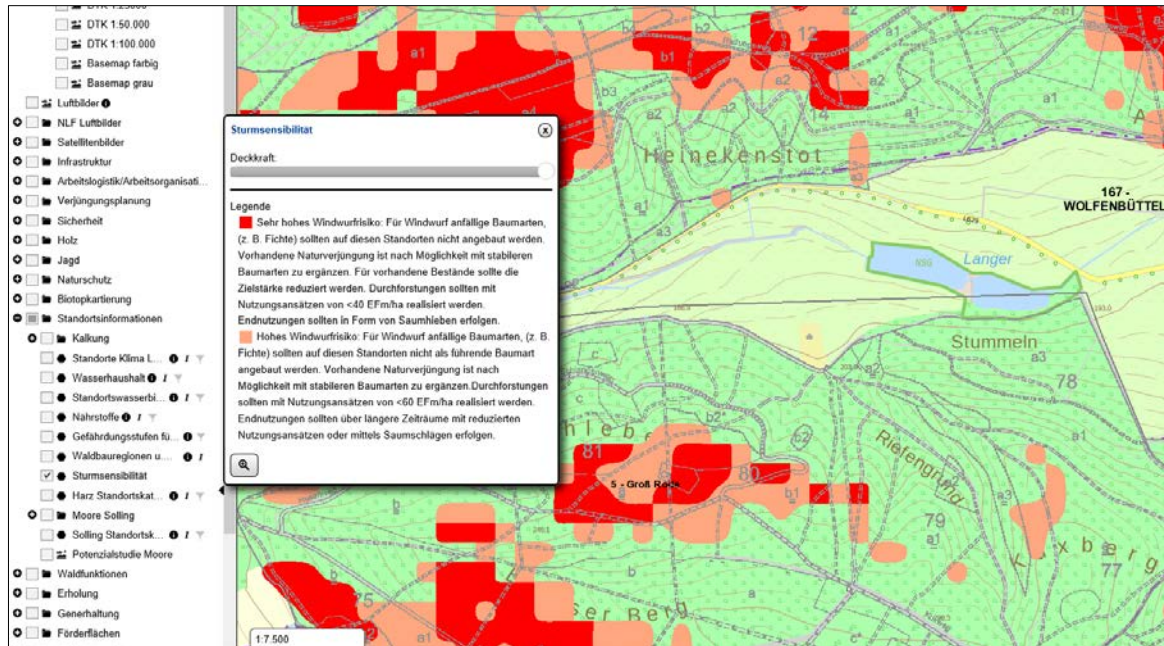


Abbildung 4: Karte im WebGIS der NLF zur Darstellung von Klassen des Sturmschadensrisikos und vereinfachte Ableitung von Einschränkung der Anbauempfehlungen für sturmanfällige Baumarten.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen des Sondervermögens „Wirtschaftsförderfonds – Ökologischer Bereich (Maßnahmenpaket „Stadt.Land.Zukunft – SLZ“) und hier der Maßnahme „Forschung und Anpassung klimaresilienter Wälder“ wurden im Teilprojekt „Aufbau eines flächendeckenden Informationssystems zur Bereitstellung von Wuchsleistungs- und Risikoprojektionen für den Wald in Niedersachsen“ (Wuchs-Risiko-NI) Grundlagen für eine verbesserte Bewertung wichtiger Baumarten im Klimawandel erarbeitet. Diese umfangreichen Datengrundlagen sind die Voraussetzung für die Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems zur klimaangepassten Baumartenwahl (BaEm). Ein derartiges multikriterielles BaEm, das auf einem Ensemble von Klimäläufen basiert, wird aktuell für die Trägerländer der NW-FVA entwickelt. Das multikriterielle BaEm soll den aktuellen eindimensionalen Ansatz auf Grundlage der Standortwasserbilanz und der Nährstoffversorgung ersetzen. Das aktuelle BaEm war als schnell entwickeltes System zur Entscheidungsunterstützung für einen klimaadaptiven Waldbau nach den säkularen Waldschäden der Extremjahre 2018 ff. äußerst nützlich. Mittlerweile zeigen sich allerdings einige Schwächen, die durch den multikriteriellen ensemblebasierten Ansatz überwunden werden sollen. Die SWB als Grundlage für eine Trockenstresseinschätzung in Kombination mit überarbeiteten baumartenspezifischen

Grenzwerten zur Bewertung der Trockenheitstoleranz der Baumarten wird weiterhin eine wichtige Komponente im multikriteriellen BaEm bleiben.

6. Literatur

- Alveteg M, Walse C, Warfvinge P (1998) Reconstructing historic atmospheric deposition and nutrient uptake from present day values using MAKEDEP. *Water Air Soil Pollut.* 104: 269-283. doi:10.1023/A:1004958027188
- Ehrminger L, Schmidt M (2024) Ein empirischer Ansatz zur klimadynamischen Modellierung des Borkenkäferbefallsrisikos in Fichtenbeständen auf Grundlage von Schadholzdaten. In: Nagel R-V, Schmidt, M (Hrsg.) (2024): Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA (Im Druck).
- Hübener H, Bülow K, Fooker C, Früh B, Hoffmann P, Höpp S, Keuler K, Menz C, Mohr V, Radtke K, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Toussaint F, Warrach-Sagi K, Woldt M, (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. DOI: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe Ergebnisbericht.
- Höhle J, König N, Hilbrig L, Bielefeld J, Ziche D, Grüneberg E, Eickenscheidt N, Ahrends B, Wellbrock N. (2016) Methodenüberblick und Qualitätssicherung. In: Wellbrock N, Bolte A, Flessa H: Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008. Thünen Rep, 43: 6-43. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.
- Jung C, Schindler D (2021) Does the winter storm-related wind gust intensity in Germany increase under warming climate? – A high-resolution assessment. *Weather Clim Extrem* 33:100360. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100360>
- Nagel J, Biging G S (1995) Schätzung der Parameter der Weibullfunktion zur Generierung von Durchmesservertteilungen. *Allg Forst- Jagdztg* 166 (9-10)
- Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, & Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, L. und V. (2021). Waldzustandsbericht 2021 für Niedersachsen. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5615008>
- Nuske R. (2017): vegperiod: Determine Thermal Vegetation Periods [Software]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.1466541
- Schaap M, Hendriks C, Kranenburg R, Kuenen J, Segers A, Schlutow A, ... Banzhaf, S (2018). PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau
- Schick J, Albert M, Schmidt M (2023) A new approach for modeling stand height development of German forests under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change* 6. DOI: 10.3389/ffgc.2023.1201636

- Schmidt M (2020) Standortsensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel. Allg Forst- Jagdztg 190(5/6):136–160
- Schmidt M, Hanewinkel M, Kändler G, Kublin E, Kohnle U (2010) An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage—experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. Can J ForRes 40(8):1636–1652. <https://doi.org/10.1139/X10-099>
- Schober R (1995) Ertragstafeln wichtiger Baumarten – 4-te Auflage. Sauerländer.
- Spellmann H, Meesenburg H, Schmidt M, Nagel R.-V, Suttmöller J, Albert M (2015) Klimaanpassung ist Vorsorge für den Wald. Strategien zur Stabilisierung der Wälder - ohne Aktionismus. proWALD-Magazin des Deutschen Forstvereins (11).
- Tarrasón L, Nyíri Á (2008) Transboundary acidification, europication and groundlevel ozone in Europe in 2006. In: EMEP Status Report. The Norwegian Meteorological Institue, Oslo, Norway <http://www.emep.int>.
- Zeppenfeld T, Jung C, Schindler D, Sennhenn-Reulen H, Ipsen M J, Schmidt M (2023) Winter storm risk assessment in forests with high resolution gust speed data. Eur J For Res 142:1045–1058. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01575-8>