

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500519368/23

# Sturmgefährdungskarten für Baden- Württembergs Wälder als Grundlage für mittel- und langfristige Planungen

von Axel Albrecht und Ahssem Almehasneh

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

Juli 2018

**KLIMOPASS**

– **Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg**



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
<b>KONTAKT</b> <b>KLIMOPASS</b>	Dr. Kai Höpker, Dr. Ellinor von der Forst Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; E-Mail: <a href="mailto:klimopass@lubw.bwl.de">klimopass@lubw.bwl.de</a>
<b>FINANZIERUNG</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLI- MOPASS)
<b>BEARBEITUNG UND</b> <b>VERANTWORTLICH</b> <b>FÜR DEN INHALT</b>	Dr. Axel Albrecht und Dr. Ahssem Almehasneh, Forstliche Versuchs- und For- schungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)
<b>BEZUG</b>	<a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/</a> ID Umweltbeobachtung U82-W03-N21
<b>STAND</b>	Juli 2018, Internetausgabe Dezember 2018

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>6</b>
1.1 Projektziele	7
1.2 Stand der Forschung und Sturmschadensmodellierung in Baden-Württemberg	7
1.2.1 Vorarbeiten aus dem KLIMOPASS-Projekt RESTER	8
<b>2 MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>8</b>
2.1 Datengrundlagen und Datenherkunft	8
2.2 Datenaufbereitung und Analyse-Ablaufschema	10
2.3 Sentinel-2-Satellitendaten für die Baumartengruppenklassifizierung	12
2.4 Baumartengruppenklassifizierung (Überwachte numerische Klassifizierung)	13
2.5 Baumhöhen	15
2.6 H/D-Modell	16
2.7 Böengeschwindigkeitsdaten	16
2.8 Anwendung des Sturmschadensmodells von Schmidt et al. 2010	19
2.8.1 Abstraktion zu einem ereignisunabhängigen, generellen Schadensmodell	19
2.8.2 Berücksichtigung der modellierten Windgeschwindigkeit im Sturmschadensmodell	21
<b>3 ERGEBNISSE</b>	<b>23</b>
3.1 Baumartengruppenklassifizierung	23
3.2 h/D-Modell	26
3.3 Kartenset I – Sturmrisiko heutiger Waldbestände	27
3.4 Kartenset II – Potentielles Sturmrisiko der Baumarten	34
3.5 Kartenset III - Potentielles Sturmrisiko der Baumarten unter Klimawandel	45
3.6 Tabellarischer Vergleich der Mittelwerte der Kartensets I bis III	55
<b>4 DISKUSSION</b>	<b>56</b>
4.1 Diskussion der Methodenwahl und der Datengrundlage	56
4.2 Diskussion der Ergebnisse	57
4.3 Mögliche Konsequenzen für die Waldbewirtschaftung	58
4.4 Ausblick	58
<b>5 LITERATUR</b>	<b>59</b>
<b>6 ANHANG</b>	<b>64</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Starke Stürme gehören zu den heftigsten Folgen des Klimawandels und führen zur Zerstörung von ökologischen und ökonomischen Waldressourcen. Die kartographische Darstellung und Aufbereitung der Sturmgefährdung soll helfen, die potentielle Gefährdung für Sturmschäden abzuschätzen, um so als Entscheidungsgrundlage für die Baumartenwahl bei der Neubegründung von Waldbeständen zu dienen sowie für die Anpassung bzw. den Waldumbau von heute vorhandenen Waldbeständen in Baden-Württemberg planungsrelevante Strategien über die Planungszeiträume anzubieten. Der vorliegende Ansatz wurde im Rahmen des KLIMOPASS - Projekts entwickelt, um drei verschiedene Kartensets für Management- und Planungszwecke zur Verfügung zu haben. Dabei wurden mit Hilfe des von Schmidt et al. 2010 entwickelten und erweiterten Modells flächendeckend Kartensets für den gesamten Wald in Baden-Württemberg erstellt. Die Sturmgefährdung wird durch dieses Modell in Abhängigkeit der Baumart, der Baumhöhe, dem Verhältnis zwischen Baumhöhe und Baumdurchmesser, der orographischen Exponiertheit (Topex-Index), der Bodeneigenschaft Staunässe (ja/nein) sowie einem ersatzweisen Schätzwert für die Windgeschwindigkeit geschätzt. Die erarbeiteten Karten stellen zuerst die Sturmgefährdung heute vorhandener Waldbestände dar (Kartenset I, Vulnerabilität). Anschließend werden die theoretischen Gefährdungen für die fünf wichtigsten Baumartengruppen Baden-Württembergs (Fichte, Tanne-Douglasie, Kiefer-Lärchen, Buche-Eiche und sonstige Laubbäume) unter der Annahme eines durchschnittlichen (Kartenset II) und eines in Zukunft möglicherweise leicht gestiegenen Sturmrisikos auf Risikopotentialkarten abgebildet (Kartenset III). Bei der Potentialbetrachtung der Kartensets II und III wurden je Baumart durchschnittliche sogenannte Normbäume verwendet, um die Effekte der Baumdimension zu normalisieren und damit die Vergleichbarkeit zwischen den Baumarten herzustellen. Die Annahmen für ein in Zukunft möglicherweise leicht ansteigendes Sturmrisiko fußen dabei auf Modellberechnungen der maximalen Windgeschwindigkeit mit dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM-5 und dem regionalen Klimamodell Cosmo-CLM unter Annahme des Klimaszenarios A1B für die Jahre 2021-2050.

Ein besonderes Ergebnis dieses Projekts ist, dass die Sturmgefährdungskarten flächendeckend für alle Waldbesitzarten (Staats-, Kommunal- und Privatwald) erarbeitet wurden. Dies ist besonders, da detaillierte Waldinformationen wie Baumhöhe und Baumart in die Risikobeurteilung mit einfließen und diese Informationen bislang nicht flächendeckend vorlagen. Zur Erarbeitung dieser erweiterten Datengrundlage wurden (1) neu verfügbare multispektrale Satellitendaten (Sentinel-2) zur fernerkundungsbasierten Baumartenklassifikation eingesetzt, (2) luftbildbasierte Vegetationsoberhöhen zur Abschätzung von Einzelbaumhöhen landesweit berechnet, und (3) regionalspezifische H/D-Wert Modelle neu entwickelt.

Die gewonnenen Ergebnisse der drei Kartensets liefern flächendeckend wichtige und interessante neue Erkenntnisse über die Sturmgefährdung (Sturmschadenwahrscheinlichkeit) im gesamten baden-württembergischen Wald. Die Mittelwerte der Sturmgefährdung heutiger Waldbestände (Vulnerabilität) in Kartenset 1 betragen von 0.4 % für die sonstigen Laubbäume bis zu 3 % für Tanne/Douglasie. Für Fichte wurden im Mittel 2 % errechnet. Damit zeigte sich eine klare Abhängigkeit von Baumart und Baumhöhe als vorrangige Risikofaktoren. Auffällig war hier, dass die Sturmgefährdung nicht nur für Fichte, die bekanntermaßen stark sturmgefährdet ist, sondern auch für Tanne/Douglasie hoch eingestuft wurde. Erst mit deutlich geringeren Mittelwerten von 0.6 bzw. 0.7 % folgten die Baumartengruppen Kiefer/Lärche und Buche/Eiche. Diese Baumarteneffekte sind jedoch auch durch Dimensionseffekte überlagert, da große reale Baumhöhen bei Tanne/Douglasie einen zusätzlich erhöhenden Einfluss auf die Sturmgefährdung neben dem reinen Baumarteneffekt hatten.

Die sehr niedrigen Gefährdungswerte lassen zunächst vermuten, dass die Sturmgefährdung annähernd bedeutungslos ist. Sie sind jedoch so zu interpretieren, dass bei jedem in Zukunft auftretenden Sturmereignis 3 % aller vorkommenden Tannen und Douglasien bzw. 2 % aller Fichten geschädigt würden und liegen damit in einer typischen Größenordnung für Sturmschäden durchschnittlicher mittlerer Sturmereignisse. Diese Werte sind außerdem auf die vorsichtige Annahme einer mittleren Sturmstärke zurückzuführen.

Bei der reinen Potentialbetrachtung in Kartenset II auf der Basis von Normbäumen wurden die Baumarteneffekte noch deutlicher: So war die Gefährdung von Fichte (Mittelwert 9 %) leicht höher als die von Tanne/Douglasie (8 %). Im Vergleich hierzu lagen die Mittelwerte der anderen Baumarten mit Abstand niedriger (Kiefer/Lärche 2.5 %, Buche/Eiche 2 %, sonstige Laubbäume 1 %). Die insgesamt für alle Baumarten deutlich höheren Gefährdungswerte im Vergleich zu Kartenset I sind in der Annahme adulter Normbäume mit durchgängig großer Baumhöhe begründet.

Unter der Annahme einer sich möglicherweise unter Klimawandel leicht um 1,58 % erhöhenden durchschnittlichen Böengeschwindigkeit erhöhten sich die geschätzten Sturmgefährdungswerte aller Baumarten in Kartenset III überproportional. Damit ist zu befürchten, dass selbst sehr geringe Erhöhungen in der Sturmstärke, -intensität oder -häufigkeit zu überproportional zunehmenden Sturmschäden in Wäldern führen könnten.

Die dargestellten Ergebnisse sind sowohl als Kartensets (Sturmgefährdungs- bzw. Sturmschadenwahrscheinlichkeitskarten) als auch als Raster- und Esri-Vektordateien für mehrere Analysezwecke digital vorhanden. Die Karten ermöglichen den Benutzenden und Waldbesitzenden detailliert auf Bestandesebene und feiner (Horizontalauflösung bis zu 20×20 m) sowohl die kurz- und mittelfristige Waldbewirtschaftung (Verjüngungsprioritäten bei hoher Vulnerabilität) sowie langfristige Waldbewirtschaftungskonzepte (Baumartenwahl) zielgerichtet auf die Minimierung von Sturmschadensrisiken hin zu steuern.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass Waldbesitzende und Waldbewirtschaftende, die das Sturmschadensrisiko ihrer Wälder reduzieren und minimieren möchten, an erster Stelle Baumarten mit geringem Grundrisiko fördern sollten. Da für alle untersuchten dichtbenadelten Nadelbaumarten (Fichte, Tanne, Douglasie) sowohl in der konkreten in-situ-Betrachtung (Kartenset I) als auch in den Potentialbetrachtungen (Kartensets II und III) systematisch die höchsten Gefährdungen ermittelt wurden, kommen als sturmrisikoarme Baumarten vorwiegend Buche, Eiche, Kiefern, Lärchen und sonstige Laubbäume in Betracht. Als nächste wirksame Maßnahme zur Reduzierung des Sturmrisikos erscheint eine Begrenzung der Baumhöhe sinnvoll. Die Sturmgefährdung aller Baumarten nahm bei Baumhöhen zwischen 30 und 35 m so enorm zu, dass waldbauliche Behandlungen, deren Ziele bis zu dieser Baumhöhe erreicht werden können, risikoreduzierend und erstrebenswert sind.

Auch unter sich möglicherweise intensivierender Sturmhäufigkeit oder –stärke wurde weiterhin eine starke Abhängigkeit der Sturmgefährdung von Baumart und Baumhöhe beobachtet. Die Erklärung, dass besonders starke Stürme unabhängig von Baumart und Baumdimension überall dort Schäden verursachen, wo sie auftreten, konnte durch unsere Untersuchung nicht bestätigt werden.

# 1 EINLEITUNG

Entscheidungen über die Gestaltung von Wäldern haben in der Regel weit in die Zukunft reichende Auswirkungen. Zu diesen Entscheidungen gehören z. B. die Baumartenwahl, Durchforstung, Biotoppflege, Waldumbau oder Ausweisung eines Totalreservates. Und das Zustandekommen solcher Entscheidungen hat unter den sich schneller verändernden Klimabedingungen des anthropogenen Klimawandels eine Renaissance erlebt. Wegen der langen Lebenszyklen von Waldbäumen liegen zwischen einer waldbaulichen Entscheidung, ihrer Realisierung und der möglichen Beobachtung und Bewertung aller Handlungsfolgen zumeist viele Jahrzehnte, manchmal gar Jahrhunderte. Die Besonderheit dieser extremen Langfristigkeit unterscheidet die Forstwirtschaft fundamental von langfristigen Planungshorizonten industrieller Produktion (Oesten und Roeder 2002; Oesten und Roeder 2012).

Aufgrund dieser besonderen Planungsanforderungen in der Forstwirtschaft, also der Langsamkeit des Waldwachstums, der zeitlichen Entkopplung von biologischer Produktion und marktorientierter Nutzung, der Identität von Produkt und Produktionsmittel, den Problemen der Bewertung von Vorrat, Zuwachs und Nutzungen, der gesellschaftlichen Bedeutung der Wirkungen des Waldes und der Leistungen des Forstbetriebes hat sich mit der Forsteinrichtung für die Aufgabe der mittelfristigen Planung und Kontrolle im Forstbetrieb ein eigener Fachbereich entwickelt, der sich speziell mit den technischen und technologischen Aspekten der langfristigen Steuerung forstbetrieblichen Handelns auf Betriebsebene beschäftigt. Aufgabe der Planung ist es dabei, das Maß an Unsicherheit und die nachteiligen Folgen einer ziellosen Improvisation im Produktionsprozess einzuschränken und dafür Sorge zu tragen, dass die Betriebsführung kontinuierlich und „unberührt vom Wechsel der Wirtschaftler“ stets auf die angestrebten Ziele ausgerichtet bleibt. Bezüglich Waldbau- und Nutzungsentscheidungen werden der Betriebsleitung im Zuge der Forsteinrichtung mehr oder weniger verbindliche Vorgaben in der Regel für die kommenden 10 Jahre gemacht. Abgeleitet sind diese mittelfristigen Vorgaben zumeist aus Produktionsprogrammen (betriebsspezifische Betriebszieltypen, Behandlungszieltypen, Waldentwicklungstypen, Pflegepläne usw.). Produktionsprogramme werden in der Weise entwickelt, dass unter Berücksichtigung örtlicher Gegebenheiten zunächst eine Vorstellung vom angestrebten Zielwald bzw. Zielbestand entwickelt wird, dann waldbauliche Maßnahmen zur Erreichung dieser langfristigen Zielvorstellung abgeleitet werden und schließlich diese Maßnahmen mittels konkret fassbarer Steuergrößen (mittels operationaler Zielvorgaben) wie Stammzahl in Abhängigkeit von der Oberhöhe, Grundflächen, Stammzahlverteilung über dem Durchmesser, Baumartenanteile, Zieldurchmesser, Vorrat usw. charakterisiert werden (vgl. Oesten und Roeder 2012).

Die Bestimmung langfristiger Ziele steht in einem deutlichen Spannungsverhältnis zu dem sich ständig verändernden Umgebungssystem (Wert-, Management-, Informations- und Leistungssystem des Forstbetriebs) natürlicher, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Art. Nachdem der Klimawandel ein globales Phänomen geworden ist (IPCC 2012 und IPCC 2014; Trenberth et al. 2007), sind zahlreiche Klimaparameter (z.B. Durchschnittstemperaturen, Niederschläge, Starkregen) und extreme Ereignisse wie starke Böen und Winterstürme zur Herausforderung für langfristige Planungshorizonte geworden (vgl. Schmidt et al. 2010 und Schmidt et al. 2006; Feser et al. 2015; Mölter et al. 2016). Der Klimawandel könnte im forstlichen Bereich bezogen auf Baumartenwahl, Anpassungsstrategien für Waldbestände und Waldumbau nicht nur steigende Mortalitätsrisiken wie z.B. Borkenkäferkalamitäten (vgl. Nothdurft 2013; Seidl et al. 2011) sondern auch Auswirkungen auf Wachstum und Produktivität von Wäldern mit sich bringen (Yue et al. 2014; Yue et al.

2016; Albrecht 2009; Nothdurft et al. 2012; Schindler et al. 2012; Schindler et al. 2009; Hanewinkel et al. 2014; Murshed 2016; Cailleret et al. 2017). Starke Stürme können den langjährigen wirtschaftlichen Erfolg forstlichen Handelns massiv beeinflussen (vgl. Staupendahl 2011) und stellen somit die größten Herausforderungen für Forstwirtschaft und das nachhaltige Wirtschaften im Wald dar. Sturmereignisse können Waldökosysteme schlagartig durch Abbrechen von Astspitzen, Kronenteilen, Windbruch oder -wurf einzelner Bäume bis hin zu flächigen Sturmschäden verändern (vgl. Albrecht 2009). Solche verheerenden Stürme treten nur selten auf, haben aber gegenüber den ansonsten in Wäldern vorwiegend kontinuierlichen Veränderungsprozessen enorme plötzliche und langfristige ökologische und ökonomische Wirkungen (vgl. Albrecht 2009; Schindler et al. 2009; Murshed 2016). Europaweit wurden im Zeitraum von 1950- 2000 im Jahresdurchschnitt 35 Millionen m<sup>3</sup> Holz als Schäden dokumentiert, davon waren 53% der Gesamtschadenssumme durch Stürme verursacht, 16% durch Waldbrände, 3% durch Schnee und 5% durch andere abiotische Faktoren (Schelhaas et al. 2003). Sturmschäden haben somit europaweit zentrale Bedeutung für die Waldentwicklung, Wertschöpfung in Wäldern und für die Umweltleistungen von Wäldern (CO<sub>2</sub>-Bindung, nachhaltige und ökologische Ressourcenversorgung).

## 1.1 PROJEKTZIELE

Das Projekt „Sturmgefährdungskarten für Baden-Württembergs Wälder als Grundlage für mittel- und langfristige Planungen“ zielt auf die Minimierung von Sturmschäden in Wäldern ab und liefert die hierfür erforderlichen kartographischen Planungsunterlagen, die Sturmgefährdungskarten.

Der Fokus des Projekts liegt auf der kartographischen Aufbereitung modellierter Ergebnisse mit direkter Relevanz für forstbetriebliche Entscheidungen. So dienen die Karten Waldbewirtschaftenden und Waldbesitzenden als Informationsgrundlage, um vordringliche Umbaustände identifizieren zu können (Kartenset I). Die allgemeine Sturmgefährdung kann als Entscheidungsgrundlage für die Baumartenwahl bei der sich anschließenden Neubegründung von Waldbeständen herangezogen werden (Kartensets II und III).

Im Rahmen dieses Projektes wurden flächendeckende Risikokarten und Baumartengruppenklassifizierungen erstellt. Diese Karten stellen zuerst das heutige Sturmrisiko vorhandener Waldbestände dar (Kartenset I). Anschließend werden die theoretischen Gefährdungen für die fünf wichtigsten Baumartengruppen Baden-Württembergs (Fichte [*Picea abies*], Tanne-Douglasie [*Abies alba*, *Pseudotsuga menziesii*], Kiefer-Lärchen [*Pinus sylvestris*, *Larix decidua*, *L. kaempferi*], Buche-Eiche [*Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. rubra*] und sonstige Laubbäume [*Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus*, *Juglans regia*, *Ulmus sp.*, *Populus sp.*, *Betula sp.*) anhand von durchschnittlichen sogenannten Normbäumen unter der Annahme eines durchschnittlichen (Kartenset II) und eines leicht gestiegenen Sturmrisikos auf Risikopotentialkarten abgebildet (Kartenset III).

## 1.2 STAND DER FORSCHUNG UND STURMSCHADENSMODELLIERUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Sturmgefährdung und Anpassungsstrategien in Baden-Württemberg sind in Studien für Land- und Forstwirtschaft unterschiedlich untersucht und beschrieben worden. Modellansätze und Sturmrisikokarten, die sowohl Winddaten, Geländemerkmale, Baum- und Walddaten als auch Bodeninformationen berücksichtigen und gleichzeitig für alle Waldbesitzarten mit hoher räumlicher Auflösung verfügbar sind, sind dagegen rar (vgl.

Albrecht 2009; Schindler 2012; Mölter et al. 2016; Jung und Schindler 2015; Jung et al. 2016). In bisherigen Studien ist zumeist mindestens einer der genannten Informationsbereiche unzureichend berücksichtigt. So fehlt beispielsweise in den Ansätzen von Albrecht (2009) die adäquate Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit, und in den Arbeiten von Schindler et al. 2012 und Murshed 2016 sind Windinformationen nur sehr grob abgebildet. Allgemein ist festzustellen, dass je größer die untersuchte Fläche ist, umso größer die zugrundeliegenden Eingangsdaten sind.

### **1.2.1 VORARBEITEN AUS DEM KLIMOPASS-PROJEKT RESTER**

Zurzeit existieren keine Modellansätze in Baden-Württemberg, die großräumig und flächendeckend mit feiner Auflösung auf Baumartenklassen-Ebene und unter Verwendung von Baumhöheninformationen die Sturmgefährdung zeigen und direkte Relevanz für forstbetriebliche Entscheidungen und für alle Waldbesitzenden aufweisen. Die vorhandenen Vorarbeiten von Schindler et al. (2010, 2012) auch im Rahmen der KLIMOPASS-Förderung erfolgten zwar flächendeckend, konnten aber aufgrund der damaligen Datenverfügbarkeit nur geringen Bezug zur konkreten Gefährdung der existierenden Waldbestände herstellen. Die zugrundeliegenden Waldinformationen beinhalten lediglich die Differenzierung zwischen Laub-, Misch- und Nadelwäldern und gestatteten leider keine Berücksichtigung der Baumhöhe (Mayer 2010). Die Baumhöhe ist allerdings zusammen mit der Baumart einer der stärksten Risikofaktoren zur Charakterisierung des Sturmrisikos (Hanewinkel et al. 2015) und sollte berücksichtigt werden.

Diese Informationslücke wird nun durch die Verwendung von Satellitendaten für die flächendeckende Baumartenerkennung und die Auswertung stereoskopischer Luftbilddaten zur Gewinnung von Baum- bzw. Vegetationsoberhöhendaten geschlossen.

## **2 MATERIAL UND METHODEN**

### **2.1 DATENGRUNDLAGEN UND DATENHERKUNFT**

Die für die Modellierung und Berechnung der Sturmgefährdung in Baden- Württemberg verwendeten Datengrundlagen und deren Herkünfte sind in Tabelle 1 dargestellt. Im Einzelnen werden diese Datengrundlagen und besonders die Aufbereitung dieser Daten als Prädiktoren für die Modellierung der Sturmgefährdung in den folgenden Kapiteln separat dargestellt. Zusammenfassend wird jedoch hier kurz ein Überblick gegeben.

Die Daten für die Charakterisierung der orographischen Exposition (Topex Index: Beschreibung der Geländeexponiertheit unter Berücksichtigung der Expositionen) wurde auf Grundlage eines digitalen Geländemodells berechnet. Die regionalzonalen Standorteinheiten der forstlichen Standortkartierung wurden für die Ermittlung der Bodenstaunässe verwendet. Zur Ermittlung des Prädiktors Baumhöhe wurden Luftbilddaten verwendet. Zur Charakterisierung des Schlankheitsgrads von Bäumen wurden forstliche Betriebsinventurdaten (BI) und Daten der Bundeswaldinventur (BWI3) verwendet. Der Schlankheitsgrad von Waldbäumen bezeichnet das Verhältnis von Baumhöhe zu Baumdurchmesser und wird auch als H/D-Wert bezeichnet. Dieser Index ist ein Indikator für die Schaftstabilität von Bäumen und wird im forstlichen Bereich häufig für die Standfestigkeit und mechanisch-physikalische Stabilität von Bäumen und Waldbeständen gegenüber Sturm- und Schneebruchereignissen verwendet. Zur Ermittlung der Baumartenzugehörigkeit wurde eine satellitenbasierte multispektrale Baumartenklassifikation verwendet.

**Tabelle 1: Datengrundlagen zur regionalisierten Modellierung von Sturmgefährdungsflächen**

Kategorie	Herkunft	Datenformat
Bundeslandgrenze und Waldbesitzarten: Staats- und Kommunalwald	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Waldbesitz (FOGIS): ForstBW, Geschäftsbereich FGeo (www.forstbw.de)	Raster und Vektor (Polygon)
BWI <sup>3</sup> und Betriebsinventur BI	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA). (Nur Staats- und Kommunalwald)	dBase-Tabellen, Vektordaten (Polygon)
Topex Index	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA)	Rasterdaten
Forsteinrichtung, regionalzonale Standortseinheiten	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Nur Staats- und Kommunalwald bzw. standortskartierter Wald)	Vektordaten (Polygon)
CORINE (CLC)	Land cover 2012: www.eea.europa.eu	Raster und Vektordaten (Polygon)
Sentinel-2 Satelliten Bilddaten	ESA: Europäische Fernerkundungsgemeinschaft	Raster 10x10 m
Winddaten (Zeitreihen)	Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Institute of Meteorology and Climate Research - Tropospheric Research Division	Raster 5x5 km
Befliegungsdaten NDSM (Vegetationshöhen und Schlankheitsgrad (h/d-Wert))	LGL: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg	Raster 1x1m

In diesem Projekt wurden 5 Baumartengruppen (BAGRG) in Baden-Württemberg gebildet, um die Sturmgefährdung räumlich und baumartenspezifisch möglichst genau zu untersuchen (Tabelle 2). Die Zusammenfassung einiger Arten wie z. B. Tanne und Douglasie oder Buche und Eiche ist dem Umstand geschuldet, dass die Datengrundlage für das zugrundeliegende Sturmschadensmodell (Schmidt et al. 2010) keine separate Klasse für die besonders seltenen Baumarten erlaubte. So waren beispielsweise zu wenige Douglasien und zu wenige Eichen für eigenständige Klassen in den Daten vorhanden gewesen (Schmidt et al. 2010). Die untersuchten Baumarten repräsentieren alle Hauptbaumarten in Baden-Württemberg.

**Tabelle 2: Einteilung der Baumartengruppen für die Anwendung des Sturmschadensmodells in Baden-Württemberg**

Baumart	Baumartengruppe als Kürzel (BAGRG)
Fichte ( <i>Picea abies</i> )	FI
Eiche ( <i>Quercus robur</i> , <i>Q. petraea</i> ), Roteiche ( <i>Quercus rubra</i> ), Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> )	BUEI
Kiefer ( <i>Pinus sylvestris</i> ), Lärche ( <i>Larix decidua</i> , <i>L. kaempferi</i> ),	KILAE
Tanne ( <i>Abies alba</i> ), Douglasie ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	TADGL
Buntlaubebäume: Esche ( <i>Fraxinus excelsior</i> ), Bergahorn ( <i>Acer pseudoplatanus</i> ), Walnuss ( <i>Juglans regia</i> ), Ulme ( <i>Ulmus sp.</i> )  Sonstiges Laubholz: Pappel ( <i>Populus sp.</i> ), Birken ( <i>Betula sp.</i> )	ALHALN

## 2.2 DATENAUFBEREITUNG UND ANALYSE-ABLAUFSCHHEMA

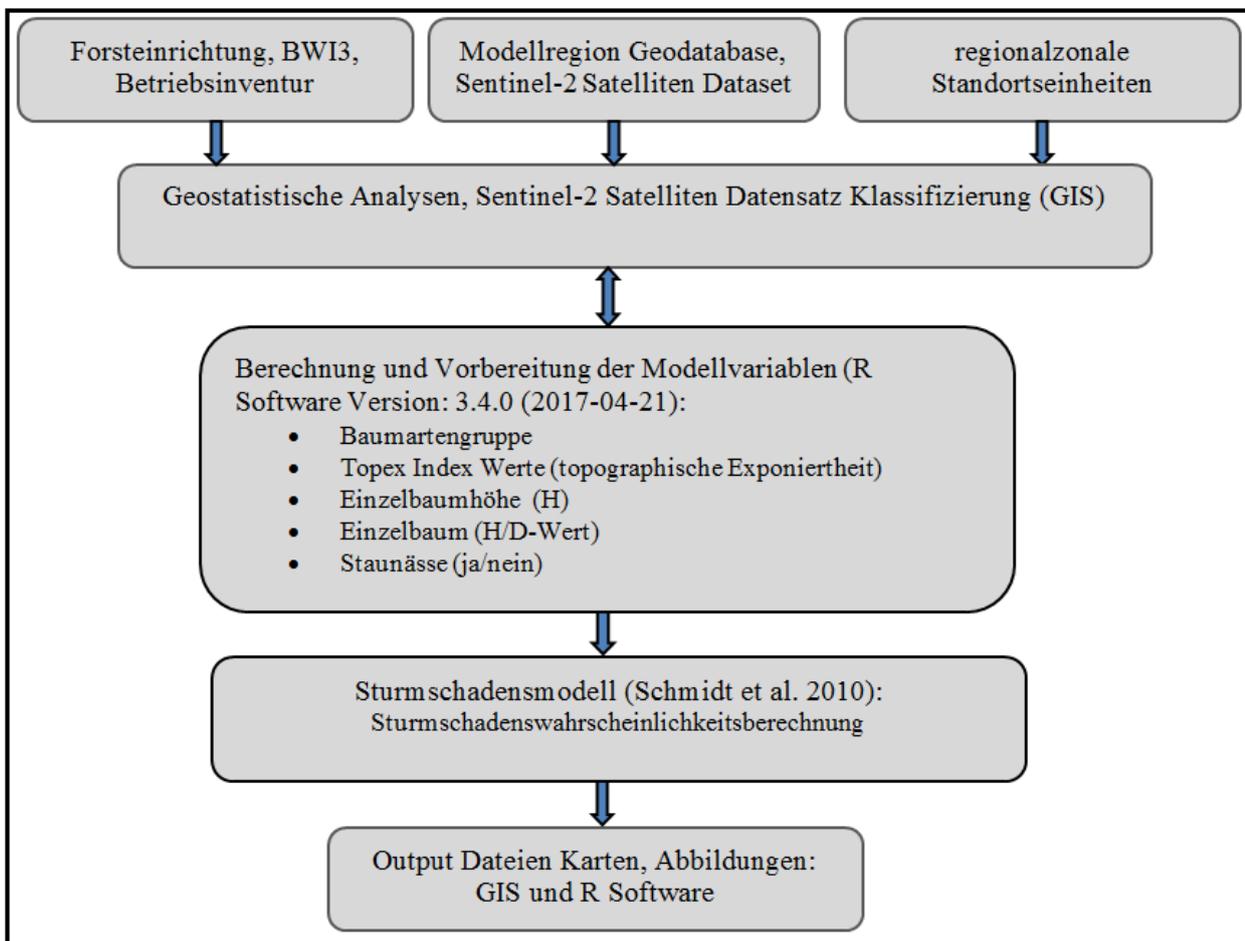
Datenaufbereitung, Analyse, Modellierung und Validierung erfolgten mit dem Programm ArcGIS und der Statistik-Software R. Statistische Analysen und Datenvorbereitungen in R wurden unter Verwendung der Bibliotheken 'gstat' (für Geostatistik; Gräler et al. 2016), 'Raster' (für Rasterberechnung und Georeferenzierung; Hijmans und van Etten 2012), 'ggplot2' (zum Plotten; Wickham 2016), 'maptools' (um Shapefiles zu lesen und zu bearbeiten), 'mgcv' (für die Implikation von mehreren Glättungsparametern in GAM; Wood 2006) durchgeführt.

Die erforderlichen Eingangsparameter sowie deren Datenherkunft für die Modellierung der Sturmgefährdung sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3: Prädiktorvariablen für die modellbasierte Abschätzung der Sturmgefährdung. Details zum Sturm-schadensmodell folgen in Abschnitt 2.8.**

Prädiktorvariable	Datenskala	Herkunft
Topex (Geländeexponiertheit)	kontinuierlich	FVA
Geländehöhen über dem Meeresspiegel (NN)	kontinuierlich	FVA
Einzelbaumhöhen (H)	kontinuierlich	Luftbildbasierte Vegetationsoberhöhenmodell
h/d-Wert (Schlankheitsgrad)	kontinuierlich	FVA (Eigene Modellierung)
Baumartengruppen (BAGRG)	kategorisch	Sentinel-2 (Eigene Klassifizierung)
Bodenstaunässe	kategorisch	FVA, Standortkartierung
Böengeschwindigkeit	kontinuierlich	KIT, IMK TRO
Rechts und Hochwert (RW, HW)	kontinuierlich	Geographische Koordinaten (GIS)

Der Ablauf der Analyse- und Modellierungsschritte ist in Abbildung 1 graphisch zusammengefasst.



**Abbildung 1: Ablaufschema der R- und GIS-basierten Analyse- und Modellierungsschritte**

### 2.3 SENTINEL-2-SATELLITENDATEN FÜR DIE BAUMARTENGRUPPENKLASSIFIZIERUNG

Die Baumartengruppenklassifizierung für die fünf Baumartengruppen (Tabelle 2) wurde anhand der multispektralen Sentinel-2 Daten durchgeführt.

Sentinel-2 liefert im Vergleich zu anderen Satellitendaten wie z.B. Landsat8 (vgl. Usgs 2017) optische Daten in hoher Auflösung, die als Basis für operationelle Interpretationen in den Bereichen Landwirtschaft (Landnutzung und -bedeckung, Ernteprognosen, Wasser- und Düngerbedarf), Forstwirtschaft (Bestandsdichte, Gesundheitszustand, Waldbrände, Baumklassifikationen), Überwachung von Gewässern, Raumplanung und Katastrophenmanagement dienen. Zeitnahe Aufnahmen von Überschwemmungen, Vulkanausbrüchen und Erdbeben tragen zur Erstellung von aktuellen Karten bei Naturkatastrophen bei (Esa 2017).

Die Vorteile der Verwendung von Sentinel-2 Daten für die Baumartenklassifikation bestehen darin, dass diese Daten global kostenfrei und in hoher zeitlicher Auflösung verfügbar sind. Damit sind flächendeckend und waldbesitzartenunabhängig Spektraldaten verfügbar, was insbesondere für das Schließen von Datenlücken in nichtöffentlichen Wäldern sorgt. In öffentlichen Wäldern wird durch die Verwendung der Sentinel-2-Daten in Ergänzung zu heute bereits vorhandenen Forsteinrichtungsinformationen die räumliche Auflösung von Daten zu Baumartenvorkommen deutlich verbessert.

Diese Art von Satellitendaten enthält 12 Bandkombinationen, jedoch sind für die Baumklassifikationen bzw. den Reflexionsgrad (Reflexionseigenschaften) der Baumarten im Satellitendatensatz nur die Bänder 2- bis 8 mit einer räumlichen Auflösung von 10×10 m bis 20×20 m (vgl. Tabelle 4) von großer Bedeutung. Die anderen Bandkombinationen (1, 9, 10, 11, und 12) spielen für die atmosphärischen Korrekturen und die Klassifizierungen anderer Merkmale eine bedeutende Rolle.

**Tabelle 4: Sentinel-2 Spektralbänder (Quelle: ESA 2017)**

<b>Band (Eigenschaften)</b>	<b>Zentrale Wellenlänge</b>	<b>Auflösung (m)</b>
Band 1- Detektion von Aerosolen	443	60
Band 2 – Blauer Kanal	490	10
Band 3 – Grüner Kanal	560	10
Band 4 – Roter Kanal	665	10
Band 5 - Vegetationsklassifizierung	705	20
Band 6 - Vegetationsklassifizierung	740	20
Band 7 - Vegetationsklassifizierung	783	20
Band 8 – Nahinfrarot	842	10
Band 8a- Vegetationsklassifizierung	865	20
Band 9- Wasserdampf	945	60
Band 10- Cirrus	1375	60
Band 11- Schnee/Eis/Wolken	1610	20
Band 12- Schnee/Eis/Wolken	2190	20

Der verwendete Satellitendatensatz (10 Szenen Sentinel-2 für die Modellregion) wurde am 19. Juni 2017 mit 97 % Wolkenfreiheit aufgenommen. Die Atmosphärenkorrektur erfolgte mit einem Prozessor, der für die Korrektur von atmosphärischen und Geländeverzerrungen im Satellitenbild geeignet ist (Sentinel-2 Levels 2A Produkt Sen2Cor). Für die Baumartengruppenerkennung wurden die drei 20 m Spektralbänder mit der Resampling-Methode (Nächster Nachbar: Dabei erfolgt eine Zuweisung des nächsten Nachbarn) interpoliert,

auf 10 m umgerechnet und mit den originalen 10 m-Bändern zusammengeführt. Die Nächster-Nachbar-Interpolationsmethode ist die schnellste der in der Fernerkundung angewendeten Interpolationsmethoden und wird am häufigsten für diskontinuierliche Daten verwendet, beispielsweise für eine Klassifizierung der Landnutzungstypen (vgl. Immitzer et al. 2016; Hildebrandt 1996 und die dort angegebene Literatur).

#### **2.4 BAUMARTENGRUPPENKLASSIFIZIERUNG (ÜBERWACHTE NUMERISCHE KLASSIFIZIERUNG)**

In der Fernerkundung verfolgen die numerischen rechnergestützten Klassifizierungsmethoden das Ziel, die Bildelemente von Grauwertmatrizen oder Farbkompositen (Pixelwerte) nach spektralen Signaturen zu gruppieren und als Objektklassen quantitativ auszuweisen, gegebenenfalls ihr Vorkommen als Objektkarten abzubilden. Dieser Schritt bzw. diese Gruppierung wird als Segmentierung bezeichnet. Die Klassifikationsalgorithmen, die die Bildelemente zu spektralen und Objektklassen zuordnen, nennt man Klassifikatoren. Bei der überwachten numerischen Klassifizierung (Supervised classification) soll der Rechner mit Hilfe des Gaußschen und des Bayesschen Maximum-Likelihood Klassifikators (ML) alle Bildelemente suchen, die eine gleiche oder ähnliche Grauwertkombination oder Pixelwerte aufweisen (Hildebrandt 1996). Die Zuweisung erfolgt zuerst durch die Benutzer am Monitor anhand der sogenannten Trainingsgebietsauswahl für die segmentierten Satellitenbilder. Die Auswahl von Trainingsgebiet bzw. Objektklassen (Nadel-, Laub- und Mischwaldgruppen) wird dabei mit Hilfe von Referenzpunkten bzw. Genauigkeitspunkten durchgeführt. Nach der Auswahl des Trainingsgebietes werden spektrale Signaturen von Musterklassen bzw. Referenzpolygonen für jede Objektklasse erstellt, die für das Ausführen von Klassifikationsalgorithmen (ML) und für die Signaturanalyse jeder Objektklasse notwendig sind.

Anhand der Genauigkeitspunkte bzw. Referenzpunkte der Bundeswaldinventur 3 (2012) und der georeferenzierten Versuchsflächen (als Trainingsgebiet) der Abteilung Waldwachstum der forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) wurden Segmente gewählt, die den möglichst realen Baumartengruppen entsprechen, um die Klassifikations-Referenzpolygone (spektrale Signatur-Polygone) zu erstellen. Nach der Erstellung der spektralen Signatur-Polygone wurde der in der Fernerkundung am häufigsten verwendete Algorithmus Maximum-Likelihood Klassifikator in ArcGIS angewendet. Der Maximum-Likelihood Klassifikator ist ein statistischer Ansatz, der davon ausgeht, dass die Pixelwerte der zu einer Objektklasse gehörenden Bildelemente in dem Satellitenbild jedes Spektralkanals eine Gaußsche Normalverteilung um den jeweiligen Mittelwert der Musterklasse aufweisen. Einen besonderen Vorteil beim Einsatz des ML-Algorithmus‘ bietet dazu der erweiterte Ansatz des Bayesschen Klassifikators. Hierbei werden Schätzungen für die Wahrscheinlichkeiten des Vorkommens der Klassen in dem gegebenen Satellitenbild bzw. der Szene und des Verlustes durch Fehlklassifizierung als Gewichte eingeführt (Hildebrandt 1996; Carleer und Wolf 2004; Bolstadt und Lillesand 1991 und Waser et al. 2011).

Nach der Anwendung des Maximum-Likelihood Klassifikators erfolgte die Überprüfung der Genauigkeit zunächst mithilfe der Produzenten- und Benutzergenauigkeitsanalyse. Diese wird nur auf die einzelnen Klassen angewandt. Als Referenzdatengrundlage für die wahren beobachteten Baumartenvorkommen wurden die Daten der Bundeswaldinventur 3 (2012) verwendet. Hierbei wurde jede Traktecke einer der Baumartengruppen aus Tabelle 2 zugeordnet, wenn der grundflächenbasierte Baumartenanteil dominanter (also herrschender) Bäume der jeweiligen Baumart mindestens 80 % betrug. Traktecken bei denen keine Baumart mindestens 80 % Grundflächenanteil aufwies, wurden nicht berücksichtigt. Durch diese Bedingung wurden Klassifikationsungenauigkeiten aufgrund von Mischbestandseffekten vermieden.

Die Produzentengenauigkeit (PG) präsentiert die Anzahl der Pixel, die korrekt in einer bestimmten Kategorie klassifiziert sind, als Prozentsatz der Gesamtzahl der Pixel, die tatsächlich zu dieser Kategorie im Bild gehören (vgl. Tabelle 5 in Esri 2017 und Hildebrandt 1996) und entspricht damit der Menge a in Tabelle 5 geteilt durch die Summe von a und b. Bei der Benutzergenauigkeit (NG) wird der Anteil korrekt klassifizierter Pixel an der Gesamtzahl derjenigen Pixel berechnet, die einer bestimmten Kategorie – in unserem Fall einer bestimmten Baumartengruppe – (modellbasiert) zugeordnet sind. Nach der Darstellung in Tabelle 5 entspricht die NG damit der Menge a geteilt durch die Summe a und c. Die Gesamtgenauigkeit (Gg) zeigt auf höherer Aggregationsebene den Anteil der Punkte an, die korrekt klassifiziert wurden (vgl. Hildebrandt 1996), nach Tabelle 5 also als Menge (a+c)/N berechnet werden.

Als weiteres Maß der Klassifikationsgenauigkeit liefert der Kappa-Index nach Sachs (1992) eine Gesamtbeurteilung und ist ein Maß der Übereinstimmung zweier oder mehr Beobachter (A; B mit Modellvorhersagen bzw. Klassen a, b, c und d) an denselben Objekten und wird auch als Konkordanzmaß bezeichnet (vgl. Sachs 1992 S. 472 f, und Tabelle 5). Er lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Kappa} = \frac{2(ad-bc)}{(a+c).(c+d)+(a+b).(b+d)}$$

**Tabelle 5: Klassifikationstabelle (auch Konfusionsmatrix genannt) als Grundlage für die Berechnung der Klassifikationsgüte, wie z. B. Konkordanzindex (Kappa) nach Sachs (1992) oder Produzenten- und Benutzergenauigkeit. a: Anzahl beobachteter und durch das Modell vorhergesagter Ereignisse. b: beobachtete Ereignisse, die durch das Modell als Nichtereignis klassifiziert wurden. c: beobachtete Nichtereignisse, die durch das Modell als Ereignis klassifiziert wurden. d: beobachtete und durch das Modell vorhergesagte Nichtereignisse. Als Ereignis ist in diesem Arbeitsschritt die Zugehörigkeit eines Pixels zu einer Baumart zu sehen.**

	<i>B (Modellvorhersage)</i>		<i>Summe</i>
<i>A (Beobachtung)</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c+d</i>
<i>Summe</i>	<i>a+c</i>	<i>b+d</i>	<i>N</i>

Die Güte der Klassifizierung nach dem Kappa-Index lässt sich dann verbal folgendermaßen beschreiben (Tabelle 6):

**Tabelle 6: Verbale Beschreibung der Klassen für das Konkordanzmaß Kappa-Index (vgl. Sachs 1992)**

Kappa	Genauigkeitsgüte
<10%	keine
10%-40%	schwach
40%-60%	deutlich

60%-80%	stark
80%-100%	Fast vollständig

## 2.5 BAUMHÖHEN

Die Baumhöhen für Baden-Württembergs Staats-, Kommunal- und Privatwald standen als Rasterdaten basierend auf stereoskopischen Luftbildern mit einer Auflösung von 1×1m vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL) zur Verfügung. Die Luftbilder wurden in den Jahren 2014 bis 2017 gewonnen (Abbildung 2). Um die Baumhöheninformation kontinuierlich zu berechnen, wurde im Rahmen dieses Projektes eine Programmierschnittstelle zwischen dem Programm ArcGIS bzw. der Python Programmiersprache und der Software R entworfen.

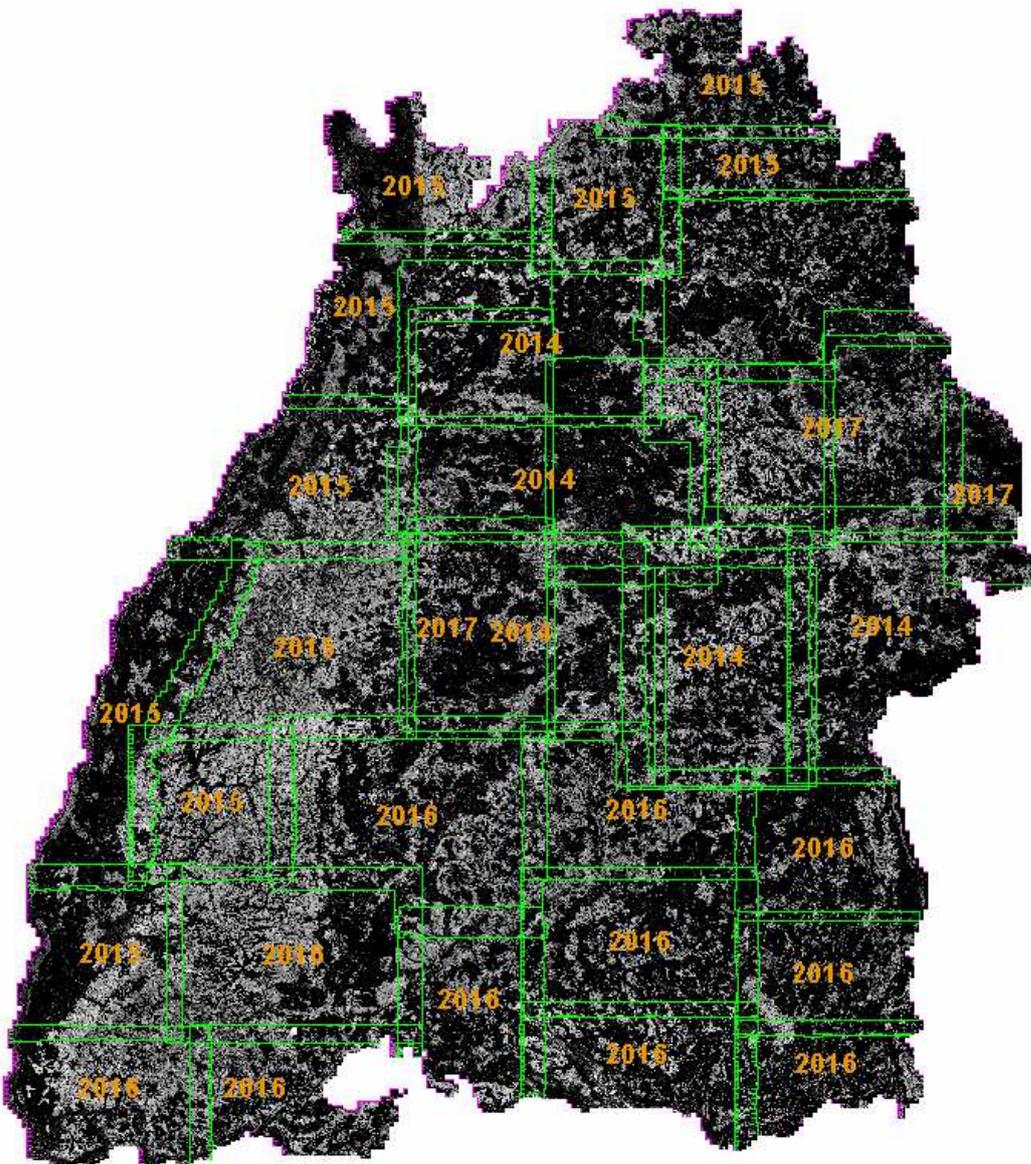


Abbildung 2: Lose der Befliegung für die Gewinnung der Baumhöhendaten mit Angabe des Jahrs der Befliegung.

## 2.6 H/D-MODELL

Für die Berechnung und Herleitung des Schlankheitsgrads (H/D-Wert) wurde flächendeckend mittels der Software R und der Bundeswaldinventur Daten, (BWI 3, 2012) ein eigenes H/D-Wert-Modell erstellt. Die parametrische Modellierung für die H/D-Werte erfordert ein relativ kompliziertes nicht-lineares Modell. Kernaufgabe dieses Modells ist es, die H/D-Werte für jede Baumartengruppe mithilfe der luftbildbasierten Baumhöhendaten für jedes Wuchsgebiet und für die konkrete Höhe über dem Meeresspiegel (NN) zu berechnen.

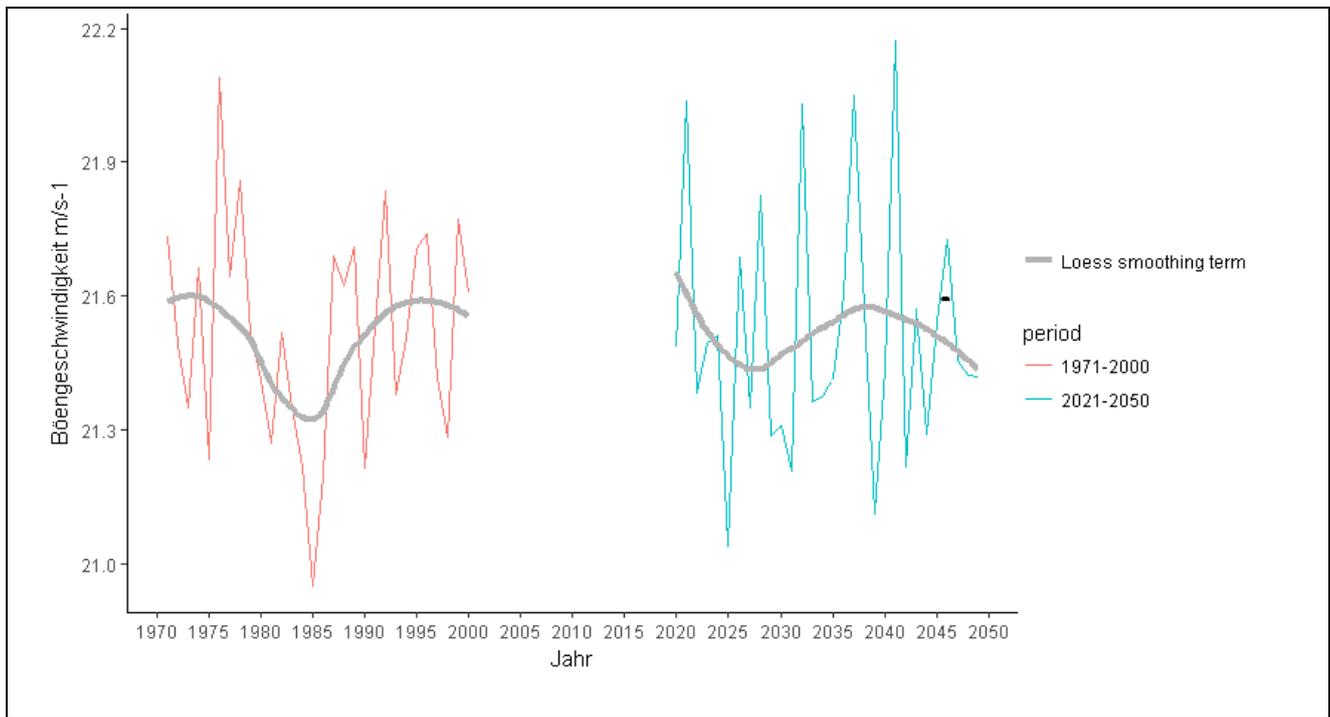
Hierfür wurde ein gemischtes Modell angewendet: Eine Variante der Chapman-Richards-Gleichung bzw. eine modifizierte Ableitung. Die Chapman-Richards-Gleichung lässt sich wie folgt beschreiben:

$$hd = (A_0 + A_1 \cdot H_{NN}) \cdot (1 - e^{-k \cdot h})^p \cdot k \cdot p \cdot e^{-k \cdot h} + c$$

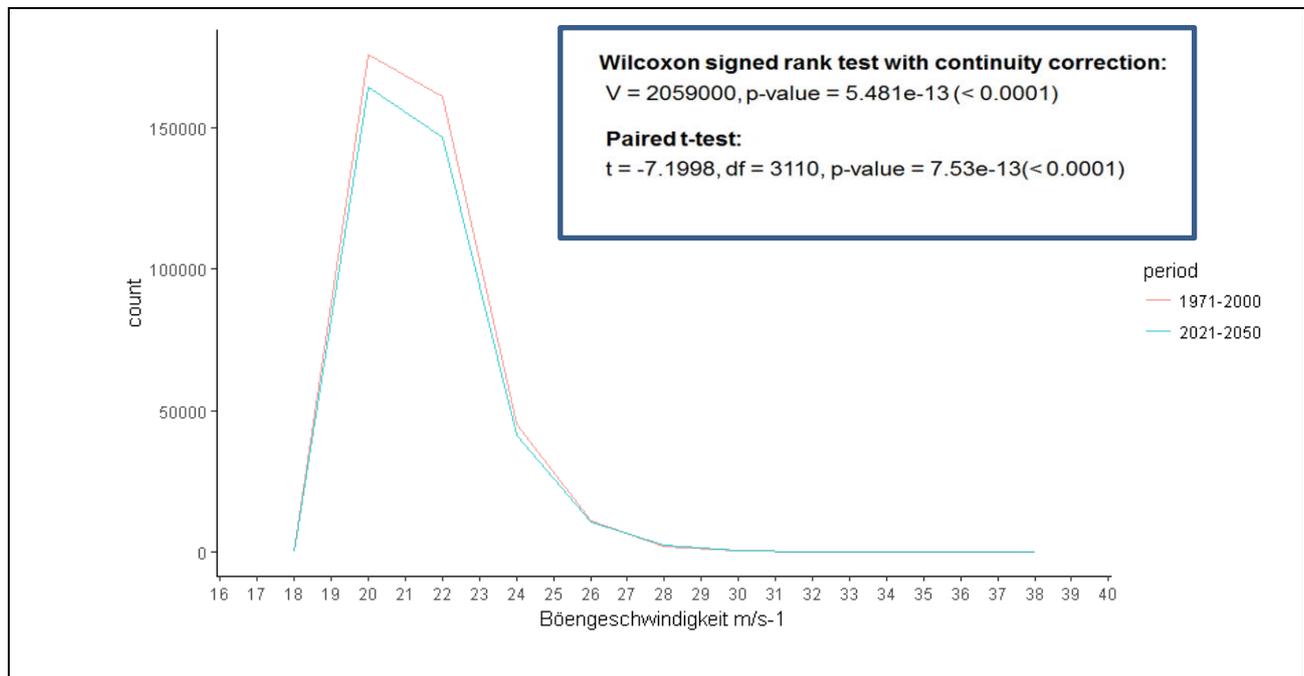
$A_0, A_1, k, p, c$  sind Koeffizienten und Modellparameter. Das gemischte Modell unterteilt sich in die festen Effekte Baumhöhe und Meereshöhe sowie die zufälligen Effekte Wuchsgebiet mit Koeffizienten des Asymptoten-Terms  $A_0 + A_1 \cdot H_{NN}$ . Dies bedeutet, dass für jedes Wuchsgebiet eigene Koeffizienten für  $A_0$  und  $A_1$  geschätzt werden.

## 2.7 BÖENGESCHWINDIGKEITSDATEN

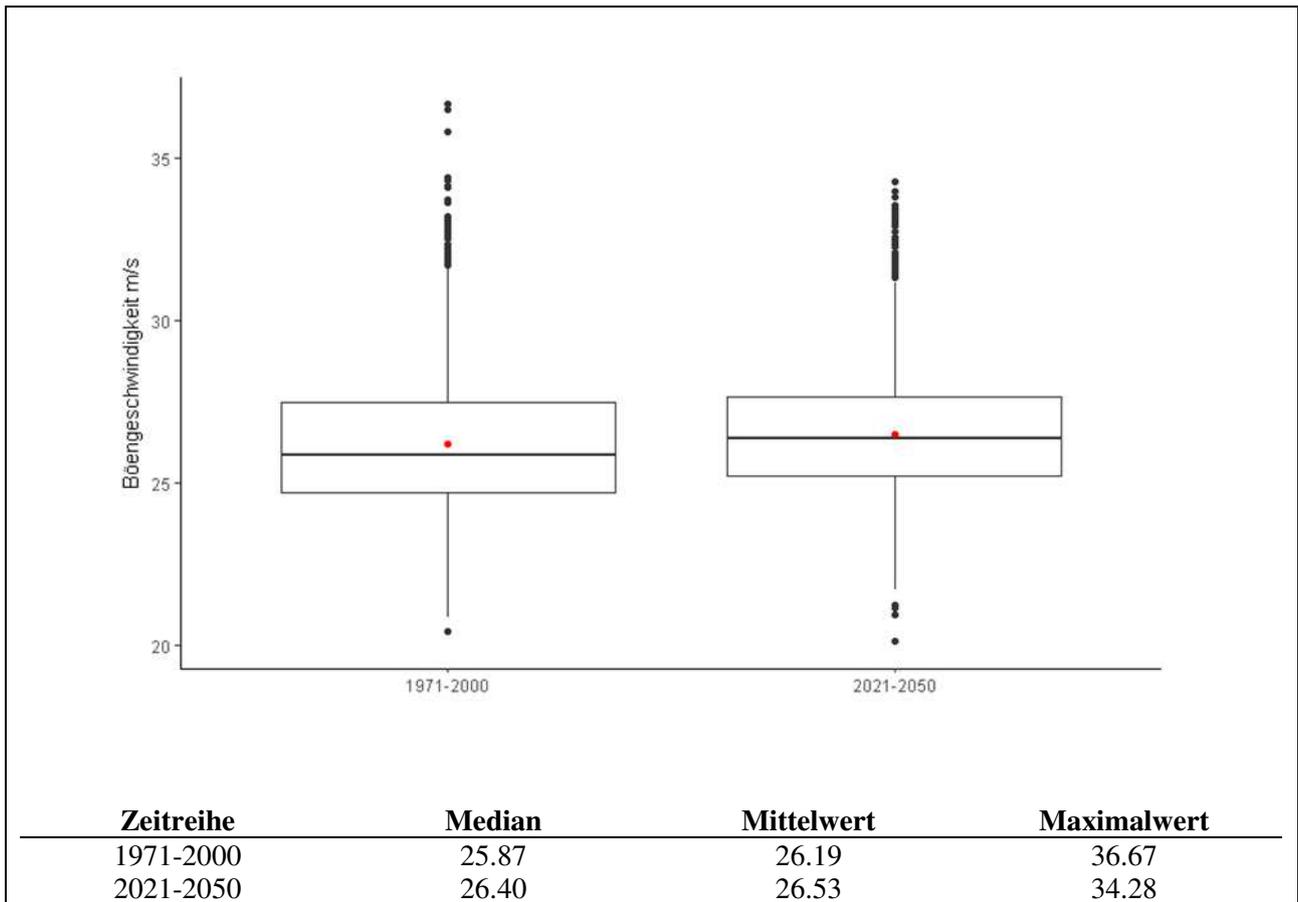
Die Böenwindgeschwindigkeiten als Zeitreihen von 1971-2000 und von 2021-2050 wurden durch den Projektpartner „Institute of Meteorology and Climate Research - Tropospheric Research Division KIT“ zur Verfügung gestellt. Die Daten können in ArcGIS oder in der Statistik-Software R über mehrere oder eine Dimension (z. B. Zeit) dargestellt und analysiert werden. Abbildung 3 zeigt den Mittelwert der Böengeschwindigkeiten für die Zeitreihen 1971-2000 und 2021-2050. In der vorliegenden Arbeit wurden die Rasterzellen mit heutiger Lage im Wald verwendet und die Windgeschwindigkeit bzw. Tagesmaxima (gust windspeed) von über 20 m/s ausgewählt unter die Annahme, dass die Böengeschwindigkeiten unter 20 m/s tendenziell für den Wald nicht schadenbringend sind. Es wurden mit einem Signifikanztest nach Wilcoxon (Abbildung 4) – auch Vorzeichen-Rang-Test genannt – die Unterschiede und die Erhöhung der Böengeschwindigkeiten zwischen den Zeitreihen 1971-2000 und 2021-2050 untersucht (vgl. Abbildung 5 und Kap. 3.5).



**Abbildung 3: Geglättete Mittelwerte (graue Linie) der modellierten Böengeschwindigkeiten über der Zeit auf Grundlage des globalen Zirkulationsmodells ECHAM5 und des regionalen Klimamodells Cosmo-CLM für die Zeitreihen 1971-2000 (links) und 2021-2050 (rechts, hier IPCC-Klimaszenariodaten A1B).**



**Abbildung 4: Vergleich der Böengeschwindigkeit und Signifikanztest für die Zeitreihen 1971-2000 und 2021-2050 (globales Zirkulationsmodell ECHAM5 und regionales Klimamodell Cosmo-CLM, IPCC-Klimaszenario A1B).**



**Abbildung 5: Differenzen der Böengeschwindigkeiten von über 20m/s für die Zeitreihen 1971-2000 und 2021-2050 (Mittelwert als roter Punkt, globales Zirkulationsmodell ECHAM5 und regionales Klimamodell Cosmo-CLM, IPCC-Klimaszenario A1B).**

Der rein visuelle Vergleich der Böengeschwindigkeitsdaten für die Perioden 1971-2000 zu 2021-2050 lässt keinen großen Unterschied erkennen (Abbildung). Auf der Grundlage der Signifikanztests zeigt sich jedoch, dass statistisch signifikante geringe Unterschiede auftreten (Abbildung 4). Durch Überprüfung mit Boxplot-Darstellung wurde eine leichte Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit von Werten > 20 m/s festgestellt, die jedoch durch eine leichte Abnahme der Maximalwerte begleitet wurde (vgl. Abbildung 5). Im langfristigen Trend wurde somit eine Erhöhung des Mittelwerts um 0.34 m/s bzw. 1.58 % ausgehend von der Periode 1971-2000 hin zur Periode 2021-2050 festgestellt (Abbildung 5).

## 2.8 ANWENDUNG DES STURMSCHADENSMODELLS VON SCHMIDT ET AL. 2010

In der vorliegenden Arbeit wurde ein empirisch-statistisches Sturmschadenmodell (generalisiertes additives Modell, GAM), von Schmidt et al. 2010 eingesetzt und für die Berechnung und Darstellung der Sturmgefährdung in Baden-Württemberg erweitert. GAMs wurden ursprünglich von Hastie und Tibshirani (1986) entwickelt und werden häufig bei der Ermittlung und Vorhersage von Sturmschäden sowie auch für andere ökologische und Klimamodelle angewendet (vgl. Zuur et al. 2008; Militino 2010; Dolos und Märkel 2016) dar. Ein GAM ist grundsätzlich ein verallgemeinertes lineares Modell (GLM), in dem eine Summe glatter Funktionen von Kovariablen enthalten ist (vgl. Stollenwerk 2006; Wood 2006 und Wood 2012). Für jede erklärende Variable im GAM wird eine eigene Glättungsfunktion konstruiert (Dormann und Kühn 2012). Nach Dormann und Kühn (2012) lässt sich ein GAM im Allgemeinen so darstellen:

$$y \sim X_i + F_1(X_1) + F_2(X_2, X_3) + F_n(X_n) + X_n \dots \dots$$

Wobei  $y$  die Antwortvariable ist,  $F= 1,2,\dots,n$  sind glatte Funktionen der erklärenden Variablen  $X=1, 2,\dots,n$ , jede glatte Funktion ( $F$ ) kann sich auf eine oder auf mehrere Kovariablen  $X$  beziehen. GAM ist eine Zusammenstellung von Methoden, die als gemeinsames Ziel haben, durch entspannte bzw. flexible Kurven die Daten nachzuzeichnen (Dormann und Kühn 2012).

Die genaue Form der glatten Funktionen ( $F$ ) sowie Art und Umfang der Glätte sind in der Regel nicht bekannt. Daher sind einige Erweiterungen des generalisierten linearen Modells erforderlich, um GAMs in der Praxis zu verwenden, wie z.B. die Darstellung von glatten Funktionen, Kontrolle des Grades der Glätte und Schätzung der am besten geeigneten Glätte. Am häufigsten wird in der Praxis der Modellierung und Schätzung nichtparametrischer Modelle für Schadensereignisse und bei der Modellierung der klimatischen Standorteignung (siehe Dolos und Märkel 2016) die Glättungsfunktion Spline (Thin-Plate penalised- Regression Spline) verwendet (vgl. hierzu Hastie und Tibshirani 1986 und Hastie und Tibshirani 1990; sowie Wood 2012 und Zuur et al. 2008). Die Glättungsfunktion Spline kann als eine Mischung aus einem Standard Regression Spline und einem Standard Glättungsspline angewendet werden (zum Vor- und Nachteil der Glättungsfunktion Spline siehe Wood 2006; Zuur et al. 2008, sowie Schmidt et al. 2006). In der vorliegenden Arbeit wurde der Glättungsparameter Spline verwendet. GAM Modellierungsschritte wurden mittels des Programms R bzw. R-Programmbibliothek „mgcv“ durchgeführt (Wood 2006 und Wood 2012). Der erhebliche Vorteil der R-Programmbibliothek „mgcv“ besteht darin, dass diese Software die Möglichkeit für die Verwendung sogenannter Penalized Regression Splines als additive Modellkomponenten und somit die Möglichkeit zur Identifikation und Erfassung nicht-linearer Einflüsse auf die Antwortvariable bietet (Schmidt et al. 2006).

### 2.8.1 ABSTRAKTION ZU EINEM EREIGNISUNABHÄNGIGEN, GENERELLEN SCHADENSMODELL

Folgende Vorbemerkung ist essentiell für die Frage der Übertragbarkeit ereignisspezifischer Sturmschadensmodelle auf ereignisunabhängige Sturmrisikokarten: Empirisch-statistische Sturmschadensmodelle mit Anwendungspotential für großflächige Risikokartierungen enthalten kaum real gemessene oder auch modellierte Böengeschwindigkeitsdaten als Prädiktoren. Dies ist vielleicht zunächst irritierend, dann jedoch begründet in der mangelnden Verfügbarkeit feinskaliger, präziser Böendaten (Scott und Mitchell 2005). Ein weiterer Grund ist, dass großflächige, mittlere Windgeschwindigkeitsdaten zwar besser verfügbar sind, jedoch leider allzu oft nicht mit tatsächlichen Schadensdaten korrelieren (Albrecht et al. 2012). Diese mangelnde Korrelation geht vermutlich auf die unterschiedliche räumliche Auflösung der Schadensdaten und der Windgeschwindigkeitsdaten zurück und ist möglicherweise durch die kleinräumig-komplexe Orographie

begründet, die zu kleinräumig variierenden und in Modellen nur schwer quantifizierbaren Turbulenzen führen kann.

Dieser Befund stellt selbstverständlich nicht den Zusammenhang zwischen Böengeschwindigkeiten und Sturmschäden in Frage, sondern erläutert lediglich, weshalb empirisch-statistische Modelle bisher im Regelfall Böendaten nicht enthalten.

#### 2.8.1.1 ÜBERTRAGBARKEIT DES WINDFELDES

Das empirische Modell von Schmidt et al. 2010 enthält eine räumliche Komponente, sozusagen ein verortetes Interzept, um genau dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die tatsächlich örtlich wirksame Böengeschwindigkeit nicht als Prädiktor zur Verfügung stand (weitere Ausführungen warum dies so ist, siehe weiter unten bei ‚Hintergrund‘). Die räumliche Komponente ermöglicht eine weitgehende Bereinigung dieser unerwünschten Effekte durch das Schätzen eines Varianzterms (thin-plate regression spline), der die unbekannt örtlichen Böengeschwindigkeiten substituiert. Ohne diese räumliche Komponente wäre es denkbar, dass die an einem bestimmten Ort auftretende hohe Böengeschwindigkeit zufällig mit bestimmten Baumparametern (z. B. junge Buchen) oder Standortparametern (z. B. kiesige Grushänge) zusammenfällt. Ohne Korrekturkomponente würde ein statistisches Modell dann hohe Korrelationen zwischen Sturmschäden in jungen Buchenbeständen auf kiesigen Grushängen ermitteln, welche de facto viel stärker durch die örtlich auftretenden – aber nicht quantitativ verfügbaren – hohen Böengeschwindigkeiten geprägt sind. Die räumliche Komponente bereinigt das Modell um unerwünschte Scheinkorrelationen, die aufgrund der realen Sturmzugbahn bzw. des Windfeldes hätten auftreten können.

Für die Übertragung dieses ereignisspezifischen „Lothar-Modells“ auf generelle Sturmrisikokarten kann diese räumliche Komponente nun isoliert und fixiert werden, um z.B. die Sturmstärke zu rekonstruieren. Für die Schätzung einer ereignisunabhängigen Sturmschadenswahrscheinlichkeit kann beispielsweise die Sturmstärke im damaligen Hauptschadensgebiet Nordschwarzwald als konstante Sturmstärke auf das gesamte Bundesland übertragen werden. Genauso ist es denkbar, eine abgeschwächte bzw. lediglich mittlere Lothar-Sturmstärke für zukünftige Sturmereignisse anzunehmen. Für die Anwendung in unserem Fall wurde eine mittlere Sturmstärke von Lothar für die Kartensets I und II ausgewählt und einheitlich auf das ganze Land übertragen, ohne dabei die räumlichen Auftretensmuster der Böengeschwindigkeiten von Sturm Lothar nachzuzeichnen. Die genaue Berechnung der verwendeten räumlichen Koordinate ist im Anhang unter Gliederungspunkt 6 aufgeführt. Da der Zweck des Projektes die Berücksichtigung mittlerer Sturmrisiken bei der Waldbauplanung ist, erscheint die Annahme mittlerer Sturmcharakteristika gerechtfertigt.

Hintergrund: Tatsächlich wirkende Böengeschwindigkeiten, die den einzelnen Baum oder Waldbestand während eines Sturms schädigen, sind generell bislang nicht in der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung verfügbar, um Korrelationsanalysen mit großflächigen Schadensdaten zu ermöglichen. Bislang waren Windfelder mit Horizontalauflösung von z. B. 1 km verfügbar (Heneka et al. 2006). Diese Auflösung erwies sich für einige Modellierungszwecke als hilfreich, für forstliche Sturmschäden jedoch weniger, da die orographischen realen Geländeverhältnisse deutlich kleinräumiger variieren. Es wurden in letzter Zeit wieder vermehrt Bemühungen unternommen, diese Skalendifferenzen zu beheben und Böendaten mit deutlich verfeinerter Horizontalauflösung zu erarbeiten (z. B. Jung und Schindler 2015, Jung et al. 2016). Ob diese Daten jedoch *de facto* hohe Korrelationen mit Sturmschadensdaten aufweisen ist noch nicht getestet.

### **2.8.1.2 JAHRESZEIT**

Stürme, die in mitteleuropäischen Wäldern verheerenden Schaden angerichtet haben, kamen bisher beinahe ausschließlich in den Wintermonaten Oktober bis März vor (Hurrell et al. 2001; Leckebusch et al. 2006; Marshall et al. 2001; Pfister 1999). Diese meteorologisch als Orkane bezeichneten Starkstürme entwickeln sich im Rahmen winterlicher Zyklone, die über dem Nordatlantik entstehen und dem Luftdruckunterschied zwischen dem Azorenhoch und dem Islandtief entstammen. Dieser Luftdruckunterschied wird durch die Nordatlantische Oszillation (NAO) quantifiziert (Bengtsson et al. 2006; Greeves et al. 2007; Hurrell et al. 2001).

Zukünftige Stürme werden voraussichtlich diese Saisonalität beibehalten. Eine nennenswerte Verlagerung in die Vegetationszeit würde die meteorologischen Rahmenbedingungen erheblich verändern, da Laubbäume zunehmend belaubt sein könnten und damit deren Windlast deutlich gegenüber dem unbelaubten Winterzustand steigen würde. Hierfür gibt es jedoch keine belastbaren Hinweise (Beniston et al. 2007; Giorgi et al. 2004; Hanson et al. 2007; Pinto et al. 2007a; Pinto et al. 2007b; Walter et al. 2006).

Insofern erscheint die Übertragbarkeit des Sturmrisikos auf der Grundlage retrospektiver Wintersturm-Modelle auch für zukünftige Sturmrisiken als plausibel.

### **2.8.1.3 WINDRICHTUNG**

Sowohl die von SW nach Mitteleuropa streichende mediterrane als auch die von NW streichende nordatlantische Zugbahn führen in Mitteleuropa zu westlichen Windrichtungen von Winterstürmen. Historische Untersuchungen belegen dies für Baden-Württemberg für die wichtigsten Schaden bringenden Stürme des 19. und 20. Jahrhunderts (Steller 2003) und für schwedische Sturmschäden des 20. Jahrhunderts (Nilsson et al. 2004). Auch Zukunftssimulationen lassen derzeit keine deutliche Änderung dieser vorherrschenden Windrichtung von Winterstürmen erwarten (Albrecht et al. 2009).

Insofern erscheint die Verallgemeinerung des Sturmrisikos ausgehend von einem westwindgeprägten Sturmereignis auch für die Zukunft als realistisch.

Dieser Westwind-Effekt ist im anzuwendenden Modell in Teilen auch durch den Prädiktor Topex gewährleistet (Schmidt et al. 2010), welcher die richtungsabhängige topographische Exponiertheit von Waldstandorten quantitativ berücksichtigt (Ruel et al. 1997; Wilson 1984).

### **2.8.1.4 SONSTIGE STURMSPEZIFISCHE STURMCHARAKTERISTIKA**

Sonstige Aspekte wie Bodenwassersättigung zum Sturmschadenszeitpunkt sowie Temperatur bzw. Bodenfrost werden im gewählten Ansatz direkt von den Verhältnissen des Sturms Lothar (1999) auf die allgemeinen Risikokarten übertragen.

## **2.8.2 BERÜCKSICHTIGUNG DER MODELLIERTEN WINDGESCHWINDIGKEIT IM STURMSCHADENSMODELL**

Für das Kartenset III (Annahme einer erhöhten Sturmhäufigkeit bzw. -intensität) wird auf der Grundlage der meteorologischen Trends für die maximalen modellierten Windgeschwindigkeiten (SRES-Szenarien des KIT, IMK-TRO) die räumliche Komponente des Sturmschadensmodells verteilungsbasiert modifiziert. Die in Abschnitt 2.7 beschriebene Erhöhung der Geschwindigkeiten um 1,58 % im SRES-Szenario A1B dient als Grundlage für die proportionale Erhöhung der räumlichen Komponente des Sturmschadensmodells. Der

Berechnungsweg für das Zuordnen der erhöhten Böengeschwindigkeit zu einem korrespondierenden erhöhten räumlichen Term des GAMs ist im Anhang unter Gliederungspunkt 6 dargestellt.

Modellierte Windspitzen fließen prinzipiell nicht direkt in das empirisch-statistische Schadensmodell ein, wie oben erläutert. Es ist hier noch anzumerken, dass zum einen die orographische Exponiertheit, z. B. Effekte wie Luv-Hänge, geschützte Tallagen etc., durch den Topex-Index quantitativ im Modell berücksichtigt werden. Zum anderen ist es expliziter Grundsatz des beantragten Vorhabens, die großflächige Sturmwahrscheinlichkeit für das gesamte Land als gleich und als nicht abhängig von einem hypothetischen, möglicherweise lokal oder regional begrenzten Einzelereignis anzunehmen. Es soll also für das Kartenset II an allen Orten das gleiche, und ebenso für das Kartenset III an allen Orten das gleiche, wenn auch insgesamt leicht erhöhte bzw. modifizierte Niveau gelten.

### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 BAUMARTENGRUPPENKLASSIFIZIERUNG

Güte und Genauigkeit der Klassifikation lassen sich zuerst anhand der Trennbarkeit und des Reflexionsgrades bzw. der Reflexions-Mittelwerte der jeweiligen Spektralbänder aus den Referenzobjekten (hier Baumartengruppen) im Verhältnis zu den zentralen Wellenlängen der einzelnen Bänder der Sentinel-2-Daten (vgl. Abbildung 6) grob visuell einschätzen. Die Laubbaumarten bzw. die Buche/Eiche weisen im Vergleich zu den Nadelbaumarten einen höheren Mittelwert bzw. Reflexionswert (spektrale Signaturen) bei Band 8 bzw. im Wellenlängenbereich 842 nm (Nahinfrarot, vgl. Tabelle 4) auf. Fichte und Kiefer zeigen die geringsten Werte. Die Trennbarkeit der Baumartengruppen zeigt sich deutlich zwischen Laub- und Nadel-Wald. Innerhalb der einzelnen Baumartengruppen zeigen sich zwischen Buche/Eiche und sonstiges Laubholz/Buntlaubholz jedoch nur geringe erkennbare spektrale Unterschiede; ebenso sind die spektralen Unterschiede zwischen Fichte und Kiefer/Lärche gering. Die Gruppe Tanne/Douglasie war hiervon jedoch mit etwas höheren Reflexionsgraden im Wellenlängenbereich 720 bis 950 nm abgesetzt.

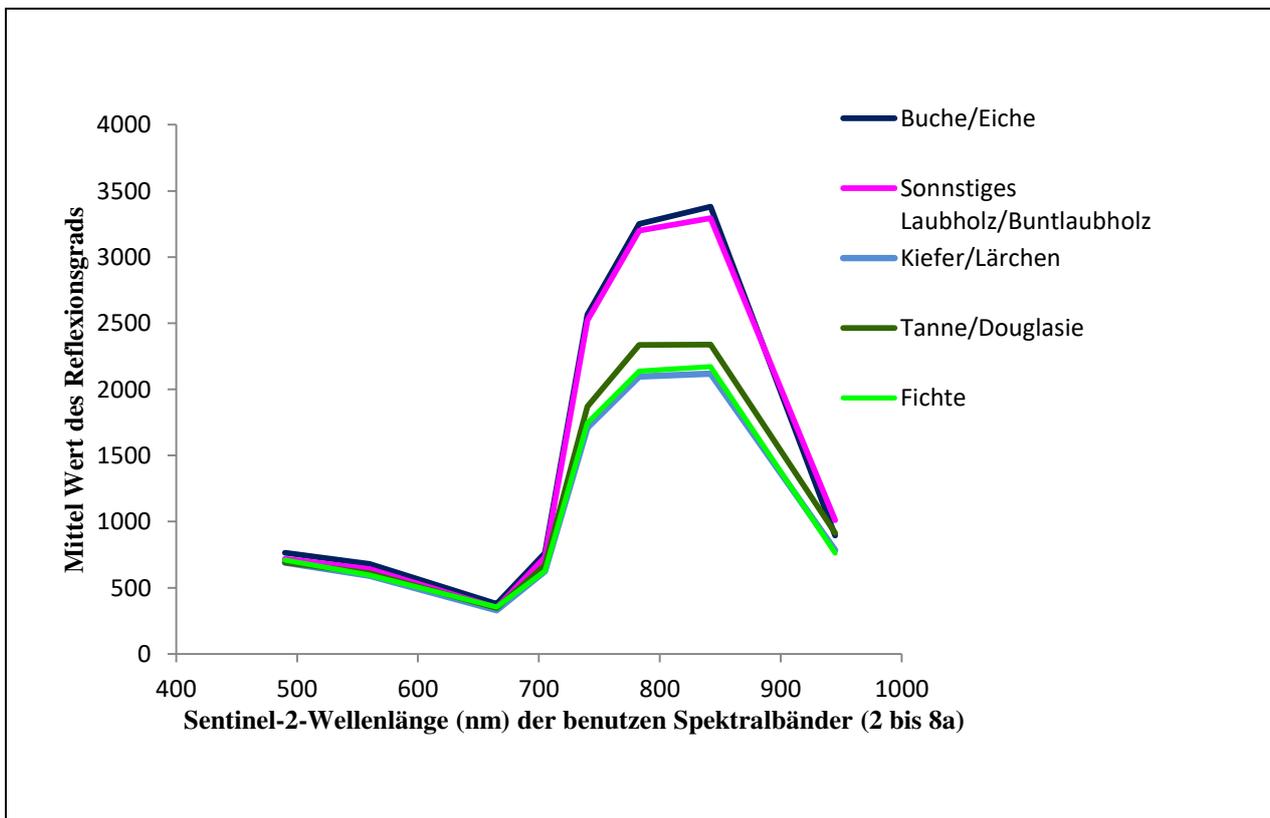


Abbildung 6: Spektrale Signaturen, Trennbarkeit und Reflexionsgrad der klassifizierten Baumartengruppen

**Tabelle 7: Kappa- Index, Gesamtgenauigkeit (Gg), Produzenten (PG) und Nutzergenauigkeit (NG) (Sentinel-2)**

Klassifiziert als	Fichte	Tanne/Douglasie	Buche/Eichen	Kiefer/Lärchen	Sonstiges Holz	Total	(NG)
Fichte	3709	103	0	10	0	3822	97.0%
Tanne/Douglasie	113	1989	69	69	0	2240	88.8%
Buche/Eiche	0	0	3946	43	0	3989	98.9%
Kiefer/Lärchen	0	12	0	710	420	1142	62.2%
Sonstiges Holz	344	28	182	17	1135	1706	66.5%
<b>Total</b>	<b>4166</b>	<b>2132</b>	<b>4197</b>	<b>849</b>	<b>1555</b>	<b>12899</b>	
(PG)	89.03%	93.29%	94.02%	83.63%	72.99%	(Gg)	89.07%
						<b>Kappa</b>	<b>85.49%</b>

Mit einer Kappa-Konkordanz von 85 % und einer Gesamtgenauigkeit (Gg) von 89 % ist die Baumartengruppenklassifikation beurteilt anhand des Referenzdatensatzes der Bundeswaldinventur 3 als „Fast vollständig“ zu beurteilen, was auf die sehr hohe räumliche und spektrale Auflösung des Sentinel-2-Datensatzes und die Auswahl der Klassifikationsmethode zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 7). Im Gegensatz hierzu war Klassifikationsgüte anhand des Referenzdatensatzes von Corine 2012 mit 23 % Kappa und 48 % Gesamtgenauigkeit „schwach“. Aufgrund der nur sehr groben Horizontalauflösung und der groben Vegetationsklassen (Laub-, Nadel- und Mischwald) erscheint der Corine-Daten nicht als Referenzdatensatz für die hochaufgelöste satellitenbasierte Klassifikation geeignet (Tabelle 8).

**Tabelle 8: Kappa- Index, Gesamtgenauigkeit (Gg), Produzenten (PG) und Nutzergenauigkeit (NG) (Corine 2012)**

Klassifiziert als	Nadelwald	Laubwald	Mischwald	Total	(NG)
Nadelwald	3102	127	161	3390	91.5%
Laubwald	2478	2414	1255	6147	39.3%
Mischwald	1638	1047	677	3362	20.1%
<b>Total</b>	<b>7218</b>	<b>3588</b>	<b>2093</b>	<b>12899</b>	<b>0</b>
(PG)	42.98%	67.28%	32.35%	(Gg)	0.48%
				<b>Kappa</b>	<b>23.33%</b>

Die Ergebnisse der Baumartengruppenklassifizierung sind in Abbildung 7 graphisch dargestellt.

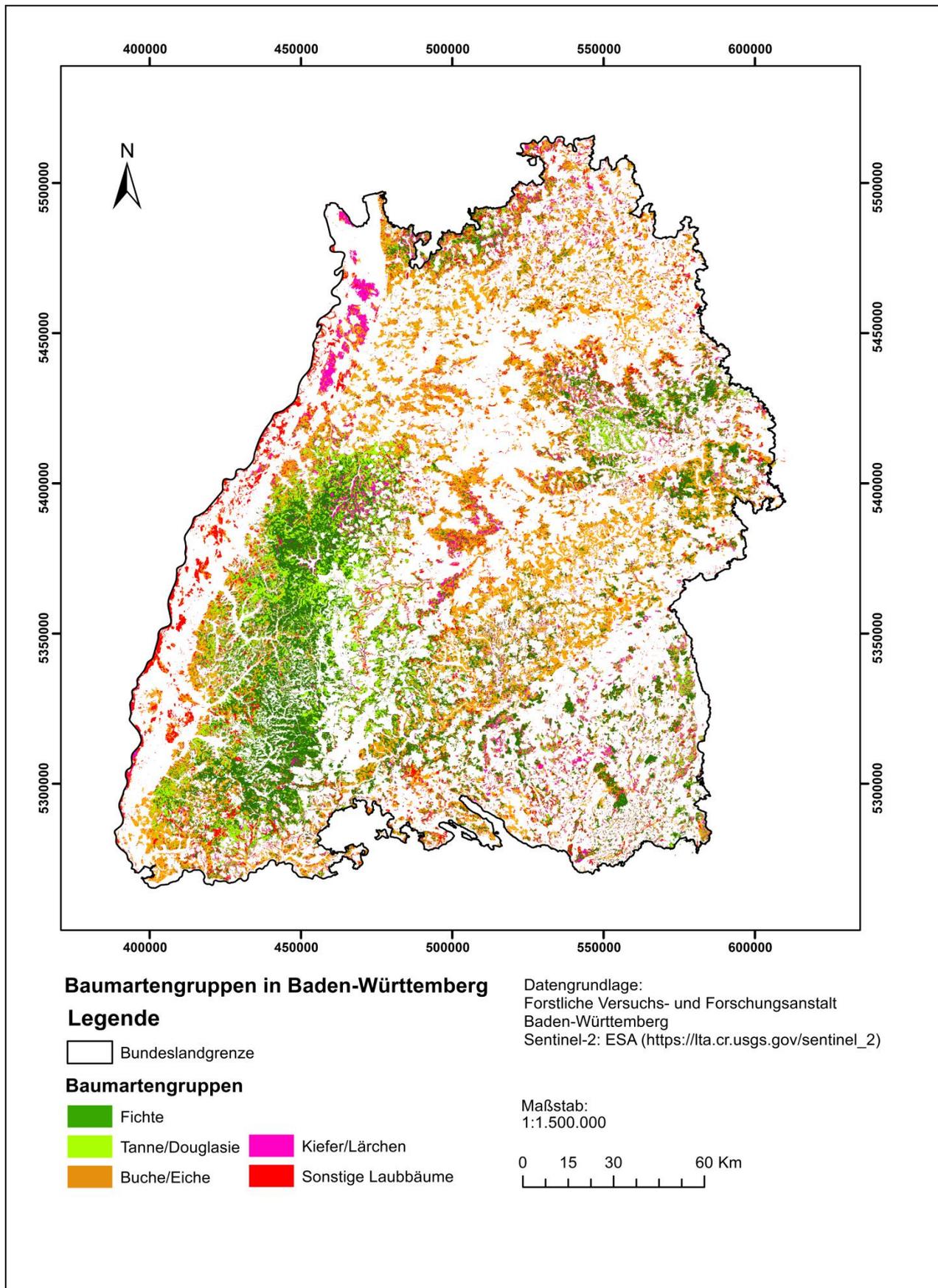
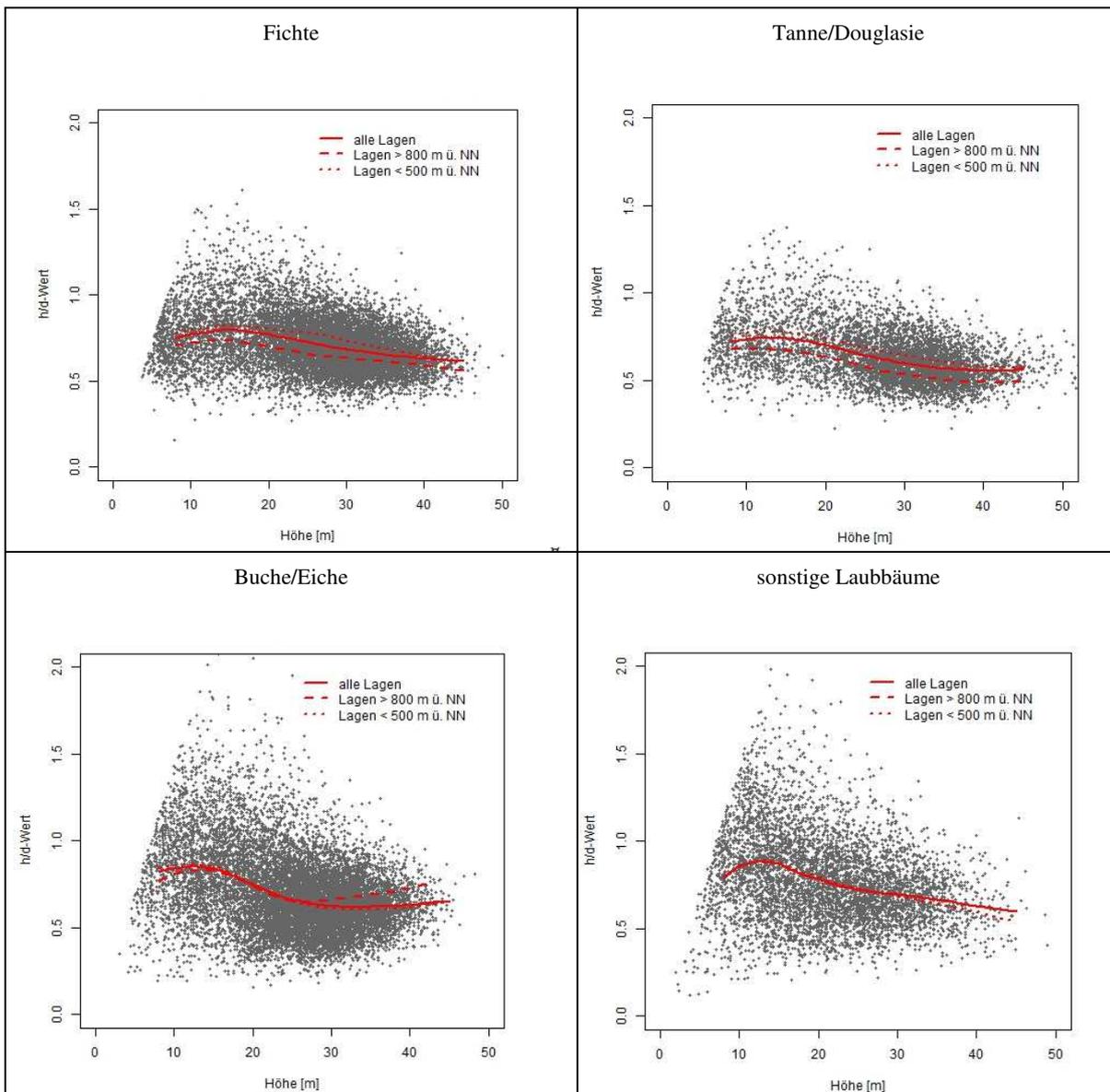


Abbildung 7: Baumartengruppen (BAGRG) in Baden-Württemberg auf der Grundlage von satellitenbasierten Sentinel-2-Klassifizierungen (Eigene Darstellung).

### 3.2 H/D-MODELL

Die H/D-Werte für die fünf Baumartengruppen weisen über der Baumhöhe ein bestimmtes mittleres Muster auf und zeigen eine Abhängigkeit von der Meereshöhe (Abbildung 8). Für alle Baumartengruppen nahmen die H/D-Werte ab einer Baumhöhe von ca. 15 m systematisch ab, wobei die Abnahme bei den Laubbäumen deutlich stärker als bei den Nadelbäumen war. Die Meereshöhenabhängigkeit war besonders bei den Nadelbaumartengruppen dahingehend ausgeprägt, dass in Lagen mit größerer Meereshöhe die H/D-Werte bei gleicher Baumhöhe niedriger waren. Hierin verbirgt sich ein Effekt der Wuchskräftigkeit von Standorten, da mit zunehmender Meereshöhe die Wuchskräftigkeit abnimmt, Bäume bei gleicher Baumhöhe damit älter sind und größere Durchmesser aufweisen als in tiefer gelegenen Bereichen. Dieser Effekt war bei den Laubbäumen nicht in gleichem Maße zu beobachten.



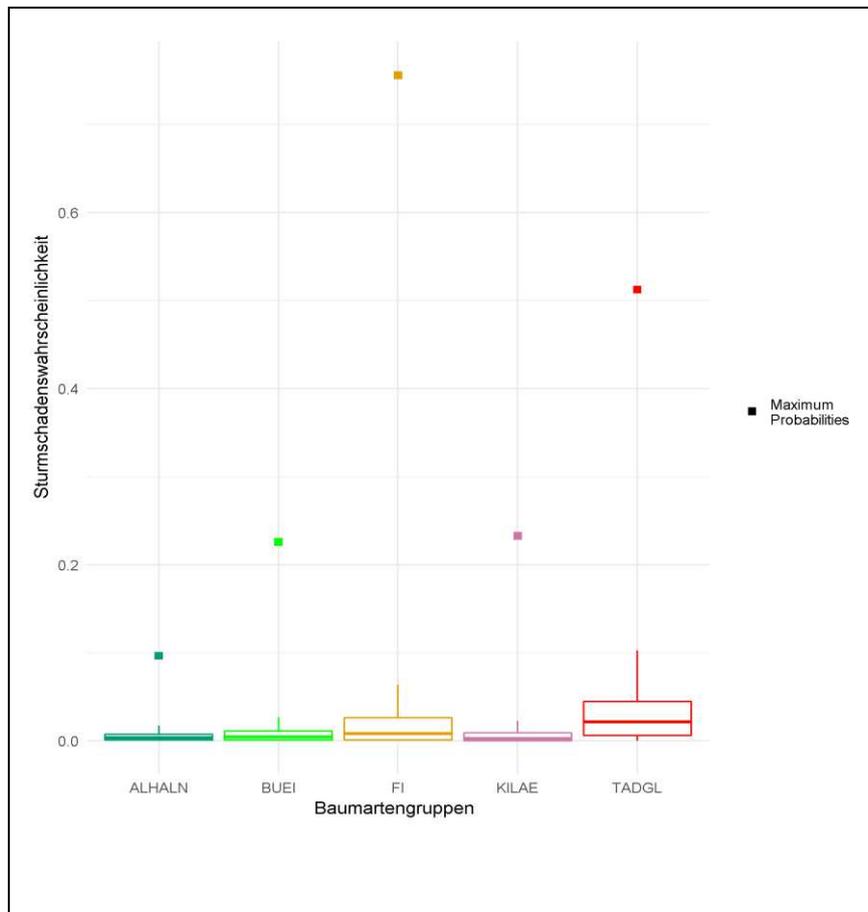
**Abbildung 8: Zusammenhang zwischen H/D-Wert und Baumhöhe (Höhe) dargestellt für die Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche und sonstige Laubbäume. Zugrundeliegende Messwerte sind als graue Punkte darstellen, die Ergebnisse des entwickelten Modells als rote Linien. Der H/D-Wert (syn. Schlankheitsgrad) ist ein Weiser für die mechanische Schaftstabilität von Bäumen und wird im forstlichen Bereich häufig für die Standfestigkeit und Stabilität von Bäumen und Waldbeständen gegenüber Sturm- und Schneebruchereignissen verwendet.**

Durch die Anwendung dieses Modells kann nun an jedem beliebigen Ort in Baden-Württemberg der H/D-Wert eines Baums geschätzt werden, sofern die Eingangsparameter Baumartengruppe, Baumhöhe, Meereshöhe sowie Wuchsgebiet bereitgestellt werden. Und da diese Eingangsparameter nun komplett und flächendeckend vorlagen, wurde der H/D-Wert für jedes Pixel landesweit berechnet.

### 3.3 KARTENSET I – STURMRISIKO HEUTIGER WALDBESTÄNDE

In diesem Kartenset wurden für die Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume die Sturmschadenswahrscheinlichkeit mittels des von Schmidt et al. 2010 entwickelten Modells berechnet und in digitalen Karten mit 20x20m Auflösung dargestellt. Die Variablenauswahl ist im Abschnitt 2.8 beschrieben. Ziel dieses Kartensets war es, das heutige Sturmrisiko vorhandener Waldbestände darzustellen.

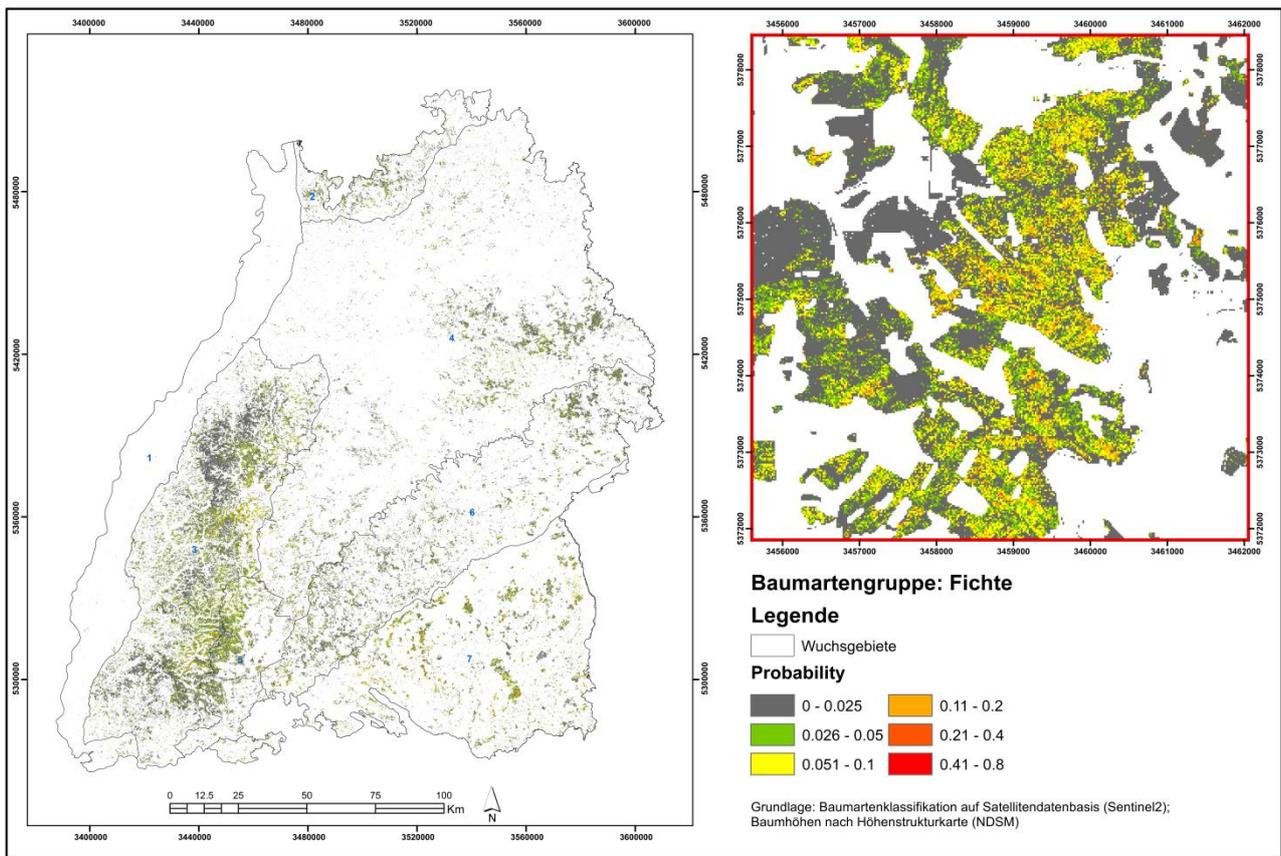
Abbildung 9 zeigt, dass die Sturmschadenswahrscheinlichkeit der Baumartengruppen sehr unterschiedlich, im Mittel für alle Baumartengruppen jedoch sehr gering ist. Für die Baumartengruppe Fichte beträgt der Mittelwert 0.02 (Medianwert von 0.008) und die Maximale Sturmschadenswahrscheinlichkeitswert (Maximum Probabilites) 0.76 (Abbildung 10). Bei der Baumartengruppe Tanne/Douglasie liegt der Mittelwert der Sturmschadenswahrscheinlichkeit bei 0.03 (Medianwert von 0.02) und ist damit am höchsten von allen Baumartengruppen. Der Maximalwert liegt bei 0.51 (Abbildung 11). Für die Baumartengruppe Buche/Eiche war der Mittelwert deutlich geringer bei 0.007 (Medianwert von 0.004) und der Maximalwert lag bei 0.23 (Abbildung 12). Der Mittelwert der Kiefer/Lärchen lag bei 0.006 (Medianwert von 0.002) und der Maximalwert ähnlich wie bei der Baumartengruppe Buche/Eiche bei 0.23 (Abbildung 13). Die sonstigen Laubbäume haben einen Mittelwert von 0.004 (Medianwert von 0.003) und einen geringen maximalen Wert von 0.09 (Abbildung 14). Die Differenz zwischen den Baumartengruppen bzw. deren Sturmschadenswahrscheinlichkeit hängt in erster Linie von der Baumartengruppe und der vorhandenen Baumhöhe ab. Auch die Lage der Waldflächen und die dazugehörige Geländeexponiertheit (Topex) hat Einfluss auf die Schadwahrscheinlichkeit.



**Abbildung 9: Sturmgefährdung des Kartensets I (Sturmschadenswahrscheinlichkeitswerte, Probability), dargestellt für die Baumartengruppen (Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume). Dargestellt sind Wahrscheinlichkeitswerte für reale Bäume, die auf Grundlage von Satellitendaten und Luftbilddaten hergeleitet wurden.**

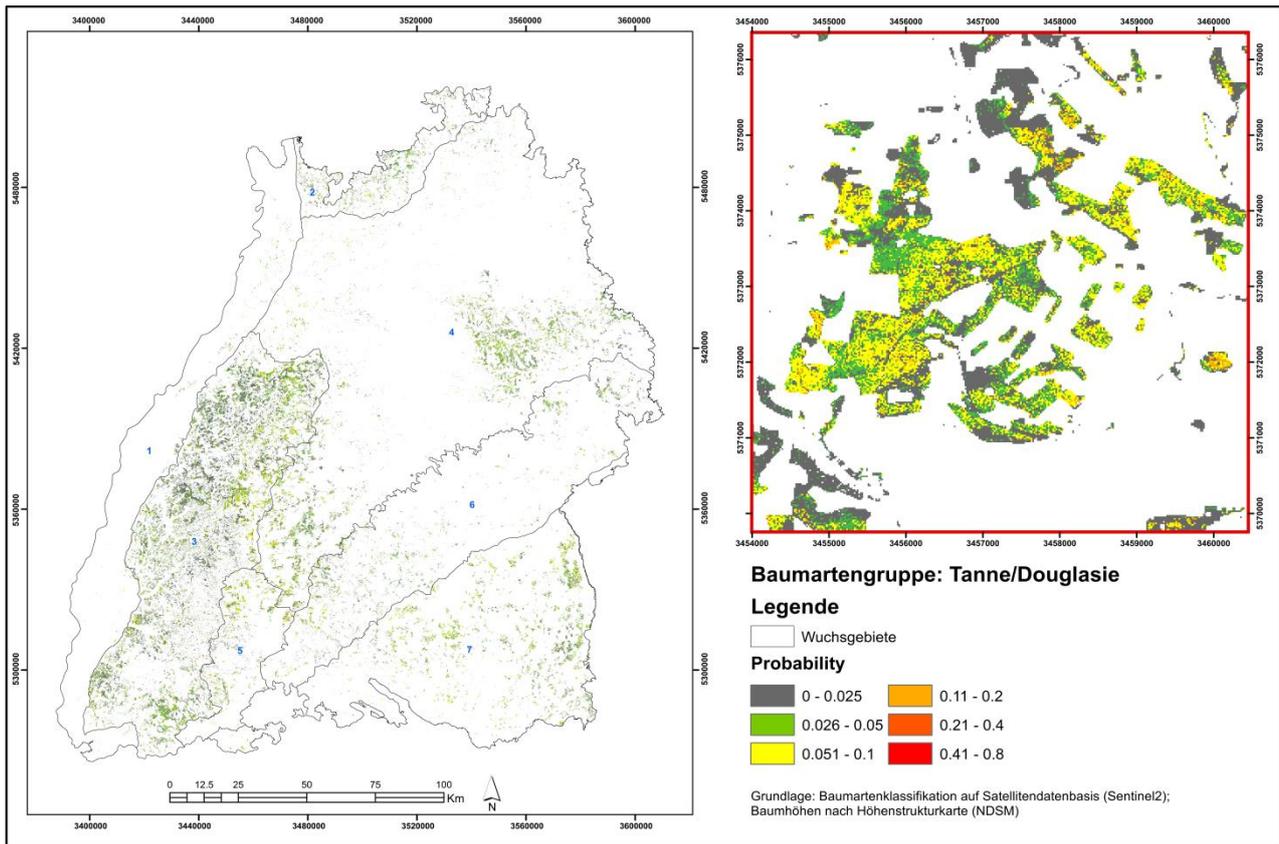
Für jede Baumartengruppe wurde dann eine Sturmgefährdungskarte anhand des realen, aktuellen Vegetationszustands erstellt.

Anhand Abbildung 10 wird der heutige regionale Verbreitungsschwerpunkt der Fichte im Schwarzwald (Wuchsgebiet 3) sowie im östlichen Neckarland (Wuchsgebiet 4), besonders im Schwäbisch-Fränkischen Wald und dem Virngrund deutlich. Jedoch ist die Fichte auch in anderen Regionen weitverbreitet. Die Sturmgefährdung ist nach dem visuellen Eindruck von den höheren Gefährdungsklassen gelb, orange und rot geprägt.



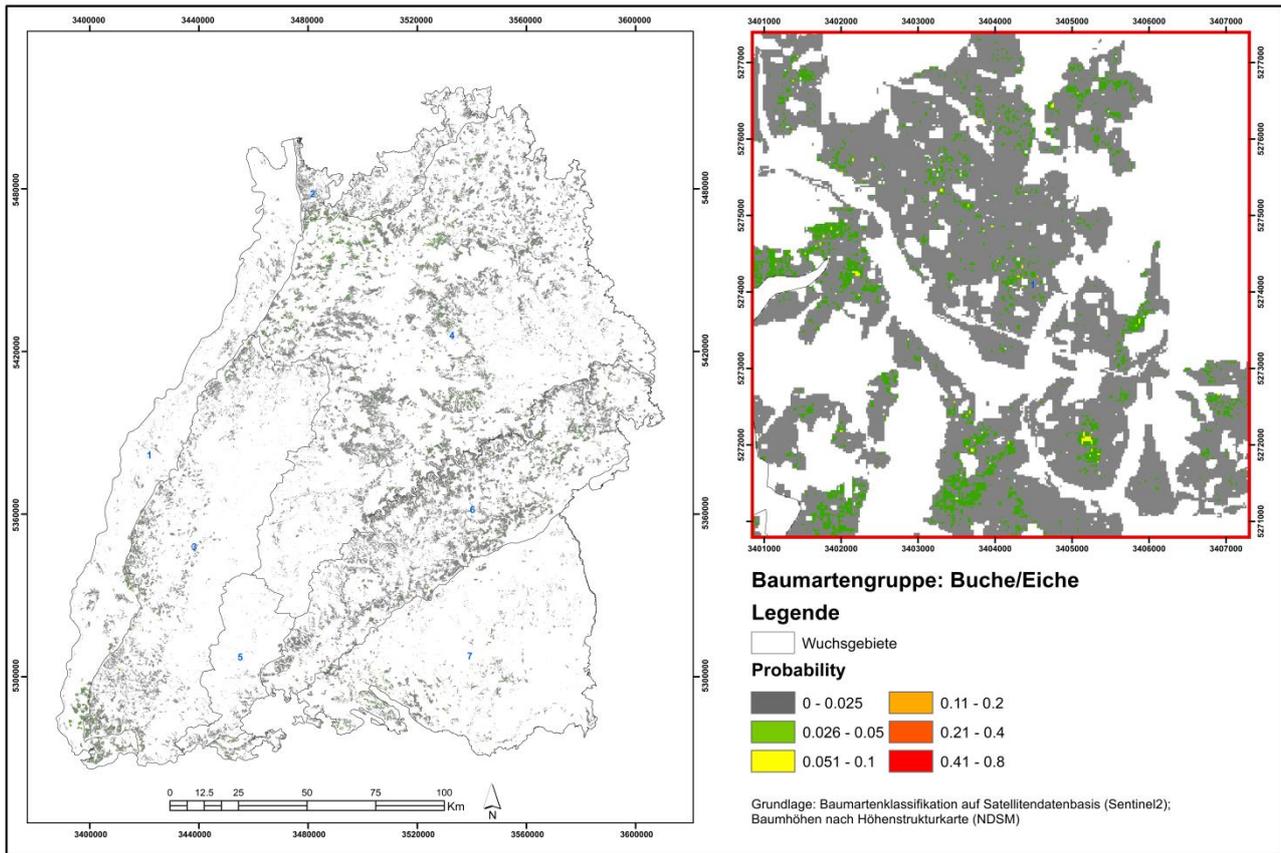
**Abbildung 10: Kartenset I: Sturmgefährdung (Probability) für die Baumartengruppe Fichte (*Picea abies*) anhand deren realen heutigen Vorkommen und deren luftbildbasiert ermittelten Baumhöhen. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

In Abbildung 11 werden die Verbreitungsschwerpunkte von Tanne und Douglasie im Schwarzwald (Wuchsgebiet 3), östlichen Neckarland (Wuchsgebiet 4) und Südwestdeutschen Alpenvorland (Wuchsgebiet 7) deutlich. Ähnlich zur Fichte kommt diese Baumartengruppe jedoch auch in anderen Wuchsgebieten vor. Der allgemeine Farbeindruck der landesweiten Karte ähnelt dem der Fichte, sodass neben den geringen grauen Gefährdungstufen auch gelbe und orange Farbtöne mit erhöhter Gefährdung auftreten.



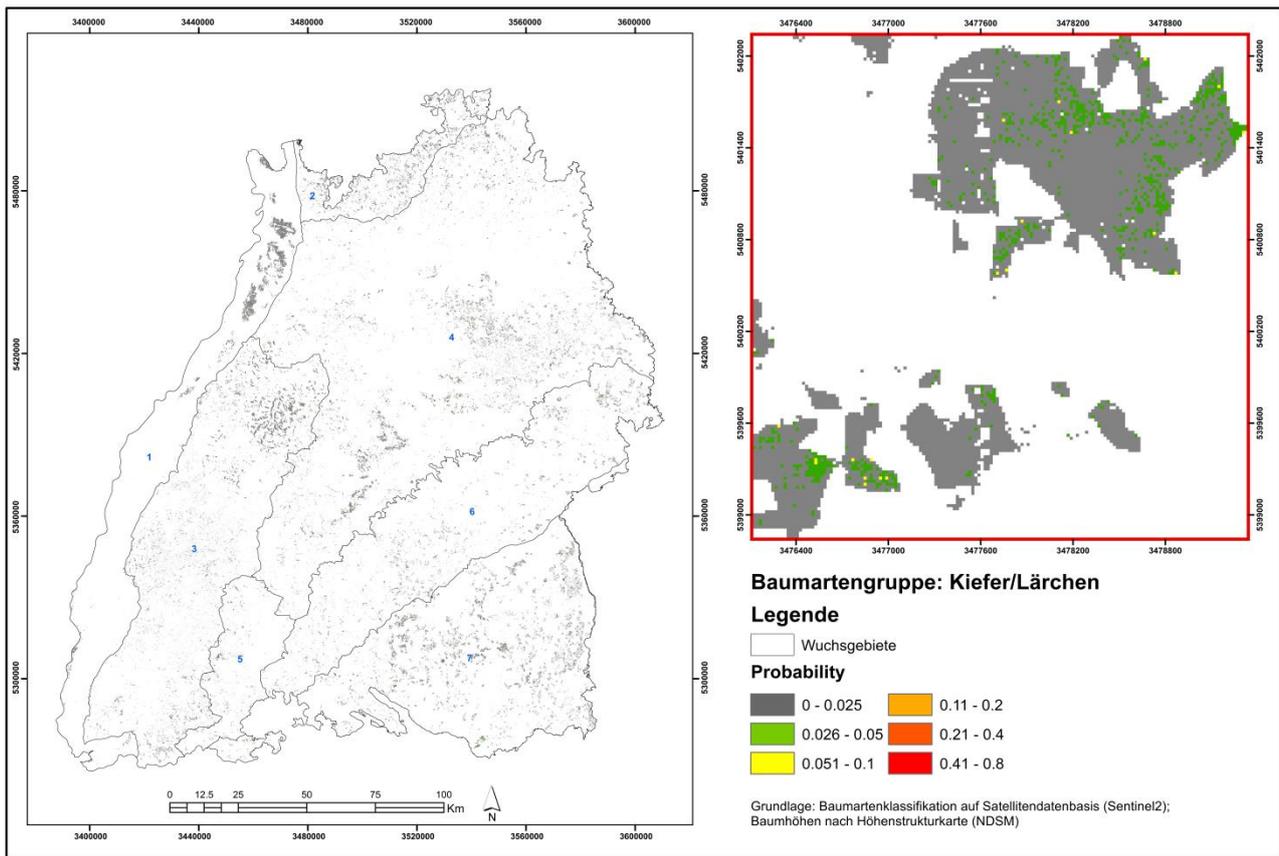
**Abbildung 11: Kartenset I: Sturmgefährdung (Probability) für die Baumartengruppe Tanne/Douglasie (*Abies alba*, *Pseudotsuga menziesii*) anhand deren realen heutigen Vorkommen und deren luftbildbasiert ermittelten Baumhöhen. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**

Bei Buche/ Eiche (Abbildung 12) vermittelt der visuelle Eindruck mit überwiegend grauer Färbung ein generell sehr geringes Gefährdungsniveau. Auffällig ist hier die regionale Verbreitung mit Schwerpunkten auf der Schwäbischen Alb (Wuchsgebiet 6), dem Neckarland (Wuchsgebiet 4), dem Odenwald (Wuchsgebiet 2) und im Schwarzwald (Wuchsgebiet 3) lediglich den niedrigeren Lagen des Westabfalls.



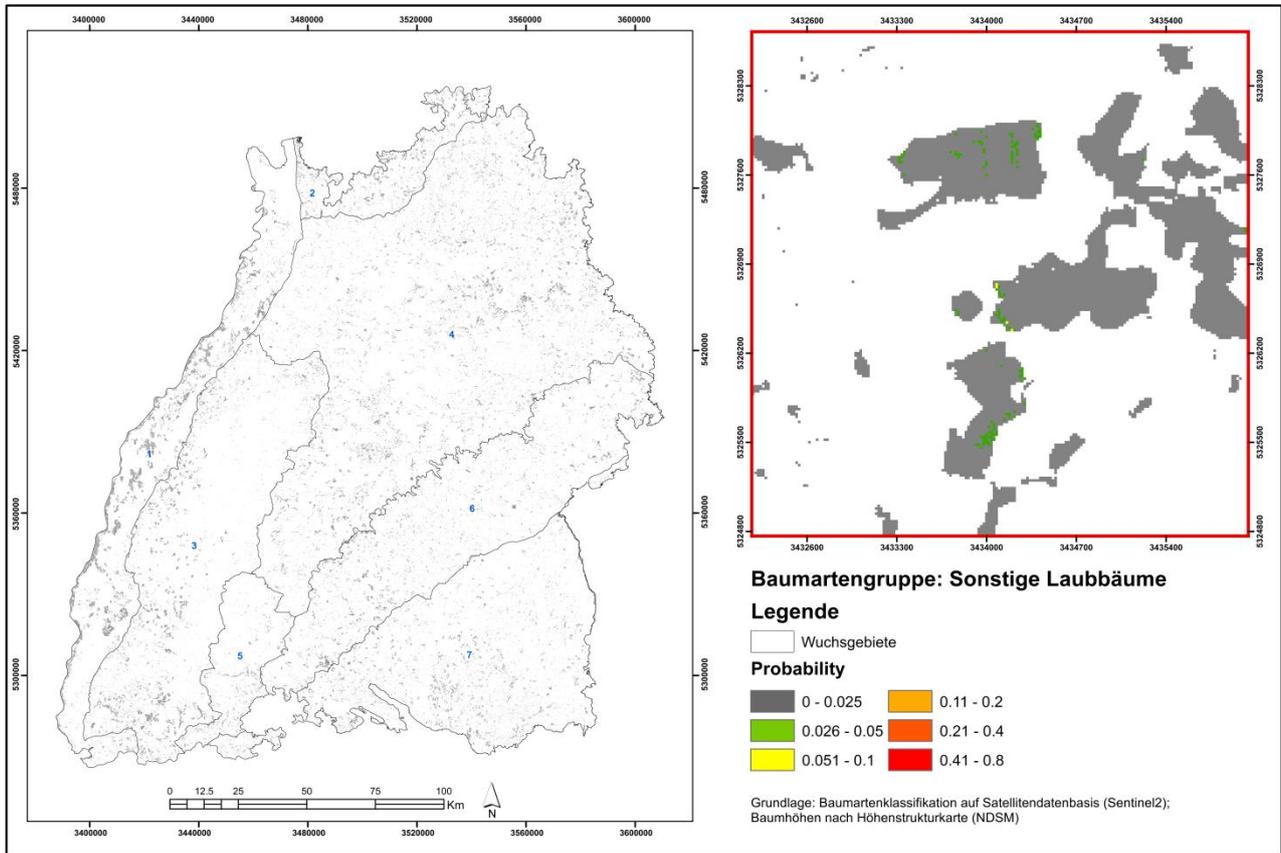
**Abbildung 12: Kartenset I: Sturmgefährdung (Probability) für die Baumartengruppe Buche/Eiche (*Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. rubra*,) anhand deren realen heutigen Vorkommen und deren luftbildbasiert ermittelten Baumhöhen. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**

Für die Kiefer/Lärchen-Gruppe fallen die Verbreitungsschwerpunkte Karlsruher Hard (Wuchsgebiet 1 Ober-rheinisches Tiefland) und Nordschwarzwald (Wuchsgebiet 3) auf. Auch im restlichen Land sind vereinzelte Vorkommen vorhanden. Die generelle Farbgebung ist landesweit bei dieser Gruppe grau und kennzeichnet damit eine generell vergleichsweise geringe Gefährdung (Abbildung 13).



**Abbildung 13: Kartenset I: Sturmgefährdung (Probability) für die Baumartengruppe Kiefer/Lärchen (*Pinus sylvestris*, *Larix decidua*) anhand deren realen heutigen Vorkommen und deren luftbildbasiert ermittelten Baumhöhen. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**

Verbreitungsschwerpunkt der seltenen Baumartengruppe „sonstige Laubbäume“ sind schwer auszumachen, und können allenfalls für das Wuchsgebiet 1 (Oberrheinisches Tiefland) festgestellt werden. In allen anderen Landesteilen und Wuchsgebieten sind seltene Vorkommen flächendeckend vorhanden. Die generell dominierende Farbe Grau suggeriert allgemein sehr niedrige Gefährdung für diese Baumartengruppe (Abbildung 14).



**Abbildung 14: Kartenset I: Sturmgefährdung (Probability) für die Baumartengruppe sonstige Laubbäume ALHALN (*Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus*, *Juglans regia*, *Ulmus* sp., *Populus* sp., *Betula* sp.) anhand deren realen heutigen Vorkommen und deren luftbildbasiert ermittelten Baumhöhen. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**

### 3.4 KARTENSET II – POTENTIELLES STURMRISIKO DER BAUMARTEN

In diesem Kartenset wird die theoretische Gefährdung der fünf wichtigsten Baumartengruppen unter der Annahme eines durchschnittlichen Sturmrisikos abgebildet. Die Abschätzung der potentiellen Gefährdung für Sturmschäden dient als Entscheidungsgrundlage für die Baumartenwahl bei der Neubegründung von Waldbeständen sowie für die Anpassung bzw. den Waldumbau von heute vorhandenen Waldbeständen in Baden-Württemberg. Für die Modellierung und Berechnung dieses Kartensets wurden sogenannte Normbäume (vgl. Tabelle 9) für die Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume ermittelt, die auf Grundlage bestimmter Durchschnittswerte der Bundeswaldinventur 3 hergeleitet wurden.

Für die Ermittlung der Baumhöhen wurde das 80. Perzentil definiert, da sich die Risikokarten an erwarteten Endhöhen der Baumarten orientieren sollten. Für den H/D-Wert wurde das 50. Perzentil gewählt, da der H/D-Wert mit zunehmender Baumhöhe sinkt und keine überdurchschnittlich stabilen Bäume als Beurteilungsgrundlage definiert werden sollten, sondern Normbäume durchschnittlicher Stabilität. In diesem Kartenset spielen die Geländeexponiertheit für alle Baumartengruppen und die Staunässe im Boden für die Baumartengruppe Fichte eine besondere Rolle bei der Berechnung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit, da die baumbezogenen Risikofaktoren bewusst konstant gehalten wurden.

Die sich aus diesen Definitionen ergebenden konkreten Normbaumwerte lagen für alle Baumarten mit Baumhöhen zwischen 29 und 35 m sowie H/D-Werten zwischen 60 und 75 vergleichsweise nahe beieinander. Besonders auffällig niedrige Baumhöhen wurden für den Normbaum der sonstigen Laubbäume (ALHALN) mit knapp 29 m, besonders hohe Baumhöhe für den Normbaum der Tanne/Douglasien-Gruppe festgestellt (Tabelle). Gleichzeitig lag der Norm-H/D-Wert für diese Baumartengruppe vergleichsweise niedrig, wohingegen er beim Normbaum der sonstigen Laubbäume (ALHALN) vergleichsweise hoch lag (74,5).

**Tabelle 9: Normbäume bzw. gemessene Bäume aus der Bundeswaldinventur (2012)**

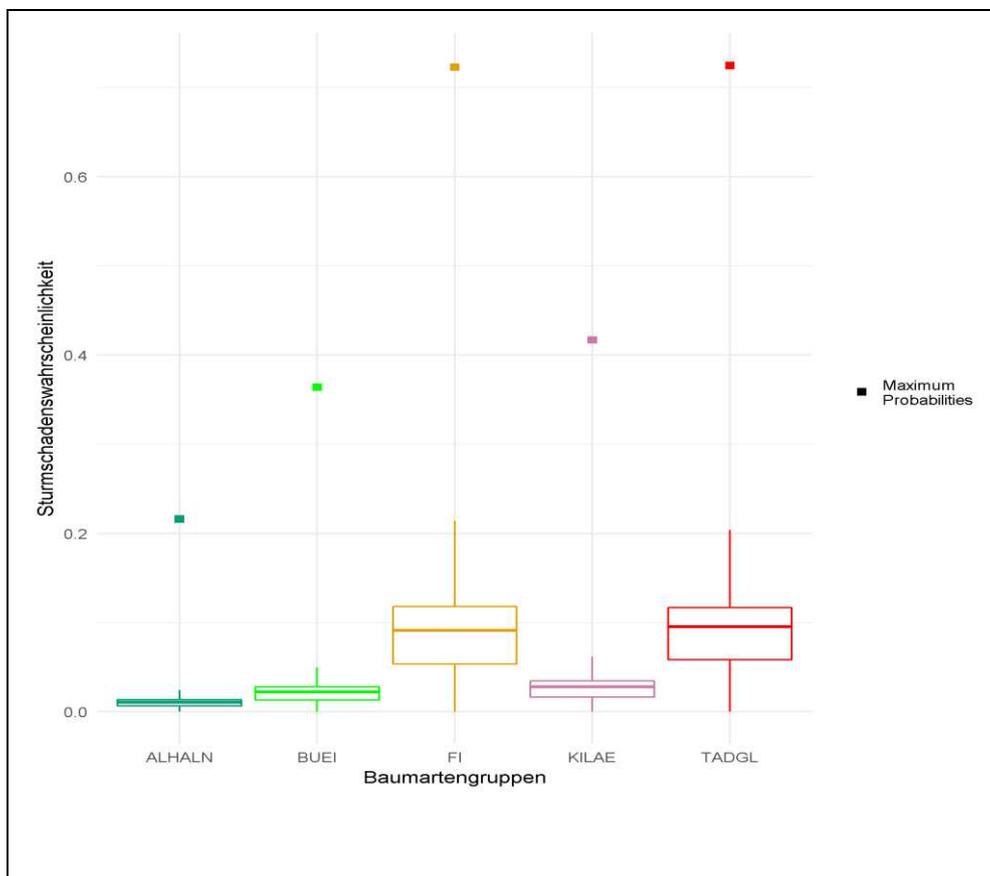
Baumartengruppen (BAGR)	Höhe (Perzentil 0.8)	H/D-Wert (Perzentil 0.5)
FI	33.8	69.12
TADGL	35.3	60.49
BUEI	32.46	65.75
KIELAE	32.1	64.31
ALHALN	28.7	74.52

Aufgrund fehlender Standortkartierung im Privatwald wurden für die Baumartengruppe Fichte drei verschiedene Berechnungen durchgeführt. (1) Im standortskartierten Wald wurden Risikokarten für die Fichte unter Verwendung der bekannten Information ‚Vernässt‘, ‚stark vernässt‘ und ‚nicht vernässt‘ erstellt. Für den gesamten Wald in Baden-Württemberg wurde daraufhin eine Fichten-Risikokarte unter Annahme (2) vernässter Böden sowie eine Risikokarte unter Annahme (3) nicht vernässender Böden erstellt.

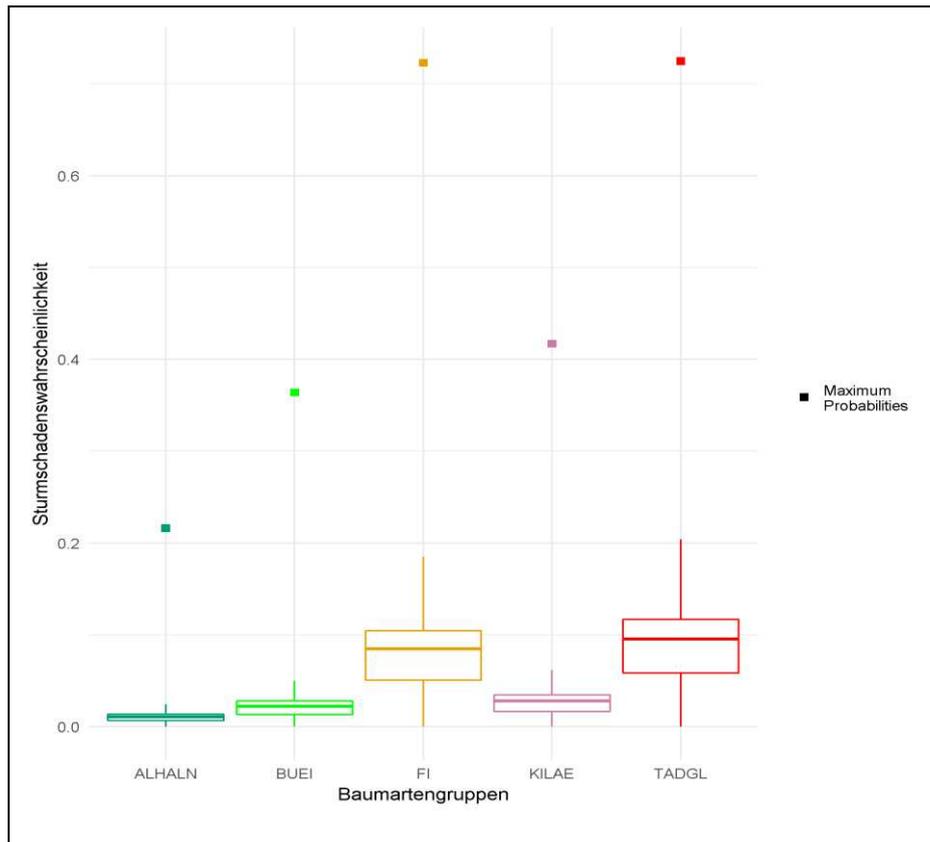
In Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die Ergebnisse der **Sturmgefährdung** für die fünf Baumartengruppen zusammenfassend als Boxplots dargestellt. Dabei zeigt sich der Einfluss des Risikofak-

tors Staunässe auf die Sturmgefährdung der Baumart Fichte. Die Gefährdung der anderen Baumarten ist in allen drei Abbildungen gleich. Auf den standortskartierten Flächen konnte die reale standörtliche Disposition einfließen und führte zu einem Mittelwert und Median von 0.09 (Maximalwert 0.72, Abbildung 15/Abbildung). Für Fichte wurde für den nicht-standortskartierten Wald unter der hypothetischen Annahme nicht-vernässter Standorte mit im Mittel 0.07 eine leicht niedrigere Gefährdung ermittelt (Median bei ca. 0.08, Maximalwert 0.72, Abbildung 16), und unter Annahme vernässter Standorte eine im Mittel deutlich erhöhte Gefährdung von 0.12 (Median von über 0.14, Maximum 0.82, Abbildung 17).

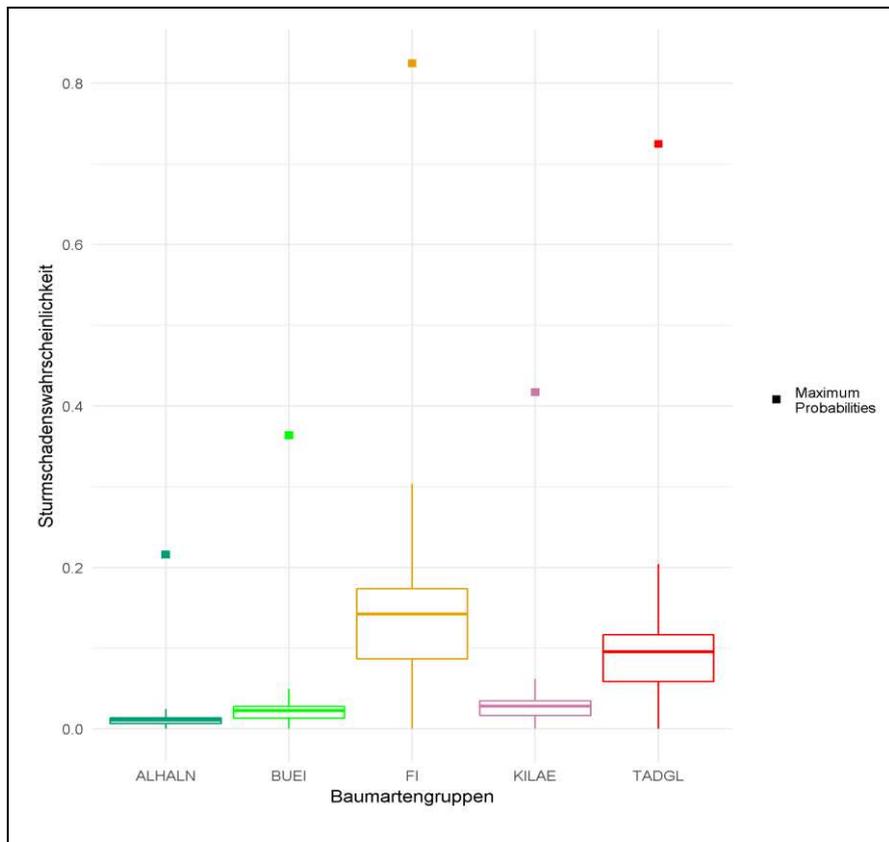
Bei der Baumartengruppe Tanne/Douglasie liegen der Mittelwert der Sturmgefährdung bei 0.08 (Medianwert von 0.09) und der Maximalwert bei 0.72. Für die Baumartengruppe Buche/Eiche war der Mittelwert 0.02 (Median von 0.022) und der Maximalwert lag bei 0.36. Der Mittelwert der Kiefer/Lärchen lag bei 0.025 (Median von 0.027) und der Maximalwert lag bei 0.42. Die sonstigen Laubbäume haben einen Mittelwert von 0.01 (Median von 0.001) und einen geringen maximalen Wert von 0.22.



**Abbildung 15: Sturmgefährdung des Kartensets II (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHALN). Grundlage bei Fichte: reale Staunässeinformation auf Grundlage der regionalzonalen Standorteinheiten im standortskartierten Wald.**

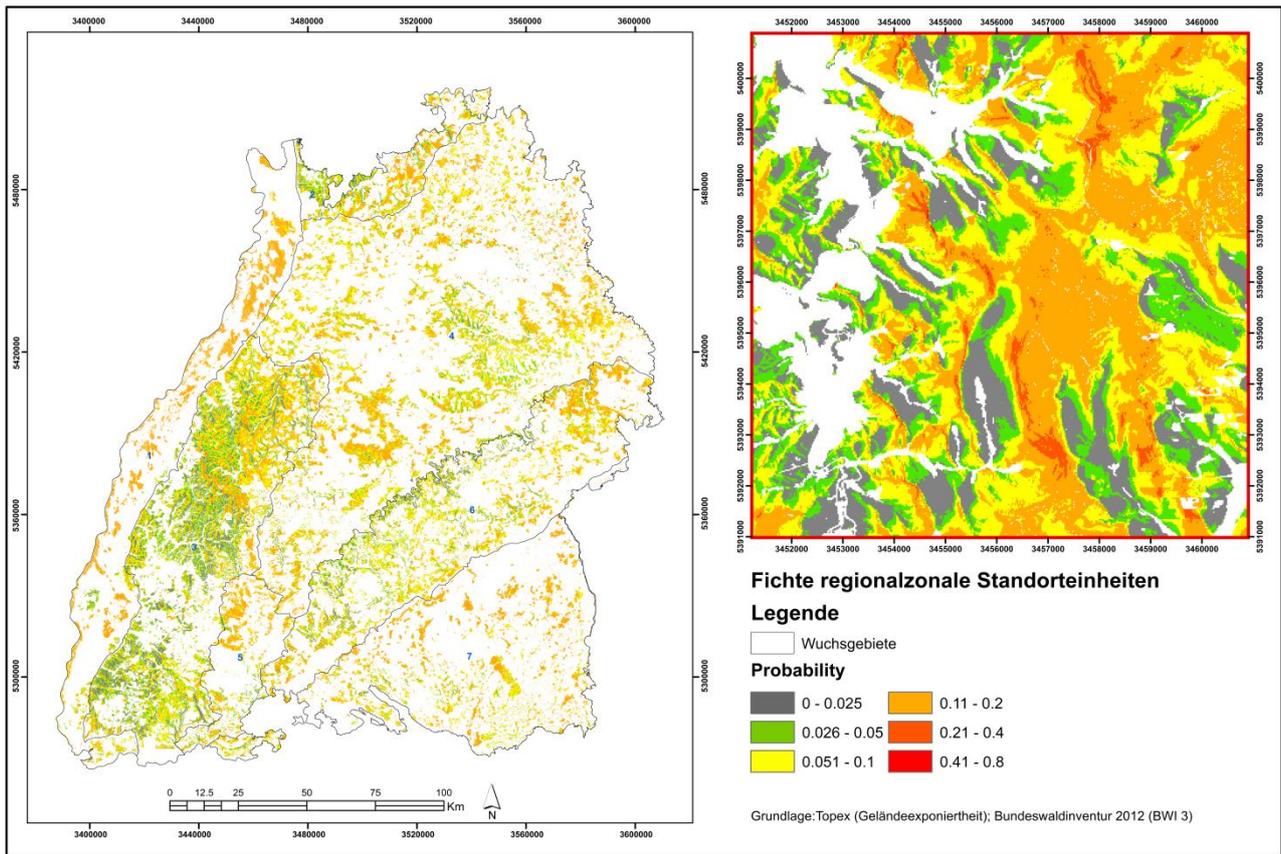


**Abbildung 16: Sturmgefährdung des Kartensets II (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHALN). Grundlage bei Fichte: Nicht vernässte Böden.**

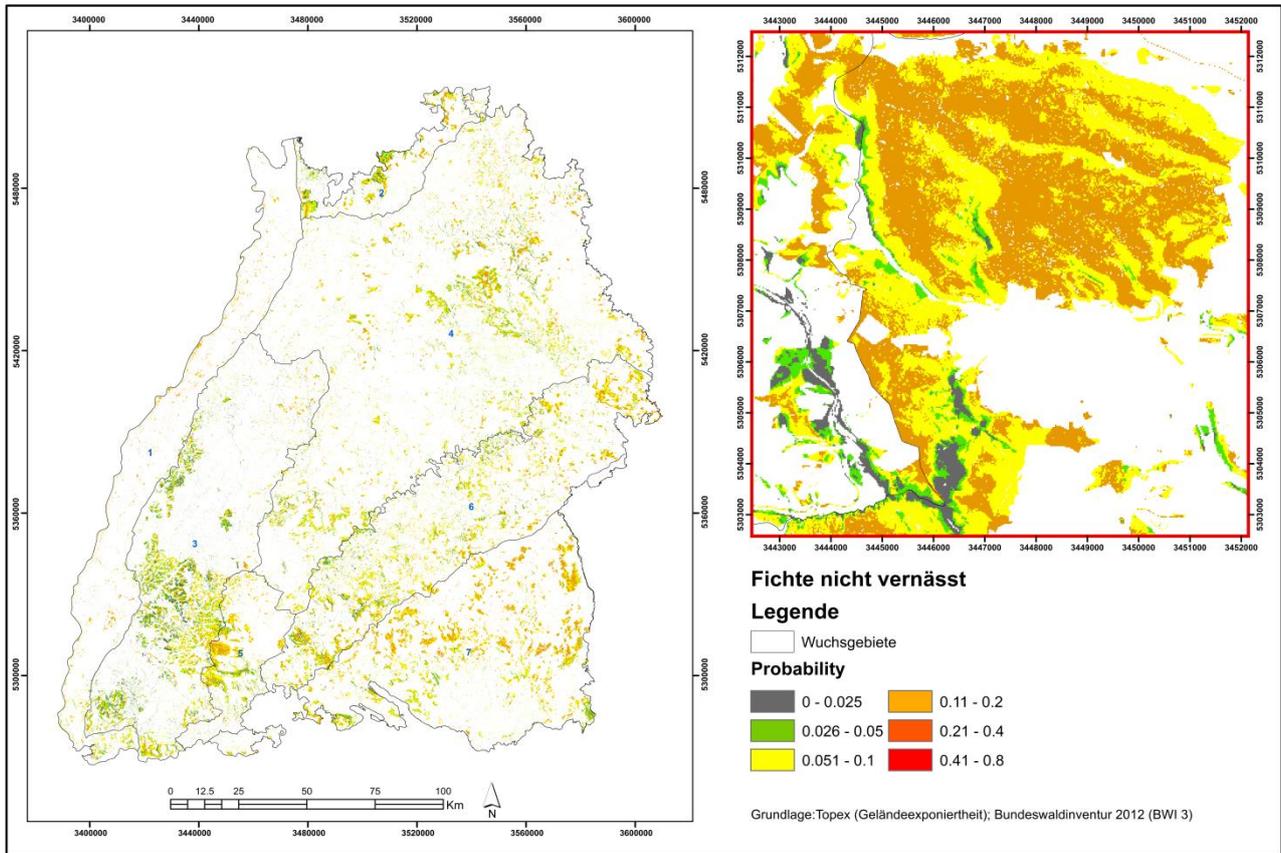


**Abbildung 17: Sturmgefährdung des Kartensets II (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHALN). Grundlage bei Fichte: Vernässte Böden.**

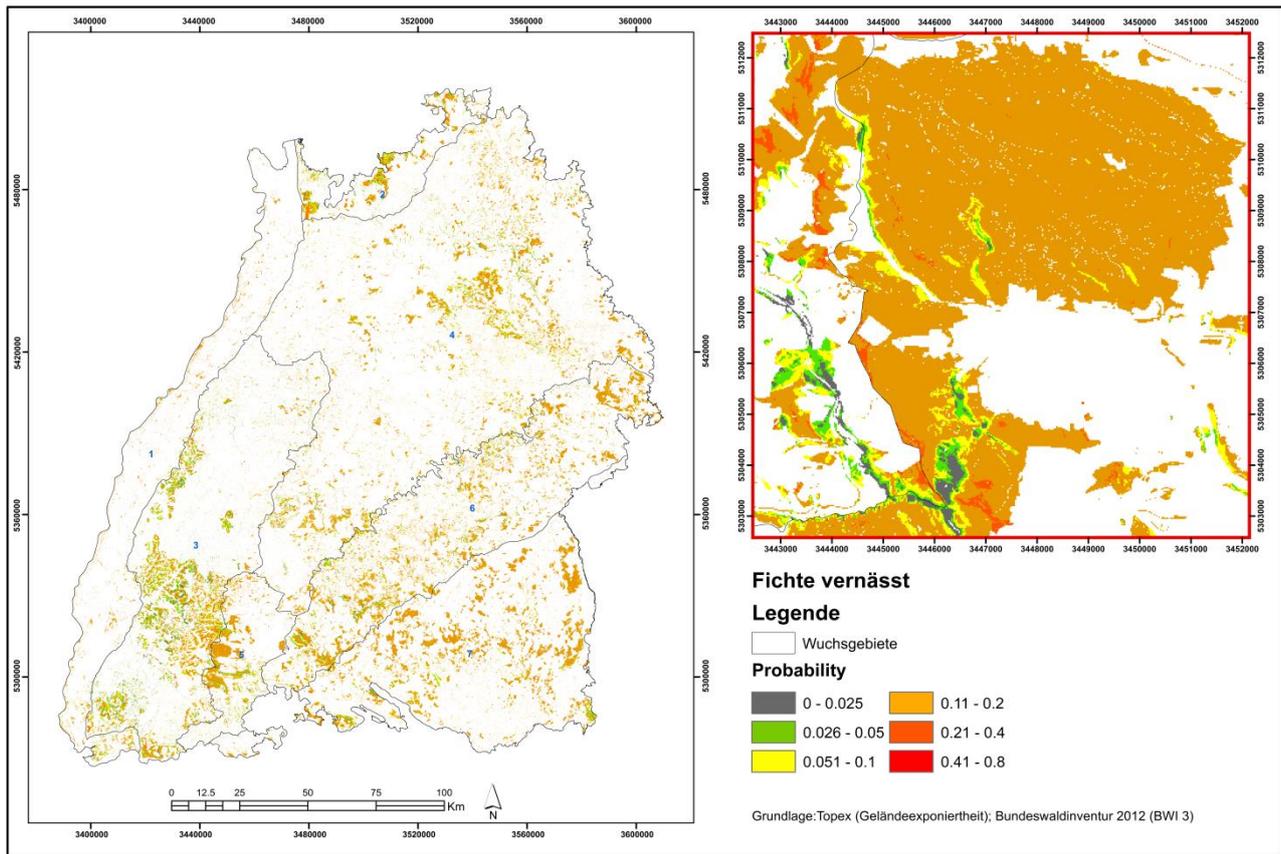
Die landesweite Abbildung 18 ist visuell von Grün-, Gelb- und Orangetönen und somit mittlerer Gefährdung geprägt. Auffällig sind hohe Grün-Anteile der zweitniedrigsten Gefährdungsstufe im mittleren und südlichen Schwarzwald. In Abbildung 18, 19 und Abbildung 20 manifestieren sich die bereits anhand der Boxplots festgestellten Unterschiede in der Sturmgefährdung der Fichte in Abhängigkeit davon, ob sie auf vernässenden oder nicht vernässenden Standorten vorkommt. Der visuelle Vergleich der landesweiten Karten in Abbildung 18, 19 und Abbildung 20 verdeutlicht, dass vernässte Standorte zu höherer Gefährdung führen (höhere Anteile dunklerer Orange-Töne). Der Vergleich der identischen Nahansichten in Abbildung 19 und Abbildung 20 verdeutlicht den Vorteil einer hochauflösenden Gefährdungsbeurteilung, da nun sogar innerhalb von Waldbeständen eine feinörtlich differenzierte Waldbauplanung erfolgen kann, um in besonders exponierten Teilflächen prinzipiell weniger sturmgefährdete Baumarten zu fördern.



**Abbildung 18: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Fichte. Beurteilungsgrundlage für die Staunässeinformation ist die regionalzonale Standorteinheit nach Standortkartierungen. Nicht standortskartierte Waldflächen sind in dieser Karte nicht abgebildet. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**

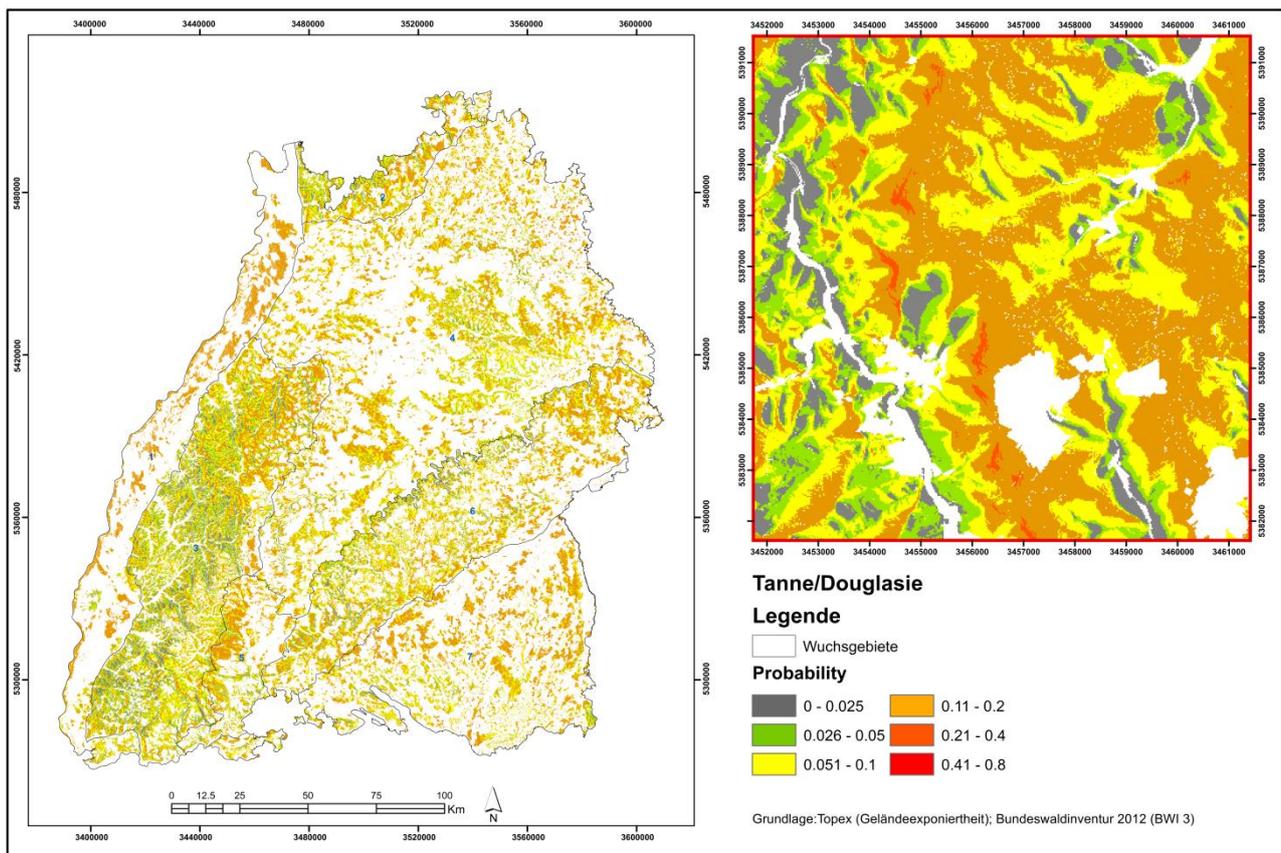


**Abbildung 19: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumart Fichte.** Abgebildet sind lediglich nicht standortskartierte Waldflächen. Beurteilungsgrundlage für die Staunässeinformation ist die hypothetische Annahme „nicht vernässt“. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.



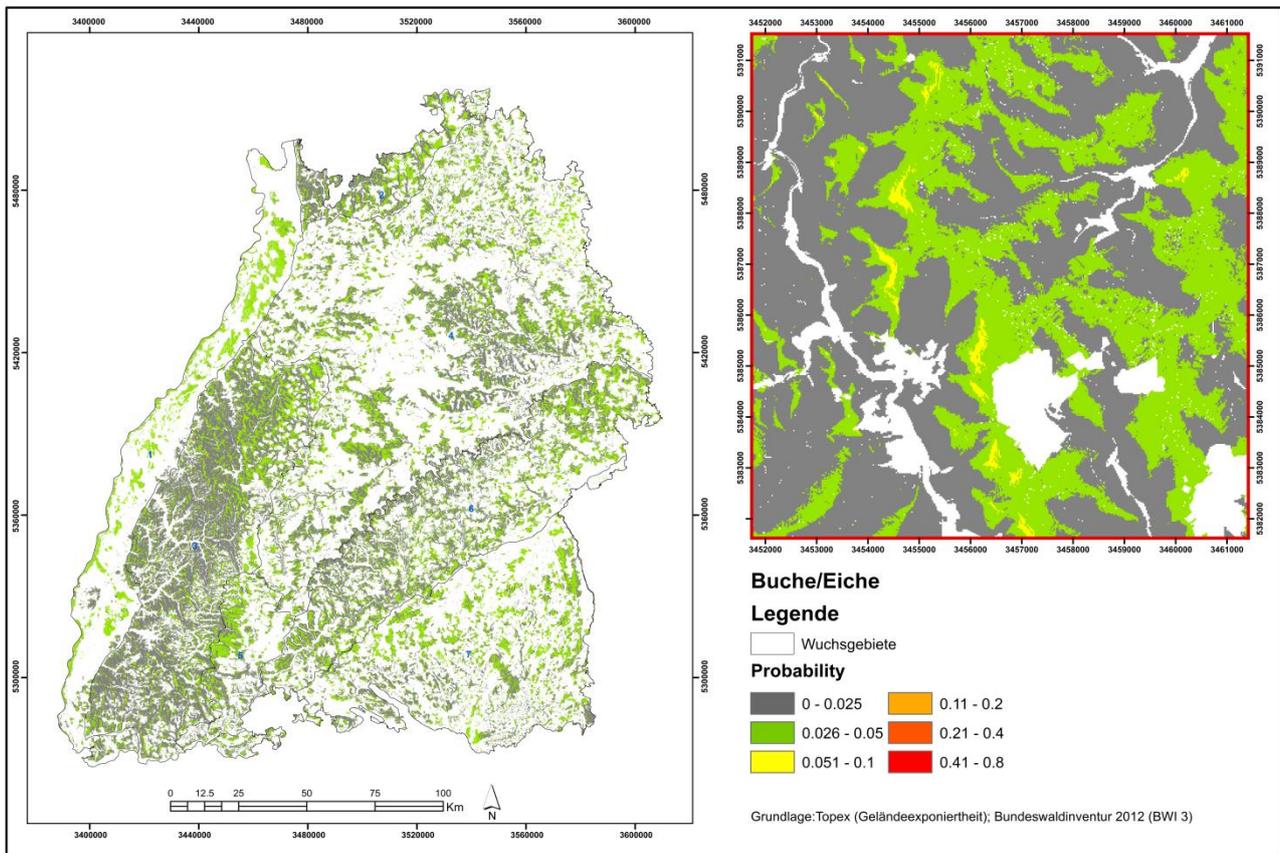
**Abbildung 20: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Fichte. Abgebildet sind lediglich nicht standortskartierte Waldflächen. Beurteilungsgrundlage für die Staunässeinformation ist die hypothetische Annahme „vernässt“. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

Aus der gelb- und orange-dominierten landesweiten Karte für die Baumartengruppe Tanne/Douglasie (Abbildung 21) wird ersichtlich, dass diese Baumartengruppe eine vergleichbar hohe Gefährdung wie die Fichte aufweist. Aus der Nahansicht dieser Abbildung wird ebenfalls deutlich, wie kleinräumig sich die Sturmgefährdung tatsächlich ausdifferenziert, wenn man die Effekte unterschiedlicher Baumdimensionen herausfiltert.



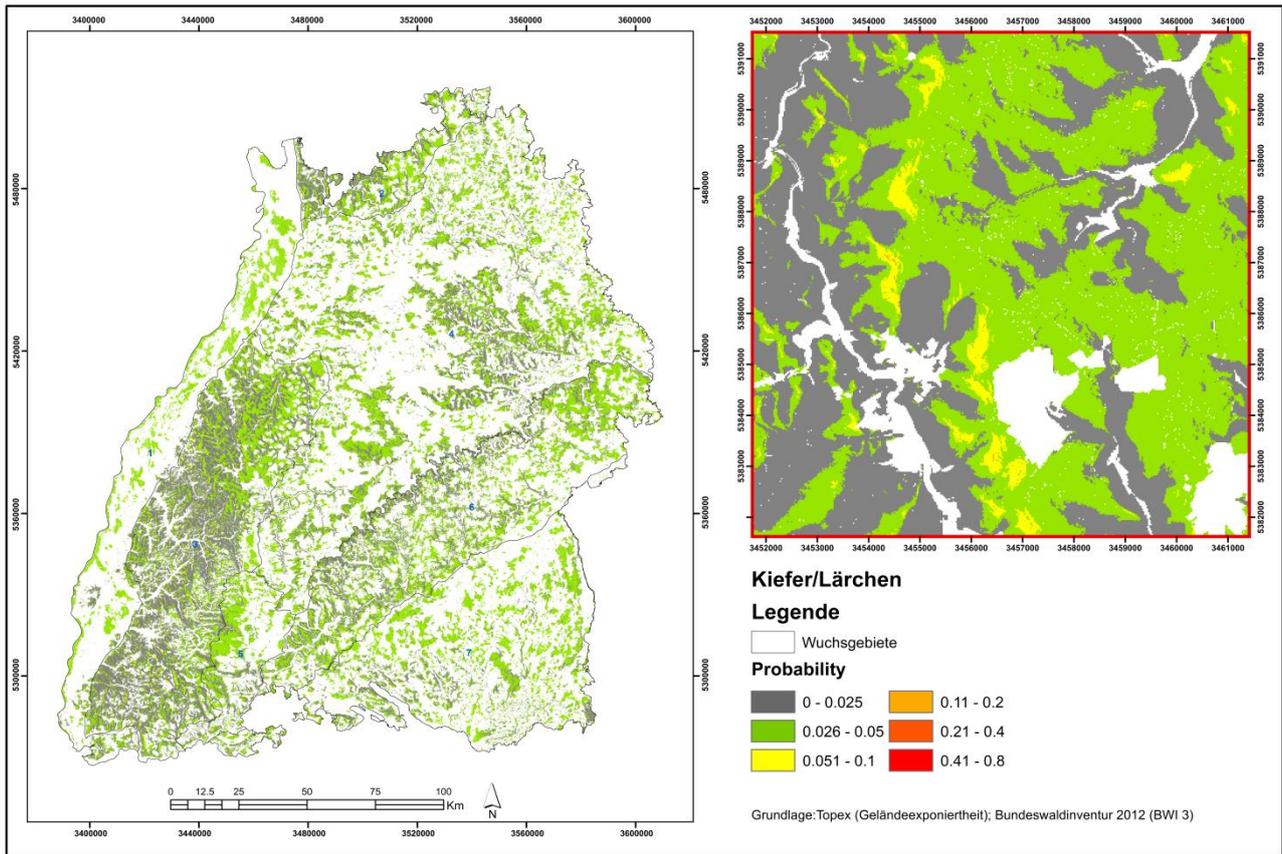
**Abbildung 21: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Tanne/Douglasie. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

Eine sofort ersichtliche Veränderung ergibt sich bei der Betrachtung der Baumartengruppe Buche/Eiche, bei der die landesweit prägenden Farbtöne der Gefährdungskarte grau und grün sind (Abbildung 22). Dieser große Farbunterschied verdeutlicht die systematisch geringere Sturmgefährdung dieser Baumartengruppe.



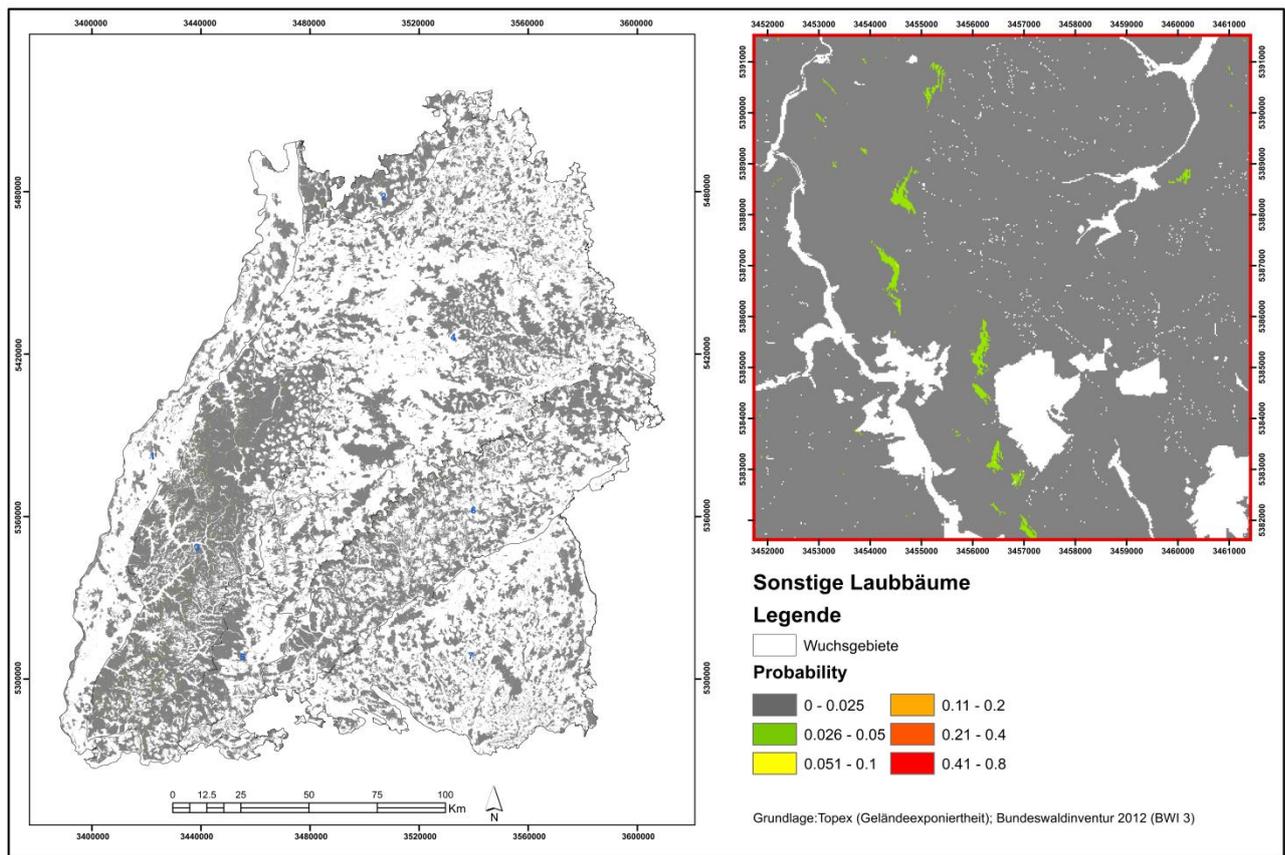
**Abbildung 22: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Buche/Eiche. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

Im Vergleich zu Buche/Eiche ist der überwiegende Farbton der Gefährdungskarte für Kiefer/Lärchen (Abbildung 23) etwas mehr ins Grünliche und Gelbliche verschoben und zeigt damit die im Mittel etwas höhere Gefährdung an. Das Gefährdungsniveau liegt jedoch deutlich unter dem von Fichte und Tanne/Douglasie.



**Abbildung 23: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Kiefer/Lärchen. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

Die aufgrund der landesweit dominierenden Grautöne geringste Gefährdung wurde für die Baumartengruppe sonstige Laubbaumarten ermittelt (Abbildung 24). Nur in den extremsten Kammlagen werden für diese Baumarten Sturmschadensgefährdungswerte von 0,025 überschritten.



**Abbildung 24: Kartenset II: Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe sonstige Laubbäume. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

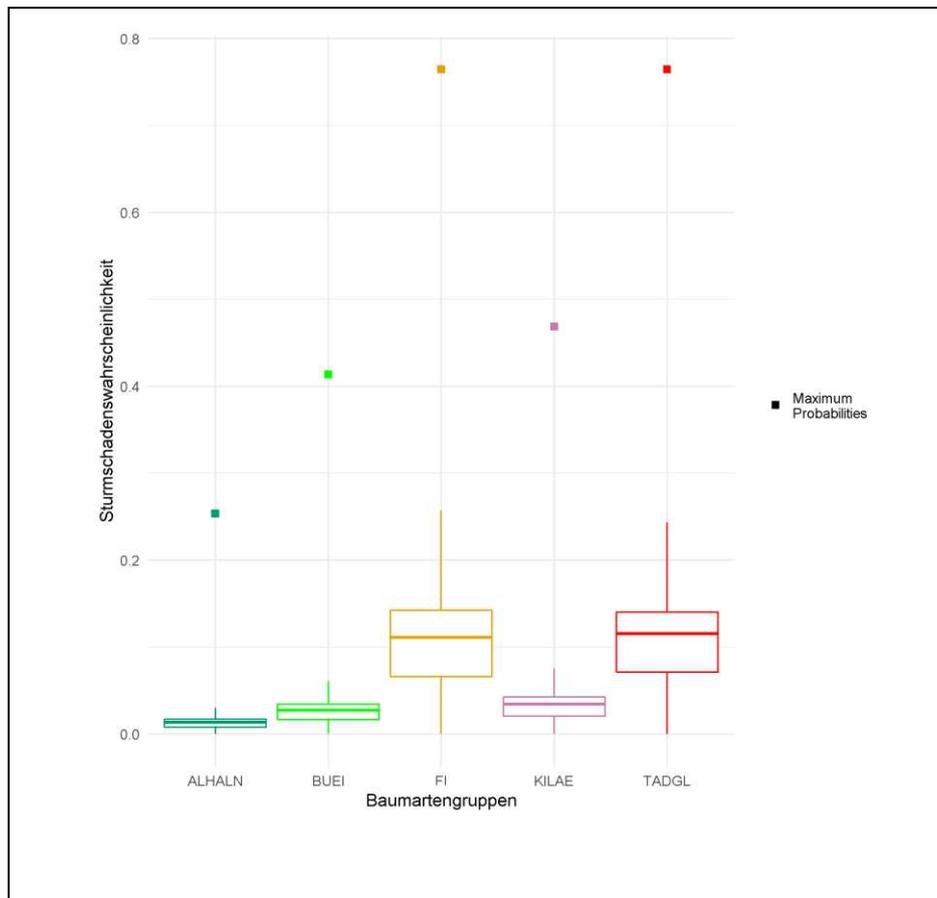
Die dargestellten Ergebnisse in Kartenset II verdeutlichen zunächst anschaulich die großen Unterschiede in der Sturmgefährdung zwischen den Baumarten. Weiter werden dann der große Einfluss der Geländeexponiertheit und die kleinräumige Differenzierung der Gefährdung auf der Grundlage der hochaufgelösten Eingangsinformationen deutlich. Speziell für die Baumart Fichte werden auch die Unterschiede der Gefährdung in Abhängigkeit der Staunässe im Boden deutlich. Die Schadwahrscheinlichkeiten der Karten in Kartenset II liegen allgemein deutlich höher im Vergleich zu denen in Kartenset I, was durch die Definition der Baumhöhe als Normbäume mit dem 80. Perzentil der Baumhöhe heute vorhandener Bäume begründet ist.

Zum allgemeinen Verständnis der Ergebnisse ist anzumerken, dass die Kartensets II und III eine Potentialbetrachtung darstellen und somit für die waldbauliche Entscheidung der Baumartenwahl als Vergleich zwischen dem standardisierten Sturmgrundrisiko der Baumarten herangezogen werden kann. Im Gegensatz hierzu stellt das Kartenset I das konkrete Sturmrisiko heutiger Waldbestände dar (*in situ* Vulnerabilität) und kann für die Identifizierung heute besonders gefährdeter Waldbestände verwendet werden, um z. B. bei den besonders vulnerablen Waldbeständen mit dem risikoreduzierenden Waldumbau zu beginnen. Sinnvollerweise kann zuerst das Kartenset I zur Identifizierung vordringlicher Waldbestände betrachtet werden, um dann in den Kartensets II und III zu ermitteln, welche Baumarten mit geringerem Sturmgrundrisiko bei der Neubegegründung der Waldbestände zu begünstigen oder neu zu pflanzen wären.

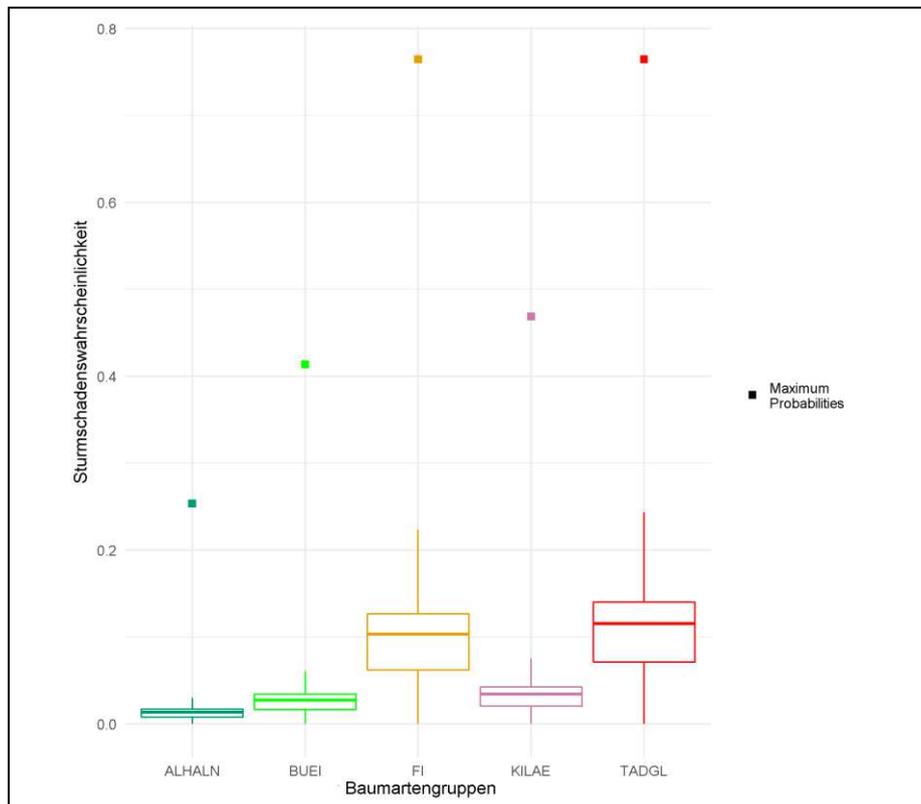
### 3.5 KARTENSET III - POTENTIELLES STURMRISIKO DER BAUMARTEN UNTER KLIMAWANDEL

In diesem Kartenset wird nach dem gleichen Verfahren wie im vorhergehenden Kartenset II die theoretische Gefährdung der fünf wichtigsten Baumartengruppen, allerdings unter der Annahme eines sich möglicherweise unter Klimawandel moderat erhöhenden Sturmrisikos abgebildet.

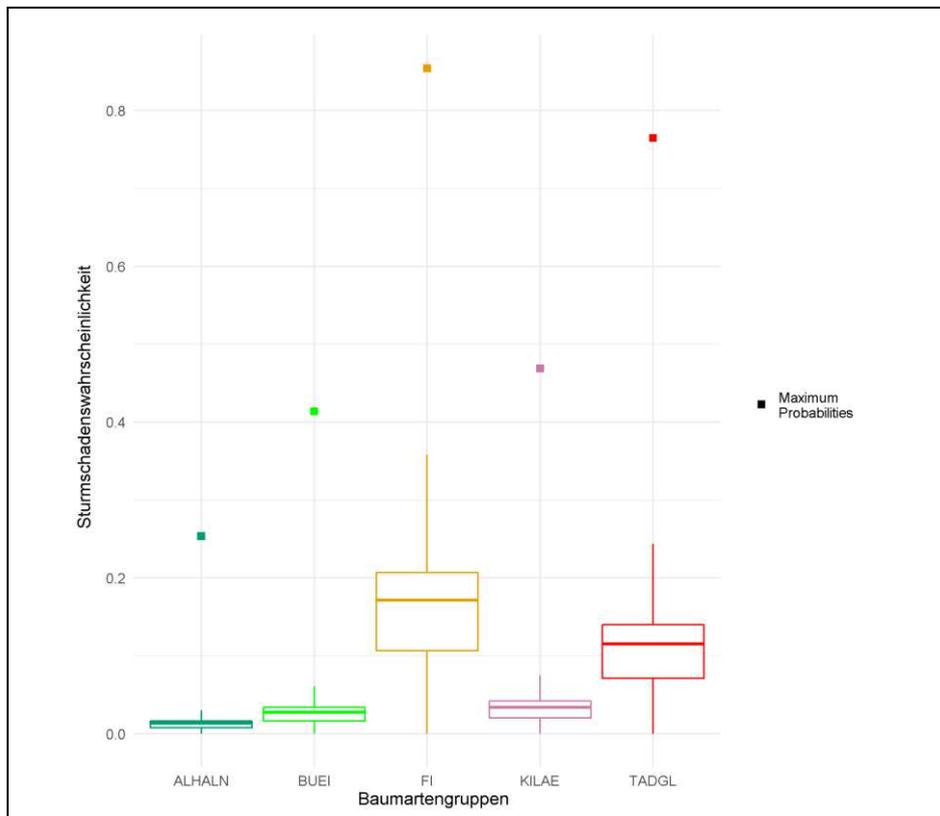
Für die Baumartengruppe Fichte auf regionalzonalen Standorteinheiten beträgt der Mittelwert der Sturmgefährdung unter Annahme möglicherweise leicht steigender Böengeschwindigkeiten 0.10 (Medianwert von 0.11) und der Maximalwert (Maximum Probabilities) 0.76 (Abbildung 25). Auf nicht vernässten Böden liegt der Maximalwert bei 0.76 und der Mittelwert 0.09 (Abbildung 26, Medianwert von 0.10). Auf vernässten Böden beträgt der Mittelwert 0.15 und der Medianwert 0.17, der maximale Wert liegt bei 0.85 (Abbildung 27). Bei der Baumartengruppe Tanne/Douglasie liegt der Mittelwert der Sturmschadenswahrscheinlichkeit bei 0.10 (Medianwert von 0.11) und die Maximalwerte bei 0.76 (Abbildung 25) Für die Baumartengruppe Buche/Eiche war der Mittelwert 0.03 (Median 0.028) und der Maximalwert lag bei 0.41. Der Mittelwert der Kiefer/Lärchen lag bei 0.032 (Median von 0.034) und der Maximalwert lag bei 0.46. Die sonstigen Laubbäume wiesen einen Mittelwert von 0.012 (Median 0.013) und einen geringen maximalen Wert von 0.25 auf. Diese Werte liegen damit systematisch über den jeweiligen Vergleichswerten von Kartenset II.



**Abbildung 25:** Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung des Kartensets III (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHANL). Grundlage bei Fichte: reale Staunässeinformation auf Grundlage der regionalzonalen Standorteinheiten im standortskartierten Wald.

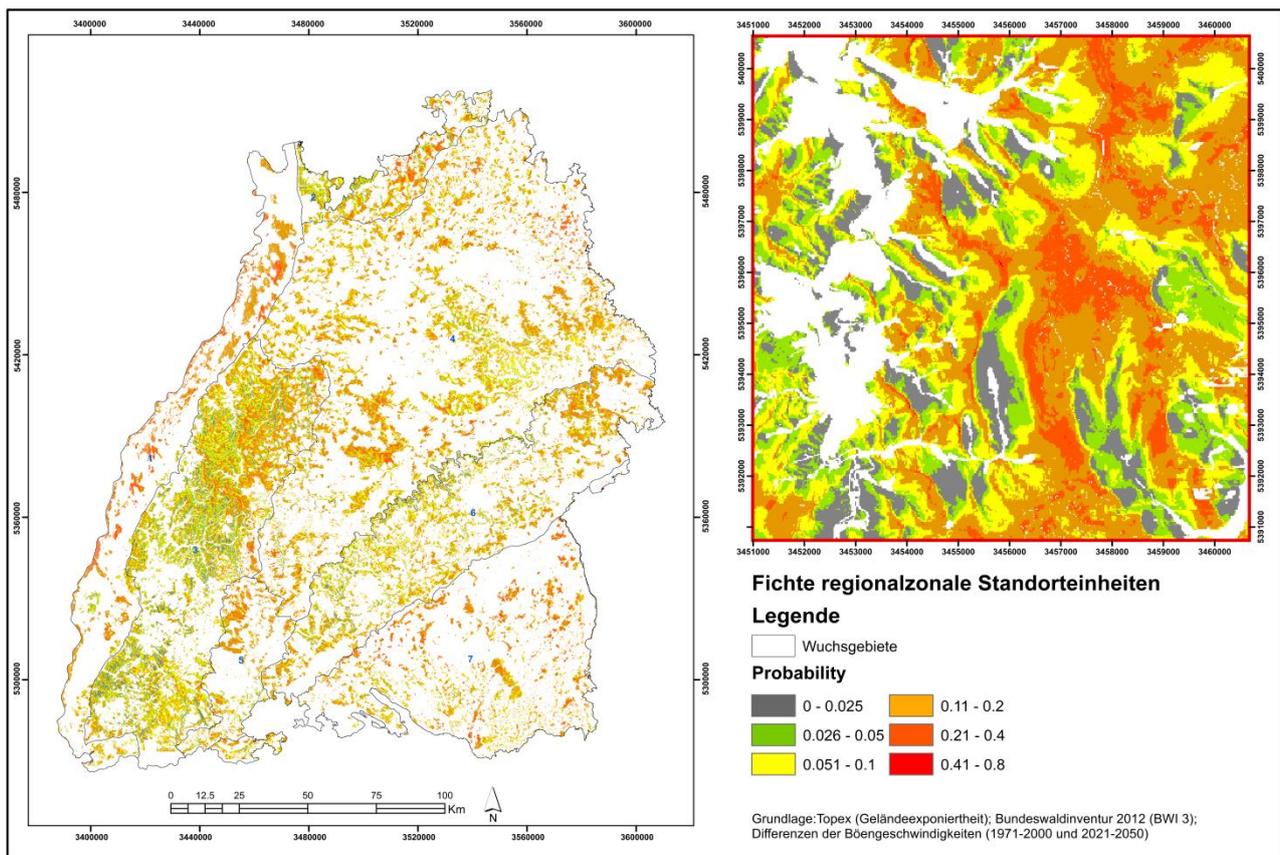


**Abbildung 26: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung des Kartensets III (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHALN). Grundlage bei Fichte: Nicht vernässte Böden.**

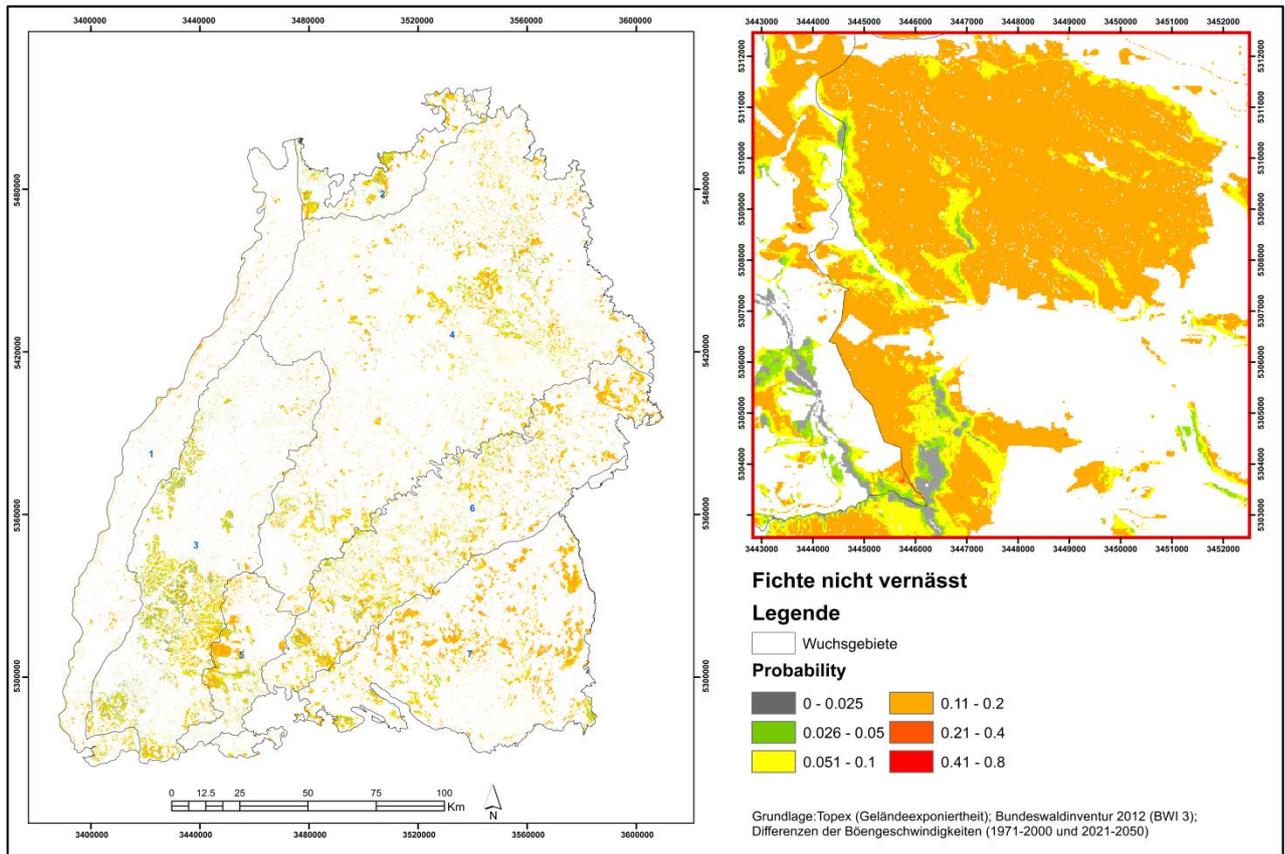


**Abbildung 27: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung des Kartensets III (Probability, Sturmschadenswahrscheinlichkeit), dargestellt für die fünf Baumartengruppen Fichte, Tanne/Douglasie, Buche/Eiche, Kiefer/Lärchen und sonstige Laubbäume (ALHALN). Grundlage bei Fichte: Veräsnste Böden.**

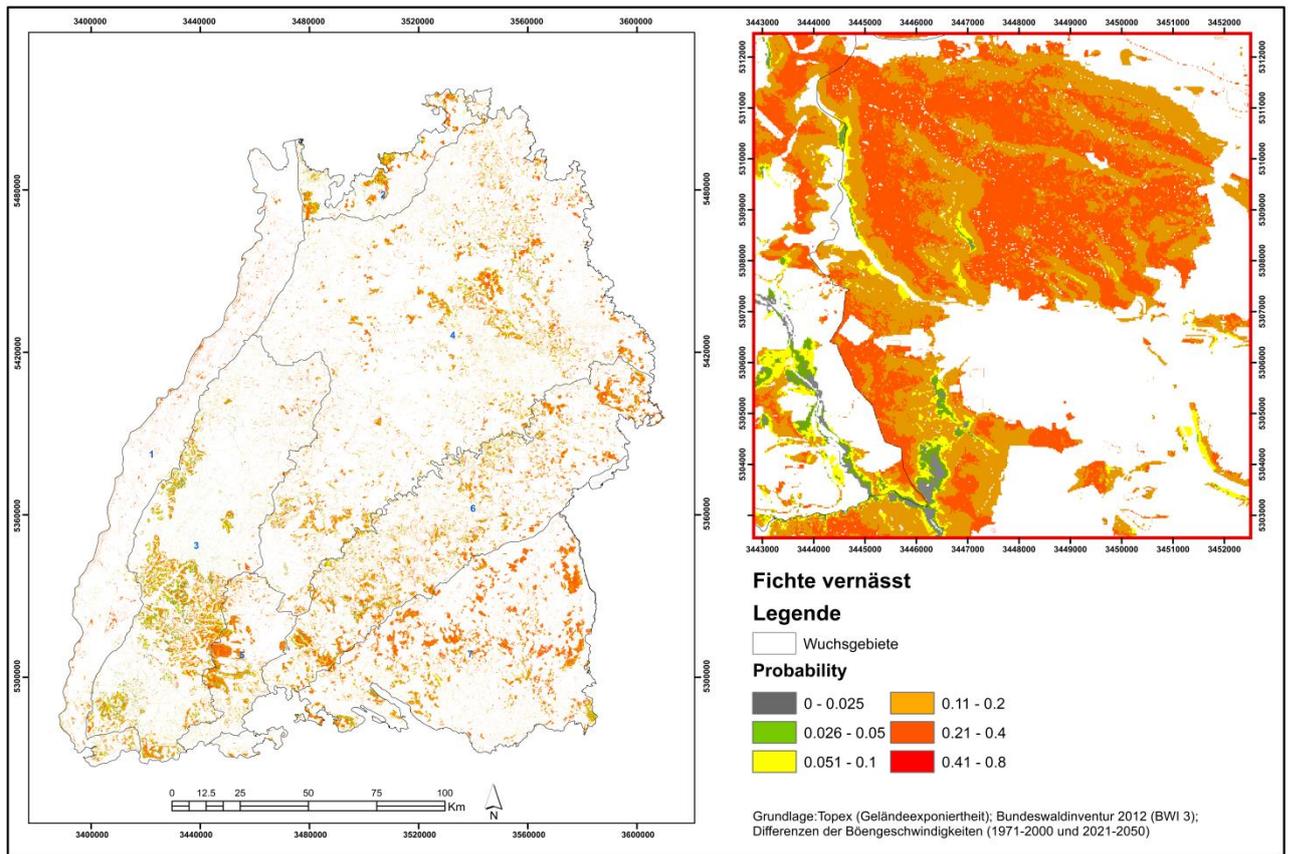
Im Vergleich zu Abbildung 18 zeigen sich eine Zunahme der orangenen Gefährdungsklassen und eine Abnahme der günstigen grünen Gefährdungsstufen (Abbildung 28). Insgesamt wird also eine erhöhte Gefährdung vorhergesagt, wenn die Böengeschwindigkeit als leicht zunehmend angenommen wird. Dieser Trend der Gefährdungserhöhung setzt sich erwartungsgemäß systematisch bei allen Baumarten fort, wenn erhöhte Böengeschwindigkeiten angenommen werden (Abbildungen 29 bis 34).



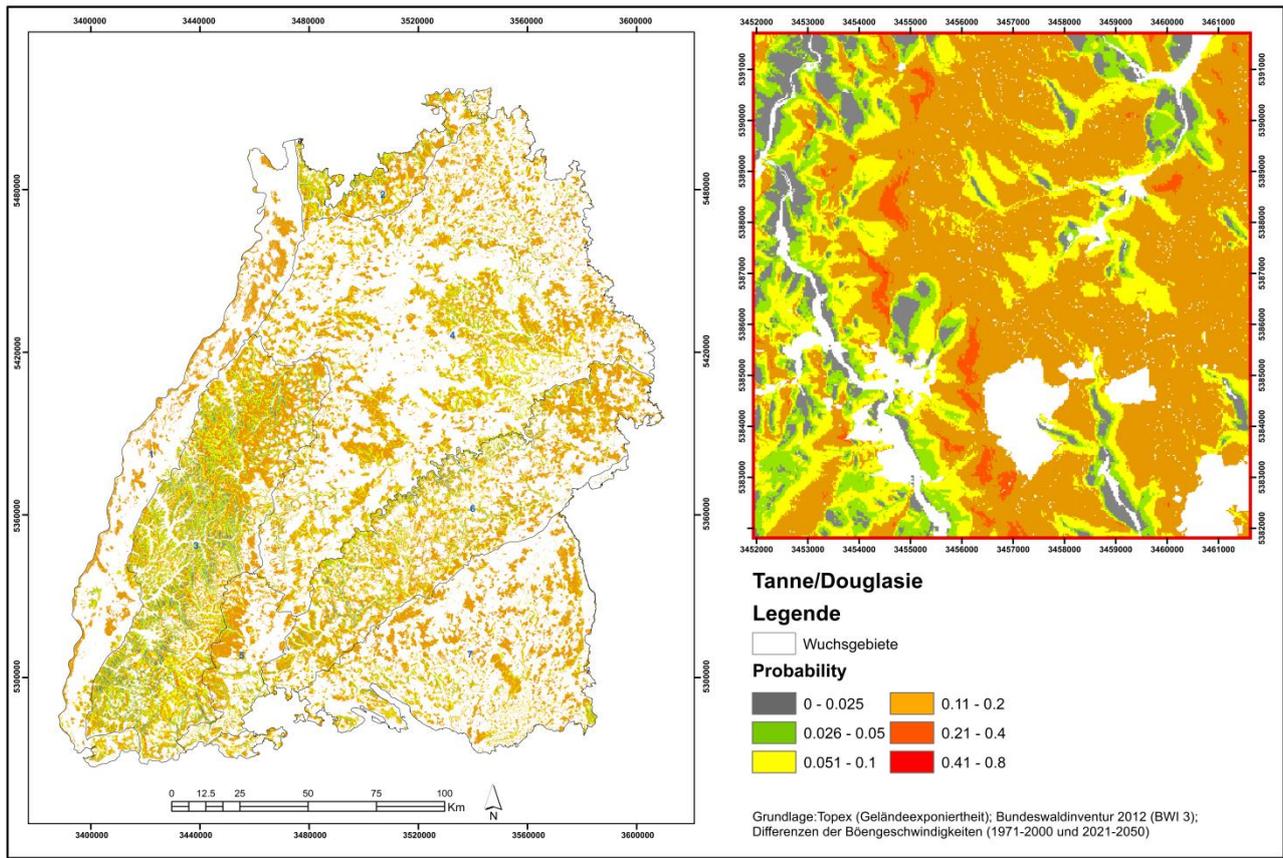
**Abbildung 28: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Fichte. Beurteilungsgrundlage für die Staunäseinformation ist die regionalzonale Standorteinheit nach Standortkartierung. Nicht standortskartierte Waldflächen sind in dieser Karte nicht abgebildet. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht**



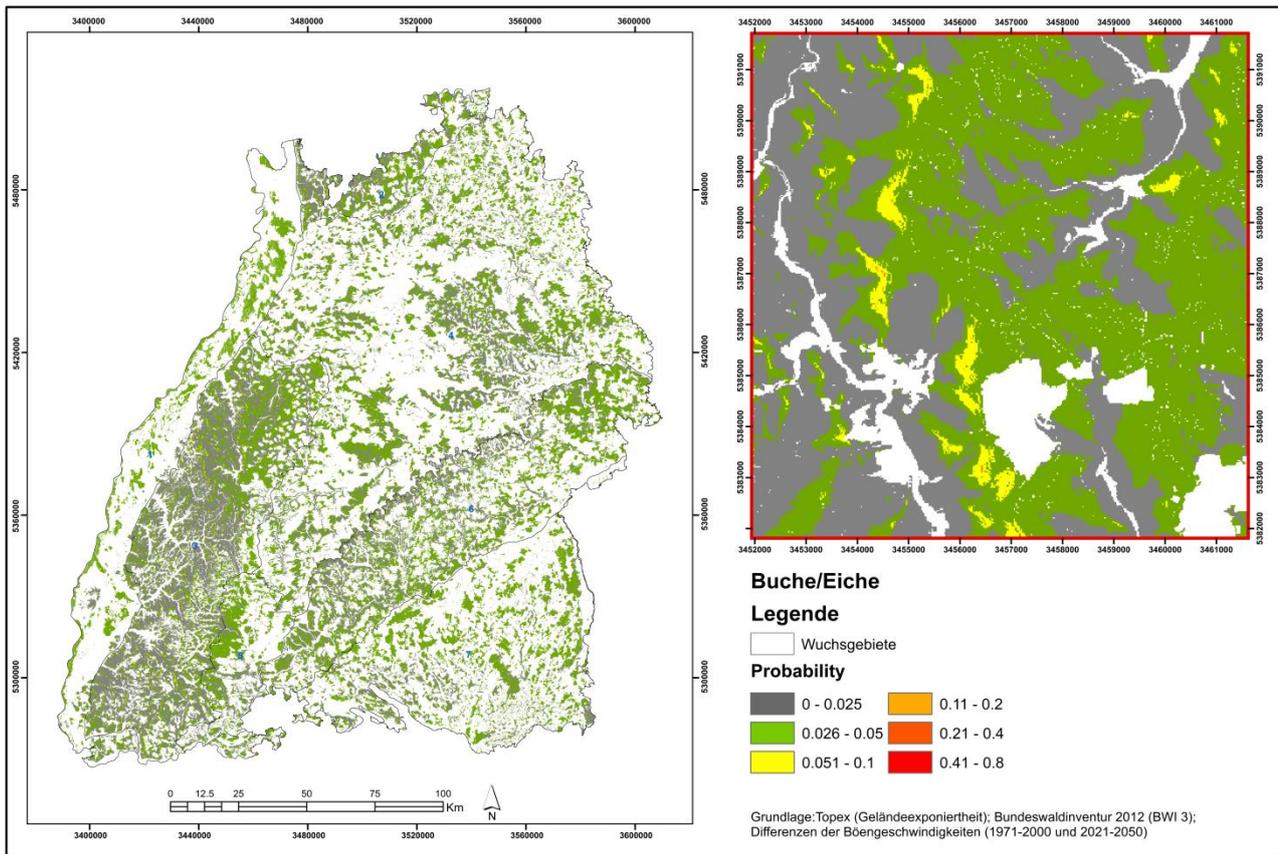
**Abbildung 29: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumart Fichte. Abgebildet sind lediglich nicht standortskartierte Waldflächen. Beurteilungsgrundlage für die Staunässeinformation ist die hypothetische Annahme „nicht vernässt“. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**



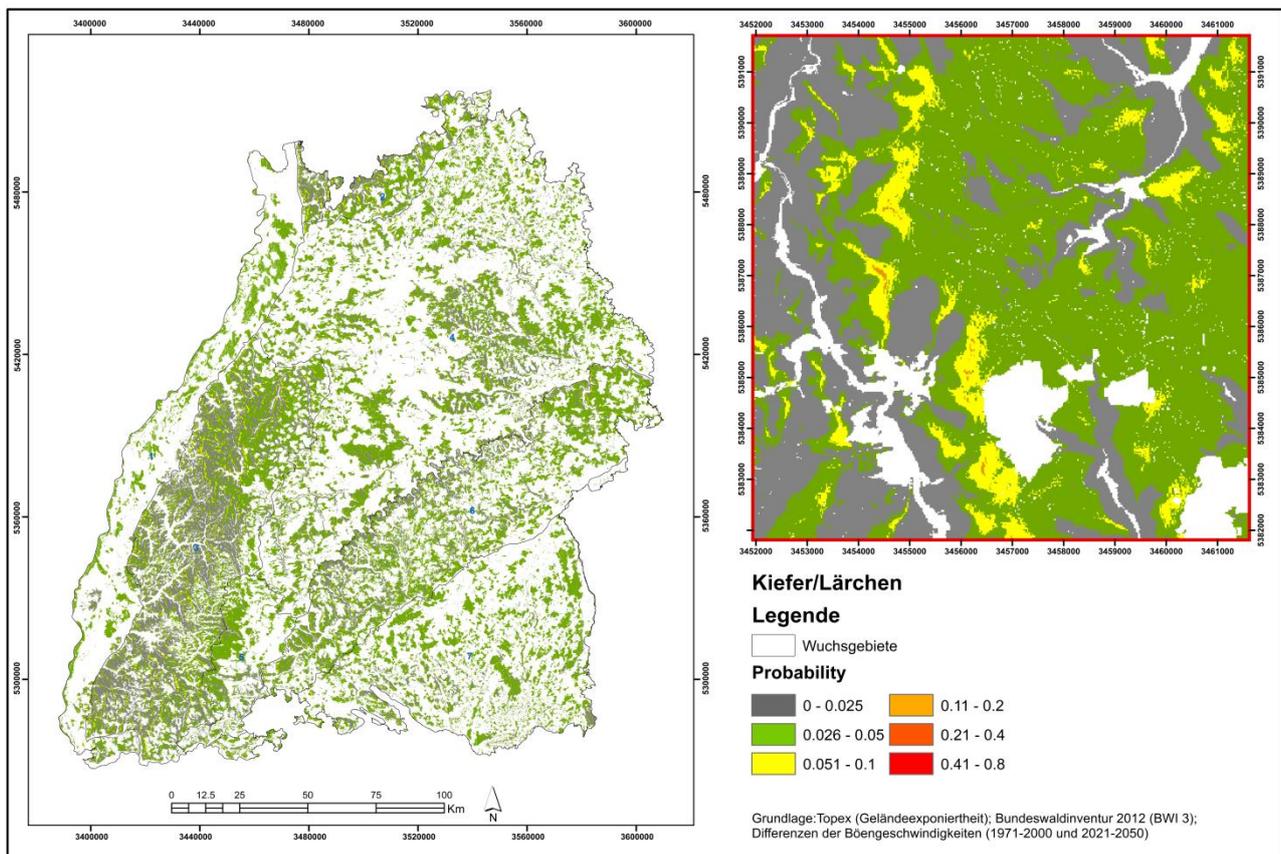
**Abbildung 30: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumart Fichte. Abgebildet sind lediglich nicht standortskartierte Waldflächen. Beurteilungsgrundlage für die Staunässeinformation ist die hypothetische Annahme „vernässt“. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**



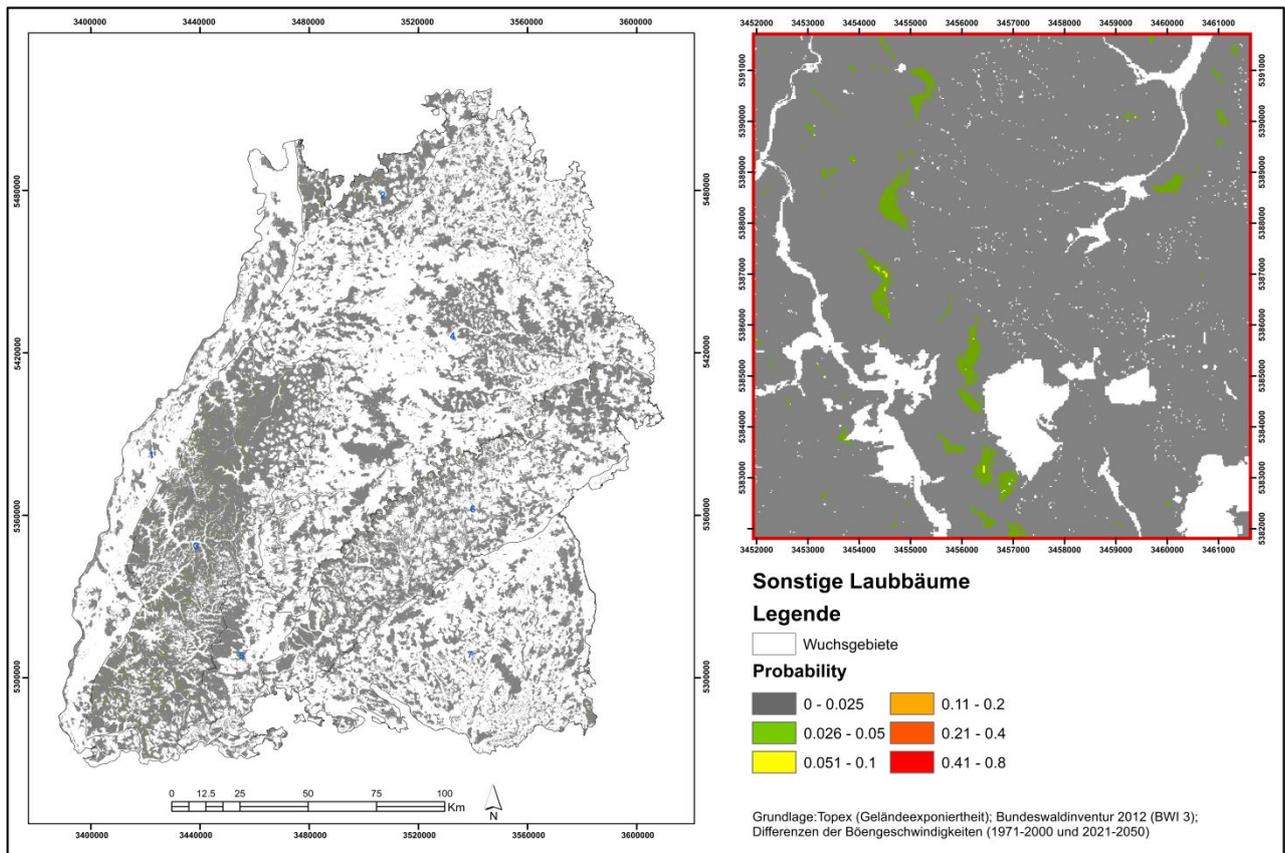
**Abbildung 31: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Tanne/Douglasie. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**



**Abbildung 32: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Buche/Eiche. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**



**Abbildung 33: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe Kiefer/Lärchen. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**



**Abbildung 34: Kartenset III: Unter Klimawandel möglicherweise leicht erhöhte Sturmgefährdung (Probability) als Potentialkarte für einen Normbaum der Baumartengruppe sonstige Laubbäume. Abgebildet sind alle Waldflächen Baden-Württembergs. Die Karte rechts ist eine beispielhafte Nahansicht.**

### 3.6 TABELLARISCHER VERGLEICH DER MITTELWERTE DER KARTENSETS I BIS III

Zusammenfassend sind in Tabelle 10 die landesweiten Mittelwerte der Sturmgefährdung (Sturmschadenswahrscheinlichkeit) je Baumartengruppe zusammengestellt. Insbesondere aus dem Vergleich der Mittelwerte zwischen Kartensets II und III wird deutlich, dass die Annahme einer sich möglicherweise moderat um 1,58 % erhöhenden Böengeschwindigkeit bei allen Baumarten zu einer überproportionalen Erhöhung der mittleren Schadwahrscheinlichkeit führen könnte. So entspräche beispielsweise die höhere Böengeschwindigkeit bei der Baumartengruppe Tanne/Douglasie einer Erhöhung der mittleren Sturmschadenswahrscheinlichkeit von 8,7 auf 10,5 Prozentpunkte, und damit einer relativen Erhöhung um annähernd 20 %.

**Tabelle 10: landesweite Mittelwerte der Sturmgefährdung (Sturmschadenswahrscheinlichkeit) für alle drei Kartensets im Vergleich, getrennt dargestellt für die untersuchten fünf Baumartengruppen.**

<b>Mittelwert</b>	Kartenset I	Kartenset II	Kartenset III
Fichte	2,00 %	9,04 %	10,94 %
Tanne/Douglasie	2,92 %	8,73 %	10,51 %
Kiefer/Lärche	0,61 %	2,57 %	3,15 %
Buche/Eiche	0,73 %	2,07 %	2,54 %
sonstige Laubbäume	0,48 %	1,01 %	1,24 %

## 4 DISKUSSION

### 4.1 DISKUSSION DER METHODENWAHL UND DER DATENGRUNDLAGE

Das empirisch-statistische Sturmschadenmodell von Schmidt et al. 2010 ermöglicht im Gegensatz zu anderen Modellansätzen und statistischen Berechnungen die regionale Abschätzung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung zahlreicher Parameter wie Baumart, Baumhöhe, Verhältnis Baumhöhe zu Baumdurchmesser, topographische Exponiertheit sowie Staunässe im Boden und wurde für die Berechnung und Abschätzung von Sturmschäden in Baden-Württemberg spezifisch entwickelt. Weitere Aspekte des Modells, wie z. B. die Modellkonzeption, die Parametrisierung, die Eignung für die Sturmschadenswahrscheinlichkeitsberechnung in Baden-Württemberg sowie die Güte des Modells und die Validierung der Modellergebnisse wurden bereits verschiedentlich diskutiert und publiziert (vgl. Schmidt et al. 2006; Schmidt et al. 2010).

Im Vergleich zu anderen Sturmgefährdungsmodellen, die meist als Stand-Alone-Modell mit grob aufgelösten Daten betrieben werden (vgl. Murshed 2016; Schindler 2012), konnte das Modell von Schmidt et al. 2010 vergleichsweise einfach mit anderen daten- und modellbasierten Systemen wie der satellitenbasierten Baumartengruppenklassifikation oder dem regionalisierten H/D-Wert-Modell zur Entscheidungsunterstützung gekoppelt werden. Die Verbindung des Modells mit räumlich und zeitlich differenzierten Böengeschwindigkeiten ermöglicht es, potentielle Sturmrisikokarten unter Annahme sich ändernder Windregimes zu berechnen und damit für verschiedene Waldbesitzende entscheidungsrelevante Gefährdungseinschätzungen darzustellen.

Der hier gewählte Ansatz bildet derzeit keine Veränderung räumlicher Muster des Auftretens von Sturmböen ab. Eine mögliche Klimawandelsensitivität wurde lediglich über eine landesweit pauschale Erhöhung der Böengeschwindigkeit von ca. 1,58 % umgesetzt. Diese recht pauschalen Annahmen erscheinen jedoch als gerechtfertigt, da sich aus der Vielzahl der meteorologischen Studien, die sich mit möglichen Veränderungen von Sturmhäufigkeiten, -intensitäten und -zugbahnen unter Klimawandel auseinandersetzen, keine systematische Veränderung der regionalen Schwerpunkte von Winterstürmen innerhalb Baden-Württembergs ableiten liesse (Albrecht et al. 2009; Feser et al. 2015; Mölter et al. 2016). Eine möglicherweise systematische Nordverlagerung der künftigen Sturmzugbahnen könnte prinzipiell mit dem verwendeten Sturmschadenmodell berücksichtigt werden. Allerdings sollten hierfür etwas stärkere Veränderungssignale der Böengeschwindigkeiten als lediglich eine Erhöhung um 1,58 % durch ein klimatologisches Modell vorausgesagt werden, da erst bei größeren regionalen Unterschieden wirkliche Unterschiede in der Sturmgefährdung auftreten dürften.

Die Einteilung von Wahrscheinlichkeitswerten in Klassen kann durch verschiedene Ansätze erfolgen. Es kann z. B. eine gleichmäßige Verteilung der Beobachtungen auf die zu definierenden Klassen gefordert werden, oder eine feste Klassenbreite. In unserem Ansatz wurde versucht dem Umstand Rechnung zu tragen, dass auf der einen Seite sehr viele Wahrscheinlichkeitsvorhersagewerte sehr gering waren (Mittelwerte unter 0,2), auf der anderen Seite aber noch eine Differenzierung der hohen und sehr hohen Werte sichtbar bleiben sollte. Da auch Baumartenunterschiede klar ersichtlich sein sollten, wurde die Klasseneinteilung schrittweise manuell ermittelt. Somit wurden die niedrigsten zwei Wertebereiche mit einer recht feinen Unterteilung von 2,5 % gewählt, gefolgt von einer Klasse von 5 % und einer Klasse von 10 %. Die höheren aber sehr seltenen

Wertebereiche  $> 0,2$  wurden dann in 20 % Stufen eingeteilt. Obwohl eine gewählte Klasseneinteilung immer auch kritisch hinterfragt werden kann, bleiben die Wahrscheinlichkeitswerte hinter diesen Klassen letzten Endes immer auch erhalten. Und die von uns gewählte Einteilung zeigte sich bei der Vielzahl der Karten als vergleichsweise gute Wahl, um Unterschiede systematisch und kartographisch abzubilden.

#### 4.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten für die Baumartengruppe Fichte und Fichte auf vernässten Böden war in allen Kartensets hoch, häufig gleichauf mit oder knapp gefolgt von der Baumartengruppe Tanne/Douglasie. Die höchste Klasse hat einen Mittelwert von über 15,6 % mit einem Maximum von über 85 % (Fichte auf vernässten Böden Kartenset III). In Kartenset II liegen die Werte etwas niedriger, und in Kartenset I liegen die Werte am niedrigsten. Dies zeigt, dass die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten in erster Linie durch die Baumartengruppe geprägt ist. Erst in zweiter Linie fielen die Werte auch in Abhängigkeit der Baumdimensionen (Höhe und H/D-Wert), der Geländeeigenschaften und der Böengeschwindigkeiten unterschiedlich aus.

Die Verwendung des Sturmschadenmodells vom Schmidt et al. 2010 zeigte, dass das Wissen um die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg auf verschiedenen Skalen (Bestandsebene/ Wuchsgebietsebene) im geografischen Informationssystem veranschaulicht werden kann. Dies ermöglicht eine regional differenzierte Beurteilung und Schätzung der Sturmschäden, was wiederum die Unsicherheiten bei der Baumartenwahl, der Bestandespflege und der Überführung von heutigen Waldbeständen reduziert. Der Einfluss der Baumartenzusammensetzung auf die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten konnte im Rahmen dieser Arbeit nur über die Baumartenklassifizierung mit Sentinel-2 Satellitendaten für alle Waldbesitzarten ermittelt werden. Eine genauere Bestandserhebung oder großflächige terrestrische Kartierung in allen Waldbesitzarten könnten die Ergebnisse und die Berechnungen von Sturmschadenswahrscheinlichkeiten unterstützen, jedoch wären diese Erhebungen und Kartierungen auf Landesebene zeitlich und finanziell sehr aufwändig, und deshalb war der Einsatz von hochauflösenden Satellitendaten von großer Bedeutung.

Bei der Analyse der Sturmschäden hat sich ergeben, dass die Differenz zwischen den drei Kartensets und innerhalb der Baumartengruppen signifikant ist. Diese Differenz war auch eindeutig zwischen den beiden Kartensets „II“ und „III“ erkennbar, wobei sich die Annahme einer sich möglicherweise durchschnittlich moderat erhöhenden Böengeschwindigkeit unter Klimawandel überproportional auf die Erhöhung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit auswirkte.

Die Ergebnisse der GIS-basierten/ und empirisch-statistischen Modellierung liefern Indizien dafür, dass trotz der Verluste durch die Stürme der vergangenen Jahrzehnte wie Lothar und Wiebke in den Jahren 1999 bzw. 1990 und trotz vieler Waldumbaumaßnahmen in den vergangenen Jahren ein hohes allgemeines Gefährdungspotenzial vorhanden ist.

Ganz allgemein ist zu dieser Untersuchung anzumerken, dass viele Unsicherheiten nicht untersucht wurden. Der Fokus lag auf der reinen Quantifizierung natural definierbarer Risiken bzw. Schadwahrscheinlichkeiten. So wurden beispielsweise die ökonomischen Konsequenzen für Forstbetriebe generell nicht in die Betrachtungen mit einbezogen. Auch mögliche Reaktionen der Holzmärkte auf große sturmschadensbedingte Holznutzungsmengen wurden nicht analysiert. Zusätzlich existieren bei der Betrachtung von Risiken auch personenbezogene Effekte wie z. B. der Risikoaffinität der entscheidenden Personen, was dazu führen kann, dass

ein bestimmter Wahrscheinlichkeitswert des Sturmrisikos von verschiedenen Personen unterschiedlich beurteilt werden kann. Aus diesen und vielen anderen möglichen weiteren Aspekten zu Sturmschäden und Katastrophennutzungen können für Forstbetriebe sehr unterschiedliche betriebliche Entscheidungen entstehen. Allerdings ist für die meisten Betrachtungen von Risiken die Quantifizierung einer Schadwahrscheinlichkeit essentiell, und hierfür liefert die vorliegende Arbeit eine umfassende Datengrundlage mit hoher räumlicher und inhaltlicher Auflösung.

#### 4.3 MÖGLICHE KONSEQUENZEN FÜR DIE WALDBEWIRTSCHAFTUNG

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass Waldbesitzende und Waldbewirtschaftende, die das Sturm- und Schadensrisiko ihrer Wälder reduzieren und minimieren möchten, an erster Stelle Baumarten mit geringem Grundrisiko fördern sollten. Da für alle untersuchten dichtbenadelten Nadelbaumarten (Fichte, Tanne, Douglasie) sowohl in der konkreten *in-situ*-Betrachtung (Kartenset I) als auch in den Potentialbetrachtungen (Kartensets II und III) systematisch die höchsten Gefährdungen ermittelt wurden, kommen als sturmrisikoarme Baumarten vorwiegend Buche, Eiche, Kiefern, Lärchen und sonstige Laubbäume in Betracht. Als nächste wirksame Maßnahme zur Reduzierung des Sturmrisikos erscheint eine Begrenzung der Baumhöhe sinnvoll. Die Sturmgefährdung aller Baumarten nahm bei Baumhöhen zwischen 30 und 35 m so enorm zu, dass waldbauliche Behandlungen, deren Ziele bis zu dieser Baumhöhe erreicht werden können, risikoreduzierend und erstrebenswert sind. Dieser Befund ließ sich aus dem Vergleich der Sturm- und Schadenswahrscheinlichkeiten zwischen den Kartensets I und II ableiten.

Auch unter sich möglicherweise intensivierender Sturmhäufigkeit oder –stärke wurde weiterhin eine starke Abhängigkeit der Sturmgefährdung von Baumart und Baumhöhe beobachtet. Die Erklärung, dass besonders starke Stürme unabhängig von Baumart und Baumdimension überall dort Schäden verursachen, wo sie auftreten, konnte durch unsere Untersuchung nicht bestätigt werden.

#### 4.4 AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurden flächendeckend Kartensets für den gesamten Wald in Baden-Württemberg erstellt. Durch die Anwendung effizienter Programmier- und IT-Methoden konnten Waldflächen aller Waldbesitzarten in Baden-Württemberg berücksichtigt werden. Die dargestellten Ergebnisse sind sowohl als Kartenset (Sturmschadenwahrscheinlichkeitskarten) vorhanden als auch als Raster- und Esri-Vektor Dateien für mehrere Analysezwecke vorhanden. Die Karten ermöglichen es den Benutzenden und Waldbesitzenden ganz im Detail auf Bestandesebene und sogar feiner (Horizontalauflösung 20×20 m) Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Sturmschäden durchzuführen.

Für die methodische Weiterentwicklung der Sturmgefährdungsbeurteilung erscheint die Kombination meteorologischer Modelle zur Schätzung und Projektion von Böengeschwindigkeiten mit Sturmschadensmodellen, die flächendeckend einsetzbar sind, aussichtsreich. Mit solchen innovativen Modellkopplungen könnten Effekte sich verändernder Böen- und Windregime für konkrete Zukunftsprojektionen verlässlicher abgebildet werden.

## 5 LITERATUR

- Albrecht, A.; Schindler, D.; Grebhan, K.; Kohnle, U.; Mayer, H. (2009): Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels – eine Literaturübersicht. *AFJZ* 180, 109-118.
- Albrecht, A.; Hanewinkel, M.; Bauhus, J.; Kohnle, U. (2012): How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research* 131(1): 229-247.
- Albrecht, A. (2009): Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg, Forstliche Versuchs-und Forschungsanst. Baden-Württemberg.
- Bengtsson, L.; Hodges, Kevin I.; Roeckner, E.; Brokopf, R. (2006): On the natural variability of the pre-industrial European climate. *Climate Dynamics* 27(7/8): 743-760.
- Beniston, M.; Stephenson, David B.; Christensen, Ole B.; Ferro, Ch. A. T.; Frei, Ch.; Goyette, S.; Halsnaes, K.; Holt, T.; Jylhä, K.; Koffi, B.; Palutikof, J.; Schöll, R.; Semmler, T.; Woth, K. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections." *Climatic Change* 81(Supplement 1): 71-95.
- Bolstadt, P.; Lilesand, T. (1991): Rapid maximum likelihood classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 57, No.1, pp67-74.
- Cailleret, M. J., S.; Robert, E.; Desoto, L.; Aakala, T.; Antos, J. A.; Beikircher, B.; Bigler, Ch.; Bugmann, H.; Caccianiga, M. (2017): A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology* 23(4): 1675-1690.
- Carleer, A.; Wolff, E. (2004): Exploitation of very high resolution satellite data for tree species identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(1): 135-140.
- Dolos, K.; Märkel, U. (2016): Modellierung der klimatischen Standorteignung forstlich relevanter Baumarten. (online unter: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/>: Stand 15.06.2017). ID Umweltbeobachtung U82-W03-N19.
- Dormann, C. F; Kühn, I. (2009): *Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften*. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ 2.
- ESA (2017): Europäische Weltraumorganisation (Online unter: [http://www.esa.int/ger/ESA\\_in\\_your\\_country/Germany/Sentinel-2\\_im\\_Dienste\\_der\\_Ernaehrung](http://www.esa.int/ger/ESA_in_your_country/Germany/Sentinel-2_im_Dienste_der_Ernaehrung): Stand 15.07.2017).
- ESRI (2017): Konfusionsmatrix berechnen (online unter:<http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-confusion-matrix.htm>: Stand 22.07.2017).
- Feser, F.; Barcikowska, M.; Krueger, O.; Schenk, F.; Weisse, R.; Xia, L. (2015): Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe-A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(687): 350-382.
- ForstBW (2017): Landesforstbetrieb Baden-Württemberg ForstBW.

- Giorgi, F.; Bi, X.; Pal, J. (2004): Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100).
- GLC (2017): Global land cover, Global European Environment Agency (online unter: [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu): Stand 16.06.2017).
- Gräler, B.; Pebesma E.; Heuvelink, G. (2016): Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal* 8(1), 204-218.
- Greeves, C.Z.; Pope, V.D; Stratton, R.A.; Martin, G.M. (2007): Representation of Northern Hemisphere winter storm tracks in climate models. *Climate Dynamics* 28(7-8): 683-702.
- Hanewinkel, M.; Cullman, D.A.; Michiels, H-G.; Kändler, G. (2014): Converting probabilistic tree species range shift projections into meaningful classes for management. *Journal of environmental management* 134: 153-165.
- Hanewinkel, M.; Albrecht, A.; Schmidt, M. (2015). Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrößen. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 166(3), S. 118-128.
- Hanewinkel, M.; Kuhn, T.; Bugmann, H.; Lanz, A.; Brang, P. (2014): Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. *Forestry* 87(4): 525-534.
- Hanson et al. (2007): Modelling the impact of climate extremes: an overview of the MICE project *Climatic Change* 81(Supplement 1): 163-177.
- Hastie, T. J.; Tibshirani, R. J. (1986): Generalized additive models. *Statistical science*, 297-310.
- Hastie, T. J.; Tibshirani, R. J. (1990): *Generalized additive models* (Vol. 43). CRC Press.
- Hijmans R.J.; van Etten, J. (2012): raster: Geographic analysis and modeling with raster data. R package version 2.0-12.
- Hildebrandt, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Herbert Wichmann Verlag, Hüthing GmbH, Heidelberg. ISBN 3-87907-238-8.
- Hurrell, J.W.; Kushnir, Y.; Visbeck, M. (2001): The North Atlantic Oscillation. *Science* 291(5504): 603-605.
- Immitzer, M.; Atzberger, C.; Koukal, T. (2012): Tree species classification with random forest using very high spatial resolution 8-band WorldView-2 satellite data. *Remote Sensing* 4(9): 2661-2693.
- Immitzer, M.; Vuolo, F.; Einzmann, K.; Ng, WT.; Böck, S.; Atzberger, C. (2016): Verwendung von multispektralen Sentinel-2 Daten für die Baumartenklassifikation und Vergleich mit anderen Satellitensensoren. *Proceedings of Conferemce Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG, Bern, Switzerland: 8-9.*
- IPCC (2012): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (First ed.). Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO). 151 pp.

- Jung, C.; Schindler, D. (2015): Statistical modeling of near-surface wind speed: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany). *Austin Journal of Earth Science* 2.
- Jung, C.; Schindler, D.; Albrecht, A.; Buchholz, A. (2016): The role of highly-resolved gust speed in simulations of storm damage in forests at the landscape scale: A case study from southwest Germany. *Atmosphere* 7(1): 7.
- Kändler, G.; Cullmann, D. (2014): *Der Wald in Baden-Württemberg.* Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg.
- Leckebusch, G.K.; Brigitte, U.; Uwe, P.; Joaquim, G.S.; Zacharias, T-S. (2006): Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research* 31(1): 59-74.
- LGL (2016): Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg.
- Marshall, J.; Kushnir, Y.; Battistic, D.; Chang, P.; Czaja, A.; Dickson, R.; Hurrell, J.; McCartney, M.; Saravanan, R.; Visbeck, M. (2001): North atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms, review." *International Journal of Climatology* 21: 1863-1898.
- Mayer, H. (2010): Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder:(Verbundprojekt RESTER), Eigenverl. des Meteorolog. Inst. der Albert-Ludwigs-Univ. Freiburg.
- Militino, A. F. (2010). Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)* 173(4): 938-939.
- Mölter, T.; Schindler, D.; Albrecht, A.; Kohnle, U. (2016): Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region. *Atmosphere* 7(4): 60.
- Murshed, S. M. (2016): Assessment of Impacts of Extreme Winter Storms on the Forest Resources in Baden-Württemberg. A Combined Spatial and System Dynamics Approach, Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016.
- Nilsson, C., et al. (2004). Recorded storm damage in Swedish forests 1901-2000. *Forest Ecology and Management* 199(1): 165-173.
- Nothdurft, A. (2013): Spatio-temporal prediction of tree mortality based on long-term sample plots, climate change scenarios and parametric frailty modeling. *Forest ecology and management* 291: 43-54.
- Nothdurft, A.; Wolf, T.; Ringeler, A.; Böhner, J.; Saborowski, J. (2012): Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest ecology and management* 279: 97-111.
- Oesten, G.; Roeder, A. (2002): *Management von Forstbetrieben, Band 1 Grundlagen und Betriebspolitik.* Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter.
- Oesten, G.; Roder, A. (2008): *Management von Forstbetrieben, Band II: Management, Informations- und Leistungssystem.* Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter.
- Oesten, G.; Roder, A. (2012): *Management von Forstbetrieben, Band III: Management, Informations- und Leistungssystem.* Verlag Dr. Kessel, Remagen-Oberwinter.
- Pasalodos-Tato, M.; Mäkinen, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Borges, JG.; Lämås, T.; Eriksson, LO. (2013). *As*

- sessing uncertainty and risk in forest planning and decision support systems: review of classical methods and introduction of new approaches. *Forest Systems* 22(2): 282-303.
- Pfister, C. (1999): *Wetternachhersage, 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*. Bern, Haupt-Verlag.
- Pinto, J. G., et al. (2007): Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 165-175.
- Pinto, J. G., et al. (2007): Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics* 29(2-3): 195-210.
- Richards, FJ. (1959): A flexible growth function for empirical use. *Journal of experimental Botany*. Vol. 10. ISSUE 2. PP: 290-301. ISSN: 0022-0957.
- Sachs, L. (1992): *Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden*, 7. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Scott, R. E.; S. J. Mitchell. (2005): Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes." *Forest Ecology and Management* 218(1-3): 193-209.
- Schelhaas, M. J.; Nabuurs, GJ.; Schuck, A. (2003): Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology* 9(11): 1620-1633.
- Schindler, D.; Grebhan, K.; Albrecht, A.; Schönborn, J. (2009): Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar'. *International journal of biometeorology* 53(6): 543-554.
- Schindler, D.; Mayer, H.; Grebhan, K.; Schönborn, J. (2010): Erarbeitung einer Risikokarte für Sturmschäden in Wäldern und forstlich relevante Sturmschadensmodelle als Grundlagen für Methoden zur Reduzierung von Sturmschäden in Wäldern in Baden-Württemberg. *Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder. Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 21* 107.
- Schindler, D.; Grebhan, K.; Albrecht, A.; Schönborn, J.; Kohnle, U. (2012): GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany). *International journal of biometeorology* 56(1): 57-69.
- 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. *Canadian Journal of Forest Research* 40(8): 1636-1652.
- Schmidt, M.; Bayer, J.; Kändler, G. (2006): Sturm 'Lothar' – Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse. DVFFA–Sektion Ertragskunde. *Jahrestagung 2006*: 5-20.
- Schmoeckel, J. (2005): Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans "Lothar", *Inst. für Meteorologie und Klimaforschung*.
- Seidl, R.; Fernandes, P. M.; Fonseca, T- F.; Gillet, F.; Jönsson, A-M.; Merganičová, K.; Netherer, S.; Arpaci, A.; Bontemps, J-D.; Bugmann, H. (2011): Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling* 222(4): 903-924.

- Staupendahl, K. (2011): Modellierung der Überlebenswahrscheinlichkeit von Waldbeständen mithilfe der neu parametrisierten Weibull-Funktion." *Forstarchiv* 82(1): 10-19.
- Stollenwerk, B. (2006): Ein Markov-Modell zur Ermittlung der Kosten-Nutzen-Relation von Risikoscores zur Prognose der koronaren Herzkrankheit.
- Team., R. C. (2017): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Trenberth, KE.; Jones ,PD.; Ambenje, P.; Bojariu, R.; Easterling, D.; Klein, T.; Renwick, J.; Rusticucci, M.; Soden, B. (2007): Observations: surface and atmospheric climate change. Online unter: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch3.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3.html): Stand 15.04.2018).
- Unisder (2004): Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR).
- Usgs (2017): United States Geological Survey (online unter: <http://www.usgs.gov/>: Stand 15.06.2017).
- Walter et al. (2006): A high resolution reference data set of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorologische Zeitschrift* 15(6): 585-596.
- Waser, L.; Ginzler, C.; Kuechler, M.; Baltsavias, E., Hurni, L. (2011): Semi-automatic classification of tree species in different forest ecosystems by spectral and geometric variables derived from Airborne Digital Sensor (ADS40) and RC30 data. *Remote Sensing of Environment* 115(1): 76-85.
- Wickham, H. (2016): *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. Springer Verlag. ISBN: 3319242776
- Wood, S. (2006): *Generalized additive models: an introduction with R*. CRC press.
- Wood, S. (2012): Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association*.
- Yue, Ch.; Kahle, H-P.; von Wilpert, K.; Kohnle, U. (2016): A dynamic environment-sensitive site index model for the prediction of site productivity potential under climate change. *Ecological Modelling* 337: 48-62.
- Yue, Ch; Kahle, H-P.; Kohnle, U.; Zhang, Q.; Kang, X. (2014): Detecting Trends in Diameter Growth of Norway Spruce on Long-Term Forest Research Plots Using Linear Mixed-Effects Models. *European Journal of Forest Research* 133, no. 5 (2014): 783-92.
- Zuur, A. F.; Ieno, E.N.; Walker, N.J.; Saveliv, A.A.; Smith, G.M. (2009): *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer Science+ Business Media, LLC 2009. ISBN 978-0-387-87457-9 173(4): 938-939.

# 6 ANHANG

## 1. Modellparameter von Schmidt et al. 2010

Family: quasibinomial  
Link function: logit

Formula:

```
WZ1 ~ -1 + BAGRG + log(H99):BAGRG + log(BHD99):BAGRG + sum_TOPEX1000_22_19 +  
sum_TOPEX1000_1_4 + sum_TOPEX1000_14_27 + sum_TOPEX1000_9_32 +  
s(RW, HW, k = 170, fx = FALSE, bs = "tp")
```

Parametric coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
BAGRGALHALN	-9.173e+00	6.851e-01	-13.389	< 2e-16 ***
BAGRGBUEI	-1.325e+01	5.120e-01	-25.879	< 2e-16 ***
BAGRGFI	-1.241e+01	2.432e-01	-51.033	< 2e-16 ***
BAGRGKILAE	-8.984e+00	6.076e-01	-14.785	< 2e-16 ***
BAGRGTADGL	-8.601e+00	4.702e-01	-18.292	< 2e-16 ***
sum_TOPEX1000_22_19	-6.181e-03	1.781e-04	-34.700	< 2e-16 ***
sum_TOPEX1000_1_4	-1.495e-03	1.723e-04	-8.678	< 2e-16 ***
sum_TOPEX1000_14_27	4.361e-03	2.982e-04	14.624	< 2e-16 ***
sum_TOPEX1000_9_32	-2.697e-03	3.034e-04	-8.888	< 2e-16 ***
BAGRGALHALN:log(H99)	1.832e+00	3.124e-01	5.864	4.54e-09 ***
BAGRGBUEI:log(H99)	4.033e+00	2.019e-01	19.978	< 2e-16 ***
BAGRGFI:log(H99)	5.148e+00	1.286e-01	40.018	< 2e-16 ***
BAGRGKILAE:log(H99)	3.548e+00	2.710e-01	13.094	< 2e-16 ***
BAGRGTADGL:log(H99)	2.445e+00	2.213e-01	11.049	< 2e-16 ***
BAGRGALHALN:log(BHD99)	-2.691e-01	1.897e-01	-1.419	0.156
BAGRGBUEI:log(BHD99)	-1.013e+00	1.011e-01	-10.012	< 2e-16 ***
BAGRGFI:log(BHD99)	-1.786e+00	7.857e-02	-22.734	< 2e-16 ***
BAGRGKILAE:log(BHD99)	-1.574e+00	1.844e-01	-8.536	< 2e-16 ***
BAGRGTADGL:log(BHD99)	-4.975e-01	1.243e-01	-4.003	6.26e-05 ***

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

	edf	Ref.df	F	p-value
s(RW,HW)	168.1	168.9	53.57	< 2e-16 ***

---  
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Rank: 1/188

R-sq.(adj) = 0.212 Deviance explained = 23.7%

GCV = 0.51559 Scale est. = 0.51286 n = 63452

## 2. R Code für die Berechnung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit für die Baumartengruppen TADGL, BUEI, KILAE, ALHALN (Schmidt et al.2010)

```
function(BAGRG, BHD99, H99, sum_TOPEX1000_22_19, sum_TOPEX1000_1_4, sum_TOPEX1000_14_27, sum_TOPEX1000_9_32, RW, HW)  
{  
  #BAGRG:kategorische Variable Baumartgruppe: ALHALN: anderes Laubholz mit niedriger und hoher Produktionszeit  
  # BUEI: Buche/Eiche  
  # FI: Fichte  
  # KILAE: Kiefer Laerche  
  # TADGL: Tanne/Douglasie  
  # BHD99: Brusthoehendurchmesser [cm]  
  # H99: Baumhoehe [m]  
  #Topex to distance Indices: sum_TOPEX1000_22_19[ $\diamond$ x10]: Top_to_Dis_1 Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(8): 1636-  
1652, 10.1139/X10-099  
  #muessen zur Simulation sum_TOPEX1000_1_4[ $\diamond$ x10]: Top_to_Dis_2  
  #abweichender Windrichtungen sum_TOPEX1000_14_27[ $\diamond$ x10]: Top_to_Dis_3  
  #angepasst werden sum_TOPEX1000_9_32[ $\diamond$ x10]: Top_to_Dis_4  
  # RW: Rechtswert Gauss-Krueger 3. Meridian  
  # HW: Hochwert Gauss-Krueger 3. Meridian  
  data<-data.frame(BAGRG,BHD99,H99,sum_TOPEX1000_22_19,sum_TOPEX1000_1_4,sum_TOPEX1000_14_27,sum_TOPEX1000_9_32,  
RW, HW)
```

```

data$BAGRG<-factor(data$BAGRG,levels=c('ALHALN','BUEI','FI','KILAE','TADGL'))#bei nicht bekannten Baumartengruppen wird 'NA'
zurueckgegeben
data$pred_risk<-predict(sturm.choose.k170_all,newdata=data,type='response')
return(data$pred_risk)
}

```

### 3. R Code für die Berechnung der Sturmschadenswahrscheinlichkeit für die Baumartengruppe Fichte (Schmidt et al.2010)

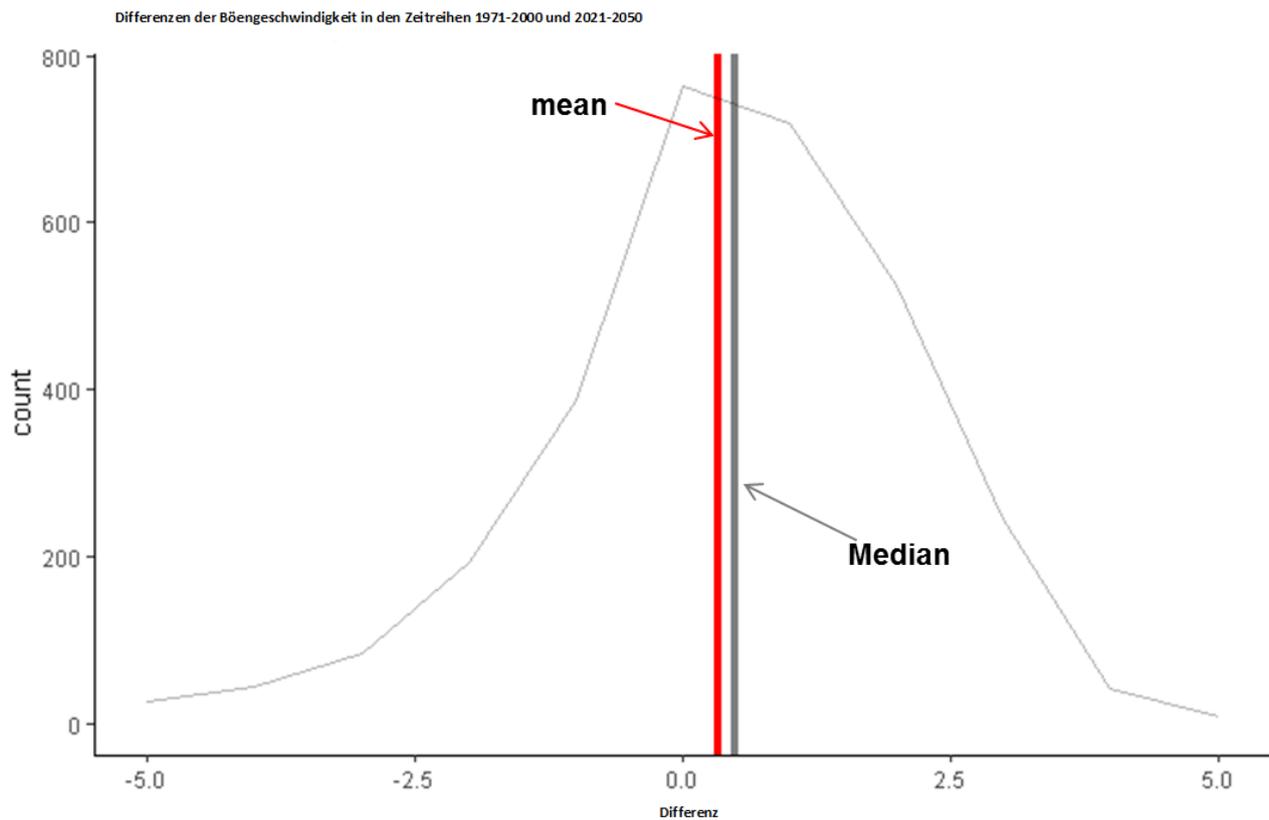
```

function(BAGRG, BHD99, H99, sum_TOPEX1000_22_19, sum_TOPEX1000_1_4, sum_TOPEX1000_14_27, sum_TOPEX1000_9_32,
WAS_Grupp, RW, HW)
{
#BAGRG:kategorische Variable Baumartgruppe: ALHALN: anderes Laubholz mit niedriger und hoher Produktionszeit
#
#           BUEI: Buche/Eiche
#
#           FI: Fichte
#
#           KILAE: Kiefer Laerche
#
#           TADGL: Tanne/Douglasie
#
#           BHD99: Brusthoehendurchmesser [cm]
#
#           H99: Baumhoehe [m]
#Topex to distance Indices:          sum_TOPEX1000_22_19[◆x10]: Top_to_Dis_1 Canadian Journal of Forest Research, 2010, 40(8): 1636-
1652, 10.1139/X10-099
#muessen zur Simulation              sum_TOPEX1000_1_4[◆x10]: Top_to_Dis_2
#abweichender Windrichtungen         sum_TOPEX1000_14_27[◆x10]: Top_to_Dis_3
#angepasst werden                    sum_TOPEX1000_9_32[◆x10]: Top_to_Dis_4
#
#           WAS_Grupp: Stauwasserkategorien: 1 nicht vernaessend, 3: nicht oder wenig vernaessend, 4: mehr oder weniger
vernaessend, vernaessend, stark vernaessend
#
#           RW: Rechtswert Gauss-Krueger 3. Meridian
#
#           HW: Hochwert Gauss-Krueger 3. Meridian
data<-data.frame(BAGRG, BHD99, H99, sum_TOPEX1000_22_19, sum_TOPEX1000_1_4, sum_TOPEX1000_14_27, sum_TOPEX1000_9_32,
WAS_Grupp, RW, HW)
data$BAGRG<-factor(data$BAGRG,levels=c('FI'))#wenn nicht Baumartengruppe 'FI' (Fichte) wird 'NA' zurueckgegeben
data$WAS_Grupp<-factor(data$WAS_Grupp,levels=c(1,3,4))#1: nicht vernaessend; 3: wenig vernaessend; 4: mehr oder weniger vernaessend,
vernaessend, stark vernaessend; wenn abweichende Kategorie wird 'NA' zurueckgegeben!
data$fit.sturm.choose.k170<-predict(sturm.choose.k170_all,newdata=data,type='link')
data$pred_risk_fi_stau<-predict(sturm.sto.choose.k170_FI,newdata=data,type='response')
return(data$pred_risk_fi_stau)
}

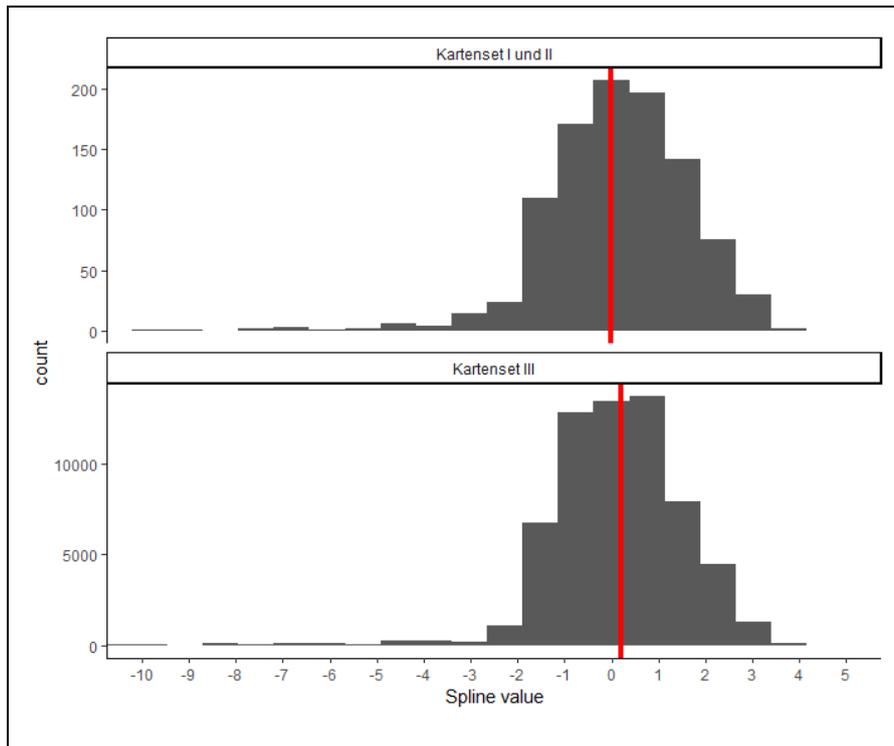
```

**Abb. B1.** Prozentuale Differenzen der Böengeschwindigkeit zwischen den Zeitreihen 1971-2000 und 2021-2050. Grundlage stellen modellierte Tagesmaxima der Windgeschwindigkeit dar. Das verwendete Generelle Zirkulationsmodell war ECHAM5, das verwendete Regionale Klimamodell war COSMO-CLM, das untersuchte Klimaszenario war das IPCC SRES-Szenario A1B.

Variable	Median	mean	Max
Wind speed of gust Differenz_%	1.933	1.583	24.145
Wind speed of gust_ Differenz	0.4945	0.3362	5.7688



**Abb. B2:** Grundlage für die Verknüpfung von Böengeschwindigkeit (Abb. B1) und Sturmschadensmodell. Histogramme der Smoothing Spline Terme (Spline value) des Sturmschadensmodells von Schmidt et al. (2010) und Darstellung der verwendeten Mittelwertkoordinaten (senkrechte rote Linien). Für die Kartensets I und II wurde eine fiktive Geo-Koordinate mit Wert nahe Null gewählt (Wert= -0.0099), um ein mittleres Sturmniveau abzubilden (obere Graphik). Für die näherungsweise Abschätzung eines sich möglicherweise unter Klimawandel moderat erhöhenden Sturmrisikos (Kartenset III) wurde diese Koordinate so modifiziert, dass sie der prozentualen Erhöhung der Böengeschwindigkeit von +1,58 % (Abb. B1) gleichkommt (Wert= 0.1999, untere Teilgraphik).



#### 4. R Code für die Berechnung der H/D-Werte

```
function(bagr.nr,h,h.nhn,wg.nr,typ,ctl)
#<bagr.nr>: Sturmmodell-Baumartengruppen Nr. (1..5)
#<h>: Baumhöhe [m]
#<h.nhn>: Höhe über Normalhöhenull [m]
#<h.nhn.kl>: Numerischen Klasse der Höhe über NHN, nur für KI/LAE (= 3) (bei den
#anderen BAGR ist diese 0, da dort direkt die Höhe über NHN als Prädiktor ins Modell eingeht)
#<wg.nr>: Wuchsgebietsnummer (BW) (1..7)
#<typ> bestimmt, ob das Mittelwerts oder Quantil-Modell verwendet wird, beim Mittelwert-Modell
#wird zusätzlich die Datengrundlage bestimmt (Default alle Höhen):
#zulässige Werte: "m.a" (Mittelwert-Modell auf der Basis aller Höhen),
#"m.hm": Mittelwert-Modell auf Basis nur der gemessenen Höhen (herrschendes Kollektiv)
#"q": Quantilmodell, wobei nur die Quantile 5,10,25,75,90,95 definiert sind;
#diese werden im Argument "ctl" festgelegt. Wenn Modell "m.a" oder "m.hm" gewählt, hat 2ctl keine
#Bedeutung; dann kann irgendein Wert übergeben werden.
#Hinweis: beim ctl-Modell wird nicht nach WG differenziert, wg.nr muss aber immer im generalisierten
#Modell übergeben werden
#Tabellen <hd.coef.tab.a>, <hd.coef.tab.hm> und <hd.ctl.tab> müssen im Workspace geladen sein!
{
  if (tolower(typ)=="q")
  {
    if (!(ctl %in% c(5,10,25,75,90,95))) return(paste(ctl,"ist ungültiger Quantilwert!"))
    return(hd.model.qt.x(bagr.nr,h,h.nhn,ctl))
  }

  if (tolower(typ)=="m.hm")

  else
  {hd.coef.tab <- hd.coef.tab.a}
  return(hd.model.x(bagr.nr,h,h.nhn,wg.nr))
}
```

```
function(bagr.nr,h,h.nhn,wg.nr, hd.coef.tab)
#<bagr.nr>: Sturmmodell-Baumartengruppen Nr. (1..5)
#<h>: Baumhöhe [m]
#<h.nhn>: Höhe über Normalhöhenull [m]
#<h.nhn.kl>: Numerischen Klasse der Höhe über NHN, nur für KI/LAE (= 3) (bei den
#anderen BAGR ist diese 0, da dort direkt die Höhe über NHN als Prädiktor ins Modell eingeht)
#<wg.nr>: Wuchsgebietsnummer (BW) (1..7)
{
  wg.nr <- ifelse(bagr.nr==3 & wg.nr %in% c(1:4,7),0,wg.nr)
  id <- bagr.nr*10+wg.nr
  b <- hd.coef.tab[as.character(id),3:9]
  return(ifelse(h==0,0,b[1]*h.nhn/100+b[2]*(h.nhn/100)^0.7+
    (b[3]+b[4]*h.nhn/100)*(1-exp(-b[5]*h))^b[6]*b[5]*b[6]*exp(-b[5]*h)+b[7]))
}
```

