

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema: **Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald:
Klima - Nährstoffe - Wasserhaushalt (StWM-KPW)**

Zuwendungsempfänger: **Teilvorhaben 1: Projektkoordination und klimatisches Anbaurisiko von
etablierten und alternativen Baumarten**

Teilvorhaben 2: Erweiterte Standortinformationen für Bayern

**Teilvorhaben 3: Standortbezogenes Nährstoffangebot und erweiterte
Standortinformationen für Nordwestdeutschland**

**Teilvorhaben 4: Standortgerechtes Waldmanagement in Baden-Württemberg,
Schwerpunkt Nutzungsentzüge**

Teilvorhaben 5: Erweiterte Standortinformationen für Brandenburg

**Teilvorhaben 6: Nährstoffansprüche von Hauptbaumarten und wichtigen
alternativen Baumarten in Deutschland**

Förderkennzeichen: **Teilvorhaben 1: 2220NR269A**

Teilvorhaben 2: 2220NR269B

Teilvorhaben 3: 2220NR269C

Teilvorhaben 4: 2220NR269D

Teilvorhaben 5: 2220NR269E

Teilvorhaben 6: 2220NR269F

Laufzeit: **01.10.2021 bis 31.05.2025**

Monat der Erstellung: **09/2025**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Allgemeine Angaben

Projektleitung/-koordination

Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)
Dr. Klaas Wellhausen
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, 85354 Freising
klaas.wellhausen@lwf.bayern.de

Weitere Projektpartner

Verein für forstliche Standortserkundung in Bayern e.V. (VfS)
Stephan Garneiter
Max-Joseph-Straße 9, 80333 München
garnreiter@vfs-muenchen.de

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Dr. Ulrike Talkner
Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen
ulrike.talkner@nw-fva.de

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW)
Dr. Heike Puhlmann
Wonnhaldestraße 4, 79100 Freiburg
heike.puhlmann@forst.bwl.de

Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) und
Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE)
Prof. Dr. Winfried Riek
Alfred-Möller-Straße 1, 16225 Eberswalde
winfried.riek@hnee.de

Inhaltliche Ausarbeitung

Klaas Wellhausen¹, Sandra-Maria Hipler¹, Tobias Mette¹, Tobias Plettenbacher¹, Stephan Garnreiter², Bernd Ahrends³, Silva Weiken³, Leonie von Rudorff³, Ferdinand Schirrmeister³, Ulrike Talkner³, Christian Vonderach⁴, Femke Lutz⁴, Peter Hartmann⁴, Laurin Osterholt⁴, Heike Puhlmann⁴, Petra Adler⁴, Daniel Ziche⁵, Victoria Viert⁶, Winfried Riek^{5,6}

¹Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft

²Verein für forstliche Standortserkundung in Bayern e.V.

³Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

⁴Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

⁵Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde

⁶Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	17
Kurzbericht.....	18
Aufgabenstellung	18
Planung und Ablauf des Vorhabens.....	21
Resümee der wesentlichen Ergebnisse.....	23
Arbeitspakete und Meilensteine	23
Zusammenfassung.....	28
Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	30
Erzielte Ergebnisse	30
Schaffung einer gemeinsamen Datengrundlage.....	30
StWM-KPW Datenbank	30
Verwendeter Klimadatensatz	31
Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten	37
Hintergrund zum Anbaurisiko.....	37
Methodik Anbaurisiko.....	38
Anwendung des Anbaurisikos in StWM-KPW	41
StWM-KPW Anbaurisiko-Datenbanken	49
Nährstoffbilanzen	50
Untersuchungsansatz	50
Atmosphärische Stoffeinträge.....	51
Verwitterungsraten	58
Sickerwasserausträge von Nährstoffen	62
Nutzungsfreie Stoffbilanz	68
Nährstoffentzüge.....	72
Unsicherheiten	78
Gesamtbilanz und Bewertung.....	81
Nährstoffansprüche von Baumarten	88
Literaturrecherche	88
Statistische Auswertung.....	90
Kalktoleranz der Baumarten	94
Spezielle Literatur: Studien zu den Nährstoffansprüchen einzelner Baumarten	95
Zusammenfassung	95

Wasserhaushaltsmodellierung	96
Bayern	96
Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen	104
Baden-Württemberg.....	107
Brandenburg	109
Länderspezifische Umsetzung der Ergebnisse.....	112
Bayern.....	112
Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen	119
Baden-Württemberg.....	127
Brandenburg	130
Austausch mit Vertretern aus der Praxis.....	136
Projektvorarbeiten und Ermittlung des Praxisbedarfs.....	136
Projekttreffen und Austausch mit regionalen Praktikern.....	138
Ergebnisvorstellung und -diskussion, Praxisrückkopplung.....	140
Verwertung	144
Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	144
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	144
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	144
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	146
Erkenntnisse von Dritten	147
Veröffentlichungen	147
Erfolgte Veröffentlichungen	147
Geplante Veröffentlichungen.....	149
Zitierte Literatur	149
ANHANG	162
Teilvorhaben 1: Projektkoordination und klimatisches Anbaurisiko von etablierten und alternativen Baumarten	162
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	162
2. Bearbeitete Arbeitspakete	162
Arbeitspaket 1: Koordination.....	162
Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	162
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen.....	162
Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten	166
Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt	167
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	168
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	168

Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse	170
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	171
Teilvorhaben 2: Erweiterte Standortinformationen für Bayern	172
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	172
2. Bearbeitete Arbeitspakete	172
Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	172
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen	174
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	175
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	175
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	176
Teilvorhaben 3: Standortbezogenes Nährstoffangebot und erweiterte Standortinformationen für Nordwestdeutschland	178
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	178
2. Bearbeitete Arbeitspakete	178
Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	178
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen	179
Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen	185
Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt	186
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	187
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	189
Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse	189
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	190
Teilvorhaben 4: Standortgerechtes Waldmanagement in Baden-Württemberg, Schwerpunkt Nutzungsentzüge	191
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	191
2. Bearbeitete Arbeitspakete	191
Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	191
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen	192
Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen	197
Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt	204
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	204
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	207
Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse	208
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	208
Teilvorhaben 5: Erweiterte Standortinformationen für Brandenburg	209
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	209
2. Bearbeitete Arbeitspakete	209

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	209
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen	210
Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten	211
Arbeitspaket 6: Nährstoffansprüche von Baumarten	211
Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt	211
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	212
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	213
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	213
Teilvorhaben 6: Nährstoffansprüche von Hauptbaumarten und wichtigen alternativen Baumarten in Deutschland	214
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	214
2. Bearbeitete Arbeitspakete	214
Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	214
Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen	214
Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten.....	215
Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen	215
Arbeitspaket 6: Nährstoffansprüche von Baumarten	215
Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	216
Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis	216
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	217

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über Projektablauf, inhaltliche Schwerpunkte der einzelnen Projektpartner und gemeinsames Ziel des deutschlandweiten Verbundvorhabens.....	21
Abbildung 2: Sommertemperatur (tjja) und Änderung der Sommertemperatur (dtjja) in den StWM-KPW Beispielgebieten:	33
Abbildung 3: Wintertemperatur (tdjf) und Änderung der Wintertemperatur (dtdjf) in den StWM-KPW Beispielgebieten:	34
Abbildung 2: Jahresniederschlag (pyr) und Änderung des Jahresniederschlags (dpyr) in den StWM-KPW Beispielgebieten:	34
Abbildung 2: Sommerniederschlag (pjja) und Änderung des Sommerniederschlags (dpjja) in den StWM-KPW Beispielgebieten:	35
Abbildung 3: Zeitliche Auflösung der in StWM-KPW verwendeten Klimadaten für eine zentrale Koordinate im Beispielgebiet Nürnberger Land (UTM32: 673349, 5486259). Links: Zeitreihe der Jahrestemperatur (links oben) und Sommerniederschläge (links unten) 1961-2020 bzw. 1961-2100 für die Datensätze <observed> (= obs, 1961-2020), MPIESM CLM RCP 4.5 (=r45, 1961-2100), mittlerer Klimawandel) und MPIESM CLM RCP 8.5 (=r85, 1961-2100), harter Klimawandel); Rechts: Zeitreihe der Tagestemperaturen (rechts oben) bzw. Tagesniederschläge 2017-2019 (rechts unten) 2017-2019 für den Datensatz <observed>.....	36
Abbildung 4: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) bis 1m Tiefe auf den Standorten der StWM-KPW Beispielgebiete.....	41
Abbildung 5: Standörtliche Risikofaktoren (links) und Konfusionsmatrix der Spalten <i>Wasser</i> und <i>pWasser</i> aus der erweiterten Tabelle <i>kartiereinheiten</i> (rechts). Die Zuweisung der Risikofaktoren Stauwasser, Grundwasser, Überflutung und Moor erfolgte wie dargestellt über die gemeinsame Betrachtung beider Spalten. Spalte <i>Wasser</i> : T-T5 = terrestrischer Wasserhaushalt der Frischestufen (sehr) trocken bis (sehr) frisch, Sx-S6 = Stauwassereinfluss von (sehr) schwach bis stark, G0-G6 = Grundwassereinfluss von (sehr) schwach bis stark. Spalte <i>pWasser</i> : T = terrestrisch, SW-/SW+ = mäßiger/starker Stauwassereinfluss, GW-/GW+ = mittlerer/starker Grundwassereinfluss, UB-/UB+ = mäßiger/starker Überflutungseinfluss, HN/ HH = Niedermoor/Hochmoor. <NA> = keine Angaben.	43
Abbildung 6: Konfusionsmatrix der Spalten <i>BasVer</i> und <i>Naehr</i> bzw. <i>BasVer</i> und <i>BodTyp</i> aus der erweiterten Tabelle <i>kartiereinheiten</i> . Die Zuweisung des Risikofaktors Basenverlaufstyp erfolgte direkt aus der Spalte <i>BasVer</i> und wurde nur bei nicht vorhandenen Werten aus der Spalte <i>Naehr</i> bzw. unter Zuhilfenahme gut basendifferenzierbarer Bodentypen <i>BodTyp</i> (bzw. dem Vorhandensein von Kalk im Oberboden) abgeleitet. Spalte <i>BasVer</i> – Basensättigungstiefenverlauf nach Kölling (2010) in den Klassen 1-5, wobei die Klasse 1 in eine Klasse ohne/ mit möglichem Kaliummangel unterschieden wird (1+/1-) und die Stufe 6 für sehr nährstoffarme, aber gekalkte Böden steht. Spalte <i>Naehr</i> – Trophie-Einstufung von eutroph nach dystroph (StOK 2016, S. 285-287). Spalte <i>BodTyp</i> – nur gut basendifferenzierbare Bodentypen: AB = Vega, DD = Pelosol, PP = Podsol, RR = Rendzina (inkl. auch Pararendzina und Terra fusca), SS = Pseudogley (zusätzlich: caOB = Kalk im Oberboden)	44
Abbildung 7: Anteil der Standorte ohne/mit Wassereinfluss (links) und Anteil der Basenverlaufstypen (rechts) für die Beispielgebiete in den Bundesländern Niedersachsen (NW), Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY) und Brandenburg (BB). Legendenklassen s. Kürzel in Tabelle 9. Der Wassereinfluss und Basenverlaufstyp werden für das Anbaurisiko gebraucht, da sie das Klimarisiko standörtlich modifizieren.	44
Abbildung 8.a: Klimarisiko Fichte StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:	45
Abbildung 9: Standortmodifikation des Klimarisikos (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) der Tanne 1991-2020 durch die nutzbare Feldkapazität nFK (bis 1m Tiefe).	48
Abbildung 10: Standortmodifikation des Klimarisikos (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) der Rotbuche 1991-2020 (inkl. nutzbare Feldkapazität nFK) durch den Faktor Wasser (T = Terrestrisch, SW = Stauwasser, GW = Grundwasser, UB = Überflutung, HN/HH = Nieder/Hochmoor, -/+ mäßig, stark).....	48

Abbildung 11: Standortmodifikation des Klimarisikos (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) des Bergahorns 1991-2020 (inkl. nutzbare Feldkapazität nFK) durch den Faktor Basenverlaufstyp (1 = sehr basenreich bis 5 = sehr basenarm).....	49
Abbildung 12: Schematische Darstellung der betrachteten Elementflüsse für die Bodennährstoffbilanzen von Ca ²⁺ , Mg ²⁺ und K ⁺ in Waldökosystemen und deren Beziehungen zueinander. Ein 1000stel des pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrats im Boden wird als zusätzlicher Input (Puffer) berücksichtigt (Ahrends et al., 2022).	50
Abbildung 13: Dynamische Kartierung der Sulfat-Nassdeposition (in eq ha ⁻¹ a ⁻¹) für die Jahre 2000-2015 (Datengrundlagen: Schaap et al. 2018 und Dietrich et al. 2019).	53
Abbildung 14: Okkulte Deposition (OD) von Gesamtstickstoff (in eq ha ⁻¹ a ⁻¹) für Deutschland.....	54
Abbildung 15: Evaluierung der modellierten Gesamtdeposition für Level II Flächen in Deutschland am Beispiel der Baumart Fichte.	56
Abbildung 16: Baumartenspezifische Gesamtdeposition von Calcium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.....	57
Abbildung 17: Baumartenspezifische Gesamtdeposition von Magnesium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.....	57
Abbildung 18: Baumartenspezifische Gesamtdeposition von Kalium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.....	58
Abbildung 19: Werteverteilung für die Verwitterungsraten von Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) in den bearbeiteten Beispielregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht berücksichtigt, daher erfolgte die Darstellung nur bis 20 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	60
Abbildung 20: Zeitliche Verteilung der Magnesium-Verwitterungsraten (kg ha ⁻¹ a ⁻¹) im Beispielgebiet Löwenhagen für die Baumart Buche für die Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Historisch beschreibt hier die Hindcasts der Klimaszenarien.	62
Abbildung 21: Räumliche Verteilung des geschätzten Stickstoffaustrags (kg ha ⁻¹ a ⁻¹) in den Untersuchungsgebieten. Links: Löwenhagen (Buche); Rechts: Soltau (Kiefer).	64
Abbildung 22: Räumliche Verteilung des geschätzten Sulfataustrags SO ₄ -S (kg ha ⁻¹ a ⁻¹) in den Untersuchungsgebieten. Links: Löwenhagen (Buche); Rechts: Soltau (Kiefer)	65
Abbildung 23: Geschätzte räumliche Verteilung der Kationenausträge (kg ha ⁻¹ a ⁻¹) in der Beispielregion Nürnberger Land in Bayern. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht dargestellt.	66
Abbildung 24: Werteverteilung für die Sickerwasserausträge von Calcium, Magnesium und Kalium in den bearbeiteten Beispielregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht berücksichtigt, daher erfolgte die Darstellung nur bis 20 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	68
Abbildung 25: Berechnete nutzungsfreie Ca ²⁺ , Mg ²⁺ und K ⁺ Bilanzen, aggregiert über die Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern (NDS, BW, BY, BRB) für den Zeitraum 1991-2020. Die Baumarten wurden angegeben, da die Deposition baumartenspezifisch ermittelt wird. Ki = Kiefer; Bu = Buche; Fi = Fichte.	69
Abbildung 26: Gemittelte berechnete nutzungsfreie Ca ²⁺ , Mg ²⁺ und K ⁺ Bilanzen in den drei Beispielregionen in Baden-Württemberg (1991-2020).	70
Abbildung 27: Berechnete nutzungsfreie Ca ²⁺ , Mg ²⁺ und K ⁺ Bilanzen in den drei Beispielregionen in Bayern (1991-2020).	70
Abbildung 28: Nutzungsfreie Ca ²⁺ -Bilanz für die brandenburgische Level II-Fläche in Neusorgefeld.....	71
Abbildung 29: Berechnete nutzungsfreie Ca ²⁺ , Mg ²⁺ und K ⁺ Bilanzen, aggregiert über die Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern (NDS, BW, BY, BRB) für das Szenario RCP 8.5, 2071-2100. Die Baumarten wurden angegeben, da die Deposition baumartenspezifisch ermittelt wird. Ki=Kiefer; Bu=Buche; Fi=Fichte.....	72
Abbildung 30: Beispielhafter Vergleich verschiedener Holzernteszenarien hinsichtlich mittlerem Rundholzertrag [Efm ha ⁻¹ a ⁻¹], Biomasse [AGB; t ha ⁻¹ a ⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha ⁻¹ a ⁻¹] für einen fiktiven Standort bei gleicher Baumart (hier: Fichte) und Bonität (hier:	

dGz100 = 15) auf Basis der baden-württembergischen Hilfstabellen für die Forsteinrichtung (MLR 1993). Efm=Erntefestmaß; AGB=Above-ground Biomass / oberirdische Biomasse.	74
Abbildung 31: Vergleich der Holzernteentzüge verschiedener Baumarten nach dGz ₁₀₀ -Bonitäten für die Ertragstafeln aus Baden-Württemberg und das Szenario REAL. Einheiten: Erntefestmaß [Efm ha ⁻¹ a ⁻¹], Biomasse [AGB; t ha ⁻¹ a ⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha ⁻¹ a ⁻¹].	75
Abbildung 32: Vergleich der Biomasse- und Nährstoffentzüge mit der Holzernte für verschiedene Ertragstafelwerke für Fichte bei gleicher Wuchtleistung (hier: dGz100 11) unter dem Szenario REAL für eine Umtriebszeit von 120 Jahren. Mittlerer Rundholzertrag [Efm ha ⁻¹ a ⁻¹], Biomasse [AGB; t ha ⁻¹ a ⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	76
Abbildung 33: Effekt der Umtriebszeit auf die Biomasse- und Nährstoffentzüge mit der Holzernte für Fichte (oben) und Buche (unten) für das Szenario REAL, basierend auf den für Baden-Württemberg eingesetzten Ertragstafeln. Mittlerer Rundholzertrag [Efm ha ⁻¹ a ⁻¹], Biomasse [AGB; t ha ⁻¹ a ⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	77
Abbildung 34: Darstellung der Bilanzterme inklusive Unsicherheiten für Ca eines zufällig gewählten Ortes in der Testgebietskulisse Baden-Württembergs. Die einzelnen Größen werden mit ihrem Erwartungswert (mittige horizontale Linien) und ihrer modellierten Unsicherheit (95%-Niveau, 2,5%- und 97,5%-Perzentile als kurze Linien am oberen und unteren Ende der dargestellten Verteilungen) in Form einer Verteilung dargestellt.	81
Abbildung 35: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete (1) Löwenhagen und (2) Soltau in Niedersachsen für Buche mittlerer Bonität. „Auswertung: Erwartungswert“ weist darauf hin, dass für die Klassifizierung der geschätzte Wert der Gesamtbilanz (Mittelwert der Fehlerverteilung) genutzt wurde.	83
Abbildung 36: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete (1) Nürnberger Land, (2) Kronach-Rothenkirchen und (3) Cham-Roding in Bayern für Fichte mittlerer Bonität.	84
Abbildung 37: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete 3/09: mittlerer Schwarzwald, 4/02: Vaihingen/Enz und 4/03: Kocher-Jagst-Landschaft in Baden-Württemberg für Douglasie mittlerer Bonität.	85
Abbildung 38: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Landesfläche Brandenburgs für Kiefer mittlerer Bonität. Gewässerflächen sind blau markiert.	87
Abbildung 39: Mediane und 90%-Konfidenzbereich der Z-Scores der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten.	91
Abbildung 40: Anzahl der berücksichtigten Indikatoren für die Ermittlung der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten.	91
Abbildung 41: Standardabweichung der Z-Scores der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten.	92
Abbildung 42: Output der mit SPSS durchgeführten CHAID-Analyse zur Gruppierung der Baumarten nach ihren Nährstoffansprüchen.	93
Abbildung 43: Zahlenstrahl mit mittleren Z-Scores der Nährstoffansprüche von Baumartengruppen.	94
Abbildung 44: Unterlegung der Z-Scores einiger wichtiger Eingangsgrößen aus der Literaturrecherche sowie Lage der Clustermittelwerte (Baumartengruppe 1 - 8, vgl. Tab.2). Schlüssel nach AK Standortkartierung nach Benning et al. (2015).	96
Abbildung 45: Vergleich zwischen SWI (links) und MWI (rechts) in Kuppenlagen bei Grandsberg.	99
Abbildung 46: Vergleich zwischen SWI (links) und MWI (rechts) in Tallagen zwischen Steinberger See und Nittenau.	100
Abbildung 47: Nach dem Postprocessingverfahren V2 modellierte Wasserhaushaltsstufen für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Flächenprozent).....	101
Abbildung 48: Abweichung des Wasserhaushalts (in Anzahl an Stufen Abweichung von 0-5) zwischen Kartierung und Modell (Postprocessing V2), dargestellt nach WHH-Stufen und Flächenprozent.	102
Abbildung 49: Zeitreihe der Wasserhaushaltsstufen in den drei Beispielgebieten.	103
Abbildung 50: Baumartenspezifische mittlere Sickerwasserraten im Zeitraum von 1991-2020 in der Beispielregion Soltau. Klimadatengrundlage Dietrich et al. (2019) und Böhner et al. (2023). Ki: Kiefer; Bu: Buche; Fi: Fichte; Ei: Eiche.	105

Abbildung 51: Mittlere Bodenwassergehalte bei Fichtenbestockung im Zeitraum von 1991-2020 in der Beispielregion Löwenhagen.	105
Abbildung 52: Sickerwasserraten bei Buchenbestockung in der Beispielregion Löwenhagen für unterschiedliche Klimaszenarien (RCP 2.6, 4.5 und 8.5) und Referenzzeiträume (P1: 1961-1990; P2: 1991-2020; P3: 2041-2070; P4: 2071-2100). Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung.	106
Abbildung 53: Bodenwassergehalt bei Buchenbestockung in der Beispielregion Löwenhagen für unterschiedliche Klimaszenarien (RCP 2.6, 4.5 und 8.5) und Referenzzeiträume (P1: 1961-1990; P2: 1991-2020; P3: 2041-2070; P4: 2071-2100). Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung.	107
Abbildung 54: Modellierter Wasserhaushaltsstufen über alle drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg für unterschiedliche Klimaszenarien (past, RCP 4.5 und RCP 8.5).	108
Abbildung 55: Zeitliche Entwicklung von Wassergehalt, Sickerwasser und Bestandesniederschlag über alle drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg gemittelt für unterschiedliche Klimaszenarien (past, RCP 4.5 und RCP 8.5).	108
Abbildung 56: Anzahl der Trockenjahre in einer 30-jährigen Periode in den auf historischen Klimadaten basierenden Zeiträumen 1961-1990 und 1991–2020 sowie den auf dem Klimamodell MPI-ESM-LR(r1) CCLM4-8-17 basierenden Modellläufen 2071-2100 der Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (Grün = Median).	109
Abbildung 57: Räumliche Verteilung der Anzahl der Trockenjahre einer 30-jährigen Periode in den auf historischen Klimadaten basierenden Zeiträumen 1961-1990 (oben links) und 1991-2020 (oben rechts), sowie den auf dem Klimamodell MPI-ESM-LR(r1) CCLM4-8-17 basierenden Modellläufen 2071-2100 der Szenarien RCP 4.5 (unten links) und RCP 8.5 (unten rechts).....	110
Abbildung 58: Anzahl der Trockenjahre pro 30-jähriger Periode nach Feuchtestufen entsprechend SEA95 (Schulze und Kopp, 2013), mit N1 = nass, N2 = feucht, N3 = frisch (entwässert), T1 = frisch, T2g = schwach grundfrisch, T2 = mäßig frisch, T3 = trocken. RCP 4.5 und RCP 8.5 geben die Projektionen für den Zeitraum 2071–2100 wieder.	111
Abbildung 59: Anzahl der Trockenjahre pro 30-jähriger Periode nach Substratgruppen auf T2-Standorten nach SEA95 (Schulze und Kopp, 2013), mit S = sandiges Substrat, S ü. L (>1.6m) = sandiges Substrat mit Lehm-Unterlagerung in einer Tiefe > 1,6m, S ü. L (>0.8m) = sandiges Substrat mit Lehm-Unterlagerung in einer Tiefe >0,8m, S + L = Substrat aus Sand und Lehm, L = lehmiges Substrat. RCP 4.5 und RCP 8.5 geben die Projektionen für den Zeitraum 2071-2100 wieder.	112
Abbildung 60: Darstellung des Anbaurisikos als Posterbeitrag auf einer gemeinsamen Exkursion mit Försterinnen und Förstern und Waldbesitzenden in Eberswalde (Juni 2024).	113
Abbildung 61: Darstellung des Anbaurisikos im Rahmen eines LWF-Regional Vortrags in Mittelfranken (Juli 2024).	114
Abbildung 62: Ausschnitte aus den weiterentwickelten Standortkarten der drei bayerischen Beispielgebiete. Links oben: Cham-Roding, rechts oben: Nürnberger Land, links unten: Kronach-Rothenkirchen.	116
Abbildung 63: Weiterentwickelte bayernweit gültige Legende zur Kombination von Bodenart, Standortwasserhaushalt und forstlich relevanten standörtlichen Besonderheiten.	117
Abbildung 64: Substratkarte der vom VfS kartierten Gebiete in einer bayernweiten Ansicht. Für die Gesamtdarstellung wurde die Legende vereinfacht, siehe links im Bild. Die Darstellung von Schraffuren und Signaturen wird erst im Zoom sinnvoll und möglich, wie rechts in der Grafik zu sehen ist.	117
Abbildung 65: Screenshot des Bayerischen Waldinformationssystems BayWIS. Eingebledet im Kartenfenster sind das Anbaurisiko der Buche 2100 sowie die VfS-Standortkartierung für einen Ausschnitt im Testgebiet Cham/ Roding. Nach der Aktualisierung des Anbaurisikos (geplant für Herbst 2025) werden zwei Varianten des Klimawandels angezeigt werden: 2100-mittel und 2100-hart.	118
Abbildung 66: Der VfS-Viewer in seiner aktuellen Form. Zu sehen sind die roten Umrisse der Standortpolygone und die dreistelligen Standortziffern aus der Standortkartierung. Die weiterentwickelten Standortdaten werden hier eingespielt, sodass den WBVen und FBGen und Waldbesitzenden auch die in der Tabelle 29 und der Abbildung 62 und Abbildung 63 vorgestellten farbigen Karten mit Schraffuren und weiterentwickelter Standortziffer zur Verfügung stehen.	119

Abbildung 67: Polygone der STOK 1 (blau), Vorschätzung (gelb), und der nachkartierten STOK 2 (grün) in den Beispielgebieten Soltau (links) und Löwenhagen (rechts).	120
Abbildung 68: Konfusionsmatrix der Wasserhaushaltszahl zwischen vorgeschätzten und nachkartierten Flächen (STOK) im Gebiet Soltau (Vergleich von übereinander liegenden Rasterzellen). Alle Werte innerhalb einer Spalte sind prozentual zur Spaltensumme weiß bis schwarz hinterlegt. Zur Eliminierung der Randbereiche wurde hier ein Puffer von 50 m angewendet.	121
Abbildung 69: Übersichtskarten der Wasserhaushaltsziffer (oben), Nährstoffziffer (mitte) und Substratziffer (unten) der STOK-Kartierung (links) und mit „Digital Soil Mapping“ vorgeschätzte Flächen (rechts) für das Beispielgebiet bei Soltau.	122
Abbildung 70: Mit Hilfe der Schätzfunktionen (vgl. Tabelle L1) regionalisierte C/N-Verhältnisse für die Kartiereinheiten der Standortkartierung im Beispielgebiet Soltau.	123
Abbildung 71: Flächenhafte Darstellung der Ca-, Mg- und K-Gesamtbilanzen für die Beispielgebiete Löwenhagen (links) und Soltau (rechts) in Niedersachsen für die Buche mittlerer Bonität unter aktuellen Klimabedingungen und dem Nutzungsszenario REAL.	124
Abbildung 72: Aktueller Stand des Beratungsinstruments ‚BaEm‘ (2025), hier Beispiel Hessen.	126
Abbildung 73: Umsetzungsvorschlag der Integration der Projektergebnisse in das Beratungsinstrument ‚BaEm‘, hier anhand eines Beispielpunkts im Testgebiet Löwenhagen, Niedersachsen. Entsprechend kann für vom BaEm empfohlene WET’s (Waldentwicklungstypen) die Nährstoffnachhaltig bewertet werden.	127
Abbildung 74: Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit für die Buche (oben) und Fichte (unten) mittlerer Bonität in den Beispielgebieten Baden-Württembergs mit einem Vorschlag zur Übersetzung der technischen Bewertung in Bewirtschaftungsempfehlungen.	128
Abbildung 75: Screenshot des prototypischen Nährstoffrechners in Form einer Webanwendung zur konkreten standortbezogenen Berechnung von Nährstoffbilanzen und der Bewertung von geplanten Nutzungsintensitäten.	129
Abbildung 76: Kombination des Säureindex, des Nährstoffvorratsindex und der Nährstoffbilanzen. In Beispielgebiet 3/09 wurden die Bilanzen der Fichte verwendet, in den beiden Beispielgebieten 4/02 und 4/03 die Bilanzen für die Buche (Bonität = mittel, Szenario = REAL, Auswertung = Erwartungswert, ohne Berücksichtigung des Bodenvorrats).	130
Abbildung 77: Verschiedene Ebenen der Nutzeroberfläche der QField-App.	132
Abbildung 78: Einige Kennwerte der QField-Anwendung für das Waldgebiet Chorin, a) Substratgruppe, b) Basenvorräte (dimensionslose, auf Brandenburg bezogene Relativ-Skala), c) Risiko des Kohlenstoffverlustes bei Grundwasserabsenkung.	134
Abbildung 79: Trockenstressrisiko (Anzahl der Trockenjahre in 30-jähriger Periode) im Waldgebiet Chorin als Beispiel für Kennwerte der QField-Anwendung a) in der Periode 1961-1990, b) 1991-2020, c) 2071-2100 im RCP 4.5 Szenario.	135
Abbildung 80: Ausschnitt aus Fragebogen, der an Brandenburger Waldbesitzer/innen verteilt wurde.	137
Abbildung 81: Diskussion des theoretischen Endprodukts zwischen Projektpartnern und regionalen Vertretern der Forstverwaltung.	138
Abbildung 82: Auszug aus dem Exkursionsführer für das Forstrevier Waldkirch, wo erste Ergebnisse und mögliche Bewertungsszenarien anhand eines konkreten BZE-Profiles vorgestellt wurden.	138
Abbildung 83: Links: Darstellung des Anbaurisikos am Exkursionspunkt Schönebecker Sand-Rostpodsol. Rechts: Präsentation des Wasserhaushalts am Standort Finowtaler Sand-Braunerde ...	139
Abbildung 84: Präsentation der Methodik zur Weiterentwicklung der Standortinformationen in Bayern im Rahmen der AFSV-Jahrestagung (2023). Von links: Klaas Wellhausen (LWF), Stephan Garnreiter (VfS), Sandra-Maria Hipler (LWF), Jens Haertel (AELF Coburg-Kulmbach), Klaus Löffler (Landrat Landkreis Kronach), Markus Wich (Geschäftsführer WBV Kronach-Rothenkirchen), Helge Walentowski (HAWK)	140
Abbildung 85: Präsentation der Ergebnisse und Produktvorschläge vor Vertretern aus der forstlichen Praxis.	140
Abbildung 86: Gemeinsame Begehung, Beprobung und Diskussion am Bodenprofil zwischen NW-FVA- und LWK-Mitarbeitern in der Beispielregion Soltau. Fotos: B. Ahrends, S. Weiken.	143

Abbildung 87: Gesamtbewertung (Profileignung) Physik, Chemie und Gesamt (y-Achse, Anzahl der Profile)	165
Abbildung 88: Flow Chart zur Herleitung der Artverbreitungsmodelle für das Anbaurisiko und für die Berechnung des Anbaurisos aus den Klima- und Standortdaten im Projekt StWM-KPW (mit Stand 13.02.2023).	167
Abbildung 89: Ausgewählte regionale Pressemeldungen über die Unterzeichnung der Nutzungsvereinbarungen zur gemeinschaftlichen Weiterentwicklung und Inwertsetzung der Daten der konventionellen forstlichen Standortkartierung in Bayern.....	169
Abbildung 90: Die räumliche Lage der drei Beispielgebiete in Bayern	172
Abbildung 91: Übersichtskarte der ausgewählten Beispielgebiete in Niedersachsen.	178
Abbildung 92: Expertenbasierte Aggregation der sechs zu einem niedersächsischen Standorttyp vorliegenden Bodenprofile zu einem Leitprofil (rechts), das eine typische Horizontabfolge, typische Horizontmächtigkeiten und gemittelte bodenphysikalische Eigenschaften aufweist (Ahrends et al., 2017).....	180
Abbildung 93: Auszug aus dem Geländeökologischen Schätzrahmen (NFP 2023b). Anwendungsbereich: Pleistozänes (Diluviales) Flachland. Dargestellt ist die verbale Charakterisierung von Profileigenschaften (Bodenart, Schichtung, Ausgangsgestein, etc.) anhand der Substratgruppen und Lagerungsverhältnisse, die bei der Profilableitung Berücksichtigung fand.....	180
Abbildung 94: Beprobte Standorte südöstlich von Soltau (Testgebiet „Tiefeland“) mit aufgenommenen Standortziffern und -varianten in vorgeschätzten STOK-Polygonen (Kenntnisstand des Gebiets zu dem Aufnahmezeitpunkt der Profile).	182
Abbildung 95: Scatterplots zum Vergleich von modellierten Polygondaten und Punktdaten aus bodenchemischen Probenahmen der BZE, Standortkartierung und zusätzlich erhobenen Bodenprofilen.	183
Abbildung 96: Boxplots der prozentuellen Residuen der regionalisierten Polygonwerte zu den gemessenen Profilwerten, unterschieden in STOK-Polygone und Vorschätzungs-Polygone.....	184
Abbildung 97: Kaliumdeposition für Fichten im mittl. Schwarzwald, Baden-Württemberg, im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.	187
Abbildung 98: Kaliumverwitterung für Kiefern in Brandenburg im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.....	188
Abbildung 99: Calciumaustrag mit dem Sickerwasser für Fichten in der Kocher-Jagst-Landschaft, Baden-Württemberg, im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.....	188
Abbildung 100: Magnesiumvorräte im Nürnberger Land, Bayern.	189
Abbildung 101: Waldbesitzarten im kartierten und nicht kartierten Bereich der Beispielgebiete von BW.	191
Abbildung 102: Entscheidungsbaum zur Abschätzung der Nährstoffklasse nach Kolb et al. (2019) anhand von bodenchemischen Parametern.	194
Abbildung 103: Regionalisierte (reg) und an BZE-Punkten gemessene Kationengehalte (Ca, Mg und K) als Karte und als Scatterplot dargestellt.	195
Abbildung 104: Boxplots der Sand-, Schluff und Tongehalte der AUPs und der Regionalisierungen (reg) nach Wuchsgebiet.	196
Abbildung 105: Säurestufe nach AUP im Vergleich mit den regionalisierten pH-Werten je Tiefenstufe. ..	197
Abbildung 106. Die gemeinsame Bewertung aller Elemente und Szenarien wurde mittels eines Entscheidungsbaums durchgeführt.....	199
Abbildung 107. Die berechnete Gesamtbilanz für Buche mittlerer Bonität in den drei unterschiedlichen Beispielgebieten in Baden-Württemberg.	200
Abbildung 108: Berechnete mittlere Nährstoffentzüge in den Beispielgebieten (links) und nach Bonitäten (rechts) in Baden-Württemberg.....	201
Abbildung 109. Räumliche Gesamtbewertung von Buche (links), und relativer Anteil von der Gesamtbewertung für die mittlere Bonität Buche in den Beispielgebieten (rechts).....	202

Abbildung 110: Ampelkarten des Nährstoffvorratsindex (= Nährstoffvorrat) und des Säureindex (= Nährstoffverfügbarkeit) für die drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg	206
Abbildung 111: Gesamtbewertung der Nährstoffsituation in den Beispielgebieten durch die Kombination zwischen Nährstoffvorratsindex, Säureindex und den Nährstoffbilanzen. Im Beispiel wurden die Bilanzen für die Baumarten Buche und Fichte genommen (Bonität = mittel, Szenario = REAL, Auswertung = Erwartungswert, Bodenvorrat = 0).....	206
Abbildung 112: Beispiel für die Auflösung eines Wechselstandortes mit den Standortformen Bäs6 und LnS. Dargestellt sind die den Rasterpunkten im Ergebnis zugewiesenen Standortformen.	210
Abbildung 113: Vergleich von gemessenen mit modellierten Werten der Austauschkapazität (links) und des Kohlenstoffvorrates (rechts) des Feinbodens an Brandenburger Probepunkten (n = 426), mit Tiefenstufe 1 = 0-5 cm, 2 = 5-10 cm, 3 = 10-30 cm, 4 = 30-60 cm und 5 = 60-90 cm Bodentiefe.	211
Abbildung 114: Modellierte Kationenaustauschkapazität nach Nährkraftstufe der SEA (Schulze et al., 1993) für grundwasserferne Böden des 100m-Rasters. Darstellung der Nährkraftstufen ohne „+“ - und „C“ - Stufen.	213

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aktualisierter Zeitplan für die Erreichung der Meilensteine. Hellgrün: ursprünglich geplante Meilensteinerreichung; dunkelgrün: um 8 Monate verlängerte Meilensteinerreichung; grau: nicht in allen Teilvorhaben realisierte Erreichung.....	22
Tabelle 2: Übersicht über die Arbeitspakete und deren Zielerreichung	23
Tabelle 3: Übersicht über die Meilensteine und deren Zielerreichung	26
Tabelle 4: Definitions- bzw. Codelisten der gemeinsamen StWM-KPW-Datenbank	30
Tabelle 5: Übersicht verwendeter Klimadatensätze im Projekt StWM-KPW	31
Tabelle 6: Klimakennwerte für die Beispielgebiete in StWM-KPW. Nds. = Niedersachsen, B.-W. = Baden-Württemberg, Som = Sommer (Juni - August), Veg = Vegetationsperiode (Mai-September), Win = Winter (Dezember - Februar).....	32
Tabelle 7: Datenumfang der Artverbreitungsmodelle der 32 BaSIS-Baumarten (BaSIS 2.0)	38
Tabelle 8: Bezeichnung der fünf Anbaurisiko­klassen im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS. Das Datenperzentil gibt an, wieviel % des Vorkommensdatensatzes in diese Anbaurisiko­klasse fallen.....	39
Tabelle 9: Standörtliche Risikoeinwertung der 32 BaSIS-Baumarten („Patchtabelle“).....	40
Tabelle 10: Auszug aus der StWM-KPW Tabelle Kartiereinheiten für das Land Bayern. Aus StWM-KPW Tab. Kartiereinheiten übernommen. Land, GISIds, Centroid-Koordinaten CenterX und CenterY, BodTyp (Bodentyp), nFK1m (nFK bis 1m Tiefe), Wasser, Naehr (Trophie) und BasVer (Basenverlaufstyp). Neu generierte Spalten: pWasser (Patch Wasser), waw (water and wetness, Copernicus Sentinel Satellitendaten-Produkt), KalkOB (Kalk im Oberboden).....	42
Tabelle 11: Landnutzungsspezifische Depositionsgeschwindigkeiten für die NH ₃ , NO ₂ und SO ₂ (m s ⁻¹). Abgeleitet aus den landnutzungsunabhängigen Geschwindigkeiten von Zhang et al. (2023).	55
Tabelle 12: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Kationen-Verwitterungsraten mit korrigiertem R ² (R ² _{adj.}) und erklärter Abweichung (ED). Angenommene Fehlerverteilung: Gaussian.	59
Tabelle 13: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Nitrat-Austräge mit korrigiertem R ² (R ² _{adj.}) und erklärter Abweichung (ED). GAMM Familie: Gaussian.....	63
Tabelle 14: Erklärende Variablen der statistischen Modelle zur Abschätzung der Sulfatausträge mit korrigiertem R ² (R ² _{adj.}) und erklärter Abweichung (ED). Angenommene Fehlerverteilung: Gaussian.	65
Tabelle 15: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Kationenanteile an den Austrägen mit korrigiertem R ² (R ² _{adj.}) und erklärter Abweichung (ED). GAM Familien: Beta Regression.	66
Tabelle 16: Die in dieser Studie differenzierten Holzernteszenarien und die hinterlegte Parametrisierung der Nutzung von Rinde und Krone sowie der Verlustgrößen. Min = Minimal-Szenario, DhmR = Derbholz mit Rinde; MMHE= motormanuelle Holzernte; REAL = mittleres, realitätsnahes Szenario; VMHE: vollmechanisierte Holzernte, MAX = intensivstes Nutzungsszenario.....	73
Tabelle 17: Vergleich der Biomasse- und Nährstoffzüge für Fichte und Buche auf einem zufällig gewählten Standort im nördlichen Baden-Württemberg mit den dort zu erwartenden, modellierten Bonitäten für die Baumarten Fichte und Buche für das Szenario REAL auf Basis der für Baden-Württemberg genutzten Ertragstafeln.	75
Tabelle 18: Übersicht über die berechneten Nährstoffzugsvarianten.....	78
Tabelle 19: Global genutzte Korrelationen zwischen den Bilanztermen Deposition (DEP), Sickerwasserverlust (LEA), Verwitterung (WEA) und pflanzenverfügbarer Bodenvorrat (S) für die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium.....	80
Tabelle 20: Vorschlag zur Übersetzung der technischen Bewertung in Handlungsempfehlungen. Die Fälle (1) nfSB < 0 und (2) nfSB < MIN zeigen beide negative Gesamtbilanzen und folglich identische Handlungsempfehlungen. Die Trennung beruht auf der Ursache der negativen Gesamtbilanz: im ersten Fall ist schon die nutzungs­freie Stoffbilanz negativ, im zweiten Fall führt die Nutzung zu einer negativen Gesamtbilanz.....	82

Tabelle 21: Tabellarische Übersicht der Bewertung der nutzungsfreien Stoffbilanz auf Basis des Erwartungswerts (Spalte Kriterium: Ex) bzw. des 5 %-Quantils (Spalte Kriterium: E0.05) der Gesamtbilanz, differenziert nach Baumart, Bonität und Nutzungsszenario (MIN, REAL, MAX). NEG: die nutzungsfreie Stoffbilanz ist negativ, MIN_neg: die Nutzung führt zu einer negativen Gesamtbilanz, MIN/REAL/MAX: das entsprechende Holzernteszenario führt nicht zu einer negativen Gesamtbilanz. Die Werte stellen Anteile der Flächen [%] dar und sind auf eine Dezimalstelle gerundet.	86
Tabelle 22: Liste der 56 etablierten und alternativen Baumarten	88
Tabelle 23: Einteilung der Baumarten nach kalkliebend, kalkindifferent und kalkmeidend.	94
Tabelle 24: Finale Gruppierung aller 56 Baumarten nach Nährstoffanspruch sowie mittlerer Z-Score der Gruppen; <i>kursiv</i> : Baumarten mit <10 Literaturbelegen für die Z-Score-Auswertung.....	95
Tabelle 25: Neue Wasserhaushaltsstufen für Bayern (in Anlehnung an Ergebnisse des Projekts WHH-KW)	97
Tabelle 26: Bias-Korrektur des Wasserhaushalts nach Kartiergebieten im Beispielgebiet Nürnberger Land.....	98
Tabelle 27: Modellerte Wasserhaushaltsstufen nach dem Postprocessingverfahren V2 für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Flächenprozent im Beispielgebiet)	100
Tabelle 28: Abweichung zwischen modelliertem und kartiertem Wasserhaushalt - Vergleich der beiden Postprocessingverfahren V1 und V2.....	102
Tabelle 29: Standortspezifisches Anbaurisikos im Format der traditionellen Baumarteneignungstabelle im Rahmen eines LWF-Regional Vortrags in Mittelfranken (Juli 2024) und auf einer Exkursion mit Försterinnen, Förstern und Waldbesitzenden in Cham-Roding.	115
Tabelle 30: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der bodenchemischen Parameter KAK_{eff} , BS, C/N-Verhältnis und Kationen-Vorräte mit korrigiertem R^2 ($R^2_{adj.}$) und erklärter Abweichung (ED).	123
Tabelle 31: In der Standort-App bereitgestellte Indikatoren.....	131
Tabelle 32: Standortspezifisches Anbaurisikos im Format der traditionellen Baumarteneignungstabelle im Rahmen eines BaSIS 2.0 Feedback- und Informationsworkshops mit Försterinnen und Förstern der bayerischen Forstverwaltung (Januar 2025)	141
Tabelle 33: Parameter für die Profilbewertung	164
Tabelle 34: Level bzw. räumliche Fixierung auf die ÜBK25 (Maximalentfernung zu passender ÜBK-Einheit)	165
Tabelle 35: Vorträge über Ziele, Vorgehensweisen und Ergebnisse des Projektes und der Weiterentwicklung von Standortinformationen.....	170
Tabelle 36: Vergleichsübersicht zu den drei Beispielgebieten.....	174
Tabelle 37: Übersicht der durch die Geländeaufnahme erfassten Humusformen, Bestandes- und Bodentypen.	181
Tabelle 38: Methoden der Unsicherheitsbestimmung für die nutzungsfreie Stoffbilanz. Die Berechnung erfolgte auf Parameterebene und schließt nicht die jeweiligen Unsicherheiten der einfließenden Variablen mit ein. Für die ermittelten Fehlerwerte des relativen mittleren Quadratwurzelfehlers (rRMSE) wird der Wertebereich über die Elemente Ca, Mg und K und die Baumarten Buche, Eiche, Kiefer, Douglasie und Fichte angegeben.	185
Tabelle 39: Verwendete Datenquellen der Parameter aus der Bodendatenbank für die Beispielgebiete in Baden-Württemberg.....	193
Tabelle 40. Quelle zur Ertragstafeln unterschiedlicher Bundesländer	198
Tabelle 41. Die Altersspanne und damit die maximale Umtriebszeit nach Baumart und Bundesland.	198
Tabelle 42. Die Einordnung von Bonitäten (G: "Gut", M: "Mittel", S: "Schlecht") berechnet nach Perzentilen und in den Bonitätseinheiten der jeweiligen Ertragstafeln (BW: dGz100; andere Bundesländer: Ertragsklasse).	198

Tabelle 43: Klassifizierter Quotient aus Nährstoffentzügen durch die Holzernte und Sickerwasserausträge für die drei Beispielgebiete, fünf Baumarten und drei Elemente in Baden-Württemberg. Der Quotient ist eingeteilt nach festen Verhältnissen und die Werte in den Spalten geben den Anteil [%] an Standorten wieder, die in diese Klasse fallen. Fett gedruckt ist die jeweils häufigste Klasse.	203
Tabelle 44: Klassifizierungstabelle der Parameter, die jeweiligen Indexwerte wurden in den beiden Indizes kombiniert.	204
Tabelle 45: Je drei Werte der Indexsumme werden zu einer Bewertung und Ampelfarbe zusammengefasst.	205
Tabelle 46: Zusammenfassung der Nährstoffbilanzen auf drei Ampelkategorien.	205
Tabelle 47: Kombinationsmöglichkeiten des Säureindex, des Nährstoffvorratsindex und den berechneten Nährstoffbilanzen.	205
Tabelle 48: Baumartenunterschiede der Kombinationskarten für die Beispielgebiete. Unabhängig, ob die Baumart tatsächlich dort vorkommt. Die Prozente geben die Verteilung der Bewertungen an, wenn in den drei Beispielgebieten jeweils ausschließlich die jeweilige Baumart vorkommen würden.	207
Tabelle 49: Kenngrößen der statistischen Modelle für die Hochrechnung der mit LWF-Brook90 ermittelten Wasserhaushaltskenngrößen auf das gesamte 100m-Raster.	212

Abkürzungsverzeichnis

BayWIS	Bayerisches Waldinformationssystem
BIS-Datenbank	Bodeninformationssystem – Datenbank
BÜK200	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000
BWI	Bundeswaldinventur
BZE	Bodenzustandserhebung
DGM25	Digitales Geländemodell mit Gitterweite 25m
DSS-RiskMan	Waldklimafonds-Projekt „Entscheidungsunterstützung zur Verteilung und Begrenzung von Risiken für die Forstwirtschaft vor dem Hintergrund des Klimawandel“
DSW-Daten	Daten des Datenspeicher Wald
EBAS-Datenbank	Datenbank zu Luftkonzentrationen (EMEP-Datensatz)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EnNa	Projekt „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über seinen Projektträger, die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR))
FVA-BW	Forstliche Versuchs und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Forst-BW	Forstbetrieb Baden-Württemberg
GÜK250	Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:250.000
HarmStok	Projekt „Machbarkeitsstudie zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der standortkundlichen Datenbasis in Bayern“
HNEE	Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
KA4/KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. bzw. 5. Auflage
LFE	Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
LfU Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
LWF-Brook90	Von der LWF modifiziertes deterministisches Wasserhaushaltsmodell
LWK	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
MLR-BW	Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
RP-Freiburg	Regierungspräsidium Freiburg
UHH-Klimadaten	Klimadaten der Universität Hamburg, Lehrstuhl für Physische Geografie
VfS	Verein für forstliche Standortserkundung in Bayern e.V.
WHH-KW	Projekt „Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds)
WP-KS-KW	Projekt „Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel“ (Gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds)

Kurzbericht

Aufgabenstellung

Zielsetzung

Die Umsetzung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel ist im Kleinprivatwald aufgrund der kleinparzellierten Strukturen besonders schwierig. Oft sind Informationen zum Standort und der künftigen Standortdynamik für Waldbesitzer/-innen nicht in der nötigen kleinräumigen Auflösung verfügbar. Daher sollten im Rahmen des hier beschriebenen deutschlandweiten Verbundvorhabens „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald: Klima - Nährstoffe - Wasserhaushalt“ (StWM-KPW) vorhandene forstliche Standortinformationen weiterentwickelt und für Waldbesitzer/-innen, Beratungsförster/-innen und die beratungsbasierte Förderung im Kleinprivatwald zugänglich gemacht werden. Hierzu sollten in ausgewählten, repräsentativen Beispielgebieten (in Brandenburg landesweit) konventionelle Standortinformationen um bewirtschaftungsrelevante Informationen, wie eine einheitliche und klimadynamische Einschätzung des Bodenwasserhaushalts, ein standortsensitives Anbaurisiko sowie Nährelementansprüche von Baumarten und nährstoffnachhaltige Holzernte ergänzt werden. Ziel des Vorhabens war es, künftig auch Kleinprivatwaldbesitzer/-innen aktualisierte sowie inhaltlich erweiterte und hinsichtlich der klimatischen Veränderungen dynamisierte Standortinformationen über die staatlichen Beratungsförster/-innen, forstlichen Zusammenschlüsse oder unmittelbar in Form von Webangeboten oder einer Standort-App zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen sollen die Waldbesitzenden bei Fragen der standortgerechten Baumartenwahl, der ressourcenschonenden Waldbewirtschaftung und Risikoabschätzung unterstützen.

Projektpartner waren in Bayern die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (**LWF**), die durch den Verein für forstliche Standortserkundung in Bayern e. V. (**VfS**) unterstützt wurde, in Nordwestdeutschland die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (**NW-FVA**) und in Baden-Württemberg die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (**FVA-BW**). In Brandenburg erfolgte die Bearbeitung gemeinsam durch das Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (**LFE**) und die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (**HNEE**). Die Aufgaben und Zuständigkeiten im Projekt verteilten sich auf die Projektpartner entsprechend ihrer Expertise in den einzelnen fachlichen Bereichen (vgl. Abbildung 1).

Stand der Wissenschaft und Technik

In **Bayern** wurden in der Vergangenheit über einen langen Zeitraum umfassende Standortkartierungen durchgeführt - im Staatswald seit 1949 durch die Forstämter und im Privat- und Körperschaftswald von 1984 bis 2008 auf einem Großteil der Landesfläche durch den Verein für forstliche Standortserkundung e.V. (VfS). Diese Kartierungen erfassten Bodeneigenschaften über Bodenprofile und Bohrstock-Einschläge, standörtliche Besonderheiten und den vor Ort angeschätzten Wasserhaushalt in einem Raster von 50 x 50 bzw. im Staatswald von 100 x 100 Metern. Im Rahmen einer 2018 durchgeführten „Machbarkeitsstudie zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der standortkundlichen Datenbasis in Bayern“ (HarmStok) wurde versucht regionale Unterschiede bei der Standortsbezeichnung und -kodierung in Staats-, Privat- und Körperschaftswald auszugleichen (Weis et al., 2018 b).

Seit 2009 entwickelt die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) das bayernweit einheitliche, GIS-basierte Standortinformationssystem BaSIS, das Informationen zu Lage, Boden, Geologie und Klima mit Analysedaten aus Bodenprofilen, statistischen Modellen und Expertenwissen kombiniert (Beck et al., 2012; Beck und Kölling 2013, Taeger et al., 2016). Insgesamt wird in diesem Zusammenhang an einer Vereinheitlichung der Datenbasis gearbeitet, um die Ergebnisse der traditionellen Standortkartierung mit den aktuellen Methoden aus BaSIS und anderen Forschungsprojekten zu kombinieren. Der VfS nimmt hierbei eine Schlüsselrolle ein, da er im Auftrag rund 1,1 Mio. Hektar Waldfläche kartiert und digitalisiert hat und diese Daten über einen webbasierten GIS-Viewer (<https://vfsvviewer.vfs-muenchen.de/>) den forstlichen Zusammenschlüssen zugänglich macht.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt der LWF liegt in der Weiterentwicklung von Artverbreitungsmodellen, die Prognosen über Baumartenzusammensetzungen der Zukunft unter sich ändernden klimatischen Verhältnissen liefern. Diese Modelle verschneiden Vorkommensdaten, sog. Präsenzen und Absenzen von Baumarten mit Klimainformationen und definieren darüber die ökologische Nische einer Baumart (Booth 2017). Die zunehmende Verfügbarkeit von hoch aufgelösten Klimadaten und forstlichen Inventurdaten u.a. aus dem mediterranen oder nordamerikanischen Raum (Mauri et al., 2017) sowie die Verwendung von standardisierten Modellen ermöglicht es, Zusammenhänge zwischen der Verbreitung und dem Klima robust nachzubilden. Damit können auch Anbauempfehlungen für derzeit in Deutschland noch kaum verbreitete Baumarten gegeben werden.

Im Zuständigkeitsbereich der **Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)** kommen im Bereich der Standortkartierung verschiedene Verfahren zur Anwendung, die sich in den Bundesländern Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt unterscheiden. In Hessen spielt die Bodenvegetation eine wichtige Rolle bei der Klassifizierung der forstlichen Standorte, während in Niedersachsen und Schleswig-Holstein im Wesentlichen das Bodensubstrat zur Bestimmung des Standorttyps herangezogen wird. Sachsen-Anhalt wendet das ostdeutsche Verfahren an, das den Standorttyp unter Berücksichtigung von Stamm- und Zustandsformen der Böden ableitet. Diese inhomogenen Grundlagen erschweren länderübergreifende Auswertungen und die bundeslandübergreifende Anwendung identischer Methoden und Modelle und unterschiedliche Kartiersysteme der forstlichen Standortkartierung. Daher wird schon seit längerem versucht, die Ergebnisse unterschiedlicher Standortkartierungsverfahren miteinander vergleichbar zu machen (Schmidt et al. 2015). Ein Ansatz ist es für forstliche Standortstypen bodenphysikalische und -chemische Kennwerten abzuleiten, die dann direkt in den Bewertungsansätzen Berücksichtigung finden (Ahrends et al. 2016, Benning et al. 2020, Hafner et al. 2017, Heitkamp et al. 2021). Auf diese Kennwerte können dann Modelle und Methoden bundeslandübergreifend direkt angewendet werden, ohne dass länderspezifische Anpassungen notwendig sind. Ein entsprechendes Vorgehen funktioniert jedoch nur, wenn für die entsprechenden Flächen des Kleinprivatwaldes auch auskartierte Standortstypen vorliegen. Während die niedersächsische Standortkartierung im Staatswald über eine nahezu vollständige Flächenabdeckung verfügt, ist diese für den Privatwald noch sehr lückenhaft, insbesondere im niedersächsischen Tiefland. Insgesamt sind aktuell nur etwa 65% der forstlichen Standorte nach dem Verfahren der niedersächsischen Standortkartierung erfasst (Ahrends et al., 2021b). Daher besteht in diesem Bundesland eine zusätzliche Herausforderung darin, die umfangreichen Kartierlücken mit Methoden des "Digital Soil Mapping" vorübergehend zu schließen (Ahrends et al. 2021a). Mit entsprechenden Vorschätzungen können die waldbaulichen Werkzeuge zur Risikovorsorge zur groben Orientierung eingesetzt und die aktuell laufenden Feldkartierungen beschleunigt werden.

Potenzielle Partner für die Umsetzung vor Ort sind Landesinstitutionen, wie das Landeszentrum Wald (LZW) in Sachsen-Anhalt, HessenForst oder regionale Forstbetriebsgemeinschaften.

Ein Arbeitsschwerpunkt der NW-FVA liegt in der Bilanzierung von Nährstoffflüssen im Waldökosystem, insbesondere im Hinblick auf Nährstoffeinträge über die atmosphärische Deposition, die Nährstofffreisetzung durch Verwitterung der Bodenminerale und den Nährstoffverlust mit dem Sickerwasser. Diese Stoffströme werden mit Hilfe von Bilanzmodellen beschrieben, bei denen neben der Nutzung auch natürliche Prozesse wie Denitrifikation und Sulfatadsorption berücksichtigt werden. Besonders in Waldökosystemen führt der intensive Säureeintrag mit der trockenen Deposition zu erhöhten Verwitterungsraten und zur Nährstofffreisetzung. Hier wird auf umfangreiche Modellierungs- und Messerfahrungen der NW-FVA zurückgegriffen, die unter anderem auch die Arbeit mit dem bochenchemischen Modell PROFILE umfasst. Die Einbeziehung von Unsicherheiten in den einzelnen Bilanzkomponenten (Deposition, Verwitterung, Sickerwasseraustrag, Nutzungsentzüge) spielt ebenfalls eine zentrale Rolle, da sie das Vertrauen in die Resultate und die Methodik insgesamt stärkt.

Die NW-FVA verfügt über umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit verschiedenen länderspezifischen Verfahren der Forsteinrichtung und Standortansprache sowie in der Erfassung, Modellierung und Regionalisierung von Wasser-, Stoff- und Energieflüssen in Waldökosystemen und trägt damit maßgeblich zur Weiterentwicklung der forstlichen Standortkartierung bei (Ahrends et al., 2010, 2016 a, 2018 d, Ahrends und Penne 2010, Albert et al., 2016; Guckland et al., 2012; Köhler et al., 2016; Steinicke et al., 2016; Sogachev et al., 2011; Panferov et al., 2009, 2011; Penne et al., 2010). In mehreren Vorgängerprojekten wurden Methoden

entwickelt, um atmosphärische Stoffeinträge dynamisch zu berechnen und die Ergebnisse für die forstliche Praxis nutzbar zu machen (Ahrends et al. 2020; Ahrends et al. 2022b).

In **Baden-Württemberg** liegt für rund 40 % der Privatwaldflächen eine Standortkartierung vor. Eine flächendeckende digitale Verfügbarkeit, z.B. über das Geoportal, besteht nur für den Staatswald. Zur standortbezogenen Planung wird ein sogenanntes 2-Säulenmodell eingesetzt, das aus regressionsbasierten Regionalisierungsmodellen zur Punkt-Flächen-Übertragung von Bodenparametern der Bodenzustandserhebung II und – wenn vorhanden – Informationen aus der Standortkartierung beruht. Ergänzend kommen die Bodenkarte Baden-Württemberg 1:50.000 (BK50) sowie die vorhandene Geodateninfrastruktur zum Einsatz, die flächenhafte Informationen für den Staatswald bereithält. Im Rahmen des Projekts „Waldexpert“ wurden digitale Angebote für Privatwaldbesitzer/-innen entwickelt, um gezielte Informationen zur Waldbewirtschaftung, Bestandsdaten, Geoinformationen sowie Kontaktmöglichkeiten zu Beratungsstellen, wie Dienstleistern, forstlichen Zusammenschlüssen oder der Forstverwaltung bereitzustellen.

Ein Arbeitsschwerpunkt der FVA-BW ist die Entwicklung von Methoden zur Bilanzierung von Nährstoffentzügen durch Holzerntemaßnahmen, differenziert nach Baumarten, Bestandesstrukturen und Nutzungsszenarien– und speziell auch unter Berücksichtigung der Besonderheiten im Kleinprivatwald, wie hohem Energieholzanteil oder spezifische Ernteverfahren. Die Berechnung erfolgt auf Basis von Messdaten (Inventuren, Vollaufnahme), Ertragstabellen und Modellen wie dem Schaftkurven- und Sortiermodell BDAT (Kublin et al., 2013), ergänzt durch Biomasse- (Kändler und Bösch 2012; Vonderach et al., 2018) und Nährelementfunktionen (Rumpf et al., 2018). Für fünf der ökonomisch wichtigsten Baumarten existieren auf großer Datenbasis kompartimentspezifische Biomassefunktionen (Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche), für weitere drei Baumarten mit geringer Datenbasis (Bergahorn, Esche und Tanne) sind nach äquivalenter Methodik Funktionen erstellt worden (Vonderach et al., 2018).

Die FVA-BW bringt langjährige Erfahrungen aus den Bereichen Waldernährung, Umweltmonitoring, Regionalisierung, Stoffbilanzierung sowie Inventurmethode und -auswertung ein und war an zahlreichen Forschungsprojekten beteiligt, darunter auch FNR-geförderte Vorhaben zur Energieholzernte und stofflichen Nachhaltigkeit und zum Einsatz von Holzasche in der Bodenschutzkalkung.

In **Brandenburg** leistet die forstliche Standortkartierung einen wichtigen Beitrag zur waldbaulichen Planung auf standörtlicher Grundlage. Die Standortkarte deckt dabei etwa 83 % der Gesamtwaldfläche in einem Maßstab von 1:10.000 ab und liefert qualitative Angaben zu Nährkraft, Feuchte und Klima. Die Zuordnung zwischen Standort und Bestandeszieltyp erfolgt gemäß den Prinzipien der Standortgerechtigkeit, Naturnähe sowie einer Wirtschaftszielorientierung, die sich an der Wert- und Volumen-Leistungserwartung der Bestände bemisst. Ergänzend arbeiten das Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) und die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) an der Entwicklung von Regionalisierungsmodellen auf Grundlage aktueller Inventurdaten der Bodenzustandserhebung, Standortkarten sowie zusätzlicher Geodaten und digitaler Höhenmodelle (Riek und Russ 2016). In diesem Rahmen wurden bodenphysikalische und -chemische Daten für ein 100x100m-Raster landesweit berechnet, deren Praxistauglichkeit in dem vorliegenden Vorhaben geprüft werden soll.

Ein fachlicher Schwerpunkt liegt in der Untersuchung der Nährstoffansprüche etablierter, seltener und alternativer (nicht heimischer) Baumarten. Während für etablierte Arten wie Fichte, Buche, Kiefer, Eiche oder Douglasie bereits umfangreiche Erkenntnisse vorliegen, fehlen vergleichbare Daten für seltene und nicht heimische Baumarten – insbesondere aus trockeneren Regionen Europas. Ziel ist es, über Literaturstudien zur Bedeutung der standörtlichen Nährstoffverfügbarkeit für Wachstum, Vitalität und Reproduktion der Baumarten und Auswertungen langjähriger Versuchsflächendaten alle Baumarten in eine Rangskala bezüglich der Nährstoffansprüche zu überführen und – darauf aufbauend – eine absolute Einordnung vorzunehmen. Dabei soll auch der Wasserhaushalt zur Interpretation der baumartenspezifischen Nährstoffamplituden berücksichtigt werden.

Die enge Zusammenarbeit von LFE und HNEE, gestützt durch zahlreiche gemeinsame Vorarbeiten und Forschungsprojekte u.a. zu Waldernährung (Riek et al., 2016), Bodenzustand und nachhaltigem Nährstoffmanagement (Riek et al., 2015; Russ et al., 2011), bildet die Grundlage für dieses Vorhaben. Durch die Teilnahme an den Waldklimafonds-Projekten RiskMan und WP-KS-KW wurden zudem Daten gesammelt, die besonders

zur Erreichung des übergeordneten Forschungsziels von LFE und HNEE - eine nachhaltige Waldwirtschaft durch geschlossene Stoffkreisläufe zu fördern - beigetragen haben (Riek und Russ 2015a, Riek und Russ 2015b).

Planung und Ablauf des Vorhabens

Die vier beteiligten Forschungsinstitutionen und verbundenen Partner bildeten die Säulen des Verbundvorhabens, wobei jeder Forschungseinrichtung ein inhaltlicher und räumlicher Schwerpunkt übertragen wurde. Die Standortfaktoren Klima, Nährstoffe und Wasserhaushalt wurden dabei durch die inhaltlichen Schwerpunkte der einzelnen Partner im Projekt bzw. durch die Kooperation mit dem Waldklimafonds-Projekt „Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) abgedeckt. Datengrundlage waren Standortkarten, GIS-gestützte Informationen, Messungen und Analysen sowie einschlägige Methoden, Modelle und Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsprojekten. Der Ablauf, die inhaltlichen Schwerpunkte der einzelnen Projektpartner und das gemeinsame Projektziel sind in Abbildung 1 dargestellt.

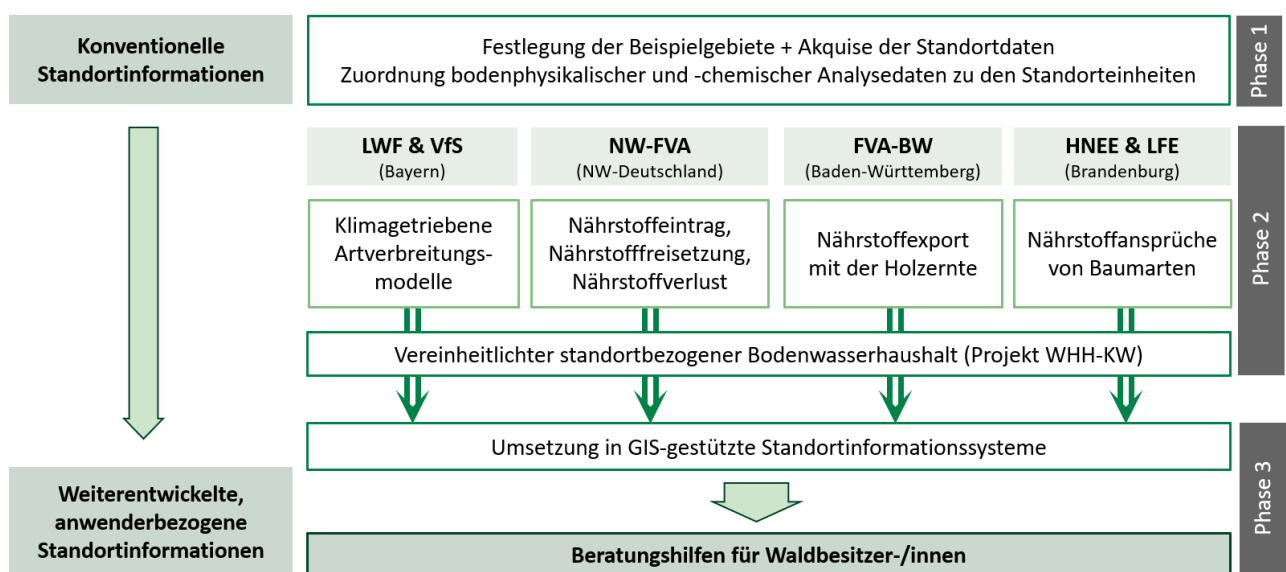


Abbildung 1: Übersicht über Projektablauf, inhaltliche Schwerpunkte der einzelnen Projektpartner und gemeinsames Ziel des deutschlandweiten Verbundvorhabens

Das Projekt lässt sich in drei Phasen unterteilen:

Phase 1: Allgemeine Vorarbeiten

- Festlegung von Beispielgebieten in den jeweiligen Bundesländern bzw. landesweite Umsetzung der Projektziele in Brandenburg
- Recherche, Akquise, Zusammenführung und Abgleich der Standortdaten im Privatwald zur einheitlichen Weiterbearbeitung auf Ebene der einzelnen Bundesländer
- Zuordnung regionalisierter Klimadaten zu den Standorteinheiten für die Verwendung in klimagetriebenen Modellen
- Zuordnung bodenphysikalischer und -chemischer Analysedaten zu den Standorteinheiten

Phase 2: Zuweisung neu entwickelter Standortinformationen

- Abschätzung des klimatischen und standörtlichen Anbaurisikos etablierter und alternativer Baumarten für die Standortpolygone über Modelle, Literatur und Expertenwissen
- Berechnung von Nährstoffbilanzen für wichtige Baumarten (Fichte, Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie) und Bewirtschaftungsformen zur Einschätzung der Nährstoffnachhaltigkeit verschiedener auf die Bewirtschaftung von Kleinprivatwaldflächen abgestimmter Holzernteverfahren

- Literaturrecherche und statistische Auswertung der Ergebnisse zu den Nährstoffansprüchen von 56 seltenen und alternativen Baumarten
- Objektivierete Einschätzung des Bodenwasserhaushalts der Standortpolygone zur besseren Abschätzung von Risiken bei Trockenheit (z. B. Borkenkäferbefall bei Fichte) oder Wasserüberschuss (z. B. erhöhtes Windwurfisiko bei Staunässe). Hierbei wird in erster Linie auf Modellierungsroutinen aus dem Projekt „Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) zurückgegriffen.

Phase 3: Umsetzung der Ergebnisse in ein praxisnahes Standortinformationssystem für den Kleinprivatwald

- Ausarbeitung praxisorientierter Darstellungsweisen von digitalen Standortinformationen in Zusammenarbeit mit Privatwaldbesitzer/-innen, forstwirtschaftlichen Zusammenschlüssen und Beratungsförster/-innen
- Länderspezifische Umsetzung der Ergebnisse in GIS - gestützten Standortinformationssystemen, die den Abruf von Standortinformationen über Toughbook, Smartphone-App, WMS - Dienste, etc. für Beratungssituationen und Entscheidungen im Gelände ermöglichen
- Beratung und Datenhaltung über staatliche Behörden und forstliche Zusammenschlüsse oder direkter Zugriff auf Standortinformationen der eigenen Flächen durch den/die Waldbesitzer/-in in Form einer Smartphone-App
- Vorstellung der Projektergebnisse in den Beispielgebieten der beteiligten forstlichen Zusammenschlüsse und für interessierte Privatwaldbesitzer/-innen, an den forstlichen Versuchsanstalten der Bundesländer und weiterer Stakeholder sowie auf Tagungen

Die ursprüngliche Laufzeit des Projekts wurde kostenneutral um 8 Monate verlängert. Grund hierfür waren die bewerbungs- und verfahrensbedingte verzögerte Einstellung des wissenschaftlichen Personals in drei Teilvorhaben sowie Personalwechsel und Stellenvakanzen während der Projektlaufzeit, die zu einem zeitlichen Verzug im Projektablauf führten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die ursprünglich geplante und die an die Projektverlängerung angepasste Meilensteinplanung.

Tabelle 1: Aktualisierter Zeitplan für die Erreichung der Meilensteine. Hellgrün: ursprünglich geplante Meilensteinerreichung; dunkelgrün: um 8 Monate verlängerte Meilensteinerreichung; grau: nicht in allen Teilvorhaben realisierte Erreichung.

Meilensteine	2021			2022					2023					2024					2025			
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	M	
Auswahl Beispielgebiete																						
Akquise Standortdaten																						
Zuordnung Bodenprofildaten																						
Bodenprofilaufnahme und -analyse																						
Bearbeitung inhaltl. Schwerpunkte																						
Wasserhaushalt aus Projekt WHH-KW																						
Ergebnisaufbereitung in GIS																						
Durchführbarkeit, Akzeptanz																						
Programmierung Standort-APP*																						
Vorstellung der Projektergebnisse																						
Berichterstattung, Veröffentlichung																						

* nur nach erfolgreicher Durchführungs- und Akzeptanzprüfung

Zusammenarbeit mit Dritten

Die regionalisierten Klimadaten für Vergangenheits- und Zukunftsklima, die für eine Darstellung des klimadynamischen Standortwasserhaushalts erforderlich waren, wurden aufbauend auf den Vorarbeiten in den Waldklimafonds-Projekten WP-KS-KW und WHH-KW von der Universität Hamburg, Institut für Physische Geographie (Dr. Jan-Axel Wehberg, Prof. Dr. Jürgen Böhner) zur Verfügung gestellt.

Die Modellparametrisierung und -validierung zur Ableitung der Nährstoffbilanzen erfolgte in enger Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen den Projektmitarbeiter/-innen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW).

Daneben gab es eine Zusammenarbeit der NW-FVA mit nationalen und internationalen Forschergruppen hinsichtlich der atmosphärischen Stoffeinträge. Hierbei ging es vorwiegend um die Evaluierung von Methoden zur Abschätzung der Gesamtdepositionen von Stickstoff und basischen Kationen (Braun et al., 2022, Schmitz et al., 2023). Zudem wurden Bodenbeprobungen und aktuelle Standortkartierungen in Kooperation mit Stephan Zander und Dino Blaß von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen durchgeführt.

An der LWF erfolgte ein fachlicher Austausch mit Herrn Dr. Wendelin Weis (Ecosystem Monitoring und Modelling) über methodische Ansätze der Zuweisung von Bodenprofilen zu den entsprechenden Standorteinheiten. Eine Validierung der Bodenprofilzuweisung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Forstsachverständigen Frau Sabine Huhn anhand ausgewählter Standorte im Raum Kelheim.

Resümee der wesentlichen Ergebnisse

Arbeitspakete und Meilensteine

In Tabelle 2 sind die Arbeitspakete und in Tabelle 3 die Meilensteine aufgeführt, die im Rahmen des Projekts von allen Projektpartnern bearbeitet wurden, inkl. einer kurzen Erläuterung zur Zielerreichung. Der Bearbeitungszeitraum wurde für alle Projektpartner an die veränderte Laufzeit angepasst.

Tabelle 2: Übersicht über die Arbeitspakete und deren Zielerreichung

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1: Koordination	10/2021 bis 04/2025	Alle Partner: Abstimmung und Unterzeichnung einer Kooperationsvereinbarung LWF: <ul style="list-style-type: none">• Vorbereitung und Durchführung von Projekttreffen mit unterschiedlicher thematischer Schwerpunktsetzung• Koordination von Berichterstattung und Datenaustausch zwischen den Projektpartnern• Steuerung und Überprüfung des Projektfortschritts• Sicherstellen der Einhaltung von Zeitplänen und Meilensteinen
AP 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten	10/2021 bis 08/2022	LWF/vfS: Festlegung und Akquise der Standortinformationen für die Beispielgebiete FBG Nürnberger Land, WBV Cham/Roding und WBV Kronach-Rothenkirchen. FVA-BW: Für Baden-Württemberg wurden 3 Beispielgebiete festgelegt. Die Daten der Standortkartierung werden an der FVA-BW durch die Abteilung Waldnaturschutz betreut und wurden dem Projektteam für die Projektzwecke zur Verfügung gestellt. NW-FVA: Aktuelle Daten der Standortkartierung wurden für die Beispielgebiete zusammengestellt. Katierlücken wurden mit Methoden des Digital Soil-Mapping (DSM) geschlossen. HNEE/LFE: Darstellung der Standortdaten in einem Raster von 100 x 100 m für Waldflächen in ganz Brandenburg.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analyse- daten an Bodenprofilen	12/2021 bis 01/2025	<p>LWF: Erweiterung der Bodenprofildatenbank um neue Bodenprofile des LfU Bayern und Ergänzung fehlender bodenphysikalischer und -chemischer Kenngrößen über statistische Verfahren. Entwicklung eines Algorithmus zur Zuordnung von labortechnisch analysierten Bodenprofilen zu den 6-ziffrigen Standorteinheiten.</p> <p>VfS: Stichprobenartige Validierung der 6-ziffrigen Standorteinheiten nach der im Projekt „HarmStok“ entwickelten Harmonisierungs-Methode als Grundlage für die Profiltzuweisung</p> <p>FVA-BW: Es wurden unterschiedliche Verfahren für die Erstellung von Informationen im unkartierten Gebiet durch die Synthese von regressionsbasierten Regionalisierungsmodellen sowie von Boden- und geologischen Karten für BW erarbeitet. Die Standortdaten wurden im 50 x 50 m Raster in der Datenbank abgelegt. Die Validierung der Daten wurde anhand eines umfangreichen Datensatzes von Bohrstockansprachen der Standortkartierung durchgeführt.</p> <p>NW-FVA: Eine direkte Zuordnung von physikalischen und bodenchemischen Bodeneigenschaften existierte nicht flächenhaft. Bestehende Ansätze wurden für die Standorteinheiten der Untersuchungsgebiete angepasst und erweitert. Zusätzlich wurden Bodenprofile zur Evaluierung kartiert und im Labor analysiert.</p> <p>HNEE/LFE: Zuordnung der für die Standortformen vorliegenden Bodenprofilinformationen anhand des projektübergreifenden bundesweiten Schlüssels.</p>
AP 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten	12/2021 bis 06/2024	<p>LWF: Parametrisierte Modelle für 32 Baumarten aus verschiedenen Projekten waren im Wesentlichen vorhanden. Eine Anpassung dieser Modelle zur Abbildung der Vorkommenswahrscheinlichkeiten an die im Projekt zur Verfügung stehenden Klima- und Bodendaten wurde vorgenommen.</p>
AP 5: Nährstoffbilanzen	12/2021 bis 06/2024	<p>FVA-BW: Berechnung von Nährstoffbilanzen für wichtige Baumarten und Bewirtschaftungsformen zur Einschätzung der Nährstoffnachhaltigkeit verschiedener auf die Bewirtschaftung von Kleinprivatwaldflächen abgestimmter Holzernnteverfahren wurden durchgeführt. Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von den Berechnungen zu bewerten, wurden zusätzlich Fehlerschätzungen vorgenommen.</p> <p>NW-FVA:</p> <p>Deposition: Die atmosphärischen Einträge basischer Kationen und versauernder Schwefel- und Stickstoffeinträge wurden für alle Waldflächen des Landes- und Privatwaldes der am Projekt beteiligten Bundesländer für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche ermittelt (vgl. Ahrends et al., 2022, 2020). Neben der Verwendung der Deposition basischer Kationen als direkter Bilanzterm der Stoffbilanzierung dienten die ermittelten Depositionen als Eingangsparameter für die anderen Bilanzkomponenten (Verwitterung, Sickerwasserausträge, Nährstoffentzüge).</p> <p>Silikatverwitterung: Es wurden neue Schätzmodelle mit PROFILE (Alveteg, 2006) entwickelt und getestet. Die so generierten Verwitterungsraten für die Elemente Ca²⁺, Mg²⁺ und K⁺ wurden mit Hilfe von gemischten nichtlinearen Modellen (GAMM) aus den Eingangsdaten der Modellierungen mit PROFILE abgeschätzt und auf Standorteinheiten der Bundesländer angewandt.</p> <p>Sickerwasserausträge: An die von Fleck et al. (2019) und Weis et al. (2018) abgeschätzten Anionenausträge (NO₃⁻, SO₄⁻) wurden verschiedene generalisierte additive Modelle</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>(GAM) angepasst. Zur Abschätzung der prozentualen Anteile der Kationen Ca^{2+}, Mg^{2+} und K^+ wurden mit Hilfe der von Weis et al. (2018) dargestellten Anteile in der Bodenlösung ebenfalls GAM's parametrisiert, und auf alle Projektgebiete angewandt.</p> <p>Bilanz: Um die spezifischen Managementoptionen, z. B. verschiedene Ernteszenarien bewerten zu können, war es notwendig, die einzelnen Bilanzglieder unabhängig von den Nährstoffentzügen zu ermitteln. Entsprechend wurden zunächst für alle Standorte in den jeweiligen Bundesländern die nutzungsfreien Nährstoffbilanzen ermittelt.</p>
AP 6: Nährstoffansprüche von Baumarten	12/2021 bis 06/2024	<p>HNEE/LFE: Durchführung einer Literaturrecherche und statistische Auswertung der Ergebnisse zu den Nährstoffansprüchen von 56 Baumarten. Einteilung der Baumarten in 8 Gruppen mit jeweils vergleichbaren Nährstoffansprüchen.</p>
AP 7: Wasserhaushalt	04/2023 bis 07/2024	<p>LWF: Modellierung des Bodenwasserhaushalts für die drei Projektgebiete mithilfe des dynamischen Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90 und Darstellung der Ergebnisse in Karten für verschiedene Perioden und Klimaprojektionen</p> <p>FVA-BW: Die Wasserhaushaltsmodellierung für die Jahre 1961-2020 und die Zukunftsszenarien von 2070 bis 2100 wurden für die Beispielgebiete in BW durchgeführt.</p> <p>NW-FVA: Die für die Wasserhaushaltssimulationen notwendigen Eingangsdaten wurden zunächst für die Untersuchungsgebiete entsprechend der Modellanforderungen abgeleitet. Anschließend wurden die Wasserhaushaltssimulationen zur Ableitung der Sickerwasserraten und der Bodenwassergehalte in den Untersuchungsgebieten für die unterschiedlichen Baumarten, die realen klimatischen Verhältnisse und für unterschiedliche Klimaszenarien (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5) durchgeführt.</p> <p>HNEE/LFE: Simulation des Wasserhaushalts für Brandenburg für die historische Messperiode 1961-2020, die Vergleichsperiode des Klimamodells 1970-2000 und die Periode 2071-2100 für die beiden Projektionen RCP 4.5 und RCP 8.5.</p>
AP 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)	04/2023 bis 08/2024	<p>LWF/VfS: Aufbereitung der Ergebnisse für die Beispielgebiete in ArcGIS Pro und Bereitstellung von weiterentwickelten Standort-, Wasserhaushalts- und Anbauisikokarten.</p> <p>FVA-BW: Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung, die berechneten Nährstoffbilanzen sowie eine Kombination der Nährstoffbilanzen mit dem Status quo des Bodens wurden erfolgreich für die Beispielgebiete in BW als Karten in GIS aufbereitet.</p> <p>NW-FVA: Für alle Beispielgebiete wurden Karten der Standortkartierungen inkl. Schätzungen für nichtkartierte Flächen, der Kenngrößen der Stoffbilanzierung sowie der nutzungsfreien Stoffbilanz für unterschiedliche Szenarien erstellt.</p> <p>HNEE/LFE: Aufbereitung und landesweite Darstellung der Standortdaten in einem 100 x 100 m Raster in GIS.</p>
AP 9: Umsetzung in die Praxis	06/2023 bis 04/2025	<p>LWF/VfS: Bereitstellung von weiterentwickelten Standortkarten, Wasserhaushaltskarten (1971-1990, 1991-2020, 2071-2100 für RCP 4.5 und RCP 8.5) und Anbauisikokarten. Ausspielung der Karten über das verwaltungsinterne GIS-System BayWIS und über den VfS-Viewer, ein auf Q-GIS basierendes Informationssystem.</p> <p>FVA-BW: Ein Workshop zum Thema „Nährstoffnachhaltigkeit in der Forstwirtschaft“ mit Forst-BW, dem MLR-BW, und RP-Freiburg wurde durchgeführt.</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		<p>Entwicklung eines Prototyps einer webbasierten Anwendung („Shiny App“) für eine standortspezifische Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit unter Berücksichtigung der aktuellen Bestockung und Bereitstellung der Projektergebnisse für die Praxis</p> <p>NW-FVA: Aktuell wurde vom ursprünglichen Vorhaben die Ergebnisse in die „WALDBESITZER-APP“ der LWK zu implementieren abgerückt. Mittel- und langfristig erscheint eine Erweiterung des länder- und besitzübergreifenden Beratungsinstruments für eine klimaangepasste Baumartenwahl (BaEm) der NW-FVA zielführender. https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem</p> <p>HNEE/LFE: Berechnung und landesweite Darstellung der Standortdaten in einem 100 x 100 m Raster.</p>
AP 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse	07/2024 bis 04/2025	<p>Alle Partner: Erstellung von drei Zwischenberichten für das jeweilige Teilvorhaben und eines gemeinsamen Schlussberichts zum Verbundvorhaben</p> <p>LWF/VfS: Eine Veröffentlichung der Ergebnisse ist in Bearbeitung.</p> <p>FVA-BW: Eine Berichterstattung erfolgte auf verschiedenen Veranstaltungen (siehe Teilvorhaben 4 im Anhang).</p> <p>NW-FVA: Publikation der Projektergebnisse (siehe Teilvorhaben 3 im Anhang)</p> <p>HNEE/LFE: Einarbeitung der Ergebnisse in die App-Anwendung QField und Vorbereitung einer begleitenden Standortfibel.</p>

Tabelle 3: Übersicht über die Meilensteine und deren Zielerreichung

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag) - aktualisiert -	Zielerreichung
M 1: Auswahl der Beispielgebiete	07/2022	Alle Partner: Erfolgreiche Auswahl der Beispielgebiete bzw. landesweite Bearbeitung in Brandenburg
M 2: Akquise der Standortdaten	08/2022	Alle Partner: Erfolgreiche Akquise und Zusammenstellung fehlender Standortinformationen
M 3: Zuordnung von Bodenprofildaten	12/2022	Alle Partner: Erfolgreiche Zuordnung von Bodenprofildaten
M 4: Ergänzende Bodenprofilaufnahme und -analyse	01/2025	<p>LWF: Entgegen den ursprünglichen Planungen wurden keine ergänzenden Bodenprofile analysiert, sondern ausschließlich vorhandene Bodenprofile verwendet und fehlende bodenphysikalische und -chemischer Kenngrößen über statistische Verfahren ergänzt. Hierzu wurde die aktuelle BIS-Datenbank des LfU Bayern angefordert, damit für die vielen Standorteinheiten eine ausreichende Anzahl an Bodenprofilen zur Verfügung stehen.</p> <p>FVA-BW: Ergänzende Bodenprofilaufnahmen wurden in BW nicht durchgeführt. Alternativ wurden regionalisierte Bodendaten genutzt und ein bisher nicht verwendeter Datensatz von Bohrstockansprachen zur Validierung eingesetzt.</p> <p>NW-FVA: Meilenstein erfolgreich abgeschlossen</p> <p>HNEE/LFE: Validierung der Modellierungen im Waldgebiet Schorfheide-Chorin (Feinbodenform u. Basensättigung)</p>
M 5: Bearbeitung der inhaltlichen Schwerpunkte	06/2024	Alle Partner: Erfolgreiche Bearbeitung der jeweiligen inhaltlichen Schwerpunkte
M 6: Übertragung der Ergebnisse zum Wasserhaushalt aus Projekt WHH-KW	07/2024	Alle Partner: Simulation des Standortwasserhaushalts unter Berücksichtigung der Methoden und Ergebnisse des Projekts WHH-KW.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag) - aktualisiert -	Zielerreichung
M 7: Aufbereitung der Ergebnisse für die Beispielgebiete in GIS	08/2024	Alle Partner: Aufbereitung der Ergebnisse für die Beispielgebiete bzw. in Brandenburg landesweit in einem 100 x 100 m Raster in GIS.
M 8: Diskussion, Durchführbarkeits- und Akzeptanzprüfung	12/2024	<p>LWF/vfS: Schaffung von Akzeptanz für die Weiterentwicklung der konventionellen Standortinformationen bei den forstlichen Zusammenschlüssen über eine bayernweite Initiative. Über 100 forstliche Zusammenschlüsse haben ihr Interesse an den Produkten bekundet und eine Vereinbarung über die Nutzung und Weiterverarbeitung der forstlichen Standortinformationen unterzeichnet.</p> <p>FVA-BW: Das Thema Nährstoffnachhaltigkeit bei der Waldbewirtschaftung wurde in BW mit den Experten der Standortkartierung und der Führungsebene der Forstpraxis besprochen.</p> <p>NW-FVA: Meilenstein erfolgreich abgeschlossen</p> <p>HNEE/LFE: Bedarfsabfrage bei Kleinprivatwaldbesitzer/-innen mit Fragebögen über die Waldbauernschule Brandenburg e.V.</p>
M 9: Bei positiver Durchführbarkeit und Akzeptanz Programmierung einer Standort-App	02/2025	<p>LWF/vfS: Aufgrund technischer sowie nutzungs- und datenschutzrechtlicher Einschränkungen ist die Entwicklung und künftige, nachhaltige Nutzung einer entsprechenden App auch außerhalb der Pilotgebiete nicht möglich. Die Bereitstellung der weiterentwickelten Standortinformationen erfolgt daher in digitaler Form über den bestehenden und in Weiterentwicklung befindlichen VfS-Viewer und das Forstverwaltungsinterne (mobile) GIS-System BayWIS.</p> <p>FVA-BW: Ein Prototyp von einer webbasierten App, die die Projektergebnisse der Praxis zur Verfügung stellen kann, wurde erarbeitet. Die Bereitstellung der App ist in Planung.</p> <p>NW-FVA: Mittel- und langfristig erscheint für Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein eine Einbindung der Ergebnisse in die besitzübergreifende App der NW-FVA zur klimaangepassten Baumartenwahl (BaEm) zielführender.</p> <p>HNEE/LFE: Darstellung der Ergebnisse in der App-Anwendung QField.</p>
M 10: Vorstellung der Projektergebnisse	04/2025	<p>LWF/vfS: Vorstellung der Methoden und Ergebnisse auf wissenschaftlichen Tagungen, FNR-Statusseminar (Klein)Privatwald, LWFregional, Exkursionen und bei forstlichen Vertretern und Waldbesitzer/-innen der Beispielgebiete; Impulsvortrag „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald“ im Rahmen der FNR Online-Tagung am 15.Mai 2025</p> <p>FVA-BW: Im Rahmen von Workshops, Vorträgen und Postern erfolgreich durchgeführt.</p> <p>NW-FVA: Austausch mit den Standortkartierern der LWK bei Bodenprobenahmen und Geländeterminen im Rahmen der Standortkartierung. Vorstellung von Projektergebnissen für Forstpraktiker/-innen auf den Exkursionen der Projekttreffen. Präsentation von Projektergebnissen auf der Tagung „Wald und Wasser“ in Göttingen.</p> <p>HNEE/LFE: Durchführung eines Praxisworkshops im Juni 2024 in Eberswalde.</p>
M 11: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse	04/2025	<p>Alle PP: Erstellung von drei Zwischenberichten und eines Schlussberichts zum Vorhaben</p> <p>LWF/vfS: Artikel in der LWFaktuell in Bearbeitung</p> <p>FVA-BW: Veröffentlichung der Ergebnisse in Bearbeitung (vgl. auch Kapitel 2.4)</p> <p>NW-FVA: Publikation der Projektergebnisse (siehe Kapitel II.4 und Teilvorhaben 3 im Anhang)</p>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag) - aktualisiert -	Zielerreichung
		HNEE/LFE: Einarbeitung der Ergebnisse in die App-Anwendung QField und Vorbereitung einer begleitenden Standortfibel.

Zusammenfassung

Bayern

In der Gesamtschau wurden die Arbeiten der bayerischen Projektpartner Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und Verein für Forstliche Standortserkundung e.V. (VfS) im Projekt StWM-KPW erfolgreich abgeschlossen.

In Bayern ist es gelungen in den Beispielgebieten die vorhandenen Standortinformationen nach einem zuvor entwickelten Verfahren neu zu verschlüsseln (zu kodieren) und mit Analysedaten von Bodenprofilen zu verknüpfen. Darauf aufbauend konnte eine Klimadynamisierung der Standorteigenschaften (hier insbesondere des Standortwasserhaushalts) und eine Bereitstellung wichtiger Kenngrößen für die Berechnung von Nährstoffnachlieferung und -austrag bereitgestellt werden. Ferner konnten standorteinheitenabhängige Baumarteneignung bzw. Anbaurisikoinformationen abgeleitet und für interne und externe Bereitstellungswege (s.u.) aufbereitet werden. Darüber hinaus ist es gelungen bayerische Standortinformationen so aufzubereiten, dass sie für methodische Ansätze anderer Bundesländer und Partnerinstitutionen (z. B. Nährstoffbilanzierungen) geeignet sind. Die entwickelten Prozessketten bieten die Möglichkeit in Bayern künftig auch über die Beispielgebiete hinaus entsprechende Berechnungen durchführen zu können. Die im Kleinprivatwald vorhandenen, z. T. heterogenen Standortinformationen können so perspektivisch auch auf größerer Fläche harmonisiert (Verschlüsselung), klimadynamisiert (Standortwasserhaushalt und Baumarteneignung), ergänzt (Nährstoffe) und somit weiter in Wert gesetzt werden.

Für die Veröffentlichung der Ergebnisse der Standortkartierung und Baumarteneignung wurden verschiedene Darstellungsvarianten und Ausspielwege auf gemeinsamen Veranstaltungen mit Waldbesitzenden und Förster/-innen diskutiert. Die Informationsangebote seitens der bayerischen Forstverwaltung werden 2025 im Nachgang zum Projekt aktualisiert (Internet, Printmedien und das Informationssystem BaSIS zur Beratung von Waldbesitzenden). Der webbasierte VfS-Viewer wurde parallel modernisiert und für die Integration weiterentwickelter und harmonisierter Standortinformationen, einschließlich klimadynamischer Baumarteninformationen vorbereitet. Ein Daten- und Funktionalitätsupdate in der Anwendung ist für die erste Jahreshälfte 2026 geplant.

Insgesamt wurde die Rolle der konventionellen Standortkartierung für ein standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald in Bayern durch das Projekt StWM-KPW sichtbar gestärkt.

Baden-Württemberg:

Das Ziel, die verfügbaren Standortdaten für den Kleinprivatwald zusammenzustellen und die Datenqualität zu prüfen, wurde im Rahmen des Projekts für BW erreicht. Da der Kleinprivatwald zu großen Teilen nicht kartiert ist, wurde im Wesentlichen auf regionalisierte Bodendaten zurückgegriffen. Diese zeigten zwar bei der Validierung durchaus eine große Unsicherheit, stellen aber die beste verfügbare Bewertungsgrundlage für den nicht kartierten Bereich dar.

Mittlere Nährstoffentzüge und daraus abgeleitete Nährstoffbilanzen für wichtige Baumarten, differenziert nach Bonitäten und Nutzungsszenarien, wurde erfolgreich zur Einschätzung der Nährstoffnachhaltigkeit berechnet. Eine Unsicherheitsanalyse wurde zur Abschätzung der Fehlergrößen und Ableitung von Handlungsmöglichkeiten bei unterschiedlicher Risikobereitschaft ergänzt. Die Daten- und Modellierungsgrundlage wurde in ein R-Paket integriert. Es wurde ein Prototyp einer webbasierten Shiny-App entwickelt, der die interaktive Bewertung eines konkreten Standorts bei Vorgabe verschiedener Bestockungsinformationen erlaubt.

Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen:

Im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA erfolgte im Projektverlauf eine weitgehende inhaltliche und räumliche Fokussierung auf zwei Beispielregionen in Niedersachsen. Die in diesen repräsentativen Beispielregionen gewonnenen Erfahrungen können auch auf die Verfahren und Datengrundlagen in Schleswig-Holstein übertragen werden. In Sachsen-Anhalt findet hingegen das ostdeutsche Kartierverfahren Anwendung, was hinsichtlich seiner damit verfügbaren Datengrundlagen und anzuwendenden Methoden und Verfahren durch den Projektpartner LFE-Brandenburg hinreichend abgebildet wurde. Im Trägerland Hessen wurden bereits Verfahren entwickelt, um Elemente der Standortkartierung flächenhaft bereitzustellen (Ahrends et al., 2023, Heitkamp et al., 2020). Die Überarbeitung war zu umfangreich, dass die im Rahmen des StWM-KPW entwickelten Methoden auch für hessische Waldstandorte anwendbar sind. Entsprechend wurde sich in diesem Projekt auf die niedersächsische forstliche Standortkartierung fokussiert. Für die anderen drei Bundesländer (Hessen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) sind in den letzten Jahren umfangreiche besitzübergreifende Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl für den hessischen Kommunal- und Privatwald Online bereitgestellt worden. Da als nächstes die Entscheidungshilfen für Niedersachsen aktualisiert und angepasst werden und in diesem Bundesland die größten Kartierlücken (insbesondere im Privatwald) vorliegen, bietet sich eine entsprechende Schwerpunktsetzung an. Für die zwei repräsentativen Beispielregionen im niedersächsischen Berg- und Tiefland konnte gezeigt werden, wie wichtig für den Privatwald eine Standortkartierung ist, um bestehende Methoden einer klimaangepassten Baumartenwahl und Nährstoffmanagementsysteme implementieren zu können. Für nicht kartierte Flächen des niedersächsischen Privatwaldes wurden in den Beispielregionen die Standorttypen mit in Vorgängerprojekten entwickelten Methoden des Digital Soil-Mapping (DSM) geschätzt. Der Standorttyp der kartierten und geschätzten Flächen ist die Eingangsvariable zur Ableitung von bodenphysikalischen und –chemischen Grundinformationen für Privatwaldflächen. Auf dieser Grundlage konnten nicht nur für die niedersächsischen Flächen, sondern auch für alle Beispielregionen in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg und Niedersachsen die atmosphärischen Stoffeinträge, Verwitterungsraten, Sickerwasserausträge und Bodenvorräte abgeleitet werden.

Brandenburg:

Für Brandenburg wurde ein Prototyp einer QField-Anwendung entwickelt. Betrachtungsgrundlage ist ein 100m-Punkteraster für die gesamte Brandenburger Waldfläche. An den Rasterpunkten können standortspezifische Informationen abgerufen werden, die die Themen Klima, Boden, Wasserhaushalt, Baumarteneignung und nachhaltige Nutzungsintensität abdecken. Die Eignung des Standorts für Baumarten hinsichtlich deren Ansprüche an Nährstoffe und Klima kann für Baumartengruppen an den Rasterpunkten abgelesen werden. Die gewonnenen Ergebnisse zum Wasserhaushalt zeigen eine deutliche Zunahme des Trockenstressrisikos zwischen den Perioden 1961-1990 und 1991-2020 sowie eine zukünftige Zunahme des Trockenstressrisikos im Zeitraum 2071-2100. Substrateigenschaften und Grundwasseranschluss können die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in gewissem Maße abmildern. Die Daten der verschiedenen Themenbereiche wurden für die QField-Anwendung in einfache Indizes überführt, die es auch Nutzern ohne fachliches Hintergrundwissen ermöglichen, deren Bedeutung intuitiv zu erfassen. Parallel zur QField-Anwendung wurde das Konzept einer sogenannten „Standortfibel“ erarbeitet, in der die einzelnen Themenbereiche populärwissenschaftlich erläutert werden. So kann der Nutzer seine Fachkenntnisse selbstständig erweitern. Sowohl die QField-Anwendung als auch die Standortfibel werden als frei verfügbarer Download bereitgestellt.

Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Erzielte Ergebnisse

Schaffung einer gemeinsamen Datengrundlage

StWM-KPW Datenbank

Basierend auf der Datenbank des Waldklimafonds-Projekts „Waldproduktivität - Kohlenstoffspeicherung - Klimawandel“ (WP-KS-KW) (BWI 2012 Umweltdatenbank Bodenprofile: www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00049873) wurde eine projektinterne Datenbank im SQLite-Format erstellt, um die unterschiedlichen Datengrundlagen für Modellierungen zu vereinheitlichen und den Datenaustausch zwischen den Projektpartnern zu gewährleisten.

In der Datenbank wurden alle Daten, die für die Modellierung von Wasser-, Nährstoffhaushalt und Anbaurisiko benötigt werden, in einer Tabelle abgelegt:

- **Flächendaten:** Flächenbezogene Daten pro Bundesland. Flächen mit einer genormten eindeutigen GIS-ID (11-stellige ID aus UTM 32 Rechts- und Hochwert auf 10 m gerundet) und beliebig vielen Teilflächen inkl. Flächengröße und Koordinate (Centroid).
- **Kartiereinheiten:** Definition der Kartiereinheiten pro Bundesland mit beliebig vielen Varianten mit einem Bodentyp und Zuordnung zu einem Leitprofil.
- **Profilhorizonte:** Leitprofile zu den Kartiereinheiten pro Bundesland (Horizonte, Bodenart, chem. und physikalische Parameter). Hinweis: Für Brandenburg wurden diese Parameter direkt als Flächendaten abgelegt, weil sie flächig vorhanden waren.
- **Wasserhaushalt:** Mit LWF-Brook90 modellierte Wasserhaushaltsparameter, die für die Modellierung des Nährstoffhaushalts benötigt werden

Die Metadaten und Codelisten der Datenbank wurden systematisch in wenigen Tabellen zusammengeführt und ihre Datenstruktur vereinheitlicht, nur die Komplexmerkmale Bodentyp und Stratigraphie wurden gesondert abgelegt und waren durch alle Projektpartner erweiterbar. Tabelle 4 zeigt die Definitions- bzw. Codelisten der Datenbank:

Tabelle 4: Definitions- bzw. Codelisten der gemeinsamen StWM-KPW-Datenbank

Nr	Bezeichnung	Herkunft/Kommentar
10	Bundesland	Deutschland, genormt
20	Quelle/Qualität	nach Projekt WP-KS-KW
21	Merkmal Größe	nach KA5 (Tabelle 5, Seite 53)
22	Merkmal Grad/Stärke	nach KA5 (Tabelle 3, Seite 50)
23	Merkmal Volumenanteil	nach KA5 (Tabelle 33, Seite 150)
24	Merkmal Flächenanteil	nach KA5 (Tabelle 4, Seite 53)
31	Durchwurzelung	nach KA5 (Tabelle 24, Seite 129) Wurzeln/dm ²
32	Humusgehalt	nach KA5 (Tabelle 15, Seite 122)
33	Carbonatgehalt	nach "Forstliche Standortaufnahme" (2003, Tabelle 24) erweitert nach BIS (Bodeninformationssystem)
34	Wasserhaushalt	nach Wolff et al. 1998 und Gauer et al. 2003
35	Nährkraft	nach Wolff et al. 1998
36	KMgCaP-Serie	Ostdeutsche Standorterkundungsanleitung (SEA 95 Teil B 2013, Seite 156)
37	Nährstoffklasse Kolb	Nährstoffklasse nach Kolb (2019)
38	Basenverlaufstyp	Basenverlaufstyp/Basenausstattung (Tiefenprofiltypen der Basensättigung) nach LWF (BaSIS/KLIP4)
40	Stratigraphie - Gesamt	Geologische Kartiereinheit/Stratigraphie, teils nach nach KA5, teils Langtext, Zuweisung zu Detailliste 41
41	Stratigraphie - Detail	nach KA5 (Liste 29, Seite 187), erweitert
42	Substrat	nach KA5 (Tabelle 43, Seite 174), Wolff et al. 1998 (Tabelle II, Seite 74-76) und BZE II (Tabelle IV-23)

Nr	Bezeichnung	Herkunft/Kommentar
43	Bodenfraktion	nach KA5 (Feinboden Tab. 28, Seite 141, Grobboden Tabelle 32, Seite 150)
44	Grobbodenart	nach KA5 (Tabelle 34, Seite 152) erweitert nach BIS (Bodeninformationssystem Bayern)
45	Feinbodenart	nach KA5 (Tabelle 30, Seite 144, Tabelle 31, Seite 148, Liste 25, Seite 164) erweitert nach BIS
46	Horizonttiefe	Endteufe/Fortsetzung des Profils bzw. tiefsten Horizonts nach KA5
47	Trockenrohdichte	5 Klassen nach Projekt WP-KS-KW
48	Tiefenstufe	nach BZE I/II/III
50	Bodensubtyp - Gesamt	nach KA5 (Kapitel 5.7.1.3, Seite 197-263), laufende Nr. der Ausprägung
51	Bodentyp - Detail	nach KA5 (Kapitel 5.7.1.3, Seite 197-263)
52	Bodensubtyp	nach KA5 (Tabelle 49, Seite 273) - nachgestellter Abweichungssubtyp
53	Bodenvarietät	nach KA5 (Tabelle 46, Seite 264-269), Varietäten von Typen, vorangestellt
54	Bodentyp-Trennzeichen	nach KA5 (Symbolkombination, Seite 270-272)
55	Humusform	nach KA5 (Kapitel 5.7.3, Seite 298-309)
60	Klimaszenario	projektintern

Verwendeter Klimadatensatz

Eine wichtige Grundlage für ein klimastabiles Waldmanagement sind Daten zum aktuellen und zukünftigen Klima. Die Ansprüche vor allem seitens der Wasserhaushaltsmodellierung sind hierbei hoch: die Klimadaten müssen neben Temperatur und Niederschlag auch Informationen zu Strahlung, Luftfeuchte und Wind enthalten sowie zeitlich und räumlich möglichst hoch aufgelöst sein.

Ein hochqualitativer Datensatz, der im Rahmen der Waldklimafonds-Projekte WP-KS-KW (2014-2017) und WHH-KW (2019-2022) erstellt und verwendet wurde, ist der Klimadatensatz der Universität Hamburg vom Lehrstuhl für physische Geografie von Prof. Böhner - hier kurz „UHH-Klimadaten“ genannt (Dietrich et al. 2018, Weis et al. 2023). Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die aus dem vorgenannten Datensatz im Projekt StWM-KPW verwendeten Klimadatensätze.

Tabelle 5: Übersicht verwendeter Klimadatensätze im Projekt StWM-KPW

Datensatz	Vorrangige Verwendung (Bezeichnung)	Datengenerierung	zeitliche Auflösung	räumliche Auflösung	Parameter
Observed	1991-2020 (heute)	Regionalisierung von DWD-Wetterstationsdaten und Niederschlagsmessungen	Tageswerte 01.01.1961- 31.12.2020	250 m, deutschlandweit mit ca. 2 km Puffer	Temperatur (mean, min, max), Niederschlag, Globalstrahlung, Wasserdampfdruck, Windgeschwindigkeit
MPIESM CLM RCP 4.5	2071-2100 (milder Klimawandel)	Eurocordex 11' Download, Adjustierung auf <observed> Datensatz 1971-2000, dann Anwendung der Regionalisierungsalgorithmen auf gesamten Zeitraum 1961-2100	Tageswerte 01.01.1961- 31.12.2100		
MPIESM CLM RCP 8.5	2071-2100 (harter Klimawandel)				

Ein kritischer Punkt bei der Verwendung der Daten von Klimamodellen ist die **Adjustierung** auf einen Referenzzeitraum (Teutschbein und Seibert, 2012, Maraun et al., 2016, Dinh und Aires, 2023). Dazu modellieren Klimamodelle das Klima rückliegender Perioden. Für diese Zeiträume - in Deutschland üblicherweise 1971-2000 - kann man die Klimamodelle mit der Klimarealität vergleichen und systematische Abweichungen adjustieren. Nach der Adjustierung sollten für diesen Referenzzeitraum klimatische Kennwerte - allen voran Jahrestemperatur- und niederschlagsverlauf - zwischen Modell und Realität möglichst gut übereinstimmen. In der Folge werden die Adjustierungsmuster auf den gesamten Modellierungszeitraum von 1971-2100 angewandt. Vor der Verwendung der Modelle in StWM-KPW wurde die Adjustierung anhand der Temperatur und des Niederschlags überprüft. Für die Temperatur ergaben sich vernachlässigbare Residuen zwischen Modell und Wirklichkeit, für den Niederschlag wurde jedoch eine ca. 10% Überschätzung seitens der Modelle festgestellt.

Das Adjustierungsverfahren der Universität Hamburg (Sachindra et al., 2014) hatte zwar den Großteil der ursprünglichen Abweichung zwischen Modell und Realität beseitigt, dennoch war eine vereinfachte lineare Nachjustierung notwendig. Komplexe Quantilsverfahren wären rechentechnisch nicht realisierbar gewesen.

Im Folgenden sind einige Eckdaten zum Klima für die Beispielgebiete in StWM-KPW aufgeführt. Abbildung 2 bis Abbildung 5 zeigen die Sommer- und Wintertemperatur und den Sommer- und Jahresniederschlag für die drei in StWM-KPW genutzten Datensätze. Tabelle 5 stellt gebietsweise Kennwerte für die Beispielgebiete vor.

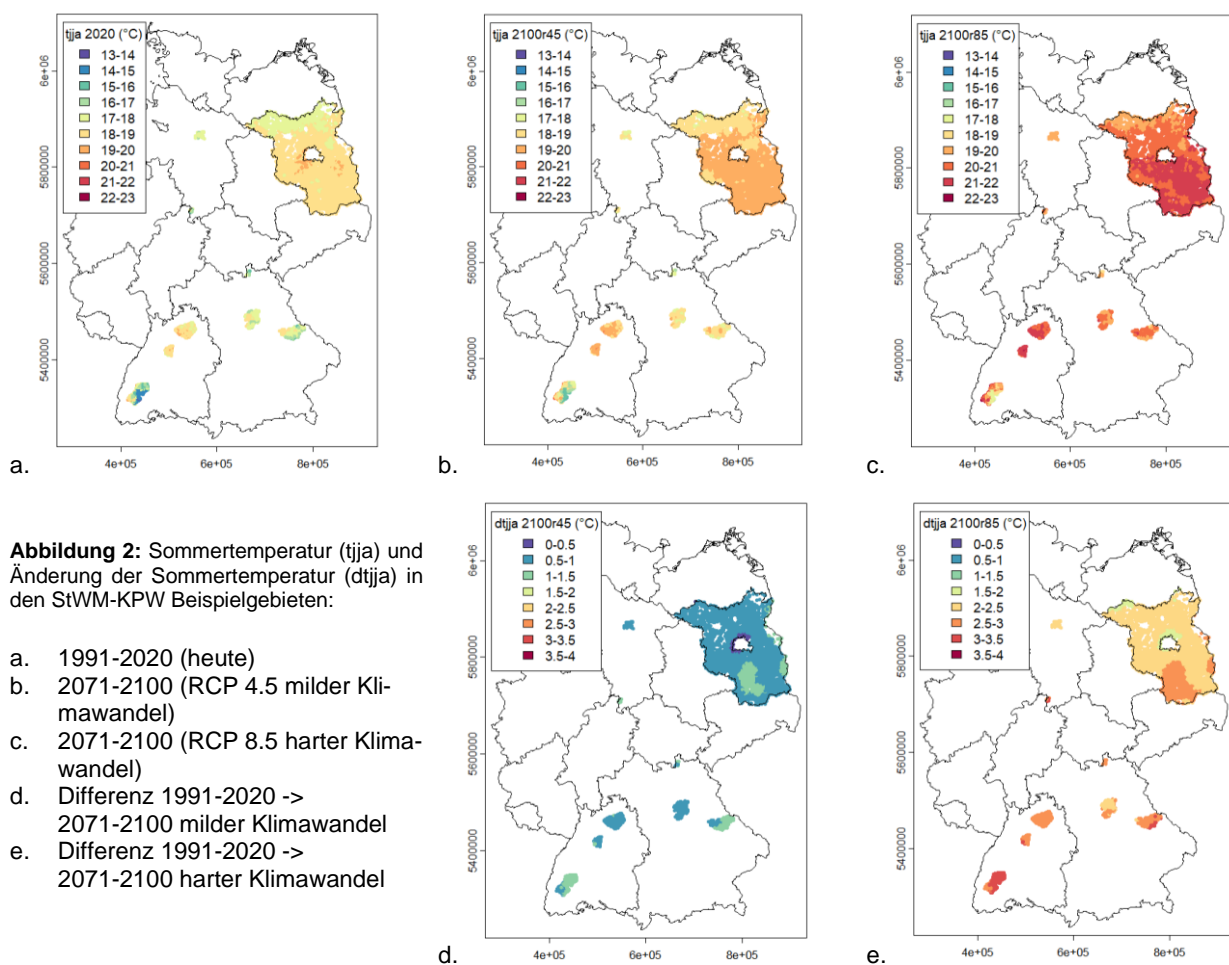
- Die mittlere Jahrestemperatur 1991-2020 liegt in den Beispielgebieten zwischen 8,0°C (Kronach-Rotenhkirchen) und 10,1°C (mittl. Neckar). Der Anstieg im RCP 4.5 liegt bei 0,7-1,0°C und im RCP 8.5 bei 2,4-2,8°C. Er ist am höchsten im bayerischen Beispielgebiet Cham-Roding.
- Die mittlere Sommertemperatur 1991-2020 liegt in den Beispielgebieten zwischen 17,3°C (mittl. Schwarzwald) und 19,4°C (mittl. Neckar). Der Anstieg im RCP 4.5 liegt bei 0,7-1,3°C und im RCP 8.5 bei 2,1-3,1°C. Er ist am höchsten im mittl. Schwarzwald und am niedrigsten in Löwenhagen, Niedersachsen.
- Die mittlere Wintertemperatur 1991-2020 liegt in den Beispielgebieten zwischen -0,4°C (Cham-Roding) und 1,7°C (Soltau und Löwenhagen). Der Anstieg im RCP 4.5 liegt bei 0,9-1,4°C und im RCP 8.5 bei 2,9°C und 3,6°C. Er ist am höchsten in Cham-Roding und am niedrigsten im mittl. Schwarzwald.
- Der mittlere Jahresniederschlag 1991-2020 liegt in den Beispielgebieten zwischen 590 mm (Brandenburg) und 1.540mm (mittl. Schwarzwald). Er bleibt im RCP 4.5 konstant oder verzeichnet eine leichte Zunahme bis 16% in Soltau. Im RCP 8.5 nimmt er in allen Beispielgebieten um 2-20%, im Mittel 11% zu.
- Der mittlere Sommerniederschlag 1991-2020 liegt in den Beispielgebieten zwischen 195 mm (Brandenburg) und 401mm (mittl. Schwarzwald). Er nimmt in allen Beispielgebieten ab, im RCP 4.5 durchschnittlich 8%, im RCP 8.5 durchschnittlich 17% ab. In Baden-Württemberg ist dabei der Niederschlagsrückgang im RCP 8.5 mit 23-29% am stärksten.

Zusammenfassend spannen die Beispielgebiete einen Klima-Gradienten vom subkontinentalen, warm-trockenen Brandenburg (9,6°C, 590 mm) bis hin zum subozeanischen, warm-feuchten Oberrheingraben (10,0°C, 730 mm) auf, und vom subkontinentalen, kalttrockenen Cham-Roding (8,3°C, 790 mm) bis hin zum subozeanischen, kalt-feuchten Schwarzwald (8,1°C, 1.540 mm). Die Temperaturänderungen zwischen 2020 und 2100 (80 Jahre) liegen den Klimamodellen zufolge bei ca. 1°C bei einem mildem Klimawandel (RCP 4.5) und bis zu 2,5°C bei einem hartem Klimawandel (RCP 8.5). Während die Jahresniederschläge im Mittel 7% im RCP 4.5 und 11% im RCP 8.5 zunehmen, nehmen die Sommerniederschläge im Mittel um 8% im RCP 4.5 bzw. 17% im RCP 8.5 ab. Im Vergleich zu anderen Klimamodellen liegt das ausgewählte Klimamodell MPIESM CLM bzgl. des Temperaturanstiegs sowohl im RCP 4.5 als auch im RCP 8.5 am unteren Ende der Modelle des jeweiligen RCP, bzgl. des Niederschlagsrückgangs hingegen am oberen Ende (Hübener et al., 2017).

Tabelle 6: Klimakennwerte für die Beispielgebiete in StWM-KPW. Nds. = Niedersachsen, B.-W. = Baden-Württemberg, Som = Sommer (Juni - August), Veg = Vegetationsperiode (Mai-September), Win = Winter (Dezember - Februar).

	Temperatur-Kennwerte (°C)											
	<heute>				RCP 4.5 <milder Klimawandel>				RCP 8.5 <harter Klimawandel>			
Beispielgebiet	Som	Veg	Jahr	Win	Som	Veg	Jahr	Win	Som	Veg	Jahr	Win
Brandenburg	18,4	16,7	9,6	1,3	19,2	17,5	10,4	2,3	20,7	18,9	12,1	4,6
Soltau, Nds.	18,4	16,7	9,9	1,7	19,2	17,5	10,6	2,9	21,1	19,2	12,3	4,8
Löwenhagen, Nds.	17,8	16,2	9,5	1,7	18,5	16,9	10,3	2,8	19,9	18,2	11,9	5,0
Kocher-Jagst, B.-W.	16,5	15,0	8,7	1,2	17,8	16,2	9,7	2,4	19,6	17,8	11,4	4,4
Mittl. Neckar, B.-W.	18,5	16,8	10,1	2,0	19,4	17,7	10,8	3,1	21,4	19,4	12,5	5,0
Mittl. Schwarzwald, B.-W.	16,2	14,5	8,1	0,6	17,3	15,6	8,9	1,6	19,3	17,3	10,6	3,5
Cham-Roding, Bayern	17,2	15,5	8,3	-0,4	18,3	16,6	9,3	1,1	20,1	18,2	11,1	3,4
Nürnberger Land, Bayern	17,6	15,9	8,8	0,3	18,3	16,6	9,4	1,4	20,1	18,2	11,2	3,6

Kronach-Rothenkirchen, Bayern	16,6	14,9	8,0	-0,2	17,6	15,9	9,0	1,2	19,4	17,5	10,7	3,4
	Niederschlags-Kennwerte (mm)											
	<heute>				RCP 4.5 <milder Klimawandel>				RCP 8.5 <harter Klimawandel>			
Beispielgebiet	Som	Veg	Jahr	Win	Som	Veg	Jahr	Win	Som	Veg	Jahr	Win
Brandenburg	195	297	587	131	163	281	595	136	172	289	629	145
Soltau, Nds.	218	352	817	211	230	406	948	248	188	365	978	282
Löwenhagen, Nds.	201	304	653	161	169	283	648	164	168	281	685	174
Kocher-Jagst, B.-W.	238	374	849	220	201	361	870	232	184	324	868	245
Mittl. Neckar, B.-W.	229	364	733	156	222	401	821	176	170	348	828	199
Mittl. Schwarzwald, B.-W.	401	657	1.539	403	381	693	1.702	450	285	593	1.703	514
Cham-Roding, Bayern	265	404	792	176	239	385	826	195	235	406	909	220
Nürnberger Land, Bayern	251	397	888	230	246	416	977	249	220	400	1.019	282
Kronach-Rothenkirchen, Bayern	259	408	989	291	237	397	1.024	286	225	389	1.090	323



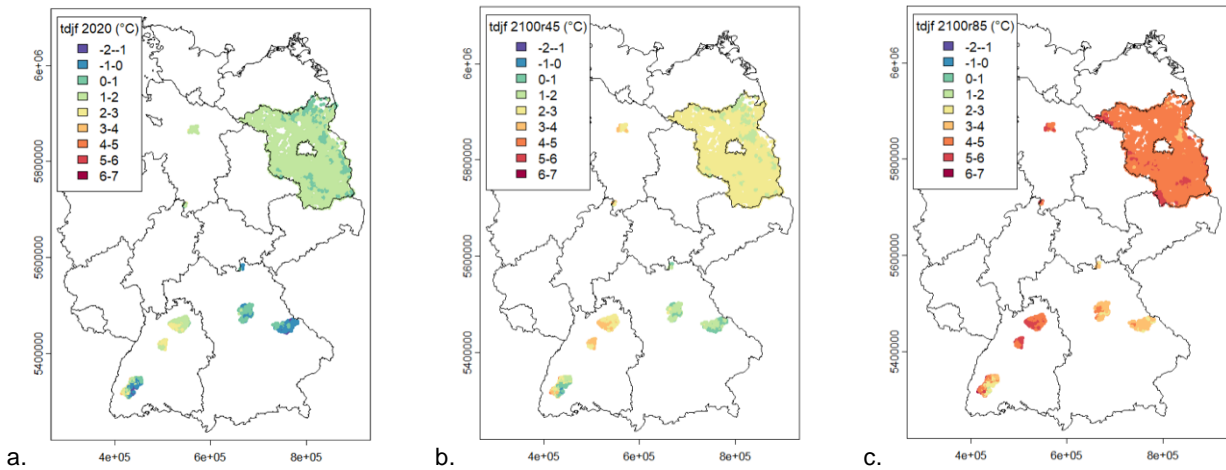


Abbildung 3: Wintertemperatur (tdjf) und Änderung der Wintertemperatur (dtdjf) in den StWM-KPW Beispielgebieten:

- a. 1991-2020 (heute)
- b. 2071-2100 (RCP 4.5 milder Klimawandel)
- c. 2071-2100 (RCP 8.5 harter Klimawandel)
- d. Differenz 1991-2020 -> 2071-2100 milder Klimawandel
- e. Differenz 1991-2020 -> 2071-2100 harter Klimawandel

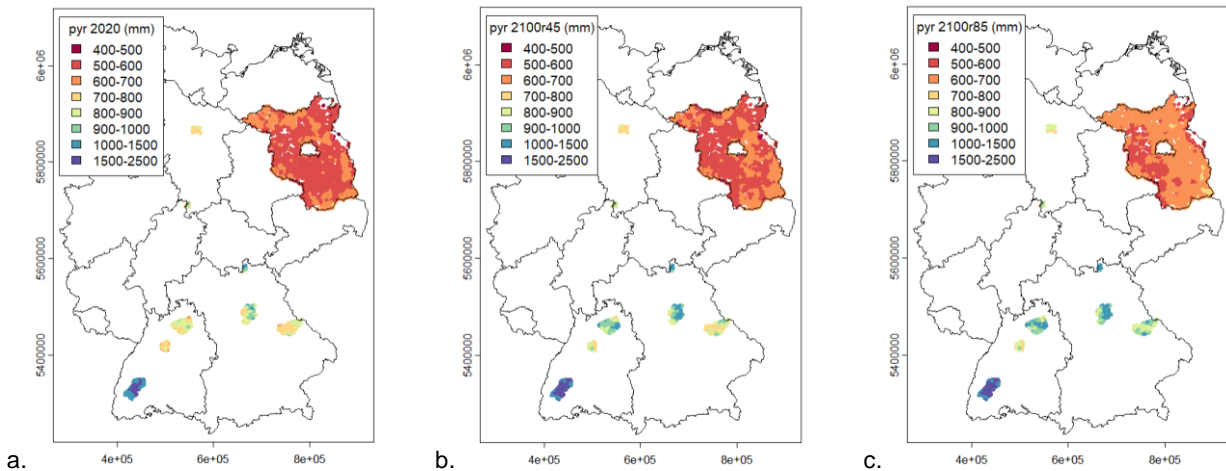
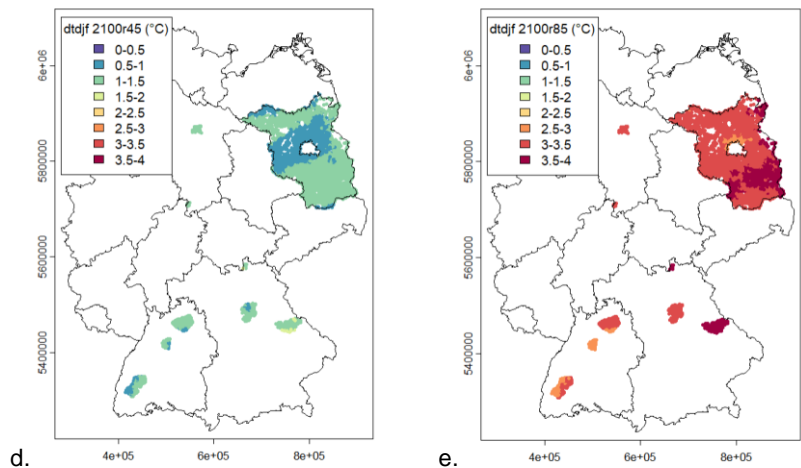
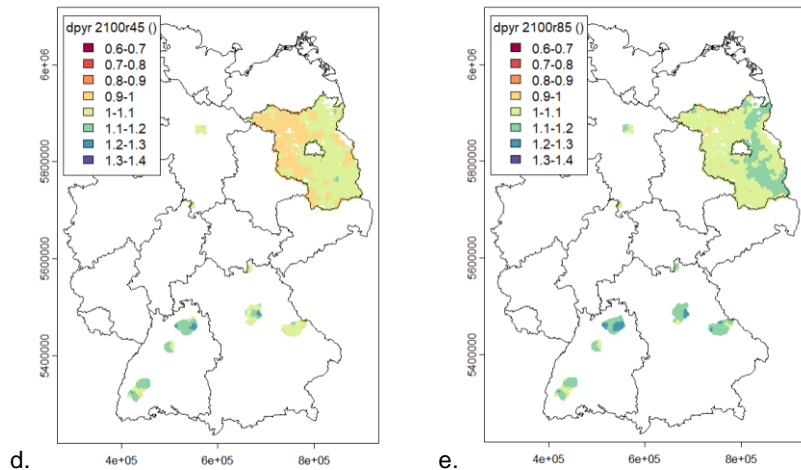
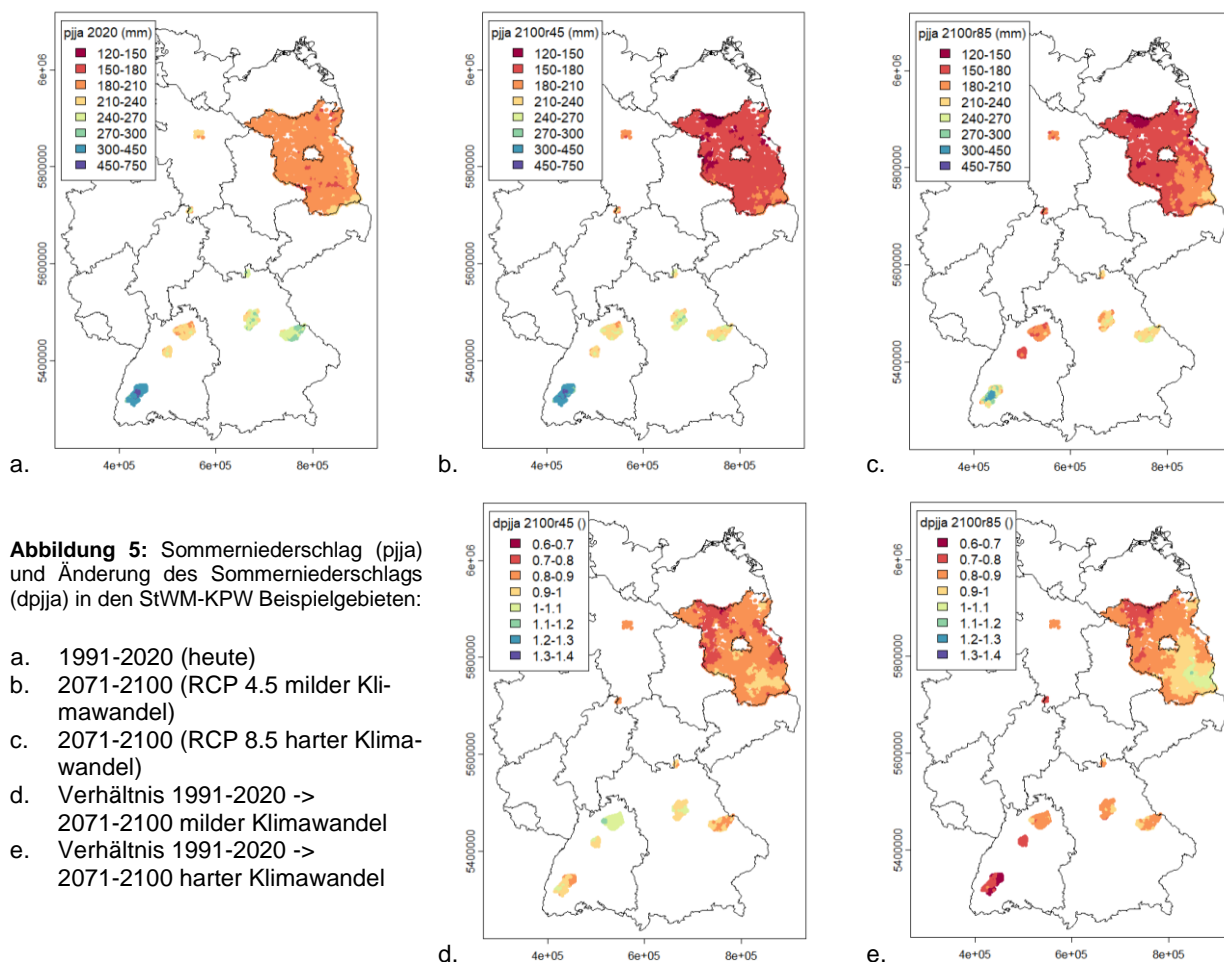


Abbildung 4: Jahresniederschlag (pyr) und Änderung des Jahresniederschlags (dpyr) in den StWM-KPW Beispielgebieten:

- a. 1991-2020 (heute)
- b. 2071-2100 (RCP 4.5 milder Klimawandel)
- c. 2071-2100 (RCP 8.5 harter Klimawandel)
- d. Differenz 1991-2020 -> 2071-2100 milder Klimawandel
- e. Differenz 1991-2020 -> 2071-2100 harter Klimawandel





Abschließend stellt Abbildung 6 Temperatur- und Niederschlagszeitreihen des Beispielgebiets Nürnberger Land dar. Die Jahreswerte fließen u.a. in die Berechnung der Verwitterungsraten für die Nährstoffnachlieferung ein. Die Tageswerte sind hingegen Grundlage für die Wasserhaushaltsberechnung in LWF-Brook90. Wie man in Abbildung 6 erkennen kann, unterschätzen die verwendeten Klimamodelle den rezenten Temperaturanstieg zwischen 1960 und 2020 (besonders in Bayern). Dieser Effekt ist seit längerem bekannt. Ein möglicher Grund hierfür könnte in der Unterschätzung der Wolkenbedeckung in den mittleren Breiten in den Modellen der RCP-Generation liegen (Zelinka et al., 2020). Es macht daher Sinn in Studien wie dieser, nicht die vollen Zeitreihen gegenüberzustellen, sondern sich auf aussagekräftige Zeiträume zu konzentrieren. Dies wurde in StWM-KPW mit dem Fokus auf die Zeiträume 1991-2020 (heute, nur obs. Daten) sowie 2071-2100 (milder Klimawandel RCP 4.5) und 2071-2100 (harter Klimawandel RCP 8.5) getan. Intermediäre Klimaperioden wie 2021-2050 oder 2041-2070 machen wenig Sinn, da die Temperaturen hierbei die heute schon erreichten Werte unterschreiten oder sich kaum unterscheiden.

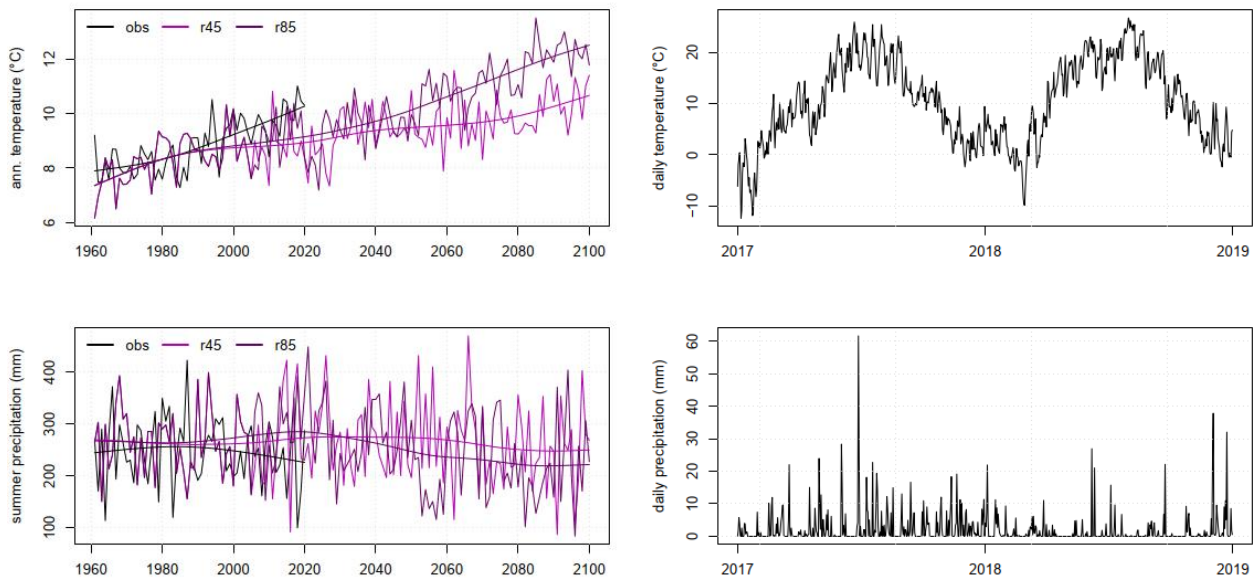


Abbildung 6: Zeitliche Auflösung der in StWM-KPW verwendeten Klimadaten für eine zentrale Koordinate im Beispielgebiet Nürnberger Land (UTM32: 673349, 5486259). Links: Zeitreihe der Jahrestemperatur (links oben) und Sommerniederschläge (links unten) 1961-2020 bzw. 1961-2100 für die Datensätze <observed> (= obs, 1961-2020), MPIESM CLM RCP 4.5 (=r45, 1961-2100), mittlerer Klimawandel) und MPIESM CLM RCP 8.5 (=r85, 1961-2100), harter Klimawandel); Rechts: Zeitreihe der Tagestemperaturen (rechts oben) bzw. Tagesniederschläge 2017-2019 (rechts unten) 2017-2019 für den Datensatz <observed>.

Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten

Hintergrund zum Anbaurisiko

Um die potenziellen Effekte des Klimawandels auf die Baumartenzusammensetzung unserer Wälder zu verstehen, muss man die klimatischen Ansprüche, d.h. die „Klimanische“, der einzelnen Baumarten kennen. Die Klimanische ist eine klimatische Erfassung des physischen Raums, in dem die abiotischen und biotischen Bedingungen das Überleben und die Fortpflanzung einer Art erlauben (Grinnell 1917, Hutchinson 1957). Intuitiv würde man dafür den natürlichen Lebensraum einer Art betrachten, das Verbreitungsgebiet. Aber Anbauarten außerhalb des natürlichen Areals zeigen oft, dass eine Art bis zu einem gewissen Grad auch andere Klimabedingungen tolerieren kann. Z.B. wird die Roteiche (*Quercus rubra*) in Europa unter einem trockeneren aber zugleich kühleren Klima angebaut als in ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet im östlichen Nordamerika (Schaller et al. 2025). Die in StWM-KPW genutzten Artverbreitungsmodelle der LWF basieren auf natürlichen und anthropogenen Verbreitungsdaten von 32 Baumarten (s. Tabelle 7).

Dass Bäume bei Klimaänderungen ihrer Klimanische „hinterherwandern“, ist keine neue Erkenntnis. Die nach-eiszeitliche Rückwanderung der Baumarten in Europa ist über Pollenanalysen gut belegt. Entsprechend ist der Rückschluss, dass sich im derzeitigen Klimawandel die Verbreitungsgebiete der Baumarten verschieben, nicht neu (z.B. Ritchie 1986, Overpeck et al. 1991). Allerdings ist es fraglich, ob die Geschwindigkeit des Klimawandels und die menschliche Zerschneidung der Landschaft eine natürliche Wanderung zulassen (Kölling 2024). Nach einigen frühen Modellierungsansätzen (z.B. Sykes et al. 1996, vgl. Loehle und LeBlanc 1995) legten Guisan und Zimmermann (2000) wesentliche Grundsteine für eine „prädiktive Habitatmodellierung“ mit statistischen Modellen. Mit diesen Ansätzen kann die Habitatverschiebung im Klimawandel vorhergesagt werden (Pearson und Dawson 2003, Araujo et al. 2005). Die im Projekt StWM-KPW genutzten Artverbreitungsmodelle der LWF basieren auf binomialen generalisierten additiven Modellen (GAMs, Wood 2017), die einen Zusammenhang zwischen Vorkommen/Nichtvorkommen und physiologisch wirksamen Klimavariablen erstellen (vgl. Kap. 2.1.2.2.2. Modell).

Die ersten Analysen und Ergebnisse der LWF zur Klimasensitivität waren die Klimahüllen von Kölling (2007) für 27 Baumarten. Sie verorten die Verbreitung einer Art in einem Temperatur-Niederschlagsdiagramm. Die Klimahüllen machten seinerzeit deutlich, dass Baumarteneignung nicht statisch ist und die Baumarteneignungstabellen der traditionellen Standortkartierung im Klimawandel zunehmend ihre Gültigkeit verlieren. Diese Abkehr von einer bodenfokussierten regionalen Baumarteneignung hin zu einer klimasensitiven Baumarteneignung stellen einen nicht zu unterschätzenden Paradigmenwechsel in der forstlichen Standortkunde dar.

[Kasten 1] Der Begriff **Anbaurisiko** hebt sich vom weiter gefassten traditionell standortkundlichen Begriff **Baumarteneignung** ab (Aldinger und Michiels 1997) und versteht sich als inverse Überlebenswahrscheinlichkeit (Kölling et al. 2009). In dem sich das Anbaurisiko aus der mittels der Artverbreitungsmodelle berechneten Vorkommenswahrscheinlichkeit herleitet, wird angenommen, dass (1) die Überlebenswahrscheinlichkeit im Verbreitungszentrum einer Art am größten ist, und (2) zu den Verbreitungsrändern hin abnimmt. Es wirken am warm-trockenen Rand Hitze und Dürre, am kalten Rand Winterkälte oder eine zu geringe Wärme in der Vegetationszeit. Hinter dem Klimarisiko können auch biotische Agenten wie Borkenkäfer oder Pilzkrankheiten stehen – das wird seitens der Daten und damit seitens der Modelle allerdings nicht explizit unterschieden. Die Daten und Verfahren der Artverbreitungsmodellierung sind viel robuster als direkte Mortalitätsmodelle. Trotzdem handelt es sich beim Link zwischen Vorkommen und Überlebenswahrscheinlichkeit primär um eine Annahme. Erstens ist es möglich, dass eine Art auch über den Verbreitungsrand hinaus überlebensfähig ist, und nur andere Arten konkurrenzstärker sind. Beispielsweise sinkt die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Waldkiefer mit zunehmenden Niederschlägen nicht, weil die Art hier weniger überlebensfähig ist, sondern weil andere Arten konkurrenzstärker sind. Zweitens gibt es manche Klimaräume nicht oder nur selten, z.B. warm-feuchte Sommerklimate in Europa. Hier kann das Verhalten einer Art nur annahmegestützt modelliert werden („Extrapolation“) und sollte wenigstens für bekannte physiologische Grenzen auf den nachweislichen Datenbereich begrenzt werden. D.h. auch wenn diese Art dort vorkommen könnte, fehlen ausreichend Nachweise, dass sie dort auch vorkommen kann. Dies ist kein Mortalitätsrisiko, sondern ein Wissensrisiko. Diese und weitere Aspekte werden in der Literatur unter den Stichworten realisierte vs. fundamentale Nische diskutiert (Hutchinson 1959, Patten and Auble 1981, Soberon 2007).

In Folge wurden für einen klimaangepassten Waldumbau in Bayern zunächst provisorische Klimarisikokarten für sieben Baumarten herausgegeben (Kölling et al. 2009) und schließlich das *Anbaurisiko* (vgl. Kasten 1) für 21 Baumarten in das Bayerische Waldinformationssystem BayWIS integriert (Falk und Mellert 2011, Falk et al. 2013a/b, Beck und Kölling 2013). Dort wird das Anbaurisiko zusammen mit den ebenfalls digital aufbereiteten Standortdaten als Bayerisches Standortinformationssystem - BaSIS bezeichnet. 2018 wurde das Anbaurisiko um 11 weitere Arten auf seinen heutigen Umfang von 32 Arten erweitert (Thurm et al. 2018). Seit 2013 ist BaSIS offizielles Beratungswerkzeug der bayerischen Forstverwaltung für den Privat- und Kommunalwald. Seit 2021 wurde das Anbaurisiko der 32 Baumarten überarbeitet und ab Herbst 2025 als BaSIS 2.0 im Bayerischen Waldinformationssystem veröffentlicht (Mette et al. 2025).

Methodik Anbaurisiko

Daten

Wie dargestellt bilden klimasensible Artverbreitungsmodelle (in Folge abgekürzt als SDM für species distribution models) die Grundlage des Anbaurisikos. Die Datengrundlage der Artverbreitungsmodelle für die 2013 in BaSIS 1.0 veröffentlichten 21 Baumarten basierte auf damals verfügbaren Daten von 8.000 europäischen Monitoringpunkten und wurde um Karten der potenziell natürlichen Vegetation Europas erweitert (Bohn et al. 2003). Für die 2018 ergänzten 11 Baumarten in BaSIS 1.0 konnte hingegen auch schon auf den EU-Forest-Datensatz zugegriffen werden, der mehr als eine halbe Million Einträge aus Waldinventuren aus 30 Ländern umfasst (Mauri et al. 2017). Auch die überarbeiteten Artverbreitungsmodelle für BaSIS 2.0 bauen auf dem EU-Forest Datensatz auf, und ergänzen auch weiterhin nicht durch Inventurdaten abgedeckte östliche Verbreitungsgebiete um Artverbreitungskarten nach Caudullo et al. (2017). Einerseits lässt sich dadurch die Winterhärte der Baumarten besser abschätzen. Andererseits werden die lückigen Verbreitungsdaten seltener Baumarten wie Elsbeere, Speierling oder Bergulme geschlossen. Die Zusammenstellung der Daten ist entscheidend für die Aussage der Modelle. Um möglichst vergleichbare Datensätze für alle Arten zu erhalten, wurde großer Wert daraufgelegt, unterschiedliche räumliche und klimatische Dichten in den zugrundeliegenden Datensätzen anzugleichen. Tabelle 7 stellt eine Übersicht über die Zusammensetzung der Datensätze der 32 BaSIS-Baumarten dar.

Tabelle 7: Datenumfang der Artverbreitungsmodelle der 32 BaSIS-Baumarten (BaSIS 2.0)

Baumart	nn (gesamt)		nn (Caudullo et al. 2017)		nn (Mauri et al. 2017)	
	Pres	Abs	Pres	Abs	Pres	Abs
Nadelbäume heimisch						
<i>Abies alba</i> (Weisstanne)	3449	7253	399	744	3050	6509
<i>Larix decidua</i> (Europ. Lärche)	4196	6202	63	714	4133	5488
<i>Picea abies</i> (Fichte)	18817	8593	2097	1046	16720	7547
<i>Pinus sylvestris</i> (Waldkiefer)	17512	10282	2753	1318	14759	8964
Nadelbäume alternativ						
<i>Abies grandis</i> (Küstentanne)	335	4719	0	0	335	4719
<i>Larix kaempferi</i> (Japanlärche)	1855	4815	0	0	1855	4815
<i>Pinus nigra</i> (Schwarzkiefer)	2697	6803	234	1172	2463	5631
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Douglasie)	2744	6718	0	0	2744	6718
Laubholz heimisch						
<i>Carpinus betulus</i> (Hainbuche)	7209	8938	1197	1030	6012	7908
<i>Fagus sylvatica</i> (Rotbuche)	9295	9711	1041	1206	8254	8505
<i>Quercus petraea</i> (Traubeneiche)	6669	9222	1201	1093	5468	8129
<i>Quercus robur</i> (Stieleiche)	11335	10274	2304	1086	9031	9188
Edellaub heimisch						
<i>Acer campestre</i> (Feldahorn)	4979	9504	1579	1128	3400	8376
<i>Acer platanoides</i> (Spitzahorn)	3743	10179	2127	1096	1616	9083
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)	6340	9877	902	1159	5438	8718
<i>Fraxinus excelsior</i> (Gem. Esche)	9813	10636	2296	1024	7517	9612

Baumart	nn (gesamt)		nn (Caudullo et al. 2017)		nn (Mauri et al. 2017)	
	Pres	Abs	Pres	Abs	Pres	Abs
Prunus avium (Vogelkirsche)	5291	10183	1267	1183	4024	9000
Sorbus aucuparia (Vogelbeere)	10529	11476	3524	863	7005	10613
Sorbus domestica (Speierling)	811	5620	577	830	234	4790
Sorbus torminalis (Elsbeere)	2124	7081	871	1191	1253	5890
Tilia cordata (Winterlinde)	4570	9698	2627	902	1943	8796
Tilia platyphyllos (Sommerlinde)	1784	7784	922	714	862	7070
Ulmus glabra (Bergulme)	3255	9909	2507	1070	748	8839
Laubholz sonstiges						
Alnus glutinosa (Schwarzerle)	8644	11666	2953	1053	5691	10613
Betula pendula (Sandbirke)	13111	10846	3216	841	9895	10005
Pyrus pyraister (Wildbirne)	1914	7117	1438	1028	476	6089
Laubbäume alternativ						
Acer monspessulanum (Franz. Ahorn)	1119	5599	550	1038	569	4561
Quercus pubescens (Flaumeiche)	3280	6761	733	1017	2547	5744
Castanea sativa (Edelkastanie)	3765	7032	165	1142	3600	5890
Quercus cerris (Zerreiche)	2210	5527	469	995	1741	4532
Quercus rubra (Roteiche)	1128	7028	0	0	1128	7028
Robinia pseudoacacia (Robinie)	2575	7303	0	0	2575	7303

Modell

Die Beziehung zwischen Vorkommen/Nichtvorkommen (Präsenzen/Absenzen) einer Art und dem Klima wurde mithilfe von binomialen GAMs modelliert. Resultat ist die Vorkommenswahrscheinlichkeit einer Art unter einem bestimmten Klima. Die Vorkommenswahrscheinlichkeit skaliert zwischen 0 und 1 (bzw. 0-100 %):

Vorkommenswahrscheinlichkeit ~ gam(Sommertemperatur, Sommerniederschlag, Wintertemperatur)

Im Unterschied zu den 2013 bzw. 2018 erstellten SDMs wurde bei der Aktualisierung des Anbaorisikos für BaSIS 2.0 konsequent auf die genannten drei Klimaparameter umgestellt (Mette et al. 2025). Sommertemperatur und -niederschlag dienen als Proxys für die Hitze- und Trockentoleranz von Baumarten, die Wintertemperatur für die Winterhärte. Als Klimadatensatz wurde auf Chelsa v2.1 (Karger et al. 2018) zurückgegriffen. Um unplausible Modellprognosen im Extrapolationsbereich zu vermeiden, d.h. dort, wo keine Klimadaten für die Modellkalibrierung vorhanden waren, wurden klimatische Grenzen aus dem Vorkommensdatensatz abgeleitet. Diese verhindern, dass ein Modell eine positive Vorhersage für Bereiche ohne physische Vorkommensnachweise trifft.

Anbaorisiko-Klassen

Die Einteilung der Vorkommenswahrscheinlichkeit in fünf Anbaorisikoklassen erfolgte in BaSIS 2.0 annahmegestützt über den Vorkommensdatensatz und über den Abgleich mit dem bereits existierenden Anbaorisiko (Tabelle 8). Dabei wird die Vorkommenswahrscheinlichkeit für bestimmte Perzentile des Vorkommensdatensatzes ermittelt. Voraussetzung ist eine weitgehend harmonische Zusammenstellung der Vorkommensdaten über alle Arten hinweg unter Angleichung unterschiedlicher räumlicher und klimatischer Dichten.

Tabelle 8: Bezeichnung der fünf Anbaorisikoklassen im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS. Das Datenperzentil gibt an, wieviel % des Vorkommensdatensatzes in diese Anbaorisikoklasse fallen.

Risikoklasse	Legende (Bayern)	Datenperzentil
Sehr gering	sehr geringes Risiko, als führende Baumart möglich	30-70%
Gering	geringes Risiko, als führende Baumart mit hohen Mischbaumanteilen möglich	15-30%
Erhöht	erhöhtes Risiko, als Mischbaumart in mäßigen Anteilen möglich	10-15%
Hoch	hohes Risiko, als Mischbaumart in geringen Anteilen möglich	5-10%
Sehr hoch	sehr hohes Risiko, als Mischbaumart in sehr geringen Anteilen möglich	0-5%

Standortsensibilisierung

Neben der klimagetriebenen Baumarteneinwertung werden bei der Anbaurisikoanalyse auch die Bodeneigenschaften am Standort mit einbezogen. Dies erfolgt in BaSIS über die Verknüpfung des „Klimarisikos“ mit baumartenspezifischen Standorteinschränkungen (Taeger et al. 2016, Thurm et al. 2019), namentlich:

- Stauwasser, Grundwasser, Überflutung und Moor
- Basenausstattung (Kölling 2010) und Kalk (im Oberboden)

Das baumartenspezifische standörtliche Risiko der 32 BaSIS-Baumarten ist Tabelle 9 zu entnehmen. Diese Tabelle wird gern umgangssprachlich als „Patchtabelle“ bezeichnet, da sich das standörtliche Risiko wie Flecken (engl. patches) über das Klimarisiko legt. Das standörtliche Risiko kommt allerdings nur dann zum Tragen, wenn es höher ist als das Klimarisiko. In BaSIS kann der Nutzer in einer Zusatzspalte ablesen, ob an einem Punkt für eine Art das klimatische oder standörtliche Risiko ausschlaggebend ist. Zusätzlich wurde in der Aktualisierung des Anbaurisikos (BaSIS 2.0) auch die nutzbare Feldkapazität (nFK) also der potenziell pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher berücksichtigt, da flachgründige, skelettreiche oder wasserdurchlässige sandige Böden das Risiko von Trockenschäden erhöhen können. Da die Trockentoleranz artspezifisch ist, wurde die nFK mit der artspezifisch erforderlichen oder bevorzugten Sommerniederschlagsmenge verrechnet. In niederschlagsarmen Gebieten und bei trockenheitssensitiven Arten bekommt die Wasserspeicherkapazität des Bodens daher in diesen Fällen eine größere Bedeutung (Mette et al. 2025).

Tabelle 9: Standörtliche Risikoeinwertung der 32 BaSIS-Baumarten („Patchtabelle“).

Faktor	Stauwasser ¹		Grundwasser ¹		Überflutung		Moor ^{1,2}				Basensättigungs-Tiefenverlauf					Kalk (Oberboden)	
	mäßig	stark	ge- neigt	eben	mäßig	stark	K-N	br N	ba N	HM	1+	1-	2	3	4		5
Kürzel	SW-	SW+	GW-	GW+	UB-	UB+	-	HN	-	HH	1+	1-	2	3	4	5	KalkOB
Fichte	3	5	3	4	3	5	5	3	3	4	1	1	1	1	1	1	
Tanne	1	1	1	2	4	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
Lärche	1	1	1	2	3	5	5	4	3	2	2	3	1	1	1	1	
Kiefer	3	5	4	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
Douglasie	2	5	4	5	4	5	5	5	5	5	2	3	1	1	1	1	
Buche	2	3	4	5	4	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	
Stieleiche	1	1	1	2	1	2	5	5	5	5	2	2	1	1	1	1	
Traubeneiche	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	2	2	1	1	1	1	
Bergahorn	2	3	3	4	2	4	5	5	5	5	1	1	1	2	3	5	
Spitzahorn	2	3	3	4	2	4	5	5	5	5	1	1	1	2	3	5	
Feldahorn	2	3	3	4	1	3	5	5	5	5	1	1	1	3	5	5	
Esche	1	2	1	2	1	3	4	5	5	5	1	1	1	3	5	5	
Winterlinde	1	3	3	4	2	4	5	5	5	5	1	1	1	2	3	4	
Sommerlinde	2	5	4	5	4	5	5	5	5	5	1	1	1	3	4	5	
Bergulme	2	4	2	3	3	5	5	5	5	5	1	1	1	3	4	5	
Hainbuche	1	1	1	2	3	5	5	5	5	5	1	1	1	2	2	3	
Schwarzerle	3	2	1	1	1	3	2	3	4	5	1	1	1	1	4	5	
Sandbirke	2	3	1	2	3	5	5	3	3	4	1	1	1	1	1	1	
Elsbeere	2	4	4	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	3	4	5	
Speierling	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	1	1	2	3	4	5	
Vogelbeere	2	3	1	2	5	5	5	5	4	5	1	1	1	1	1	1	
Küstentanne	2	2	2	3	4	5	5	5	5	5	3	2	1	1	1	2	3
Franz.Ahorn	3	4	3	5	3	4	5	5	5	5	1	1	1	1	3	4	1
Edelkastanie	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4	2	1	1	2	4
Jap.Lärche	2	4	2	3	4	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	2	1
Schwarzkiefer	4	5	3	4	4	5	5	5	5	5	1	1	1	1	2	3	1
Vogelkirsche	3	4	3	4	3	5	5	5	5	5	1	1	1	2	4	5	1
Wildbirne	2	3	1	2	2	4	5	5	5	5	1	1	1	1	2	3	1
Zerreiche	2	3	2	3	2	4	5	5	5	5	1	1	1	1	2	3	3
Flaumeiche	3	4	3	4	3	4	5	5	5	5	1	1	1	1	2	3	1
Roteiche	2	3	2	4	4	5	5	5	5	5	2	3	1	1	1	2	3
Robinie	3	5	2	3	3	5	5	5	5	5	1	1	1	1	2	3	2

¹ Patch wirksam in BaSIS nur wenn flächig ² N = Niedermoore: K = Kalkreich, br = basenreich, ba = basenarm; HM = Hochmoor)

Anwendung des Anbaurisikos in StWM-KPW

Die Anwendung der klimabasierten BaSIS-Artverbreitungsmodelle ist grundsätzlich aufgrund der meteorologisch einheitlichen Definition von Temperatur und Niederschlag universell möglich. Hierzu werden lediglich langjährige Monatsmittel der Temperatur und des Niederschlags benötigt. Beim standörtlichen, also bodenabhängigen Anbaurisiko hingegen, musste im vorliegenden Projekt auf die jeweilige Definition des standort- bzw. bodenkundlichen Systems der einzelnen Länder geachtet werden.

Ableitung der standörtlichen Risikofaktoren

Aus den standort- und bodenkundlichen Daten der Beispielgebiete der einzelnen Länder werden für eine vollständige Berechnung des Anbaurisikos folgende Informationen benötigt:

- Nutzbare Feldkapazität bis 1m Tiefe nach Teepe et al. (2003), ergänzt nach Osenstetter (2012)
- Stauwasser (mäßig, stark), Grundwasser (mittel, stark), Überflutung (mäßig, stark) und Moor (Kalk-Niedermoor, basenreiches Niedermoor, basenarmes Niedermoor, Hochmoor)
- Basensättigungstiefenverlaufstyp (Basenverlaufstyp) nach Kölling 2010 und Kalk im Oberboden (bis 30 cm Tiefe)

Wie in den Methoden erklärt, wird die nutzbare Feldkapazität (nFK) mit dem Sommerniederschlag verrechnet. Dabei wird angenommen, dass eine nFK von 150 mm bis 1m Tiefe neutral auf das Klimarisiko wirkt. Eine niedrigere nFK kann bei gleichzeitig geringen Niederschlägen das klimatische Trockenheitsrisiko erhöhen, eine höhere nFK das klimatische Trockenheitsrisiko senken. Die Grenzen sind artspezifisch und werden von der Sommertemperatur beeinflusst. Die Verteilung der nFK in den StWM-KPW Beispielgebieten ist in Abbildung 7 dargestellt.

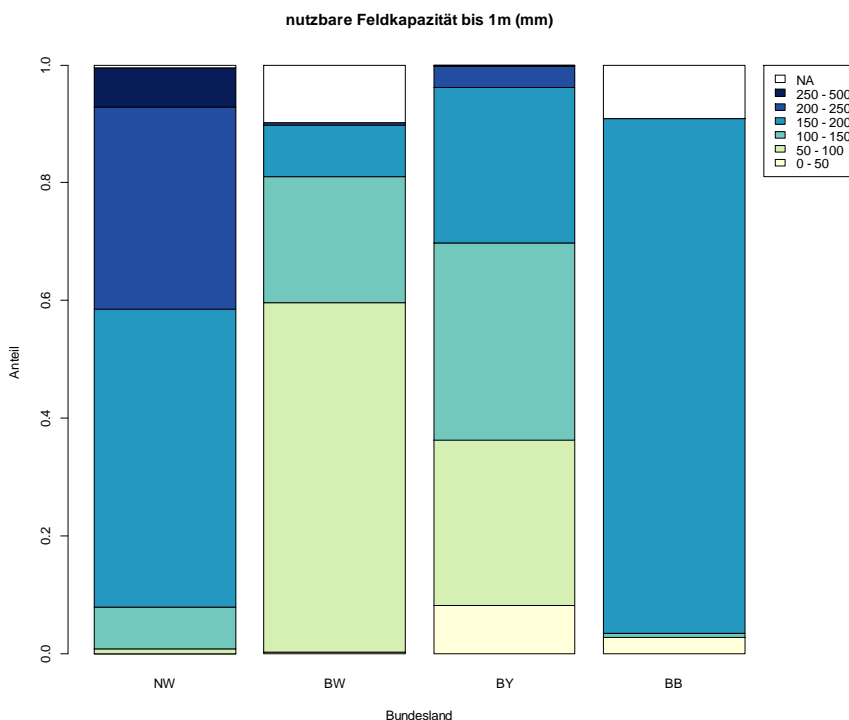


Abbildung 7: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) bis 1m Tiefe auf den Standorten der StWM-KPW Beispielgebiete.

Die beim Anbaurisiko betrachteten Standortfaktoren und die Wirkung auf das Anbaurisiko sind in Tabelle 9 für alle 32 BaSIS-Baumarten dargestellt. Im Folgenden werden meist die Kürzel aus der dritten Zeile verwendet, um die Herleitung der Standortfaktoren aus den Standortdaten zu beschreiben.

Grundlage für die Ermittlung der Anbaurisiko-relevanten Standortfaktoren ist die Datentabelle *Kartiereinheiten* der einzelnen Länder. Neben den Spalten *Land*, *GISId* und den Centroid-Koordinaten *CenterX* und *CenterY* lassen sich auch die Spalten *BodTyp* (Bodentyp), *nFK1m* (nFK bis 1m Tiefe), *Wasser*, *Naehr* (Trophie) und

BasVer (Basenverlaufstyp) auslesen. Diese Spalten wurden für die Ableitung der standörtlichen Risikofaktoren um drei neue Spalten ergänzt (Tabelle 10).

Tabelle 10: Auszug aus der StWM-KPW Tabelle Kartiereinheiten für das Land Bayern. Aus StWM-KPW Tab. Kartiereinheiten übernommen. Land, GISIds, Centroid-Koordinaten CenterX und CenterY, BodTyp (Bodentyp), nFK1m (nFK bis 1m Tiefe), Wasser, Naehr (Trophie) und BasVer (Basenverlaufstyp). Neu generierte Spalten: pWasser (Patch Wasser), waw (water and wetness, Copernicus Sentinel Satellitendaten-Produkt), KalkOB (Kalk im Oberboden).

Spalten aus StWM-KPW Tabelle <i>Kartiereinheiten</i>									Neu generierte Spalten		
Land	GISId	CenterX	CenterY	BodTyp	nFK1m	Wasser	Naehr	BasVer	pWasser	waw	KalkOB
90	196712	666526	5499288	s2BB-PP	182	G1	<NA>	20	T	terrestrial	0
90	196730	679117	5488481	BB-RR	53	<NA>	<NA>	12	T	terrestrial	1
90	196730	679117	5488481	CF-RR	32	T1	<NA>	11	T	terrestrial	1
90	196730	679117	5488481	BB-RZ	123	G1	<NA>	12	T	terrestrial	1
90	196779	683514	5477682	RRn	58	<NA>	<NA>	11	T	terrestrial	0
90	196779	683514	5477682	RRn	61	<NA>	<NA>	11	T	terrestrial	0

Die drei neu generierten Spalten wurden wie folgt erzeugt:

Spalte 1: pWasser: in der neuen Spalte pWasser (Patch-Wasser) wurde auf Grundlage des Bodentyps (Spalte BodTyp) Information zu Stauwasser, Grundwasser und Moor wie folgt abgeleitet (vgl. StOK 2016, S. 154/5 und S. 161):

- Hochmoor (HH) enthält HH oder -HH
- Niedermoor (HN) enthält GH oder -GH oder GM oder -GM oder HN oder -HN
- Starkes Grundwasser (GW+) enthält GG oder GN
- Mittleres Grundwasser (GW-) enthält -GG|-GN
- Starkes Stauwasser (SW+) enthält SS oder SG oder SH
- Mäßiges Stauwasser (SW-) enthält SS- oder SG- oder SH-

Spalte 2: waw: in der neuen Spalte waw (water and wetness) wurde auf Grundlage von Copernicus Sentinel 1/2-Daten (2021) Information zu Überflutung und Grundwasser wie folgt abgeleitet:

- Starke Überflutung (UB+) entspricht waw-Klasse permanently water
- Mäßige Überflutung (UB-) entspricht waw-Klasse temporary water
- Starkes Grundwasser (GW+) entspricht waw-Klasse permanently wet (not used)
- Mittleres Grundwasser (GW-) entspricht waw-Klasse temporarily wet (not used)

Spalte 3: KalkOB: in der neuen Spalte KalkOB (Kalk im Oberboden) wurde positiv vermerkt (1), wenn in der Tabelle <profilhorizonte> Horizonte der obersten 30cm nicht carbonatfrei waren (carbonatarm bis -haltig c1-c7 nach StOK 2016, S. 96)

In einem zweiten Schritt wurden die Spalten *Wasser* und *pWasser* verschnitten, um die standörtlichen Risikofaktoren Stauwasser, Grundwasser, Überflutung und Moor wie in Abbildung 8 dargestellt abzuleiten. Aus der Konfusionsmatrix in Abbildung 8 geht hervor, dass die unterschiedlichen Informationsgrundlagen der Spalten *Wasser* und *pWasser* erwartungsgemäß nicht 100% deckungsgleich sind. So können auch Böden, die in der Spalte *Wasser* als terrestrische Böden bezeichnet sind (T-T5) als mäßiges Stauwasser gewertet werden, wenn in der Spalte *pWasser* der Wert SW+ hinterlegt ist (quasi ein Informationskompromiss). Auch zu erkennen ist, dass fehlende Information (NA) in einer der Spalten oft durch die Information aus der anderen Spalte gefüllt werden kann. Nur für 1.710 von 1.645.030 Datensätzen liegt so am Ende keine Information zu Stauwasser, Grundwasser, Überflutung und Moor vor.

In einem dritten Schritt wurde der Risikofaktor Basenverlaufstyp bestimmt. Er lässt sich direkt aus der Spalte *BasVer* übertragen. Nur dort, wo kein Wert vorhanden war, wurde versucht, ihn über die Spalten *Naehr* und *BodTyp* abzuleiten (Abbildung 9). Auch hier sind die unterschiedlichen Informationsgrundlagen der Spalten *Naehr* und *BasVer* erwartungsgemäß nicht deckungsgleich und die Nutzung der Spalte *Naehr* für den Basenverlaufstyp kann nur als grobe Annäherung gesehen werden (vgl. StOK 2016, 285-287): Naehr 1 -> 1+ (BasVer), Naehr 2 -> 3, Naehr 3 -> 4, Naehr 4-6 -> 5. Zusätzlich wurden für den Fall, dass beide Spalten *BasVer*

und *Naehr* nicht befüllt waren, für Bodentypen, die eine hohe Korrelation mit dem Basenverlaufstyp aufweisen, der Basenverlaufstyp über den Bodentyp zugewiesen: BodTyp AB (Vega) -> 1+ (BasVer), DD (Pelosol) -> 2, PP (Podsol) -> 5, RR (Rendzina, auch RZ Pararendzina und CF Terra fusca) -> 1+. Nur für 6.921 von 1.645.030 Datensätzen liegt am Ende keine Information zum Basenverlaufstyp vor.

Der dargelegte Prozess zur Ableitung standörtlicher Risikofaktoren mündet in einer simplen Tabelle der Standorte der Beispielgebiete der einzelnen Länder mit einer Spalte für den Risikofaktor Wassereinfluss und zwei Spalten für den Risikofaktor Basenverlaufstyp und Kalk im Oberboden. Für den Risikofaktor Wassereinfluss und Basenverlaufstyp sind die Anteile der Standorte in den Beispielgebieten der Projektpartner in Abbildung 10 zusammengestellt. In allen Bundesländern ist der Wasserhaushalt auf 70-90% aller Flächen terrestrisch. In den niedersächsischen und baden-württembergischen Gebieten halten sich Stau- und Grundwassereinfluss ungefähr die Waage. Bayern ist charakterisiert durch einen höheren Anteil mäßig stauwasserbeeinflusster Standorte, Brandenburg durch einen höheren Anteil von Standorten mit mittlerem Grundwassereinfluss und dem fast vollständigen Fehlen von Stauwasserstandorten. Niedersachsen und Brandenburg weisen die meisten (Nieder)moorstandorte auf. Hinsichtlich des Risikofaktors Basenverlaufstyp zeichnen sich die bayerischen Beispielgebiete durch den höchsten Anteil in den basenreichen Substraten aus. Dies ist vor allem durch den fränkischen Jura im Nürnberger Land bedingt. Auch die baden-württembergischen Beispielgebiete weisen einige basenreiche Standorte auf, jedoch dominieren zu mehr als 60% die sehr basenarmen Standorte (Basenverlaufstyp 5); in erster Linie Gneise und Granite im Schwarzwald. In Brandenburg verteilen sich die Böden im Wesentlichen auf die Basenverlaufstypen sehr basenarm (5) und mittelbasisch (3), in Niedersachsen dominieren ebenfalls die Basenverlaufstypen 3 und 5, wobei im ersten Bearbeitungsdurchlauf für 60 % der Standorte zunächst keine Informationen hinterlegt werden konnten. Diese Standorte wurden in ersten Bearbeitungsdurchgang beim Anbaurisiko nicht in Bezug auf die Basenausstattung abgewertet.

► Spalte *pWasser*

	T	SW-	SW+	GW-	GW+	UB-	UB+	HN	HH	<NA>
Terrestrisch	5485	0	0	0	3382	0	0	15	0	80623
Mäßiges Stauwasser	28024	38	2	0	4	0	0	0	0	132
Starkes Stauwasser	640696	437	144	0	351	0	0	0	0	866
Mittleres Grundwasser	142130	5947	720	3	228	0	0	0	0	80
Starkes Grundwasser	154598	3609	434	1	1742	0	0	2	0	419
Mäßige/ seltene Überflutung	57371	148	649	9	738	0	0	10	0	0
Starke/ häufige Überflutung	Sx	110	0	1327	0	0	0	0	0	0
Niedermoor	S0	4937	27	487	0	0	0	0	0	0
Hochmoor	S1	12691	9209	4089	1	1469	0	0	0	467
Keine Angabe mgl.	S2	260	27	2124	0	1408	0	0	3	343
	S3	874	899	2277	1	896	0	0	0	2214
	S4	37	40	636	0	918	0	0	0	9
	S5	16	0	30	0	621	0	0	16	424
	S6	0	0	10	0	291	0	0	167	868
	G0	123313	1554	169	0	15081	0	0	38	11267
	G1	20102	197	9	0	23022	0	0	32	518
	G2	31039	214	116	40	40372	0	0	161	3938
	G3	26	38	780	0	19768	0	0	2365	100
	G4	11071	168	755	377	28922	0	0	8927	3972
	G5	321	0	92	48	3371	0	0	15593	2219
	G6	632	0	63	0	746	0	0	12789	660
	<NA>	69386	3466	2698	451	2585	0	0	341	1710

▼ Spalte *Wasser*

Abbildung 8: Standörtliche Risikofaktoren (links) und Konfusionsmatrix der Spalten *Wasser* und *pWasser* aus der erweiterten Tabelle *kartiereinheiten* (rechts). Die Zuweisung der Risikofaktoren Stauwasser, Grundwasser, Überflutung und Moor erfolgte wie dargestellt über die gemeinsame Betrachtung beider Spalten. Spalte *Wasser*: T-T5 = terrestrischer Wasserhaushalt der Frischestufen (sehr) trocken bis (sehr) frisch, Sx-S6 = Stauwassereinfluss von (sehr) schwach bis stark, G0-G6 = Grundwassereinfluss von (sehr) schwach bis stark. Spalte *pWasser*: T = terrestrisch, SW-/SW+ = mäßiger/starker Stauwassereinfluss, GW-/GW+ = mittlerer/starker Grundwassereinfluss, UB-/UB+ = mäßiger/starker Überflutungseinfluss, HN/ HH = Niedermoor/Hochmoor. <NA> = keine Angaben.

		Spalte BasVer							
		1+	1-	2	3	4	5	6	<NA>
Spalte Naehr	1	39470	193	14500	2033	11	1549	1	14441
	2	9571	322	65103	100947	5778	7112	4	22032
	3	438	12	11885	98096	3171	87926	296	4409
	4	8	8	147	124505	39961	189360	309	35009
	5	0	1	2924	185247	21635	379257	26	64166
	6	0	0	0	0	0	14188	72	1703
Spalte BodTyp	AB->1+	368	0	1	6	0	0	0	1
	caOB->1+	1502	344	47	13	44	0	0	51
	DD->2	23	115	2477	1028	0	0	0	0
	PP->5	43	0	564	362	462	1605	0	2167
	RR->1+	19101	4275	606	16	5	0	0	00
SS->3	172	694	5180	4755	1202	49	0	662	
<NA>	1339	1301	7616	22286	7392	2409	0	6921	

Abbildung 9; Konfusionsmatrix der Spalten *BasVer* und *Naehr* bzw. *BasVer* und *BodTyp* aus der erweiterten Tabelle *kartiereinheiten*. Die Zuweisung des Risikofaktors Basenverlaufstyp erfolgte direkt aus der Spalte *BasVer* und wurde nur bei nicht vorhandenen Werten aus der Spalte *Naehr* bzw. unter Zuhilfenahme gut basendifferenzierbarer Bodentypen *BodTyp* (bzw. dem Vorhandensein von Kalk im Oberboden) abgeleitet. Spalte *BasVer* – Basensättigungstiefenverlauf nach Kölling (2010) in den Klassen 1-5, wobei die Klasse 1 in eine Klasse ohne/ mit möglichem Kaliummangel unterschieden wird (1+/1-) und die Stufe 6 für sehr nährstoffarme, aber gekalkte Böden steht. Spalte *Naehr* – Trophie-Einstufung von eutroph nach dystroph (StOK 2016, S. 285-287). Spalte *BodTyp* – nur gut basendifferenzierbare Bodentypen: AB = Vega, DD = Pelosol, PP = Podsol, RR = Rendzina (inkl. auch Pararendzina und Terra fusca), SS = Pseudogley (zusätzlich: caOB = Kalk im Oberboden)

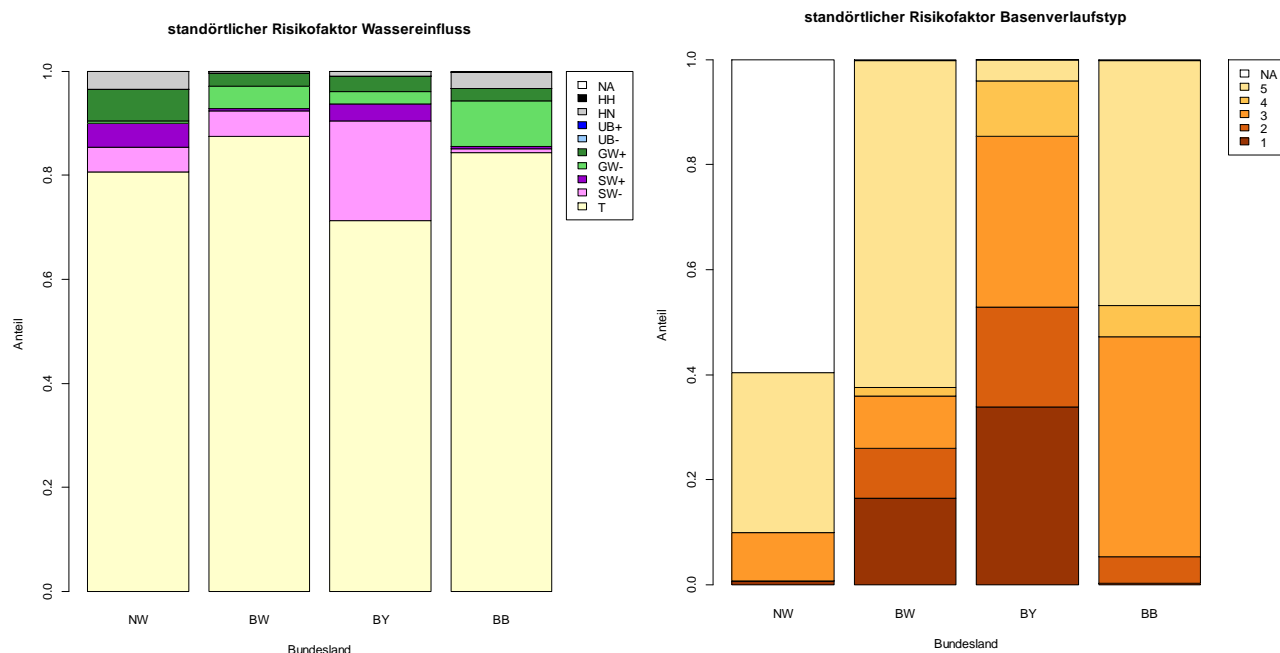


Abbildung 10: Anteil der Standorte ohne/mit Wassereinfluss (links) und Anteil der Basenverlaufstypen (rechts) für die Beispielgebiete in den Bundesländern Niedersachsen (NW), Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY) und Brandenburg (BB). Legendenklassen s. Kürzel in **Tabelle 9**. Der Wassereinfluss und Basenverlaufstyp werden für das Anbaurisiko gebraucht, da sie das Klimarisiko standörtlich modifizieren.

Das Klimarisiko

Die Artverbreitungsmodelle der 32 BaSIS-Baumarten modellieren das Klimarisiko wie dargestellt als Funktion der Klimaparameter Sommertemperatur, Sommerniederschlag und Wintertemperatur (vgl. Kapitel zur Methodik Anbaurisiko). Liegen diese Klimaparameter vor, kann das Klimarisiko auch für andere Klimakonstellationen berechnet werden. Im Fall von StWM-KPW wurde das Klimarisiko für die Beispielgebiete für den Zeitraum 1991-2000 und zwei Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 (MPIESM CLM RCP 4.5 und RCP 8.5) berechnet. Das Klimarisiko kann gut auf einer deutschlandweiten Karte betrachtet werden, da es im Vergleich zum Boden regional relativ homogen ist. Ausnahmen bilden die Beispielflächen in den Mittelgebirgen unterschiedlicher Höhenstufen.

Abbildung 11 zeigt auf einer Deutschlandkarte mit den StWM-KPW Beispielgebieten das Klimarisiko für die Baumarten (von oben nach unten) Fichte, Kiefer, Buche, Bergahorn und Edelkastanie und (von links nach

rechts) für die Klimadaten 1991-2020, 2071-2100 (MPIESM CLM RCP 4.5) und 2071-2100 (MPIESM CLM RCP 8.5).

- Fichte (Abbildung 11.a) weist schon heute in den tiefer gelegenen Beispielgebieten Soltau (NS), Brandenburg, Jagst-Kocher Landschaft (BW) und Weinbaugebiet Vaihingen/Enz (BW) ein sehr hohes Klimarisiko auf. In den höheren Lagen der Gebiete Löwenhagen (NS), Frankenwald (BY), Nürnberger Land (BY), Cham-Roding (BY) steigt das Klimarisiko schon beim RCP 4.5 Szenario auf hoch, im Schwarzwald (BW) erst im RCP 8.5.
- Kiefer (Abbildung 11.b) ist hitze- und trockenheitstoleranter als Fichte und zeichnet sich in den StWM-KPW Beispielgebieten heute noch meist durch ein geringes Klimarisiko aus. Allerdings nimmt das Risiko schon im RCP 4.5 Szenario in tieferen Lagen zu (v.a. Brandenburg, Jagst-Kocher Landschaft und Weinbaugebiet Vaihingen/Enz). Im harten RCP 8.5 Szenario steigt das Klimarisiko dann in nahezu allen Gebieten auf die höchste Stufe mit Ausnahme der Hochlagen im Beispielgebiet Schwarzwald.
- Buche (Abbildung 11.c) weist heute noch in allen StWM-KPW Beispielgebieten ein überwiegend sehr geringes Anbaurisiko auf. Im RCP 4.5 Szenario fallen dann schon einige Flächen in Brandenburg in die erhöhte Risikoklasse. Im RCP 8.5 steigt das Klimarisiko in Soltau (NS), Brandenburg, Jagst-Kocher Landschaft (BW) und Weinbaugebiet Vaihingen/Enz (BW) weiter auf hoch und sehr hoch an, in den übrigen Gebieten Löwenhagen (NS), Frankenwald (BY), Nürnberger Land (BY), Cham-Roding (BY) und Schwarzwald dominieren aber weiterhin die geringen Risikoklassen.
- Das Klimarisiko des Bergahorns (Abbildung 11.d) stellt sich ähnlich dar wie das der Buche. Hier sind v.a. bei Berücksichtigung des standörtlichen Risikos lokale Unterschiede zu erwarten, da der Bergahorn hohe Ansprüche an die Basensättigung des Bodens stellt.
- Das Klimarisiko der Edelkastanie (Abbildung 11.e) entwickelt sich erst mit dem Klimawandel zum Positiven. Während heute noch in vielen Regionen v.a. die Winterkälte das Klimarisiko erhöht, verbessern sich die Risikoklassen vor allem im ozeanischeren Baden-Württemberg sehr schnell, und liegen schließlich in allen StWM-KPW Beispielgebieten fast flächendeckend in der Risikostufe sehr gering.

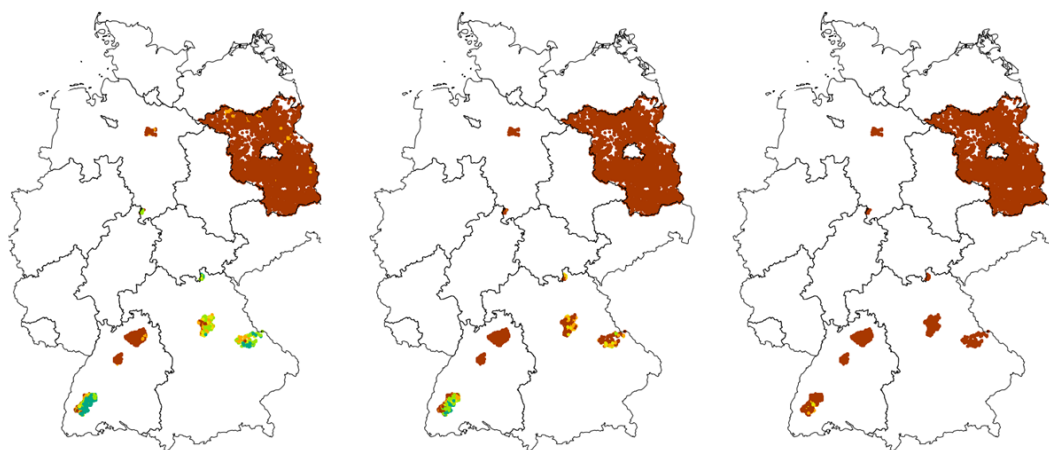
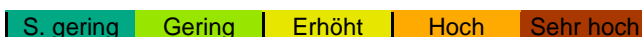


Abbildung 11.a: Klimarisiko Fichte StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:



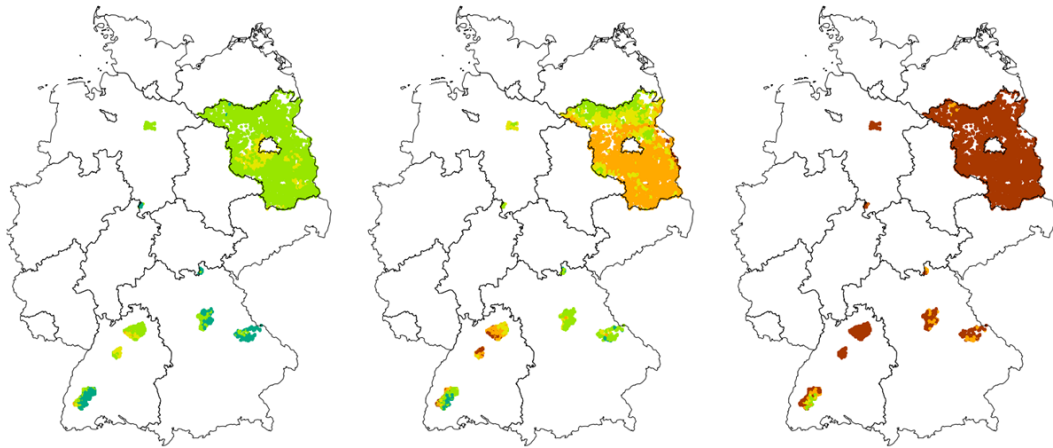


Abbildung 11.b: Klimarisiko Kiefer StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:

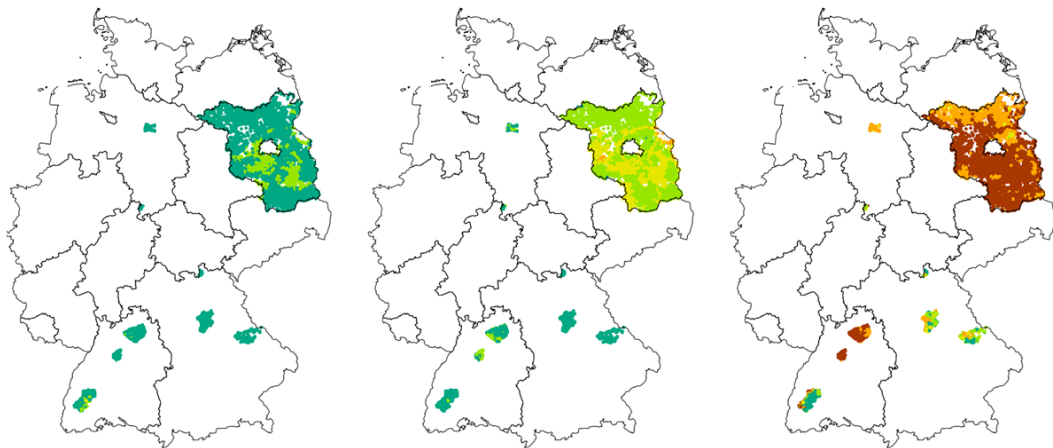
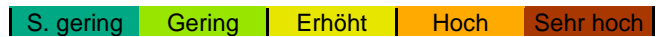


Abbildung 11.c: Klimarisiko Buche StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:

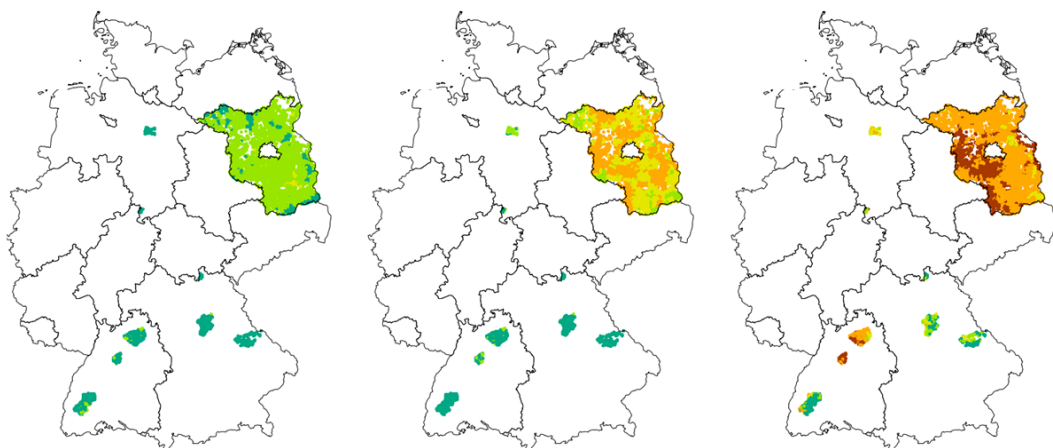
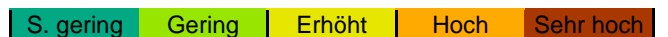


Abbildung 11.d: Klimarisiko Bergahorn StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:



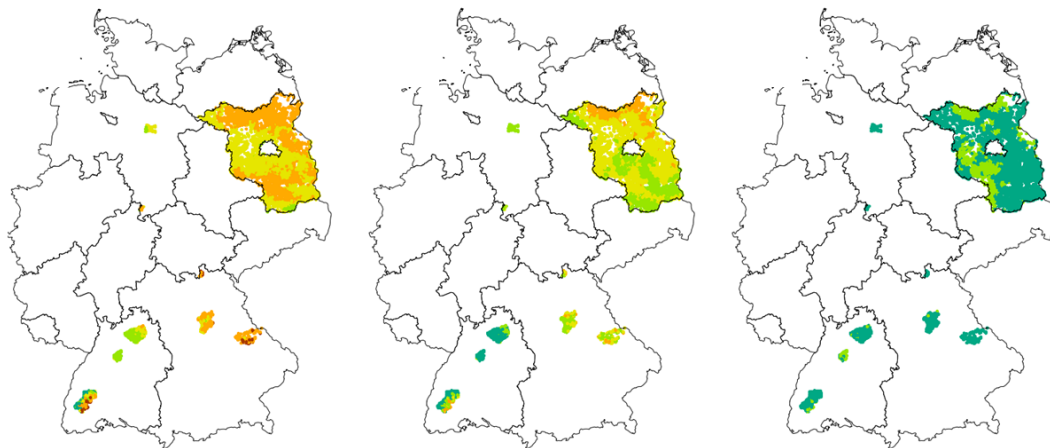


Abbildung 11.e: Klimarisiko Edelkastanie StWM-KPW Beispielgebiete, (links) 1991-2020, (mittig) 2071-2100 RCP 4.5, (rechts) 2071-2100 RCP 8.5. Farblegende:



Standörtliche Modifikation des Klimarisikos – das Anbaurisiko

Die standörtliche Modifikation des Klimarisikos erfolgt einerseits durch Verrechnung der nutzbaren Feldkapazität mit dem Sommerniederschlag (hohe nFK = Aufschlag auf Sommerniederschlag; niedrige nFK = Abschlag vom Sommerniederschlag), andererseits durch limitierende Faktoren: Stauwasser, Grundwasser, Überflutung, Moor, Basenansprüche und Kalk im Oberboden. Die artspezifische Einwertung dieser Risikofaktoren ist in der „Patchtabelle“ hinterlegt. Sie greifen nur dann, wenn das Klimarisiko zu einer besseren Risikoeinwertung kommen würde. Begrifflich trennen wir das reine Klimarisiko und das Anbaurisiko als standörtlich überprägtes Klimarisiko.

Die standörtliche Modifikation des Klimarisikos wird insbesondere auf lokaler Ebene sichtbar, da die Bodeneigenschaften in der Regel viel heterogener sind als die eher regionalen Klimateigenschaften, v.a. was den Einfluss von Stau- und Grundwasser, von Überflutung und von Mooren angeht. Bzgl. der Basenausstattung können sich schon eher großflächigere geologische Muster abzeichnen. Die standörtliche Modifikation des Anbaurisikos wird an dieser Stelle nur für das Beispielgebiet Cham-Roding in Bayern am Beispiel der Baumarten Tanne, Buche und Bergahorn gezeigt:

- Modifikation des Klimarisikos durch die nutzbare Feldkapazität (Abbildung 12): am Beispiel des Klimarisikos der Tanne 1991-2020 in Cham-Roding sieht man den standörtlichen Einfluss der Bodenwasserspeicherkapazität. Auf Standorten mit geringer nFK von unter 100 mm erhöht sich das Risiko um eine Stufe, auf Standorten mit einer nFK über 150 mm sinkt das Risiko um eine Stufe. Dieser Zusammenhang ist nicht universell, sondern art- und klimaspezifisch. Tanne reagiert im Klima von Cham-Roding mit 17,2 °C Sommertemperatur und 265 mm Sommerniederschlag sensitiv auf den Bodenwasserspeicher.
- Modifikation des Klimarisikos durch Stau-/Grundwasser, Überflutung und Moor (Abbildung 13): am Beispiel des Klimarisikos der Buche 1991-2020 in Cham-Roding sieht man den standörtlichen Einfluss von Stau- und Grundwasser. Das grundsätzlich geringe Klimarisiko wird standörtlich vor allem bei Grundwasser mit dem standörtlich hohen bis sehr hohen Risiko überlagert.
- Modifikation des Klimarisikos durch den Basenverlaufstyp (Abbildung 14): am Beispiel des Klimarisikos 1991-2020 für den basensensitiven Bergahorn in der eher basenarmen Region Cham-Roding sieht man den standörtlichen Einfluss des Basenverlaufs der Böden. Das grundsätzlich geringe Klimarisiko wird auf mittelbasischen Standorten (Typ 3) auf gering (Stufe 2), auf basenarmen Standorten (Typ 4) auf erhöht (Stufe 3) und auch basenarmen Standorten auf sehr hoch (Stufe 5) gesetzt.

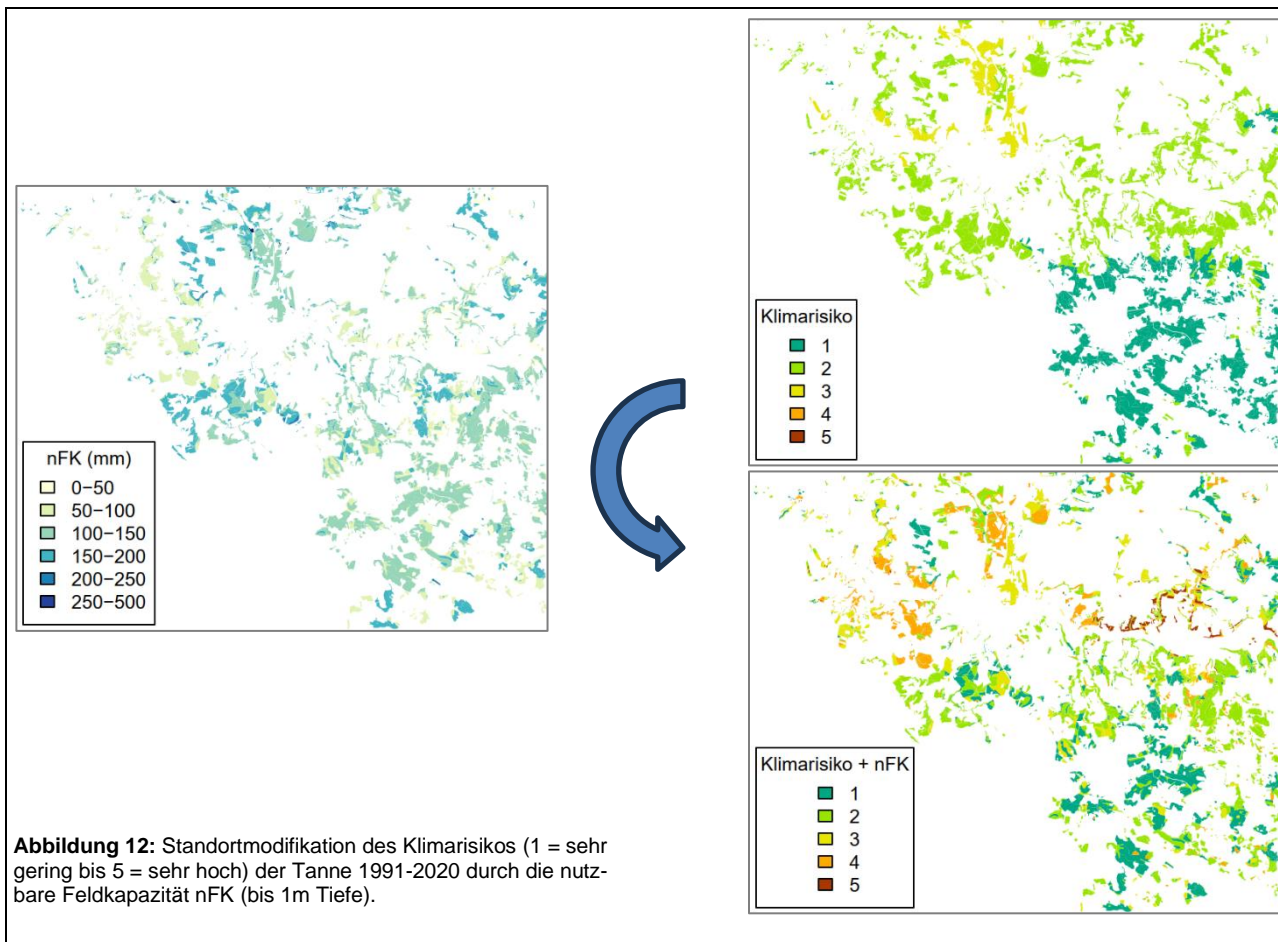


Abbildung 12: Standortmodifikation des Klimarisikos (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) der Tanne 1991-2020 durch die nutzbare Feldkapazität nFK (bis 1m Tiefe).

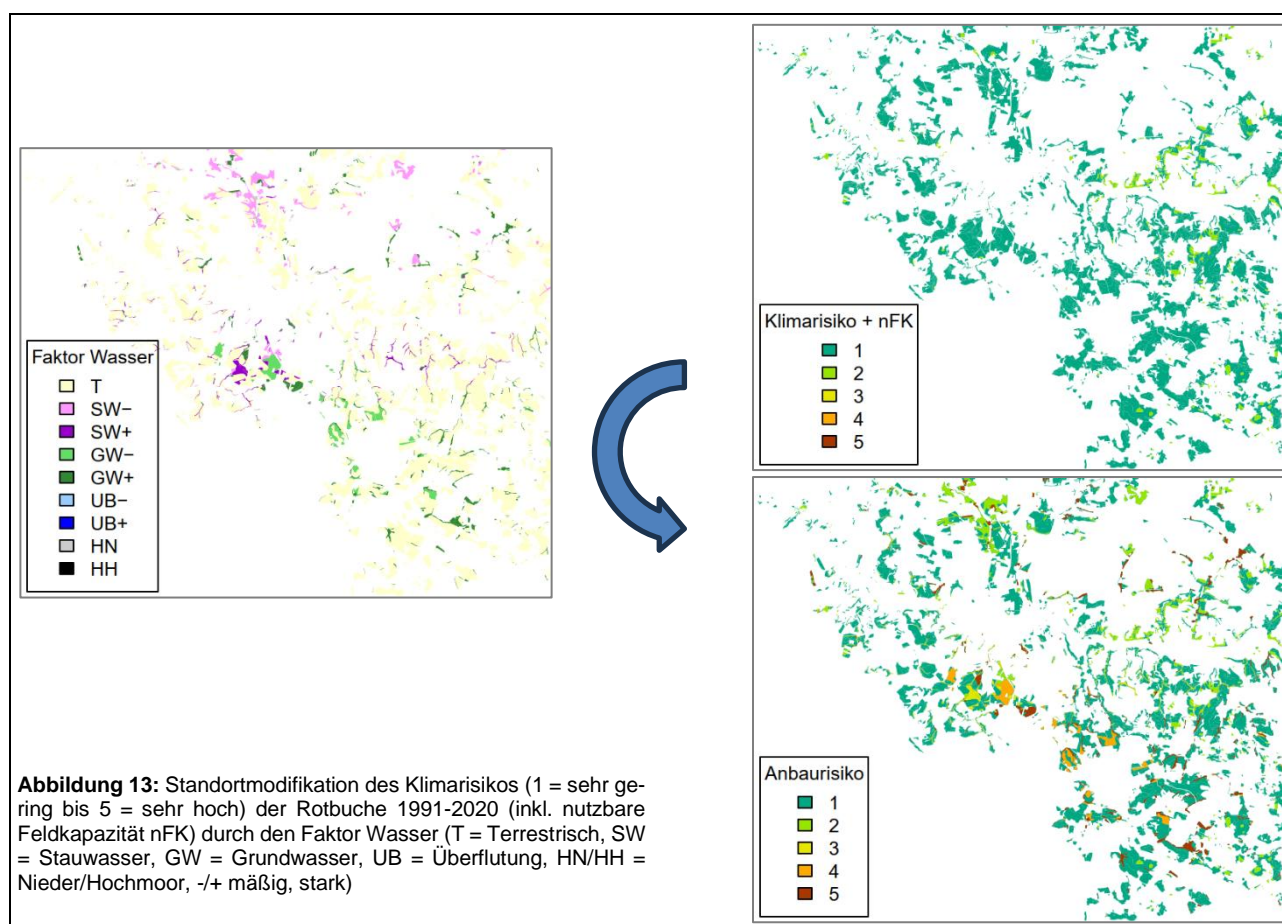
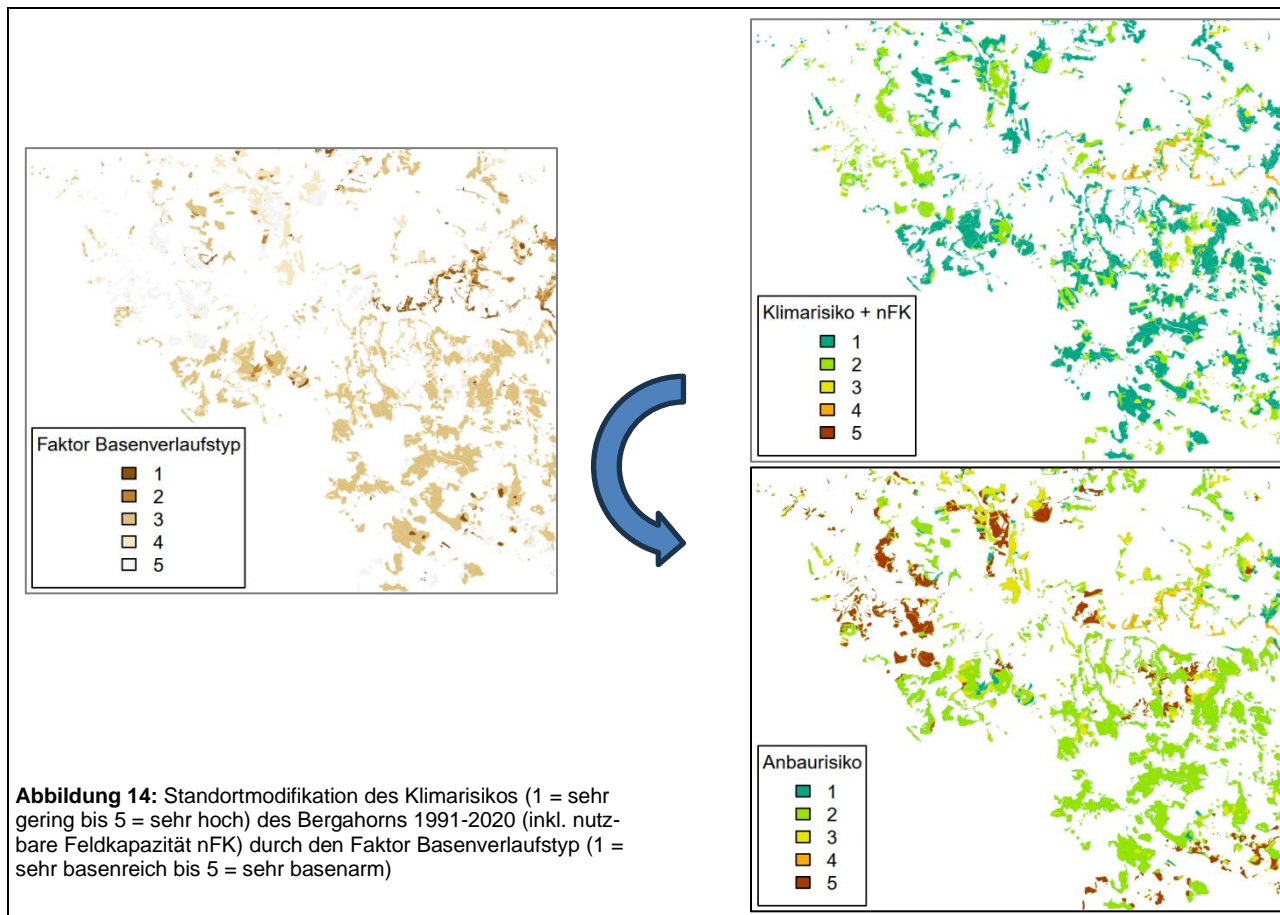


Abbildung 13: Standortmodifikation des Klimarisikos (1 = sehr gering bis 5 = sehr hoch) der Rotbuche 1991-2020 (inkl. nutzbare Feldkapazität nFK) durch den Faktor Wasser (T = Terrestrisch, SW = Stauwasser, GW = Grundwasser, UB = Überflutung, HN/HH = Nieder/Hochmoor, +/- mäßig, stark)



StWM-KPW Anbaurisiko-Datenbanken

Die Datengrundlagen für die Berechnung des Anbaurisikos zum Klima und Boden sowie das Anbaurisiko selbst wurde in SQLite Datenbanken den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Dabei wurde das Anbaurisiko separat als klimatisches Klimarisiko mit und ohne Berücksichtigung der nFK und der Limitierung durch die Bodenfaktoren abgelegt. Das Anbaurisiko umfasst die 32 BaSIS-Baumarten und wurde mit der zum Zeitpunkt des Abschlussberichts aktuellen Version gerechnet.

Nährstoffbilanzen

Zur Ableitung von Nährstoffbilanzen wurden für die Elemente Calcium, Magnesium und Kalium umfangreiche Modellierungen durchgeführt, die die Bilanzterme Deposition, Verwitterung, Sickerwasserausträge und die Nährstoffentzüge mit der Holzernte enthalten.

Untersuchungsansatz

Indikatoren wie Bodenvorräte oder Blatt- und Nadelspiegelwerte kennzeichnen die aktuelle Nährstoffausstattung und -verfügbarkeit eines Standortes. Stoffbilanzen erlauben darüber hinaus auch eine Einschätzung der möglichen Folgen forstlichen Handelns oder der Notwendigkeit von Managemententscheidungen. Daher ist die Stoffbilanzierung eine wichtige Methode, um die Reaktionen der Stoffhaushaltskomponenten auf sich verändernde Umweltbedingungen zu erkennen. Entsprechend wird als ein Bewertungsmaßstab für nachhaltiges Wirtschaften und als Grundlage für eventuell notwendige Kompensationsmaßnahmen häufig die Gegenüberstellung der Nährstoffentzüge und Nährstoffnachlieferungen herangezogen (Ahrends et al., 2022; De Vries et al., 2021). Im Vergleich zu landwirtschaftlichen Systemen, bei denen der Düngemiteleintrag die Bodennährstoffbilanz dominiert, stellt die Berechnung von Bodennährstoffbilanzen für Waldökosysteme eine viel größere Herausforderung dar, und die damit verbundenen Unsicherheiten sind sehr hoch (Ahrends et al. 2022; Paré und Thiffault, 2016). In Wäldern sind die relevanten Prozesse der Eintrag durch atmosphärische Deposition und die mineralische Verwitterung im Boden sowie die Austräge durch Auswaschung aus dem Boden und über die Holzernte (Abbildung 15). Für eine praxisgerechte Bewertung von Managementoptionen sollten die Berechnungen in zwei Schritten erfolgen: (1) Berechnung der Nährstoffbilanzen ohne Ernteentzug (Environment) und (2) Berechnung der Gesamtnährstoffbilanzen unter Berücksichtigung spezifischer Managementoptionen, z. B. verschiedener Ernteszenarien (Management). Dafür ist es notwendig, dass die einzelnen Bilanzglieder unabhängig von den Nährstoffentzügen ermittelt werden (De Vries et al., 2021).

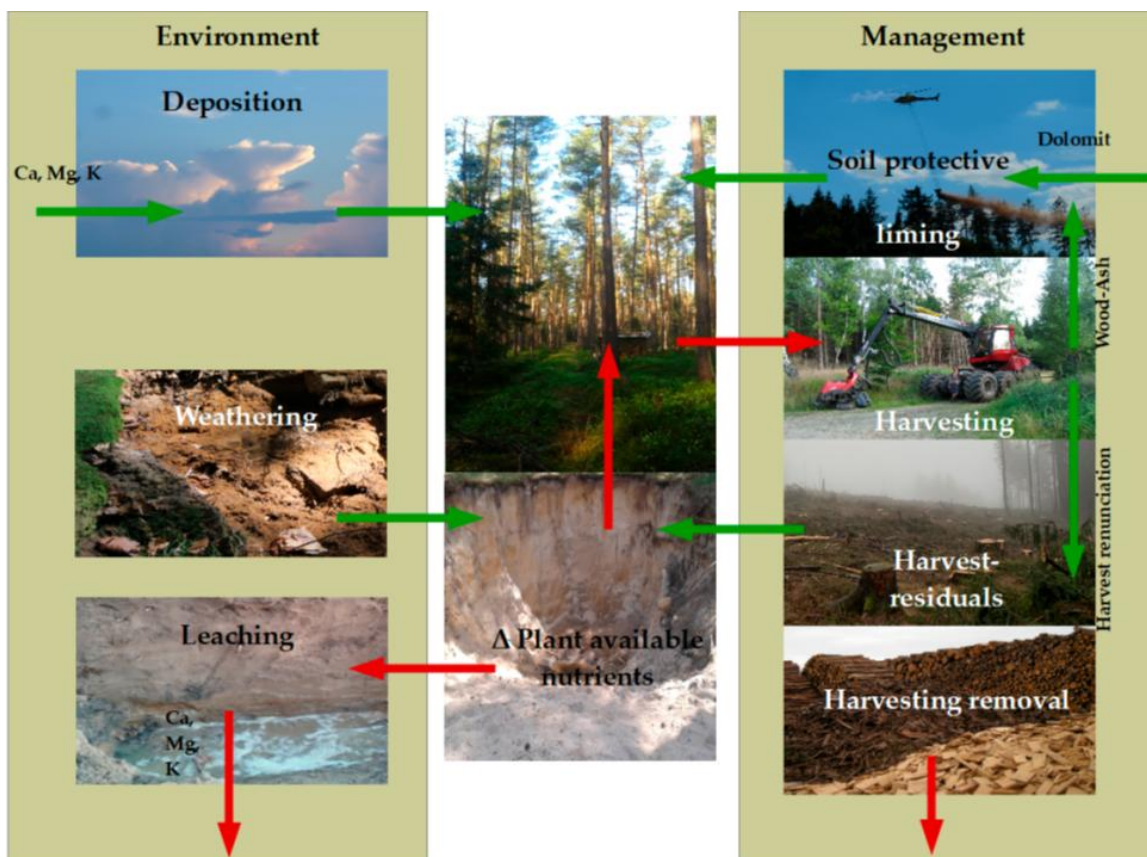


Abbildung 15: Schematische Darstellung der betrachteten Elementflüsse für die Bodennährstoffbilanzen von Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ in Waldökosystemen und deren Beziehungen zueinander. Ein 1000stel des pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrats im Boden wird als zusätzlicher Input (Puffer) berücksichtigt (Ahrends et al., 2022).

In diesem Projekt beschränkte sich die Berechnung der Nährstoffbilanzen auf die Hauptnährstoffe Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}) und Kalium (K^+). Diese Elemente bestimmen weitgehend die Widerstandsfähigkeit der Waldböden gegenüber der Versauerung. Eine Stickstoffbilanzierung ist nicht erfolgt, da die hohen Stickstoffemissionen in der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart in ganz Deutschland ein Überangebot an Stickstoff verursacht haben (Fleck et al., 2019; Sutton et al., 2011). Phosphor (P), ebenfalls ein essentieller Nährstoff für das Wachstum und die Vitalität von Bäumen, zeichnet sich durch sehr geringe Flüsse sowohl bei der Auswaschung als auch bei der Deposition aus, und die P-Konzentrationen liegen oft nahe oder unterhalb der Nachweisgrenzen herkömmlicher Analysemethoden (Bol et al., 2016). Darüber hinaus findet ein Teil des P-Transportes in Böden in kolloidalen anorganischen und organischen P-Formen statt und kann nur mit erheblichem analytischem Aufwand gemessen werden (Missong et al., 2018). Entsprechend wurde auch Phosphor im Rahmen der vorgestellten Bilanzierungen nicht berücksichtigt. In einigen Waldböden ist der Bilanzüberschuß oder das -defizit von basischen Kationen im Verhältnis zu den Bodenvorräten sehr gering (Likens et al., 1977). Um dies zu berücksichtigen, wurde ein Tausendstel des pflanzenverfügbaren Bodennährstoffvorrats an Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ bis zu einer Tiefe von 90cm (ergibt sich aus der Beprobungstiefe der Bodenzustandserhebung im Wald) in die Nährstoffbilanz eingerechnet und wäre damit frühestens in 1000 Jahren aufgebraucht. Ein solcher Puffer ist angemessen, weil kleine Bilanzdefizite in Böden mit hohen pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräten eher tolerierbar sind und die natürliche Bodenversauerung ein extrem langsamer Prozess ist (Ulrich, 1986). Die Gesamtnährstoffbilanz (GB) mit der Holzernte (HAR) wurde für die jeweiligen Elemente wie folgt berechnet:

$$GB_x = DEP_x + WEA_x + LEA_x + HAR_x + S_x/1000 \quad (\text{Gleichung 1})$$

für jedes Element x (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) getrennt, wobei DEP die Deposition, WEA die Verwitterungsrate, LEA die Auswaschung, HAR der Ernteentzug von basischen Kationen und S den pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrats im Boden bezeichnet. Für die nutzungsfreie Nährstoffbilanz wurde HAR auf Null gesetzt. Alle Flüsse wurden in $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ berechnet. In Anlehnung an Sverdrup et al. (2006) wurden der Kationenaustausch und die Freisetzung von Basenkationen im Zuge der Mineralisierung von organischer Substanz nicht berücksichtigt, da es sich um interne Kreisläufe und somit nicht um langfristige Quellen handelt.

Auf Kalk- und Dolomitstandorten ist die Versorgung der Waldbestände mit Calcium und Magnesium in der Regel unproblematisch, da durch die hohe Löslichkeit des Ausgangsgesteins beide Elemente im Überfluss verfügbar sind. Nur auf sehr reinen Kalken (Calciumkarbonat) kann es zu einer unzureichenden Magnesiumversorgung kommen. Die hohe Löslichkeit der Karbonate bedingt hohe absolute Elementflüsse von Calcium und Magnesium mit der Verwitterung und dem Sickerwasseraustrag. Die Kombination von hohen Flussraten bei gleichzeitig hohem Vorhersagefehler der Modelle führt dazu, dass eine hinreichend verlässliche Interpretation der Stoffbilanz für diese Standorte nicht gewährleistet ist (Von Wilpert et al., 2018). Aus den genannten zwei Gründen wurden für Kalk- und Dolomitstandorte die Stoffbilanzen modifiziert, indem sie für Calcium und Magnesium als immer ausgeglichen angenommen wurden.

Atmosphärische Stoffeinträge

Nährstoffe können in der Atmosphäre über weite Strecken transportiert und anschließend in Waldökosysteme eingetragen werden. Dieser Eintrag von Nährstoffen aus der Atmosphäre in die Waldbestände wird als Deposition bezeichnet und erfolgt anhand der folgenden drei Depositionspfade: (1) Die nasse Deposition beschreibt den Eintrag durch den Niederschlag in Form von Regen, Schnee und Hagel. (2) Demgegenüber erfolgt bei der trockenen Deposition die direkte Ablagerung von Partikeln und Gasen an den jeweiligen Oberflächen (Blätter, Nadeln, Äste, usw.). (3) Bei der feuchten Deposition lösen sich die Elemente in Nebel- und Wolken-Tröpfchen und gelangen auf diesem Wege in die Waldökosysteme. Die feuchte Deposition ist insbesondere in größeren Höhenlagen quantitativ bei der Ermittlung der Gesamtdosition von Bedeutung. Um die feuchte Deposition klar von der nassen Deposition zu unterscheiden, wird sie im Folgenden als okkulte Deposition bezeichnet.

Die drei Depositionspfade und z.T. auch die einzelnen Elemente wurden mit Hilfe verschiedener Verfahren ermittelt. Die neu entwickelten Methoden und deren Ergebnisse werden im Folgenden kurz beschrieben und dargestellt.

Ermittlung der Nassdeposition für die Hauptkationen und -anionen

Die Kartierung der Nassdeposition basiert auf den Karten des Umweltbundesamtes (Schaap et al., 2018). Da die Nassdeposition ein Eingangsparameter für die Abschätzung der trockenen und der okkulten Deposition ist, wurden alle Eingangsdaten in ein gemeinsames Grundraster überführt. Verwendet wurde hierfür das Raster der Klimadaten der Universität Hamburg in der Auflösung von 250x250m (Dietrich et al., 2019) aus dem Forschungsprojekt „Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) (<https://www.fdr.uni-hamburg.de/record/11449>). Die Niederschlagsdaten von Dietrich et al. (2019) wurden hierfür mit dem R-Paket „exactextract“ (Baston, 2020) auf das Raster des Umweltbundesamtes von 1x1km übertragen. Aus den Eintragsraten der Elemente und der jährlichen Niederschlagsmenge wurde die Konzentration im Niederschlagswasser ermittelt. Diese Konzentration wird zum einen für die Abschätzung der okkulten Deposition verwendet und zum anderen wird sie mit den Niederschlagsdaten der Rasterauflösung 250x250m verschnitten, um die Deposition direkt in das 250x250m Raster der Klimadaten für die Wasserhaushaltsmodellierung und die Abschätzung der Trockendeposition (Windgeschwindigkeit) zu überführen. Durch diesen Ansatz erfolgt keine Änderung der absoluten eingetragenen Mengen sondern nur eine räumliche Umverteilung innerhalb der 1x1km Rasterzellen des Datensatzes von Schaap et al. (2018). Die Ergebnisse sind in der Abbildung 16 beispielhaft für die Nassdeposition von Sulfat dargestellt. Die zeitliche Dynamik zeigt einen weiteren Rückgang der Schwefelfrachten z.B. durch Rauchgasentschwefelungsanlagen und den Wechsel weg von schwefelhaltigen hin zu schwefelarmen Brennstoffen. Es ist zu erkennen, dass mittlerweile die exponierte Lage der Mittelgebirge immer mehr an Bedeutung verliert. In den letzten 5 Jahren sind Hotspots vorwiegend im Küstenbereich der Nordsee (Meeresgischt und Schifffahrt) und im Ruhrgebiet (Verkehr) zu erkennen.

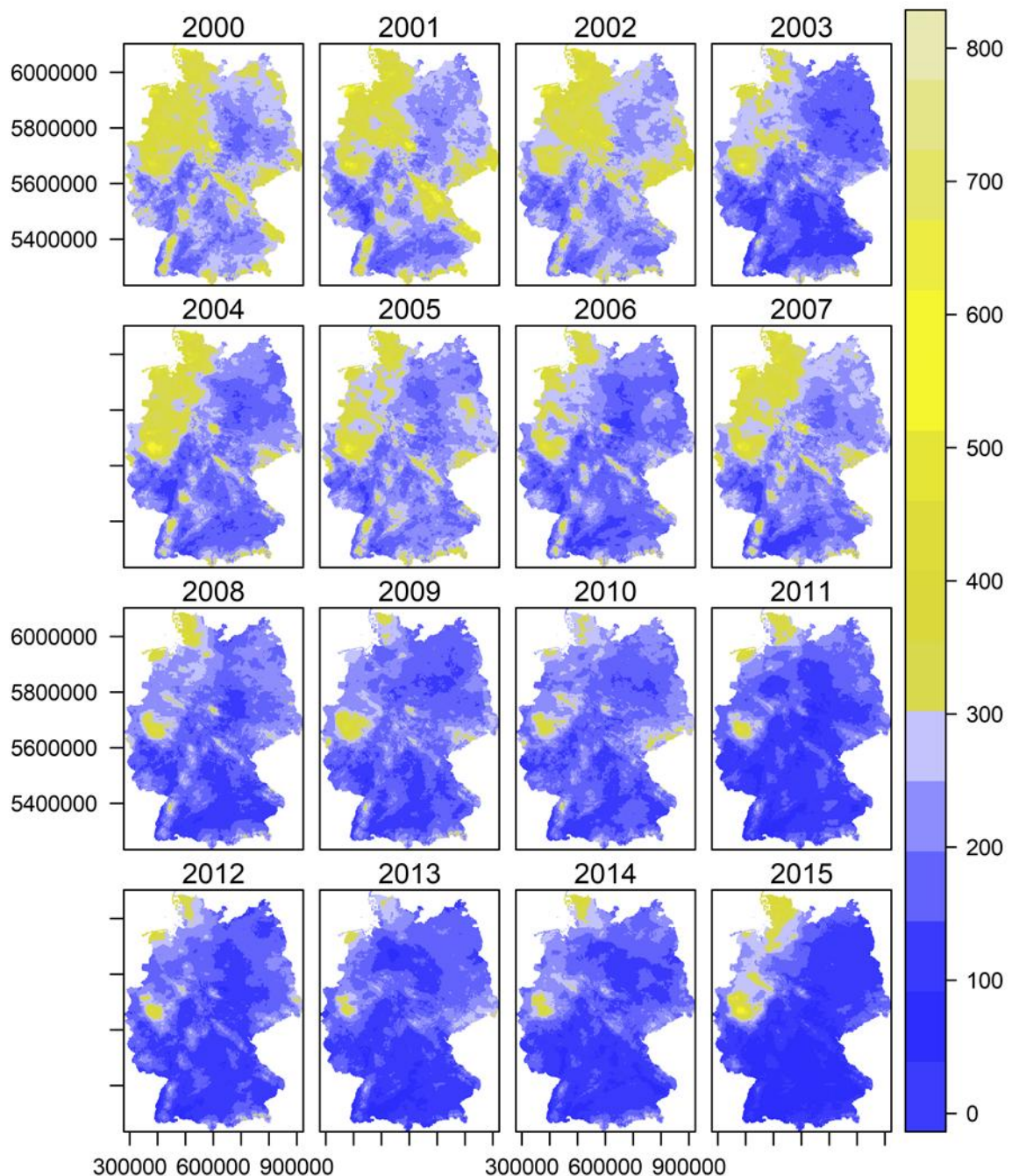


Abbildung 16: Dynamische Kartierung der Sulfat-Nassdeposition (in $\text{eq ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) für die Jahre 2000-2015 (Datengrundlagen: Schaap et al. 2018 und Dietrich et al. 2019).

Ermittlung der okkulten Deposition

Unter diesem Depositionsfluss versteht man die Abscheidung gelöster und ungelöster Verbindungen mit Wolken- bzw. Nebeltröpfchen an den Oberflächen der Wälder. Die okkulte Deposition hängt daher von der Konzentration der Stoffverbindungen in den Wolken- bzw. Nebeltropfen und lokalen meteorologischen Parametern ab, die die Entstehung und den Fluss von Nebelwasser beeinflussen. Besonders relevant ist die okkulte Deposition an orographisch exponierten Standorten, z.B. Gebirgsketten, an denen Wolken häufig auf Grund treffen. Schaap et al. (2018) weisen darauf hin, dass der Ansatz der feuchten Deposition innerhalb der Depositionsberechnung verfeinert werden sollte, um orographisch bedingte Effekte besser abbilden zu können. Entsprechend wurde in diesem Projekt die okkulte Deposition mit einem neuen Ansatz abgeleitet. Hierbei wurde die okkulte Deposition (OD) ermittelt, indem der Depositionsfluss von Nebelwasser (F_{NE}) mit der Elementkonzentration (W_{CON}) im Nebelwasser multipliziert wird:

$$OD = W_{CON} * F_{NE}$$

(Gleichung 2)

W_{CON} : Elementkonzentration im Nebelwasser, [eq ha/mm]
 F_{NE} : Depositionfluss von Nebelwasser, [mm/a]

Aus den Elementkonzentrationen im Niederschlagswasser (vgl. Nassdeposition) wurden mit Hilfe von Anreicherungsfaktoren die Elementkonzentrationen im Nebelwasser (W_{CON}) ermittelt (Schaap et al., 2018). Diese Konzentrationen wurden mit der Niederschlagsmenge der Nebeldeposition (Körner et al., 2021) verrechnet, um die okkulte Deposition zu ermitteln.

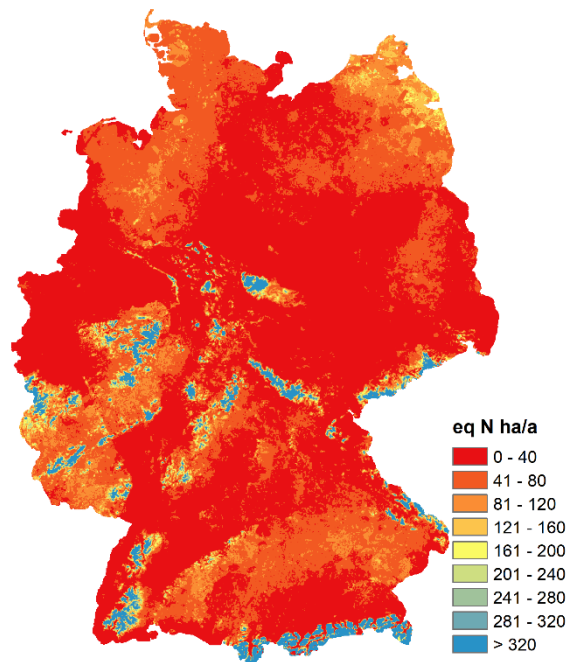


Abbildung 17: Okkulte Deposition (OD) von Gesamtstickstoff (in eq ha⁻¹ a⁻¹) für Deutschland.

Die Abbildung 17 zeigt die räumliche Verteilung der okkulten Deposition von Gesamtstickstoff. Einen bedeutenden Anteil an der Gesamtdosition hat die okkulte Deposition nur in größeren Höhenlagen, wie die Abbildung 17 verdeutlicht. In diesen Regionen kann die Nebelbildung durchaus 1000 mm und mehr betragen (vgl. Körner et al., 2021) und entsprechend zu erheblichen zusätzlichen Einträgen neben der nassen und der trockenen Deposition führen. Insgesamt ist der Beitrag der okkulten Deposition sehr gering. Eine Ausnahme bilden die Gebirgsregionen in Deutschland (z.B. Bayerischer Wald, Eifel, Erzgebirge, Fränkische Alb, Harz, Schwäbische Alb).

Ermittlung der Trockendeposition

Die Ermittlung der Trockendeposition von basischen Kationen erfolgte nach Ahrends et al. (2022). Die Abschätzung der Trockendeposition erfolgt mit Hilfe der Nassdeposition und regionalisierten „dry deposition“ Faktoren (DDF) (vgl. Ahrends et al., 2022). Zur Ableitung der baumartenspezifischen DDF's werden weitere Klima- und Reliefparameter (z.B. Windgeschwindigkeit, Luv- und Leeeffekte) berücksichtigt. Da die Stickstoff- und Sulfateinträge nicht wie die basischen Kationen direkt mit Hilfe der DDF's aus der Nassendeposition abgeleitet werden können, wurde für die Trockendepositionsmodellierung von Sulfat, Ammonium und Nitrat der Ansatz von Kirchner et al. (2014) in der von Ahrends et al. (2020) angepassten und erweiterten Variante verwendet. Dieses Verfahren basiert auf der Inferenzmethode, auch als Konzentrationsmethode bezeichnet (z.B. Peters und Eiden, 1992). Der Fluss der Trockendeposition (DD) berechnet sich hierbei als Produkt der Konzentration in der Umgebungsluft in einer bestimmten Bezugshöhe (z) und einer Proportionalitätskonstante, der Depositionsgeschwindigkeit (vd ; $cm s^{-1}$), gemäß der Grundgleichung nach Wesely und Hicks (2000):

$$DD = v d_{(z)} * c_{(z)}$$

(Gleichung 3)

Die Luftkonzentrationen (NH₃, NO₂ und SO₂) wurden für Deutschland dem EMEP-Datensatz (co-operative programme for monitoring and evaluation of the long-range transmission of air pollutants in Europe - <https://www.emep.int/> - Hjellbrekke 2024) entnommen. Die EMEP-Luftkonzentrationsdaten sind in der EBAS-Datenbank frei verfügbar (<https://ebas.nilu.no>). Die Depositionsgeschwindigkeiten wurden aus dem Review von Zhang et al. (2023) abgeleitet. Hierbei wurden die mittleren landnutzungsunabhängigen Depositionsgeschwindigkeiten der Elemente SO₂, NO₂ und NH₃ mit Korrekturfaktoren in die Landnutzungen Nadel-, Laub- und Mischwald umgerechnet. Die landnutzungsspezifischen Korrekturfaktoren wurden aus Schaap et al. (2018) abgeleitet. Die verwendeten Depositionsgeschwindigkeiten sind in der Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 11: Landnutzungsspezifische Depositionsgeschwindigkeiten für die NH₃, NO₂ und SO₂ (m s⁻¹). Abgeleitet aus den landnutzungsunabhängigen Geschwindigkeiten von Zhang et al. (2023).

Element	Depositionsgeschwindigkeit nach Zhang	Nadelwald	Laubwald	Mischwald
NH ₃	0.00546	0.0081	0.0070	0.0076
NO ₂	0.00202	0.0030	0.0026	0.0028
SO ₂	0.00546	0.0082	0.0071	0.0076

Da jedoch konstante Depositionsgeschwindigkeiten vor allem in komplexerer Orographie ungeeignet sind, wurden die mittleren Depositionsgeschwindigkeiten mit semi-empirischen Korrekturfaktoren weiter spezifiziert. Hierbei wurden die Jahreszeit, die Hangneigung, die Exposition, die Windgeschwindigkeit, Inversionswetterlagen und die Baumart berücksichtigt (vgl. Ahrends et al., 2020).

Gesamtdeposition

Mit dem vorgestellten Modellsystem wurden die verschiedenen Depositionspfade für ganz Deutschland in einer Auflösung von 250 x 250m modelliert und zur Gesamtdeposition aufsummiert. Die modellierten jährlichen Gesamtdepositionen für die Jahre 2000-2015 wurden gemessenen jährlichen Eintragsraten auf den Flächen des Level II - Programmes gegenübergestellt. Als Datengrundlage hierfür diente der von Ahrends et al. (2020) aufbereitete Datensatz. Für den Vergleich wurden die Ergebnisse der Kronenraumbilanzierung nach Ulrich (1994) verwendet. Mit Ausnahme der Chlorid - Depositionen streuen die Depositionen aller Elemente unauffällig um die 1:1 Linie. Die Cl-Deposition wird aber in der Modellkette nicht weiter berücksichtigt, so dass die Abweichungen an dieser Stelle vernachlässigt werden können. Gute Beziehungen zeigen sich insbesondere bei Natrium und Schwefel. Die dargestellten Zusammenhänge zwischen der Regionalisierung und der Messungen auf den Flächen des Intensiven Umweltmonitorings in Deutschland sprechen für die Anwendbarkeit des Verfahrens. Für Ca²⁺, Mg²⁺ und K⁺ gilt jedoch, dass die lokalen Messungen zwar im Mittel gut getroffen werden, aber die kleinräumlichen Variabilitäten wesentlich schlechter abgebildet werden können. Zum anderen resultieren die schwächeren Beziehungen auch darauf, dass sich durch die Reduzierung der Emissionen das Depositionsniveau der unterschiedlichen Standorte angenähert hat. Da die basischen Kationen aus sehr unterschiedlichen Quellen emittiert werden (Meerwasser, Böden, Biomasseverbrennung, Waldbrände, Emissionen aus dem Straßenverkehr, Wüstenstaub oder Kalkungen), können mit dieser Datengrundlage kleinräumige und regionale Besonderheiten des Depositionsgeschehens (Dämmgen et al., 2013) nur sehr unzureichend abgebildet werden (Schaap et al., 2015). Entsprechend können basische Kationen, deren Hauptquelle Seesalz ist, etwas besser abgeschätzt werden, als das stärker anthropogen geprägte Kalium (Dämmgen et al., 2013). Dieses zeigt sich auch daran, dass bei Natrium deutlich höhere Gütemaße erreicht werden. Demgegenüber sind insbesondere K⁺ - Depositionsraten stark durch regionale Quellen beeinflusst (vgl. Dämmgen et al., 2013), die wiederum zwischen den Jahren erheblich variieren können (Schaap et al., 2015). Insgesamt können mit dem vorgestellten Verfahren die Depositionen der basischen Kationen (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) verzerrungsfrei abgeschätzt werden. Dennoch sind die Unsicherheiten immer noch erheblich und die realen Depositionen können an einzelnen Standorten stark abweichen. Der im Vergleich zu den Messwerten

der Level-II-Standorte ermittelte mittlere Quadratwurzelfehler (RMSE) liegt für die Zielgrößen Ca^{2+} , K^+ und Mg^{2+} bei 40 - 80 % der Mittelwerte und ist damit unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der messtechnischen Erfassung der Depositionen (vgl. Ahrends et al., 2018) tolerabel.

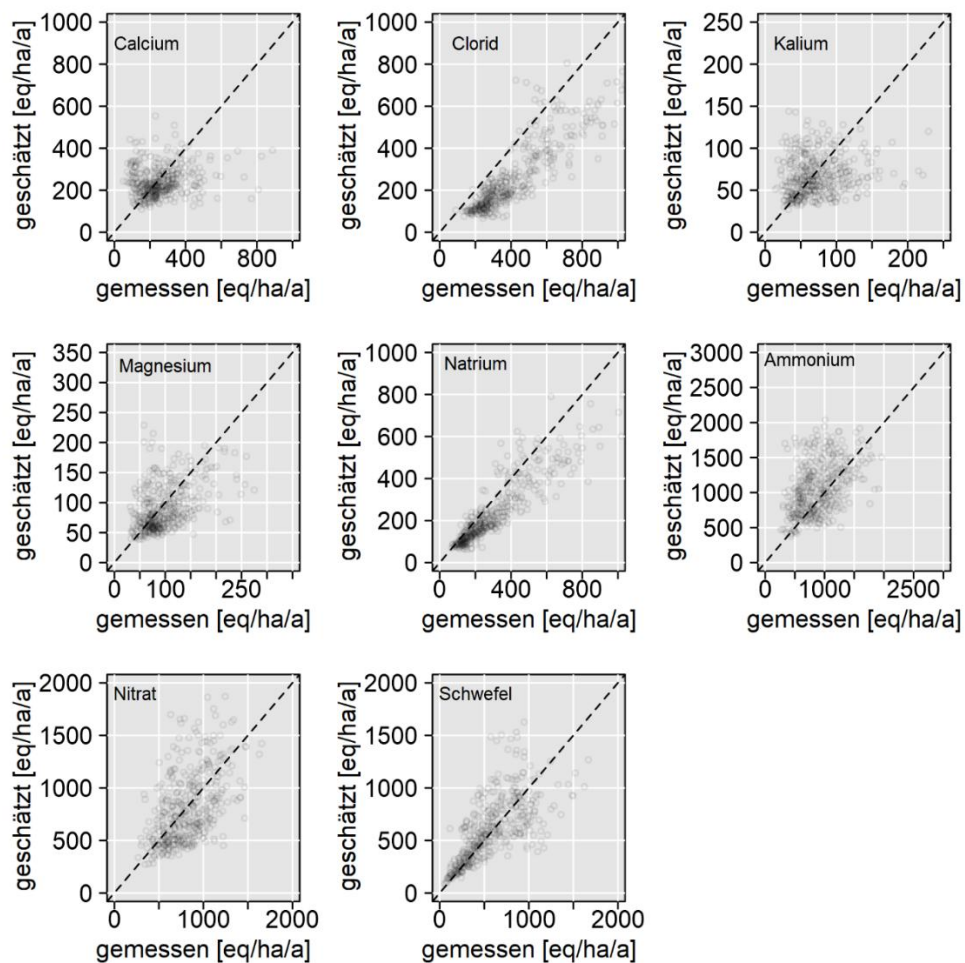


Abbildung 18: Evaluierung der modellierten Gesamtdosition für Level II Flächen in Deutschland am Beispiel der Baumart Fichte.

Die Anwendung des vorab beschriebenen Verfahrens auf die Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern (vgl. Abbildung 19-Abbildung 21) zeigt für die basischen Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+) eher geringe Niveauunterschiede. Insgesamt sind die regionalen Unterschiede nicht mehr so ausgeprägt wie in der Vergangenheit, da Minderungen der Einträge vor allem auf höher belasteten Standorten zu beobachten waren (Ahrends et al., 2018). Maximale Einträge werden in den Beispielregionen von Baden-Württemberg erreicht, da hier auch eine größere Anzahl an Mittelgebirgsstandorten einbezogen wurde. Hier zeigt sich der Einfluss der Niederschlagsmenge und der höheren Windgeschwindigkeiten auf das Depositionsgeschehen. Dass ein entsprechendes Muster nicht für Mg^{2+} erkennbar ist, liegt darin begründet, dass Magnesium stärker meeresbürtig geprägt ist und entsprechend der „Mittelgebirgseffekt“ kompensiert wird. Insgesamt erreichen die Mg^{2+} - Depositionen in allen Regionen nur selten Werte über $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auch Dämmgen et al. (2013) stellten bei ihren Untersuchungen fest, dass mittlerweile die Mg^{2+} - Depositionen in einer Größenordnung liegen, die als anthropogen weitgehend unbeeinflusst charakterisiert werden kann. Bei den K - Depositionen zeigen sich zwei Muster. Zum einen ist auch dieses Element durch den Einfluss der Niederschlagsmenge und der höheren Windgeschwindigkeit an Mittelgebirgsstandorten (vgl. Baden-Württemberg) geprägt. Zum anderen zeigen die vergleichsweise hohen Werte in Niedersachsen, dass der Landwirtschaft als Emissionsquelle ebenfalls eine große Bedeutung zukommt. Nach den Modellrechnungen ergeben sich für die ganzjährig belaubten Nadelbäume (Fichte > Kiefer) höhere Eintragsraten als für die Laubbäume (Buche > Eiche). Die Douglasie ist bei den Modellierungen der Fichte gleichgesetzt worden.

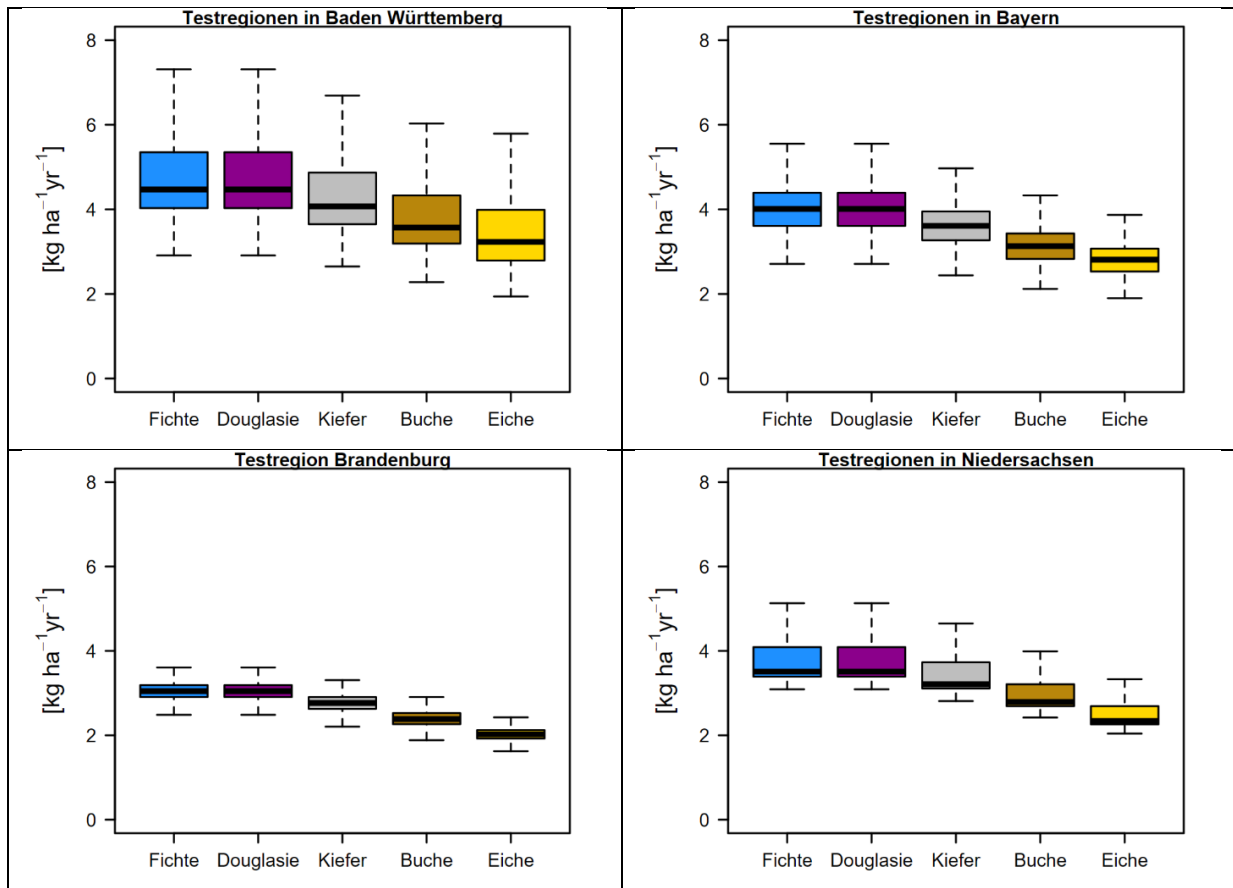


Abbildung 19: Baumartenspezifische Gesamtdeposition von Calcium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.

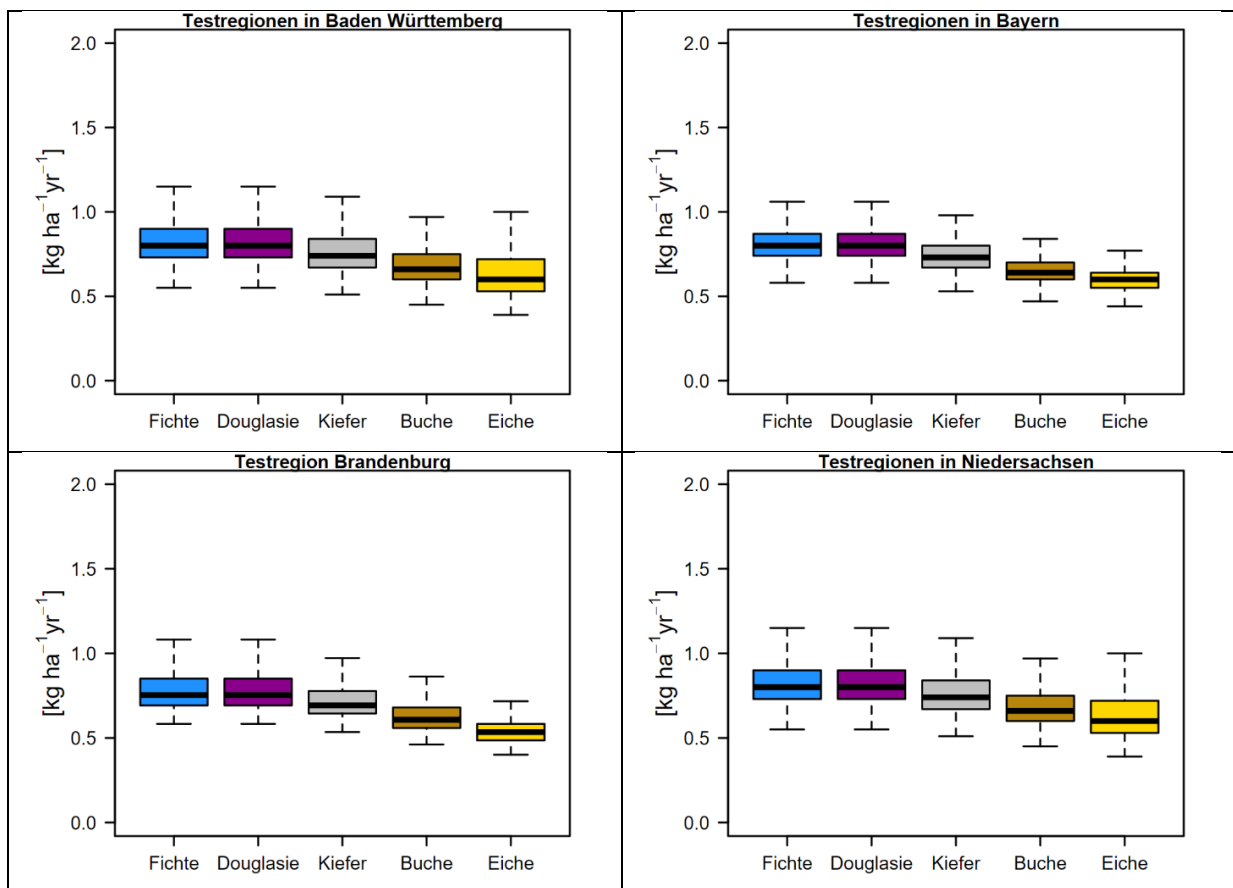


Abbildung 20: Baumartenspezifische Gesamtdeposition von Magnesium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.

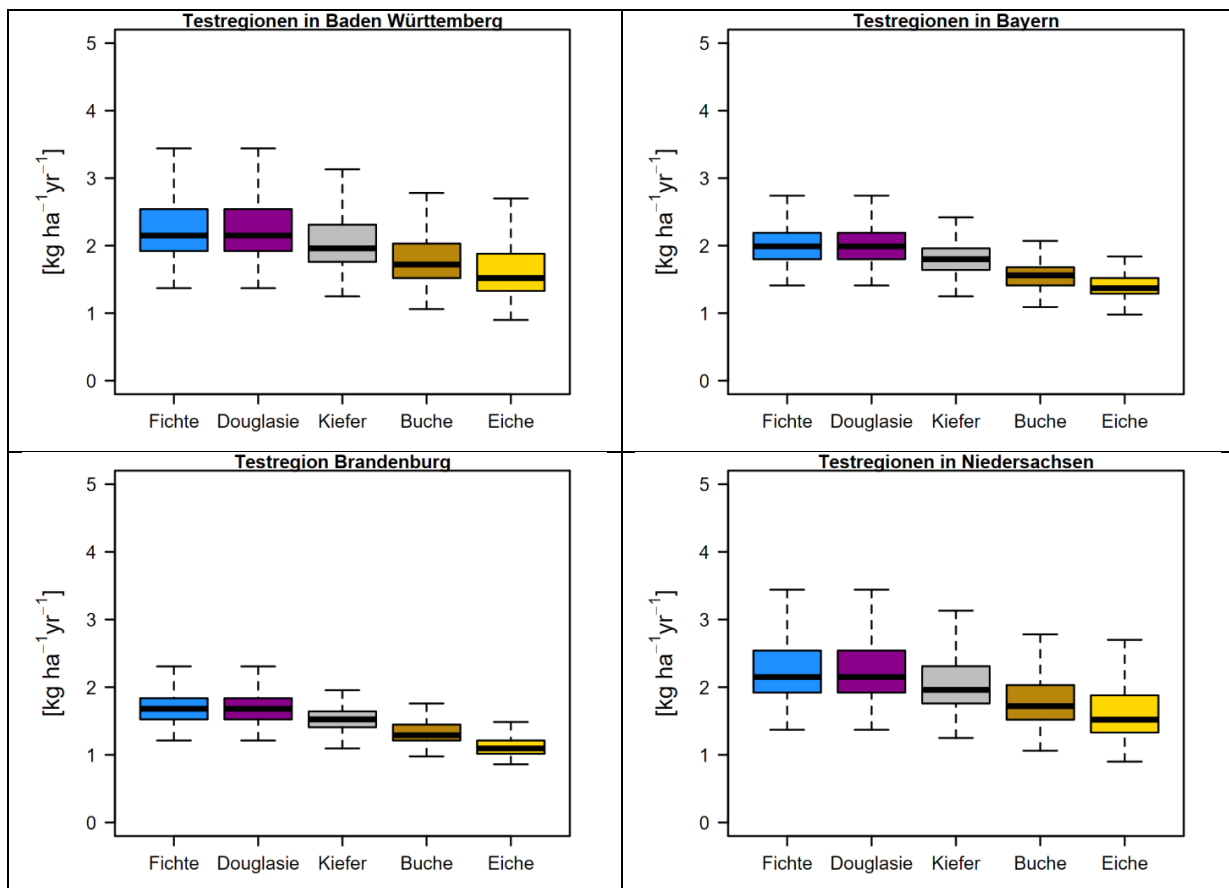


Abbildung 21: Baumartenspezifische Gesamtd deposition von Kalium in den bearbeiteten Testregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020.

Verwitterungsraten

Die Quantifizierung der Verwitterungsraten basischer Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+) ist für die Ermittlung der langfristigen Nährstoffbereitstellung, der Pufferkapazität der Böden und der Qualität des oberflächennahen Sickerwassers von entscheidender Bedeutung (Ouimet und Duchesne, 2005). Daher war es Ziel dieses Arbeitspaketes statistische Modelle zur Abschätzung der Verwitterungsraten für Waldböden in Deutschland zu entwickeln. Neben den etablierten Funktionen aus dem Critical Loads Manual (CLRTAP, 2017) wurden für die bundesweiten Bearbeitungsgebiete neue Schätzmodelle entwickelt. Verwendet wurde hierfür das bodenchemische Modell PROFILE in der schwedischen Original-Version 5.1 (Alveteg, 2006), nicht die „Deutsche Version 4.2“ (Becker, 1999). Neben einigen anderen Verbesserungen, wie das numerische Lösungsverfahren, die getrennte Betrachtung basischer Kationen und korrigierte Fehler (vgl. Ahrends et al., 2018a) wurde vorwiegend aufgrund der mineralspezifischen Verwitterungslimits (BREAKS) auf die schwedische Modellversion zurückgegriffen. Durch diese „Breaks“ sollen insbesondere natürliche Besonderheiten im Verwitterungsprozess berücksichtigt werden, die durch andere Parametereinstellungen nicht abgebildet werden können. Hohe Konzentrationen eines Elements in der Bodenwasserlösung wirken hierbei reduzierend auf die Verwitterungsrate der Minerale, die das Element enthalten. Wichtig ist eine solche Produktthemmung insbesondere für Kalium, dessen Verwitterungsraten bei der Modellierung mit PROFILE bislang häufig überschätzt wurden (z.B. Houle et al., 2012). Mögliche Ursachen hierfür können z.B. darin liegen, dass sich Kalium-Feldspat durch Oberflächenabdeckung der eigenen Zersetzungsprodukte „schützt“ (Arnold, 1960). Des Weiteren haben die Untersuchungen von Simonsson et al. (2009, 2007) und Andrist-Rangel et al. (2013) gezeigt, dass die Freisetzung und die Fixierung von Kalium im Boden stark von der aktuellen Kaliumversorgung des Bodens abhängig sind. Entsprechend scheinen auch die Konzentration in der Bodenlösung einen entscheidenden Einfluss für die weitere Mineralauflösung zu haben (Simonsson et al., 2009).

Das Modell wurde nach der Parametrisierungsanleitung von Ahrends et al. (2018a) so parametrisiert, dass für alle sensitiven Modellparameter ein breites Wertespektrum aufgespannt wurde. Als Datengrundlage dienten auch hierbei die Ergebnisse des Forschungsprojektes EnNA „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (Ahrends et al., 2022b). Insgesamt wurden über 20.000 Modellsimulationen durchgeführt und die Ergebnisse und die Eingangsdaten in einer Datenbank zusammengeführt. Die so generierten Verwitterungsraten für die Elemente Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ und Na^+ wurden mit Hilfe von gemischten nichtlinearen Modellen (GAMM) aus den bedeutsamsten Eingangsdaten der Profilmodellierungen abgeschätzt (vgl. Tabelle 12). Hierbei erwiesen sich die aus der Literatur bekannten Eingangsgrößen (Verwitterungsoberfläche, Bodenwassergehalt, Mineralogie, Entwicklungstiefe, Trockenrohdichte und Temperatur) als signifikant und für die Abschätzung der Verwitterungsraten als bedeutsam. Die so entwickelten statistischen Modelle können somit auf die in den jeweiligen Bundesländern den Standortkartierungseinheiten zugeordneten Bodenprofile angewendet werden.

Tabelle 12: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Kationen-Verwitterungsraten mit korrigiertem R^2 ($R^2_{\text{adj.}}$) und erklärter Abweichung (ED). Angenommene Fehlerverteilung: Gaussian.

Zielvariable	Modell	$R^2_{\text{adj.}}$	ED (%)
log(Ca_Verwitterung) [kmol _c ha ⁻¹ a ⁻¹]	~ s(Temp) + s(SW, k = 3) + s(VO, k = 5) + s(Ca, bs = "cr", k = 5) + Depth + WG	0,776	77,6
log(K_Verwitterung) [kmol _c ha ⁻¹ a ⁻¹]	~ s(Temp) + s(SW, k = 4) + s(TRD _G , k = 4) + s(VO, k = 4) + s(K, k = 5) + t	0,965	96,6
log(Mg_Verwitterung) [kmol _c ha ⁻¹ a ⁻¹]	~ s(Temp) + s(SW, k = 3) + s(VO, k = 5) + s(Mg, bs = "cr") + Depth + WG	0,843	84,3
log(Na_Verwitterung) [kmol _c ha ⁻¹ a ⁻¹]	~ s(Temp) + s(SW, k = 4) + s(TRD _G , k = 4) + s(VO, k = 4) + s(Na, k = 4) + t	0,962	96,3

Temp: Temperatur [°C]; SW: Bodenwassergehalt [m³ m⁻³]; TRD_G: Trockenrohdichte des Gesamtbodens [kg m⁻³]; VO: Verwitterungsoberfläche [m² m⁻³]; Ca, K, Mg, Na: Oxidgehalte der Kationen [%]; t: Tiefe [m]; WG: Wuchsgebiet, statistisch gruppiert.

Die beschriebenen Modelle wurden mit Hilfe von Pedotransferfunktionen, z.B. Verwitterungsoberfläche, Gesamtelementgehalte usw. auf die landespezifischen Daten der jeweiligen Kartiersysteme angewendet. Eine Übersicht hinsichtlich der Größenordnungen der Verwitterungsraten in den jeweiligen Beispielregionen der einzelnen Bundesländer liefert die Abbildung 22.

Hinter den Daten der Bundesländer (vgl. Abbildung 22) stehen einzelne Beispielregionen mit z.T. sehr unterschiedlicher geologischer und bodenkundlicher Ausstattung. Hinsichtlich des Nährstoffhaushaltes variiert zunächst in den einzelnen Regionen der Anteil der Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte. Diese Standorte werden jedoch in den folgenden Ausführungen für die Elemente Ca^{2+} und Mg^{2+} nicht näher betrachtet, da für sie die Ca- und Mg-Bilanzen als immer ausgeglichen angenommen werden (Ahrends et al., 2022b; Von Wilpert et al., 2018). Entsprechend wurden die Regressionsgleichungen (vgl. Tabelle 12) ausschließlich mit Daten von carbonatfreien Standorten parametrisiert, um insbesondere die Bereiche mit geringen und mittleren Verwitterungsraten möglichst genau abbilden zu können. Entsprechend sollten die Ergebnisse für Standorte > c0 oder d0 nicht weiter interpretiert werden und werden auch im Folgenden nicht dargestellt.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für die einzelnen Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern aggregiert. Analysiert man die Ergebnisse getrennt nach den Beispielregionen ergeben sich klare standörtliche Unterschiede (nicht graphisch dargestellt). Die Beispielregion Cham-Roding im Osten Bayerns liegt im Vorderen Bayerischen Wald. Viele der betrachteten Böden haben sich aus Graniten und Gneisen entwickelt. Die Mediane der Verwitterungsraten für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ betragen in diesen Beispielregionen 2,6, 2,6 und 4,3 kg ha⁻¹ a⁻¹. Die Interquantilabstände (IQA = 75th Perzentil (Q3) – 25th Perzentil (Q1)) für die Elemente Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ betragen 1,8, 1,9 und 3,6 kg ha⁻¹ a⁻¹. Insbesondere für die Elemente Ca^{2+} und Mg^{2+} zeigt sich

eine geringe Variabilität innerhalb der Region. Angaben aus der Literatur für die in dieser Region stark verbreiteten Granite und Gneise liegen tendenziell etwas unter den vorab genannten Größenordnungen. Für Granit ergeben sich aus der Literatur Mediane von 2,6, 1,7 und 3,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und für Gneise von 1,5, 0,9 und 1,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Bain et al., 2001, 1994; Egli et al., 2008; Fichter et al., 1998; Langan et al., 1995; Lelong et al., 1990; Olsson and Melkerud, 2000; Ouimet und Duchesne, 2005; Sverdrup und Warfvinge, 1995). Wobei zu beachten ist, dass einige der Literaturwerte von flachgründigeren Böden stammen.

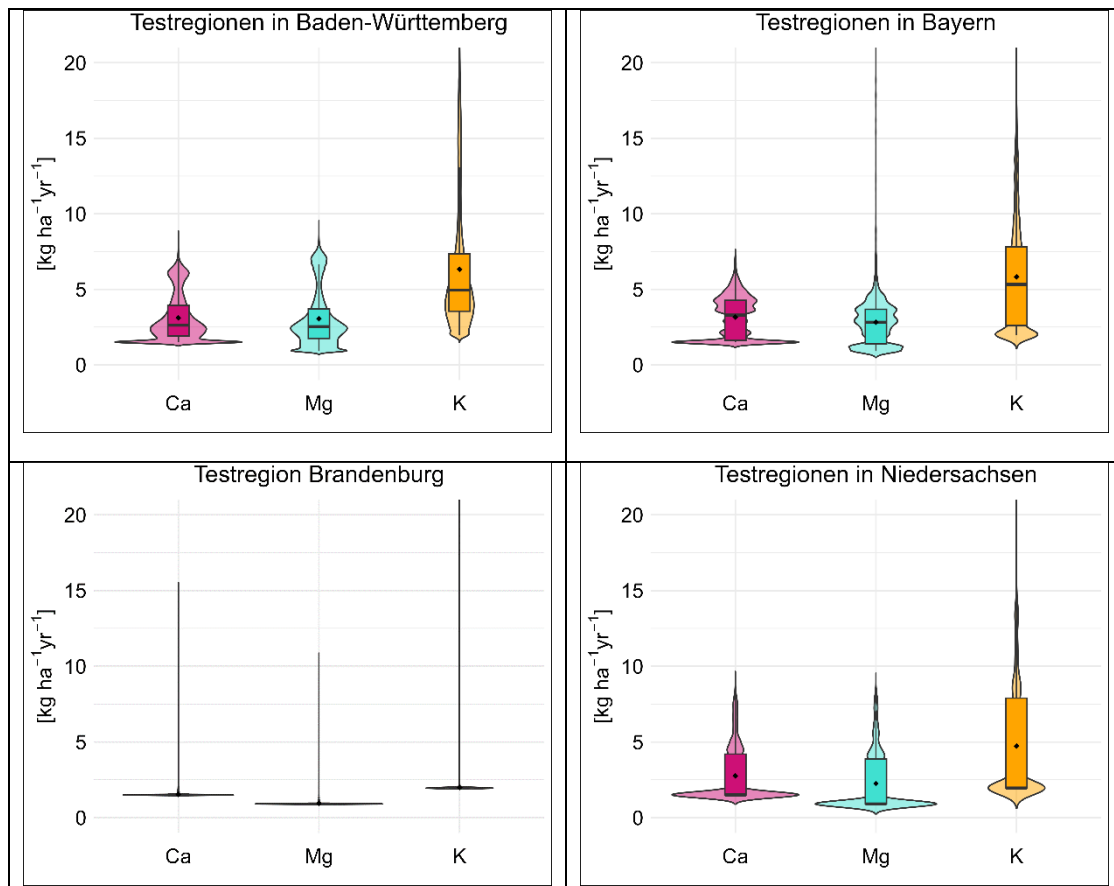


Abbildung 22: Werteverteilung für die Verwitterungsraten von Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) in den bearbeiteten Beispielregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht berücksichtigt, daher erfolgte die Darstellung nur bis 20 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

Eine weitere Beispielregion in Bayern ist das Nürnberger Land. Diese Region verfügt über einen höheren Anteil an Carbonat-, Dolomit- und Mergelgestein. Diesen nährstoffreicheren Standorten stehen viele sandige Böden gegenüber, die sich aus verschiedenen Sandstein-Varietäten (Eisensandstein, Glimmersandstein, usw.) gebildet haben. Hinzu kommen Standorte mit Tonschiefern und Löß. Entsprechend sind für die carbonat- und dolomitfreien Standorte die Mediane der Verwitterungsraten für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ mit 3,9, 2,9, 6,3 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ etwas höher als in der vorab beschriebenen Region Cham-Roding. Gemäß der stärkeren geologischen Variabilitäten in diesem Gebiet fallen auch die IQA wesentlich größer aus: 3,0, 2,5, 6,4 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

In der dritten bayerischen Beispielregion Kronach-Rothentkirchen im Norden Bayerns haben sich viele Böden aus Quarzit, Grauwacken, Tonschiefern oder Sandsteinen gebildet. Die Mediane der Verwitterungsraten für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ betragen 3,0, 2,6 und 7,0 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und mit Ausnahme von K^+ sind die IQA mit 1,7, 1,3, 6,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ eher als gering einzustufen. Von Ahrends et al. (2022b) wurden für die entsprechende Bodengroßlandschaft (S9: Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Ton und Schluffschiefern) in Deutschland Mediane von 3,8, 3,8 und 7,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ angegeben.

In Baden-Württemberg wurden die Regressionsgleichungen ebenfalls auf drei Beispielregionen angewendet. Die erste Region „Mittlerer Schwarzwald“ wird von hellen Gneisen und Granit dominiert. Entsprechend sind

die Mediane der Verwitterungsraten von Ca^{2+} , Mg^{2+} , und K^+ mit 2,4, 2,3 und 4,4 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ in einer vergleichbaren Größenordnung zu den Ergebnissen aus der Region Cham-Roding aus Bayern. Auch die IQA liegen mit 1,3, 1,3 und 2,6 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ in dieser Region des Schwarzwaldes sehr eng beieinander. Die beiden anderen Regionen in Baden-Württemberg sind aufgrund des hohen Anteiles von Lößstandorten wesentlich besser hinsichtlich der Nährstoffversorgung einzustufen. Die Mediane der Verwitterungsraten von Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ liegen in der zweiten Region bei 5,9, 6,5 und 11,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ und in der dritten Region bei 6,0, 6,7 und 14,3 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Die IQA sind in beiden Regionen für die drei Elemente eher als gering anzusprechen. Sie betragen 1,0, 1,1 und 4,4, bzw. 0,7, 1,0 und 4,8 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$.

Die ebenfalls durch Löß geprägte niedersächsische Region Löwenhagen weist etwas geringere aber durchaus vergleichbare Verwitterungsraten von 4,8, 4,4 und 8,9 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ auf. Die größeren IQA bei Ca^{2+} und Mg^{2+} in Löwenhagen (1,9, 1,8 und 3,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) begründen sich aus einer höheren Variabilität der Lößdeckenmächtigkeit über den unterlagernden Buntsandsteinen in dieser Region. Die niedersächsische Beispielregion Soltau besteht hingegen überwiegend aus quartären Sanden, die durch geringe Verwitterungsraten gekennzeichnet sind (De Vries et al., 2021). Diese Standorte entsprechen dem unteren Dichtemaximum der Violin Plots (vgl. Abbildung 22). Die Mediane der Verwitterungsraten von Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ liegen bei 1,5, 0,9 und 2,0 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Diese Werte entsprechen den hinterlegten Minimalwerten für arme Sandböden (De Vries et al., 2021), die einer Verwitterung an basischen Kationen, inklusive Na^+ , von 0,25 $\text{kmol}_c \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ entsprechen. Eine entsprechende untere Grenze verwendeten auch Riek et al. (2015) als minimale Verwitterungsrate für Flugsand bei ihrer Regionalisierung der Verwitterungsraten für Brandenburg. D.h. modellierte Werte, die die entsprechenden Wertebereiche für die jeweiligen Elemente unterschritten hatten, wurden auf dieses Niveau angehoben. Die Anwendung einer unteren Grenze begründet sich dadurch, dass die Verwitterungsraten mit einem statistischen Modell abgeleitet wurden und es somit keine Rückkopplung bei sehr sauren Bodenverhältnissen gibt. Jedoch nehmen unter Freilandbedingungen Verwitterungsraten mit sinkendem pH-Wert zu (De Vries et al., 2021). Auch wenn in der Literatur z.B. für Geschiebedecksande z.T. deutlich geringere Verwitterungsraten angegeben werden (Dultz, 2001; Rademacher et al., 2001), basieren die von De Vries et al. (2021) vorgeschlagenen Werte ebenfalls auf einer Literaturlauswertung. Die Anwendung eines unteren Limits ist auch der Grund dafür, dass die überwiegende Anzahl der Standorte in Brandenburg Werte in den entsprechenden Größenordnungen zugeordnet wurden (vgl. Abbildung 22). Gleichsam wurde z.B. auch von Hannemann et al. (2016) für die Level II-Flächen im Land Brandenburg verfahren. Bei den entsprechenden Stoffbilanzierungen wurde für alle Flächen und Jahre eine Verwitterungsrate von 1,18 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ für Ca^{2+} , von 0,5 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ für Mg^{2+} und von 7,6 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ für K^+ in die Bilanzierung einbezogen. Die hohen Verwitterungsraten von Kalium erklären sich dadurch, dass sie mit dem damals aktuellen bodenchemischen Modell PROFILE 4.2 (Becker, 1999) abgeleitet wurden. Eine Überschätzung der mit dieser Modellversion ermittelten K-Verwitterungsraten ist aus der Literatur bekannt (Houle et al., 2012; Jönsson et al., 1995; Sverdrup et al., 2020). Vor dem Hintergrund, dass die austauschbaren Kaliumvorräte im Boden auf unverlehmten Sandböden in Niedersachsen und Brandenburg im Median um 200 kg ha^{-1} liegen (Jan Evers et al., 2019; Riek et al., 2015) erscheinen jährliche Verwitterungsraten von 2 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ eher plausibel als fast 8 $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Generell muss beachtet werden, dass die Abschätzung von Verwitterungsraten mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist. Studien, die sich mit Unsicherheitsbetrachtungen beschäftigt haben, kommen zu unterschiedlichen Größenordnungen. Von Kolka et al. (1996) und Wesselink et al. (1994) werden Unsicherheiten von 25% genannt. Etwas größere Unsicherheiten wurden von Jönsson et al. (1995) und Dultz (2001) mit 40% bzw. 75% ermittelt. Nach Hodson und Langan (1999) besitzen die meisten Methoden für die Ermittlung der Verwitterungsraten eine Genauigkeit von $\pm 50\%$. Wesentlich höhere Unsicherheiten mit Größenordnungen von über 100% ergeben die Studien von Klaminder et al. (2011) mit 98-110% und Futter et al. (2012) mit 33-300%. Es bleibt die generelle Problematik, dass der Verwitterungsfluss sehr schwer in einem zeitlichen Maßstab zu messen ist, der für forstliche Maßnahmen passend ist (Lucas et al., 2014).

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Verwitterungsraten zeigt die Abbildung 23 beispielhaft für Mg^{2+} in der Beispielregion Löwenhagen in Niedersachsen. Der fördernde Effekt der Temperatur auf die Verwitterung zeigt sich in einem leichten Anstieg der Verwitterungsraten. Leichte Anstiege der Verwitterung im Zeitraum von 1970 bis 2018 zeigten auch die Untersuchungen von Ahrends et al. (2021b). Der Anstieg der Verwitterungsraten durch den Anstieg der Bodentemperaturen kann anscheinend nicht durch den hemmenden

Effekt geringer Bodenwassergehalte kompensiert werden, wie aus anderen Studien bekannt (Belyazid et al., 2019).

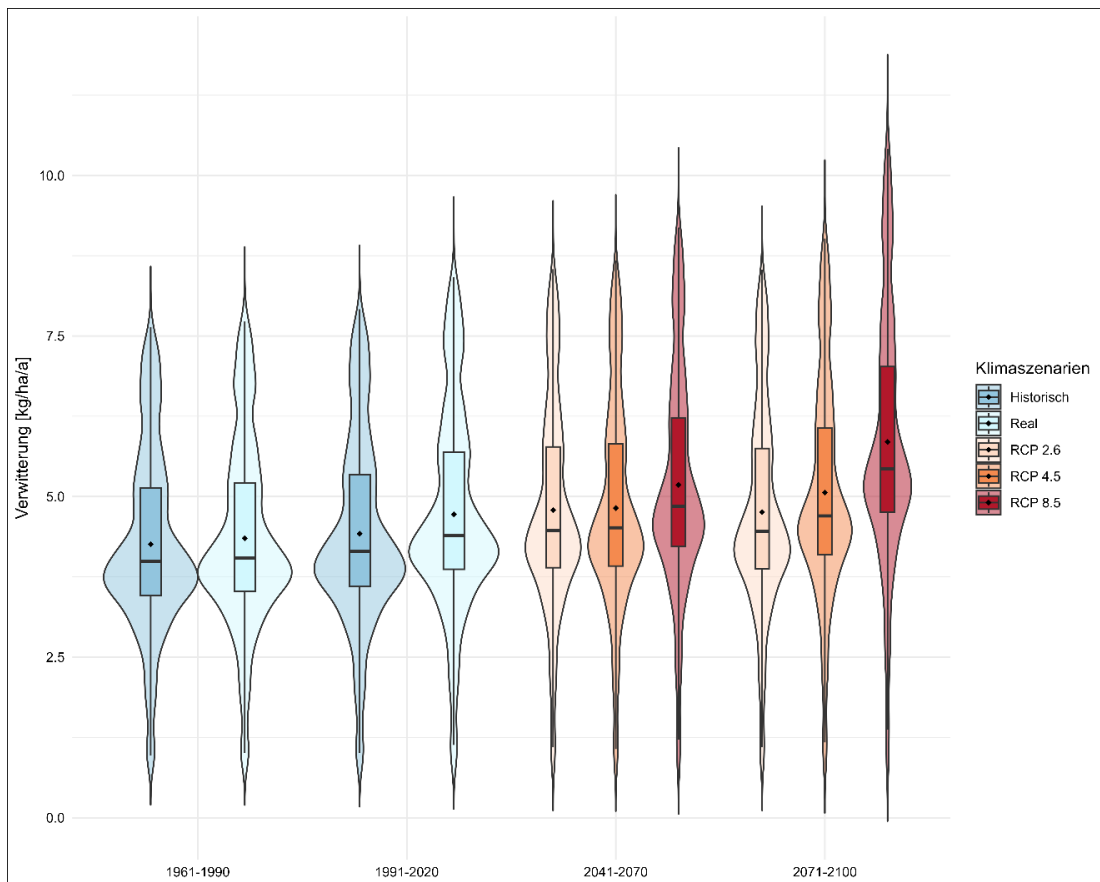


Abbildung 23: Zeitliche Verteilung der Magnesium-Verwitterungsraten ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) im Beispielgebiet Löwenhagen für die Baumart Buche für die Emissionsszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Historisch beschreibt hier die Hindcasts der Klimaszenarien.

Sickerwasserausträge von Nährstoffen

In forstlichen Ökosystemen findet ein steter Austrag von Nährelementen mit dem Sickerwasser statt. Die hierbei ausgetragene Menge an basischen Kationen kann jedoch standörtlich sehr stark variieren (Klinck et al., 2012; Weis et al., 2016). Hauptverantwortlich für hohe Elementverluste auf carbonatfreien Böden sind dabei Flüsse der starken Anionen Nitrat, Sulfat und Chlorid (Frank und Stuanes 2003; Weis et al., 2018a). Hohe Nitrat- und Sulfat-Flüsse ergeben sich in erster Linie auf Grund der historisch bzw. anhaltend hohen atmosphärischen Deposition von Stickstoff und Schwefel (Meesenburg et al., 2016; Schaap et al., 2018; Schöpp et al., 2003). Da die Ladungssumme der Ionen im Sickerwasser ausgeglichen sein muss (Bonten et al., 2016) führen hohe Austräge von Anionen auch zu hohen Austrägen an Begleitkationen und damit zu Verlusten wichtiger Nährstoffkationen wie Calcium, Magnesium und Kalium mit dem Sickerwasser. Gemessen werden jedoch entsprechende Anionen- und Kationenkonzentrationen im Sickerwasser nur auf einzelnen Flächen des intensiven Umweltmonitorings bzw. über Bodenextraktion für die Punkte der Bodenzustandserhebung (BZE) im Wald (Fleck et al., 2019; Riek, 2009; Weis et al., 2018a). Für eine flächenhafte Abschätzung der Austräge musste auf einen anderen Ansatz zurückgegriffen werden, da i.d.R. keine Messdaten verfügbar waren. Dieser Ansatz ist als Erweiterung der Arbeiten von Armbruster und Matzner (2000) anzusehen und basiert zunächst auf der Quantifizierung des Austrages der starken Anionen. Hierbei wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Auswaschung der basischen Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ sehr eng mit der Auswaschung von Sulfat (SO_4) und Nitrat (NO_3) verknüpft ist (De Vries et al., 2021) und der Chlorid-Anteil vereinfachend unberücksichtigt bleibt. Diese Vereinfachung erfolgt vor dem Hintergrund, dass Aerosole des Meerwassers die Hauptquelle für Natrium und Chlorideinträge sind (Keuffel-Türk et al., 2021). Entsprechend treten an Standorten mit

hohen Chlorid- auch hohe Natriumeinträge auf. Da Freisetzungsraten von Na^+ durch die Verwitterung ebenfalls nicht berücksichtigt wurden, wird vereinfacht angenommen, dass der Anionenüberschuss durch die Cl-Depositionen über Na-Depositionen und Na-Verwitterung ausgeglichen wird. Für die Stickstoffausträge wird vereinfacht angenommen, dass Ammonium (NH_4^+) innerhalb der Wurzelzone vollständig nitrifiziert und entzogen wird (Posch et al., 2015), und der Austrag sich auf Nitrat (NO_3^-) beschränkt.

Der Anteil der basischen Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ , der mit den Nitrat- und Sulfatausträgen ausgetragen wird, hängt stark von den Gehalten der mobilisierbaren bzw. austauschbaren Kationen an der effektiven Kationenaustauschkapazität des Bodens ab. Entsprechend wurden zur Herleitung der Austräge von basischen Kationen zunächst die Austräge von Sulfat und Nitrat quantifiziert. Dann wurde mit elementspezifischen Modellen der Anteil von Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ an den ausgetragenen Anionen ermittelt.

Abschätzung der Stickstoffausträge mit dem Sickerwasser

In Fleck et al. (2019) erfolgte eine umfassende deutschlandweite Abschätzung der Nitratausträge an den Plots der BZE II. Anders als beim Sulfat zeigt sich beim Stickstoff, dass immer noch eine bedeutende Immobilisierung im Waldboden stattfindet (Ahrends et al., 2021b; Evers et al., 2019). Eine Ausnahme bilden Standorte, die durch Sturmschäden, Borkenkäferbefall oder allgemein starke Nutzungseingriffe beeinträchtigt wurden (Beudert et al., 2015; Löfgren et al., 2014, 2011; Waldner et al., 2019).

Um die langjährigen mittleren Stickstoffausträge abschätzen zu können, wurde zunächst getestet, wie gut bestehende Schätzverfahren (S1: Borken und Matzner, 2004; S2: Waldner et al., 2019) die ermittelten Nitratausträge an diesen Standorten abbilden können. Da bei Borken und Matzner (2004) als Input für die Stickstoffeinträge die Einträge mit dem Bestandesniederschlag („throughfall“) verwendet wurden, wurde zunächst ein statistisches Modell entwickelt, mit dem die Gesamtd deposition aus der Bestandesdeposition und umgekehrt abgeleitet werden kann (Braun et al., 2022). Beide getesteten Modelle S1 und S2 zur Abschätzung der Nitratausträge konnten jedoch nur einen geringen Anteil der Varianz erklären. Daher wurde ein neues statistisches Modell parametrisiert und kreuzvalidiert.

Tabelle 13: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Nitrat-Austräge mit korrigiertem R^2 (R^2_{adj}) und erklärter Abweichung (ED). GAMM Familie: Gaussian.

Zielvariable	Modell	R^2_{adj}	ED (%)
$\log(\text{N-Austrag})$ [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	$\sim s(\text{NDEP}) + s(\text{CN}, k = 3) + s(\text{MAP}, k = 3) + s(\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}, k = 3)$	0.437	72.5

CN: C/N-Verhältnis [g g^{-1}]; MAP: Mittlerer Jahresniederschlag [mm]; NDEP: Stickstoff-Gesamtd deposition [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$: pH-Wert.

Entsprechend der getesteten Modelle S1 und S2 wird auch bei dem neu parametrisierten Modell die Stickstoffdeposition und das C/N-Verhältnis in der Humusaufgabe bzw. im Ah bei Mullhumusformen berücksichtigt. Es zeigen sich positive Effekte der Deposition und signifikant negative Effekte der C/N-Verhältnisse. Der Einfluss der C/N-Verhältnisse tritt jedoch im Bereich zwischen 10-25 nur sehr schwach in Erscheinung. Zwischen den C/N-Verhältnissen von 25-30 ist der Effekt immer noch relativ schwach ausgeprägt. Erst bei C/N-Verhältnissen von über 30 zeigt sich eine deutliche Reduktion des geschätzten Austrags (vgl. auch Gundersen et al., 1998). Auch bei Untersuchungen in den Niederlanden (De Vries und Leeters, 2001) zeigte sich, dass im C/N-Bereich zwischen 20-30 keine eindeutige Beziehung zwischen der Konzentration von gelöstem Nitrat im Unterboden und dem C/N-Verhältnis der Humusaufgabe zu finden war.

Mit zunehmender Niederschlagsmenge nimmt die geschätzte Auswaschung zu. Da die Stickstoffdeposition auch von der Niederschlagsmenge abhängt und beide Variablen mit der Meereshöhe korreliert sind, wurde bei Waldner et al. (2019) geprüft, wie gut sich der Einfluss des Niederschlags von demjenigen der Stickstoffdeposition trennen lässt. Hierbei zeigt sich, dass sich die Koeffizienten von Niederschlag und Stickstoffdeposition nicht stark gegenseitig beeinflussen und dass deshalb die gefundene Beziehung mit dem Niederschlag

als zuverlässig beurteilt werden kann. Auch in dieser Studie waren die N-Deposition und der Niederschlag mit einem r_{Pear} von 0,58 mittelstark korreliert. Allerdings berücksichtigt das verwendete ‚general additive mixed model‘ (GAMM, Package ‚mgcv‘) im Hintergrund die Kovarianzmatrizen (Wood, 2011), sodass der Niederschlagseffekt als plausibel angesehen wird.

Der Effekt des pH-Wertes ist insgesamt eher schwach ausgeprägt. Ein leichter Anstieg des Austrags ist vorwiegend bei sehr hohen pH-Werten zu verzeichnen. Ein erhöhter Austrag wird auch von Evers et al. (2019) und Mellert et al. (2005) für die Substratgruppe der Kalke beschrieben. Dies kann auf die ausgeprägte Flachgründigkeit, die hohe Wasserdurchlässigkeit, das hohe Nitrifikationspotenzial und die hohen Stickstoffumsatzraten zurückgeführt werden. Die durch das Modell der Tabelle 13 beschriebenen Einflussfaktoren auf den Austrag sind somit plausibel und entsprechen gut den Ergebnissen anderer Untersuchungen (Borken and Matzner, 2004; Evers et al., 2019; Mellert et al., 2005; Waldner et al., 2019).

Die Abbildung 24 zeigt die räumliche Verteilung des geschätzten Austrags für Stickstoff in den beiden niedersächsischen Beispielregionen in Abhängigkeit von der Stickstoffdeposition und den Standortverhältnissen. Die Ergebnisse zeigen, dass der geschätzte Stickstoff-Austrag in Löwenhagen insgesamt etwas größer ist als in der Region Soltau. Auch Borken und Matzner (2004) fanden die geringsten Stickstoff-Austräge und das geringste Austrags/Eintrags-Verhältnis unter Kiefernbeständen, die vorwiegend auf den armen Sandböden des Norddeutschen Tieflandes anzutreffen sind.

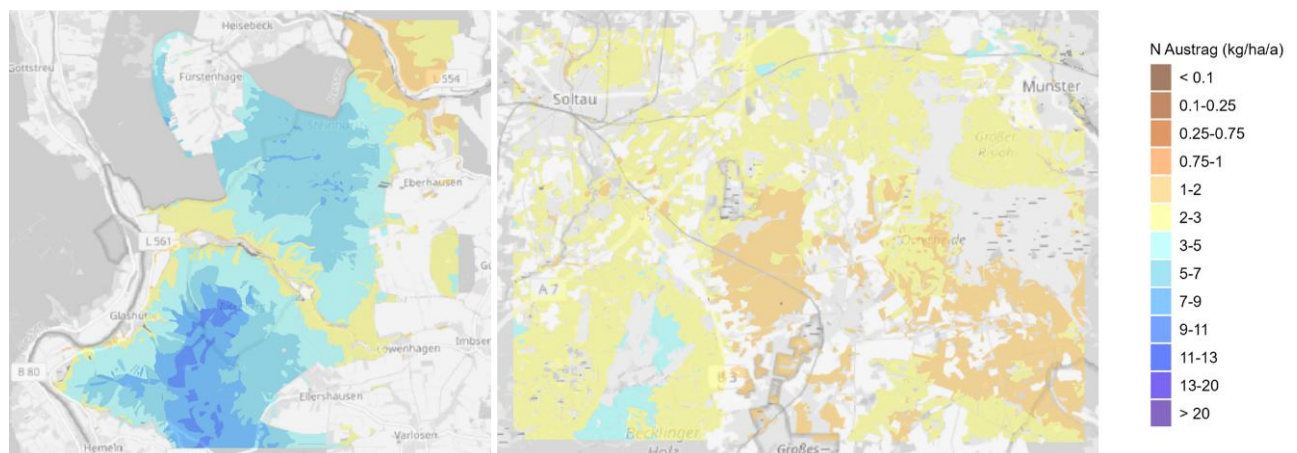


Abbildung 24: Räumliche Verteilung des geschätzten Stickstoffaustrags ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) in den Untersuchungsgebieten. Links: Löwenhagen (Buche); Rechts: Soltau (Kiefer).

Abschätzung der Sulfatausträge mit dem Sickerwasser

Im einfachsten Fall kann die Sulfatauswaschung ($\text{SO}_{4,\text{I}}$) mit den Einträgen durch die S-Gesamtd deposition (S_{DEP}) gleichgesetzt werden ($\text{SO}_{4,\text{I}} = S_{\text{DEP}}$). Viele Studien zeigen in den letzten Jahrzehnten, dass die Sulfatein- und -austräge mittlerweile ausgeglichen sind oder dass die Sulfatausträge die Schwefeleinträge deutlich übersteigen (vgl. Meesenburg et al., 2016; Vuorenmaa et al., 2018). Daher ist Sulfat auf vielen Standorten immer noch einer der Haupttreiber für Kationenausträge (Piirainen et al., 2002). Entsprechend zeigen viele Standorte trotz stark gesunkener Sulfatdepositionen (Ahrends et al., 2022a) hohe Austräge von basischen Kationen durch stattfindende Remobilisierung von zwischengespeichertem Sulfat (Ahrends et al., 2022a; Knust et al., 2016; Meesenburg et al., 2019). Eine entsprechende Dynamik von Ad- und Desorption des Sulfates im Boden kann nur durch dynamische Modelle abgebildet werden, deren Anwendung jedoch häufig nur an Einzelstandorten umfassend erprobt ist (z.B. Bonten et al., 2012). Eine vollständige Nichtberücksichtigung des Einflusses durch die Auflösung von zuvor gespeicherten Sulfaten im Boden würde jedoch zu einer wesentlichen Unterschätzung führen. Dieses gilt insbesondere für Standorte, die in der Vergangenheit starken Schwefeldepositionen ausgesetzt waren und gleichzeitig über Bodensubstrate mit einer hohen Affinität für die S-Retention verfügen. Auch wenn sich der Prozess der Remobilisierung zunehmend verlangsamen wird, sind aktuell die deutlich erhöhten Austräge noch gegenwärtig (vgl. Ahrends et al., 2022a; Meesenburg et al., 2019) und werden noch mindestens bis Mitte des Jahrhunderts anhalten (Augustin und Bartens, 2001).

Wie zur räumlichen Erfassung des Nitrataustrags wurde auch für Sulfat versucht mit einem generalisierten additiven Modell (GAM) aus dem R-Paket „mgcv“ (Wood, 2006) Schätzmodelle zu entwickeln und zu validieren (vgl. Tab. S2). Als Datengrundlage dienten auch hierbei die Ergebnisse des Forschungsprojektes EnNa (Weis et al., 2018). Neben der Deposition ist der Einfluss der Bodenmatrix aus Bodenarten und Trockenrohddichte auf die Sulfatsorption berücksichtigt. Auffällig ist hierbei, dass insbesondere die Bodenartengruppen der Lehmtone (Tt, Tu, Tl, Ts2) und der Tonlehme (Lts, Ts3, Ts4) deutlich geringere Austräge aufweisen. Hier ist eventuell eine stärkere spezifische Adsorption in der inneren Helmholtzosphäre der zahlreichen Tonminerale entscheidend (Zhang und Sparks, 1990). Der Einfluss des pH-Wertes auf die S-Retention wird in zahlreichen Studien berichtet (Gustafsson et al., 2015; Harrison et al., 1989; Mitchel und Fuller, 1988). Mit sinkendem pH-Wert steigt die Sorption an (Augustin und Bartens, 2001). Entsprechend sind die wichtigsten die Sorption beschreibenden Parameter (1) die Sulfateinträge, (2) der pH-Wert des Bodens und (3) die Eigenschaften des bodenbildenden Substrates (vgl. Augustin und Bartens, 2001) in diesem Modellansatz berücksichtigt. Durch die Einbeziehung von Wuchsgebieten in stark aggregierter Form konnten Signifikanzen der räumlichen Autokorrelation (Moran's I-Test; Lichstein et al., 2002) verhindert werden.

Tabelle 14: Erklärende Variablen der statistischen Modelle zur Abschätzung der Sulfatausträge mit korrigiertem R^2 (R^2 adj.) und erklärter Abweichung (ED). Angenommene Fehlerverteilung: Gaussian.

Zielvariable	Modell	R^2 adj.	ED (%)
log(SO ₄ -S-Austrag) [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]	~ s(SDEP) + s(TRD _F) + s(pH _{H2O}) + s(ARI) + Bodenart _{Gruppe} + WG	0,43	60,3

ARI: Ariditätsindex de Martonne (1926); Bodenart_{Gruppe}: Bodenarten gruppiert nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005); pH_{H2O}: pH-Wert aus wässrigem Extrakt; SDEP: SO₄-Deposition [kg ha⁻¹ a⁻¹]; TRD_F: Trockenrohddichte des Feinbodens [g cm⁻³]; WG: Wuchsgebiet, statistisch gruppiert.

Die Abbildung 25 zeigt die räumliche Verteilung des geschätzten Austrags für Sulfat in den beiden niedersächsischen Beispielregionen in Abhängigkeit von der Schwefeldeposition und den Standortverhältnissen. Die Ergebnisse zeigen, dass der geschätzte SO₄-S-Austrag in Löwenhagen insgesamt etwas größer ist als in der Region Soltau. Hieran ist deutlich der jeweilige Effekt der Standorteigenschaften zu erkennen. Ein Sandboden wird auch bei höchster Eintragungssituation von Schwefel nicht zu vergleichbaren Sulfatgehalten kommen wie eine Braunerde auf Buntsandstein bei mittlerer Eintragungssituation (Augustin und Bartens, 2001). Entsprechend weisen die von Lössdecken überlagerten Buntsandsteinstandorte im Untersuchungsgebiet Löwenhagen ein höheres Risiko der Remobilisierung von zwischengespeichertem Sulfat und entsprechend höheren Sulfatausträgen auf.



Abbildung 25: Räumliche Verteilung des geschätzten Sulfataustrags SO₄-S (kg ha⁻¹ a⁻¹) in den Untersuchungsgebieten. Links: Löwenhagen (Buche); Rechts: Soltau (Kiefer)

Abschätzung der Ca, Mg, und K-Austräge mit dem Sickerwasser

Die Annahme, dass die Auswaschung der basischen Kationen Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ anhand der Auswaschung von Sulfat (SO_4^-) und Nitrat (NO_3^-) abgeschätzt werden kann (De Vries et al., 2021), erfordert die Quantifizierung der prozentualen Anteile der jeweiligen Kationen an den jeweiligen Anionenausträgen von NO_3^- und SO_4^- . Zur Umsetzung wurden die von Weis et al. (2018) verwendeten Anteile der jeweiligen Kationen in der Bodenlösung verwendet. Parametrisiert wurde je ein GAM in dem als erklärende Variablen je nach Element das geologische Ausgangsmaterial, der pH-Wert (H_2O), die Basensättigung und die Bodenarten berücksichtigt wurden (vgl. Tab. 14). Die Kationen-Austräge für Ca^{2+} , Mg^{2+} , und K^+ konnten mit Bestimmtheitsmaßen von über 0,75 geschätzt werden. Dabei spielten wie zu erwarten der pH-Wert und die Basensättigung eine große Rolle. Auch in der Verknüpfungsregel 6.2.9 des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®) ist der pH-Wert der entscheidende Parameter zur Abschätzung der prozentualen Gehalte der austauschbar gebundenen Kationen an der effektiven Kationenaustauschkapazität unter forstlicher Nutzung (Bug et al., 2020). Es muss aber auch klar betont werden, dass Böden weit entfernt vom chemischen Gleichgewicht sein können, sodass keine sichere Beziehung zwischen dem pH-Wert und der Austauscherbelegung besteht. Dies gilt insbesondere für den Austauscher-Pufferbereich. Einen Einfluss auf das Modellergebnis zeigten auch der Ariditätsindex nach De Martonne (1926), die Bodenregionen und die Wuchsgebiete. Mit den beiden letztgenannten Geoinformationen konnten Signifikanzen der räumlichen Autokorrelation (Moran's I-Test; Lichstein et al., 2002) verhindert werden. Bei den Kaliumanteilen konnten zusätzlich die K-Gesamtgehalte im Boden die Modellgenauigkeit verbessern.

Tabelle 15: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der Kationenanteile an den Austrägen mit korrigiertem R^2 ($R^2_{\text{adj.}}$) und erklärter Abweichung (ED). GAM Familien: Beta Regression.

Zielvariable	Modell	$R^2_{\text{adj.}}$	ED (%)
Ca_Anteil [%]	$\sim s(\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}, k = 3) + s(\text{BS}, k = 5) + s(\text{C-CO}_3, k = 3) + \text{BR} + \text{WG}$	0,816	82,7
Mg_Anteil [%]	$\sim s(\text{Ca_Anteil}) + s(\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}, k = 5) + s(\text{ARI}) + \text{Bodenart}_{\text{Gruppe}} + \text{BR} + \text{WG}$	0,765	80,5
K_Anteil [%]	$\sim s(\text{Ca_Anteil} + \text{Mg_Anteil}, k = 4) + s(\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}, k = 3) + s(\text{ARI}, k = 4) + s(\text{C}_{\text{org}}, k=9) + s(\text{K}_{\text{RT}}, k=9) + \text{BR} + \text{WG}$	0,792	83,0

ARI: Ariditätsindex de Martonne (1926); $\text{Bodenart}_{\text{Gruppe}}$: Bodenarten gruppiert nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005); BR: Bodenregion; BS: Basensättigung [%]; C-CO_3 : Carbonat-Kohlenstoff [g kg^{-1}]; C_{org} : Organischer Kohlenstoff [g kg^{-1}]; K_{RT} : Kalium-Gesamtgehalte [mg kg^{-1}]; $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$: pH-Wert aus wässrigem Extrakt; WG: Wuchsgebiet, statistisch gruppiert.

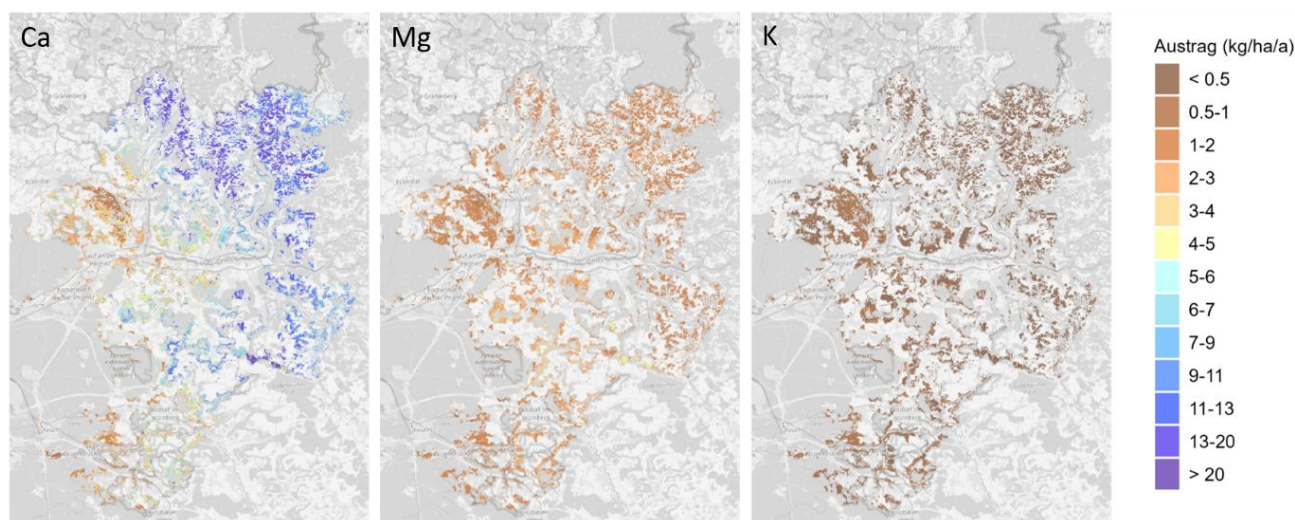


Abbildung 26: Geschätzte räumliche Verteilung der Kationenausträge ($\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) in der Beispielregion Nürnberger Land in Bayern. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht dargestellt.

Die Abbildung 26 zeigt die geschätzte räumliche Verteilung der Kationenausträge in der Beispielregion Nürnberger Land. Während die Kaliumausträge insgesamt vorwiegend unter $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen sind insbesondere im Osten und Nordosten des Nürnberger Landes hohe Calciumausträge zu erkennen.

Das vorab beschriebene Verfahren wurde auf alle Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern angewendet. In der Abbildung 27 sind die Ergebnisse für die einzelnen Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern aggregiert. Analysiert man die Ergebnisse getrennt nach den Beispielregionen ergeben sich klare standörtliche Unterschiede (nicht graphisch dargestellt). Wie bei den Verwitterungsraten gestaltet sich das Austragsgeschehen in den verschiedenen Naturräumen der Modellregionen sehr unterschiedlich. Daher werden im Folgenden die einzelnen Beispielregionen kurz charakterisiert und diskutiert. Die Mediane der Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ -Austräge liegen in Cham-Roding (Bayern) bei 4,4, 1,5 und $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und die Interquartilabstände (IQA) bei 3,3, 0,8 und $0,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Im Nürnberger Land liegen die Mediane der Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ Austräge in einer vergleichbaren Größenordnung mit 5,2, 2,0 und $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Höhere Austräge mit Medianen von 7,2, 2,5 und $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ haben sich aus den Berechnungen in der Region Kronach-Rothenkirchen ergeben. Die IQA sind mit 2,3, 0,8, $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aber im Vergleich zu den anderen beiden Regionen geringer. Von Ahrends et al. (2022b) wurden für die entsprechende Bodengroßlandschaft (S9: Berg- und Hügelländer mit hohem Anteil an Ton- und Schluffschiefen) in Deutschland Mediane der Austräge von 15,3, 7,3 und $2,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ genannt. Die höheren Werte dieser Bodengroßlandschaft erklären sich durch die höheren Austräge in anderen Regionen (z.B. Nordrhein-Westfalen). In Baden-Württemberg wurden ebenfalls drei Beispielregionen untersucht. Die erste Region „Mittlerer Schwarzwald“ weist Mediane von 5,9, 3,2 und $2,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ auf. Die IQA betragen 2,6, 1,4 und $1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In den beiden anderen Regionen, die sehr stark durch Löss geprägt sind, bestimmt Ca^{2+} das Austragsgeschehen. Die Sickerwasserausträge von Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ liegen in der zweiten Region bei 5,6, 1,7 und $0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und in der dritten Region bei 6,5, 2,3 und $0,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die IQA sind in beiden Regionen für die drei Elemente eher als gering anzusprechen und betragen 1,0, 0,5 und $0,1$, bzw. 1,2, 0,4 und $0,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In der ebenfalls durch Löss geprägten Region Löwenhagen ergaben sich Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ -Austräge von 4,1, 2,1 und $0,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und IQA von 1,9, 1,0 und $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die etwas geringeren Ca^{2+} -Austräge im Vergleich zu den Regionen in Baden-Württemberg und der auf der anderen Seite höhere IQA für Ca^{2+} in Löwenhagen weisen auf eine höhere Variabilität der Lößdeckenmächtigkeit über den unterlagernden Buntsandsteinformationen in dieser Region hin. Die niedersächsische Beispielregion Soltau besteht dagegen überwiegend aus quartären Sanden, deren Austausch nur noch zu sehr geringen Anteilen mit Ca^{2+} und Mg^{2+} belegt sind (vgl. auch De Vries et al., 2021; Ahrends et al. 2022a). Entsprechend liegen die Ca^{2+} und Mg^{2+} -Austräge mit 2,7 und $0,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (IQA: 0,6 und 0,4) deutlich unter dem Niveau der anderen Regionen. Die K^+ -Austräge liegen mit $0,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (IQA: 0,1) zumindest über dem Niveau der lößbeeinflussten Regionen. Für die vorwiegend ebenfalls durch Sande geprägten Standorte in Brandenburg ergaben sich für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ vergleichbare Austräge in Höhe von 2,2, 0,8 und $1,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Da es sich hierbei um eine landesweite Auswertung handelt, sind die IQA mit 2,0, 0,3 und $1,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ erwartungsgemäß etwas größer.

De Vries et al. (2021) schätzen für niederländische Sandböden die Austräge für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ auf 4, 3 und $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Demgegenüber fallen die Austräge auf niedersächsischen Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) deutlich geringer aus. Ahrends et al. (2021b) ermittelten für die BDF in Niedersachsen Mediane der Sickerwasserausträge für Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ von 1,5, 1,3 und $1,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auch wenn die Sickerwasserausträge in Brandenburg durch die „Vorbelastung“ durch basische Stäube in der Vergangenheit z.T. deutlich höher lagen (Hannemann et al., 2016), haben sie sich mittlerweile an das vorab beschriebene Niveau angeglichen und die Austräge betragen nur noch wenige Kilogramm (Hannemann et al., 2016).

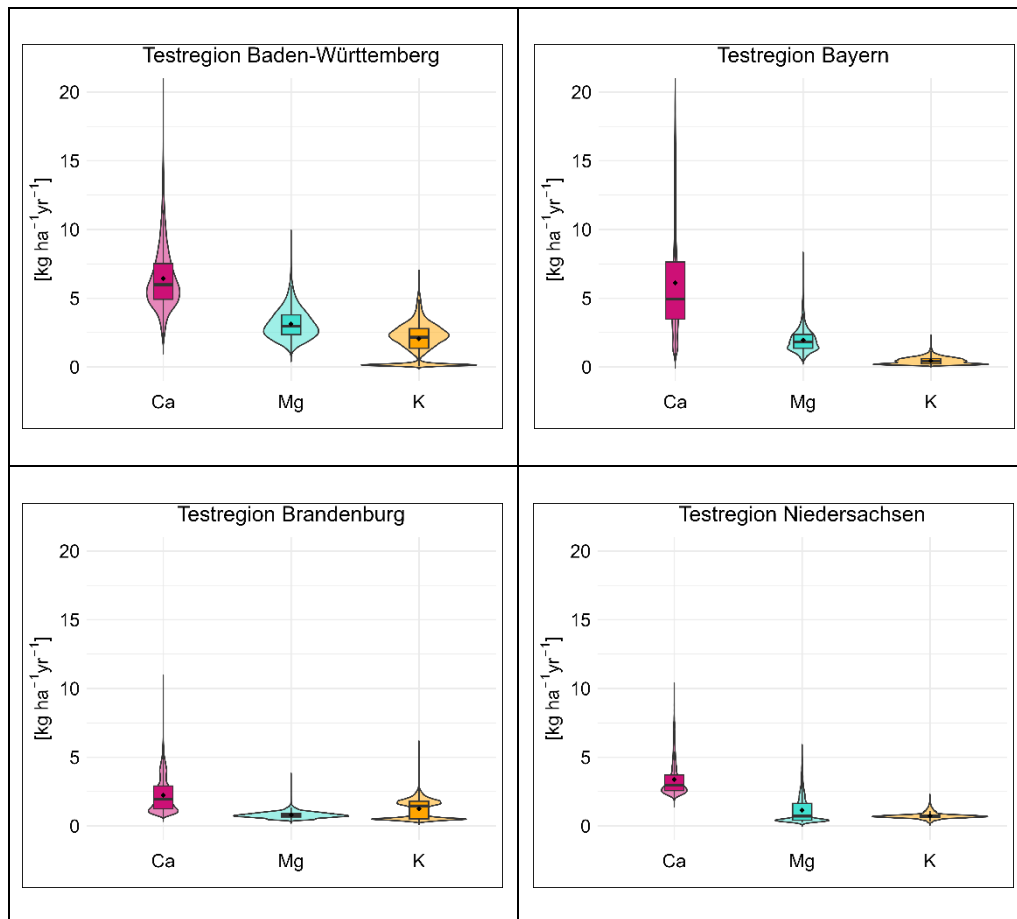


Abbildung 27: Werteverteilung für die Sickerwasserausträge von Calcium, Magnesium und Kalium in den bearbeiteten Beispielregionen der Bundesländer im Zeitraum von 1991-2020. Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung. Carbonat-, Dolomit- und Mergelstandorte wurden nicht berücksichtigt, daher erfolgte die Darstellung nur bis $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Insgesamt fallen die geringen Kaliumausträge in allen Beispielregionen auf. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Fixierung und Freisetzung von K^+ im Boden stark von den durch Düngung und Pflanzenaufnahme hervorgerufenen Rahmenbedingungen im Boden abhängig sind (Andrist-Rangel et al., 2013; Simonsen et al., 2007) und es somit zu einem relativ ausgewogenen Austragsniveau kommt. Auch in den Untersuchungen von Weis und Ahrends (2018) waren auf fast allen BZE-Standorten in Niedersachsen auch bei höheren Verwitterungsraten sehr geringe K-Austräge von unter $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ festzustellen.

Nutzungsfreie Stoffbilanz

Um spezifische Managementoptionen, z.B. verschiedene Ernteszenarien hinsichtlich ihrer stofflichen Nachhaltigkeit bewerten zu können, ist es notwendig, dass die einzelnen Bilanzglieder unabhängig von den Nährstoffentzügen ermittelt werden (De Vries et al., 2021). Entsprechend kann zunächst die nutzungsfreie Stoffbilanz gebildet werden. Sie errechnet sich aus der Summe von Deposition und Verwitterung abzüglich des Elementaustrags mit dem Sickerwasser und fasst damit diejenigen Bilanzglieder zusammen, die nicht direkt durch die Holzernte beeinflusst werden. Prognostizierte Ernteentzüge können danach praxisgerecht mit der Bodenbilanz verglichen werden, ohne dass für jedes Ernteszenario die Gesamtbilanz erneut berechnet werden muss (Weis und Ahrends, 2018). Voraussetzung ist allerdings die Annahme eines langfristig stabilen Fließgleichgewichts für die nutzungsfreie Stoffbilanz. Kurzfristige Effekte und Störungen des Nährstoffkreislaufs durch Bewirtschaftungsmaßnahmen oder Kalamitäten werden dabei vernachlässigt.

Die nutzungsfreie Stoffbilanz wurde zunächst als durchschnittlicher Jahreswert für die Referenzperiode 1991-2020 aus den Teilgliedern Deposition, Verwitterung und Elementaustrag mit dem Sickerwasser gebildet. Systemgrenzen des für die Nährstoffaufnahme zur Verfügung stehenden Bodens waren die Bodenoberfläche, die Untergrenze des Hauptwurzelsraums (i.d.R. 90cm) und die Grenze zur Festsubstanz des Bodens. Stoffum-

sätze, die sich innerhalb dieser Systemgrenzen abspielen (Mineralisation, Veränderung in Menge und Zusammensetzung der austauschbar gebundenen Kationen und Anionen) und biogene Stoffeinträge, die durch eine äquivalente Stoffaufnahme ausgeglichen werden (Streufall und Kronenauswaschung), wurden nicht berücksichtigt. Um eine Überbewertung geringfügiger Bilanzdefizite vor dem Hintergrund hoher Nährstoffvorräte im Boden zu vermeiden, wurde ein Tausendstel des pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrats in die jährliche Nährstoffbilanz einbezogen. Als pflanzenverfügbar galt dabei der Gesamtelementvorrat in der Humusaufgabe (König et al., 2009: A3.3.3 Königswasser-Extrakt) und der austauschbare Elementvorrat im Mineralboden bis zu einer Tiefe von 90cm. Wenn keine Angaben zu den Elementvorräten in der Humusaufgabe vorlagen, wurden diese mit einem einfachen Regressionsmodell abgeschätzt. Hiermit sollte für die entsprechenden Standorte eine systematische Unterschätzung vermieden werden.

Für die Salden der nutzungsfreien Stoffbilanz zeigt sich, dass sie im Mittel über alle betrachteten Elemente und Regionen positiv sind (Abbildung 28). Entsprechende Tendenzen zeigen auch die Ergebnisse von Ahrends et al. (2021a) für niedersächsische Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF). Nach De Vries et al. (2021) können auf Waldstandorten in den Niederlanden die Austräge mit dem Sickerwasser durch die Einträge durch Deposition und Verwitterung mehr als ausgeglichen werden, so dass entsprechend ein Bilanzüberschuss für Nutzungsentzüge bleibt. Insbesondere für Magnesium fällt der Überschuss in den Regionen von Brandenburg und Baden-Württemberg jedoch sehr gering aus (Abbildung 28). Aufgrund der geringen Sickerwasserausträge und der vergleichsweise hohen Verwitterungsraten sind die Salden der nutzungsfreien Kaliumbilanzen am positivsten ausgeprägt. Es ist aber zu beachten, dass bei Kalium den Nutzungsentzügen eine große Bedeutung zukommt (Von Wilpert et al., 2018). In Brandenburg waren die nutzungsfreien Stoffbilanzen für Ca^{2+} und Mg^{2+} in der Vergangenheit über einen langen Zeitraum hinweg extrem negativ (Hannemann et al., 2016). Hier waren die nutzungsfreien Stoffbilanzen durch generell hohe Austräge von Ca^{2+} und Mg^{2+} geprägt. Die hohen Austräge waren auf diesen Standorten auf eine starke Sulfatschwefel auswaschung zurückzuführen. Mittlerweile wurde aber ein großer Anteil des durch die Vorbelastung akkumulierten Schwefels aus dem System ausgetragen, so dass auch die Ca^{2+} und Mg^{2+} -Austräge drastisch gesunken sind.

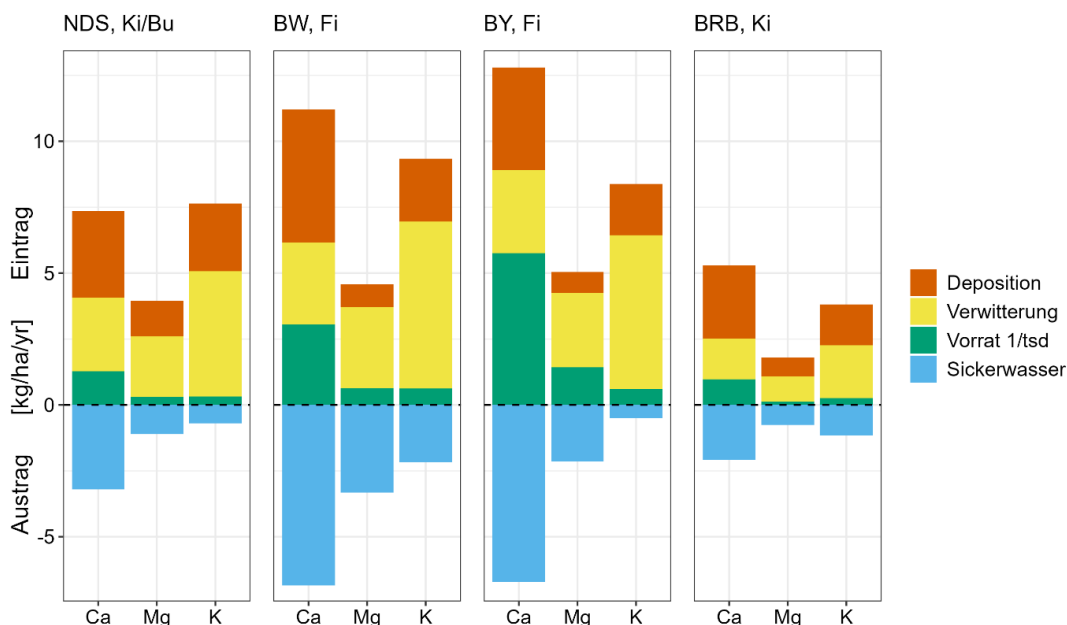


Abbildung 28: Berechnete nutzungsfreie Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ Bilanzen, aggregiert über die Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern (NDS, BW, BY, BRB) für den Zeitraum 1991-2020. Die Baumarten wurden angegeben, da die Deposition baumartenspezifisch ermittelt wird. Ki = Kiefer; Bu = Buche; Fi = Fichte.

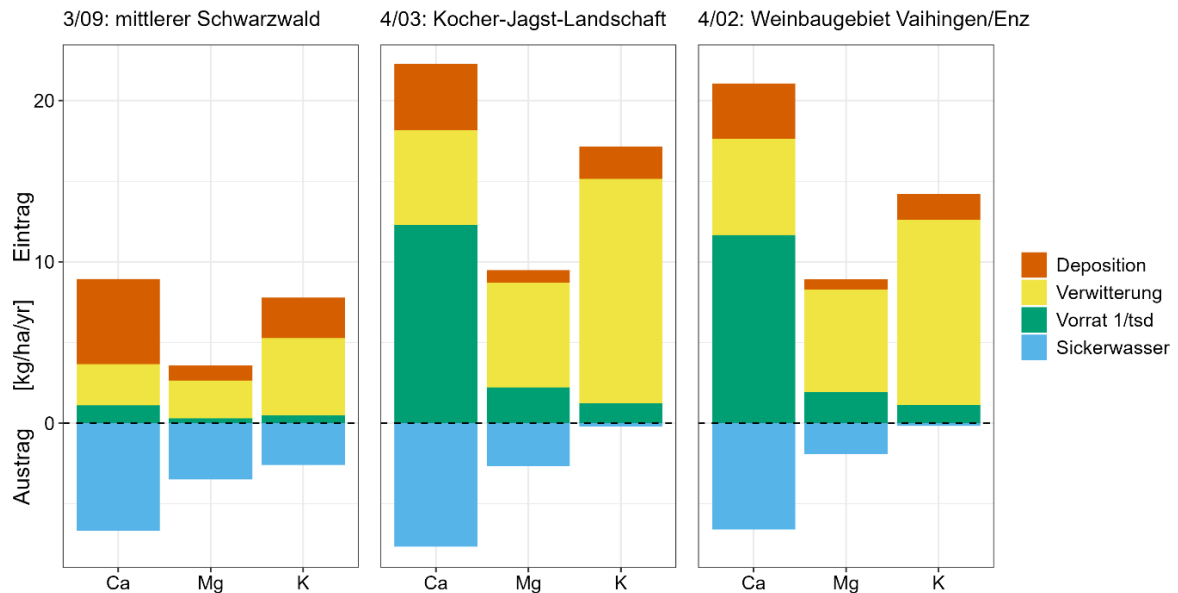


Abbildung 29: Gemittelte berechnete nutzungsfreie Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ Bilanzen in den drei Beispielregionen in Baden-Württemberg (1991-2020).

Hinsichtlich der nutzungsfreien Stoffbilanzen (nfSB) ergeben sich innerhalb der bundeslandspezifischen Beispielregionen erhebliche Unterschiede (Abbildung 29). Während in Baden-Württemberg schon die nutzungs-freie Magnesiumbilanz im Schwarzwald nur unter Einbeziehung der Bodenvorräte knapp ausgeglichen ist, fällt die nfSB in den beiden anderen, lössgeprägten Regionen durch die höheren Verwitterungsraten deutlich positiver aus. Dort sorgen sehr hohe Calciumvorräte im Boden für einen deutlichen Überschuss in der nfSB.

Deutliche Unterschiede der nutzungsfreien Stoffbilanzen zeigen sich auch für die drei bayerischen Beispielregionen (Abbildung 30). Hier wäre das Ca^{2+} -Bilanzsaldo ohne die Einbeziehung der Bodenvorräte nur noch knapp ausgeglichen bzw. in der Region Kronach-Rothenkirchen sogar negativ. Dagegen übersteigt bei K^+ auf fast allen Flächen der Nährstoffeintrag aus Deposition und Verwitterung die äußerst geringen Sickerwasser-verluste bei weitem. Auch wenn die Verwitterungsraten für K^+ an einigen Standorten noch leicht überschätzt werden (Ahrends et al., 2018a), zeigt sich eine wesentlich bessere Versorgung als mit Ca^{2+} und Mg^{2+} .

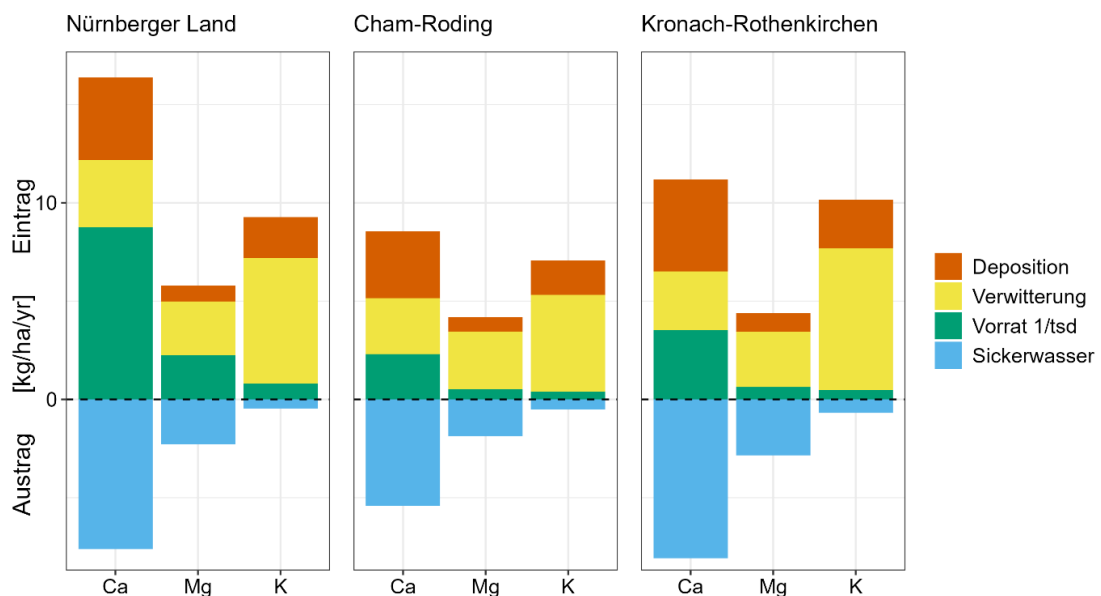


Abbildung 30: Berechnete nutzungsfreie Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ Bilanzen in den drei Beispielregionen in Bayern (1991-2020).

Im Vergleich zu den Untersuchungen aus dem EnNa-Projekt (Ahrends et al., 2022b; Von Wilpert et al., 2018), wo z.T. die Salden der nfSB in einigen Regionen deutlich negativer waren, fallen die hier berechneten Bilanzsalden etwas positiver aus. Bei den Bilanzierungen aus dem EnNa-Projekt wurden die Bilanzgrößen für den

Zeitraum zwischen der BZE I (1989-1992) und der BZE II (2006-2008) ermittelt. Der hier dargestellte Bilanzierungsraum umfasst die Referenzperiode 1991-2020. Untersuchungen auf einer brandenburgischen Level II-Fläche zeigen exemplarisch, welcher hohen Dynamik die nfSB unterliegen kann (Abbildung 31). Die Unterschiede sind überwiegend durch die Dynamik der Sickerwasserausträge getrieben. In der Vergangenheit war dieser Standort durch erhöhte Frachten des akkumulierten Schwefels bei ebenfalls erhöhter Auswaschung basischer Kationen gekennzeichnet. Auch wenn der Trend der fallenden Sulfatschwefelausträge auf anderen Standorten nicht so stark sein dürfte, wie auf den hier exemplarisch durch basische Stäube beeinflussten Sandböden, wird er sich ebenfalls in den Bilanzsalden bemerkbar machen (vgl. auch Ahrends et al. 2021b).

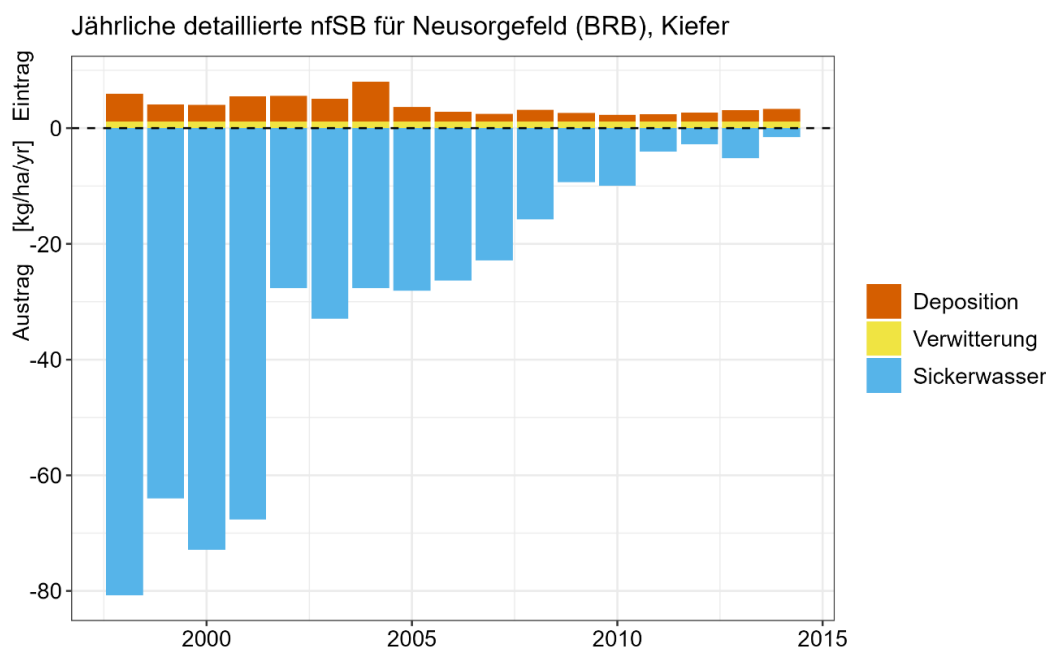


Abbildung 31: Nutzungsfreie Ca^{2+} -Bilanz für die brandenburgische Level II-Fläche in Neusorgefeld.

Neben der vorab diskutierten Dynamik gibt es noch eine weitere Erklärung für die vorab gefundenen Differenzen. Die Austräge der basischen Kationen wurden im EnNa-Projekt unter „realen“ Bedingungen abgeleitet (Weis et al., 2018). Entsprechend waren auch BZE-Punkte eingeschlossen, die in der Vergangenheit gekalkt wurden. Infolge einer Bodenschutzkalkung kann es vorübergehend, aber auch längerfristig, zu höheren Exporten von Ca^{2+} - und Mg^{2+} mit dem Sickerwasser kommen (Frank und Stuanes, 2003; Greve, 2015; Huber et al., 2006). Entsprechend waren diese durch Kalkungen verursachten etwas höheren Austragsraten zu einem gewissen Anteil in den von Weis et al. (2018) geschätzten Sickerwasserausträgen enthalten und dürften somit zu einer leichten Überschätzung der langfristigen Austräge von Ca^{2+} und Mg^{2+} geführt haben. Demgegenüber sind bei den hier kalkulierten Austrägen kurzfristige Austragsspitzen, wie sie nach Kalamitäten und forstlichen Nutzungen auftreten können (z.B. Waldner et al. 2019), nicht in den geschätzten Austrägen enthalten. Entsprechend handelt es sich um eine sehr konservative Abschätzung. Da insgesamt mittelfristig von einem langsamen weiteren Rückgang der Sulfatausträge auszugehen ist, erscheinen die etwas geringer angenommenen Austragsverluste langfristig nicht unplausibel. Modellkalkulationen für das Emissionsszenario RCP 8.5 für die Referenzperiode 2071-2100 zeigen eine geringfügige Erhöhung der Salden der nutzungsfreien Stoffbilanzen (Abbildung 32) im Vergleich zur Referenzperiode 1991-2020 (Abbildung 28). Dies ist vorwiegend auf eine temperaturbedingte Erhöhung der Verwitterungsraten zurückzuführen.

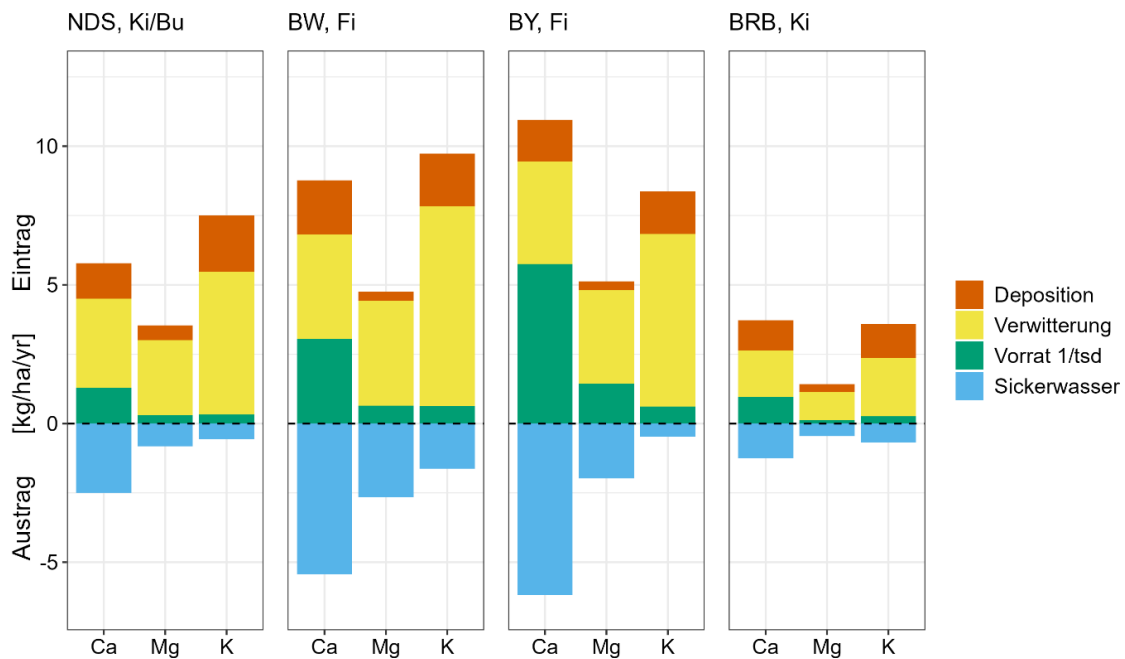


Abbildung 32: Berechnete nutzungsfreie Ca^{2+} , Mg^{2+} und K^+ Bilanzen, aggregiert über die Beispielregionen in den jeweiligen Bundesländern (NDS, BW, BY, BRB) für das Szenario RCP 8.5, 2071-2100. Die Baumarten wurden angegeben, da die Deposition baumartenspezifisch ermittelt wird. Ki=Kiefer; Bu=Buche; Fi=Fichte.

Nährstoffentzüge

Die nutzungsfreie Stoffbilanz bildet einen mittleren Systemzustand ab. Aus diesem Grund müssen auch die Nährstoffentzüge mittlere Flüsse darstellen, damit eine Bewertung perspektivischer Nutzungsintensitäten möglich wird. Zur Bestimmung der mittleren Nährelemententzüge mit der Holzernte wird dementsprechend über eine volle Umtriebszeit gerechnet, differenziert nach verschiedenen Nutzungsszenarien. Es wurden die entwickelten Methoden des EnNa-Projekts (FVA-BW 2018) eingesetzt. Im Unterschied zu diesem Vorläufer-Projekt basieren in dieser Studie die Entzüge nicht auf fortgeschriebenen Inventurdaten, sondern - da die aktuelle Bestockung im Kleinprivatwald in der Regel nicht bekannt ist - auf etablierten Ertragstafelwerken. Es wurden für alle beteiligten Bundesländer die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche berücksichtigt. Dazu wurden aus allen beteiligten Bundesländern Ertragstafelwerke zusammengestellt, geprüft, konsolidiert und Schnittstellen für die Anwendung definiert. Funktionen zur biometrischen Charakterisierung der ausscheidenden Bestände wurden entwickelt. Als Endnutzung wurde der Restbestand zum definierten Umtriebsalter das nach Baumart und Bonität in den Ertragstafeln beschrieben wird, über 10 Jahre flächig entnommen. Für die Ertragstafelfunktionen in Brandenburg, die kein definiertes Maximalalter aufweisen, wurden in Absprache mit dem Projektpartner Umtriebszeiten festgelegt. Ertragstafeln enthalten zudem üblicherweise nicht die Jungbestandsphase und diese trägt in der Regel auch nicht zum Erntevolumen bei, sodass sie unberücksichtigt bleibt.

Ertragstafelwerke geben mittlere Bestandeskenngößen über die Bestandeslebensdauer an. Damit sind Vorrat, laufender und durchschnittlicher Zuwachs, Gesamtwuchsleistung, Stammzahl, Grundfläche, Brusthöhdurchmesser (Bhd) und Baumhöhen (H) des Grundflächenmittelstamms über das Alter definiert. Je nach Ertragstafelwerk sind zudem die ausscheidenden Bestände unterschiedlich detailliert angegeben. Für die vorliegende Fragestellung wird der ausscheidende Vorrat, differenziert nach Stammzahl, mittlerem Bhd und Höhe, sowie - falls vorhanden oder ableitbar - die Formigkeit (Schaffform: vollholzig bis abholzig) der Bestände benötigt. Der ausscheidende Vorrat selbst kann - sofern fehlend - berechnet werden aus der Summe des laufenden Zuwachses über das betrachtete Zeitintervall, abzüglich des Vorratsanstiegs im verbleibenden Bestand. Die Stammzahl des ausscheidenden Bestands (N_{aus}) wird aus der Differenz der verbleibenden Stammzahl über die Umtriebszeit berechnet. Der mittlere Durchmesser und die mittlere Höhe wird aus dem ausscheiden-

den Volumen und den entnommenen Stämmen durch eine Optimierung mithilfe des Sorten- und Volumenprogramms BDAT (Kublin 2003, Vonderach et al., 2023) abgeleitet. Dabei ist das Einzelstammvolumen abhängig von Bhd, Höhe und einem oberen Durchmesser als Formigkeitsindikator. Da in diesem Parameterraum unterschiedliche Kombinationen zum gleichen Vorratsvolumen führen können, wird das h/d-Verhältnis des verbleibenden Bestands sowie initial auch die bestimmte Formigkeit für den ausscheidenden Bestand genutzt. Durch dieses Vorgehen muss nur der Bhd als freier Parameter bestimmt werden, sodass mit der Optimierung für das gegebene Triplet an Einzelbaumvolumen, h/d-Verhältnis und Formigkeit der dazugehörige Bhd_{aus} berechnet werden kann. Dieser kann dann wieder in eine Baumhöhe (H_{aus}) und einen oberen Durchmesser ($D03_{aus}$) übersetzt werden. In einem zweiten Schritt werden diese Größen (N_{aus} , Bhd_{aus} , H_{aus} , $D03_{aus}$) genutzt, um (1) den ausscheidenden Vorrat (Vfm m.R.) in Sortimente (Efm o.R.) zu übersetzen und (2) die dazugehörige oberirdische Biomasse (AGB = above-ground Biomass) (Vonderach et al., 2018) und die enthaltenen Elementmengen (Rumpf et al., 2018) zu bestimmen. Im letzten Schritt werden über verschiedene Holzernteszenarien die konkret entnommenen Biomasse- und Elementmengen berechnet. Dabei werden nach Holzernteszenarien differenziert Sortiervorgaben, Entrindung, Ernteverluste, Kronennutzungsgrade, Rückegassenarmierung und Verlustraten auf der Rückegasse berücksichtigt (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Die in dieser Studie differenzierten Holzernteszenarien und die hinterlegte Parametrisierung der Nutzung von Rinde und Krone sowie der Verlustgrößen. Min = Minimal-Szenario, DhmR = Derbholz mit Rinde; MMHE= motormanuelle Holzernte; REAL = mittleres, realitätsnahes Szenario; VMHE: vollmechanisierte Holzernte, MAX = intensivstes Nutzungsszenario

Sortimente/Kompartimente	MIN	DhmR	MMHE	REAL	VMHE	MAX
Rindennutzung	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Rückegassenarmierung	0%	0%	50%	50%	50%	50%
Verlust Rückegasse	0%	80%	80%	80%	80%	80%
Ernteverluste Derbholz	10%	10%	0%	10%	10%	0%
Ernteverluste nicht-Derbholz	Nadelholz: 20% Laubholz: 40%					
Kronennutzung	0%	0%	20%	0%	50%	50%

Für die Abbildung konkreter Nutzungsszenarien im Kleinprivatwald wurden drei verschiedene potenziell machbare Ernteszenarien in Anlehnung an das EnNa-Projekt, entlang eines Intensitätsgradienten definiert. Diese Szenarien berücksichtigten unterschiedliche Intensitäten der Stamm- und Kronennutzung sowie die Umverteilung der Biomasse im Waldbestand, ihre Akkumulation auf Rückegassen oder ihr Entzug entsprechend der Nutzungstechnik (Tabelle 16). Daneben wurden in Anlehnung an die übliche Praxis im Kleinprivatwald und im Austausch mit verschiedenen Fachleuten zusätzlich intermediäre Nutzungsintensitäten definiert, aber aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht im Detail dargestellt. Eine vergleichende Einschätzung wurde angefertigt, siehe dazu Abbildung 33. Der schwer zu quantifizierende Einfluss des Klimawandels wurde bei der Berechnung des Nährstoffexports der verschiedenen Baumarten nicht berücksichtigt.

Die sechs definierten Holzernteszenarien bilden nahezu die gesamte Bandbreite möglicher Nutzungsintensitäten ab. Ausgehend von einem Minimal - Szenario (MIN), gekennzeichnet durch großzügige Zöpfe (Zopf 12-14cm) und Entrindung, steigt die Nutzungsintensität mit den Szenarien Derbholz mit Rinde (DhmR), motormanuelle Holzernte (MMHE), einem mittleren, realitätsnahen Szenario (REAL) und dem Szenario für eine vollmechanisierte Holzernte (VMHE) kontinuierlich an. Dabei intensiviert sich die Nutzung auf das gesamte Derbholz inklusive Rinde, je nach Szenario aber auch auf Teile der Krone, die entweder als Rückegassenarmierung (REAL), als Energieholz entnommen (MMHE) oder für beide Zwecke eingesetzt werden (VMHE). Beim intensivsten Nutzungsszenario (MAX) wird jegliches Derbholz mit Rinde ohne Ernteverluste entnommen. Zudem werden große Teile der Krone für die Rückegassenarmierung und die energetische Nutzung eingesetzt, so dass nur Ernteverluste im Nichtderbholz auf der Fläche verbleiben.

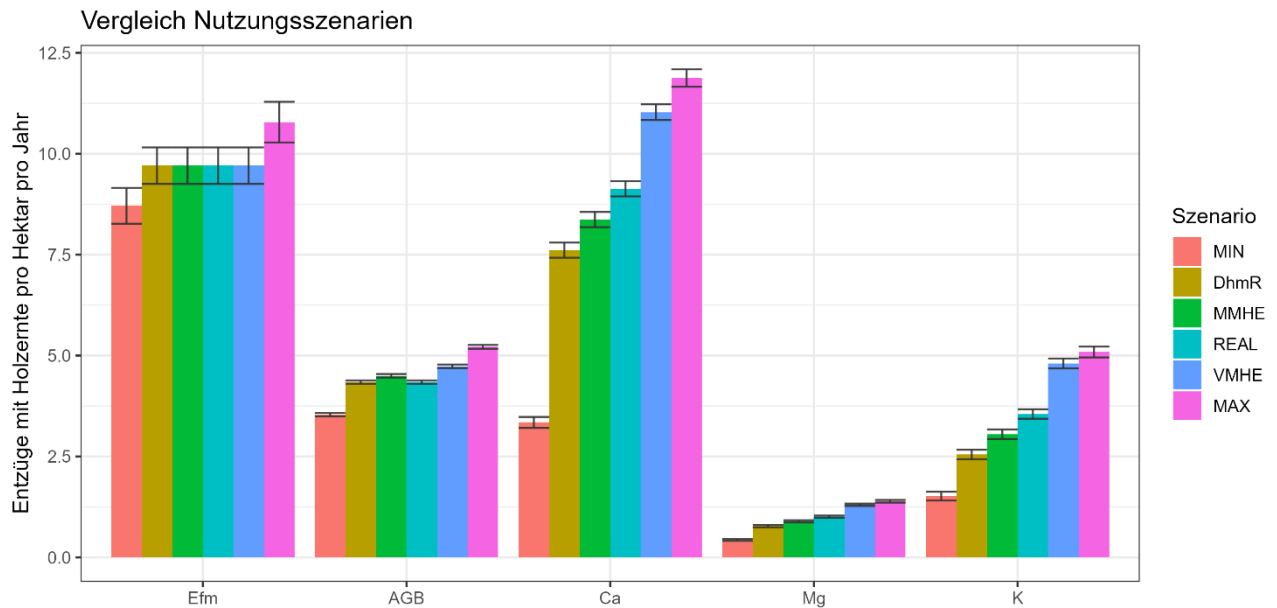


Abbildung 33: Beispielhafter Vergleich verschiedener Holzermteszenarien hinsichtlich mittlerem Rundholzertrag [Efm ha⁻¹ a⁻¹], Biomasse [AGB; t ha⁻¹ a⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha⁻¹ a⁻¹] für einen fiktiven Standort bei gleicher Baumart (hier: Fichte) und Bonität (hier: dGz₁₀₀ = 15) auf Basis der baden-württembergischen Hilfstabellen für die Forsteinrichtung (MLR 1993). Efm=Erntefestmaß; AGB=Above-ground Biomass / oberirdische Biomasse.

Während für die unterschiedlichen Szenarien praktisch die gleiche Menge an Rundholz anfällt (vgl. Abbildung 33, links: Efm) steigt die entzogene Biomasse leicht von MIN nach MAX aufgrund der zusätzlich genutzten Baumteile (Derbholz mit Zopf 12-7cm, Kronenteile, Ernteverluste) an. Übersetzt in Nährstoffentzüge zeigt sich ein deutlich überproportionaler Anstieg der Entnahmen, sodass bei gleicher standörtlicher Produktivität erheblicher Spielraum für eine Extensivierung durch die Wahl der genutzten Sortimente gegeben ist.

Die Unterschiede zwischen den Baumarten zu quantifizieren, erfordert einen standörtlichen Vergleich. Denn, ob eine hohe Bonität einer Baumart mehr oder weniger Nährstoffe entzieht als eine vergleichbare Bonität einer anderen Baumart, ist irrelevant, solange diese beiden Baumarten mit den definierten Bonitäten nicht am gleichen Standort auftreten. Die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Baumarten in Abhängigkeit der dGz₁₀₀-Bonität (durchschnittlicher Gesamtzuwachs im Alter 100) werden in Abbildung 34 dargestellt – direkt darauf verweisend, dass an einem konkreten Standort in der Regel nicht die gleiche Bonität für unterschiedliche Baumarten auftritt. Es zeigt sich, dass Laubhölzer (hier: Buche und Eiche) einen deutlich höheren Nährstoffbedarf aufweisen als Nadelhölzer (hier: Fichte, Kiefer und Douglasie).

Vergleich Baumarten

Szenario REAL

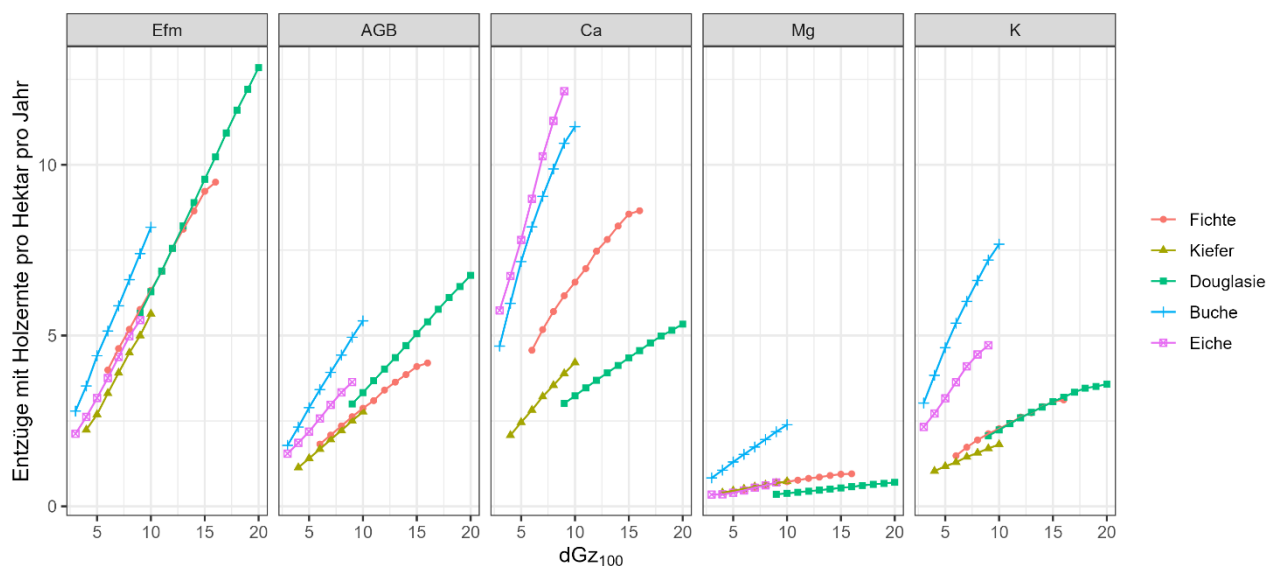


Abbildung 34: Vergleich der Holzermteentzüge verschiedener Baumarten nach dGz_{100} -Bonitäten für die Ertragstafeln aus Baden-Württemberg und das Szenario REAL. Einheiten: Erntefestmaß [Efm $ha^{-1} a^{-1}$], Biomasse [AGB; $t ha^{-1} a^{-1}$] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; $kg ha^{-1} a^{-1}$].

Sollen unterschiedliche Baumarten an einem konkreten Standort verglichen werden, so muss dort die Bonität sowie die maximale Basensättigung und die Stickstoffdeposition als Prädiktoren der Elementgehaltsfunktionen bekannt sein. Für einen zufällig gewählten Standort im nördlichen Baden-Württemberg findet sich zum Beispiel eine Oberhöhenbonität H_{100} von 32 m für Buche und von 38 m für Fichte aus Bonitätskarten für Baden-Württemberg auf Basis von Yue et al. (2016). Dies lässt sich in dGz_{100} -Bonitäten übersetzen und entspricht für Buche einem Wert von dGz_{100} 8 und für Fichte einem Wert von dGz_{100} 15. Die sich für diesen konkreten Standort ergebenden Nährstoffentzüge sind in Tabelle 17 gelistet und korrespondieren mit den jeweiligen Werten in Abbildung 34. Obwohl die Fichte in diesem Beispiel eine deutlich höhere Volumenleistung zeigt, liegen die Nährstoffentzüge noch unter den Werten für die Buche.

Tabelle 17: Vergleich der Biomasse- und Nährstoffentzüge für Fichte und Buche auf einem zufällig gewählten Standort im nördlichen Baden-Württemberg mit den dort zu erwartenden, modellierten Bonitäten für die Baumarten Fichte und Buche für das Szenario REAL auf Basis der für Baden-Württemberg genutzten Ertragstafeln.

Baumart	Bonität dGz_{100} [$m^3 ha^{-1} a^{-1}$]	Biomasse- und Nährstoffentzüge für Szenario REAL				
		Efm [$m^3 ha^{-1} a^{-1}$]	AGB [$t ha^{-1} a^{-1}$]	Ca [$kg ha^{-1} a^{-1}$]	Mg [$kg ha^{-1} a^{-1}$]	K [$kg ha^{-1} a^{-1}$]
Fichte	15	9,2	4,1	8,6	0,9	3,1
Buche	8	6,6	4,4	9,9	2,0	6,6

Ein weiterer interessanter Aspekt sind etwaige Unterschiede zwischen den Ertragstafeln (vgl. BSMELF, 2018; MLR, 1993; Albert et al., 2021 und LFB, 2016). Auch wenn diese im Regelfall nicht überregional angewendet werden, beinhalten sie doch unterschiedliche Behandlungsroutinen, die Auswirkungen auf die Nährstoffentzüge haben können. Auch hier ist es wichtig, eine vergleichbare Datenbasis zu nutzen. Für eine exemplarische Darstellung wird die Baumart Fichte gewählt und die im Projekt genutzten Ertragstafeln für eine vergleichbare Fichten-Standortleistung ausgewertet. Für Fichte mit dGz_{100} 11 und einer Umtriebszeit von 120 Jahren unter einem Szenario REAL wird der Zusammenhang zwischen Ertragstafelwerk und Nährstoffentzügen für Ca, Mg und K in Abbildung 35 dargestellt. Mit Ausnahme der Hochgebirgsertragstafel von Guttenberg (1915), zeigen die anderen Ertragstafeln nur geringe Unterschiede sowohl hinsichtlich mittlerem Rundholz-Ertrag (Efm), Entzug an Biomasse (AGB) oder Nährelementen (Ca, Mg, K). Die zweifach gelistete Ertragstafel von Wiedemann

1936/42 für Bayern und Baden-Württemberg liegt in der unterschiedlichen Bonitierung begründet. Während die bayerische Tafel relative Bonitäten angibt, die nach Ertragsklassen (I. – V.) differenziert, ist die baden-württembergische Tafel in absolute Bonitäten, sog. dGz₁₀₀-Stufen, aufgeteilt. Beide Tafeln liefern marginal unterschiedliche Ergebnisse, da die bayerische Variante keine Ertragsklasse aufweist, die exakt einer dGz₁₀₀-Stufe von 11 m³ ha⁻¹ a⁻¹ entspricht. Die gegebenen Werte entstammen einer linearen Interpolation zwischen der nächststärkeren und der nächstschwächeren Wuchsklasse. Die neue Ertragstafel von Albert et al. (2021) zeigt in diesem Vergleich leicht höhere Werte für die betrachteten Entzugsgrößen. Bei Calcium beläuft sich das Plus auf ca. 10% im Vergleich zur Tafel von Gehrhardt (1921) mit den geringsten Entzügen.

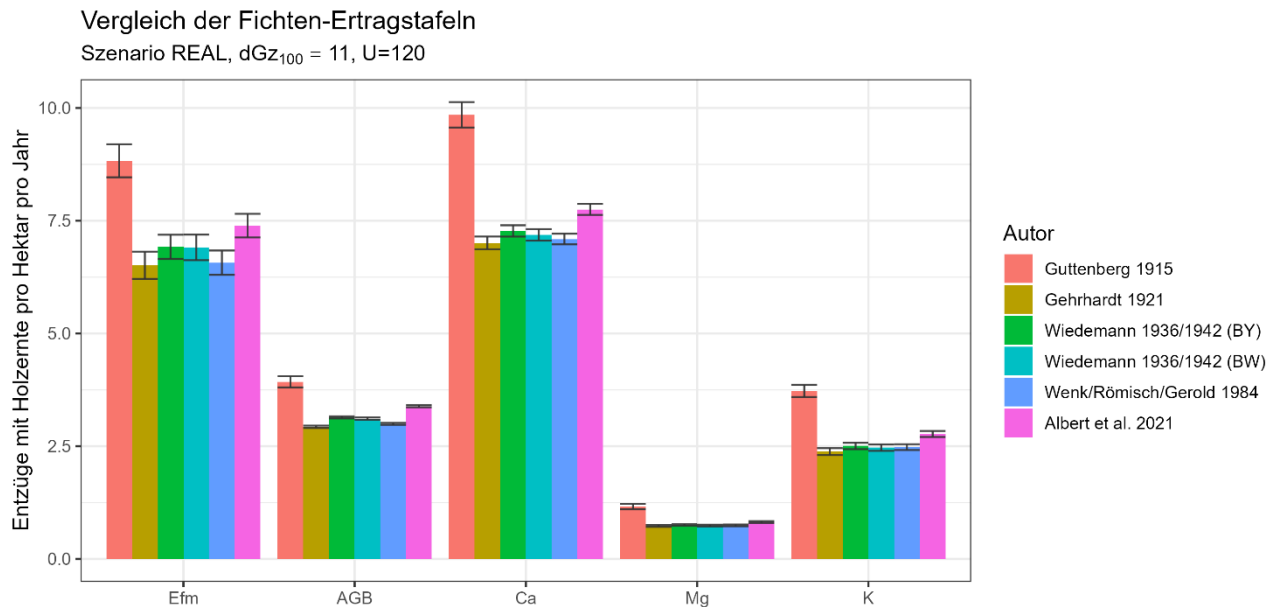


Abbildung 35: Vergleich der Biomasse- und Nährstoffentzüge mit der Holzernte für verschiedene Ertragstafelwerke für Fichte bei gleicher Wuchsleistung (hier: dGz₁₀₀ 11) unter dem Szenario REAL für eine Umtriebszeit von 120 Jahren. Mittlerer Rundholzertrag [Efm ha⁻¹ a⁻¹], Biomasse [AGB; t ha⁻¹ a⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha⁻¹ a⁻¹]

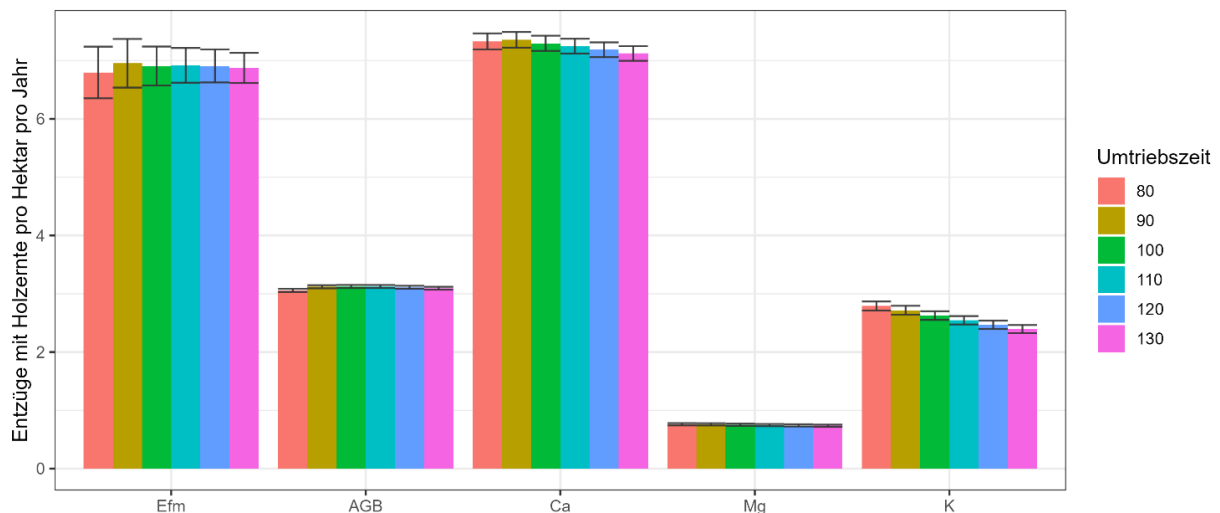
Eine wesentliche Steuergröße der Waldbewirtschaftung ist neben der Intensität der Nutzung und der Baumartenwahl, die Länge der Umtriebszeit. Perspektivisch wird zur Verringerung von Risiken aufgrund des Klimawandels und der damit einhergehenden Intensivierung von Schadereignissen darauf abgezielt, Umtriebszeiten zu reduzieren und Bäume früher zu nutzen. Der Effekt unterschiedlicher Umtriebszeiten auf die Nährstoffentzüge mit der Holzernte wird hier exemplarisch für Fichte mit dGz₁₀₀ 11 und Buche mit dGz₁₀₀ 10 anhand der für Baden-Württemberg eingesetzten Ertragstafel gezeigt (Abbildung 36).

Es zeigt sich für diese beiden Baumarten auf Basis der für die Beispielgebiete in Baden-Württemberg eingesetzten Ertragstafeln (vgl. MLR 1993) ein gegenläufiges Muster. Für Fichte mit dGz₁₀₀ 11 wurden verschiedene lange Umtriebszeiten im Bereich von 80 bis 130 Jahre und bei Buche von 80 bis 150 Jahre betrachtet. Für Fichte zeigt sich mit zunehmender Umtriebszeit keine markante Änderung im mittleren Rundholzaufkommen oder der im Mittel entzogenen Biomasse, durch die sich ändernde mittlere Allometrie der Bäume aber eine leichte Reduktion der Nährstoffentzüge. Diese ist für K deutlicher als für Ca und insbesondere für Mg. Bei der Buche mit dGz₁₀₀ 10 zeigt sich hingegen ein entgegengesetzter Trend: Eine Verlängerung der Umtriebszeit im gezeigten Bereich erhöht sowohl den mittleren Rundholzertrag als auch die entzogene Biomasse stetig für jede Verlängerung um 10 Jahre. Bei den Nährstoffen zeigt sich ein ähnliches Bild für K, welches ebenfalls kontinuierlich ansteigt. Für Ca wird allerdings ab einer Umtriebszeit von ca. 120 Jahren ein Plateau erreicht und ab diesem Alter sinken die mittleren Mg-Entzüge. Ein generelles Bild über alle Baumarten und Bonitäten kann nicht aufgezeigt werden, da unterschiedliche Ertragstafeln auch für gleiche Baumarten unterschiedlich reagieren. Wesentlicher Treiber ist aber die in der entsprechenden Ertragstafel hinterlegte zeitliche Entwicklung des laufenden und durchschnittlichen Zuwachses sowie dessen Kulmination und die Einordnung der betrachteten Umtriebszeit. Im Beispiel ist das Maximum des durchschnittlichen Gesamtwachses bei Fichte im

Alter 80, bei der Buche im Alter 150 erreicht – allerdings endet die Tafel an dieser Stelle. Folglich sinken die Entzüge mit einer längeren Umtriebszeit nur, wenn auch der durchschnittliche Zuwachs sinkt. Dies ist im Beispiel bei Fichte deutlich sichtbar. Bei Buche wird der Punkt der mittleren Zuwachsumkehr erst im Alter 150 erreicht, allerdings ist bei Ca und insbesondere bei Mg schon eine leichte Trendumkehr erkennbar.

Vergleich der Umtriebszeit für Fichte

Szenario REAL, $dGz_{100} = 11$, ET: Wiedemann 1936/42 (BW)



Vergleich der Umtriebszeit für Buche

Szenario REAL, $dGz_{100} = 10$, ET: Schober 1967 (BW)

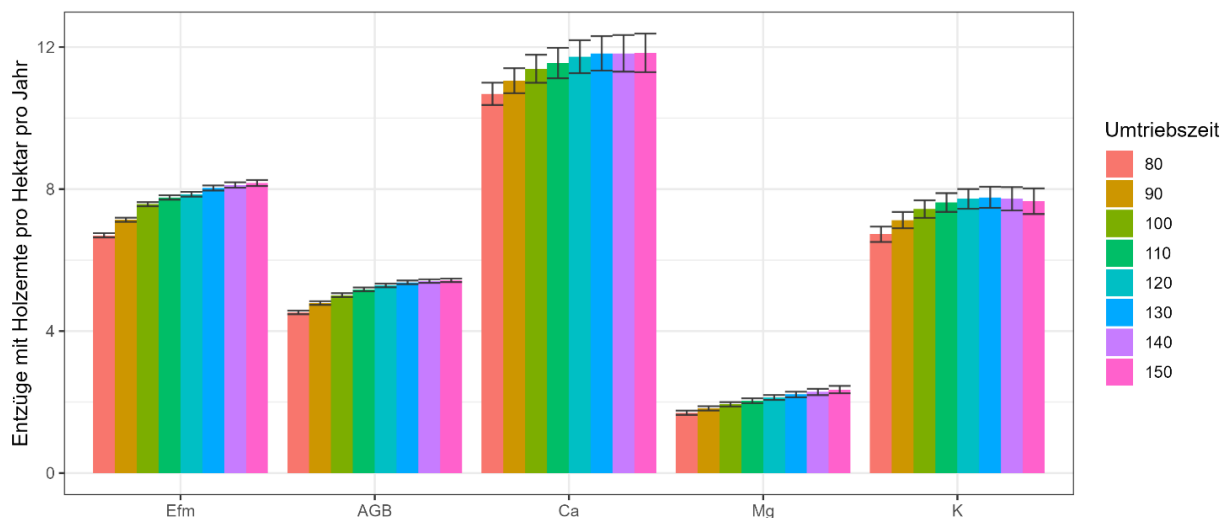


Abbildung 36: Effekt der Umtriebszeit auf die Biomasse- und Nährstoffentzüge mit der Holzernte für Fichte (oben) und Buche (unten) für das Szenario REAL, basierend auf den für Baden-Württemberg eingesetzten Ertragstafeln. Mittlerer Rundholzertrag [Efm ha⁻¹ a⁻¹], Biomasse [AGB; t ha⁻¹ a⁻¹] sowie Nährstoffentzüge [Mg, Ca, K; kg ha⁻¹ a⁻¹]

Im Ergebnis wurden die Nährstoffentzüge für die einzelnen Bundesländer für jeweils fünf Baumarten mit jeweils drei Bonitäten und jeweils drei Holzernteszenarien berechnet. Dabei wurden als Zielgrößen die mittleren Nährstoffentzüge für Calcium, Magnesium und Kalium bestimmt, ergänzend wurde der mittlere Rundholzertrag und die mittlere entzogene Biomasse berechnet (vgl. Tabelle 18:). Es hat sich gezeigt, dass es deutliche Unterschiede zwischen Laub- und Nadelholzbaumarten gibt, aber auch die Bonität eine wesentliche Rolle für die Höhe der Nährstoffentzüge spielt. Nicht gezeigt wurden hier der Einfluss der pedogenen Ausstattung (Basensättigung) und der atmosphärischen Stickstoffdeposition auf die Höhe der in den Baumkompartimenten gespeicherten Elementmengen. Geringen Einfluss scheint die Wahl der Ertragstafel zu haben, allerdings muss für eine Gegenüberstellung auf eine Vergleichbarkeit der Gesamtwachstumleistung geachtet werden. Die Um-

triebszeit kann eine Rolle für die Höhe der mittleren Nährstoffentzüge spielen, sofern eine Änderung der Umtriebszeit eine Änderung des durchschnittlichen Gesamtzuwachses bedingt. Größte Steuerungsmöglichkeiten gibt es durch die Wahl der Nutzungsintensität, die durch sechs unterschiedliche Szenarien – von sehr extensiv bis sehr intensiv – dargestellt wurde. Drei diese Bandbreite abdeckende Szenarien werden im Folgenden für die Ableitung der Gesamtbilanzen eingesetzt.

Tabelle 18: Übersicht über die berechneten Nährstoffentzugsvarianten.

Bundesland	Baumarten	Bonitäten	Szenarien	Anzahl Nährstoffentzugsvarianten	Zielgrößen
Brandenburg	Fi, Kie, Dgl, Bu, Ei	gut, mittel, schlecht	MIN, REAL, MAX	45	Ca, Mg, K, AGB, Efm
Baden-Württemberg	Fi, Kie, Dgl, Bu, Ei	gut, mittel, schlecht	MIN, REAL, MAX	45	Ca, Mg, K, AGB, Efm
Bayern	Fi, Kie, Dgl, Bu, Ei	gut, mittel, schlecht	MIN, REAL, MAX	45	Ca, Mg, K, AGB, Efm
Niedersachsen	Fi, Kie, Dgl, Bu, Ei	gut, mittel, schlecht	MIN, REAL, MAX	45	Ca, Mg, K, AGB, Efm

Unsicherheiten

Ein Faktor, der bei der Nährstoffbilanzierung häufig außer Acht gelassen wird, sind die großen Unsicherheiten, die sich aus den intrinsischen Modellfehlern der einzelnen Bilanzglieder (Deposition, Verwitterung, Sickerwasseraustrag, Nutzungsentzüge) ergeben. Diese Unsicherheiten werden zusätzlich bei der Berechnung von Nährstoffbilanzen für die Einheiten der Standortkartierung durch die Güte der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten vergrößert. Yanai et al. (2010) fordern Bilanzierungen des Nährstoffhaushaltes standardmäßig mit Unsicherheitsanalysen zu ergänzen und so die Signifikanz der beschriebenen Ergebnisse mit abzubilden. Insgesamt rückt nicht zuletzt wegen des Klimawandels die Einbeziehung von Unsicherheiten immer stärker in den Fokus der Entwicklung forstlicher Managementstrategien (Daniel et al. 2017). Entsprechend sollen die Ergebnisse in dem beschriebenen Modellansatz durch Unsicherheitsbereiche ergänzt werden. Neben dem wissenschaftlichen Aspekt dient dies auch dazu das Vertrauen in die Aussagen und das gesamte Verfahren zu stärken.

Eine Methode, die bei forstwissenschaftlichen Fragenstellungen häufig Verwendung findet (Ahrends et al., 2022; De-Miguel et al., 2014; Barkman et al., 1995), ist das Monte-Carlo-Verfahren. Es hat keine strengen Anforderungen an die exakte Formulierung der Fehler-Funktion und ist daher sehr einfach zu implementieren und allgemeingültig anwendbar (Li und Wu 2006). Da in diesem Projekt die flächenhafte Nährstoffbilanzierung für ganze Bundesländer im Vordergrund stand, wurden keine numerisch aufwendigen ($n > 10.000$, vgl. De-Miguel et al., 2014, Ahrends et al., 2022) Monte-Carlo-Simulationen für die einzelnen Kartiereinheiten der Standortkartierung durchgeführt. Stattdessen wurde eine analytische Fehlerfortpflanzung implementiert. Die eingesetzten Regressionsmodelle liefern dabei einen Erwartungswert, der um den wahren Wert schwankt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und in die Auswertung der Bilanz einzubeziehen, wurden aus den Modellen die Unsicherheit des Schätzwertes abgeleitet und über die Regeln der Fehlerfortpflanzung bis zur Zielgröße weiter propagiert. Hierbei greift der zentrale Grenzwertsatz und es kann davon ausgegangen werden, dass die Fehler um den Erwartungswert einer Normalverteilung entstammen und damit symmetrische Konfidenzbänder aufweisen.

Die Zielgrößen nutzungsfreie Stoffbilanz (nfSB) und Gesamtbilanz (GB) verknüpfen die Bilanzterme Deposition (DEP), Verwitterung (WEA), Sickerwasseraustrag (LEA) und die Holzernte (HAR) sowie die Puffergröße pflanzenverfügbarer Bodenvorrat (S) additiv bzw. subtraktiv und bilden damit summarische Größen. Unter der Berücksichtigung der Kovarianzen der Fehler der einzelnen Bilanzterme lassen sich die Varianzen der Zielgrößen folgendermaßen zusammenfassen:

$$\begin{aligned} \text{VAR} (nfSB) &= \text{VAR} (DEP - LEA + V + 0,001 * S) && \text{(Gleichung 4)} \\ &= \text{VAR} (DEP) + \text{VAR} (LEA) + \text{VAR} (WEA) + 0,001^2 * \text{VAR} (S) - 2 * \text{COV} (DEP, LEA) + 2 * \text{COV} \\ &\quad (DEP, WEA) + 0,002 * \text{COV} (DEP, S) - 2 * \text{COV} (LEA, WEA) - 0,002 * \text{COV} (LEA, S) + 0,002 \\ &\quad * \text{COV} (WEA, S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VAR} (GB) &= \text{VAR} (nfSB - HAR) && \text{(Gleichung 5)} \\ &= \text{VAR} (nfSB) + \text{VAR} (HAR) - 2 * \text{COV} (nfSB, HAR) \end{aligned}$$

Die einzelnen Bilanzterme stammen von sehr unterschiedlichen Modelltypen. Diese reichten von simplen linearen Regressionsmodellen, nichtlinearen parametrischen Funktionen bis zu komplexen semiparametrischen generalisierten additiven Modellen (GAM). Aus den Biomasse- und Elementgehaltsfunktionen lassen sich die mittleren quadratischen Fehler für jeden vorhergesagten Punkt analytisch ableiten. Die Bilanzglieder der nutzungsfreien Stoffbilanz wurden mit GAM-Modellen berechnet und beinhalten unterschiedliche Annahmen zur statistischen Verteilungsfamilie der Fehlerverteilung und Transformationen (z.B. log). Um dennoch einheitlich Fehlerterme ableiten zu können, wurden – im Gegensatz zur Vorgehensweise bei den Nährstoffentzügen – mit relativen Fehlern der Parametrisierungsdaten gerechnet (rRMSE, rMSE). Diese Gesamtfehler wurden anschließend an die Erwartungswerte skaliert. Da dies im engeren Sinne nur Modellierungsfehler sind, wurden für Bilanzgrößen wie die Verwitterungsraten zusätzlich methodische Fehlerwerte aus der Literatur herangezogen (s. Tabelle 38). Wie die GAM-Modelle sind auch die entsprechenden Fehler elementspezifisch, und – wo relevant – auch baumartenspezifisch. Für die Fehlerfortpflanzung wurden für alle Bilanzterme die geschätzten Fehler als MSE ausgedrückt und als geschätzte Varianz *VAR* in die Gleichungen der Fehlerfortpflanzung eingesetzt (vgl. Gleichung 4 und 5). Um die Komplexität der Berechnung möglichst gering zu halten, wurden nur die Fehler auf Bilanzterm-Ebene berücksichtigt, und nicht die Fehler aller einzelnen Eingangsparameter, die teilweise auf Messungen, aber auch auf Expertenwissen (Standortkartierung und abgeleitete Bodenprofile), Literaturangaben und Modellierungen basieren (s. Tabelle 38). Bei den Nährstoffentzügen, die mit der Ertragstafelgrundlage auf exemplarischen Waldentwicklungen beruhen, wurden Vorgaben, wie z.B. die genutzte Stammzahl, der ausscheidende Vorrat oder die Dimensionen der Bäume ebenfalls nicht in die Fehlerfortpflanzung integriert.

Die Korrelationen zwischen den Bilanztermen wurden aus den Fehlern der einzelnen Modelle extrahiert und für die konkreten Vorhersagen mit den entsprechenden Varianzen zur Kovarianz *COV* skaliert. Für die Berechnung der Gesamtnährstoffbilanzen unter Berücksichtigung spezifischer Managementoptionen, z.B. verschiedener Ernteszenarien, ist es notwendig, dass die einzelnen Bilanzglieder unabhängig von den Nährstoffentzügen ermittelt werden (De Vries et al., 2021). Entsprechend wurden die Kovarianzen zwischen der nutzungsfreien Stoffbilanz und den Entzügen mit der Holzernte auf null gesetzt. Die global, d.h. für alle Beispielgebiete gleichermaßen, genutzten Korrelationen zwischen den Bilanztermen Deposition, Verwitterung, Sickerwasserverluste und pflanzenverfügbaren Bodenvorrat sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Je nach Wechselwirkung zwischen den Bilanzgliedern, d.h. je nach Vorzeichen der geschätzten Korrelation, erhöhen oder reduzieren sich die Fehler für die Zielgrößen.

Tabelle 19: Global genutzte Korrelationen zwischen den Bilanztermen Deposition (DEP), Sickerwasserverlust (LEA), Verwitterung (WEA) und pflanzenverfügbarem Bodenvorrat (S) für die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium.

Bilanzterme	Nährelemente											
	Ca				Mg				K			
	D	S	V	S	D	S	V	S	D	S	V	S
DEP	1,00	0,10	-0,09	-0,16	1,00	0,00	-0,16	0,36	1,00	0,27	-0,18	-0,28
LEA	0,10	1,00	0,43	0,53	0,00	1,00	0,48	0,52	0,27	1,00	0,12	-0,08
WEA	-0,09	0,43	1,00	0,51	-0,16	0,48	1,00	0,65	-0,18	0,12	1,00	0,67
S	-0,16	0,53	0,51	1,00	0,36	0,52	0,65	1,00	-0,28	-0,08	0,67	1,00

Die Terme Sickerwasserausträge und Nährstoffentzüge mit der Holzernte ergeben sich nicht aus einer summarischen Betrachtung, sondern sind das Produkt verschiedener Eingangsgrößen. Die jeweiligen Faktoren, z.B. Elementkonzentrationen in der Biomasse oder im Sickerwasser, sind jedoch in der Regel ebenfalls durch Schätzfunktionen oder Modelle abgeleitet worden. Beispielsweise berechnet sich die mit der Holzernte entzogene Elementmenge (HAR) aus dem Produkt der Biomasse (BM) und den Nährelementgehalten (EG) der entsprechenden Kompartimente. Folglich können die Erwartungswerte aus dem Produkt der Einzelterme, skaliert mit Nutzungsanteilen und Stammzahl, berechnet werden. Die Varianzen wiederum werden berechnet mit:

$$\begin{aligned} \text{VAR} (HAR) &= \text{VAR} (BM * EG) && \text{(Gleichung 6)} \\ &= E (BM)^2 * \text{VAR} (EG) + E (EG)^2 * \text{VAR} (BM) + \text{VAR} (BM) * \text{VAR} (EG) \end{aligned}$$

Entsprechend wurde für die Sickerwasserverluste vorgegangen. Hier wurden die Anionenausträge von NO_3^- und SO_4^{2-} mit den jeweiligen Kationenanteilen der basischen Kationen Ca^{2+} , K^+ , und Mg^{2+} multipliziert, um die Austräge der basischen Kationen zu quantifizieren.

Beispielhaft sind in Abbildung 37 die Ergebnisse der einzelnen Bilanzterme sowohl als Erwartungswert als auch dessen modellierte Streuung für einen zufällig gewählten, konkreten Ort dargestellt. Von den einzelnen Bilanztermen zeigen die Verwitterung und die Sickerwasserverluste die größten Streuungen (vgl. Sverdrup et al., 2006, Kolka et al., 1996). Die atmosphärischen Stoffeinträge und die Nährstoffentzüge mit der Holzernte haben deutlich engere Konfidenzbänder. Der berücksichtigte Anteil des Bodenvorrats in Höhe von 0,1% zeigt kaum Streuung auf diesem Standort, was durch den quadratisch eingehenden Skalierungsfaktor begründet werden kann (vgl. Gleichung 4). Die im Vergleich hohen Unsicherheiten finden sich auch in der nutzungsfreien Stoffbilanz und in der Gesamtbilanz wieder. Neben den Unsicherheitsbereichen werden in Abbildung 37 zusätzlich zum Median auch die 2,5% und 97,5%-Quantile (horizontale Linien) dargestellt, um festzustellen, ob die abgeleitete Verteilung auf dem 5%-Unsicherheitsniveau signifikant positiv oder negativ ist. Die Größen „Sickerung“ und „Ernteentzüge“ weisen aufgrund ihres Austragscharakters ein negatives Vorzeichen auf. Während die nutzungsfreie Stoffbilanz (nfSB) noch als signifikant positiv bewertet werden kann, zeigt die Gesamtbilanz zwar einen positiven Erwartungswert, allerdings auf dem 95%-Niveau keine statistisch gesichert positive Bilanz.

Bilanzterme, nutzungsfreie Stoffbilanz und Gesamtbilanz

GISId = 42104531718 (BW), Szenario: REAL

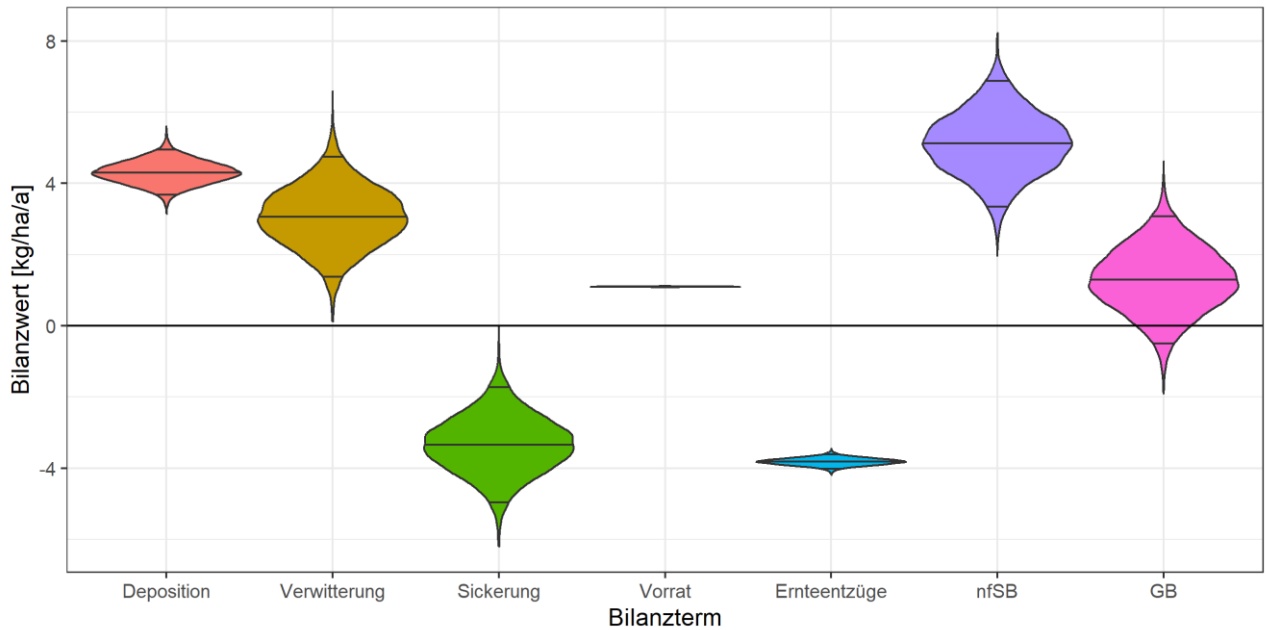


Abbildung 37: Darstellung der Bilanzterme inklusive Unsicherheiten für Ca eines zufällig gewählten Ortes in der Testgebietskulisse Baden-Württembergs. Die einzelnen Größen werden mit ihrem Erwartungswert (mittige horizontale Linien) und ihrer modellierten Unsicherheit (95%-Niveau, 2,5%- und 97,5%-Perzentile als kurze Linien am oberen und unteren Ende der dargestellten Verteilungen) in Form einer Verteilung dargestellt.

Aus den Erwartungswerten lässt sich folglich eine Bewertung ableiten, die für jeden Ort die maximal mögliche Nutzungsintensität angibt (Details dazu im Kapitel Gesamtbilanz und Bewertung). Im Beispiel aus Abbildung 37 führt die mittlere Intensität (Szenario REAL) nicht zu einer negativen Gesamtbilanz, während das intensive Szenario MAX zu einer leicht negativen Gesamtbilanz führt (Erwartungswert $GB_{MAX, 50\%} = -0.53$, nicht dargestellt). Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten bei dieser Bewertung, wird – wie oben erwähnt – aus der abgeleiteten Verteilung der Gesamtbilanz das 2,5%-Perzentil berechnet und gegen den Grenzwert Null geprüft: Ist der Wert größer als Null und damit positiv, liegt eine signifikant positive Bilanz vor. Konsequenterweise lässt sich prüfen, ob die gewählte Intensität (MIN, REAL, MAX) zu einer signifikant positiven Gesamtbilanz führt oder nicht. Im gewählten Beispiel zeigt sich keine signifikant positive Gesamtbilanz für das Szenario MAX (vgl. Abbildung 37). Das Szenario MIN führt dagegen zu einer signifikant positiven Gesamtbilanz (2,5%-Perzentil $GB_{MIN} = 2.07$). Es ist dabei möglich das Signifikanz-Niveau der Fragestellung anzupassen und zum Beispiel je nach Risikobereitschaft unterschiedlich strenge Perzentil-Werte zu definieren.

Gesamtbilanz und Bewertung

Die Gesamtbilanz setzt sich aus der nutzungsfreien Stoffbilanz (Kapitel Nutzungsfreie Stoffbilanz) und den Nährstoffentzügen mit der Holzernte (Kapitel Nährstoffentzüge) zusammen und bildet mit der Zielgröße Gesamtbilanz (GB) und den Termen Deposition (DEP), Verwitterung (WEA), Sickerwasseraustrag (LEA), Ernteverlust (HAR) in $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und pflanzenverfügbare Nährstoffvorräte im Boden (S) folgende Gleichung:

$$GB = DEP + WEA - LEA - HAR + 0,1\% S \quad (\text{Gleichung 7})$$

Wie in Kapitel Unsicherheiten beschrieben, werden dabei sowohl die Erwartungswerte als auch die geschätzten Unsicherheiten verrechnet. Folglich kann jede betrachtete Fläche nach der mittleren zu erwartenden Situation evaluiert werden, aber es können auch strengere Kriterien („Gesamtbilanz sicher positiv“) angelegt werden. Die darauf aufbauende Evaluierung basiert auf der Zuweisung von Bewertungsklassen für die konkrete Nutzungsintensitäten (z.B. MIN/REAL/MAX) nicht zu negativen Gesamtbilanzen führen dürfen. Einen separaten Fall stellen negative nutzungsfreie Stoffbilanzen dar sowie eine extensive Nutzung, die bei minimal positiven nutzungsfreien Stoffbilanzen zu negativen Gesamtbilanzen führt (vgl. Tabelle 20). Die Berücksichtigung

der einzelnen Elemente geschieht über das Minimumprinzip, d.h. die gemeinsame Bewertung der element-spezifischen Gesamtbilanzen wird durch dasjenige Element festgelegt, welches die schlechteste Bewertung aufweist.

Im Folgenden werden für die einzelnen Bundesländer exemplarisch Ergebnisse der Gesamtbilanz für jeweils eine Baumart mittlerer Bonität dargestellt, die Diskussion erfolgt am Ende für alle Baumarten und Bonitäten. Karten für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie und die drei Bonitäten gering, mittel und hoch liegen für alle Beispielgebiete vor. Für Baden-Württemberg werden die Ergebnisse exemplarisch umfassender präsentiert. Die unterschiedlichen Nutzungsszenarien (MIN, REAL, MAX) werden in den Ergebnissen gemeinsam evaluiert (vgl. auch Teilvorhaben 4 im Anhang, Abbildung 109). Die in Kapitel Nährstoffentzüge zusätzlich vorgestellten Nutzungsszenarien (DhmR, MMHE, VMHE) können entsprechend eingewertet werden. Konkrete bestandesbezogene Berechnungen wurden nicht angefertigt, da benötigte Informationen zu großen Teilen nicht standortspezifisch vorliegen (Baumarten, Bonitäten, Baumartenanteile). Kleinprivatwaldbesitzer/-innen können aber ihre Bestände durch die erzeugten Karten einordnen. Ein Prototyp einer webbasierten Anwendung erlaubt innerhalb der Beispielgebiete Baden-Württembergs die Evaluierung einer konkreten Situation vor Ort durch Vorgabe von Bestandsdaten (vgl. z.B. Abbildung 38).

Die gezeigte Bewertung in den Karten orientiert sich bewusst an technischen Begriffen. Waldbauliche Empfehlungen müssen für jedes Bundesland mit den vor Ort geltenden Empfehlungen vereinheitlicht werden. Als grundsätzliche Empfehlung wird vorgeschlagen, sich bei einer Umsetzung an folgender Übersetzung der technischen Begriffe zu orientieren:

Tabelle 20: Vorschlag zur Übersetzung der technischen Bewertung in Handlungsempfehlungen. Die Fälle (1) $nfSB < 0$ und (2) $nfSB < MIN$ zeigen beide negative Gesamtbilanzen und folglich identische Handlungsempfehlungen. Die Trennung beruht auf der Ursache der negativen Gesamtbilanz: im ersten Fall ist schon die nutzungsfreie Stoffbilanz negativ, im zweiten Fall führt die Nutzung zu einer negativen Gesamtbilanz.

Fall	Technische Stufe	Handlungsempfehlung
(1) $nfSB < 0$	negativ ($nfSB$ negativ)	Nutzung Stammholz (großzügig zopfen; entrinden empfohlen)
(2) $nfSB < MIN$	MIN negativ	Nutzung Stammholz (großzügig zopfen; entrinden empfohlen)
(3) $nfSB > MIN$	MIN möglich	Nutzung Derbholz (keine Kronennutzung; entrinden falls möglich)
(4) $nfSB > REAL$	REAL möglich	Nutzung Derbholz+ (tw. Kronennutzung; Rückegassenarmierung)
(5) $nfSB > MAX$	MAX möglich	Nutzung Derbholz++ (inkl. Kronennutzung/Rückegassenarmierung)

Auf Kalk- und Dolomitstandorten ist die Versorgung der Waldbestände mit Ca und Mg in der Regel unproblematisch, da durch die hohe Löslichkeit des Ausgangsgesteins beide Elemente hinreichend verfügbar sind. Entsprechend wurden für Kalk- und Dolomitstandorte die Stoffbilanzen modifiziert, indem sie für Ca und Mg als immer ausgeglichen angenommen werden (Brandenburg: in Absprache mit Projektpartner nur für Ca).

Niedersachsen

Die beiden Beispielgebiete in Niedersachsen (1) Löwenhagen und (2) Soltau zeigen für die Gesamtbilanz und daraus folgend für die Gesamtbewertung unterschiedliche Muster je nach angenommener Bestockung. Ohne Berücksichtigung der Holzernteentzüge findet sich in beiden Beispielgebieten eine grundsätzlich positive nutzungsfreie Stoffbilanz, dabei sind die etwas reicheren Standorte in Löwenhagen zu finden (vgl. Testgebiet 1: Löwenhagen in Abbildung 38). Die größten Unterschiede zeigen sich zwischen Kiefer mit gringer Bonität und der Buche mit hoher Bonität. Während bei letztgenannten schon eine extensive Nutzung zu negativen Bilanzen führt, sind bei der Kiefer maximal Nutzungsintensitäten möglich. Die anderen Baumarten zeigen ein intermediäres Verhalten, wobei die Eiche näher an der Buche liegt, Fichte und Douglasie näher an der Kiefer. In Soltau werden für alle Baumarten praktisch nie Klassen hoher Nutzungsintensität ausgewiesen, mit Ausnahme von Kiefer geringer Bonität und Standorte mit tonigen Beckenabsätzen aus dem Elster-Spätglazial (Lauenburger Schichten) im Zentrum der Beispielregion. Die großflächig maximal zu empfehlende Intensität liegt hier bei

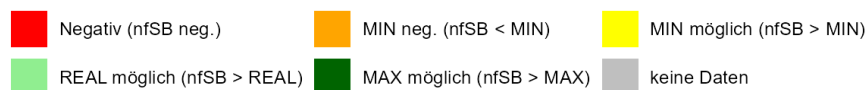
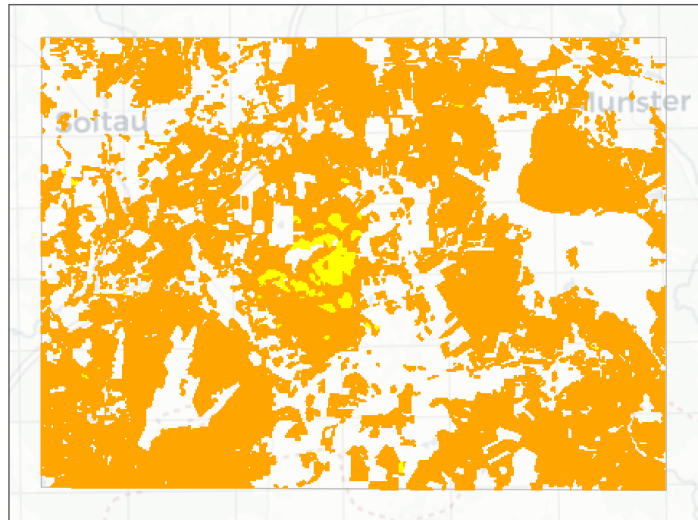
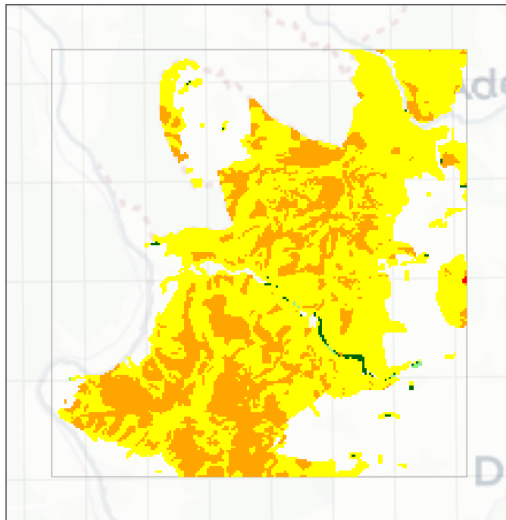
einer extensiven Nutzung (MIN-Szenario), dabei bewegen sich die Gesamtbilanzen je nach Baumart Richtung Null oder unterschreiten diese.

Testgebiete Niedersachsen

Art: Buche; Bonität: gut; Auswertung: Erwartungswert

1: Löwenhagen

2: Soltau



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

Abbildung 38: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete (1) Löwenhagen und (2) Soltau in Niedersachsen für Buche mittlerer Bonität. „Auswertung: Erwartungswert“ weist darauf hin, dass für die Klassifizierung der geschätzte Wert der Gesamtbilanz (Mittelwert der Fehlerverteilung) genutzt wurde.

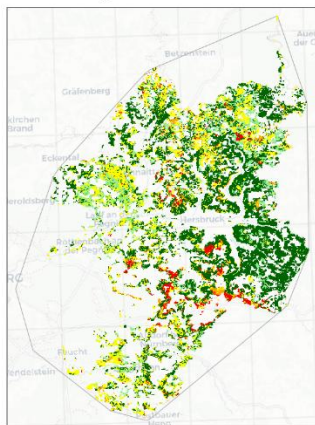
Bayern

Die drei Beispielgebiete in Bayern (1) Nürnberger Land, (2) Kronach-Rothenkirchen und (3) Cham/Roding zeigen ein heterogenes Bild möglicher Nutzungsintensitäten, wobei das Nürnberger Land tendenziell die am besten ausgestatteten Standorte aufweist. Unabhängig von Baumart und Bonität zeigen sich in allen drei Beispielgebieten praktisch durchgehend alle Intensitätsklassen, d.h. es finden sich Standorte, die aus Sicht der Nährstoffverfügbarkeit eine intensive Nutzung erlauben, aber genauso Standorte, auf denen bereits die nutzungsfreie Stoffbilanz negativ ist und eine extensive Bewirtschaftung zu empfehlen ist. Dabei zeigt das Nürnberger Land größere Anteile deutlich positiver Gesamtbilanzen als Kronach-Rothenkirchen oder Cham/Roding. In diesen beiden Gebieten zeigt Buche die größten Anteile mit Gesamtbilanzen die nahe Null liegen bzw. negativ sind. Bei Kiefer wiederum bleiben die Gesamtbilanzen auch auf großen Teilen selbst bei intensiverer Nutzung positiv. Die drei weiteren Baumarten liegen dazwischen, wobei Douglasie etwas besser abschneidet als Fichte und Eiche. Die Beispielgebiete in Bayern verdeutlichen aufgrund ihrer Heterogenität die Notwendigkeit kleinräumiger Standortansprache und Planung.

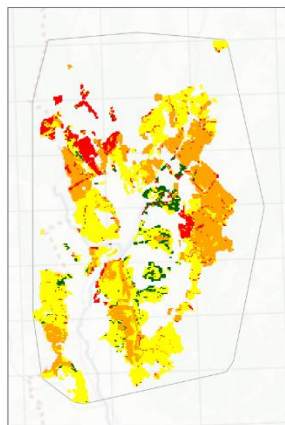
Testgebiete Bayern

Art: Fichte; Bonität: mittel; Auswertung: Erwartungswert

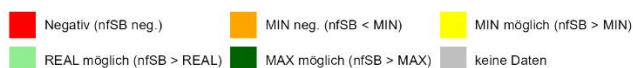
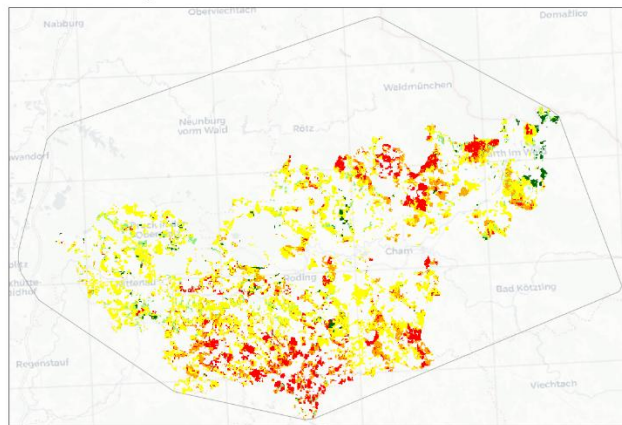
1: Nürnberger Land



2: Kronach-Rothenkirchen



3: Cham-Roding



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

Abbildung 39: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete (1) Nürnberger Land, (2) Kronach-Rothenkirchen und (3) Cham-Roding in Bayern für Fichte mittlerer Bonität.

Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurden drei Beispielgebiete (Wuchsbezirk 3/09: mittlerer Schwarzwald, 4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz, 4/03: Kocher-Jagst-Landschaft) ausgewiesen. Während der mittlere Schwarzwald im Wesentlichen durch ein nährstoffarmes Ausgangssubstrat gekennzeichnet ist, sind die anderen beiden Beispielgebiete durch kleinräumig wechselnde Ausgangssubstrate, wie Muschelkalk, Lettenkeuper und Feinlehmdecken charakterisiert und weisen eine hohe standörtliche Vielfalt auf. Die Ergebnisse der Nährstoffbilanzierung zeigen folgendes Bild: im mittleren Schwarzwald dominieren negative nutzungsfreie Stoffbilanzen. Das limitierende Element ist hierbei Magnesium. Dieses Element wurde schon bei Ahrends et al. (2018) im Schwarzwald besonders hervorgehoben. Schon während der Zeit der sog. „neuartigen Waldschäden“ wurde vor allem der Magnesiummangel als überwiegende Störung in der Waldernährung gesehen (Hüttl und Schaaf, 1997). Für das in diesem Naturraum liegende Einzugsgebiet Schluchsee ermittelten Stahr et al. (1995) zwar eine durchschnittliche Verwitterungsrate der basischen Kationen von $1,2 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ über 10.000 Jahre, der Mg^{2+} -Anteil hieran beträgt jedoch nur äußerst geringe 2,5%. Dultz (2001) führt die vielerorts geringen Verwitterungsraten für Magnesium auf eine starke Ausschöpfung während der holozänen Bodenbildung zurück, die in der hohen Mobilität von Magnesium ihre Ursache hat. Neben den geringen Verwitterungsraten führt auch die nach wie vor hohe Befruchtung des Sickerwassers mit Sulfat und Nitrat zu hohen Magnesium- und Calciumverlusten. Entsprechend besteht ein evidenter Bedarf zur Regeneration der natürlichen Bodenqualität, z.B. durch regenerationsorientierte Bodenschutzkalkungen. Auf solchen Standorten ist ein Verzicht auf die Entnahme des Kronenmaterials besonders angeraten, um keine Zuwachsverluste im Stammholz zu riskieren (Puhlmann et al., 2018).

Im südwestlichen Bereich der Beispielregion 3/09 weisen die Unterhänge teilweise eine positive nutzungsfreie Stoffbilanz auf und vor allem für Nadelholz ist dort je nach Bonität eine intensive Nutzung aus Sicht der Nährstoffnachhaltigkeit unschädlich. Eiche zeigt in Abhängigkeit von der Bonität wenig Variation und kann durchweg extensiv genutzt werden, Buche dagegen ist bei hohen Bonitäten deutlich kritischer zu bewerten als bei geringen Bonitäten.

In den Wuchsbezirken 4/02 und 4/03 zeigen sich insgesamt für Nadelholz und niedrige Bonitäten im Laubholz selbst bei intensiver Nutzung großflächig positive Gesamtbilanzen. Kleinräumig variierende Muster zeigen sich aber bei höheren Bonitäten für Buche und Eiche und in geringem Ausmaß auch bei Fichte, wobei bei Buche auch geringfügig negative Gesamtbilanzen auftreten. Eine Übersicht zu diesen Ergebnissen in

Tabelle 21 bestätigt den visuellen Eindruck aus Abbildung 40, dass im mittleren Schwarzwald fast die Hälfte der Punkte eine negative nutzungsfreie Stoffbilanz aufweist und für weitere 8-33% der Punkte schon bei geringen Nutzungsentzügen negative Gesamtbilanzen zu erwarten sind. Tatsächlich unkritische Nährstoffsituationen selbst bei hoher Nutzungsintensität entstehen nur bei den Baumarten Douglasie und Kiefer. In den beiden Beispielgebieten Weinbaugebiet Vaihingen/Enz und Kocher-Jagst-Landschaft zeigen sich für mittlere Bonitäten fast durchgehend intensive Nutzungsoptionen. Für Nadelhölzer gilt dies praktisch auf 96 - 99,9% der Fläche, beim Laubholz immerhin noch auf 83,4 - 95,2% der Fläche. Negative Bilanzen bei geringer Nutzungsintensität entstehen nur auf maximal 1,2% der Flächen. Würden anstatt dem modellbasierten Erwartungswert allerdings strengere Klassifizierungskriterien angelegt (vgl. Kapitel Unsicherheiten), d.h. wird verlangt, dass die Gesamtbilanz auf dem 95%-Niveau statistisch signifikant positiv bleibt, so verschieben sich die genannten Anteile auf 90,8 - 99,5% positive Standorte bei intensiver Nutzung unter Nadelholz, bzw. auf 62,6 - 86,4% unter Laubholz. Nicht sicher positive Bilanzen liegen selbst bei geringer Nutzungsintensität auf maximal 6,5% der Fläche vor. Im mittleren Schwarzwald verschieben sich die Anteile dagegen deutlich und sicher positive Bilanzen gibt es nur für 5% der Fläche für Buche, bzw. 16,9% für Eiche. Bei den Nadelhölzern liegt der Wert zwischen 13,4% und 19,4%.

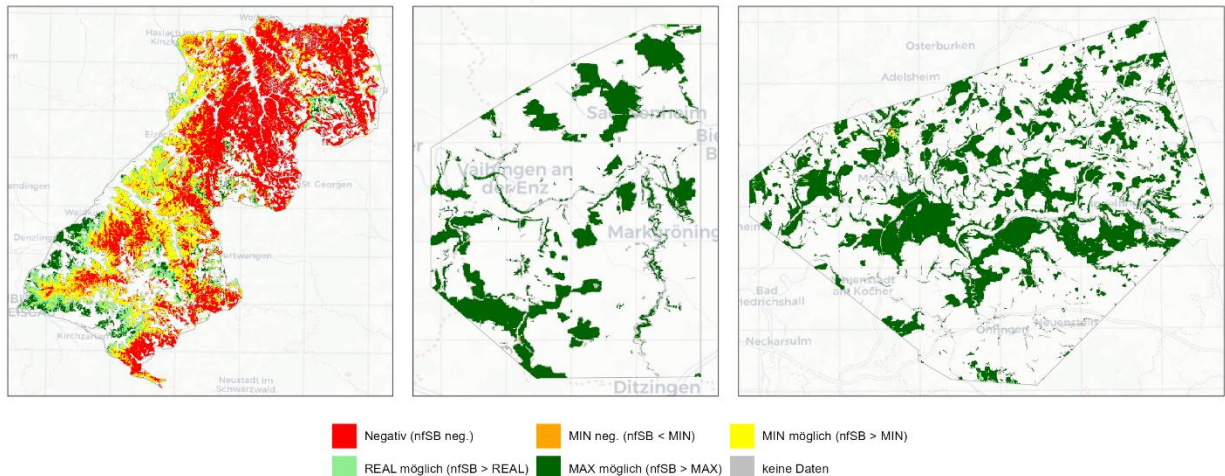
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Douglasie; Bonität: mittel; Auswertung: Erwartungswert

3/09: mittlerer Schwarzwald

4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz

4/03: Kocher-Jagst-Landschaft



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

Abbildung 40: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Beispielgebiete 3/09: mittlerer Schwarzwald, 4/02: Vaihingen/Enz und 4/03: Kocher-Jagst-Landschaft in Baden-Württemberg für Douglasie mittlerer Bonität.

Tabelle 21: Tabellarische Übersicht der Bewertung der nutzungsfreien Stoffbilanz auf Basis des Erwartungswerts (Spalte Kriterium: Ex) bzw. des 5 %-Quantils (Spalte Kriterium: E0.05) der Gesamtbilanz, differenziert nach Baumart, Bonität und Nutzungsszenario (MIN, REAL, MAX). NEG: die nutzungsfreie Stoffbilanz ist negativ, MIN_neg: die Nutzung führt zu einer negativen Gesamtbilanz, MIN/REAL/MAX: das entsprechende Holzerteszenario führt nicht zu einer negativen Gesamtbilanz. Die Werte stellen Anteile der Flächen [%] dar und sind auf eine Dezimalstelle gerundet.

Testgebiet	Baumart	Bonität	Kriterium	NEG	MIN_neg	MIN	REAL	MAX
3/09	Buche	mittel	Ex	49,3	33,9	16,7	0,0	0,0
3/09	Eiche	mittel	Ex	47,9	8,4	43,7	0,0	0,0
3/09	Fichte	mittel	Ex	50,9	13,4	31,3	4,4	0,0
3/09	Douglasie	mittel	Ex	50,9	8,4	22,8	12,7	5,2
3/09	Kiefer	mittel	Ex	42,1	10,5	16,0	9,9	21,4
4/02	Buche	mittel	Ex	0,0	1,2	5,9	6,3	86,5
4/02	Eiche	mittel	Ex	0,0	0,0	1,7	3,1	95,2
4/02	Fichte	mittel	Ex	0,0	0,0	0,6	0,9	98,4
4/02	Douglasie	mittel	Ex	0,0	0,0	0,1	0,5	99,3
4/02	Kiefer	mittel	Ex	0,0	0,0	0,0	0,1	99,8
4/03	Buche	mittel	Ex	0,0	0,3	7,2	9,2	83,4
4/03	Eiche	mittel	Ex	0,0	0,0	3,7	3,5	92,7
4/03	Fichte	mittel	Ex	0,0	0,1	1,5	2,4	96,0
4/03	Douglasie	mittel	Ex	0,0	0,0	0,2	0,7	99,0
4/03	Kiefer	mittel	Ex	0,0	0,0	0,1	0,0	99,9
3/09	Buche	mittel	E0.05	78,2	16,7	5,0	0,0	0,0
3/09	Eiche	mittel	E0.05	77,3	5,8	16,9	0,0	0,0
3/09	Fichte	mittel	E0.05	79,0	7,6	13,2	0,2	0,0
3/09	Douglasie	mittel	E0.05	79,0	5,0	10,0	5,5	0,5
3/09	Kiefer	mittel	E0.05	72,5	8,2	8,1	4,3	7,0
4/02	Buche	mittel	E0.05	0,3	6,2	10,0	13,0	70,5
4/02	Eiche	mittel	E0.05	0,3	0,1	6,9	6,3	86,4
4/02	Fichte	mittel	E0.05	0,3	0,1	1,2	2,7	95,7
4/02	Douglasie	mittel	E0.05	0,3	0,1	0,3	4,4	94,8
4/02	Kiefer	mittel	E0.05	0,2	0,1	0,1	0,1	99,5
4/03	Buche	mittel	E0.05	0,1	4,8	15,5	16,9	62,6
4/03	Eiche	mittel	E0.05	0,1	0,1	9,8	12,1	77,8
4/03	Fichte	mittel	E0.05	0,2	0,3	3,5	5,3	90,8
4/03	Douglasie	mittel	E0.05	0,2	0,2	0,9	3,4	95,4
4/03	Kiefer	mittel	E0.05	0,1	0,1	0,2	0,2	99,5

Brandenburg

Für Brandenburg wurde die Nährstoffbilanzierung auf dem gesamten Landesgebiet für die Baumarten Kiefer, Buche und Eiche durchgeführt. Da sich die Deposition baumartenspezifisch auswirkt, zeigen sich landesweit deutliche Unterschiede in der Gesamtbewertung je nach Baumart und Bonität. Buche und Eiche weisen auf größeren Teilen der Landesflächen eine negative nutzungsfreie Stoffbilanz auf, die Kiefer hingegen nur auf einem geringeren Anteil der Landesfläche. Der Gradient der Nährstoffintensität der Baumarten und Bonitäten zeigt sich deutlich in der Bewertung. Für Kiefer schlechter Bonität finden sich größere Gebiete, für die ein intensives Nutzungsszenario denkbar ist. Für Kiefer mittlerer Bonität wird ein heterogenes Bild gezeigt, wobei alle Intensitätsklassen auf der Landesfläche vorhanden sind. Kleinräumig existieren auch Standorte, die bei intensiver Bewirtschaftung unkritisch zu bewerten sind, aber genauso Standorte wo eine extensive oder mittlere Bewirtschaftungsintensität zu empfehlen ist. Für Kiefer guter Bonität, ändert sich das Bild noch deutlicher: hier zeigen sich größere Flächenanteile mit Gesamtbilanzen die nahe Null liegen bzw. negativ sind, allerdings fällt der größte Anteil der Fläche in die Klasse geringer Nutzungsintensität. Bei Buche und Eiche zeigt praktisch

die gesamte Landesfläche negative Gesamtbilanzen bei einer guten Bonität. Bei mittlerer und schlechter Bonität ist das Bild heterogener, wobei aus Sicht der Nährstoffverfügbarkeit tendenziell nur eine extensive Nutzung ausgeglichene Gesamtbilanzen aufweist, und nur kleinräumig eine intensive Nutzung aus Sicht der Nährstoffnachhaltigkeit unkritisch ist.

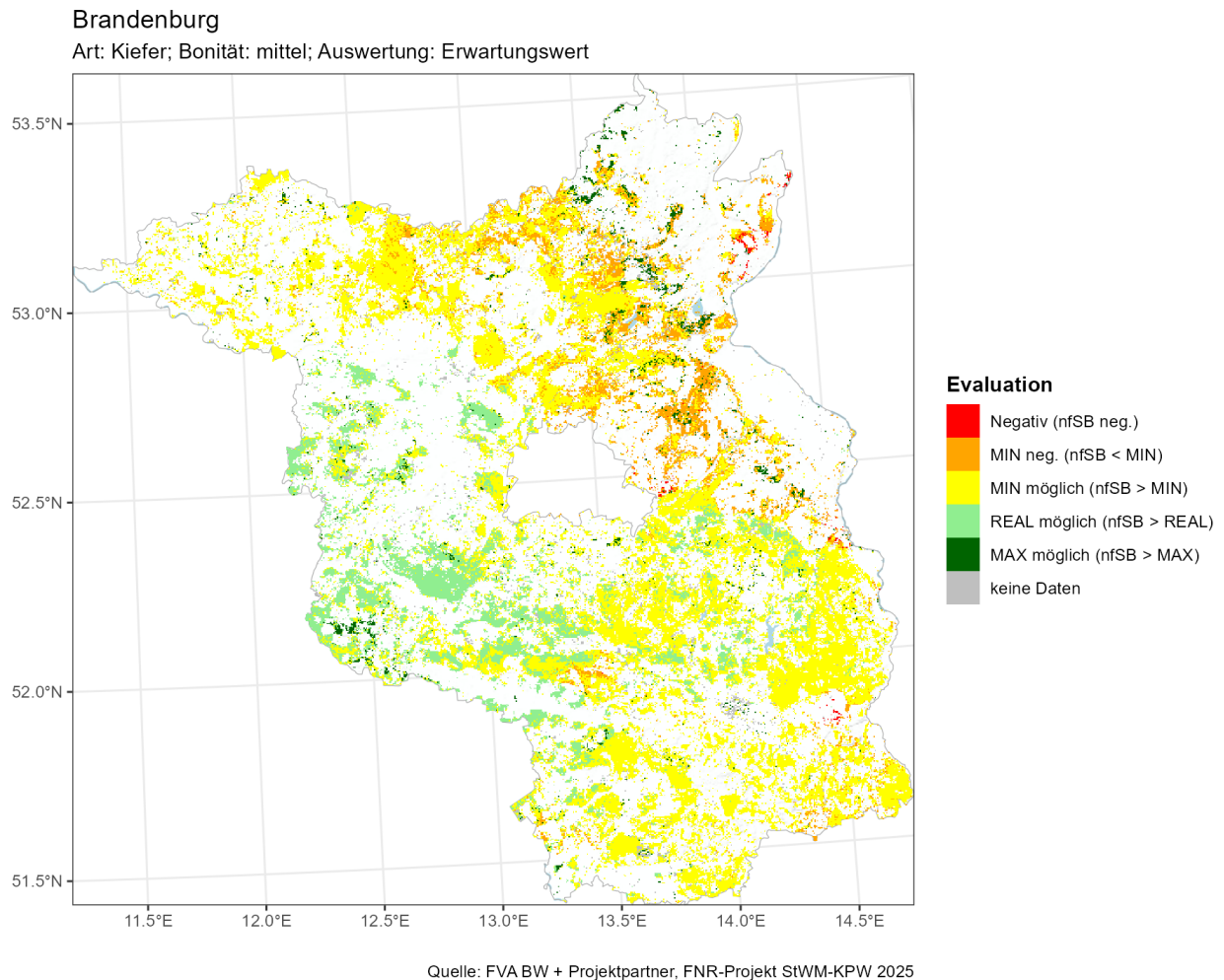


Abbildung 41: Darstellung der Ergebnisse der Gesamtbilanz für die Landesfläche Brandenburgs für Kiefer mittlerer Bonität. Gewässerflächen sind blau markiert.

Die gewählten Beispielgebiete der Projektpartner zeigen unterschiedliche Eigenschaften, die verschiedene Erkenntnisse und Schlussfolgerungen erlauben. Die Bearbeitung der Gesamtwaldfläche Brandenburgs zeigt, dass mit flächigem Vorliegen bodenkundlicher Basisinformationen die Anwendung der erarbeiteten Daten und Methoden für ein ganzes Bundesland möglich ist und in Verbindung mit dem intensiven Umweltmonitoring (Hannemann et al., 2016) und der Bodenzustandserhebung im Wald (Riek et al., 2015) vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können. So hat in Brandenburg zwischen den beiden Inventuren (BZE I: 1987-1993 und BZE II: 2006-2008) die Basensättigung in starkem Maß abgenommen. Als mögliche Erklärung für die wirklich drastischen Abnahmen der Basensättigung sind die in der Vergangenheit hohen Staubeinträge durch Flugasche anzuführen (Riek et al., 2012). Nach überschlägigen Kalkulationen von Riek et al. (2015) beläuft sich der mittlere kumulative Calcium-Eintrag von 1945 bis 1990 in die Wälder des Landes Brandenburg auf $2,2 \text{ t ha}^{-1}$, was einer flächigen Kalkungsmenge von etwa 6 t ha^{-1} (90% CaCO_3 -Anteil) entspricht. Es wird daher davon ausgegangen, dass in den zuvor von Staubablagerungen betroffenen Regionen die in der BZE II festgestellte geringere Basensättigung den naturnäheren Zustand darstellt als die künstlich erhöhten Werte zur Zeit der BZE I (Meesenburg et al., 2019). Auch die Ergebnisse der Level II-Flächen in Brandenburg zeigten in der Vergangenheit deutlich negative nutzungsfreie Stoffbilanzen (Hannemann et al., 2016).

Die baden-württembergischen Beispielgebiete zeigen in sich ein jeweils relativ homogenes Bild und betonen die bereits vorliegenden Erkenntnisse, dass bestimmte Standorte, wie der mittlere Schwarzwald durch großflächige arme Standortbedingungen gekennzeichnet sind und entsprechende Kommunikation und Managementverfahren notwendig sind. Die bayerischen Beispielgebiete, die durch eine hohe bodenkundliche Variabilität gekennzeichnet sind, verdeutlichen die Notwendigkeit kleinräumiger und standortgerechter Informationen und Planung. Dies wird insbesondere auch durch die Beispielgebiete in Niedersachsen bestätigt, die genau diese kleinräumige Auswertung und Bewertung verschiedener Nutzungsoptionen am Beispiel besser und schlechter ausgestatteter Standorte sichtbar machen.

Nährstoffansprüche von Baumarten

Literaturrecherche

Das Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) war im Rahmen des Projekts schwerpunktmäßig für die Auswertung der einschlägigen Literatur zu den Nährstoffansprüchen der Hauptbaumarten und wichtiger seltener und alternativer Baumarten zuständig. Hierbei wurden insgesamt 330 nationale und internationale Quellen zu den Standortansprüchen von Baumarten gesichtet und in eine Zotero-Datenbank eingepflegt.

Die Nährstoffversorgung der Vegetation wird im Klimawandel mit zunehmend längeren Phasen der Bodenaustrocknung an Bedeutung gewinnen, weil nur die in der Bodenlösung befindlichen Nährstoffe von den Pflanzen aufgenommen werden können. Nährstoffunterversorgung kann somit auch auf besser mit Nährstoffen ausgestatteten Standorten wahrscheinlicher werden, wenn die Trockenheit hier zunimmt.

Vor diesem Hintergrund besteht mit Blick auf den sich fortsetzenden Klima- und Standortwandel ein dringender Bedarf an Informationen zu den Nährstoffansprüchen, nicht nur der aktuell verbreiteten Wirtschaftsbaumarten, sondern im Besonderen auch der zukünftig voraussichtlich an Bedeutung gewinnenden alternativen Baumarten. In die Auswertung wurden insgesamt 56 Baumarten einbezogen (Tabelle 22). Die Auswahl umfasst neben den Hauptbaumarten auch standortheimische Arten, die gegenwärtig als Neben- und Mischbaumarten in der Forstwirtschaft eingesetzt werden. Daneben handelt es sich insbesondere um Arten, die in Südeuropa, dem östlichen Mittelmeerraum und Nordamerika heimisch sind und möglicherweise eine gute Anpassung an die zukünftig wärmeren Klimabedingungen besitzen.

Tabelle 22: Liste der 56 etablierten und alternativen Baumarten

Kurzform	Langform	Wissenschaftlicher Name
AB	Wildapfel(-baum)	<i>Malus sylvestris</i> (L.) Mill.
AS	Aspe, Zitterpappel	<i>Populus tremula</i> L.
AZE	Altaszeder	<i>Cedrus atlantica</i> (Endl.) Manetti ex Carrière
BAH	Bergahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.
BB	Wildbirne (Wildbirnbaum)	<i>Pyrus pyraeaster</i> L. Du Roi
BHA	Baumhasel	<i>Corylus colurna</i> L.
BRU	Bergrüster, Bergulme	<i>Ulmus glabra</i> Huds
BTA	Bornmüllertanne	<i>Abies bornmuelleriana</i> Mattf.
DGL	Douglasie	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirbel) Franco
EB	Gemeine Eberesche	<i>Sorbus aucuparia</i> L.
EIB	(Beeren-)Eibe	<i>Taxus baccata</i> L.
EK	Edelkastanie	<i>Castanea sativa</i> Mill.
EL	Elsbeere	<i>Sorbus torminalis</i> (L.) Crantz
ELA	Europäische Lärche	<i>Larix decidua</i> Mill.
FAH	Feldahorn	<i>Acer campestre</i> L.
FEI	Flaumeiche	<i>Quercus pubescens</i> Willd.
FRAH	Französische Ahorn	<i>Acer monspessulanum</i> L.
FRU	Feldrüster, Feldulme	<i>Ulmus minor</i> Mill.

Kurzform	Langform	Wissenschaftlicher Name
GBI	Gemeine Birke, Sandbirke	Betula pendula Roth
GES	Gemeine Esche	Fraxinus excelsior L.
GFI	Gemeine Fichte	Picea abies
GKI	Gemeine Kiefer	Pinus sylvestris L.
HBU	Hainbuche	Carpinus betulus L.
JLA	Japanische Lärche	Larix kaempferi (Lamb.) Carrière
KTA	Küstentanne	Abies grandis (Douglas ex D. Don) Lindl.
LZE	Libanonzeder	Cedrus libani A. Rich.
MBI	Moorbirke	Betula pubescens Ehrh.
ME	Echte Mehlbeere	Sorbus aria
NBS	Schwarznuss	Juglans nigra L.
NBW	Walnuss	Juglans regia L.
OBU	Orientbuche	Fagus orientalis Lipsky
PAS	Sonstige Pappeln	Populus spec.
RBU	Rotbuche	Fagus sylvatica L.
REI	Roteiche	Quercus rubra L.
RER	Roterle, Schwarzerle	Alnus glutinosa (L.) Gaertn.
RK	Roskastanie	Aesculus hippocastanum L.
RLB	Riesenlebensbaum	Thuja plicata Donn ex D. Don
RO	Gemeine Robinie	Robinia pseudoacacia L.
SAH	Spitzahorn	Acer platanoides L.
SEI	Stieleiche	Quercus robur L.
SFI	Sitkafichte	Picea sitchensis (Bong.) Carr.
SG	Speierling	Sorbus domestica L.
SILI	Silberlinde	Tilia tomentosa Moench.
SKI	Schwarzkiefer	Pinus nigra J. F. Arnold
SLI	Sommerlinde	Tilia platyphyllos Scop.
SPA	Europäische Schwarzpappel	Populus nigra L.
TEI	Traubeneiche	Quercus petraea (Mattuschka) Liebl.
VKB	Vogelkirsche (Kirschbaum)	Prunus avium L.
WEI	Weidenarten	Salix spec.
WER	Weißerle, Grauerle	Alnus incana (L.) Moench.
WKI	Weymouthskiefer	Pinus strobus L.
WLI	Winterlinde	Tilia cordata Mill.
WRU	Weißruster, Flatterulme	Ulmus laevis Pall.
WTA	Weißtanne	Abies alba Mill.
ZEI	Zerreiche	Quercus cerris L.
ZKI	Zirbelkiefer	Pinus cembra L.

Die vorliegende Literaturrecherche wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurden Baumartensteckbriefe, Eignungstabellen und Anbauempfehlungen der Forstverwaltungen der Bundesländer sowie weitere Metastudien zum Baumarten-Standortbezug vergleichend gesichtet und in einer Datenbank zusammengeführt. Dabei ist zu beachten, dass in den hier ausgewerteten Quellen nicht die ökologischen Standortgrenzen der Baumarten aufgezeigt werden. Es handelt sich überwiegend um forstwirtschaftlich empfohlene Anbauspektren; im Fokus steht deshalb das leistungsorientierte Standortspektrum.

Die der Literatur entnommenen Metastudien wurden mit speziellem Blick auf die Angaben zu den Nährstoffansprüchen ausgewertet. Das Ziel bestand darin, aus jeder einzelnen Quelle eine Reihung der Baumarten von niedrigen hin zu hohen Ansprüchen an die standörtliche Nährstoffausstattung abzuleiten. Als geeignete Indikatoren für die Nährstoffansprüche der Baumarten sind in der Literatur unterschiedliche boden- und standortkundliche Kennwerte wie pH-Wert, Basenverlaufstyp, Nährkraftstufe u. ä. zu finden. Insgesamt wurden für die statistische Auswertung 43 Indikatoren für die Nährstoffansprüche der Baumarten abgeleitet.

Bei der Auswertung dieser Informationen wurde grundsätzlich vom nährstoffreichen Spektrum ausgegangen (hohes Ranking) und entsprechend den Angaben zum Ausfall einzelner Baumarten hin zum nährstoffarmen

Spektrum (niedriges Ranking) eine Reihenfolge der Baumarten abgeleitet; d.h. der Rankingwert entspricht den Mindestanforderungen der Baumarten an den Nährstoffhaushalt.

Bei den identifizierten Indikatoren der Nährstoffansprüche handelt es sich häufig um Merkmale, die in Form von quantitativen Wertespannen eindeutig und direkt zum Ranking der Baumarten führen (z.B. Untergrenzen empfohlener baumartenspezifischer pH-Wert-Spannen). Teilweise werden aber auch qualitative Standortinformationen angegeben, denen wiederum abgestufte Einschätzungen der Baumarteneignung (z.B. gering, mittel, hoch) zugeordnet sind. Auch erfolgt teilweise eine abgestufte Eignungsbewertung der Baumarten als Haupt-, Neben- oder Begleitbaumart. Diese Angaben mussten im Zuge der vorliegenden Auswertung adäquat parametrisiert werden, um eine geeignete Reihung der Baumarten ableiten zu können. Die für alle Einzelindikatoren gebildeten Reihungen der Baumarten sollten als Grundlage für die Berechnung einer Gesamtreihung über alle ausgewerteten Anbauempfehlungen und Indikatoren dienen.

Die Ranking-Werte aus den einzelnen Literaturquellen weisen unterschiedliche Skalenniveaus (Verhältnis-, Intervall-, Ordinalskalenniveau) und Wertespannen auf. Sie mussten daher vor der indikatorübergreifenden Auswertung auf eine einheitliche Skalierung gebracht werden. Dieses erfolgte mit Hilfe einer Z-Transformation der jeweiligen Ranking-Werte. Die Z-Transformation ist ein Verfahren der Standardisierung, bei dem eine Zufallsvariable so transformiert wird, dass die resultierende standardisierte Zufallsvariable den Erwartungswert 0 und die Varianz 1 besitzt. Die Standardabweichung entspricht der Wurzel der Varianz und ist somit ebenfalls gleich 1. Bei empirischen Daten mit unbekannter Verteilung der zugrundeliegenden Zufallsvariablen wird anstelle des Erwartungswertes das arithmetische Mittel und statt der Varianz die empirische Varianz verwendet (Studentisierung).

Nach der Z-Transformation sind die hier abgeleiteten Ranking-Werte aller Nährstoffindikatoren miteinander vergleichbar. Die Werte der standardisierten Zufallsvariablen werden im Folgenden als Z-Scores bezeichnet. Baumartenweise lässt sich aus den Z-Scores ein mittleres Ranking anhand der arithmetischen Mittelwerte oder Mediane berechnen.

Statistische Auswertung

Insgesamt wurden für die statistische Auswertung der Literaturbefunde 22 Quellen herangezogen. Aus diesen wiederum ließen sich 43 Indikatoren für die Nährstoffansprüche der Baumarten ableiten. Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Tabelle generiert, in der die berücksichtigten Baumarten die Spaltenüberschriften bilden und die Indikatoren für Nährstoffansprüche die Zeilen. Die Zellwerte dieser Matrix sind die über jede einzelne Zeile Z-transformierten Ränge der Baumarten hinsichtlich des jeweiligen Indikators.

Die spaltenweise über alle Indikatoren gemittelten Z-transformierten Ränge (Z-Scores) und deren 90%-Konfidenzbereiche sind in Abbildung 42 dargestellt. Entsprechend der in den Quellen berücksichtigten Baumarten liegen diesen Mittelwerten unterschiedlich viele Indikatoren zugrunde (Abbildung 43). Von den in Tabelle 22 aufgeführten Baumarten, die in der vorliegenden Auswertung idealerweise zu berücksichtigen sind, finden sich in der Literatur keine Angaben zu Orientbuche und Rosskastanie und weniger als 3 Nährstoffindikatoren für die Baumarten Bornmüller-Tanne, Französischer Ahorn und Zirbelkiefer. Diese Baumarten wurden von der statistischen Auswertung ausgeschlossen und sind Gegenstand einer zusätzlichen vertieften und speziellen Literaturrecherche. Somit sind in Abbildung 42 bis Abbildung 44 die Angaben von 51 Baumarten dargestellt.

Die Konfidenzbereiche der Mittelwerte sind für die einzelnen Baumarten sehr unterschiedlich groß. Sie sind – wie auch die in Abbildung 44 dargestellte Standardabweichung der Mittelwerte – Ausdruck sowohl des Stichprobenumfangs als auch der mehr oder weniger stark divergierenden Literaturbefunde. Hohe Standardabweichungen und vergleichsweise weite Konfidenzbereiche treten beispielsweise für die Baumarten Schwarzkiefer (SKI), Europäische Schwarzpappel (SPA), Feldruster (FRU), Schwarznuss (NBS), Eibe (EIB), Elsbeere (EL) und Baumhasel (BHA) auf.

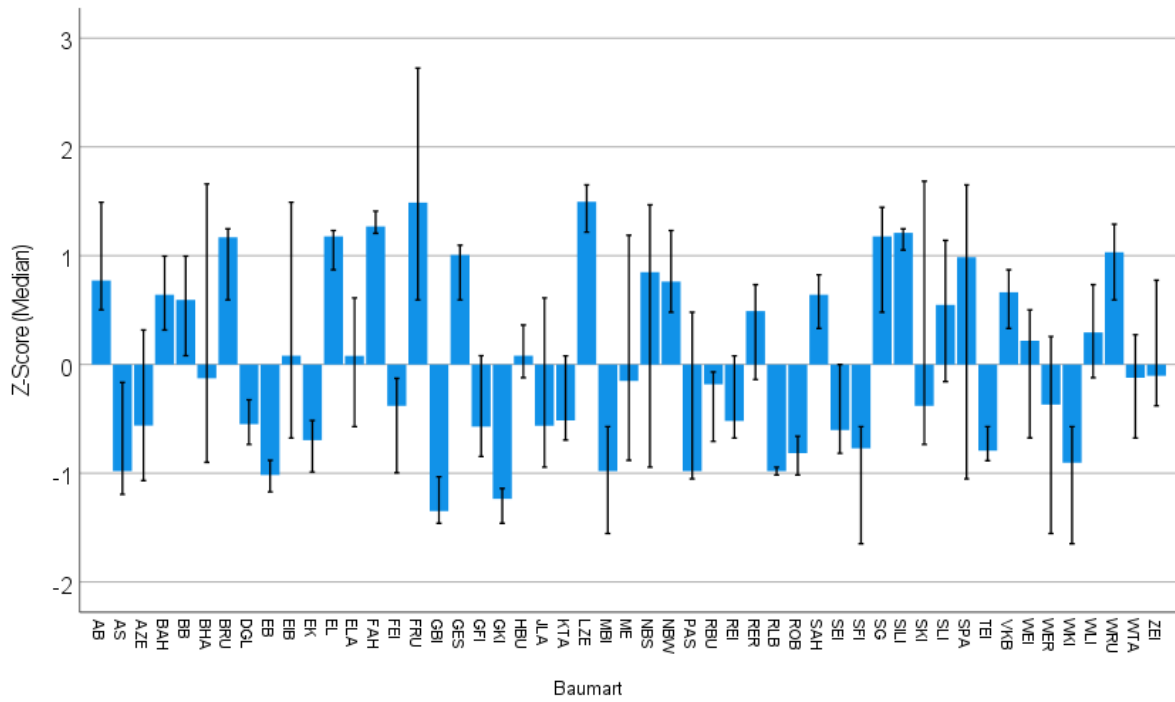


Abbildung 42: Mediane und 90%-Konfidenzbereich der Z-Scores der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten

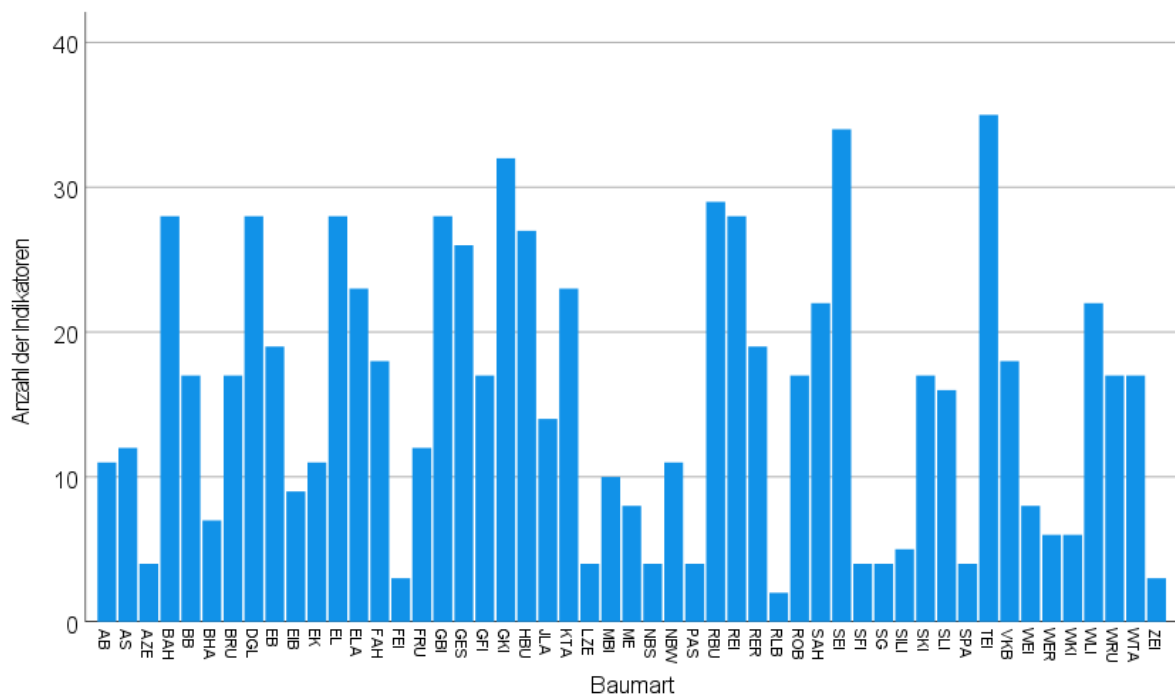


Abbildung 43: Anzahl der berücksichtigten Indikatoren für die Ermittlung der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten

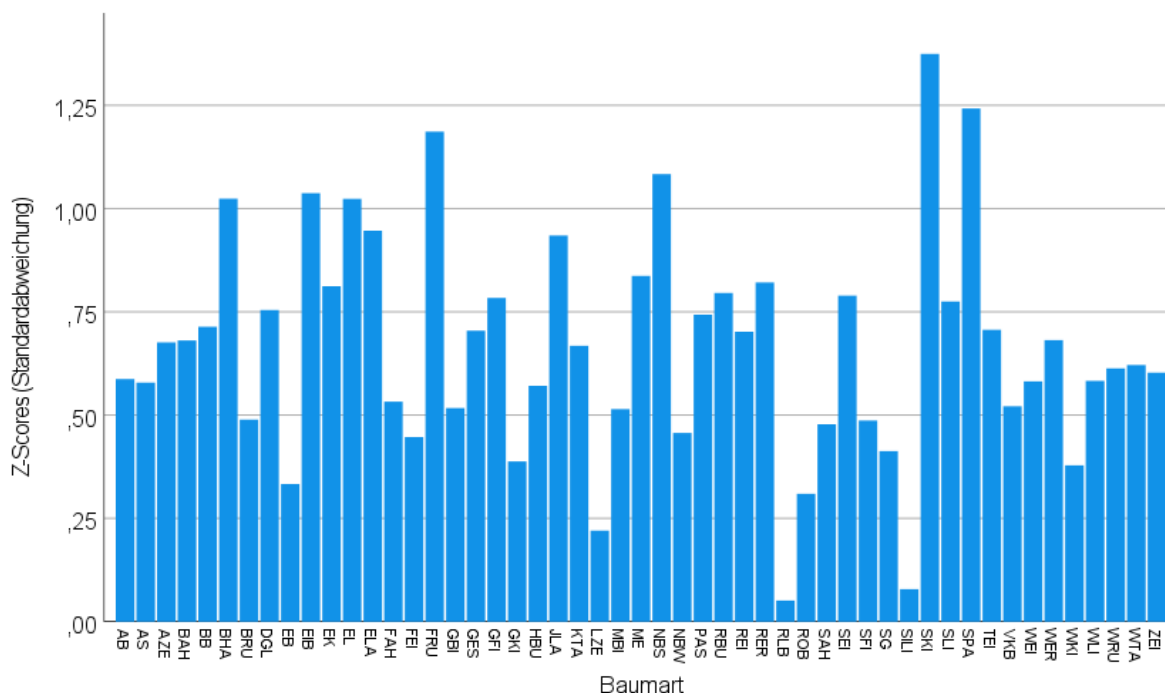


Abbildung 44: Standardabweichung der Z-Scores der Nährstoffansprüche von 51 Baumarten

Für den statistischen Vergleich der Baumarten und die Ausweisung entsprechender – signifikant unterschiedlicher – Baumartengruppen musste ein Verfahren gewählt werden, das die verschiedenen Stichprobenumfänge (variierende Anzahlen an Indikatoren bzw. Literaturquellen bei den einzelnen Arten) berücksichtigt. Hierfür kam das Verfahren *Regression Tree* des Programmpaketes SPSS zum Einsatz. Das Verfahren ist ein Entscheidungsbaum-basierter Klassifizierungsansatz, mit dem Fälle anhand von unabhängigen Prädiktorvariablen zu Gruppen zusammengefasst werden können. Die erklärenden Variablen können hierbei auch ordinal oder sogar nominalskaliert sein. Für die vorliegende Problemstellung wurde ein Entscheidungsbaum kalkuliert, bei dem die Ausprägungen der Z-transformierten Indikatoreinschätzungen (Z-Scores) die zu schätzende Zielgröße darstellt und die Baumart die einzige erklärende Variable. Für die Knotenfindung wurde dabei die in SPSS zum Regression-Tree-Verfahren erweiterte CHAID-Analyse (Chi-squared Automatic Interaction Detection) eingesetzt. Bei dieser werden die Kategorien der Prädiktoren zusammengeführt, wenn sie sich in Bezug auf die abhängige Variable nicht signifikant voneinander unterscheiden. In einem schrittweisen Verfahren werden, beginnend mit der höchsten Irrtumswahrscheinlichkeit, die Gruppen so lange zusammengeführt, bis zwischen allen Gruppen die zuvor festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 unterschritten wird. Die Berechnung der Irrtumswahrscheinlichkeiten erfolgt dabei auf Grundlage der F-Statistik. Die ermittelten Knoten weisen somit auf signifikant unterschiedliche Baumartengruppen hinsichtlich aller aus der Literatur abgeleiteten Ränge der Nährstoffindikatoren bzw. deren Z-Scores hin. Die Darstellung in Abbildung 45 enthält den SPSS-Output dieser Analyse mit den gruppenspezifischen Angaben zu den zugeordneten Baumarten, dem mittleren Z-Score der Nährstoffindikatoren (Mean), dessen Standardabweichung (Std. Dev.) sowie der jeweiligen Summe der Indikatorausprägungen (n) und deren prozentualen Anteil an allen insgesamt 788 Ausprägungen (%).

Den höchsten Anspruch an die standörtliche Nährstoffversorgung hat demnach mit einem mittleren Z-Score von +1,625 die unter Node 9 klassifizierte Baumartengruppe aus Libanonzeder (LZE) und Feldruster (FRU). Die geringsten Nährstoffansprüche weisen die unter Node 7 zusammengefassten Baumarten Gemeine Birke (GBI) und Gemeine Kiefer (GKI) auf, für die sich ein mittlerer Z-Score von -1,275 errechnet. Die Ähnlichkeit der Baumartengruppen und Baumarten hinsichtlich ihrer Nährstoffansprüche wird in Abbildung 46 durch ihre Abstände der mittleren Z-Scores auf dem Zahlenstrahl grafisch veranschaulicht. Dabei entspricht die Durchnumerierung der Gruppen auf dem Zahlenstrahl ihrem Ranking von geringem hin zu hohem Anspruch; sie ist nicht identisch mit den Nummern der Knoten in Abbildung 45. Für die fettgedruckten Baumarten konnten mehr als 10 Indikatoren bei der statistischen Analyse berücksichtigt werden. Hier sind die Befunde vergleichsweise gut abgesichert. Für die verbleibenden Baumarten ist die Einstufung anhand von zusätzlicher Spezialliteratur zu überprüfen.

Die punktuelle Lage der Baumartengruppen auf dem Zahlenstrahl steht für deren Mindestansprüche an die Nährstoffversorgung; d.h. links der Koordinate jeder Gruppe ist eine Limitierung der Anbaueignung durch Nährstoffmangel zu erwarten. Für die alternativen Baumarten lassen sich auf dieser Grundlage relativ konkrete Aussagen zu den Nährstoffansprüchen treffen. Sie sind vergleichbar mit den Nährstoffansprüchen der etablierten Baumarten derselben Gruppe.

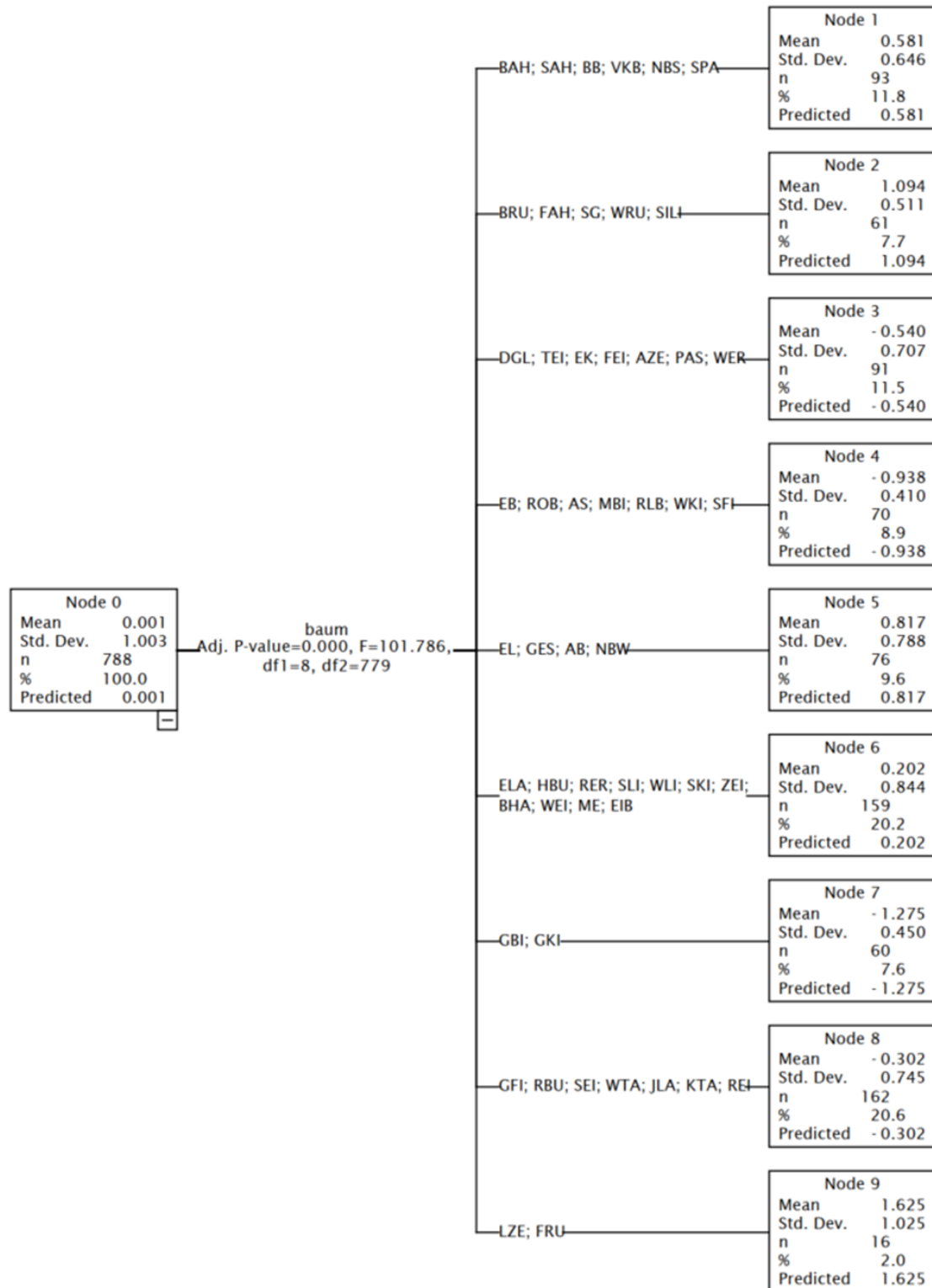
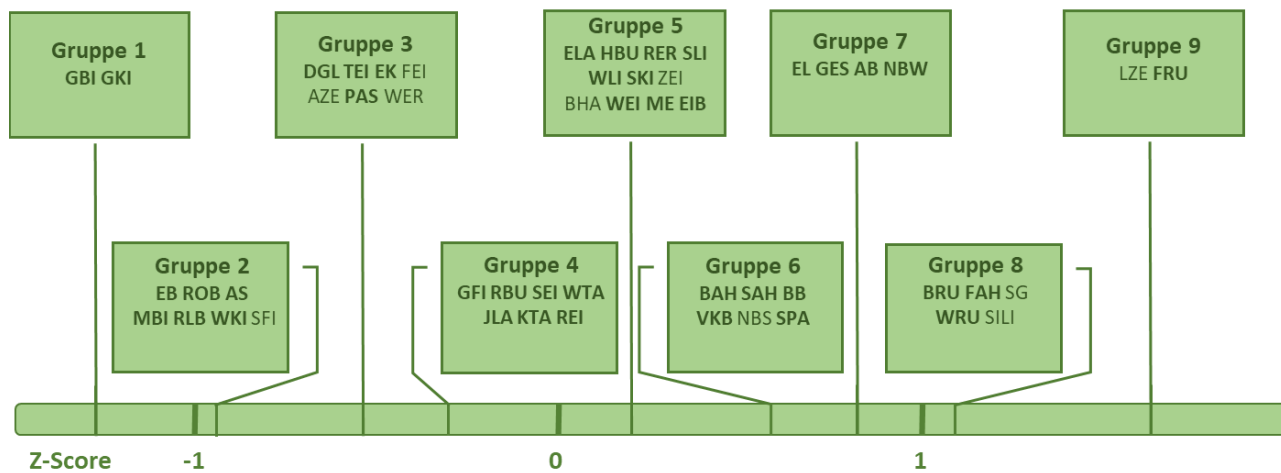


Abbildung 45: Output der mit SPSS durchgeführten CHAID-Analyse zur Gruppierung der Baumarten nach ihren Nährstoffansprüchen



AB – Wildapfel; AS – Aspe/Zitterpappel; AZE – Atlaszeder; BAH – Bergahorn; BB – Wildbirne; BHA – Baumhasel; BRU – Bergrüster/Bergulme; DGL – Douglasie; EB – Gemeine Eberesche; EIB – (Beeren-)Eibe; EK – Edelkastanie; EL – Elsbeere; ELA – Europäische Lärche; FAH – Feldahorn; FEI – Flaumeiche; FRU – Feldrüster/Feldulme; GBI – Gemeine Birke/Sandbirke; GES – Gemeine Esche; GFI – Gemeine Fichte; GKI – Gemeine Kiefer; HBU – Hainbuche; JLA – Japanische Lärche; KTA – Küstentanne; LZE – Libanonzeder; MBI – Moorbirke; ME – Mehlbeere; NBS – Schwarznuss; NBW – Walnuss; PAS – Sonstige Pappeln; RBU – Rotbuche; REI – Roteiche; RER – Roterle/Schwarzerle; RLB – Riesenlebensbaum; RO – Gemeine Robinie; SAH – Spitzahorn; SEI – Stieleiche; SFI – Sitkafichte; SG – Speierling; SILI – Silberlinde; SKI – Schwarzkiefer; SLI – Sommerlinde; SPA – Europäische Schwarzpappel; TEI – Traubeneiche; VKB – Vogelkirsche; WEI – Weidenarten; WER – Weißerle/Grauerle; WKI – Weymouthskiefer; WLI – Winterlinde; WRU – Weißrüster/Flatterulme; WTA – Weißtanne; ZEI – Zerreiche

Abbildung 46: Zahlenstrahl mit mittleren Z-Scores der Nährstoffansprüche von Baumartengruppen

Kalktoleranz der Baumarten

Im nährstoffreichen Standortspektrum wurde bei der bisherigen Auswertung nicht zwischen kalkhaltigen und kalkfreien Böden differenziert. Die Kalkstandorte wurden im Bereich der nährstoffkräftigsten Standorte verortet. Daher stellt sich die Frage, ob es Baumarten mit hohem Nährstoffbedarf (hoher Z-Score, Abbildung 46) gibt, die gleichzeitig jedoch Kalkstandorte eher meiden, sodass hier differenziert werden müsste. Auf Grundlage der ausgewerteten Literatur erfolgte eine tabellarische Einteilung der Baumarten in die drei Gruppen „kalkliebend“, „kalkindifferent“ und „kalkmeidend“ (Tabelle 23). Als kalkliebend werden Baumarten bezeichnet, die vorwiegend und teilweise ausschließlich auf kalkhaltigen Böden gedeihen. Als kalkindifferent werden Baumarten kategorisiert, die für gute Wuchsleistung nicht dringend kalkhaltiges Substrat voraussetzen. Als kalkmeidend werden Baumarten eingestuft, die schlecht oder gar nicht auf Kalkböden wachsen. Im Ergebnis zeigt sich, dass die als kalkmeidend eingestuft Baumarten gemäß der hier vorgenommenen Einteilung ausschließlich im niedrigen Z-Score-Spektrum vorkommen, also auf Standorten, die nährstoffarm und versauert sind und daher ein erhöhter Calciumcarbonatgehalt im Hauptwurzelraum auszuschließen ist.

Tabelle 23: Einteilung der Baumarten nach kalkliebend, kalkindifferent und kalkmeidend.

Kalktoleranz	Baumart
Kalkliebend	Atlaszeder, Baumhasel, Bergahorn, Bergulme, Eibe, Elsbeere, Feldahorn, Feldulme, Flaumeiche, Französischer Ahorn, Gemeine Esche, Hainbuche, Japanische Lärche, Libanonzeder, Robinie, Schwarzkiefer, Schwarzpappel, Silberlinde, Sommerlinde, Speierling, Spitzahorn, Vogelkirsche, Walnuss, Wildapfel, Wildbirne, Winterlinde
Kalkindifferent	Bornmüllerstanne, Europäische Lärche, Flatterulme, Eberesche, Gemeine Birke / Sandbirke, Mehlbeere, Rosskastanie, Rotbuche, Schwarznuss, Stieleiche, Traubeneiche, Weidenarten, Weißerle, Weißtanne, Zirbelkiefer
Kalkmeidend	Aspe, Balsampappel, Douglasie, Edelkastanie, Gemeine Fichte, Gemeine Kiefer, Große Küstentanne, Moorbirke, Riesenlebensbaum, Roteiche, Roterle, Sitkafichte, Weiden (keine spez. Arten), Weymouthskiefer, Zerreiche

Spezielle Literatur: Studien zu den Nährstoffansprüchen einzelner Baumarten

In einer sich anschließenden weiteren Literaturrecherche wurden speziell diejenigen Baumarten betrachtet, zu denen die ausgewerteten Baumartensteckbriefe und Metastudien wenige oder gar keine Aussagen treffen. In diesem Schritt wurden zusätzlich spezifische, nationale und internationale Studien zu den einzelnen Baumarten als Originalarbeiten gesichtet. Auf dieser Grundlage wurden die Baumarten Bornmüllertanne, Französischer Ahorn, Orientbuche, Rosskastanie und Zirbelkiefer den bestehenden Gruppen zugeordnet. Die Ergebnisse dienen der Überprüfung und Erweiterung des Baumarten-Rankings aus dem ersten Teil der Literaturauswertung. Die vollständige finale Gruppierung aller 56 Arten in 8 Baumartengruppen zeigt Tabelle 24.

Tabelle 24: Finale Gruppierung aller 56 Baumarten nach Nährstoffanspruch sowie mittlerer Z-Score der Gruppen; *kursiv*: Baumarten mit <10 Literaturbelegen für die Z-Score-Auswertung.

Gruppe	Baumarten	Z-Scores
1	Gemeine Birke (Sandbirke), Gemeine Kiefer	-1,275
2	Aspe (Zitterpappel), Gemeine Eberesche, Gemeine Robinie, Moorbirke, Riesenlebensbaum, <i>Sitkafichte, Weymouthskiefer</i>	-0,938
3	<i>Atlaszeder, Bornmüllertanne, Douglasie, Edelkastanie, Flaumeiche, Orientbuche,</i> Sonstige Pappeln, Traubeneiche, <i>Weißerle (Grauerle), Zirbelkiefer</i>	-0,540
4	Gemeine Fichte, Japanische Lärche, Küstentanne, Rotbuche, Roteiche, Stieleiche, Weißtanne	-0,302
5	<i>Baumhasel, Echte Mehlbeere, (Beeren-)Eibe, Europäische Lärche, Hainbuche, Rosskastanie, Roterle (Schwarzerle), Sommerlinde, Schwarzkiefer, Weidenarten, Winterlinde, Zerleiche</i>	0,202
6	Berghorn, <i>Schwarznuss</i> , Schwarzpappel, Spitzahorn, Vogelkirsche, Wildbirne	0,581
7	Elsbeere, Gemeine Esche, Walnuss, Wildapfel	0,817
8	Bergrüster (Bergulme), Feldahorn, Feldrüster (Feldulme), <i>Französischer Ahorn, Libanonzeder, Silberlinde, Speierling, Weißrüster (Flatterulme)</i>	1,224

Zusammenfassung

Für die vorliegende Literaturauswertung wurden insgesamt 330 nationale und internationale Quellen zu den Standortansprüchen von Baumarten gesichtet und in eine Zotero-Datenbank eingepflegt. Im Fokus standen die Ansprüche insbesondere der alternativen Baumarten an die standörtliche Nährstoffversorgung. Hierzu wurden Baumartensteckbriefe, Eignungstabellen und Anbauempfehlungen der Forstverwaltungen sowie weitere Metastudien zum Standortbezug der Baumarten gesichtet und einer statistischen Analyse unterzogen (22 Literaturquellen). Im Ergebnis konnte ein Ranking der Baumarten in Form von 8 Baumartengruppen generiert werden, die sich signifikant hinsichtlich eines Z-transformierten, den Nährstoffbedarf kennzeichnenden Indexwertes (Z-Score), unterscheiden. Die ermittelte Baumartenzuordnung wurde überprüft durch die ergänzende Auswertung von spezieller, baumartenspezifischer nationaler und internationaler Literatur. Insgesamt konnten auf diesem Wege 56 Baumarten nach Nährstoffbedarfen gruppiert werden. Baumarten einer Gruppe sind dabei ähnlich einzustufen und unterscheiden sich maximal von den Baumarten anderer Gruppen. Im Falle der alternativen Baumarten einer Gruppe, für die wenig Wissen zu den Nährstoffansprüchen vorliegt, können diese nun bewertet und behandelt werden, wie die gängigen Baumarten derselben Gruppe, deren Ansprüche hinlänglich bekannt sind.

Der Zusammenhang zwischen den mittleren Z-Scores der Baumartengruppen und ausgewählten Bodeneigenschaften wird durch Abbildung 47 veranschaulicht.

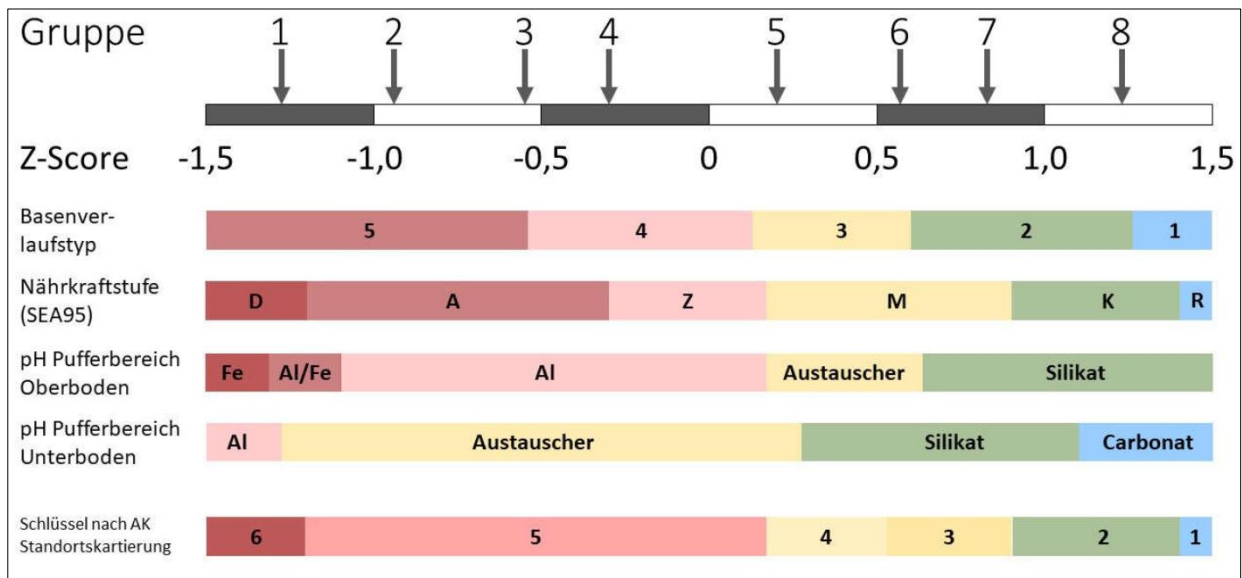


Abbildung 47: Unterlegung der Z-Scores einiger wichtiger Eingangsgrößen aus der Literaturrecherche sowie Lage der Clustermittelwerte (Baumartengruppe 1 - 8, vgl. Tab.2). Schlüssel nach AK Standortkartierung nach Benning et al. (2015).

Wasserhaushaltsmodellierung

Die Modellierung des Bodenwasserhaushalts wurde von jedem Projektpartner selbstständig für seine ausgewählten Projektgebiete bzw. für Brandenburg flächig durchgeführt. Sie erfolgte auf der Grundlage der im Waldklimafonds-Projekt „Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) entwickelten Methodik unter Verwendung des deterministischen Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90. Mit Hilfe dieses Modells kann die Wasserhaushaltsansprache wirklichkeitsnah, räumlich hochaufgelöst und dynamisch in Bezug auf den Klimawandel abgebildet werden (Weis et al. 2020). Die Ableitung flächig darstellbarer Stressindikatoren des Wasser- und Lufthaushalts dient der Bewertung der aktuellen und zukünftigen Anbaueignung wichtiger Baumarten unter veränderten Klimabedingungen und ist Grundlage für eine risikoarme Forstwirtschaft.

Bayern

Die Modellierung des Wasserhaushalts erfolgte für die bayerischen Beispielgebiete auf Grundlage des regionalisierten Klimadatensatzes der Universität Hamburg und wurde für jedes ausgewählte Profil eines Standortpolygons (Durchstich im Centroid des Polygons) durchgeführt. Dabei wurden folgende Zeiträume und Klimaszenarien betrachtet:

- Vergangenheit: Klimadaten von 1961-1990
- Gegenwart: Klimadaten von 1991-2020
- Mildes Zukunftsszenario: MPI CLM RCP 4.5 für 2071-2100
- Hartes Zukunftsszenario: MPI CLM RCP 8.5 für 2071-2100

Neue Wasserhaushaltsstufen für Bayern

Für den Vergleich des modellierten mit dem kartierten Wasserhaushalt mussten die Wasserhaushaltsziffern der Standortkartierung in die Wasserhaushaltsstufen nach WHH-KW transformiert werden. Dazu wurde die Wasserhaushalts-Skala aus dem Projekt WHH-KW umgedreht und die Stufen 8 = feucht und 9 = nass ergänzt, die nicht modelliert, sondern aus der Standortkartierung übernommen wurden. Ferner wurde die Stufe 0 = extrem trocken (zu trocken für Hochwald, d.h. xerophile Buschwälder bis Steppenvegetation) ergänzt, die bisher nicht kartiert wurde und aktuell nur kleinräumig auftritt, in Zukunft aber eine zunehmende Rolle spielen kann.

Tabelle 25: Neue Wasserhaushaltsstufen für Bayern (in Anlehnung an Ergebnisse des Projekts WHH-KW)

WHH Bezeichnung	R	G	B	Trockenjahre	Mittelwert T/T _{pot}	
Wasserversorgung (Trockenstress)						
0	extrem trocken	190	0	0	(≥) 30	< 0,5
1	sehr trocken	220	70	80	(≥) 30	≥ 0,5 - 0,75
2	trocken	240	160	80	18 bis < 30	≥ 0,75 - 0,85
3	mäßig trocken	250	240	160	12 bis < 18	≥ 0,85 - 0,90
4	mäßig frisch	230	250	190	6 bis < 12	≥ 0,90 - 0,95
5	ziemlich frisch	180	230	210	3 bis < 6	≥ 0,95 - 0,975
6	frisch	100	180	200	1 bis < 3	≥ 0,975 - 0,9917
7	sehr frisch	0	130	170	< 1	≥ 0,9917 - 1,0000
8	feucht	0	100	255	langfristige Vernässung 4-8 dm unter GOF, Feuchthumus	
9	nass	0	0	200	nahezu ständige Vernässung bis in Oberboden, Anmoor-Torf	
Kombination Wasserversorgung und Stauässe (Wechselfeuchte)						
11	wechselfeucht - sehr trocken	250	240	240	(≥) 30	< 0,75
12	wechselfeucht - trocken	230	200	220	18 bis < 30	≥ 0,75 - 0,85
13	wechselfeucht - mäßig trocken	210	160	200	12 bis < 18	≥ 0,85 - 0,90
14	wechselfeucht - mäßig frisch	190	120	180	6 bis < 12	≥ 0,90 - 0,95
15	wechselfeucht - ziemlich frisch	170	80	140	3 bis < 6	≥ 0,95 - 0,975
16	wechselfeucht - frisch	150	40	120	1 bis < 3	≥ 0,975 - 0,9917
17	wechselfeucht - sehr frisch	130	0	100	< 1	≥ 0,9917 - 1,0000
18	wechselnd feucht	100	0	100	langanhaltende Nass-/Feuchtphasen, ausgeprägter Luftman-	
19	wechsel-/stauass	70	0	100	langanhaltende Nassphase bis in Oberboden, häufig über-	
Kombination Wasserversorgung und Grund- oder Hangwasser						
21	Grund-/Hangwasser - sehr tro-	225	220	250	(≥) 30	< 0,75
22	Grund-/Hangwasser - trocken	200	190	230	18 bis < 30	≥ 0,75 - 0,85
23	Grund-/Hangwasser - mäßig tro-	175	160	210	12 bis < 18	≥ 0,85 - 0,90
24	Grund-/Hangwasser - mäßig	150	130	190	6 bis < 12	≥ 0,90 - 0,95
25	Grund-/Hangwasser - ziemlich	125	100	170	3 bis < 6	≥ 0,95 - 0,975
26	Grund-/Hangwasser - frisch	100	70	150	1 bis < 3	≥ 0,975 - 0,9917
27	Grund-/Hangwasser - sehr	75	40	130	< 1	≥ 0,9917 - 1,0000
28	grund-/hangfeucht	40	20	140	Grund-/Hangwasser im Unterboden, Oberboden periodisch	
29	grund-/hangnass	0	0	150	Grund-/Hangwasser im Unterboden, Oberboden periodisch	

Das Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 wird über einen Python-Wrapper angesteuert, der die Bodenprofile und die Parameter in Form von Textdateien an das Programm übergibt und die Ergebnisse wieder einliest.

Das Postprocessing versucht nun aus den Ergebnissen des LWF Brook90-Wrappers für die verschiedenen Profile einen optimalen Endwert zu bilden. Anfangs wurde eine Stabilisierung der Wasserhaushaltsstufe durch Auswahl des mittleren Werts bzw. Medians angestrebt (Variante V1), um Ausreißer bei der Profilauswahl herauszufiltern. Da die Abweichungen im Wasserhaushalt zwischen Modell und Standortkartierung sehr groß waren, wurde ein weiteres Verfahren (Variante V2) entwickelt, das jenes Profil auswählt, das am besten zum Wasserhaushalt der Standortkarte passt.

Postprocessing V2 – Abgleich des modellierten mit dem kartierten Wasserhaushalt

Über dieses Verfahren wird pro Standortpolygon immer das Profil ausgewählt, dessen modellierter Wasserhaushalt in der Vergangenheit dem kartierten am ähnlichsten ist. Dieses Profil wird dann für die Modellierung aller anderen Szenarien (Gegenwart, mildes und hartes Zukunftsszenario) verwendet. Der kartierte Wasserhaushalt der Standortkarte hat hier einen großen Einfluss auf das Ergebnis. Allerdings ist bekannt, dass der Wasserhaushalt im Gelände vorwiegend „relativ“ zu den anderen Standorten eines Kartiergebiets und nicht „absolut“ anhand der nutzbaren Feldkapazität (nFK) angesprochen wurde.

Aus diesem Grund wurden folgende Ziele und Methoden für das Postprocessing festgelegt:

- Bias-Korrektur der Kartiergebiete: Abgleich der relativen Wasserhaushaltsstufen pro Kartiergebiet mit den absoluten für ganz Bayern einheitlich modellierten Wasserhaushaltsstufen, d.h. Korrektur der systematischen Abweichungen zwischen Kartierung und Modell.
- Geländeformen-Patch: Im LWF-Brook90-Modell wird der laterale Wasserfluss nicht berücksichtigt. Da die relativen Unterschiede der Kartierung je nach Geländeform aber beibehalten bzw. im Modell nachgebildet werden sollen, erfolgt eine Biaskorrektur je nach Geländeform, d.h. Ab- und Zuschläge zum Wasserhaushalt über den SAGA Wetness Index.

Bias-Korrektur der Kartiergebiete

In Tabelle 26 ist der Median der Wasserhaushaltsstufen pro Kartiergebiet für die Standortkartierung (Sto), für den modellierten Wasserhaushalt in der Vergangenheit (Mod) und deren Differenz (Dif) aufgeführt. Eine Bias-Korrektur (Bias) wurde nur in 5 von 16 Kartiergebieten angewandt, wenn sich dadurch die Abweichungen zwischen Standortkartierung und Modell im Mittel verringern. Der Wasserhaushalt wurde in diesen Gebieten systematisch um eine Stufe unterschätzt, d.h. um eine Stufe trockener eingeschätzt als modelliert.

Tabelle 26: Bias-Korrektur des Wasserhaushalts nach Kartiergebieten im Beispielgebiet Nürnberger Land

Kartiergebiet	Jahr	Sto	Mod	Dif	Bias	Fein	Abw	Flächen	Hektar
Altdorf/Nürnberg	1999	5	6	1	1	1,25	0,73	4.720	3.096
Jura Süd	2001	4	6	2	1	0,75	0,66	4.343	3.444
Albvorland-Hersbruck	2003	4	5	1	0	0,50	0,69	4.660	3.252
Oberland/Hersbruck	2004	4	4	0	0	0,25	0,72	4.795	4.324
Pommelsbrunn	2007	4	4	0	0	0,00	0,69	1.787	2.655
Oberes Pegnitztal	2008	4	4	0	0	0,00	0,62	2.942	3.908

Die Spalte „Abw“ zeigt die mittlere Abweichung zwischen Modell und Standortkartierung nach Anwendung der Bias-Korrektur. In Spalte „Fein“ ist die Bias-Feinjustierung dargestellt, bei der die Grenzen der Wasserhaushaltsstufen um 1/4 Stufen verschoben werden, bis sie mit den Stufen der Standortkartierung übereinstimmt. Gewisse Anteile der Profile werden demnach in die nächste Stufe verschoben, bis sie der Standortkartierung entsprechen.

Geländeformen-Patch

Der sog. „SAGA Wetness Index“ (SWI) ähnelt dem „Topographic Wetness Index“ (TWI) und ist ein Index für die potenzielle Bodenfeuchte, der auf dem Wasserabfluss bzw. dem Relief basiert und eine Wasseroberfläche über das Geländemodell interpoliert.

Zur Berücksichtigung von Standorten mit lateralem Wasserzufluss oder -abfluss, wurde der modellierte Wasserhaushalt anhand des Bodenfeuchteindex „modifizierter SAGA Wetness Index“ (Plettenbacher 2022) in Verlustlagen ab- und in Gewinnlagen aufgewertet (gepatcht). Hierbei werden die Algorithmen des Topographic Wetness Indexes (TWI) und des SAGA Wetness Indexes (SWI) kombiniert, indem im SAGA GIS die Modified Catchment Area des SWI als Einzugsgebiet für den TWI genutzt wird. So erfolgt die Berechnung von Abfluss und Einzugsgebieten nach der neuen, die des Index aber nach der alten Methodik. Dies soll die Überschätzung

des Wasserzuflusses im SAGA Wetness Index in Tal- und flachen Kuppenlagen vermeiden. Im Folgenden ist ein Vergleich zwischen dem SWI und dem neuen „Modifizierten Wetness Index“ (MWI) in bekannten Problem-bereichen dargestellt.

Potenzielle Bodenfeuchte in flachen Kuppenlagen

Der SWI-Algorithmus spannt auch über flache Rücken und Kuppen eine Wasseroberfläche, sodass diese oft einen hohen Bodenfeuchteindex erhalten. Der MWI bleibt dort naturgemäß gering:

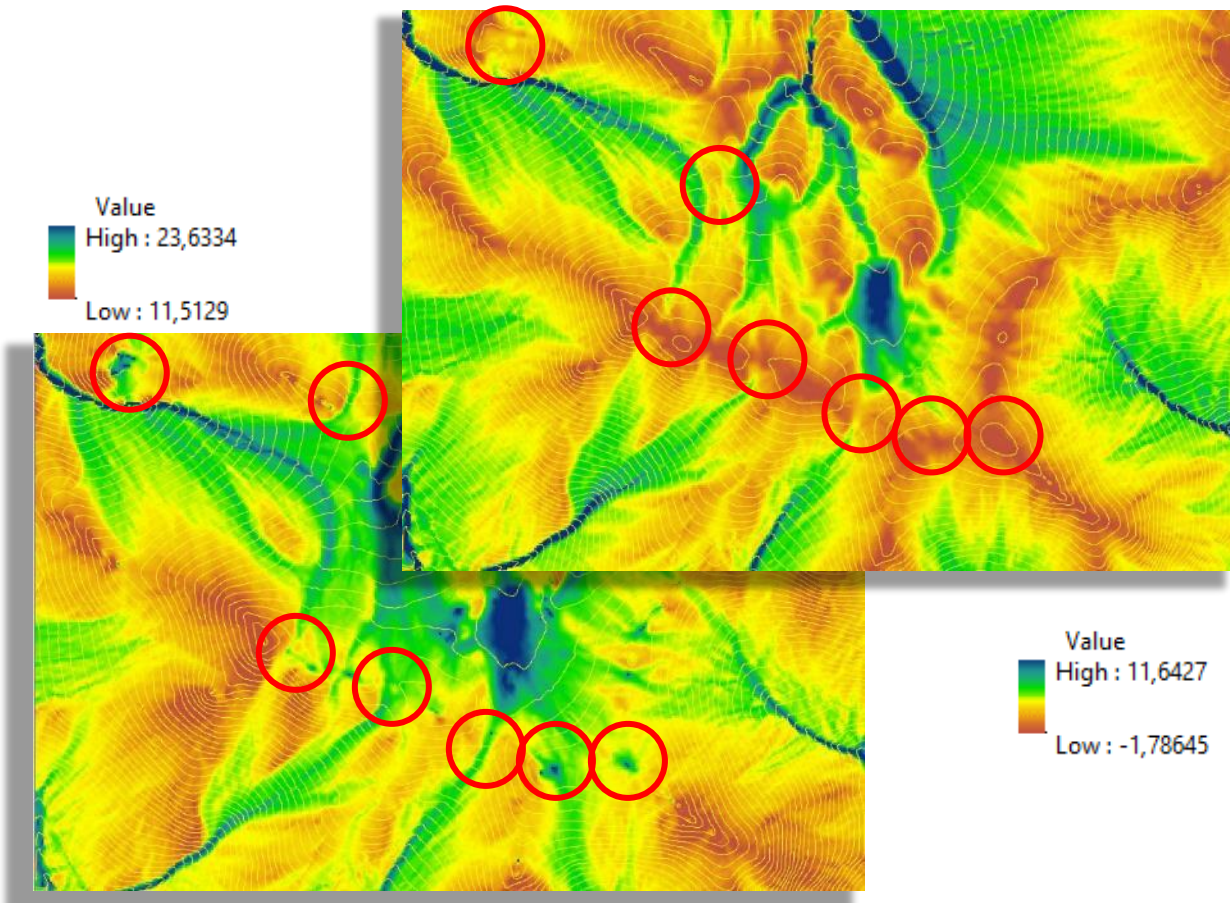


Abbildung 48: Vergleich zwischen SWI (links) und MWI (rechts) in Kuppenlagen bei Grandsberg

Potenzielle Bodenfeuchte in Tallagen

Da sich Wasser i.d.R. in den Tälern sammelt, erhalten diese fast durchwegs einen sehr hohen SWI und auch Rücken mit 30 m Höhe und mehr werden als feucht eingestuft, weil die interpolierte Wasseroberfläche diese „überflutet“ (Abbildung 49). Der MWI bleibt hier realistisch hoch in Gräben bzw. Mulden und gering auf Rücken.

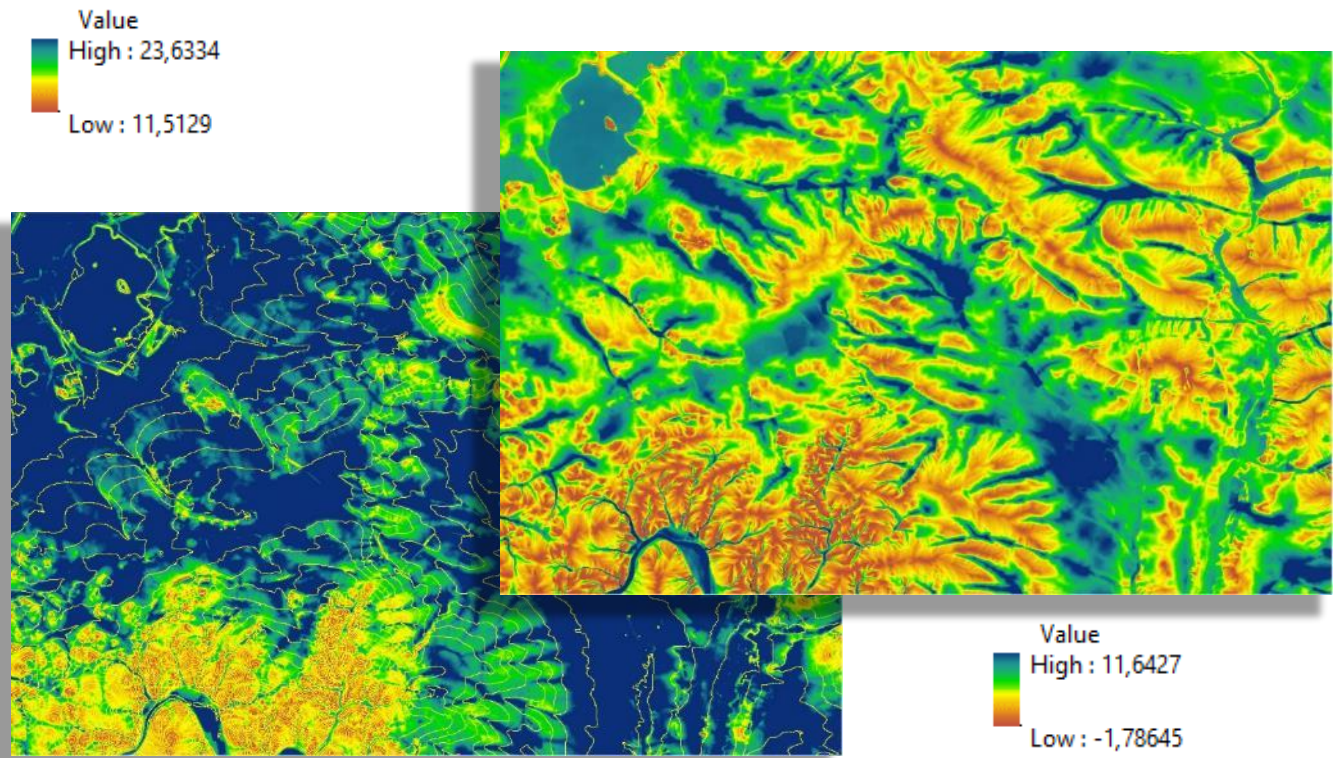


Abbildung 49: Vergleich zwischen SWI (links) und MWI (rechts) in Tallagen zwischen Steinberger See und Nittenau

Verteilung der modellierten Wasserhaushaltsstufen nach Postprocessing V2

Tabelle 27 zeigt die Verteilung der nach Postprocessing V2 modellierten Wasserhaushaltsstufen für die Vergangenheit, Gegenwart und die beiden Zukunftsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5.

Tabelle 27: Modellierte Wasserhaushaltsstufen nach dem Postprocessingverfahren V2 für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Flächenprozent im Beispielgebiet)

WHH	Bezeichnung	Vergangenheit 1961-1990		Gegenwart 1991-2020		RCP 4.5 2071-2100		RCP 8.5 2071-2100	
		%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
0	extrem trocken	0	0,00	84	0,19	328	0,73	509	1,14
1	sehr trocken	784	1,75	2.099	4,70	6.542	14,63	16.249	36,34
2	trocken	1.598	3,57	7.348	16,43	13.682	30,60	16.362	36,59
3	mäßig trocken	4.783	10,70	7.407	16,56	11.594	25,93	7.621	17,04
4	mäßig frisch	12.741	28,49	11.300	25,27	9.968	22,29	3.674	8,22
5	ziemlich frisch	10.501	23,48	8.432	18,86	2.421	5,41	214	0,48
6	frisch	9.085	20,32	6.951	15,55	158	0,35	68	0,15
7	sehr frisch	5.222	11,68	1.092	2,44	23	0,05	16	0,04

Hinweis: Die Stufen 8-9 (feucht/nass) sind hier nicht enthalten, da sie nicht modelliert werden können.

Wie im WHH-KW-Projekt zeigt sich eine starke Verschiebung des Wasserhaushalts von frisch zu trocken, bereits zwischen Vergangenheit (1961-1990) und Gegenwart (1991-2020), aber vor allem in der Zukunft (2071-2100): Frische Standorte sind selbst im milden Szenario faktisch nicht mehr vorhanden und im harten Szenario nehmen Trockenstandorte bereits 74,1% der Fläche ein.

Sogar mit dem vermehrten Auftreten extrem trockener Standorte (zu trocken für Hochwald, d.h. xerophile Buschwälder bis Steppenvegetation) ist auf ca. 1% der Fläche zu rechnen.

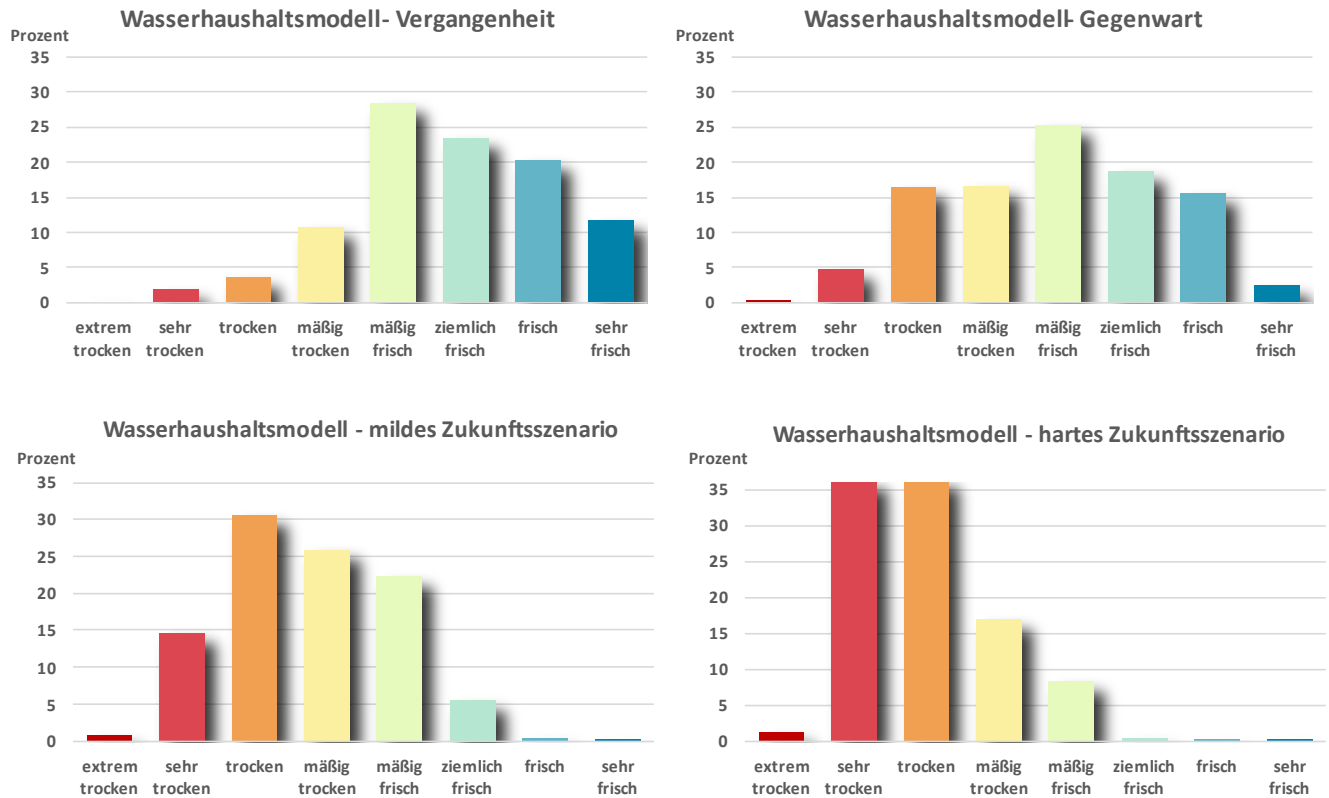


Abbildung 50: Nach dem Postprocessingverfahren V2 modellierte Wasserhaushaltsstufen für die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft (Flächenprozent)

Vergleich der Varianten und Fazit

Tabelle 28 zeigt, dass nach Postprocessing V1 nur bei 25,9% der Fläche die Wasserhaushaltsstufe des Modells der ursprünglichen Standortkartierung entspricht und bei 41,83% die Abweichung eine Stufe beträgt (gesamt 67,73%). Bei 32,27% der Flächen beträgt die Abweichung zwischen Modell und Kartierung über eine Stufe.

Bei Postprocessing V2 stimmt nach Bias-Korrektur und Geländeformen-Patch die Wasserhaushaltsstufe des Modells bei 59,34% der Flächen mit der Kartierung überein und beträgt bei 25,2% der Flächen eine Stufe (gesamt 84,54%). Lediglich bei 15,46% der Flächen erreicht die Abweichung zwei und mehr Stufen.

Tabelle 28: Abweichung zwischen modelliertem und kartiertem Wasserhaushalt - Vergleich der beiden Postprocessingverfahren V1 und V2

Abw	Postprocessing V1				Postprocessing V2			
	Hektar	%	Flächen	%	Hektar	%	Flächen	%
-5	37	0,08	80	0,21	65,29	0,15	117	0,30
-4	218	0,49	331	0,86	123,3	0,28	164	0,43
-3	1.267	2,83	1.281	3,33	759,6	1,70	878	2,28
-2	3.213	7,18	3.387	8,81	1.814	4,06	2.078	5,40
-1	6.411	14,34	5.704	14,83	4.815	10,77	4.694	12,20
±0	11.456	25,62	9.963	25,90	27.865	62,32	22.823	59,34
+1	12.539	28,04	10.384	27,00	6.014	13,45	5.002	13,00
+2	7.642	17,09	5.543	14,41	2.770	6,20	2.215	5,76
+3	1.833	4,10	1.700	4,42	477,9	1,07	481	1,25
+4	94	0,21	83	0,22	8,94	0,02	10	0,03
+5	5	0,01	8	0,02	0,87	0,00	2	0,01

Werden die Flächenanteile anstatt der Polygonanzahl betrachtet, so fällt die Übereinstimmung im trockenen Bereich viel geringer und im frischen Bereich 4% - 6% höher aus. Bei den trockenen Standorten beträgt die Übereinstimmung nach Flächenanteil nur 35,18% statt 42,54%. Dies zeigt, dass Polygone mit Wasserhaushaltsstufe von extrem trocken bis mäßig trocken meist kleinflächiger und Polygone der Stufen mäßig frisch bis sehr frisch meist viel größer sind.

Abbildung 51 zeigt, wie die Wasserhaushaltsstufen der Standortkartierung mit Postprocessing V2 modelliert wurden. Das Postprocessing reduziert die Streuung und Abweichung zwischen Modell und Vergangenheit deutlich, dennoch gibt es in wenigen Fällen immer noch starke Abweichungen. Nur die sehr trockenen Standorte können faktisch nicht modelliert werden, weil es in der Datenbank nur wenige „sehr trockene“ Profile gibt und diese in der Profilauswahl meist nicht gewählt wurden. Damit ein Profil in LWF-Brook90 in der Vergangenheit als sehr trocken eingestuft wird, muss es fast reiner Sand, extrem flachgründig oder skelettreich sein und eine nFK <25 mm aufweisen.

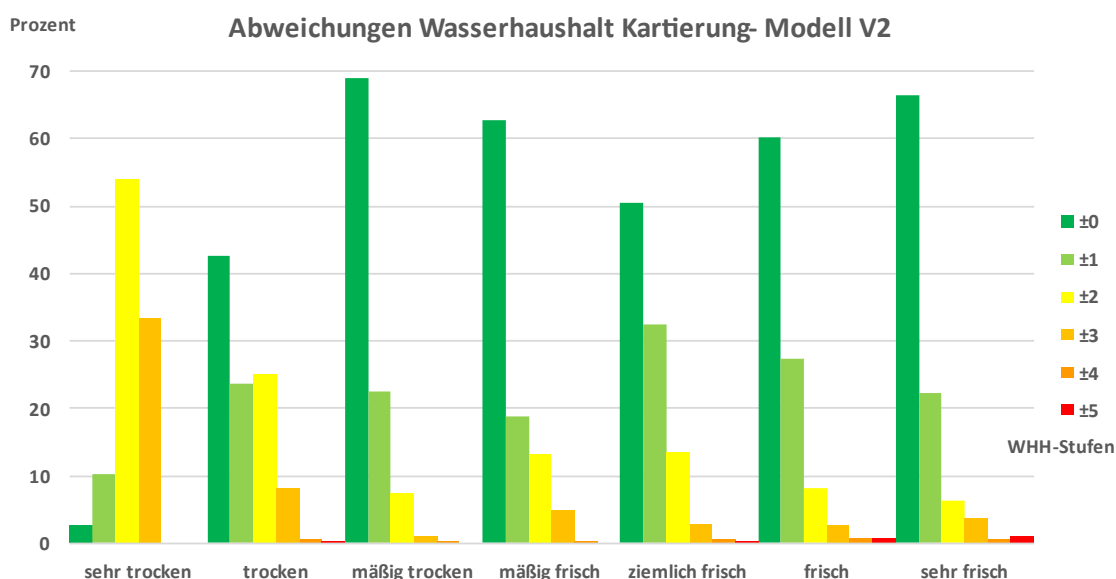


Abbildung 51: Abweichung des Wasserhaushalts (in Anzahl an Stufen Abweichung von 0-5) zwischen Kartierung und Modell (Postprocessing V2), dargestellt nach WHH-Stufen und Flächenprozent

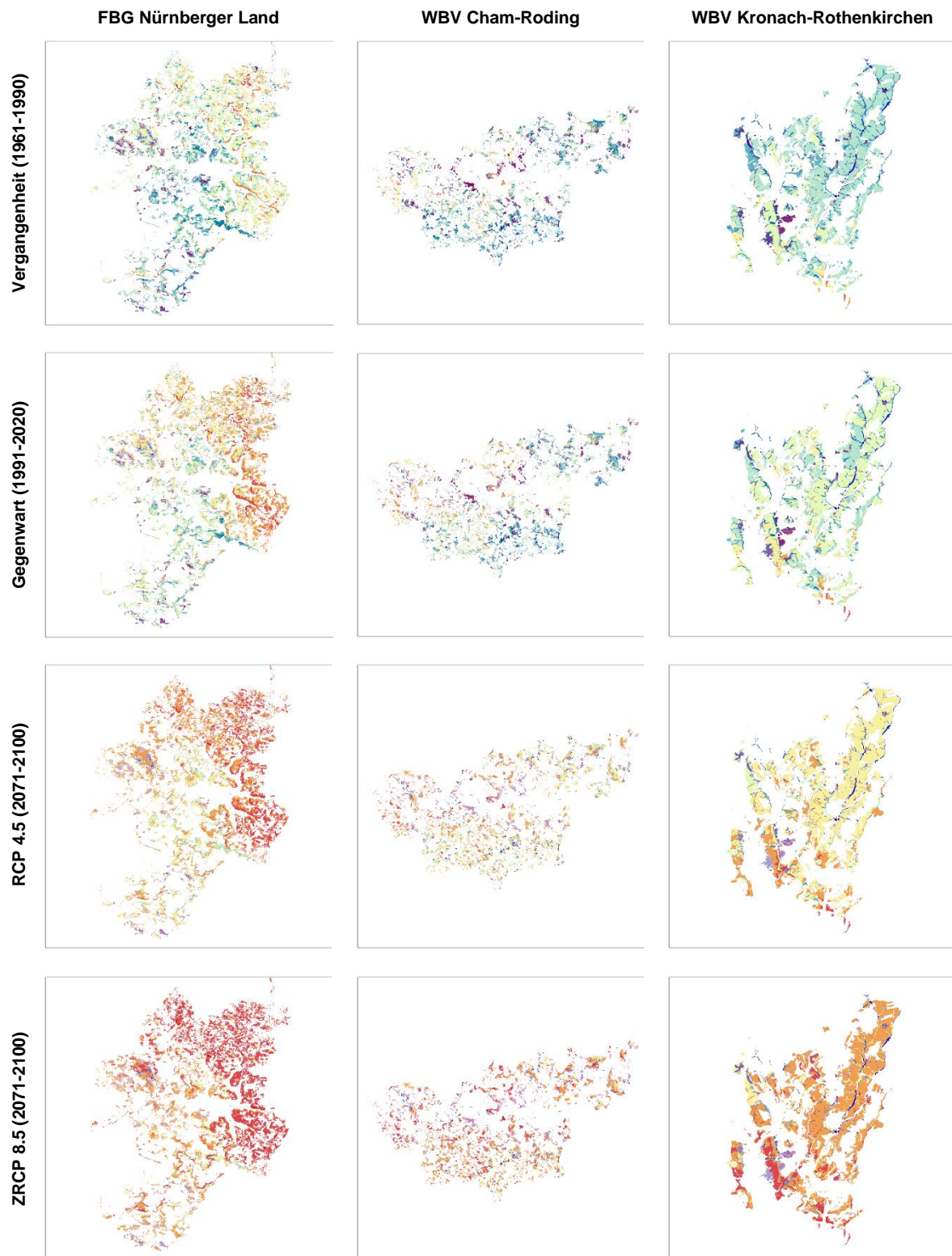


Abbildung 52: Zeitreihe der Wasserhaushaltsstufen in den drei Beispielgebieten

Hinweis: Vergangenheit und Zukunft beruhen auf gemessenen Daten. Das milde und das harte Emissionsszenario bezieht sich auf projizierte Daten für den Zeitraum von 2071 bis 2100.

Fazit und Empfehlungen

Die konventionelle terrestrische Standortkartierung in Bayern erfolgte über lange Zeiträume mit vielen verschiedenen Kartierern und auf Basis von z.T. abweichenden Verschlüsselungssystemen. Auch der Wasserhaushalt im Gelände wurde bayernweit nicht einheitlich angesprochen, sondern mit besonderem Fokus auf den jeweiligen Wuchsraum, so dass i.d.R. nur auf Ebene des Kartier- und Wuchsgebiets relativ zueinander stimmige Wasserhaushaltsstufen resultieren. Auch der Einfluss der Witterung (vorausgehende Trocken- oder Nassperioden, Regen oder Hitze während der Kartierung), Fehleinschätzungen in der nFK, Wüchsigkeit, Vegetation, Überbewertung der Geländeform etc. führten unweigerlich zu fachlichen Unschärfen in der Wasserhaushaltseinschätzung im Gelände.

Vor diesem Hintergrund erfolgte eine weitergehende, objektivierbare Einschätzung des Standortwasserhaushalts mit Hilfe des hydrologischen Modells LWF-Brook90. Allerdings sind auch diese Modellierungen mit Unschärfen behaftet. Diese ergeben sich im Wesentlichen aus der begrenzten Anzahl an zur Verfügung stehenden labor-technisch analysierten Bodenprofilen, den Schwierigkeiten bei der Zuweisung von entsprechenden Bodenprofilen zu den Standorteinheiten.

Vor diesem Hintergrund wurde das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Verfahren entwickelt, dass die Stärken der beiden Verfahren bestmöglich kombiniert und die Limitierungen der jeweiligen Verfahren überwindet. Hierbei werden zur Beurteilung des Wasserhaushalts bzw. zur Auswahl „optimal“ geeigneter labor-technisch analysierter (Leit-)Profile neben Informationen zur Bodenart und -schichtung aus der Standortkartierung v.a. Informationen und Abschätzungen zur Gründigkeit, zum Skelettgehalt und zur Geländeform stärker berücksichtigt. Aufbauend darauf erfolgt dann weiterhin eine regel- und modellbasierte und insofern weitgehend objektivierbare Wasserhaushaltsmodellierung.

Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen

Im Rahmen der Nährstoffbilanzierung wurden hinsichtlich des Wasserhaushaltes Informationen zum Bodenwassergehalt und zum Sickerwasserfluss benötigt. Die Arbeit von Schmidt-Walter et al. (2019) hat gezeigt, dass hinsichtlich der langjährigen Mittelwerte die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle ‚LWF-Brook90‘ (Federer et al., 2003) und ‚TUB-BGR‘-Verfahren (Wessolek et al., 2008) vergleichbar sind. Entscheidend für eine praxisnahe Einschätzung der Sickerwasserraten und der Bodenwassergehalte von Tieflandstandorten sind die Grundwasserflurabstände. Diese wurden anhand der kartierten Wasserhaushaltszahlen abgeleitet (Ahrends et al., 2016). Bei einem Wassergehaltsdefizit im Wurzelraum kann ein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in Abhängigkeit von der Distanz zum Grundwasserspiegel auftreten. Da der kapillare Aufstieg in LWF-Brook90 nicht berechnet wird, wurde von Fleck et al. (2023) ein Verfahren implementiert, mit dem der kapillare Aufstieg in Abhängigkeit von den Standortverhältnissen berücksichtigt werden kann. Da hierbei die Ermittlung des kapillaren Aufstiegs auf dem Verfahren des TUB-BGR Modells basiert, wurde das Modell direkt auf die Untersuchungsgebiete angewandt. Ahrends et al. (2018b) haben die Praxistauglichkeit des Ansatzes für Waldbestände in Niedersachsen demonstriert. Bei den Anwendungen in diesem Projekt wurden noch die modellinterne Unterscheidung nach Laub- und Nadelwald baumartenspezifisch disaggregiert und der aus der nutzbaren Feldkapazität (nFK) abgeleitete Wassergehalt im Boden bei Wassermangel in der Vegetationsperiode angepasst.

Die für die Wasserhaushaltssimulationen notwendigen Eingangsdaten (1) Klimadaten in täglicher Auflösung (Dietrich et al., 2019), sowohl für die aktuellen Klimabedingungen als auch für unterschiedliche Emissionsszenarien; (2) Bodendaten (vgl. AP3); (3) Bestandesdaten: Differenzierung nach Fichte, Kiefer, Douglasie, Buche und Eiche, (4) Reliefparameter: Hangneigung, Exposition, Höhe über NN und (5) die Grundwasserflurabstände aus der Standortkartierung (Ahrends et al., 2016) wurden zunächst für die Untersuchungsgebiete entsprechend der Modellanforderungen abgeleitet. Anschließend wurden die Wasserhaushaltssimulationen zur Ableitung der Sickerwasserraten und der Bodenwassergehalte in den Untersuchungsgebieten für die unterschiedlichen Baumarten, die aktuellen und vergangenen klimatischen Verhältnisse und für die Klimaszenarien RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 durchgeführt.

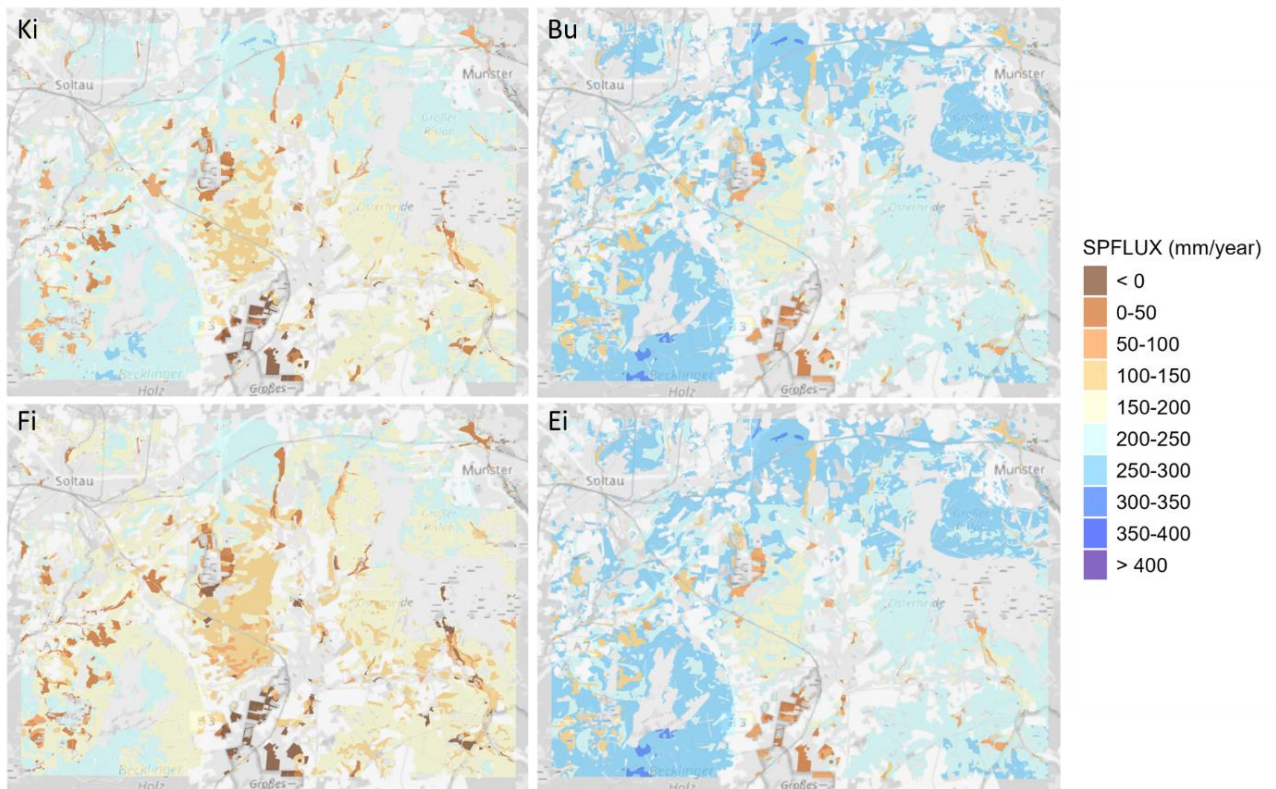


Abbildung 53: Baumartenspezifische mittlere Sickerwasserraten im Zeitraum von 1991-2020 in der Beispielregion Soltau. Klimadatengrundlage Dietrich et al. (2019) und Böhner et al. (2023). Ki: Kiefer; Bu: Buche; Fi: Fichte; Ei: Eiche.

In der Abbildung 53 sind die baumartenspezifischen Sickerwasserraten für die Beispielregion Soltau dargestellt. Hinsichtlich der Baumarten weist die Fichte die geringste Sickerwasserspende auf. Die Unterschiede zwischen Kiefer und Buche sind mit den Angaben von De Vries et al. (2021) sehr gut vergleichbar. In der Abbildung 54 sind die Bodenwassergehalte für die Beispielregion Löwenhagen dargestellt. Die simulierten Wassergehalte liegen im Mittel nahe dem von Sverdrup et al., (1990) empfohlenen Standardwert von $0,2\text{m}^3\text{m}^{-3}$ für Waldböden und entsprechen dem Bereich der von Ahrends et al. (2018b) für bundesweite BZE Standorte mit LWF-Brook90 abgeleitet wurde.

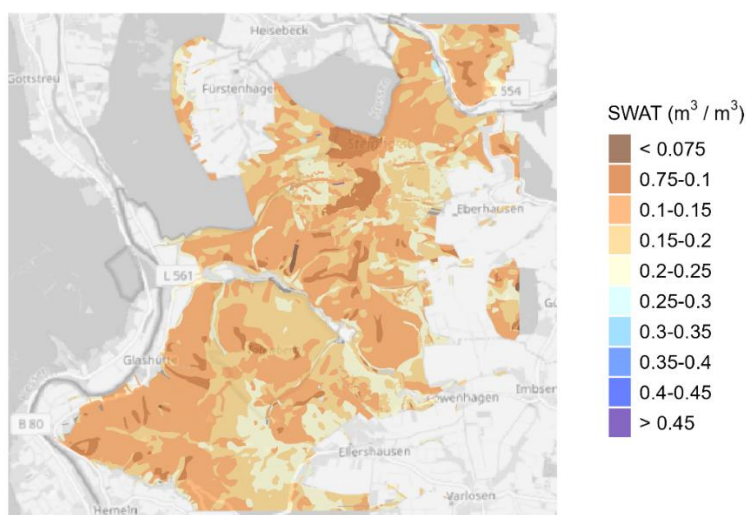


Abbildung 54: Mittlere Bodenwassergehalte bei Fichtenbestockung im Zeitraum von 1991-2020 in der Beispielregion Löwenhagen.

Die Abbildung 55 zeigt die Entwicklung der Sickerwasserraten für unterschiedliche Klimaszenarien. Anhand der Daten ist ein eindeutiger Entwicklungstrend der Sickerwasserraten abzuleiten. Im Vergleich zu den aktuellen Klimabedingungen (‚real‘) der Perioden 1961-1990 und 1991-2020 ergibt sich für die betrachteten Klimaszenarien eine Reduzierung der Sickerwasserraten. Die ebenfalls durchgeführten Simulationen der Sickerwasserraten mit den nachträglichen Prognosen der vergangenen Klimaentwicklung (engl. Hindcasts) durch die Klimamodelle zeigen jedoch, dass im Vergleich zu den realen Klimabedingungen auch für diese schon etwas geringere Sickerwasserraten zu beobachten waren (s. ‚hist‘). Es wird also deutlich, dass für die Grundwasserneubildung die Niederschlagsverhältnisse im Winterhalbjahr wesentlich entscheidender sind als die Temperaturerhöhungen im Sommerhalbjahr. Entsprechend lässt sich auch für die jährlichen Bodenwassergerhalte ein Trend erkennen. Es zeigt sich eine leichte Verringerung der Wassergehalte in der Referenzperiode 2071-2100 (Abbildung 56).

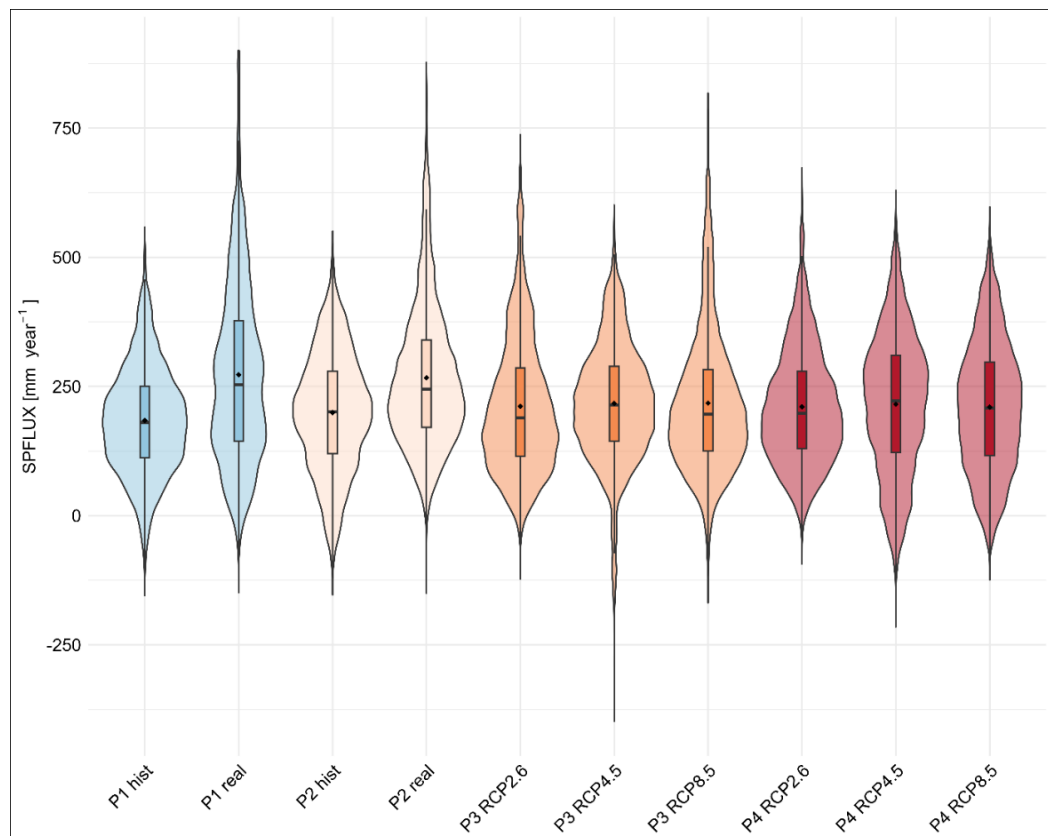


Abbildung 55: Sickerwasserraten bei Buchenbestockung in der Beispielregion Löwenhagen für unterschiedliche Klimaszenarien (RCP 2.6, 4.5 und 8.5) und Referenzzeiträume (P1: 1961-1990; P2: 1991-2020; P3: 2041-2070; P4: 2071-2100). Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung.

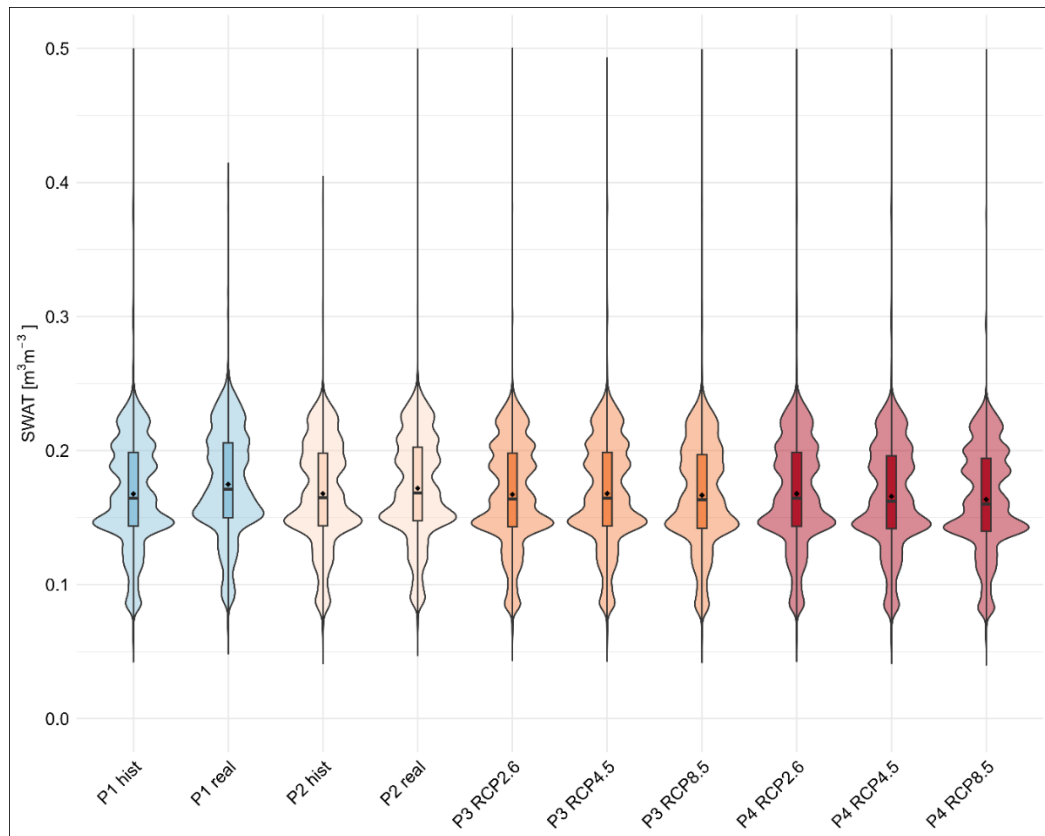


Abbildung 56: Bodenwassergehalt bei Buchenbestockung in der Beispielregion Löwenhagen für unterschiedliche Klimaszenarien (RCP 2.6, 4.5 und 8.5) und Referenzzeiträume (P1: 1961-1990; P2: 1991-2020; P3: 2041-2070; P4: 2071-2100). Violindiagramm mit Boxplot-Überlagerung.

Baden-Württemberg

Die Wasserhaushaltsmodellierungsroutinen aus dem Projekt WHH-KW (FKZ: 22WK414103; Teilvorhaben 3) konnten erfolgreich für die Beispielgebiete angewandt werden. Um zusätzlich zu den Wasserhaushaltsstufen Eingangsparmeter für die Nährstoffbilanzierung aus Arbeitspaket 5 zu erzeugen, wurden die Bodenprofile überall auf 2m Tiefe extrapoliert und die Modellergebnisse bis 1m Tiefe abgegriffen. In Abbildung 57 sind für die Beispielgebiete Karten mit den modellierten Wasserhaushaltsstufen dargestellt. Es sind sowohl die Modellergebnisse für den Zeitraum 1991-2020, basierend auf gemessenen Klimadaten, als auch die Ergebnisse für den Zeitraum 2071-2100 für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 dargestellt.

In den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 ist kein deutlicher Trend im Wasserhaushalt zu erkennen. Im Szenario RCP 4.5 entwickelt sich der Wasserhaushalt dort sogar hin zu frischeren Böden. Dies lässt sich zum einen dadurch erklären, dass in den Klimaprojektionen mit dem prognostizierten Temperaturanstieg ein steigender Bestandesniederschlag (Abbildung 58) einhergeht. Beim RCP 8.5 Szenario werden die ziemlich frischen Standorte tendenziell zu mäßig frischen Standorten, das Gesamtbild bleibt aber kaum verändert. Beim Testgebiet 3/09 ist die Veränderung des Wasserhaushalts deutlich stärker hin zu trockeneren Standorten. Bereits beim RCP 4.5 Szenario nimmt hier der Anteil sehr frischer Standorte deutlich ab. Im RCP 8.5 Szenario ist ein Großteil der Beispielregion im mäßig trockenen bis mäßig frischen Bereich angekommen, während derzeit frische und sehr frische Standorte überwiegen. In den Wasserhaushaltskarten wird außerdem die unterschiedliche räumliche Verteilung in den Beispielgebieten deutlich. Während im Beispielgebiet 3/09 der Wasserhaushalt primär durch das Relief geprägt ist und eher großräumige Unterschiede vorliegen (trockenere Südhänge und feuchtere Nordhänge und Höhenlagen), zeigt sich in den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 eine größere kleinräumige Variabilität, die durch die Heterogenität des Substrats erklärt werden kann.

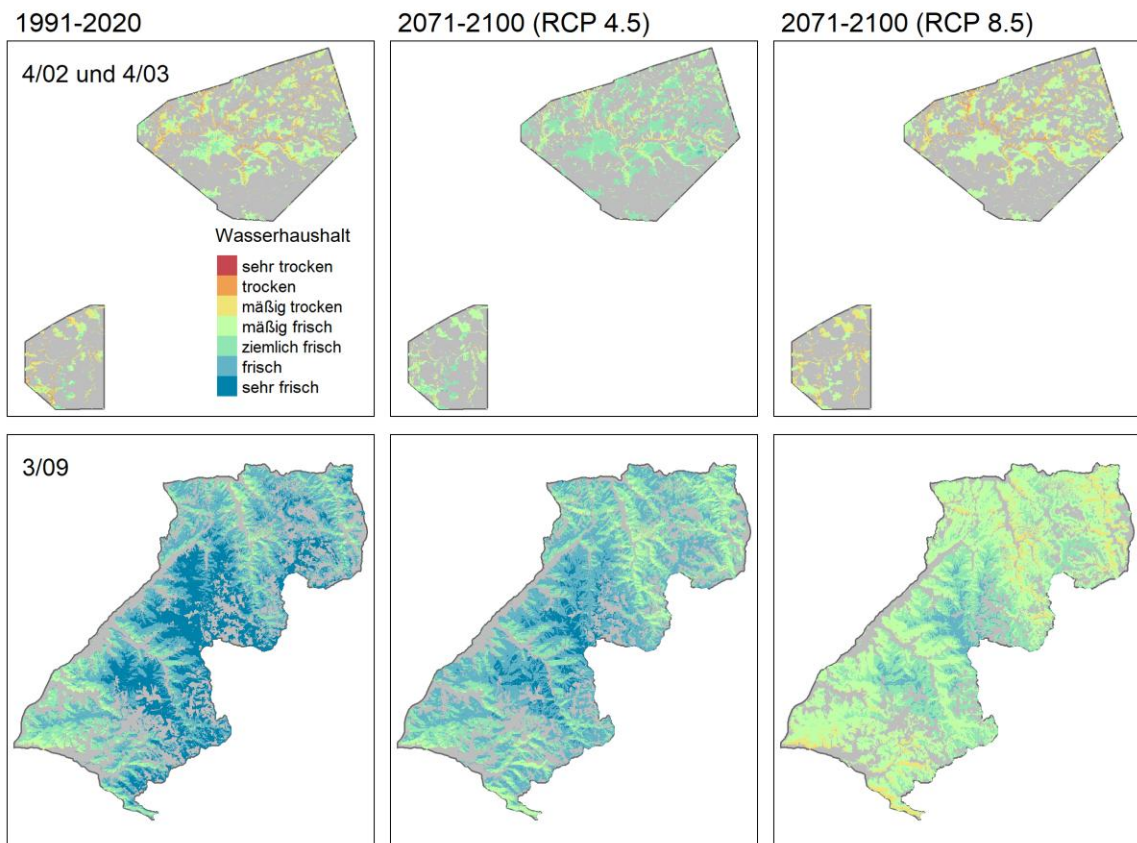


Abbildung 57: Modellierte Wasserhaushaltsstufen über alle drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg für unterschiedliche Klimaszenarien (past, RCP 4.5 und RCP 8.5).



Abbildung 58: Zeitliche Entwicklung von Wassergehalt, Sickerwasser und Bestandesniederschlag über alle drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg gemittelt für unterschiedliche Klimaszenarien (past, RCP 4.5 und RCP 8.5).

Brandenburg

Für Brandenburg wurde der Wasserhaushalt für den gesamten Wald auf einem Raster von 100x100m, insgesamt 1.18 Mio. Punkte, modelliert. Dazu wurde das Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 auf eine zufällige Auswahl von 13.000 Punkten angewandt und die Ergebnisse mit statistischen Verfahren auf das gesamte Punkteraster übertragen (siehe Anhang zu Teilvorhaben 5). Zur Parametrisierung von LWF-Brook90 wurden die Ergebnisse aus dem Projekt WHH-KW (Weis et al., 2023a) übertragen. Simuliert wurde jeweils der Zeitraum 1961-2020 für historische Messdaten und für das Klimamodell MPI-ESM-LR(r1) CCLM4-8-17 die Referenzperiode 1971-2000 sowie die Periode 2071-2100 der beiden Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (Dietrich et al., 2019; Böhner et al., 2023). Für die Parametrisierung der Wasserhaushaltssimulation mit LWF-Brook90 wurden Modellbestände für Kiefer, Buche und Traubeneiche gebildet. Dabei wurde der Blattflächenindex nach standortabhängiger Bonität variiert. Die Datengrundlage für die Bonität wurde dem Datenspeicher Wald (DSW2, 2019) entnommen. LWF-Brook90 wurde auf alle zufällig ausgewählten Punkte für alle drei Baumarten und alle o.g. Zeiträume angewandt. Standorte, auf denen die Baumarten entsprechend dem Datenspeicher Wald nicht vorkamen, wurden für die jeweilige Baumart ausgenommen. Von besonderer Bedeutung war die Modifikation von LWF-Brook90 (Weis et al., 2023a), mit der auch Grundwassereinfluss berücksichtigt werden konnte. Basierend auf den Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulation wurde das Trockenstressrisiko anhand der Anzahl von Trockenjahren in einer 30-jährigen Periode dargestellt (Weis et al., 2023b). Die Identifizierung von Trockenjahren basiert auf dem Transpirationsindex als Quotient aus tatsächlicher zu potenzieller Transpiration (T/T_{pot}). Die Ergebnisse der drei untersuchten Baumarten wurden dabei zusammengefasst.

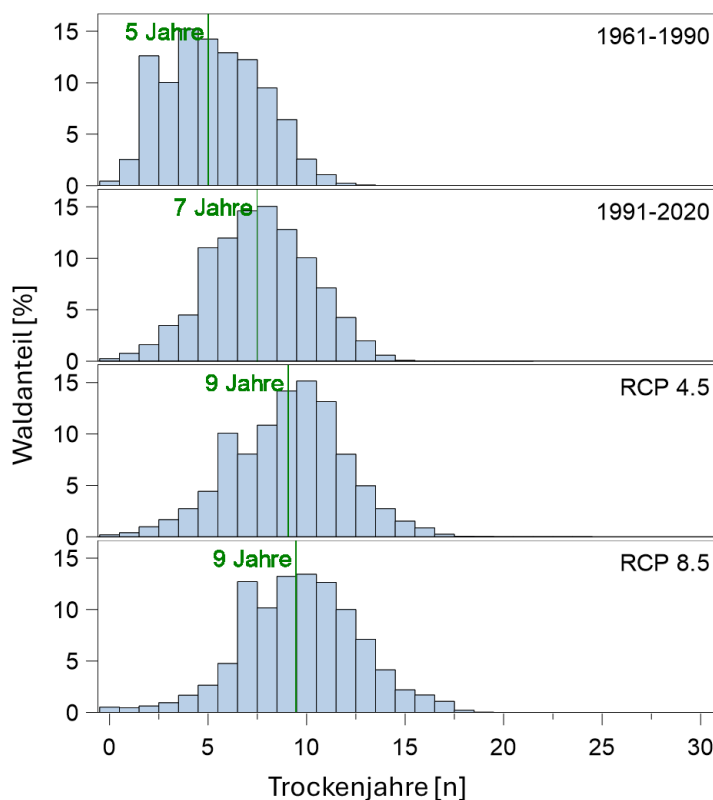


Abbildung 59: Anzahl der Trockenjahre in einer 30-jährigen Periode in den auf historischen Klimadaten basierenden Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 sowie den auf dem Klimamodell MPI-ESM-LR(r1) CCLM4-8-17 basierenden Modellläufen 2071-2100 der Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 (Grün = Median).

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Zunahme des Trockenstressrisikos zwischen den Perioden 1961-1990 und 1991-2020, sowie eine darüber hinaus gehende zukünftige Zunahme des Trockenstressrisikos in beiden Klimaszenarien im Zeitraum 2071-2100 (Abbildung 59). Die Unterschiede in der Anzahl der Trockenjahre zwi-

schen den beiden Emissionsszenarien sind dabei gering. Der Grund hierfür liegt trotz deutlicher Temperaturdifferenz von 10.5°C im RCP 4.5 zu 12.2°C im RCP 8.5 in einer deutlichen Zunahme der Jahresniederschläge im RCP 8.5. Diese betragen im RCP 8.5 für Brandenburg 629 mm, im RCP 4.5 dagegen 594 mm. Die Jahresniederschläge der Periode 1961–1990 betragen 562 mm und in der Periode 1991–2020 588 mm.

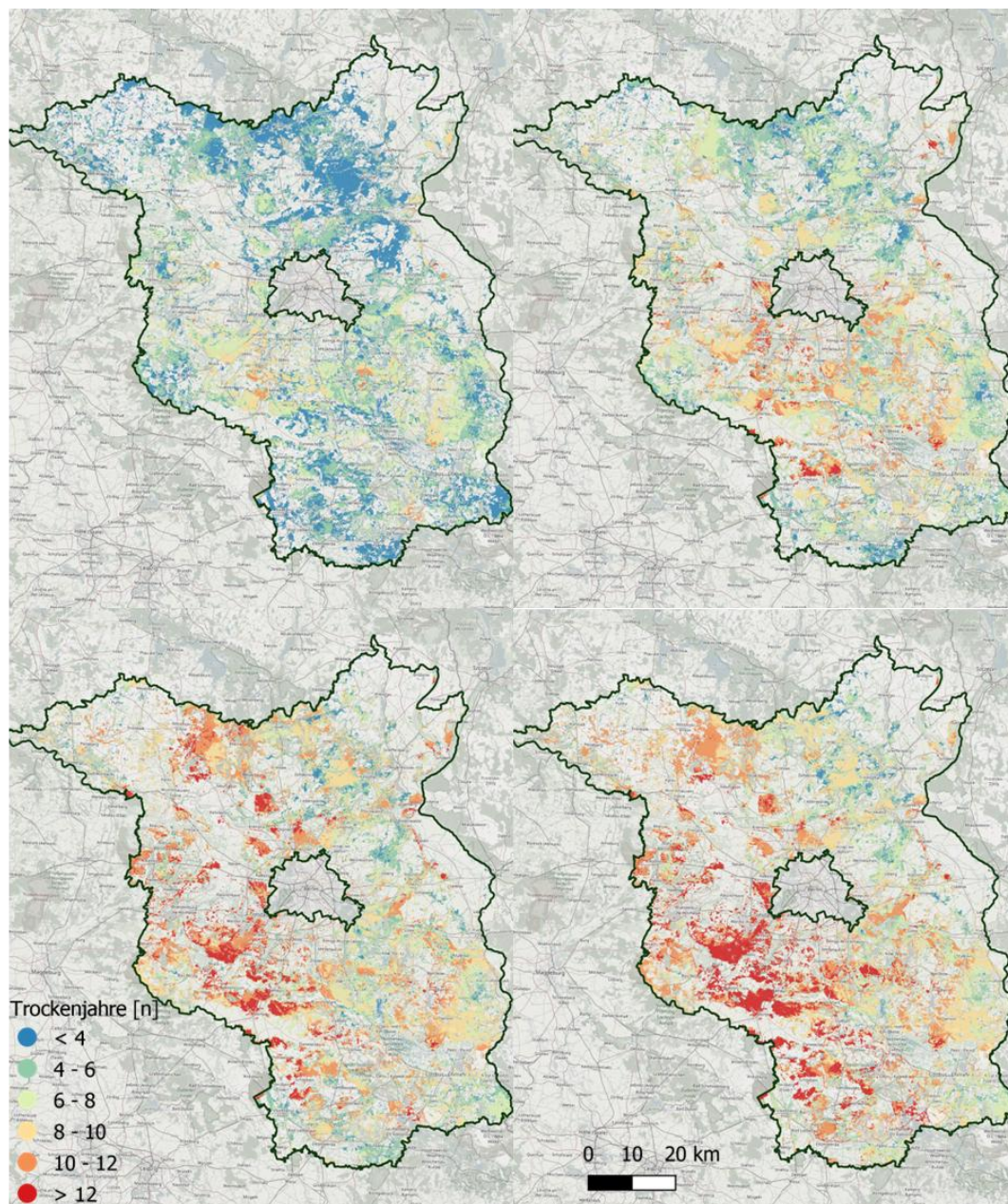


Abbildung 60: Räumliche Verteilung der Anzahl der Trockenjahre einer 30-jährigen Periode in den auf historischen Klimadaten basierenden Zeiträumen 1961-1990 (oben links) und 1991-2020 (oben rechts), sowie den auf dem Klimamodell MPI-ESM-LR(r1) CCLM4-8-17 basierenden Modellläufen 2071-2100 der Szenarien RCP 4.5 (unten links) und RCP 8.5 (unten rechts)

Eine Zunahme der Jahresniederschläge im RCP 8.5 wird für Brandenburg nicht nur für das verwendete Model vorhergesagt. Ein Vergleich verschiedener Modelle ergab für Brandenburg eine Zunahme im Mittel um 6% bei einer Schwangsbreite der Modelle von -13% bis +20% (DWD, 2019). Abbildung 60 zeigt, dass sich die räumlichen Muster der Trockenheit bei den Klimaprojektionen gegenüber den historischen Daten ändern. Der Zeitraum 1961-1990 wies eine Nord-Süd-Differenzierung Brandenburgs auf, mit einem trockeneren Streifen südlich von Berlin. Dagegen weist insbesondere das RCP 8.5 mit einer deutlichen Zunahme der Trockenheit in den westlichen Landesteilen eine West-Ost-Differenzierung auf. Dieser Befund wird gestützt durch eine vergleichende, landkreisbezogene Auswertung von 11 Modellen im RCP 8.5, darunter auch das hier verwendete Model (Pfeiffer et al., 2015). Darin zeigten die östlichen und südlichen Landkreise mit Ausnahme des

Südostens eine stärkere Zunahme des Winterniederschlags als die westlichen Landkreise. Der Sommerniederschlag nimmt hingegen in westlichen Landesteilen ab, im übrigen Land zu.

Um die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation für die Praxis nutzbar zu machen, ist es notwendig Abschätzungen zukünftiger mit gegenwärtigen oder vergangenen Verhältnissen in Beziehung setzen zu können. So kann der Praktiker sein Wissen zur gegenwärtigen Standorteignung von Baumarten auf die Zukunft übertragen. Dazu haben wir die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation mit den Standorteinheiten in Verbindung gesetzt und den Einfluss von Grundwasser und Substrat auf die Änderung des Trockenstressrisikos herausgearbeitet (Abbildung 61 und Abbildung 62). Abbildung 61 zeigt die erwartbare Minderung des Trockenstressrisikos bei zunehmendem Grundwassereinfluss. Dabei wird der für die Weiterbearbeitung in Brandenburg wichtige Schlüssel nach SEA95 (Schulze und Kopp, 2013) verwendet. Anhand von Abbildung 61 kann abgeschätzt werden, inwieweit Grundwasser den Einfluss des Klimawandels abmildern kann. Zum Beispiel werden Bestände auf Standorten der Feuchtestufe T1 nach Projektion im RCP 4.5 ein vergleichbares Trockenstressrisiko aufweisen, wie auf Standorten der Feuchtestufe T2g in der Periode 1991–2020. Als weiteres Beispiel liegt die Feuchtestufe N1 dagegen nach der Projektion im RCP 8.5 noch unter dem Trockenstressrisiko der Feuchtestufe T2 in der Periode 1961–1990. Bei der Wasserhaushaltssimulation wurde die Grundwassertiefe konstant gehalten. Bei erwartbaren Grundwasserabsenkungen können zur Beurteilung des zukünftigen Trockenstressrisikos die entsprechenden Feuchtestufen den jetzigen Feuchtestufen gegenübergestellt werden.

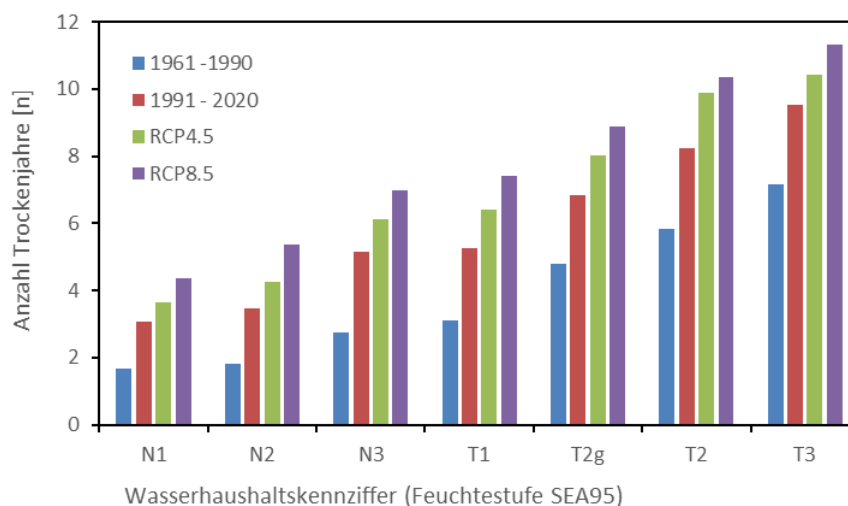


Abbildung 61: Anzahl der Trockenjahre pro 30-jähriger Periode nach Feuchtestufen entsprechend SEA95 (Schulze und Kopp, 2013), mit N1 = nass, N2 = feucht, N3 = frisch (entwässert), T1 = frisch, T2g = schwach grundfrisch, T2 = mäßig frisch, T3 = trocken. RCP 4.5 und RCP 8.5 geben die Projektionen für den Zeitraum 2071–2100 wieder.

In Abbildung 62 ist die Anzahl der Trockenjahre einer 30-jährigen Periode gegen die Substratgruppen der Standorteinheiten anhydromorpher Standorte (T2-Standorte nach SEA95; Schulze et al., 2013) aufgetragen. Der Substrateinfluss zeigt sich daran, dass Bestände auf Böden aus Lehm (L) sowie Sand und Lehm (S + L) deutlich weniger Trockenjahre aufweisen als Bestände auf sandigen Substraten (Abbildung 62). Bei beiden Substratgruppen liegt das Trockenstressrisiko der Jahre 1991-2020 noch unter dem von sandigen Substraten der Periode 1961-1990. Eine Lehm-Unterlagerung ab 0,8m Tiefe trägt bei Sandböden zu einer leichten Verbesserung der Wasserversorgung bei. Das zukünftige Trockenstressrisiko wird bei Böden aus Sand und Lehm (S + L) sowie bei Böden aus Lehm (L) unter dem Trockenstressrisiko auf Sandböden der Periode 1961-1990 liegen. Weiterhin deutet der Vergleich der beiden Emissionsszenarien daraufhin, dass bindigere Böden von der Zunahme der Winterniederschläge beim RCP 8.5 profitieren können. Somit können Substrateigenschaften die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in einem gewissen Rahmen abmildern.

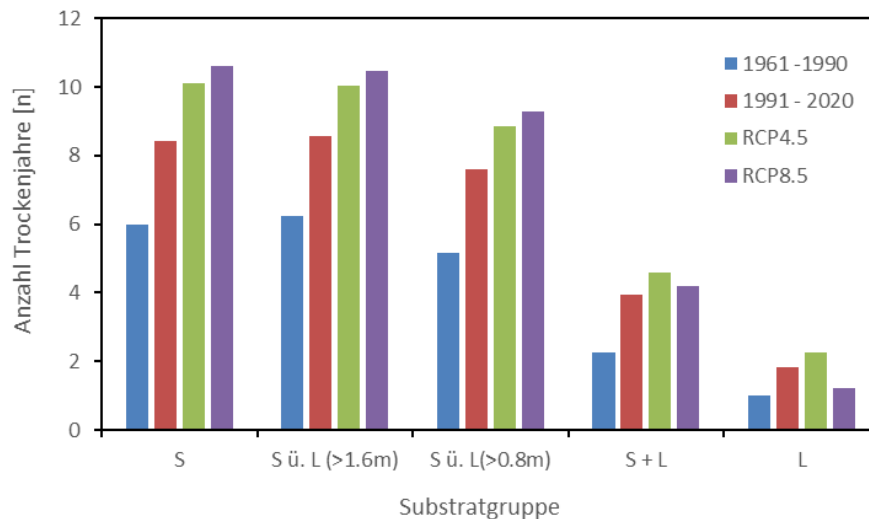


Abbildung 62: Anzahl der Trockenjahre pro 30-jähriger Periode nach Substratgruppen auf T2-Standorten nach SEA95 (Schulze und Kopp, 2013), mit S = sandiges Substrat, S ü. L (>1.6m) = sandiges Substrat mit Lehm-Unterlagerung in einer Tiefe > 1,6m, S ü. L (>0.8m) = sandiges Substrat mit Lehm-Unterlagerung in einer Tiefe >0,8m, S + L = Substrat aus Sand und Lehm, L = lehmiges Substrat. RCP 4.5 und RCP 8.5 geben die Projektionen für den Zeitraum 2071-2100 wieder.

Ein Vergleich der standortbezogenen Trockenstressindizes ermöglicht Projektionen mit dem Wissen über den gegenwärtigen Zustand abzugleichen. Substrateigenschaften und Grundwassereinfluss können die Auswirkungen des Klimawandels in einem gewissen Maße abmildern. Die Daten zeigen aber auch, dass ein Großteil der Standorte, hauptsächlich anhydromorphe Standorte auf sandigen Substraten, zukünftig außerhalb des gegenwärtigen Erfahrungshorizonts liegen werden. Aus Platzgründen sind in Abbildung 61 und Abbildung 62 die über ganz Brandenburg gemittelten Werte dargestellt. Aufgrund von Klimavariationen innerhalb von Brandenburg ist es aber notwendig, diese Auswertung wuchsgebietsweise vorzunehmen.

Länderspezifische Umsetzung der Ergebnisse

Bayern

Verwendete Datengrundlagen

- regionalisierter Klimadatensatz der Universität Hamburg (vgl. Kapitel 1.1.3)
- Standortkartendaten des VfS (Verein für Forstliche Standortskartierung Bayern)
- Bodenprofile des Bodeninformationssystems (BIS) des LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt)
- Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK25) des LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt)

Anbaurisiko

Die Aufbereitung der Anbaurisiko-Information für Förster/-innen und Waldbesitzer/-innen ist ein wichtiger Aspekt der Produktentwicklung. Bei der agilen Software-Entwicklung wird die User-Experience (UX) als eigener Bereich von der inhaltlich-technischen Entwicklung getrennt.

Im Projekt StWM-KPW wurden verschiedene Darstellungsoptionen für das Anbaurisiko entwickelt und auf gemeinsamen Veranstaltungen mit Förster/-innen und Waldbesitzer/-innen diskutiert. Zu den Veranstaltungen zählten sowohl Exkursionen im Rahmen des Projekts als auch zahlreiche Vorträge auf regionalen Veranstaltungen und nicht zuletzt auf Webinaren der FNR. Im Folgenden sollen zwei der Darstellungsvarianten mit einer kurzen Zusammenfassung der Rückmeldungen aus der Praxis vorgestellt werden. Eine dritte Variante wird im Rahmen des Kapitels Ergebnisvorstellung und -diskussion dargestellt.

Die größte Herausforderung lag darin, die Komplexität und Unsicherheit im Klimawandel und einer angepassten Waldbewirtschaftung intuitiv verständlich aufzubereiten. Bisher orientierten sich insbesondere die Waldbesitzenden und aber auch Försterinnen und Förster an den Baumarteneignungstabellen in den Standortoperaten – eine klimastatische gutachtliche Einschätzung unter Berücksichtigung der ökonomischen Leistungsfähigkeit und wirtschaftlichen Verwertbarkeit. Im Gegensatz dazu fokussiert das Anbaurisiko allein auf das klimatisch-standörtliche Risiko (vgl. Infokasten auf Seite 37) und geht strikt regelbasiert vor. Da das Anbaurisiko im Bayerischen Standortinformationssystem wie im StWM-KPW mehrere mögliche Klimazukünfte einbezieht (Mette et al. 2025), braucht der Anwender Führung und zusätzlich Informationen mit Blick auf die Frage: „An welchem Risiko soll ich mich orientieren?“. Dazu ist es zunächst sinnvoll, das Anbaurisiko szenarioübergreifend in eine Risikoaussage zu aggregieren: „Ab welchem Klimaszenario fällt das Risiko einer Baumart in eine erhöhte Risikoklasse?“ Während das Anbaurisiko in Abbildung 63 und Abbildung 64 noch einzeln für jedes Klimaszenario dargestellt wird, wurde es für den Entwurf der Baumarteneignungstabelle in Tabelle 29 schon aggregiert. Gerade für Laien, die sich nicht tiefer mit verschiedenen Klimaszenarien auseinandersetzen möchten, ist die szenarioübergreifende Aggregation die einfachere Lösung.

Variante 1: Das Poster in Abbildung 63 zeigt die Klimaabhängigkeit des Anbaurisikos für verschiedene Klima-Projektionen. Die Reihung der Baumarten und Klima-Projektionen gibt schnell erfassbar Aufschluss über die Klimatoleranz der Baumart im Klimawandel.

Rückmeldungen: Försterinnen und Förster verstehen die Grafik gut, allerdings war die häufigste Frage: „Welcher Klimawandel ist denn der Wahrscheinlichste?“. Es braucht daher eine klare Einordnung, nach welcher Klimaprojektion sie in welcher Situation die Waldbesitzenden beraten. In Beständen mit standörtlichem, d. h. bodenbezogenem Risiko wird das „schön geordnete“ klimatische Risiko von diesem überlagert („durcheinandergbracht“).

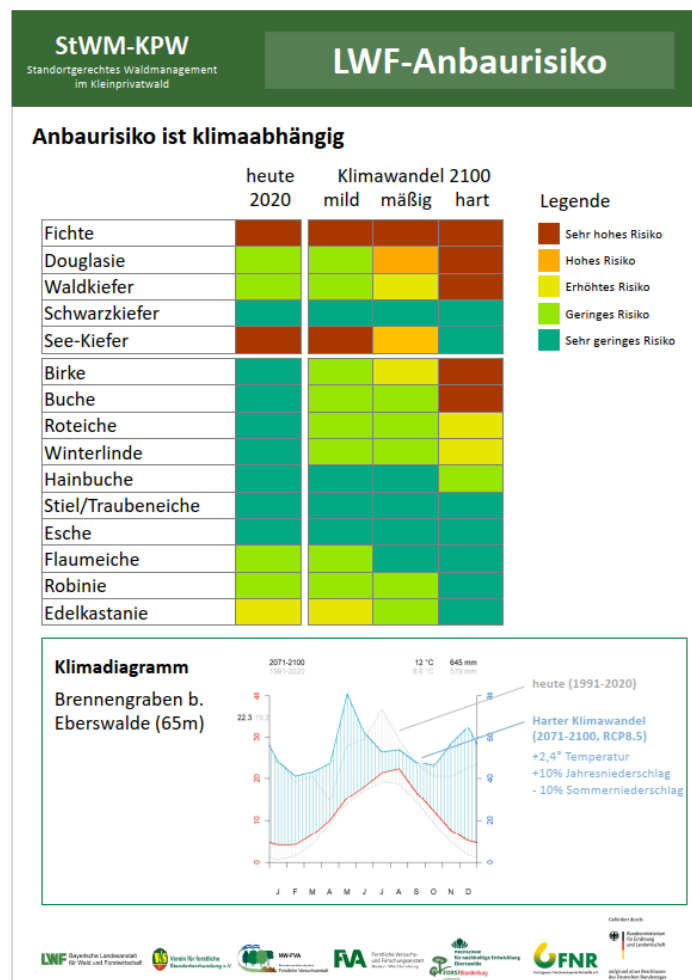


Abbildung 63: Darstellung des Anbaurisikos als Posterbeitrag auf einer gemeinsamen Exkursion mit Försterinnen und Förstern und Waldbesitzenden in Eberswalde (Juni 2024).

Variante 2: Die hochaufgelöste Anbaurisiko-Information auf Standortebebene wird regional verallgemeinert, indem man in erster Instanz das Klimarisiko gebietsweise auf Höhenstufen aufteilt – im Beispiel des Nürnberger Lands für die Höhenstufen 300-400 m und 400-700 m (Abbildung 64). Dort wird das Risiko der einzelnen Baumarten für heute und verschiedene Klimaprojektionen dargestellt. In zweiter Instanz wird einerseits für die Generierung einer dynamischen Baumarteneignungstabelle das Klimarisiko szenario-übergreifend weiter verdichtet:

- **rot** = heute schon erhöhtes Risiko
- **orange** = bei mildem Klimawandel erhöhtes Risiko
- **gelb** = bei mittlerem Klimawandel erhöhtes Risiko
- **hellgrün** = bei hartem Klimawandel erhöhtes Risiko
- **dunkelgrün** = kein erhöhtes Risiko auch bei hartem Klimawandel.

Andererseits werden standortspezifisch die modifizierenden Risikofaktoren (nFK, Wassereinfluss, Basenverlaufstyp) ermittelt. In dem Entwurf einer dynamischen Baumarteneignungstabelle von Tabelle 29 wird in die oberste Zeile das reine Klimarisiko baumartenspezifisch aufgetragen und in den folgenden Zeilen das standörtlich modifizierte Anbaurisiko.

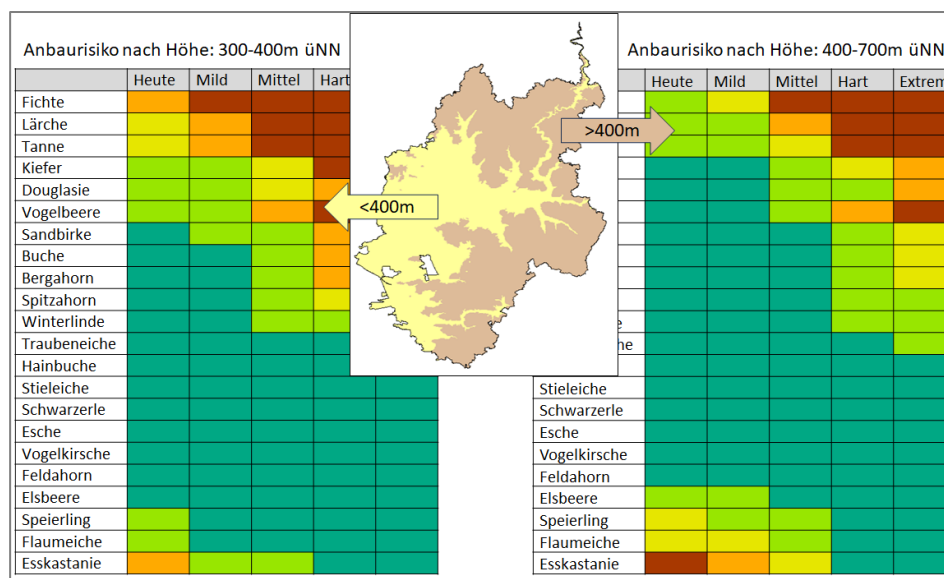


Abbildung 64: Darstellung des Anbaurisikos im Rahmen eines LWF-Regional Vortrags in Mittelfranken (Juli 2024).

Rückmeldung: Die Notwendigkeit einer klimadynamischen Baumarteneignungsbetrachtung wird als sehr wichtig angesehen. Die Aggregation bestimmter Höhenstufen vereinfacht das Verständnis der Klimasensitivität der Baumarten und der regionalen Baumarteneignung. Die szenario-übergreifende Bewertung des Klimarisikos sowie die standörtliche Differenzierung sind erklärungsbedürftig. Diese Information unterstützt eher die forstlich ausgebildeten Fachleute bei der Baumartenempfehlung im Rahmen von Beratungsterminen mit Forstbetriebsgemeinschaften oder einzelnen Waldbesitzenden.

Die weiterentwickelten harmonisierten und klimadynamisierten Standortinformationen wurden für die Arbeit und Darstellung in GIS-Anwendungen und auf Karten intuitiv verständlich und erstmalig nach einem bayernweit einheitlichen Schema aufbereitet (s. Abbildung 65 und Abbildung 66). Es wurde darauf geachtet, möglichst viele der wertvollen Standortinformationen abzubilden und gleichzeitig das Kartenbild nicht zu überladen.

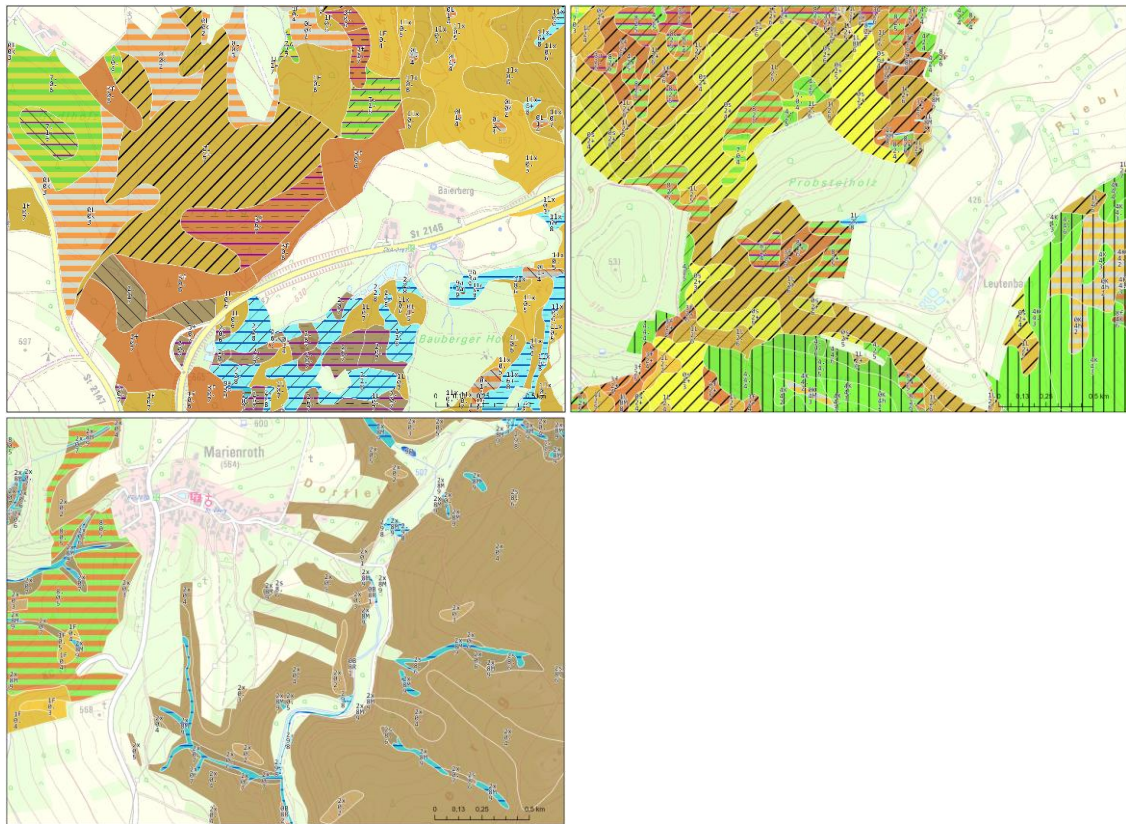


Abbildung 65: Ausschnitte aus den weiterentwickelten Standortkarten der drei bayerischen Beispielgebiete. Links oben: Cham-Roding, rechts oben: Nürnberger Land, links unten: Kronach-Rothenkirchen.

Der Aufbau der Darstellung erfolgte dabei systematisch unter Verwendung mehrerer Layer. Die Basis bilden die Füllfarben der Polygone, die je nach Bodenart eine andere Grundfarbe erhalten. Unter Einbeziehung der Nassstandorte und Gewässer wurden deshalb sechs Grundfarben ausgewählt, die an bisher in Bayern gängige Farbdarstellungen in Standortkarten angelehnt sind. Für weitere in der forstlichen Praxis bedeutungsvolle Bodengruppen (im weiteren Sinne) wie Schichtböden, Block-Humus-Böden, Humuskarbonat- und Humusdolomitböden oder Schotter-, und Kiesböden erfolgte eine Kombination aus horizontalen Schraffuren der Bodenarten-Grundfarben (Fein-/Groboden).

Je nach Wasserhaushaltsstufe wurden die Grundfarben dunkler (für frischere Standorte) oder heller (für trockenere Standorte) dargestellt. Abweichend zu gesonderten Wasserhaushaltskarten, die acht Wasserhaushaltsstufen beinhalten, wurden diese Stufen in den weiterentwickelten Standortkarten aus Gründen der Übersichtlichkeit und Darstellbarkeit auf vier beschränkt.

Zudem erscheint für jedes Standortpolygon die weiterentwickelte Standortziffer als Label, aufgeteilt in drei gestapelten Zeilen. Darin sind alle vorhandenen Informationen codiert, auch jene, die in der Karte visuell nicht abgebildet werden können. Die erste Ziffer jeder Zeile des Labels gibt die bekannte Standortziffer wieder, sodass von oben nach unten gelesen der bekannte dreistellige Standortcode zu erkennen ist. Die den Nummern nachgeordneten Buchstaben und Sonderzeichen sind Kürzel für weitere erfasste und relevante Bodeneigenschaften, die bislang nur unzureichend wiedergegeben werden konnten.

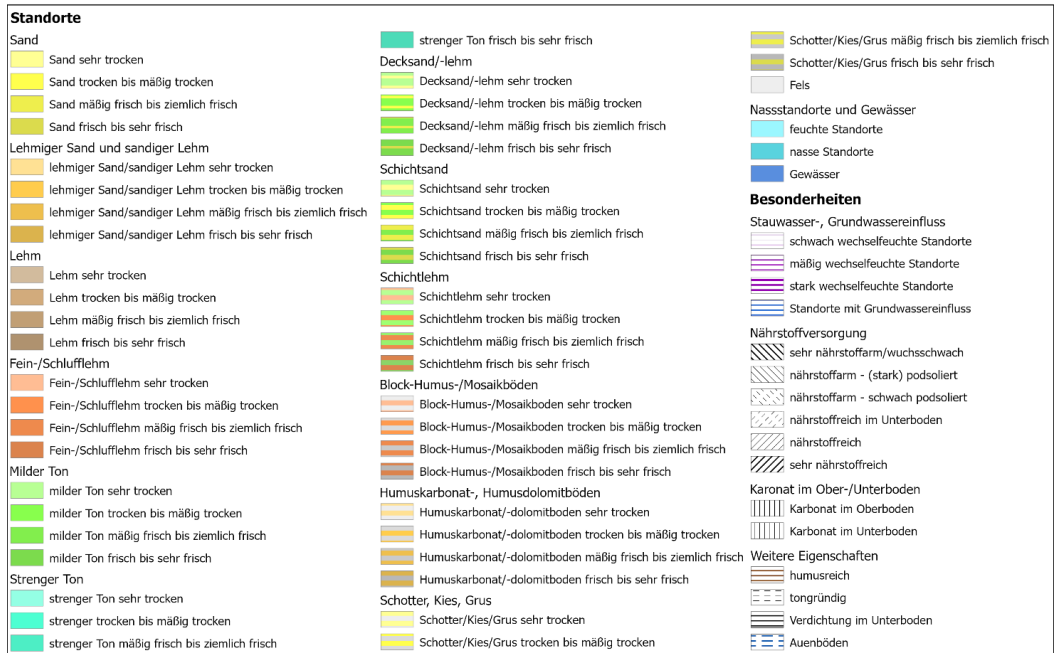


Abbildung 66: Weiterentwickelte bayernweit gültige Legende zur Kombination von Bodenart, Standortwasserhaushalt und forstlich relevanten standörtlichen Besonderheiten.

Die Harmonisierung und Erstellung einer Farblegende für alle Substrate eröffnet ergänzend die Möglichkeit, eine bayernweite Substratkarte zu erstellen (s. Abbildung 67). Dies kann einen guten Überblick liefern, um schnell die Hauptsubstrate in den verschiedenen Regionen ausfindig zu machen. Für die Großansicht wurde auf Schraffuren, Signaturen, Labels und die Darstellung des Wasserhaushaltes durch Farbabstufungen verzichtet. Ebenso wurden Substratarten zusammengefasst, z.B. Sande, Decksande und Schichtsand als eine Farbe (gelb) dargestellt.

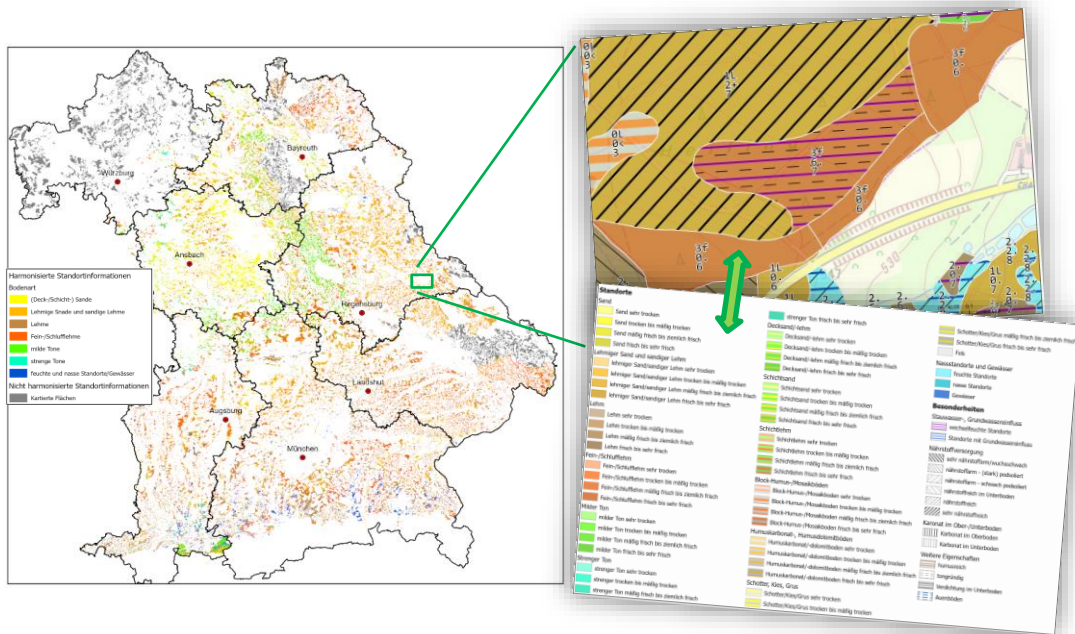


Abbildung 67: Substratkarte der vom VfS kartierten Gebiete in einer bayernweiten Ansicht. Für die Gesamtdarstellung wurde die Legende vereinfacht, siehe links im Bild. Die Darstellung von Schraffuren und Signaturen wird erst im Zoom sinnvoll und möglich, wie rechts in der Grafik zu sehen ist.

Darstellungsbeispiele in den Anwendungen: BayWIS und VfS-Viewer

Die Ergebnisse und Produkte des vorliegenden Projekts werden nach einer Übertragung auf die Flächen außerhalb der Beispielgebiete Zug um Zug in die bereits bestehenden zentralen forstlichen Informationsplattformen in Bayern eingebunden. Für die Beispielgebiete wurde dies bereits im Rahmen von Demo- und Testversionen umgesetzt.

Grundsätzlich haben Waldbesitzende des kleinen und mittleren Privatwaldes in Bayern die Möglichkeit die entsprechenden Informationen im Rahmen der kostenfreien Beratung durch die Bayerische Forstverwaltung zu erhalten. Hierzu sind z. B. das klimatische und standörtliche Anbaurisiko in das Bayerische Waldinformationssystem BayWIS eingebunden und als Thema BaSIS-Anbaurisiko dargestellt (s. Abbildung 68). Bislang wird das standörtliche Risiko hierbei über Bodeninformation aus der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 abgeleitet. Wie in den Beispielgebieten sollen künftig auch die Standorteinheiten der VfS-Kartierung flächendeckend eingebunden und so die höhere räumliche Auflösung und die Zusatzinformationen der Standortkartierung nutzbar gemacht werden. Bislang sind die Informationen der VfS-Standortkartierungen nur einsehbar eingebunden. Eine flächendeckende fachlich-inhaltliche und technische Verknüpfung mit Anbaurisiko-, Standortwasserhaushalt- und Nährstoffinformationen fehlt bislang und soll aufbauend auf den im vorliegenden Projekt erarbeiteten Methoden und Verfahren erfolgen.

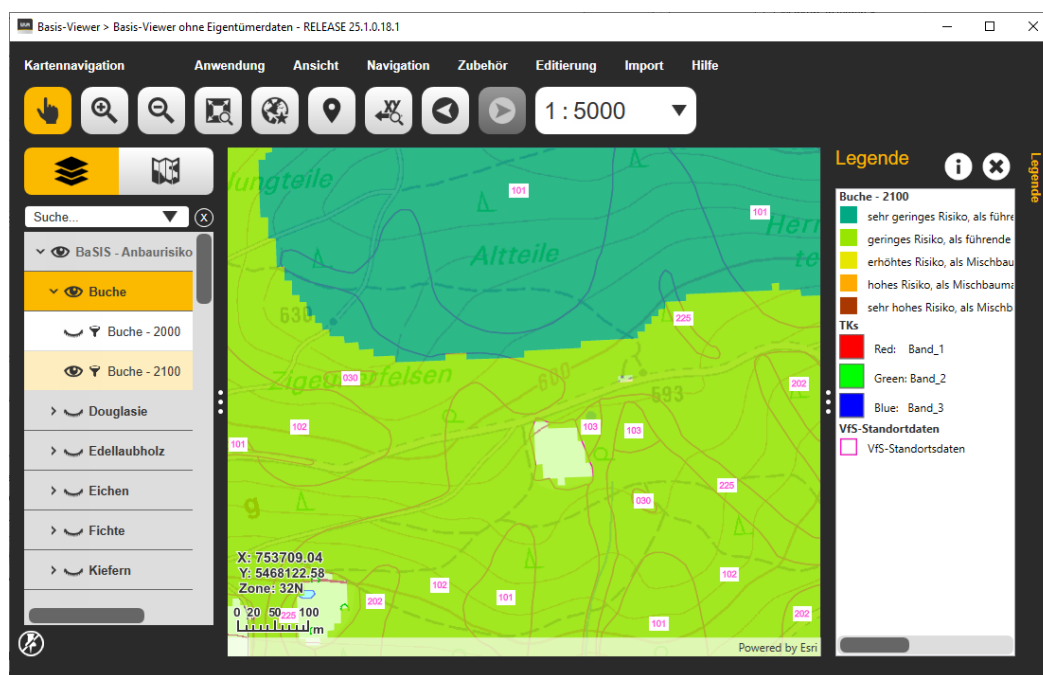


Abbildung 68: Screenshot des Bayerischen Waldinformationssystems BayWIS. Eingelblendet im Kartenfenster sind das Anbaurisiko der Buche 2100 sowie die VfS-Standortkartierung für einen Ausschnitt im Testgebiet Cham/ Roding. Nach der Aktualisierung des Anbaurisos (geplant für Herbst 2025) werden zwei Varianten des Klimawandels angezeigt werden: 2100-mittel und 2100-hart.

Neben dem Zugang zu Standortinformationen im Rahmen der kostenfreien Beratung durch die Bayerische Forstverwaltung haben Waldbesitzende auch die Möglichkeit Informationen der Standortkartierung bei den Waldbesitzervereinigungen (WBV) und Forstbetriebsgemeinschaften (FBG) anzufragen. Die WBVen und FBGen waren seinerzeit die Auftraggeber der Standortkartierung im kleinen und mittleren Privatwald und sind auch heute noch die Rechteinhaber. In den vom VfS-kartierten Gebieten haben die WBVen und FBGen die Möglichkeit die Informationen der Standortkartierung (Standortkarte und Baumarteneignungstabellen) über den VfS-Viewer abzurufen und auch in eigene GIS-Systeme einzubinden. Die Ergebnisse und Produkte des vorliegenden Projekts sollen künftig auch im VfS-Viewer zur Verfügung gestellt werden. Hierzu zählen insbesondere die neu verschlüsselten und inhaltlich harmonisierten Standorteinheiten, einschließlich eines vereinheitlichten und klimadynamisierten Wasserhaushalts und einer bayernweit einheitlichen Kartenlegende. Dar-

über hinaus sollen die Informationen zum klimatischen und standörtlichen Anbaurisiko in die Baumarteneignungstabellen integriert werden und auch diese damit weiterentwickelt und klimadynamisiert werden. Der VfS hat hierzu in einer gesonderten Initiative bereits die technischen Voraussetzungen im VfS-Viewer geschaffen.

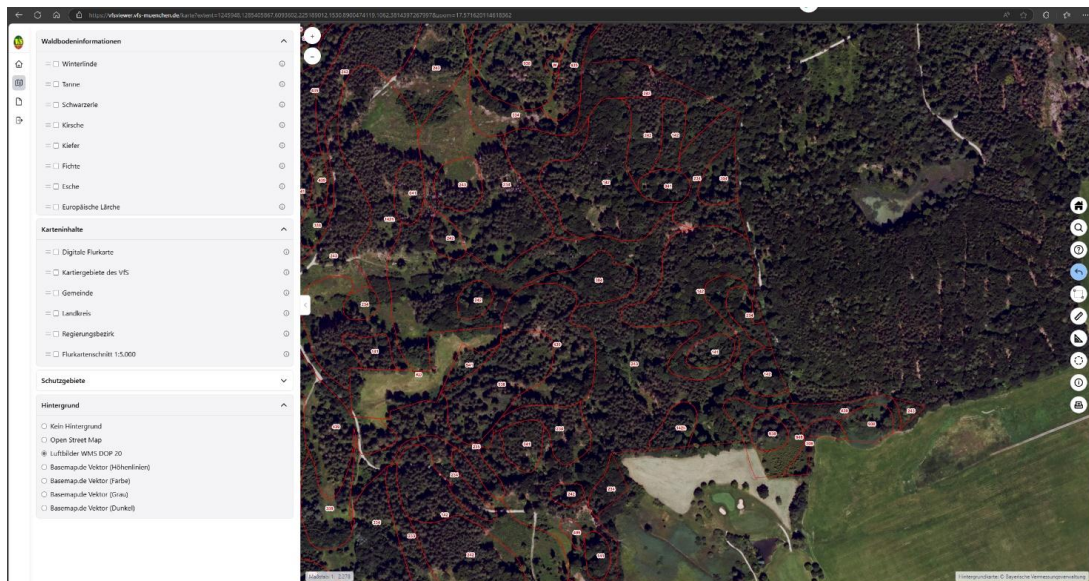


Abbildung 69: Der VfS-Viewer in seiner aktuellen Form. Zu sehen sind die roten Umrissse der Standortpolygone und die dreistelligen Standortziffern aus der Standortkartierung. Die weiterentwickelten Standortdaten werden hier eingespielt, sodass den WBVen und FBGen und Waldbesitzenden auch die in der Tabelle 29 und der Abbildung 65 und Abbildung 66 vorgestellten farbigen Karten mit Schraffuren und weiterentwickelter Standortziffer zur Verfügung stehen.

Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen

Bei der Beurteilung der Baumarteneignung für waldbauliche Entscheidungen stellen die Bodeneigenschaften hinsichtlich ihrer Funktionen als Wasser- und Nährstoffspeicher wichtige Kriterien dar. In den meisten Bundesländern wird die Inventur von Waldböden mit der höchsten räumlichen Auflösung (Maßstab 1:10.000 - 1:25.000) durch die Standortkartierung durchgeführt. Die forstliche Standortkartierung liefert Standorttypen auf der Basis der Komponenten Wasserhaushalt, Nährstoffversorgung und Substrat/Lagerung. Entsprechend stellt sie sowohl für die angewandte Forschung als auch für die forstliche Praxis und die Umweltpolitik eine wichtige Entscheidungs- und Beratungsgrundlage dar. Neben den klassischen Elementen des Standorttyps benötigen aktuelle Entscheidungsunterstützungssysteme im Kontext des Klimawandels i.d.R. weitere Informationen, die aus der Standortkartierung abgeleitet werden können. Je nach Fragestellung sind z. B. Elementvorräte, Basensättigung, C/N-Verhältnisse (Heitkamp et al., 2021, 2020; Meiwes et al., 2013) und die nutzbare Feldkapazität (nFK) (Overbeck et al., 2011) metrische Kenngrößen, die oft Berücksichtigung finden.

In anderen Bundesländern im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA, z.B. Hessen, konnten mittlerweile entsprechende Kartierlücken besitzartenübergreifend geschlossen werden (Ahrends et al., 2023). Auf dieser Grundlage können dann für alle Waldbesitzer/-innen flächendeckende Beratungsgrundlagen bereitgestellt werden (<https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem>). Die vorab beschriebenen Anforderungen an die Standortkartierung und die gleichzeitig bestehenden Unsicherheiten, Datenlücken und inhaltlichen Unschärfen in den Standortdaten machen es nach wie vor schwierig, die Privatwaldbesitzer/-innen zu beraten. Aus dem dargelegten Stand der Forschung und den Anforderungen an die Standortkartierung ergeben sich für die länderspezifische Umsetzung in Niedersachsen die folgenden Tätigkeitsschwerpunkte:

- (1) Die dringende Notwendigkeit verdeutlichen, die forstliche Standortkartierung im niedersächsischen Privatwald zu beschleunigen.

- (2) Demonstration des Mehrwertes einer digitalen Vorschätzung der Standorteinheiten, um die Feldkartierung zu beschleunigen und in deren Folge die Grundlagen für eine verbesserte waldbauliche Planung und Beratung im Privatwald zu schaffen.
- (3) Ableitung von metrischen Kenngrößen und Indikatoren aus der Standortkartierung, die Eingang in Entscheidungsunterstützungssysteme im Kontext des Klimawandels erhalten.
- (4) Berechnung der Nährstoffbilanzen für verschiedene Klimaszenarien und Biomassenutzungen in den Beispielregionen, um den Privatwaldbesitzer/-innen wissenschaftlich begründete, praxisrelevante Entscheidungshilfen für das forstliche Management im Hinblick auf eine nachhaltige Waldbewirtschaftung bereitzustellen.

Die Umsetzung der aufgezählten Punkte wird im Folgenden beispielhaft beschrieben:

Inwertsetzung der Standortkartierung

Die Arbeiten haben gezeigt, dass für eine Nährstoffbilanzierung auf Ebene der forstlichen Bewirtschaftungseinheiten eine Standortkartierung im Privatwald dringend erforderlich ist, um entsprechende Beratungsgrundlagen online dem Waldbesitzer anbieten zu können. Die Beispielgebiete für dieses Projekt wurden explizit danach ausgewählt, dass während der Projektphase Feldkartierungen stattfinden können, um eine möglichst große kartierte Fläche für die Modellanwendungen vorliegen zu haben. Eines der Gebiete liegt bei Soltau im Niedersächsischen Tiefland (TL). Dort wurde 2022 eine größere Fläche im Privatwald kartiert und ein weiteres Gebiet im Jahr 2023 nachkartiert (s. Abbildung 70). Zudem liegen in den Randbereichen des Gebietes Standortdaten des Landeswaldes vor, die als „Vergleichsindex“ herangezogen werden können. Das zweite Gebiet liegt im niedersächsischen Bergland (BL) an der Grenze zu Hessen. Im Bergland befinden sich nur kleinflächige noch unkartierte Gebiete, die restlichen Flächen wurden ebenfalls 2022 und 2023 kartiert. Somit stehen für beide Beispielregionen überwiegend aktuelle Standortdaten zur Verfügung. Weitere Informationen zu den Beispielregionen sind im Anhang, Teilvorhaben 3, AP 2 zu finden.

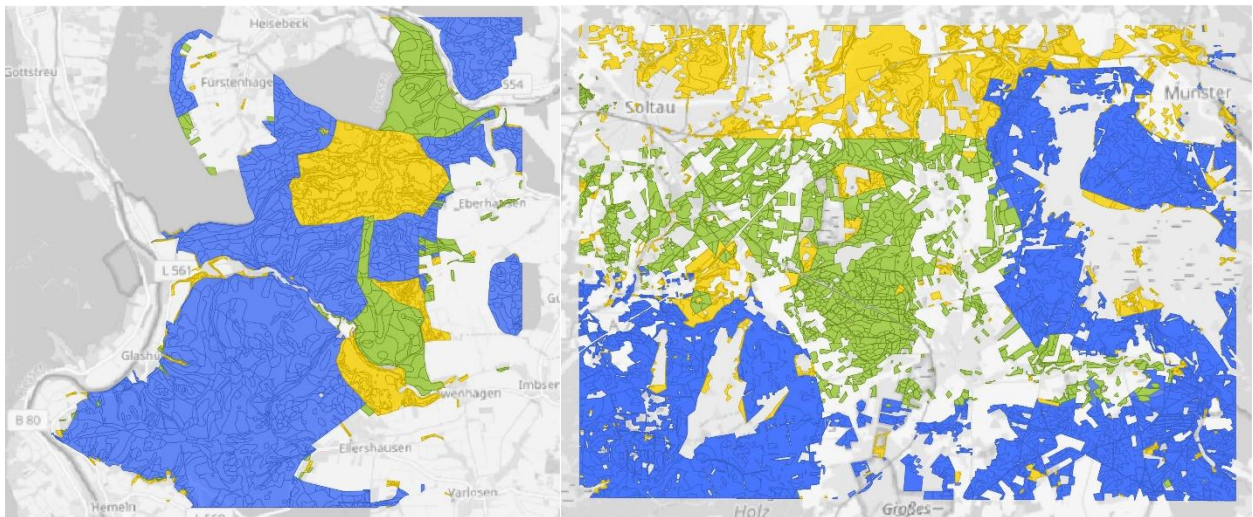
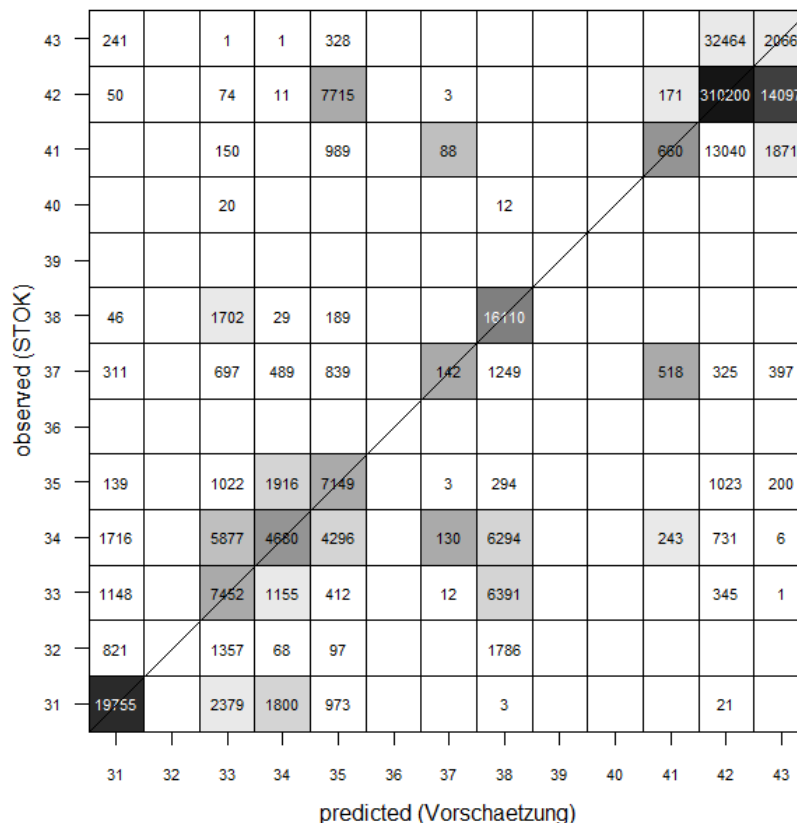


Abbildung 70: Polygone der STOK 1 (blau), Vorschätzung (gelb), und der nachkartierten STOK 2 (grün) in den Beispielgebieten Soltau (links) und Löwenhagen (rechts).

Insbesondere im Gebiet Soltau ist zu erkennen, wie kleinräumig die Standortkartierung vorgeht (Abbildung 70). Das ist eine wichtige Voraussetzung für eine abteilungsbezogene Berechnung von Nährstoffbilanzen. Durch integrative Betrachtung der Merkmale aus den Bereichen Lage, Klima, Geologie, Vegetation, Boden, Waldgeschichte und Wuchsleistung erreicht die niedersächsische Standortkartierung einen hohen Standard und bietet damit eine ideale Grundlage für flächenscharfe Entscheidungsunterstützung im Zuge des Klimawandels (vgl. Evers et al., 2013; Fleck et al. 2023; Köhler et al., 2016; Petzold et al., 2016; Petzold and Benning, 2017).

Integration von digitalen Werkzeugen in die Standortkartierung

Anhand des Beispielgebiets Soltau lassen sich Möglichkeiten und Grenzen einer digitalen Vorschätzung gut bewerten. Hier wurden 121km² Waldfläche von der LWK nachkartiert, und können mit der vorher getätigten digitalen Vorschätzung (Random Forest Modelle) verglichen werden. Bei der auf statistischen Kennzahlen basierten Auswertung der berechneten Wasserhaushaltsziffer (WHZ), Nährstoffziffer (NZ) und Substrat-/Lagerungsziffer (SZ/LZ) zeigt sich, dass die Random Forest Modelle robuste Ergebnisse liefern. Im Falle von falschen Vorhersagen lagen diese häufig sachlich nur leicht neben den kartierten Werten. So wurden z.B. grundwasserbeeinflusste Standorte eher korrekt als grundwasserbeeinflusst vorhergesagt als mit grundwasserfernen oder stauwasserbeeinflussten Standorten verwechselt (s. Konfusionsmatrix, Abbildung 71).



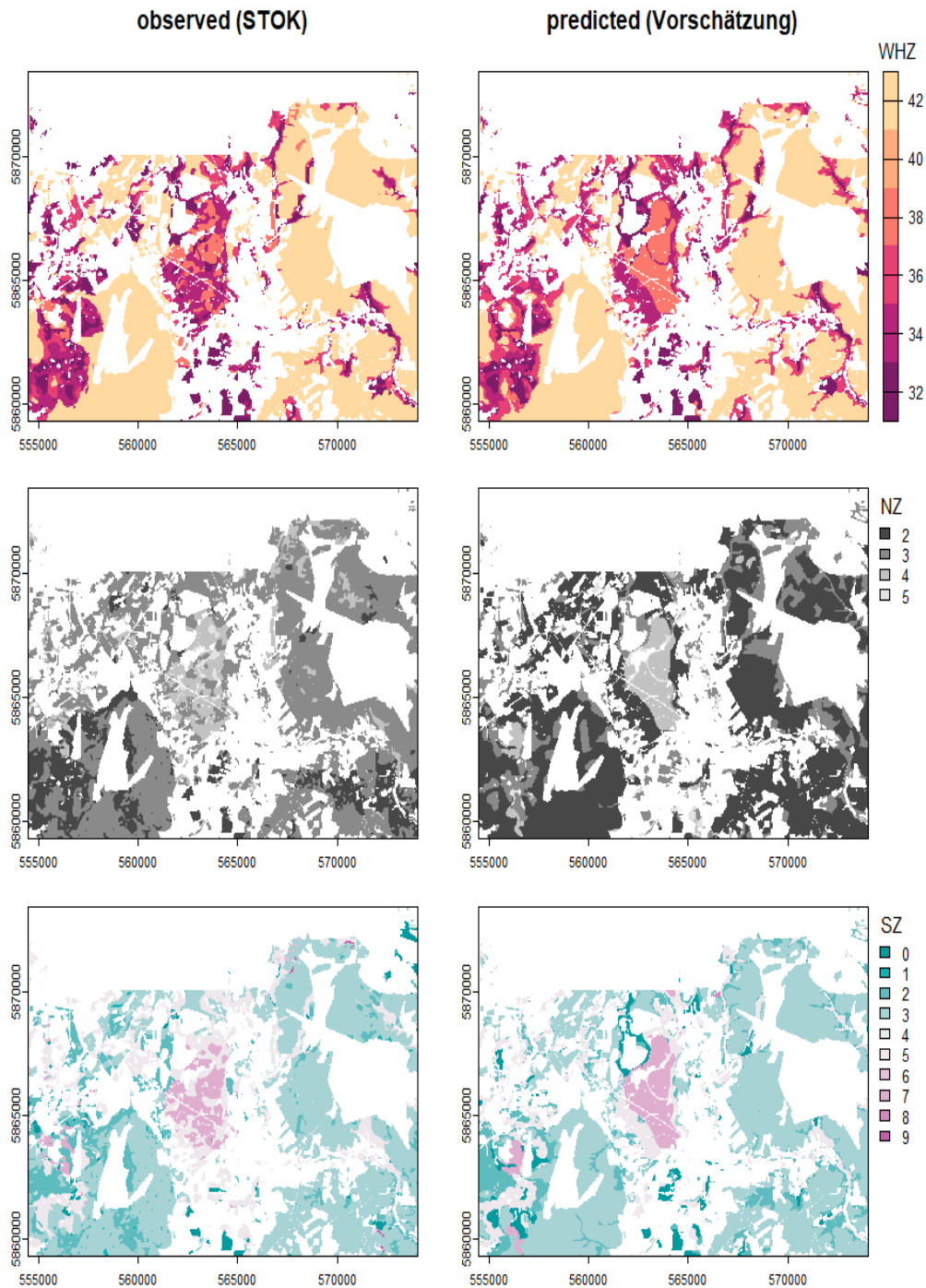


Abbildung 72: Übersichtskarten der Wasserhaushaltsziffer (oben), Nährstoffziffer (mitte) und Substratziffer (unten) der STOK-Kartierung (links) und mit „Digital Soil Mapping“ vorgeschätzte Flächen (rechts) für das Beispielgebiet bei Soltau.

Bereitstellung von zusätzlichen Bodeneigenschaften

In den Beispielregionen wurde demonstriert wie physikalische und chemische Bodeneigenschaften (z.B. Korngrößenzusammensetzung, Trockenrohdichte, Skelettgehalt, Basensättigung, Nährelementvorräte) aus den niedersächsischen Standorttypen abgeleitet werden können (s. Anhang Teilvorhaben 3, AP 3). Für die bodenphysikalischen Parameter wurden schon im Projekt WHH-KW wichtige Grundlagen gelegt (Weis et al. 2023). Im vorliegenden Projekt wurden für jede Standorteinheit der Untersuchungsgebiete zusätzlich bodenchemische Standortparameter, die die Nährstoffsituation charakterisieren (Albert et al., 2016; Jansen et al., 2002; Ulrich und Shrivastava, 1978), abgeleitet. Hierfür wurden die Schätzmodelle zur Regionalisierung von Heitkamp et al. (2020) und Ahrends et al. (2023) so angepasst, dass sie für die niedersächsische Standortkartierung anwendbar sind. Die entwickelten Modelle sind in der Tabelle 30 zusammengestellt. Eine Validierung

wurde mittels Bodenbeprobungen durchgeführt. (s. Anhang Teilvorhaben 3, AP 3). Die Abbildung 69 zeigt beispielhaft die mit der entwickelten Schätzfunktion regionalisierten C/N-Verhältnisse für die Kartiereinheiten der Standortkartierung im Beispielgebiet Soltau.

Tabelle 30: Erklärende Variablen der räumlichen Modelle der bodenchemischen Parameter KAK_{eff} , BS, C/N-Verhältnis und Kationen-Vorräte mit korrigiertem R^2 ($R^2_{adj.}$) und erklärter Abweichung (ED).

Zielvariable	Modell	$R^2_{adj.}$	ED (%)
KAK_{eff} [$cmol_c\ ha^{-1}$]	$\sim te(KAK_{pot}, k = 5) + Trophie + WT + CaCO_3$	0.664	83.4
Basensättigung [%]	$\sim te(SOF, k = 3) + te(ARI, k = 3) + WT + Trophie + SubGrp + POD + CaCO_3 + BR$	0.824	80.3
C/N-Verhältnis [$g\ g^{-1}$]	$\sim te(NDEP, k = 3) + SubGrp + BK + BR + WT + POD$	0.634	66.4
Ca-Vorrat [$kg\ ha^{-1}$]	$\sim te(SOF, k = 5) + te(BS_{mod}, k = 3) + POD + Trophie + WT + BK + BR$	0.705	83.5
K-Vorrat [$kg\ ha^{-1}$]	$\sim te(ARI, k = 4) + te(SOF, k = 5) + CaCO_3 + BR + Trophie$	0.696	73.8
Mg-Vorrat [$kg\ ha^{-1}$]	$\sim te(SOF, k = 4) + te(GBA, by = CaCO_3) + BK + Trophie + SubGrp$	0.567	81.8

ARI: Ariditätsindex De Martonne (1926); BK: Bodenklasse; BR: Bodenregion; BS_{mod} : modellierte Basensättigung [%]; $CaCO_3$: Calciumcarbonat-Gehaltsklassen [nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005]; GBA: Grobbodenanteil [%]; KAK_{pot} : Potentielle Kationenaustauschkapazität [$cmol_c\ kg^{-1}$]; NDEP: Stickstoff-Deposition [$kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$]; POD: Podsolierungsgrad; SOF: Spezifische Oberfläche [$m^2\ g^{-1}$]; SubGrp: Substratgruppe der BZE; Trophie: Trophiestufen nach Synopse von Schmidt et al. (2015); WT: Waldtyp; BK, BR, $CaCO_3$ und POD wurden je Kation statistisch gruppiert. GAM Familien: quabinomial (BS), gaussian (CN), gamma log (KAK_{eff} und Vorräte).

C/N Verhältnis für Waldgebiete bei Soltau

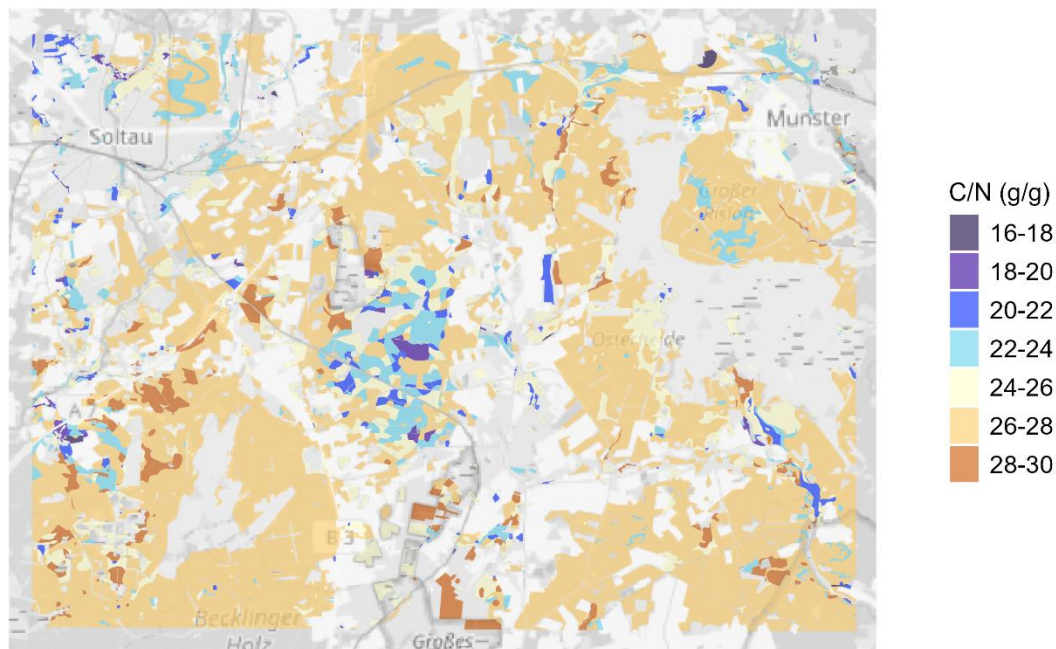


Abbildung 73: Mit Hilfe der Schätzfunktionen (vgl. Tabelle L1) regionalisierte C/N-Verhältnisse für die Kartiereinheiten der Standortkartierung im Beispielgebiet Soltau.

Bereitstellung von klimadynamischen und baumartenspezifischen Bilanzen

Abbildung 74 zeigt die Gesamtbilanzen von Ca^{+2} , Mg^{2+} und K^+ für die beiden Beispielregionen in Niedersachsen. Als Baumart für die Darstellung wurde eine Buche mittlerer Bonität gewählt, da sie sich in beiden Beispielregionen als Mischbaumart sowohl für die Kiefer (Soltau) als auch für die Fichte (Löwenhagen) eignet. Zum anderen weist sie aufgrund hoher Nährelementgehalte in Baumkompartimenten, insbesondere in der Derbrinde (Rumpf et al., 2018), hohe Nährstoffentzüge mit der Biomassenutzung auf.

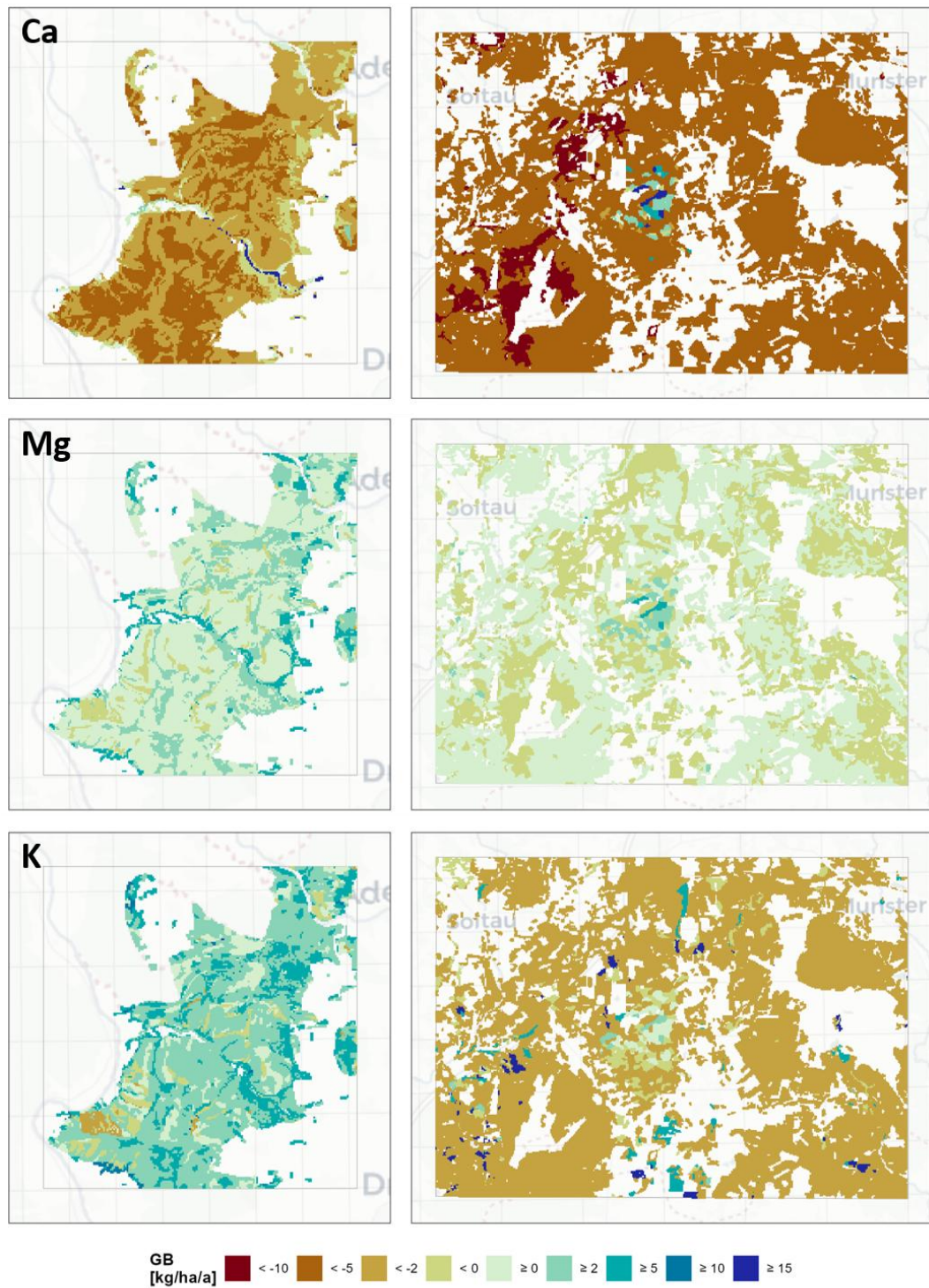


Abbildung 74: Flächenhafte Darstellung der Ca-, Mg- und K-Gesamtbilanzen für die Beispielgebiete Löwenhagen (links) und Soltau (rechts) in Niedersachsen für die Buche mittlerer Bonität unter aktuellen Klimabedingungen und dem Nutzungsszenario REAL.

Der Ca-Bilanzsaldo liegt auf den meisten Flächen in der Region Soltau mit unter $-5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich im negativen Bereich. In der Region Löwenhagen liegen die Bilanzsalden in einer vergleichbaren Größenordnung, wenn auch auf vielen Flächen das Bilanzsaldo mit -2 bis $-5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nicht ganz so extrem ausgeprägt ist. Dass auch in dieser Region trotz deutlich höherer Verwitterungsraten die Salden nicht deutlich positiver ausfallen liegt darin begründet, dass insbesondere bei der Buche die Nährelementgehalte in der Biomasse stark von der Nährstoffausstattung des Bodens abhängig sind (Jacobsen et al., 2003; Rumpf et al., 2018). Entsprechend sind durch die hohen Entzüge durch den Biomassezuwachs (bei Buche fast $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) die positiven Bilanzsalden der nutzungsfreien Stoffbilanzen schnell aufgebraucht. Für Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF-F) in Niedersachsen lag das mittlere Ca-Bilanzsaldo mit fast $-8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in einer vergleichbaren Größenordnung (Ahrends et al., 2021a). Da die BDF-F Bestände mit wenigen Ausnahmen nicht gekalkt wurden, empfiehlt sich ein Vergleich mit ebenfalls nicht gekalkten Flächen aus anderen Monitoringprogrammen. Aus Vorratsdifferenzen zwischen der BZE I und BZE II ergaben sich für die Substratgruppe der unverlehnten Sande (37 % der Waldfläche Niedersachsens) Abnahmen der Ca-Vorräte von 25 %, wenn die Flächen nicht gekalkt wurden. Bei einem Vorrat von 900 kg ha^{-1} würde dies für den Zeitraum von 15 Jahren zwischen BZE I und II einen jährlichen Ca-Verlust von $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bedeuten. Nach Paar et al. (2016) nahmen in Hessen die Ca-Vorräte innerhalb von 15 Jahren auf den ungekalkten Buntsandsteinstandorten (28 % der Waldfläche von Hessen) um 500 kg ha^{-1} ab, das entspricht einer jährlichen Abnahme von $33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In Niedersachsen sind alle Buntsandsteinstandorte der BZE gekalkt, so dass hier keine vergleichbaren Zahlen verfügbar sind. Auch wenn die absoluten Mengen aufgrund der methodischen Schwächen von wiederholten Bodeninventuren (vgl. Kravchenko und Robertson, 2011; Schrumpf et al., 2011) sicherlich mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, bestätigen sie die gefundene Tendenz zu negativen Bilanzsalden. Weiterhin ist zu beachten, dass mit einer einzigen 3-Tonnen-Bodenschutzkalkung (Zusammensetzung nach Ahrends et al., 2012) die gefundene Differenz von etwa $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 70 % (Guckland et al., 2012) für fast 100 Jahre ausgeglichen werden kann. Auf stickstoffgesättigten Standorten mit hohen Austragsverlusten wäre jedoch ein kürzeres Intervall für Kompensationsmaßnahmen erforderlich.

Die Mg-Entzüge mit der Biomassenutzung betragen für die Buche nur etwa ein Fünftel der Ca-Entzüge. Entsprechend sind die Mg-Bilanzen wesentlich ausgeglichener als die Calcium-Bilanzen, auch wenn sie auf einigen Teilflächen in beiden Regionen ebenfalls negative Salden von bis zu $-2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ annehmen können. Die K-Bilanzsalden gestalten sich in den beiden Beispielregionen sehr unterschiedlich. Während sie in Löwenhagen aufgrund der deutlich höheren Verwitterungsraten insgesamt sehr ausgeglichen sind, zeigen sich auf den Sandböden in der Region Soltau bei der Buche negative Bilanzsalden. Auch von Ahrends et al. (2021a) wurden von Buchenstandorten aufgrund höherer K-Gehalte in den Biomassekompartimenten vergleichsweise hohe Aufnahmeraten und entsprechend negative Stoffbilanzen ermittelt. Zwischen der BZE I und der BZE II (Evers et al., 2019) haben zudem die Kaliumvorräte in Niedersachsen um 20 % abgenommen. Diese Änderungen müssen jedoch mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden, da sie vor allem im Unterboden aufgetreten sind.

Negative Bilanzsalden von Kalium sollten besonders sorgsam beobachtet werden. Die Möglichkeiten einer Zufuhr von Kalium zur Kompensation hoher Entzüge und zur Bevorratung im Boden sind im Vergleich zum Calcium und Magnesium eingeschränkt. Wenn das Kalium als Sulfat zugeführt werden muss, kann das Sulfat nur in begrenztem Maße im Boden gespeichert werden, so dass ein großer Teil sehr schnell wieder ausgewaschen wird. Für die Intensivierung der Biomassenutzung bedeutet dies, dass die Grenze, die durch eine zu geringe Nachlieferung aus der Verwitterung vorgegeben ist, auf keinen Fall überschritten werden sollte. Eine Korrektur wäre nur über eine teure Düngung möglich (Meiwes und Mindrup, 2011).

Vorschlag zur digitalen Implementierung

Um die Ergebnisse in die Praxis zu bringen, wurden verschiedene Möglichkeiten geprüft. Die favorisierte Lösung war zunächst die Einbindung der Ergebnisse als Karten mit Legenden in der App: „DIE WALDBESITZER-APP“ (https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/37681_Die_Waldbesitzer-App) der LWK. Diese wurde speziell zur Bereitstellung von Daten für den Privatwald entwickelt und eine erste Version ist schon in Benutzung. Derzeit ist der Nutzer/-innenkreis noch begrenzt. Mittelfristig soll jedoch der Datenpool erweitert werden

und damit die App einem größeren Kreis an Privatwaldbesitzer/-innen zur Verfügung stehen. Mit der Einbindung der Ergebnisse in die App können die Privatwaldbesitzer/-innen viele ihrer Walddaten einsehen und Informationen für zukünftige Entscheidungen enthalten. Dies erhöht die Sichtbarkeit und Bekanntheit der Ergebnisse. Aus datenschutzrechtlichen Gründen ist der Zugang zu Flächendaten auf den jeweiligen Eigentümer beschränkt.

In den letzten Jahren hat sich jedoch als Beratungsinstrument für eine klimaangepasste Baumartenwahl ein besitzübergreifendes Tool etabliert (BaEm). Deshalb bietet es sich an, die für die Beispielregionen vorgestellten Ergebnisse der Nährstoffbilanzierung und die daraus abgeleiteten Empfehlungen der Nutzungsintensitäten und Baumartenwahlen perspektivisch in dieses Beratungsinstrument zu integrieren. Beim BaEm handelt es sich um ein besitzübergreifendes Beratungsinstrument, das Waldbesitzer/-innen die Möglichkeit bietet, Standortinformationen und klimaangepasste Baumartenempfehlungen über die Webapplikation der NW-FVA online abzurufen. Dies ist aktuell für die Bundesländer Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein direkt unter: <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem> möglich. In Niedersachsen sind entsprechende Empfehlungen bisher nur offline (Böckmann et al., 2019) verfügbar. An einer Überführung der Offline-Version in das Online-System wird momentan gearbeitet. Aktuell berücksichtigt das Beratungsinstrument der NW-FVA jedoch ausschließlich den Wasser- und ansatzweise den Nährstoffhaushalt. Im Zuge der nächsten Aktualisierungen sollen weitere biotische und abiotische Risiken implementiert werden. Bei entsprechenden Anpassungen könnten auch die Nährstoffansprüche und die Nährstoffmanagementoptionen als weitere Kriterien einer klimaangepassten Baumartenwahl im System berücksichtigt werden. Diese Lösung hätte den großen Vorteil, dass die Baumartenempfehlungen dann sowohl bundeslandübergreifend als auch besitzübergreifend über ein einheitliches System für die forstliche Praxis erreichbar wären. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Methoden der Nährstoffbilanzierung können auch in den Bundesländern Hessen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt angewendet werden.

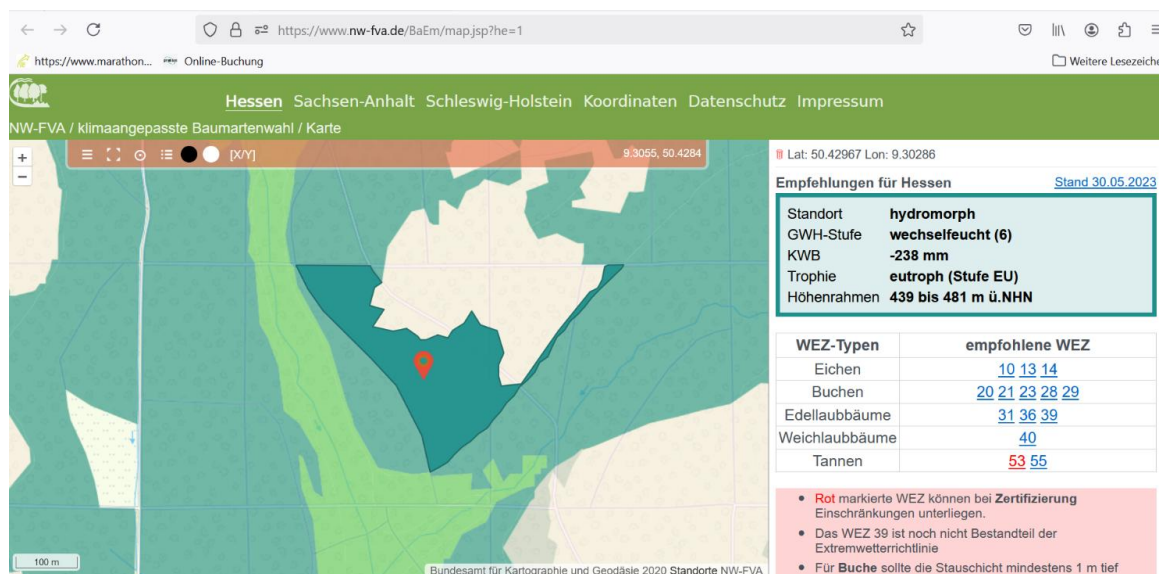


Abbildung 75: Aktueller Stand des Beratungsinstruments ‚BaEm‘ (2025), hier Beispiel Hessen.

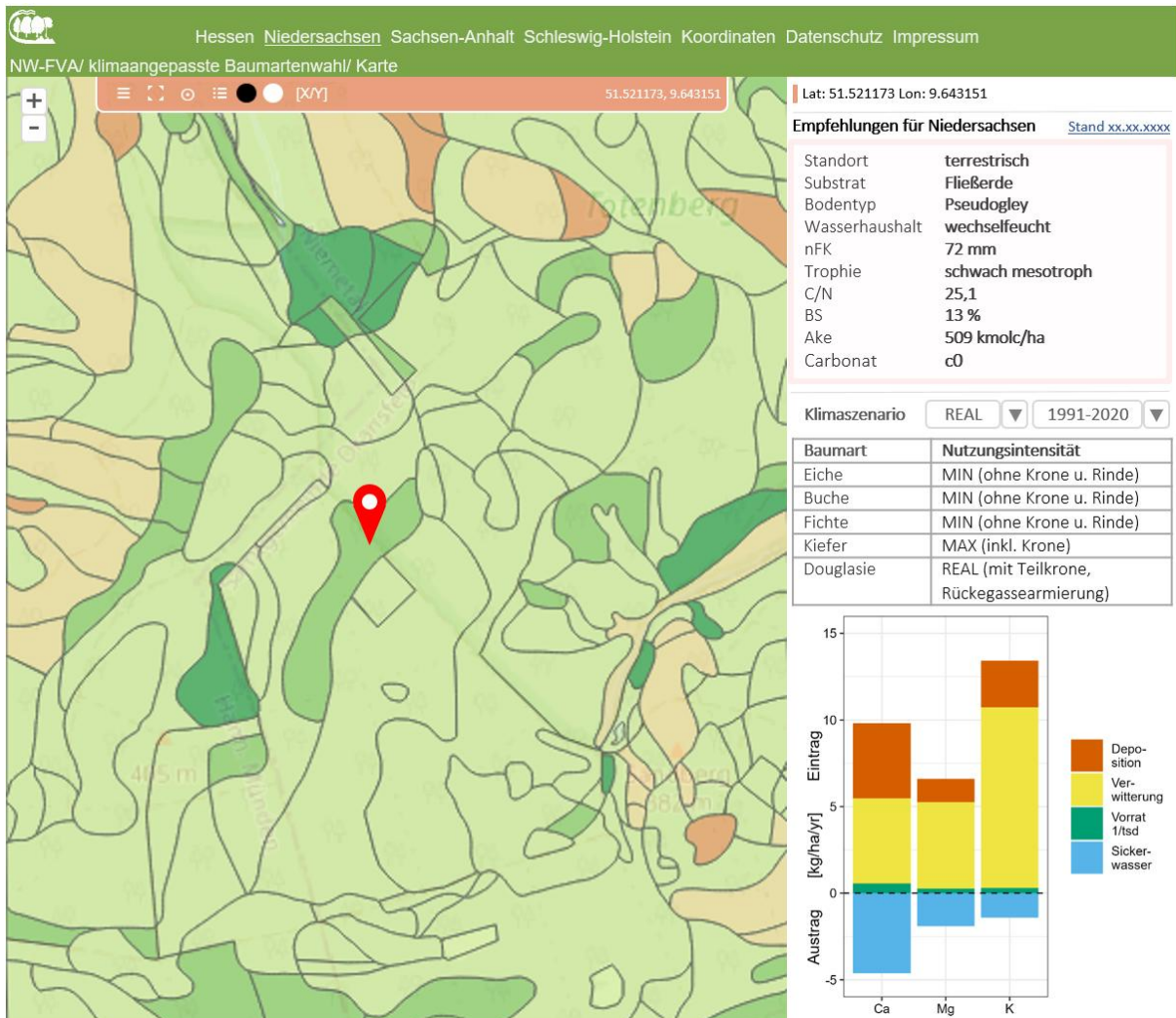


Abbildung 76: Umsetzungsvorschlag der Integration der Projektergebnisse in das Beratungsinstrument ‚BaEm‘, hier anhand eines Beispielpunkts im Testgebiet Löwenhagen, Niedersachsen. Entsprechend kann für vom BaEm empfohlene WET's (Waldentwicklungstypen) die Nährstoffnachhaltigkeit bewertet werden.

Baden-Württemberg

Nährstoffbilanzen

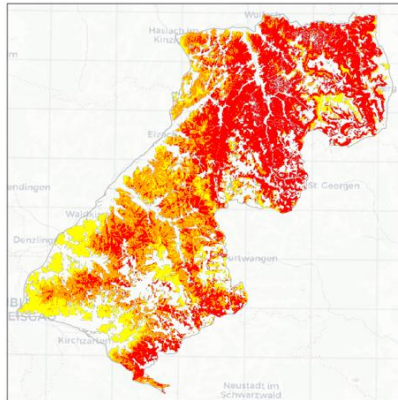
Für die drei Beispielgebiete wurden in Zusammenarbeit mit Teilvorhaben 3 umfangreiche Berechnungen zur Nährstoffnachhaltigkeit durchgeführt. Wie im Gesamtprojekt vereinbart, wurden mehrere Varianten mit potenzieller Bestockung (fünf Baumarten mit je drei Bonitäten) berechnet sowie drei Holzernteszenarien betrachtet. Die Daten sind kartographisch aufbereitet worden und liegen zur Einbindung in GIS-Systeme und für weitere Ver- und Anwendungen vor. Exemplarisch wird hier die Situation der Fichte für das Beispielgebiet 3/09 und für die Buche für die Beispielgebiete 4/02 und 4/03 mit jeweils mittlerer Bonität dargestellt (vgl. Abbildung 77). Entsprechende Karten liegen auch für die Baumarten Eiche, Kiefer und Douglasie und die Bonitäten „gut“ und „schlecht“ vor (insgesamt 15 Karten). Die Ergebnisse zeigen, dass im Beispielgebiet 3/09 auf großen Teilen der Fläche die Standorte negative nutzungsfreie Stoffbilanzen (nfSB) aufweisen und damit unter Nährstoffverlust leiden. Jede weitere Nutzung intensiviert bei der Bilanzierung die absoluten Nährstoffverluste des Systems, weshalb hier eine möglichst extensive Bewirtschaftung angeraten wird. Flächen mit positiver nfSB zeigen entweder nur geringe positive Stoffflussbilanzen, sodass auch hier eine extensive Bewirtschaftung empfohlen wird oder deutlich positive Stoffflussbilanzen, die aus Aspekten der Nährstoffnachhaltigkeit eine intensive Bewirtschaftung erlauben. Die beiden Beispielgebiete 4/02 und 4/03, hier für die Baumart Buche mit hö-

herem Nährstoffbedarf bei mittlerer Bonität ausgewertet, zeigen großflächig deutlich positive Stoffflussbilanzen, die ebenso eine aus Sicht der Nährstoffnachhaltigkeit intensive Nutzung erlauben. In allen drei Beispielgebieten sind kleinräumige Variationen sichtbar.

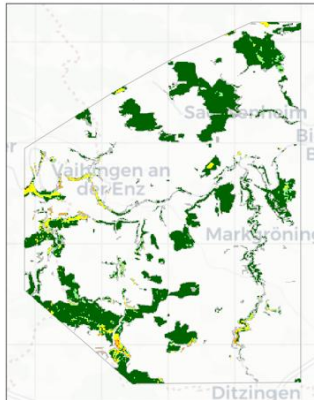
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Buche; Bonität: mittel; Auswertung: Erwartungswert

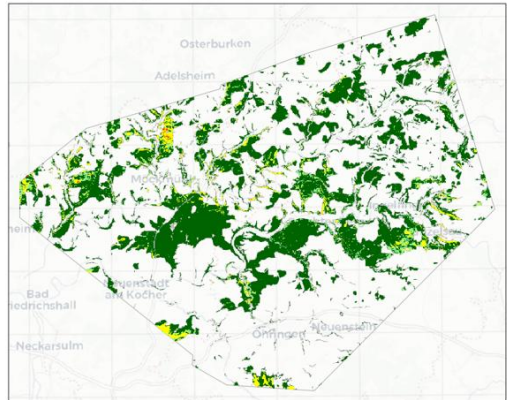
3/09: mittlerer Schwarzwald



4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz



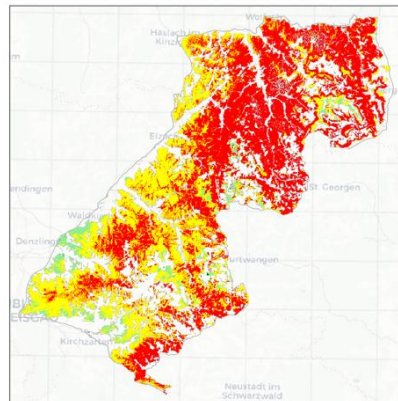
4/03: Kocher-Jagst-Landschaft



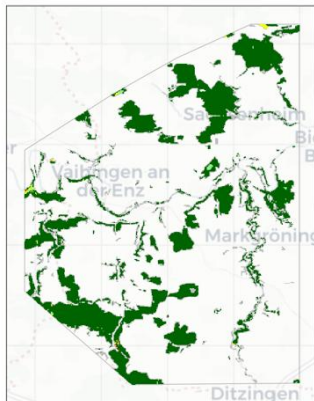
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Fichte; Bonität: mittel; Auswertung: Erwartungswert

3/09: mittlerer Schwarzwald



4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz



4/03: Kocher-Jagst-Landschaft

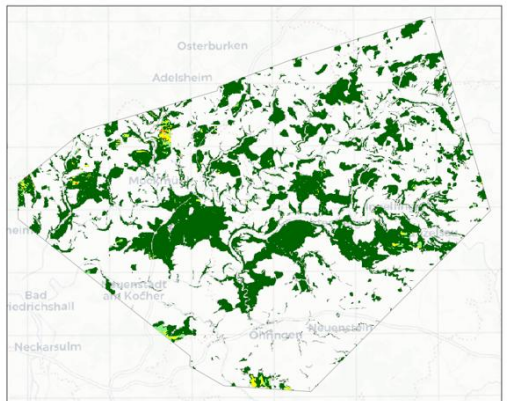


Abbildung 77: Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit für die Buche (oben) und Fichte (unten) mittlerer Bonität in den Beispielgebieten Baden-Württembergs mit einem Vorschlag zur Übersetzung der technischen Bewertung in Bewirtschaftungsempfehlungen.

Neben den flächigen Berechnungen auf Basis des potenziellen Vorkommens bestimmter Baumarten und Bonitäten, wurde ein Prototyp einer webbasierten Anwendung entwickelt („Shiny App“), die es erlaubt für konkrete Standorte eine Bewertung dieser Fläche auf Basis der aktuellen Bestockung (Vorgabe durch User) und Nutzungsintensität vorzunehmen (vgl. Abbildung 78). Liegt die Fläche innerhalb der Beispielgebiete, werden die Ergebnisse der nfSB aus dem Projekt genutzt und in Bezug zu den mittleren Nährstoffentzügen mit der Holzernte gesetzt. Es werden verschiedene Indikatoren genutzt, u.a. auch der Nährstoffindikator (siehe nächster Absatz). Außerhalb der Beispielgebiete liegen aktuell keine Stoffflussberechnungen vor.

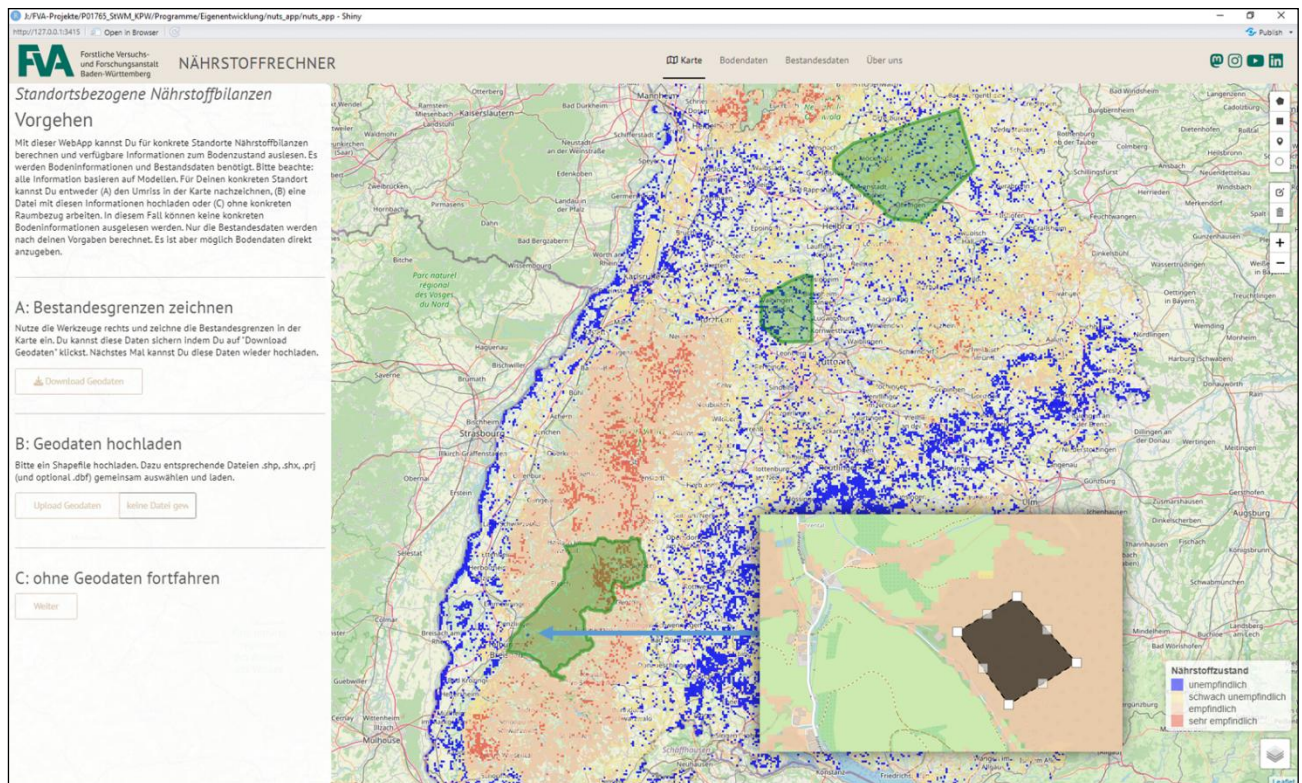


Abbildung 78: Screenshot des prototypischen Nährstoffrechners in Form einer Webanwendung zur konkreten standortbezogenen Berechnung von Nährstoffbilanzen und der Bewertung von geplanten Nutzungsintensitäten.

Kombination der Nährstoffbilanzen mit dem aktuellen Nährstoffzustand der Böden

Um eine möglichst umfassende Einschätzung der Nährstoffsituation zu erhalten, wurden neben den in Arbeitspaket 5 berechneten Nährstoffbilanzen auch der aktuelle Zustand der Waldböden mit einbezogen. Auf Basis regionalisierter Bodendaten wurde der Nährstoffstatus der Waldböden dargestellt. Diese Regionalisierungen entstanden im Rahmen des „Notfallplans für den Wald Baden-Württemberg“ (Zirlewagen 2021) und decken die gesamte Waldfläche Baden-Württembergs ab. Die Rasterkarten mit einer Auflösung von 25×25m² liefern zusätzliche Informationen für regionale Analysen der Waldböden (Hartmann et al. 2024). Zur Bewertung der Nährstoffsituation wurden verschiedene Bodenparameter begutachtet, klassifiziert und in zwei Indizes zusammengeführt. Der Nährstoffvorratsindex erfasst sowohl die Vorräte essenzieller Nährstoffe wie Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium als auch die Stickstoffverfügbarkeit im Boden. Der Säureindex gibt Aufschluss über den Versauerungsgrad der Böden und dessen Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen. Diese Indizes sollen künftig helfen ein nachhaltiges Nährstoffmanagement im Wald zu betreiben und können einzeln oder in Kombination genutzt werden.

Bei der Berechnung der Nährstoffbilanzen wurde ein Teil des Bodenvorrats berücksichtigt (s. Kapitel Nährstoffbilanzen, Seite 50 ff.). Um eine doppelte Erfassung zu vermeiden, wurden für diesen Zweck die Bilanzen mit einem Bodenvorrat von 0 berechnet. Die Gesamtbewertung der Nährstoffsituation setzt sich aus dem Säureindex, dem Nährstoffvorratsindex und den Nährstoffbilanzen zusammen. Die Einordnung erfolgt in vier Kategorien, die die Empfindlichkeit der Standorte gegenüber Nährstoffentzügen widerspiegeln. Da Nährstoffbilanzen und -bedarfe je nach Baumart variieren, wurde die Analyse für jede Baumart separat durchgeführt. Während im Beispielgebiet 3/09 im Schwarzwald die Fichte mit über 40% dominiert, sind die Beispielgebiete 4/02 und 4/03 im Neckarland von laubholzreichen Mischbeständen geprägt, in denen die Buche mit ca. 23% die häufigste Einzelbaumart ist. Daher zeigt die Abbildung 79 die Gesamtbewertung der Beispielgebiete unter Berücksichtigung der Nährstoffbilanzen der jeweils am häufigsten vorkommenden Baumart. Weitere Details finden sich im Anhang zu Teilvorhaben 4.

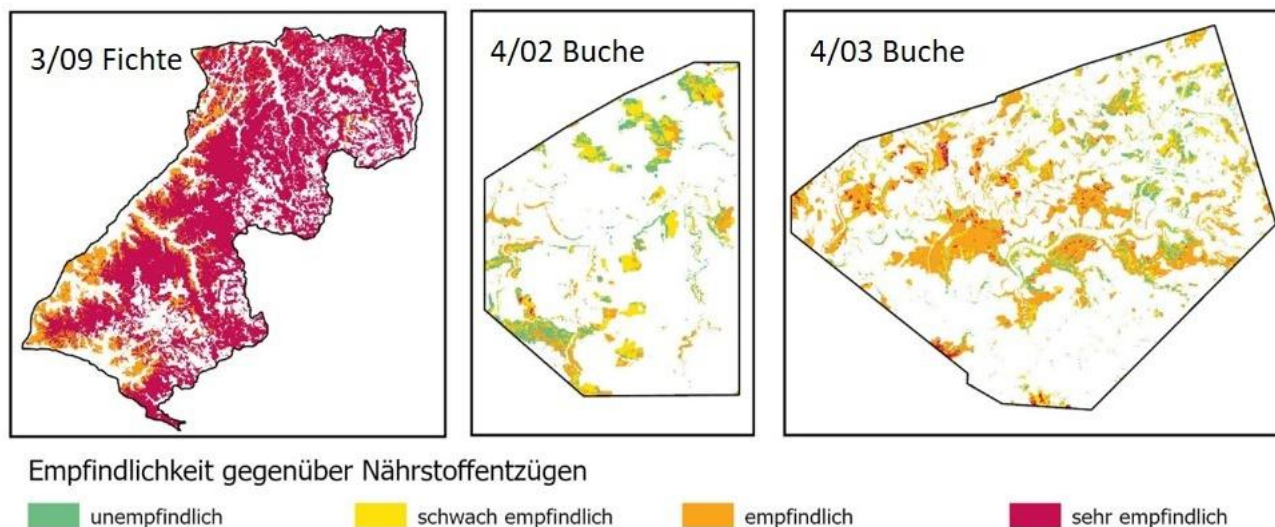


Abbildung 79: Kombination des Säureindex, des Nährstoffvorratsindex und der Nährstoffbilanzen. In Beispielgebiet 3/09 wurden die Bilanzen der Fichte verwendet, in den beiden Beispielgebieten 4/02 und 4/03 die Bilanzen für die Buche (Bonität = mittel, Szenario = REAL, Auswertung = Erwartungswert, ohne Berücksichtigung des Bodenvorrats).

Anbaurisiko

Die Ergebnisse und Methoden des Projekts wurden FVA-intern den entsprechenden Abteilungen vorgestellt und diskutiert. Es ist geplant über das Projektende hinaus die hier für die gemeinsame Datenbank aufbereiteten Bodendaten mit den anderen Fachabteilungen der FVA weiter zu verwerten. Die Anbauriskokarten der LWF werden vorerst nicht für die Praxis in GIS dargestellt. Grund hierfür sind die 2024 aktualisierten und veröffentlichten Tools zur klimadynamischen Baumarteneignung (https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/fva-praxisnah/Baumarteneignung_im_Klimawandel.pdf), der Abteilungen Waldnaturschutz und Waldwachstum der FVA-BW, die sich momentan für die Praxis bewährt haben. Dazu zählen unter anderem die Karten zur „Baumarteneignung 2.1“, die „Abiotische Stabilität für Alternativbaumarten“ und das Merkblatt zur „Wärmeklimatischen Eignung“ für den nicht kartierten Wald. Der Austausch der Projektergebnisse wird FVA-intern weiter stattfinden.

Brandenburg

Für Brandenburg war es das Ziel, digitale Standortinformationen und daraus abzuleitende waldbauliche Empfehlungen leicht verständlich und anwenderbezogen für Kleinprivatwaldbesitzer/-innen in Form einer Smartphone-App zur Verfügung zu stellen. Hierfür wird die frei verfügbare QField-App (<https://qfield.org>) genutzt und die Informationen in Form eines 100x100m - Rasters als Download zur Verfügung gestellt. Damit ist es möglich, die Informationen sowohl auf einem PC als auch unterwegs auf dem Smartphone abzurufen. Zusätzlich sollen alle Informationen auch in das Geoportale des Landesforstbetriebs integriert werden (<https://forst.brandenburg.de/lfb/de/service/geoportal/#>).

Verfügbare Standortinformationen wurden zunächst punktbezogen für das 100m-Punkteraster in der projekt-internen GIS-Arbeitsumgebung zusammengestellt und anschließend erfolgte eine Auswahl an Indikatoren für die QField-App (Tabelle 31). Die Standortinformationen stammen aus diversen Quellen. Neben Standortinformationen, die auf direkt im Projekt erarbeiteten Größen basieren oder der Standortkarte entnommen wurden, wurden auch Daten aus Vorläufer-Projekten genutzt. Die ausgewählten Indikatoren lassen sich in folgende Themengruppen unterteilen: Naturraum, Klima, Bodengeologie, Bodenklassifikation, Bodenchemie, Humus und Kohlenstoff, Bodenwasser und Wasserhaushalt, sowie Baumarteneignung und Nutzung.

Tabelle 31: In der Standort-App bereitgestellte Indikatoren

Indikatorgruppe	Indikatoren
Naturraum	Größe, Waldfläche, Waldanteil
Klima	Temperatur, Niederschlag, Spätfrosttage
Bodengeologie	Ausgangsgestein, verwitterbare Nährstoffreserven, Kalkgehalt
Bodenklassifikation	Bodentyp
Bodenchemie	Versauerungsgrad, Säure-Pufferpotenzial, Basenvorrat
Humus und Kohlenstoff	Auflagehumus, Kohlenstoffvorrat, Kohlenstoff-Speicherpotenzial, Kohlenstoffverlust bei Grundwasserabsenkung
Bodenwasser	verfügbares Bodenwasser, Grundwassertiefe, Vernässung, Grundwasserneubildung
Wasserhaushalt	Standortwasserbilanz, Trockenstressindex
Baumarteneignung	Standorteignung, Klimawandel
Nutzung	Stoffliche Nachhaltigkeit

Ein großer Teil der Indikatoren wird dabei nicht in Originalform angegeben, sondern in eine Ordinalskala überführt. Die Kennwerte sind so auch für forstliche und bodenkundliche Laien besser verständlich. Ein Beispiel ist die Angabe als Perzentile, d.h. anhand einer 100-Punkte Skala, bezogen auf die Spanne der Kennwertausprägung auf der brandenburgischen Gesamtwaldfläche. Dies soll den Nutzer/-innen eine relationale Einschätzung der „eigenen Waldfläche“ hinsichtlich Standorteigenschaften ermöglichen und erfolgt analog zu der in der landwirtschaftlichen Bodenschätzung üblichen Acker- oder Grünlandzahl, die ebenfalls Werte zwischen 0 und 100 annehmen kann. So lässt sich zum Beispiel der standörtliche Trockenstress anhand des langjährigen Quotienten aus realer und potenzieller Transpiration ($T_{\text{real}} / T_{\text{pot}}$) beschreiben. Die Ausprägung von „Trockenstress“ am Standort wird daher in Brandenburg anhand von 100 Wertepunkten quantifiziert. Standorte mit der geringsten Ausprägung von Trockenstress erhalten den Wert 1 und diejenigen mit der höchsten Ausprägung den Wert 100. Details zur Herleitung und Skalierung der einzelnen Indikatoren finden sich im Anhang zu Teilvorhaben 5.

Abbildung 80 veranschaulicht die Darstellung der Standortindikatoren in der QField-App. Die Daten lassen sich als Download auf das Smartphone oder den PC in QField laden (Abbildung 80a). Ab einem Maßstab von 1:25.000 werden die Punkte des 100x100m Rasters vor dem Hintergrund des WebAtlasDE angezeigt (Abbildung 80b). Im Drop-Down-Menü lassen sich die einzelnen Indikatorgruppen auswählen (Abbildung 80c). Innerhalb einer Indikatorgruppe lassen sich die einzelnen Indikatoren auswählen (Abbildung 80d) und die Punkte werden entsprechend der Skalierung eines ausgewählten Indikators eingefärbt (Abbildung 80e). Durch das Auswählen eines spezifischen Punktes werden die Werte für diesen Punkt angezeigt (Abbildung 80f).

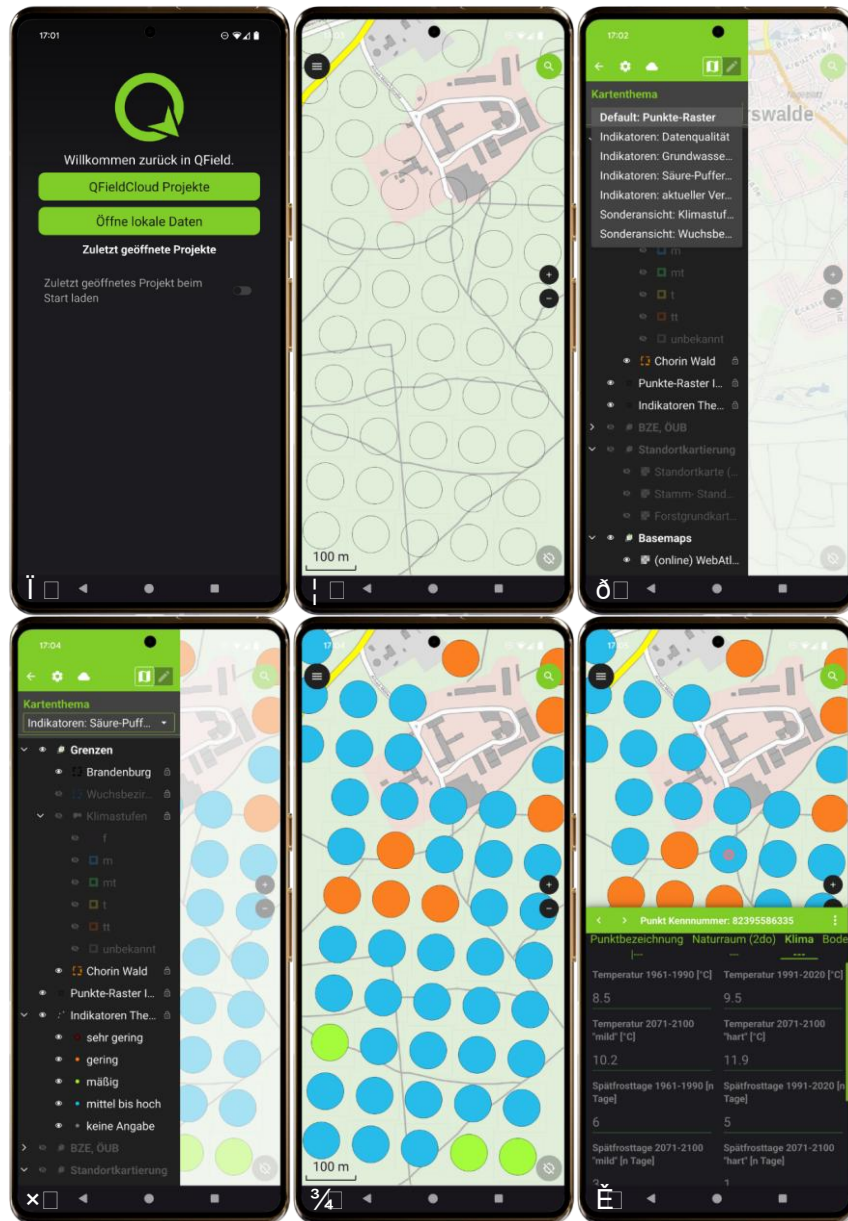


Abbildung 80: Verschiedene Ebenen der Nutzeroberfläche der QField-App.

Unter dem Titel „Blick unter die Oberfläche: Brandenburgs Waldstandorte verstehen und deuten - Kleine Standortfibel für Waldbesitzende“ soll eine Anleitung in einfacher Fachsprache generiert werden, die Waldbesitzer/-innen ohne Vorkenntnisse boden- und standortkundliche Grundlagen vermittelt. Die in der Standortfibel enthaltenen Informationen zu (1) nachhaltigen Baumartenempfehlungen im Klimawandel und (2) forstlichen Nutzungsintensitäten unter Aspekten der stofflichen Nachhaltigkeit sollen in Verbindung mit der interaktiven Karte in der QField-App bei der Bewirtschaftung der konkreten, im Besitz der Anwender/-innen befindlichen Waldfläche, eingesetzt werden.

Dabei sollen Bewusstsein für die Bedeutung der Waldböden geschaffen und auf eine allgemein verständliche Art und Weise Einblicke, in die boden- und standortkundlichen Besonderheiten gegeben werden. In Verbindung mit der mittels QField auf Tablet oder Smartphone nutzbaren Karte, deren Legende durch die Standortfibel vollständig erklärt und detailliert erläutert wird, erfahren Waldbesitzer/-innen mehr über ihren Standort und können sich Empfehlungen für die nachhaltige und bodenschonende Behandlung ihres Waldes zunutze machen.

Die Verfahren der forstlichen Standorterkundung nach der Standorterkundungsanleitung SEA95 und deren beschreibende Merkmale und Kategorisierungen sind für Laien schwer zugänglich. Die sich hinter den Codes

versteckenden Informationen sollen mit der Standortfibel praxisnah und verständlich encodiert und vermittelt werden.

Die Standortfibel ist wie folgt gegliedert:

- Vorwort
- Einleitung
- Am Anfang war Gestein
- Boden – Fundament des Lebens
- Was zeichnet gesunden Waldboden aus?
- Wie lässt sich Boden im Gelände untersuchen?
- Charakterböden brandenburgischer Wälder
- Standortkarten weisen den erfolgreichen Weg
- Haushalten wie ein Unternehmen
- Wassermangel und Klimakrise
- Baum und Boden
- Themenbereiche der Standort-App
- Wissenschaftlicher Hintergrund des Fibel-Projektes

Exemplarisch wurden in Abbildung 81 und Abbildung 82 einige Kennwerte der QField-Anwendung für das Waldgebiet Chorin (Waldgebiet des Jahres 2023, <https://www.bdf-online.de/waldgebiet-des-jahres/2023/>) dargestellt. Das räumlich sehr heterogene Waldgebiet ist vom Choriner Endmoränenbogen und damit verzahnten Grundmoränen und Sanderflächen geprägt. Neben den Moorstandorten rund um das Plagefenn weist es weiter zahlreiche Nassstandorte auf. Die enge Verzahnung der verschiedenen Substrate zeigt sich bei Kennwert „Substrat“ (Abbildung 81a). Als Endmoränenlandschaft weisen die Standorte in der Mehrzahl für Brandenburg sehr hohe Basenvorräte auf. Der Indikator „Basenvorräte“ zeigt dies auf der für Brandenburg geeichten Skala von 0-100 an (Abbildung 81b). Der Indikator „Risiko des Humusverlustes bei Grundwasserabsenkung“ (Abbildung 81 c) weist auf die grundwasserbeeinflussten Standorte hin. Das Trockenstressrisiko und seine vergangene und mögliche zukünftige Entwicklung ist in Abbildung 82 dargestellt. Das Trockenstressrisiko wird in der Anzahl der Trockenjahre in einer 30-jährigen Periode ausgedrückt und ist für die Zeiträume 1961-1990, 1991-2020 sowie für 2071-2100 im Szenario RCP 4.5 dargestellt. Für ein Waldgebiet, bei dem viele Standorte über Anschluss an bindige Substrate im Wurzelraum verfügen und das zahlreiche grundwasserbeeinflusste Standorte aufweist, ist die Ausgangslage bezüglich Trockenstress günstig (Abbildung 82a). Gleichwohl weist bereits die Periode 1991-2020 gegenüber 1961-1990 eine deutliche Zunahme des Trockenstressrisikos auf (Abbildung 82b), welches zukünftig voraussichtlich noch weiter steigen wird (Abbildung 82c). Die Zunahme des Trockenstressrisikos wird durch lokale Unterschiede der Substrateigenschaften und des Grundwasseranschlusses abgemildert.

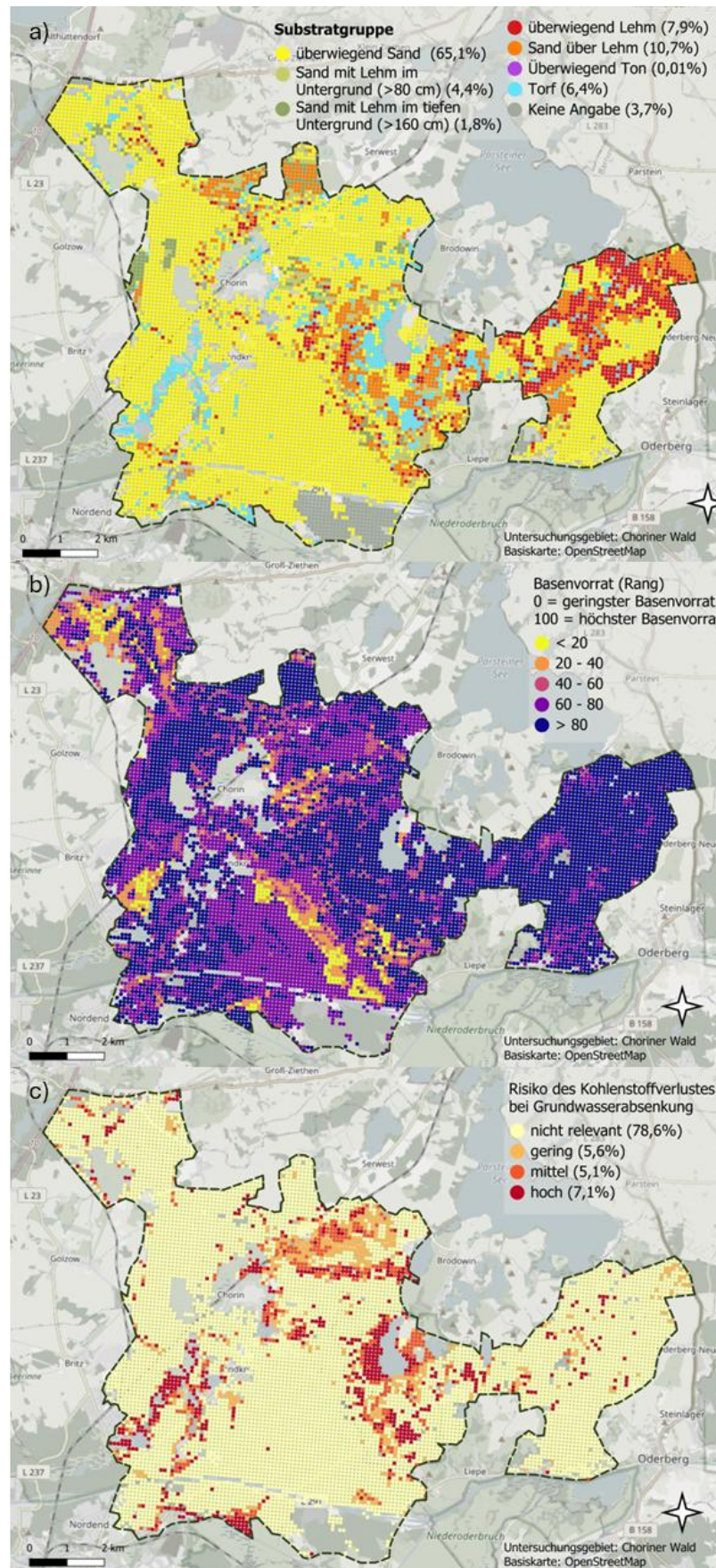


Abbildung 81: Einige Kennwerte der QField-Anwendung für das Waldgebiet Chorin, a) Substratgruppe, b) Basenvorräte (dimensionslose, auf Brandenburg bezogene Relativ-Skala), c) Risiko des Kohlenstoffverlustes bei Grundwasserabsenkung.

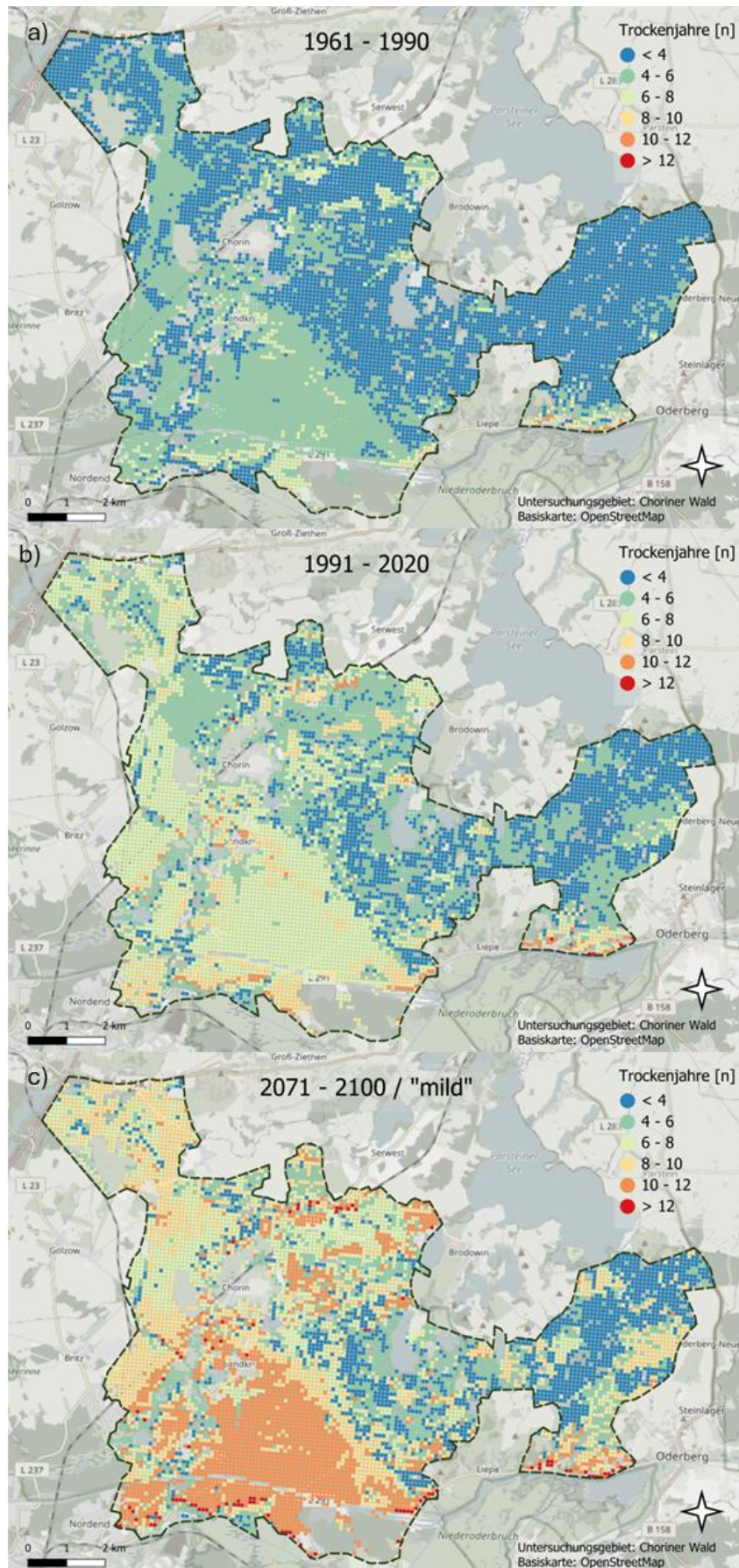


Abbildung 82: Trockenstressrisiko (Anzahl der Trockenjahre in 30-jähriger Periode) im Waldgebiet Chorin als Beispiel für Kennwerte der QField-Anwendung a) in der Periode 1961-1990, b) 1991-2020, c) 2071-2100 im RCP 4.5 Szenario.

Austausch mit Vertretern aus der Praxis

Projektvorarbeiten und Ermittlung des Praxisbedarfs

Die Projektergebnisse für Brandenburg sind in ein geografisches Informationssystem zu überführen. Bei der Wahl eines adäquaten GIS-Programmes und für die Festlegung eines Designs für die zu überführenden Praxisinformationen müssen die Ansprüche und Möglichkeiten der potenziellen Nutzer/-innen (Waldbesitzer/-innen, Beratungsstellen, forstliche Zusammenschlüsse) ausgelotet und berücksichtigt werden. Für Brandenburg erfolgte diese Untersuchung anhand von Vorgesprächen und einer Onlinebefragung der Waldbesitzer/-innen, die im Projektablauf vorgezogen und gleich zu Beginn des Projektes durchgeführt wurde.

Die Beratung der Kleinprivatwaldbesitzer/-innen erfolgt in Brandenburg meist über die Hoheitsförster/-innen der zuständigen Oberförstereien, im Rahmen forstlicher Zusammenschlüsse oder über die Waldbauernschule Brandenburg e.V. des Waldbauernverbandes Brandenburg, in dem zahlreiche Kleinprivatwaldbesitzer/-innen organisiert sind. In Vorbereitung der Erfragung von Informations- und Beratungsbedarfen der Kleinprivatwaldbesitzer/-innen wurden daher zunächst verschiedene Hintergrundgespräche mit Hoheitsförster/-innen und Referent/-innen der Waldbauernschule Brandenburg geführt.

Im Rahmen der Gespräche wurde deutlich, dass sich die Waldbesitzer/-innen bezüglich ihres Wissens über und ihre Ansprüche an den Wald sehr unterscheiden. So ist das Vorwissen der Kleinprivatwaldbesitzer/-innen zum Thema Standort aus Sicht von Referent/-innen der Waldbauernschule ausgesprochen heterogen und hängt stark von deren Organisations- und Vernetzungsgrad, beispielsweise in Forstbetriebsgemeinschaften, ab. Ebenso relevant ist ein persönlicher forstlicher Hintergrund. In Absprache mit der beratenden Forstpraxis wurde der Versuch favorisiert, den Kleinprivatwaldbesitzer/-innen Standortinformationen über eine Smartphone-App flächenscharf zugänglich zu machen. Die Aufgabe dieser App sollte demnach ausschließlich in der kartographischen Vermittlung der für das Waldmanagement als relevant erachteten Inhalte bestehen. Das für deren Anwendung und Verständnis benötigte boden-, standort- und waldkundliche Grundwissen erschien hingegen eher in Form einer ausgedruckten Broschüre vermittelbar, die als inhaltlich und formal attraktiver Erläuterungsband fungieren sollte.

Um die Eindrücke aus den Vorgesprächen und die daraus abgeleiteten Ausführungen zu möglichen praxisorientierten Darstellungs- und Vermittlungsweisen auf eine belastbare Grundlage zu stellen, wurde ein Fragenkatalog konzipiert (Abbildung 83). Der Fragenkatalog wurde über einen Link als Online-Umfrage an die 30 Oberförstereien im Land Brandenburg mit der Bitte verschickt, diese über die E-Mail-Verteiler der Hoheitsförster/-innen bzw. Oberförstereien an die Waldbesitzer/-innen weiterzuleiten. Weiterhin gingen wir auf den Waldbauernverband Brandenburg e.V. als Netzwerk und Interessenvertretung der Kleinprivatwaldbesitzer/-innen im Land Brandenburg zu, um diesen nichtstaatlichen Akteur als Multiplikator ebenfalls einzubeziehen.

Im Ergebnis der Befragung zeigte sich unter anderem, dass sich 86,1% der Befragten mehr Informationen zum Thema Standort bzw. Boden wünschen. Die Anpassung an den Klimawandel bzw. der Erhalt von Wald sind für die Befragten nach der Holzproduktion die wichtigsten Ziele bei der Waldbewirtschaftung. 62,2% der befragten Waldbesitzer/-innen geben Boden bzw. Standort bereits jetzt als wichtiges bzw. das aus ihrer Sicht wichtigste Kriterium bei der Baumartenwahl an. Hier zeigt sich das Potenzial, welches die Bereitstellung von entsprechend aufbereitetem Fachwissen hat. Gerade angesichts zukünftiger Klimaveränderungen liegt hier eine große Chance, Waldbesitzer/-innen in die Lage zu versetzen, evidenzbasierte und damit bessere Entscheidungen für die standortgerechte Baumartenwahl und Waldbewirtschaftung zu treffen.

Entscheidungsgrundlagen für Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald

Diese Befragung ist Teil des von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) finanzierten Verbundprojekts „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald: Klima – Nährstoffe – Wasserhaushalt“¹. Wir wollen unter anderem herausfinden, welche Rolle der Boden bzw. Standort aktuell bei der Waldbewirtschaftung im Kleinprivatwald spielt. Insbesondere interessiert uns dabei die Frage, welche Boden- und Standortinformationen bekannt sind, wo Sie als Waldbesitzende sich mehr Informationen wünschen und in welcher Form diese für Sie den größten praktischen Nutzen hätten.

Online-Umfrage unter <https://www.empirio.de/s/1nztGt9dGZ>

1. Welche Ziele verfolgen Sie mit Ihrem Wald?

- Brennholzproduktion
- Geldanlage
- Entspannung/ Erholung
- Wertholzproduktion
- Naturschutz/ Biodiversität
- Lernort
- Jagdkulisse
- Klimaanpassung/ Walderhalt
- ...

2. Auf welcher Grundlage entscheiden Sie sich für oder gegen eine bestimmte Baumart?

- Wuchsleistung/ Zuwachs
- Standortliche Eignung
- Anbaueignung oder –empfehlung unter Klimawandelbedingungen
- Baumartenmischung
- Risikostreuung
- Holzverwendung
- Nutzung von Nichtholzprodukten (z.B. fruchttragende Sorten)
- Ästhetische Gründe (z.B. Laubfärbung, Blüte)
- Verbissunempfindlichkeit
- Bodenpfleglichkeit
- Artenvielfalt
- ...

3. Welche Rolle spielt der Standort/ Boden für Sie bei der Waldbewirtschaftung?

- Überhaupt keine Rolle
- Bisher keine Rolle, ich würde aber in Zukunft den Standort gerne berücksichtigen
- Nur untergeordnete Rolle, ich würde aber in Zukunft den Standort gerne berücksichtigen
- Große Rolle, wichtiges Kriterium für Baumartenwahl
- Übergeordnete Rolle, für mich das wichtigste Kriterium bei der Baumartenwahl

¹ <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/die-kleine-forstliche-standortfibel>

Abbildung 83: Ausschnitt aus Fragebogen, der an Brandenburger Waldbesitzer/innen verteilt wurde.

Projekttreffen und Austausch mit regionalen Praktikern

Projekttreffen in Freiburg

Teilnehmer/-innen: Revierleiter, stellv. Forstamtsleiter

Im Rahmen des Projekttreffens in Freiburg vom 21.06. - 22.06.2023 wurden für eine bei Waldkirch (~15km nördlich von Freiburg) gelegene Kommunal- und Privatwaldkulisse Karten mit dem bisherigen Ergebnisstand erstellt und vor Ort mit den zuständigen Revierleitern sowie dem stellvertretenden Forstamtsleiter diskutiert (Abbildung 84). Es wurde auch exemplarisch ein Bodenprofil der Bodenzustandserhebung aufgesucht, um die Aspekte der Nährstoffsituation, wie sie in den Karten dargestellt wird, anhand des konkreten Bodenprofils mit Laboranalysedaten zu erläutern. Generell fanden die Kollegen der Forstverwaltung die Bewertungskriterien gut, jedoch noch viel zu komplex, als dass sie in der Praxis Anwendung finden könnten. Die Darstellung als Karten sei sehr sinnvoll und wichtig, um dies als Beratungsinstrument nutzen zu können. Kritisiert wurde die hohe Komplexität der bis dahin erstellten Ergebnisse. Es würden einfache Karten benötigt, die auf einen Blick klar differenzieren und gleich einen Praxisbezug aufweisen. Detailliertere Karten seien jedoch auch wertvoll als Hintergrundinformation.



Foto: Klaas Wellhäusen

Abbildung 84: Diskussion des theoretischen Endprodukts zwischen Projektpartnern und regionalen Vertretern der Forstverwaltung.

Gruppe	Indikator	Wert	Bewertung					
			8*	13*	250	45	500	
Klima	Jahreslufttemperatur	12.99	8*			x	13*	
	Anzahl Trockentage (T<1mm)	218	180		x		250	
	Anzahl Hitzetage (T>30°C)	36	15			x	45	
	Jahresniederschlag	1427	2000	x			500	
	Niederschlag VP ²	
	Strahlungssumme	
	SPEI ⁵	
...	?					...		
	gesamt							
Wasserhaushalt	Transpirationsquotient 2070-2100	ziemlich frisch	s.fr.	x			s-tr	
	Standortwasserbilanz	
	
	gesamt							
Nährstoffe	pH-Wert	< 3,8	8			x	3	
	C/N-Verhältnis	12-20	<12	x			>35	
	Tiefenverlauf Basensättigung	5a	Ok			x	Probl.	
	S-Wert	< 10	>200				x <10	
	pflanzenverfügbare Bodenvorrat (pBV)	Ca: 254	hoch	x				gering
		K: 700				x		
Mg: 323					x			

Abbildung 85: Auszug aus dem Exkursionsführer für das Forstrevier Waldkirch, wo erste Ergebnisse und mögliche Bewertungsszenarien anhand eines konkreten BZE-Profiles vorgestellt wurden.

Projekttreffen in Eberswalde

Teilnehmer/-innen: Kleinprivatwaldbesitzer/-innen, Mitarbeiter/-innen des LFE sowie Förster/-innen

Im Juni 2024 fand ein von den Projektpartnern HNEE und LFE ausgerichtetes Projekttreffen in Eberswalde statt. Ziel des Treffens war der fachliche Austausch unter den Projektpartner/-innen aber auch der Austausch mit Vertretern aus der Praxis. Die Projektansätze und die vorläufigen Ergebnisse zu den Schwerpunkten Wasserhaushalt, Nährstoffbilanzen und Anbaursisko wurden am Waldstandort „Bunte Buche“ in Form eines Praxis-Workshops beispielhaft an drei Bodenprofilen vorgestellt und diskutiert. Es nahmen ca. 30 Personen an dem Workshop teil.



Abbildung 86: Links: Darstellung des Anbaursikos am Exkursionspunkt Schönebecker Sand-Rostpodsol. Rechts: Präsentation des Wasserhaushalts am Standort Finowtaler Sand-Braunerde

AFSV-Jahrestagung

Teilnehmer/-innen: Tagungsteilnehmer/-innen, Landrat, Bereichsleiter Forsten

Im Rahmen der AFSV-Jahrestagung (Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standorts- und Vegetationskunde) im Oktober 2023 stellten LWF und VfS die Methodik zur Sicherung, Harmonisierung und Weiterentwicklung konventioneller Standortinformationen in Bayern am Beispiel des Kartiergebiets „Teuschnitz“ der WBV Kronach-Rothenkirchen vor. Neben den Tagungsteilnehmer/-innen waren auch Klaus Löffler, Landrat des Landkreises Kronach und Jens Haertel, Bereichsleiter Forsten des AELF Coburg-Kulmbach vertreten.



Abbildung 87: Präsentation der Methodik zur Weiterentwicklung der Standortinformationen in Bayern im Rahmen der AFSV-Jahrestagung (2023). Von links: Klaas Wellhausen (LWF), Stephan Garnreiter (VfS), Sandra-Maria Hipler (LWF), Jens Haertel (AELF Coburg-Kulmbach), Klaus Löffler (Landrat Landkreis Kronach), Markus Wich (Geschäftsführer WBV Kronach-Rothenkirchen), Helge Walentowski (HAWK)

Ergebnisvorstellung und -diskussion, Praxisrückkopplung

Bayern

Waldtag Cham-Roding

Teilnehmer/-innen: Waldbesitzer, Beratungsförster/-innen, Vertreter/-innen des VfS

Eine Präsentation aktueller Ergebnisse und Produktvorschläge durch LWF und VfS fand im November 2024 in einem Waldgebiet der WBV Cham-Roding statt. Im Rahmen dieses Außentermins hatten die Teilnehmer/-innen die Möglichkeit ihr praktisches Wissen und Verbesserungsvorschläge einzubringen und die Produkte aktiv mitzugestalten. Hierbei ging es insbesondere um die praxisorientierte Darstellungsweise einer weiterentwickelten Standortkarte und des Anbaurisikos in Form einer Baumarteneignungstabelle 2.0.



Abbildung 88: Präsentation der Ergebnisse und Produktvorschläge vor Vertretern aus der forstlichen Praxis.

LWFregional

Teilnehmer/-innen: Beratungsförster/-innen, Vertreter/-innen von WBVen/FBGen,

Die Formatreihe LWFregional dient dazu neue Ergebnisse aus der angewandten forstlichen Forschung bei forstlichen Praktikern und Interessierten vor Ort in den verschiedenen Regionen Bayerns vorzustellen und zu diskutieren. In diesem Rahmen wurden die Zwischenergebnisse des vorliegenden Projekts in Vorträgen vorgestellt. Die Vortragstitel lauteten: „Klima- und Standortwandel im Blick, Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis - Beispiel Nürnberger Land“ und „Wald-, Klima- und Standortwandel zwischen Steigerwald und Fichtelgebirge, Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis“. Im Rahmen der Veranstaltungen kamen wichtige Rückmeldungen zur Bedeutung, Nutzung und Ausgestaltung der forstlichen Standortinformationen und Baumarteneempfehlungen.

BaSIS 2.0 Feedback- und Informationsworkshop

Teilnehmer/-innen: Revierleiter/-innen, Bereichsleiter Forsten

Im Rahmen der Vorbereitung der Ausrollung des überarbeiteten Anbaurisikos im Bayerischen Standortinformationssystem BaSIS wurden Inhalte und mögliche praxisorientierte Darstellungsformen des Anbaurisikos mit Försterinnen und Förstern der bayerischen Forstverwaltung, als künftige Anwender, diskutiert. Diese Feedback- und Informationsworkshops waren nicht integraler Bestandteil des StWM-KPW Projekts haben aber wichtige Einblicke in das Nutzerverhalten und die Ausgestaltung von digitalen Beratungswerkzeugen geliefert. Ferner dienten die Workshops dazu die unterschiedlichen Beratungs- und Informationssysteme der Forstverwaltung und der forstlichen Zusammenschlüsse inhaltlich und gestalterisch aufeinander abzustimmen.

Die Darstellung des Anbaurisikos in Tabelle 32 ähnelt zum Beispiel den etablierten Baumarteneignungstabellen der forstlichen Standortkartierung umfasst zugleich aber die methodischen und inhaltlichen Bestandteile des weiterentwickelten klimadynamischen Anbaurisikos. Die Rückmeldung der Workshopteilnehmerinnen und -teilnehmer hierzu hat gezeigt, dass diese Darstellungsform grundsätzlich für die Beratungspraxis geeignet ist, allerdings noch stärker reduziert und vereinfacht werden muss.

Tabelle 32: Standortspezifisches Anbaurisikos im Format der traditionellen Baumarteneignungstabelle im Rahmen eines BaSIS 2.0 Feedback- und Informationsworkshops mit Försterinnen und Förstern der bayerischen Forstverwaltung (Januar 2025)

Variante 3 Anbaurisiko	Fichte	Lärche	Tanne	Kiefer	Buche	Hainbuche	Traubeneiche	Stieleiche	Bergahorn	Spitzahorn	Feldahorn	Esche	Winterlinde	Sommerlinde	Kirsche	Elsbeere	Speierling	Bergulme	frz. Ahorn	Edelkastanie	Zerreiche	Flaumeiche	Schwarzerle
Gesamt	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
Risikokomponenten*:																							
- ¹ Klima	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
- ¹ Klima + Wasserspeicher	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
- ² Boden: Hydromorphie	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
- ² Boden: Basenausstattung	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
- ² Boden: Kalk im Oberboden	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
- Sonstiges

* Die Risikokomponente mit dem höchsten Risiko bestimmt das Gesamt-Anbaurisiko und ist mit einem Rufzeichen (!) gekennzeichnet (ausgenommen Arten mit geringem Gesamtrisiko). Das Klimarisiko¹ prüft Szenario-übergreifend, wann das Risiko von <gering> (grün) nach <erhöht> (gelb) umspringt (s. Legende).

VfS-Strategieworkshop

Im Rahmen einer Strategiesitzung des Vereins für forstliche Standorterkundung in Bayern e.V. (VfS) wurde über künftige Arbeitsfelder des Vereins diskutiert. Eines der identifizierten war die Bereitstellung von Geo- und Standortdaten. Schon heute ist dies eines der zentralen Arbeitsfelder des VfS. Der VfS verwaltet für die seinerzeitigen Auftraggeber der Standortkartierung – im Wesentlichen die WBVen und FBGen - die analogen und digitalen konventionellen Standortdaten und stellt diese bei Bedarf zur Verfügung. Dieses Arbeitsfeld wurde von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern als bedeutsam und zukunftssträftig identifiziert. In diesem Rahmen wurde auch intensiv über die unterschiedlichen Bereitstellungswege und -formen (digital vs. analog) und das unterschiedliche Nutzungsverhalten des heterogenen Nutzerkreises diskutiert (unterschiedliche Alters-

gruppen der Waldbesitzenden, unterschiedliche digitale Affinität, unterschiedliche digitale technische Ausstattung bei Waldbesitzenden, heterogene IT-Landschaft und Nutzungsansprüche bei den WBVen und FBGen). Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund wurde im Nachgang zu dem Strategie-Workshop bei den WBVen und FBGen eine Potenzialerhebung als Umfrage durchgeführt. Der große Rücklauf der Umfrage hat gezeigt, dass bei den WBVen und FBGen ein gestiegenes Interesse an einer Nutzung der weiterentwickelten harmonisierten und klimadynamisierten Standortinformationen besteht und seitens des VfS entsprechende technische Möglichkeiten geschaffen bzw. erhalten werden sollen (VfS-Viewer). Nicht zuletzt ausgehend hiervon erfolgte in einer gesonderten Initiative eine erste Weiterentwicklung des VfS-Viewers.

Nordwestdeutschland, Fokus Niedersachsen

Projekt „KLEIBER“ wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert. Im Rahmen des Projektes „Kleiber“ wurde in einer groß angelegten Befragung von 1.671 niedersächsischen Privatwaldbesitzern ermittelt, welche Ziele Kleinprivatwaldbesitzer verfolgen, wie sie ihren Wald bewirtschaften und welche Standpunkte sie in Bezug auf Naturschutz und Ressourcennutzung einnehmen. Die Befragung und Auswertung wurde von der Landwirtschaftskammer (LWK) und verschiedenen Forstbetriebsgemeinschaften unterstützt. Hierbei wurde von mehr als 90 Prozent der Befragten der Erhalt gesunder und stabiler Bestände, die Sicherung der Boden-, Wasser- und Luftqualität sowie der Schutz der Artenvielfalt als wichtig oder sehr wichtig eingestuft, während die Holzproduktion für die persönliche Versorgung für mehr als zwei Drittel wichtig war. Diese Umfrage verdeutlicht die große Bedeutung eines standortgerechten Waldmanagements im Kleinprivatwald. Zentraler Ansprechpartner ist in Niedersachsen die LWK, die für mehr als 60.000 Privatwaldbesitzer/-innen zuständig ist. Über Kooperationen mit Waldbesitzer/-innen betreut die LWK gut 500.000 Hektar Waldfläche. Entsprechend wurde seit Beginn des Projektes StWM-KPW ein intensiver Austausch mit der LWK gesucht. Sowohl die Auswahl der Projektregionen als auch die Bodenprobenahmen in den Beispielregionen wurden zusammen mit den Standortkartierern der Landwirtschaftskammer durchgeführt. In beiden Regionen wurden bis zum Projektende durch die LWK Standortkartierungen im Privatwald durchgeführt, sodass sich zahlreiche fachliche und organisatorische Synergieeffekte ergeben haben. Hieraus ergaben sich auch sehr wertvolle Diskussionen hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der digitalen Vorschätzung von Standorteinheiten der niedersächsischen forstlichen Standortkartierung für bisher nicht kartierte Flächen des niedersächsischen Privatwaldes.

Der für die niedersächsische Standortkartierung entwickelte Ansatz zur Regionalisierung bodenchemischer Indikatoren wurde im April 2024 auf der Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“ vorgestellt und sowohl mit Vertretern der Praxis als auch der Wissenschaft diskutiert.



Abbildung 89: Gemeinsame Begehung, Beprobung und Diskussion am Bodenprofil zwischen NW-FVA- und LWK-Mitarbeitern in der Beispielregion Soltau. Fotos: B. Ahrends, S. Weiken.

Baden-Württemberg

Austausch mit Landesforstverwaltung und ForstBW

Das Thema „Nährstoffnachhaltigkeit“ wurde am 12.09.2024 im Ministerium für Ländlichen Raum MLR in Stuttgart mit Vertretern der Landesforstverwaltung, des Regierungspräsidiums, des Staatsforstbetriebes ForstBW und der FVA Baden-Württemberg diskutiert. Hier wurden die Ansätze und Ergebnisse des Projektes sowie darüberhinausgehende Grundlagen der FVA vorgestellt: (1) Nährstoffversorgung in den Wäldern Baden-Württembergs: aktuelle Situation und Entwicklung, (2) Nährstoffentzüge mit der Holz- und Biomassenutzung, (3) Nachhaltigkeitsindizes für Baden-Württemberg, (4) Werkzeuge für die Berücksichtigung von Nährstoffnachhaltigkeit im betrieblichen Handeln. Hintergrund ist der gesetzliche Auftrag „zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit“ sowie die in der Waldstrategie des Landes Baden-Württemberg verankerte ressourcenschonende Waldbewirtschaftung als Teil der Klimaanpassungsstrategie. Als Ergebnis gab es ein gemeinsames Bekenntnis zur Nährstoffnachhaltigkeit und folgende Schritte wurden als notwendig zusammengefasst: (1) Bewertungsrahmen festlegen (2) Zielkonflikte identifizieren (3) Praxispartner für Pilotprojekte identifizieren (4) Standortbezogene Wachstumsmodelle integrieren. Nährstoffnachhaltigkeit sei ein wichtiges Thema. Es gibt noch Informationsbedarf und es soll weiter daran gearbeitet werden, z.B. im Rahmen der Waldstrategie Baden-Württembergs.

Bodensymposium in Stuttgart

Als gemeinsame Veranstaltung des Ministeriums für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) wurde das Thema „Multitalent Waldboden“ im Rahmen der Kampagne „Waldboden ist Boden des Jahres 2024“ einem breiten Publikum vorgestellt. Zielgruppe der Tagung am 16.10.2024 waren Fachleute und weitere Interessierte aus den Bereichen Forst, Naturschutz und Bodenschutz. Inhalte waren u.a. eine Diskussionsrunde mit Herrn Mi-

nister Peter Hauk, MdL und Herrn Ion Codescu der EU-Kommission, Fachbeiträge zu den Themen Bodenfruchtbarkeit und Eutrophierung, wo u.a. auch Ergebnisse des Projektes StWM-KPW vorgestellt wurden. Ausführliche Informationen finden sich dauerhaft dokumentiert unter: <https://www.fva-bw.de/aktuelles/veranstaltungenseiten/bodensymposium-2024-ueberfordertes-multitalent-waldboden>.

Tagungsbeiträge

Mehrere Posterbeiträge wurden darüber hinaus bei der „Tagung der Sektion Waldernährung im DFVVA“ vom 15.05. - 18.05.2024 im tschechischen Loket sowie der Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“ am 24.04. - 26.04.2024 in Göttingen vorgestellt.

Verwertung

Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen im Rahmen dieses Projektes

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten in Bayern, Baden-Württemberg und Nordwestdeutschland verfolgen keine wirtschaftlichen Interessen. Sie arbeiten in zahlreichen Kooperationen mit anderen Forstlichen Versuchsanstalten, Forschungseinrichtungen und Universitäten zusammen. Diesbezüglich ist die Weiterentwicklung von wissenschaftlichen Grundlagen zur Stärkung ihrer Expertise und des Portfolios ein wichtiges Element der Forschungstätigkeit, die sich nicht nur in der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit äußert, sondern auch in ihrer Funktion als Kompetenz- und Servicestelle für Forstbetriebe, Waldbesitzende, Verwaltungen und die Politik in den beteiligten Ländern. Entsprechend ist der Kompetenzausbau im Bereich der Standortkartierung, Wasserhaushaltsmodellierung, Baumarteneignungsbeurteilung und Stoffbilanzierung von Wäldern ein Beitrag zur Erschließung von Anwenderpotenzial bei der Mitarbeit in fachlichen Gremien.

Die Zusammenarbeit mit Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten aus unterschiedlichen Bundesländern schafft Synergien bei der Nutzung von Daten und wissenschaftlichem Equipment und bildet dadurch einen Mehrwert bei deren Nutzung für öffentliche Aufgaben. Die erarbeiteten Forschungsergebnisse wurden und werden in internationalen Zeitschriften mit peer-review Verfahren sowie in praxisnahen Medien (Zeitschriften/Internet) publiziert und schaffen eine internationale Sichtbarkeit in dem Forschungszweig. Sie stehen damit der Allgemeinheit zur Verfügung und können von Dritten für weitere Forschung genutzt werden.

In Brandenburg soll die Verbreitung der Projektergebnisse (QField-App und Standortfibel) an Waldbesitzer/-innen über Multiplikatoren erfolgen. Dazu wurde Kontakt mit der Waldbauernschule Brandenburg e.V. aufgenommen. Der wesentliche Vorteil der Verwendung von QField ist, dass diese Anwendung als OpenSource-Produkt wartungsfrei ist, da die neueste Version für Nutzer/-innen frei zur Verfügung steht. Somit entsteht nach Projektende für die Bereitstellung und Pflege der Anwendung nur ein sehr geringer Aufwand. Es ist geplant, die QField-App und die Fibel im September 2026 zu veröffentlichen.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Bayern: Aufbauend auf mehreren aus Landesmitteln finanzierten Vorgängerprojekten und bundesfinanzierten Vorarbeiten aus den Projekten WP-KS-KW (Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels; FKZ: 22WC400303) und WHH-KW (Standortfaktor Wasserhaus-

halt im Klimawandel; FKZ: 28WK414102) wurde im Projekt StWM-KPW eine bündelnde Daten- und Methodengrundlage geschaffen, die nachstehende Umsetzungsschritte auch außerhalb der Projektbeziehungswise Beispielgebiete ermöglicht. Z. B. ermöglicht die im Rahmen des Projektes StWM-KPW aufgebaute Bodenprofildatenbank und das entwickelte Zuweisungsverfahren eine Zuordnung von labortechnisch analysierten Leitprofilen. Aufbauend auf den damit verfügbaren physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften können für sämtliche verfügbare und hierfür von den Rechteinhabern freigegebene digitale Daten der konventionellen Standortkartierung regelbasierte Wasser- und Nährstoffhaushaltsinformationen und Baumarteneignungsbewertungen für den kleinen und mittleren Privatwald bereitgestellt werden. Hierbei kommt auch die im Rahmen des Projektes für die Beispielgebiete entwickelte künftig bayernweit gültige kartografische Darstellung, Standortverschlüsselung und Kartenlegende zum Einsatz. Zur bayernweiten Umsetzung wurden bereits aus Landesmitteln finanzierte Anschluss- und Umsetzungsprojekte initiiert. Geplant ist zunächst die Bereitstellung eines inhaltlich harmonisierten und hinsichtlich des Wasserhaushalts dynamisierten Standortdatenbestandes (Zeithorizont 1 Jahr). Anknüpfend daran sollen die weiterentwickelten und harmonisierten Standortdaten mit klimadynamischen und standortsensitiven Baumartenrisikoeinschätzungen (Baumarteneignungstabellen 2.0) versehen werden (Zeithorizont 1 Jahr). Als Ausspielwege sind - in Abhängigkeit von den jeweiligen Datennutzungsrechten - bestehende Plattformen vorgesehen (VfS-Viewer, BayWIS/BaSIS, direkte Datenabgabe an Rechteinhaber/-innen und Nutzer/-innen). Die entwickelten Verfahren und Methoden können ferner auch auf den Körperschaftswald und den bayerischen Staatswald übertragen werden (Zeithorizont 1-4 Jahre).

Darüber hinaus ist die Nutzung der neugewonnenen Kenntnisse in Ausbildung und Lehre durch Informationsmaterialien, Beispielanwendungen und Schulungen auf langfristige Sicht geplant (Zeithorizont: über 4 Jahre)

Nordwestdeutschland: Die Methoden zur Ableitung von Bodenprofilen für Standorttypen der niedersächsischen Standortkartierung wurden in Zusammenarbeit mit dem Waldklimafonds-Projekt Klimawandelbedingte Mortalitäts- und Wachstumstrends als Grundlage für bundesweit vergleichende Baumarteneignungsbeurteilungen (MultiRiskSuit - Förderkennzeichen: 2220WK41F4) weiterentwickelt. Unter Berücksichtigung der Vorarbeiten aus den Projekten WP-KS-KW (Veränderte Produktivität und Kohlenstoffspeicherung der Wälder Deutschlands angesichts des Klimawandels; FKZ: 22WC400303) und WHH-KW (Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel; FKZ: 28WK414102) konnte für Niedersachsen und Schleswig-Holstein ein Ansatz etabliert werden, mit dem es auch zukünftig möglich ist, für die Kartiereinheiten der Standortkartierungen aus Niedersachsen und Schleswig-Holstein für Standorttypen spezifische Bodenprofile zu generieren und diese als Grundlage für die Ermittlung von Wasser- und Stoffflüssen in den forstlichen Bewirtschaftungseinheiten einzusetzen (Zeithorizont: 1 bis 4 Jahre, je nach Kartierfortschritt über 4 Jahre).

Die Evaluierung der Vorschätzung der Standortkartierung in den Testregionen hat gezeigt, dass im Tiefland eine erfolgreiche digitale Vorschätzung der Standorteinheiten eine wertvolle Grundlage für eine beschleunigte Kartierung im Gelände ist. Eine bessere Abdeckung und Qualität der kartierten Standorttypen ermöglichen eine verbesserte waldbauliche Planung im Privatwald. Entsprechend dürfte sich die Akzeptanz der „digitalen“ Vorschätzung erhöht haben und ein intensiverer Einsatz kann zu einer Beschleunigung der Füllung von Kartierlücken im niedersächsischen Privatwald führen (Zeithorizont: 1 bis 4 Jahre). Dieser Schritt ist besonders wichtig, da die Informationen der Standortkartierung sowohl für die angewandte Forschung als auch für die forstliche Praxis und die Politik eine wichtige Entscheidungs- und Beratungsgrundlage darstellen.

Baden-Württemberg: Es wurde eine Webanwendung entwickelt, die es erlaubt für konkrete Orte in Baden-Württemberg und für die konkrete Bestandessituation (Baumarten, Bonitäten, Baumartenanteile) eine Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit abzuleiten. Für Standorte innerhalb der Beispielgebiete wird auf die Ergebnisse der Modellierungen der Bilanzterme aufgebaut. Ergänzend werden auch die landesweiten Ergebnisse der NachhaltigkeitsIndizes angezeigt.

Im Rahmen des Workshops mit der Landesforstverwaltung in Stuttgart und Vertretern des Staatsforstbetriebs wurde das Thema einer nährstoffnachhaltigen Forstwirtschaft intensiv beratschlagt und eine weitere Bearbeitung des Themas als wichtig angesehen. Im Rahmen der Waldstrategie von Baden-Württemberg ist geplant,

sich aufbauend auf den Projektergebnissen von StWM-KPW in den nächsten Jahren vertieft mit dem Aspekt der Nährstoffnachhaltigkeit weiter auseinanderzusetzen.

Brandenburg: Die Daten für QField und die Standortfibel sollen als Download bereitgestellt werden. Die Fertigstellung der Standortfibel sowie dessen Druck und Herausgabe kann voraussichtlich erst nach dem Projektende erfolgen. Auf welchem Server die Bereitstellung der Daten für die QField-App erfolgt, Landesforstbetrieb oder Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, ist noch nicht geklärt. Die Daten der QField-App und ihre Darstellung sollen auch in das Geoportal Brandenburg eingebunden werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Bayern: Die im Rahmen des Projekts StWM-KPW aufgebaute Bodenprofildatenbank und damit verbundenen Methoden und Berechnungsroutinen können auch für Folgeprojekte genutzt werden.

Aufbauend auf den Vorarbeiten des Projekts WHH-KW (Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel; FKZ: 28WK414102) wurden im Projekt StWM-KPW Verfahren zur flächenhaften Berechnung des Standortwasserhaushalts für Daten der konventionellen Standortkartierung entwickelt und angewendet. Sowohl die Verfahren als auch die Ergebnisse können unter Beachtung der Nutzungs- und Verwertungsrechte für weitere wissenschaftliche Fragestellungen genutzt werden. In diesem Zusammenhang haben sich bereits Anknüpfungspunkte zu landesfinanzierten Projekten in Bezug auf den Landschaftswasserhaushalt und zu wissenschaftlichen Arbeiten zu Befahrungsinformationen ergeben.

Die Ergebnisse des Projekts StWM-KPW liefern einen Beitrag zur Weiterentwicklung der konventionellen standortkundlichen Kartierverfahren in Bayern (Erfassung von Bodenparametern und Einschätzung des Standortwasserhaushalts im Gelände), einschließlich von Ansätzen des Digital Soil Mapping. Hierzu bestehen bereits weiterführende Projektüberlegungen auf Landesebene.

Die im Projekt StWM-KPW entwickelten Methoden und Verfahren der Nährstoffbilanzierung (Depositon, Verwitterung, Entzug) bieten einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn im Themenfeld Nährstoffhaushalt und stellen einen wichtigen Beitrag zur Diskussion landesspezifischer Informations- und Beratungsangebote dar.

Nordwestdeutschland: Durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse in internationalen Fachzeitschriften wird die künftige Wettbewerbsfähigkeit in der Grundlagen- und angewandten Forschung der NW-FVA verbessert. Anschlussprojekte auf nationalem und internationalem Niveau werden angestrebt und durch den Kompetenzaufbau in der Anbahnung und Drittmittelfinanzierung vereinfacht. Mittelfristiges Ziel ist es, die entwickelten und verbesserten Methoden in die aufzubauenden oder bestehenden Baumartenempfehlungs- und Nährstoffmanagementsysteme der jeweiligen Bundesländer zu integrieren. Entsprechend werden neue Erkenntnisse auf den bundesweiten und internationalen Fachkonferenzen vorgestellt oder in neue Forschungsprojekte aufgenommen. Ein Beispiel dafür ist das im Dezember 2024 gestartete Verbundvorhaben „Harmonisierte Bilanzierung des Nährstoffhaushaltes auf Intensivmessflächen des Forstlichen Umweltmonitorings“ (FKZ: 2224NR092A), an dem alle Bundesländer in Deutschland beteiligt sind und das von der NW-FVA koordiniert wird.

Durch das vorliegende Projekt wurden die Grundlagen erarbeitet, um den Privatwaldbesitzern wissenschaftlich begründete, praxisrelevante Entscheidungshilfen für das forstliche Management im Hinblick auf eine nachhaltige Waldbewirtschaftung bereitstellen zu können. In Form von Szenariensimulationen wurden Optionen verschiedener Klimaszenarien und unterschiedlicher Biomassenutzungen für typische Waldökosysteme verglichen, die eine Einschätzung der Nutzungspotenziale unter Einhaltung der stofflichen Nachhaltigkeit ermöglichen. Die Ergebnisse sind eine Entscheidungsgrundlage zur Anpassung von Handlungsempfehlungen des forstlichen Managements, um unerwünschte Wirkungen (z.B. Zuwachsverluste im Stammholz) zu vermeiden.

Baden-Württemberg: Die entwickelten Methoden zur Herleitung und flächendeckenden Darstellung von Bodendaten für die Waldböden Baden-Württembergs liefern wichtige Ergebnisse für Folgeprojekte. Auch die Kombination aus Bodenzustand und berechneten Nährstoffbilanzen stellt einen ersten Ansatz dar, die verschiedenen Kenngrößen, die den Nährstoffhaushalt beeinflussen, gemeinsam darzustellen. An der FVA BW wird dieses Thema künftig weiter vertieft. Im März 2025 beginnt das FNR-geförderte Projekt „Stoffbilanz“ (Verbundprojekt Harmonisierte Bilanzierung des Nährstoffhaushaltes auf Intensivmessflächen des Forstlichen Umweltmonitorings; Teilvorhaben 2: Sickerwasseraustrag, Festlegung in der Biomasse/ Export durch Holzernte und gasförmige Stoffausträge; FKZ 2224NR092B), das wertvolle Anknüpfungspunkte an die Ergebnisse von StWM-KPW bietet.

Brandenburg: Die erhobenen Projektdaten wurden an das Waldklimafond-Projekt MultiRiskSuit (Förderkennzeichen: 2220WK41F4) weitergegeben und werden dort verwendet. Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung sollen bei der Entwicklung von Waldentwicklungstypen für Brandenburg durch das LFE einfließen. Daten zur Sickerung sollen für das Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg genutzt werden, um Modellergebnisse bezüglich der Wirkung des Waldumbaus auf die Sickerung zu vergleichen.

Erkenntnisse von Dritten

Im Projekt wurden keine exklusiven Erkenntnisse von Dritten verwendet, die nicht öffentlich zugänglich oder im Rahmen von Nutzungsvereinbarungen verfügbar waren.

Die Recherche ergab ferner keine Hinweise auf die Bearbeitung des vorliegenden Forschungsthemas durch andere Forschungsinstitutionen. Dabei ist allerdings hervorzuheben, dass die im Projekt verwendeten Methoden auch in anderen Forschungsvorhaben Anwendung finden und weiterentwickelt werden. Dies gilt z. B. im Bereich der Anbaurisikoanalyse von Baumarten. Weiterhin wird z. B. im Projekt MultiRiskSuit (Förderkennzeichen: 2220WK41F4) auch an der Weiterentwicklung der Ableitung von Bodenprofilen zu Einheiten der Standortkartierung gearbeitet, da entsprechende Informationen auch für die Nachbarschaftsregionen des angeführten Projektes benötigt wurden. Durch die Abstimmung der Arbeiten könnten Projekt- und Testgebietsübergreifend konsistente Methoden und Bewertungen entwickelt werden. Ferner wurden für die Niederlande von De Vries et al. (2021) Leitlinien für die Ernte von Waldbiomasse in Abhängigkeit von Region, Baumart und Bodentyp abgeleitet. Die dort angewendeten Methoden sind z.T. in die Arbeiten des Projektes eingeflossen und die Ergebnisse insbesondere mit den Ergebnissen von Tieflandstandorten diskutiert worden.

Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

Zeitschriftenbeiträge:

Braun S., **Ahrends B.**, Alonso R., Augustin S., García-Gómez H., Hunová I., Karlsson P.E., Karlsson G.P., Schmitz A., Thimonier A. (2022) Nitrogen deposition in forests: Statistical modeling of total deposition from throughfall loads. *Front. For. Glob. Change* 5:1062223. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1062223.

Schmitz, A., **Ahrends, B.**, Herrmann, H., Moravek, A., Poulain, L., Sanders, T., Wiedensohler, A., and Bolte, A.: Underestimation of potassium in forest dry deposition? – A simulation experiment in rural Germany, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-3358, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3358>, 2023.

Wellhausen, K., Mette, T., Garnreiter, S., Plettenbacher, T., Hipler, S.-M. (2023): Harmonisierung und Weiterentwicklung der Standortkartierung in Bayern. In: *Die Rolle von Standortkunde, Baumartenbeurteilung und forstliche Maßnahmen für das Gelingen von Waldumbau und Wiederbewaldung am Beispiel des Frankenwaldes*. Arbeitsgemeinschaft Forstliche Standort- und Vegetationskunde, Exkursionsführer zur AFSV-Jahrestagung 2023 (S. 52-59). Klartext GmbH.

Mette, T., Schaller, M., Falk, W., Hipler, S.-M., Wellhausen, K. (2025). BaSIS 2.0: Das neue (Baumarten-) Anbaurisiko. LWF-aktuell 153, S. 4-9

Abschlussarbeiten:

Niethammer, M. (2024): Validierung und Optimierung eines Nährstoffindex für die Waldböden Baden-Württembergs. Masterarbeit im Rahmen des Projekts StWM-KPW.

Vorträge:

Hipler, S.-M. (2023): Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald. Klima – Nährstoffe – Wasserhaushalt (StWM-KPW). FNR-Statusseminar (Klein)Privatwald, Göttingen, 28.-29.11.2023.

Mette, T. (2024): Erfahrungen im Einsatz von digitalen Werkzeugen bei der Baumartenwahl – Projekt Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald (StWM-KPW). FNR Online-Seminar: Baumartenwahl im Klimawandel: Prognosetools zur Risikoabschätzung, 14.03.2024.

Puhmann, H. (2024) [Bodenfruchtbarkeit: Gefährdung und Schutz einer begrenzten Ressource](#). Bodensymposium „Waldböden: Überfordertes Multitalent?“, Stuttgart

Weiken, S., Ahrends, B., Schirrmeister, F und F. Heitkamp (2024): Regionalisierung bodenchemischer Indikatoren für niedersächsische Waldböden. Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“ am 24. – 26. April 2024, Göttingen.

Wellhausen, K., Hipler, S.-M., Garnreiter, S. (2023): Sicherung, Harmonisierung und Weiterentwicklung konventioneller Standortinformationen in Bayern. AFSV-Jahrestagung, Frankenwald.

Wellhausen, K. (2024): Klima- und Standortwandel im Blick - Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis, Beispiel Nürnberger Land. LWF regional Mittelfranken (Roth)

Wellhausen, K., Falk, W., Hipler, S.-M., Dietz, E., Mette, T., Wellpott, A., Plettenbacher, T., Garnreiter, S. (2024): Boden, Klima, Standortwandel und Baumartenwahl in der Region Lindau/Hangnach. Exkursionsvorträge und Poster im Rahmen der Länderübergreifenden Tagung von DBG, ÖBG, BGS und INTERREG WINALP21 zum Boden des Jahres 2024, Wald.Boden.Klima.Wandel - Wälder und ihre Böden zwischen Arlberg, Appenzell und Allgäu im (Klima)Wandel - Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze in Wissenschaft und Praxis

Wellhausen, K. (2025): Klimadynamische Standort- und Baumarteninformationen für die forstliche Praxis - Lösungsansätze und Erfahrungen aus den Projekten StWM-KPW und EVA zur Klimadynamisierung von Standort- und Baumarteninformationen sowie zu produktbezogenen Nutzeransprüchen und Bereitstellungswegen. FNR Online-Tagung: Digitalisierung und Klimaschutz, 15.05.2025.

Wellhausen, K. (2025): Wald-, Klima- und Standortwandel zwischen Steigerwald und Fichtelgebirge – Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis; LWF regional Oberfranken (Kulmbach)

Posterbeiträge auf Tagungen:

Hartmann, P.; Niethammer, M.; Osterholt, L.; Habel, R.; Puhmann, H. (2024). Bodenregionalisierungen als Grundlage einer flächendeckenden Standortbewertung. Posterbeitrag auf der Tagung der Sektion Waldernährung im DFVVA, Karlovy Vary, Tschechien.

[Niethammer, M.; Habel, R.; Hartmann, P. \(2024\) Nährstoffsituation der Waldböden – Genügend Nährstoffe für die Wälder der Zukunft?](#) Posterbeitrag auf dem Bodensymposium „Waldboden: Überfordertes Multitalent?“, Stuttgart

Riek, W., Ziche, D., Russ, A., **Viert, V.,** Bontrup, H., Brini, A. (2025): Kohlenstoffsенke Boden und Waldbewirtschaftung: Wissenstransfer für Waldbesitzende mittels Standort-App und Standortfibel – Das Projekt „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald (StWM-KPW)“. Posterbeitrag auf der Tagung „Kohlenstoffbindung in Waldökosystemen und Holzprodukten“, Göttingen

Ziche, D., Russ, A., **Riek, W.** (2023): Standortinformationen für ein zukunftsfähiges Waldmanagement in Brandenburg. Posterbeitrag auf der DGB-Tagung, Halle.

Ziche, D., Russ, A., **Riek, W.** (2024): Abschätzung jährlicher Sickerungsraten für Stoffbilanzen von Wäldern: Anpassung des TUB-BGR - Verfahrens an das LWF-BROOK90 – Modell. Posterbeitrag auf der Tagung „Wald und Wasser“, Göttingen.

Geplante Veröffentlichungen

Schmitz, A., **Ahrends, B.,** Bolte, A., Hartmut Herrmann, H. Moravek, A., Laurent Poulain, L. Alfred Wiedensohler, A., Sanders, T (2025): Similar substance ratios in wet and dry deposition? Revisiting atmospheric base cation inputs to forests. (submitted).

Artikel zur Nährstoffsituation der Waldböden im Waldzustandsbericht 2025 von Baden-Württemberg

Artikel: Nutrient export by harvesting: a comparative analysis for Germany and possibilities for extensification (working title)

Artikel in LWFaktuell

Zitierte Literatur

LWF/VfS:

Aldinger, E., Michiels, H. G. (1997): Baumarteneignung in der forstlichen Standortskartierung Baden-Württemberg. AFZ-DerWald, 52, 234-238.

Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W., & Erhard, M. (2005): Validation of species–climate impact models under climate change. *Global change biology*, 11(9), 1504-1513.

Beck J. Dietz E. (2012): Endbericht KLIP4 – Karten für die Zukunft „Anpassung der bestehenden Standortkartierung“. Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Freising. 160 S.

Beck, J., Kölling, C. (2013): Das bayerische Standortinformationssystem. LWF-aktuell 94, S. 4-7

Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (2005): Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 438 S. (KA5)

Bohn, U.; Neuhäusl, R.; Gollub, G.; Hettwer, C.; Neuhäuslová, Z.; Raus, T.; Schlüter, H.; Weber, H. (2003): Map of the Natural Vegetation of Europe, Scale 1: 2 500 000. Parts 1-3. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup

Caudullo, G.; Welk, E.; San-Miguel-Ayanz, J. (2017): Chorological maps for the main European woody species. *Data in brief*, 12, 662-666.

Dietrich, H., Wolf, T., Kawohl, T., Wehberg, J., Kändler, G., Mette, T., ... Böhner, J. (2019): Temporal and spatial high-resolution climate data from 1961 to 2100 for the German National Forest Inventory (NFI). *Annals of Forest Science*, 76, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0788-5>

Dinh, T.L.A., Aires, F. (2023) Revisiting the bias correction of climate models for impact studies. *Climatic Change* 176, 140. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03597-y>

Falk, W., Hempelmann, N. (2013): "Species favourability shift in Europe due to climate change: a case study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. based on an ensemble of climate models." *Journal of Climatology* 2013.1, 787250.

Falk, W., Mellert, K., Bachmann-Gigl, U., Kölling, C. (2013): Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. LWF-aktuell 94, S. 8-11.

- Falk, W., Mellert, K.H. (2011): Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science* 22.4, 621-634.
- Grinnell, J. (1917): The niche-relationships of the California Thrasher. *Auk*, 34, 427–433.
- Guisan, A., Zimmermann, N. E. (2000): Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C. Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K., Woldt, M. (2017): ReKliEs-de Ergebnisbericht. <https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>
- Hutchinson, G.E. (1957): Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427. <http://dx.doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- KA5 (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Auflage. Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 438 S.
- Karger D.N., Conrad, O., Böhrer, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E, Linder, H.P., Kessler, M. (2018): Data from: Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *EnviDat*. <https://doi.org/10.16904/envidat.228.v2.1>
- Kölling, C. (2007): Klimahüllen für 27 waldbaumarten. *AFZ-DerWald*, 23 (2007), 1242-1245.
- Kölling, C. (2010): Macht sauer wirklich lustig? *LWF aktuell* 78, 21-24
- Kölling, C. (2024): *Wälder in Bewegung. Eine Reise durch hundert Jahre Wald- und Klimazukunft*. Oekom, 162 Seiten, ISBN: 978-3-98726-104-6
- Kölling, C., Dietz, E., Falk, W., Mellert, K. H. (2009): Provisorische Klima-Risikokarten als Planungshilfe für den klimagerechten Waldumbau in Bayern. *Forst und Holz*, 64(7/8), 40-47.
- Loehle, C., LeBlanc, D. (1996): Climate change effects on forests: A critical review.
- LWF – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2019): *Praxishilfe, (Band I): Klima - Boden – Baumartenwahl*. Freising.
- LWF – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2020): *Praxishilfe, (Band II): Klima - Boden – Baumartenwahl*. Freising.
- Maraun, D. (2016): Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Curr Clim Change Rep* 2, 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Mauri, A.; Strona, G.; San-Miguel-Ayanz, J. (2017): EU-Forest, a high-resolution tree occurrence dataset for Europe. *Scientific data*, 4(1), 1-8.
- Mette, T., Schaller, M., Falk, W., Hipler, S.-M., Wellhausen K. (2025): BaSIS 2.0: Das neue (Baumarten-) Anbaurisiko. *LWF-aktuell*, S. 4-9
- Osenstetter, S. (2012): Workflow zur Ableitung der UEBK-Bodenbasisdaten aus den Leitprofilen in KLIP4: PTF-DB.MDB. Anhang zu LWF (2012): Anpassung der bestehenden Standortkartierung „Maps for the future“. KLIP4 – Karten für die Zukunft. Abschlussbericht Projekt KLIP4. Freising.
- Osenstetter, S., Falk, W., Reger, B., Beck, J. (2013): Wasser, Luft, Nährstoffe – alles, was ein Baum zum Leben braucht. *LWF-aktuell* 94, S. 12-17
- Overpeck, J. T., Bartlein, P. J., Webb III, T. (1991): Potential magnitude of future vegetation change in eastern North America: comparisons with the past. *Science*, 254(5032), 692-695.
- Pearson, R. G., Dawson, T. P. (2003): Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global ecology and biogeography*, 12(5), 361-371.
- Ritchie, J. C. (1986): Climate change and vegetation response. *Vegetatio*, 67, 65-74.
- Sachindra, D.A., Huang, F., Barton, A., Perera, B.J.C. (2014): Statistical Downscaling of General Circulation Model Outputs to Precipitation - Part 2: Bias-Correction and Future Projections. *Int. J. Climatol.*, 34, 3282-3303.
- Schaller, M., Falk, W., Hahn, A., Mette T. (2025): Roteiche: eine attraktive Alternative im Klimawandel? *LWF Wissen*, 16-30.
- Soberón, J., Nakamura, M. (2009): Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (supplement_2), 19644-19650.

- Sykes, M. T., Prentice, I. C. (1995): Boreal forest futures: modelling the controls on tree species range limits and transient responses to climate change. *Water, Air, and Soil Pollution*, 82, 415-428.
- Taeger, S., Kölling, C. (2016): Standortinformationssystem BaSIS. *AFZ-DerWald*, S. 10-13.
- Teepe, R. et al. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutrition Soil Science* 166, 111-119. <https://sci-hub.st/https://doi.org/10.1002/jpln.200390001>
- Teutschbein, C., Seibert, J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.
- Thurm, E., Falk, W. (2019): Standortsansprüche seltener Baumarten. *AFZ-DerWald* 15/2019, S. 32-35.
- Thurm, E., Hernandez, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztovits, E., Bielak, K., ..., Falk, W. (2018): Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management*, 430, 485-497.
- Weis, W. (2019): Machbarkeitsstudie zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der standortkundlichen Datenbasis in Bayern. Endbericht der Projekts HarmStok. LWF, Freising. 78 S
- Weis W., Ahrends B., Böhner J., Falk W., Fleck S., Habel R., Klemmt H.-J., Meesenburg H., Müller A.-C., Puhmann H., Wehberg J.-A., Wellpott A., Wolf T. (2022): Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel (WHH-KW). Abschlussveröffentlichung zum Forschungsprojekt FKZ 22WK4141.
- Wood, S. N. (2017): Generalized additive models: an introduction with R. Chapman and Hall/CRC.
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., Po-Chedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, A., Taylor, K. E. (2020): Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47(1), e2019GL085782.

NW-FVA:

- AG-Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Aufl. ed. Hannover.
- Ahrends, B. (2012): Dynamische Modellierung der Auswirkungen von Kalkungen und Nutzungsszenarien auf die Basensättigung im Wurzelraum. *Beitr Aus NW-FVA* 9, 95–114.
- Ahrends, B., Fortmann, H., Meesenburg, H. (2021a): Versauerung Niedersächsischer Waldböden – BDF-Auswertungen zu Status Quo und Dynamik. *Geoberichte* 39, 147–161. https://doi.org/10.48476/geober_39_2021
- Ahrends, B., Fortmann, H., Meesenburg, H. (2022a): The Influence of Tree Species on the Recovery of Forest Soils from Acidification in Lower Saxony, Germany. *Soil Syst.* 6, 40. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020040>
- Ahrends, B., Heitkamp, F., Buresch, M., Evers, J., Hentschel, S., Bialozyt, R., Meesenburg, H. (2023): Neue Herausforderungen an das Waldmanagement: Möglichkeiten und Grenzen des “Digital Soil Mapping” bei der Bereitstellung flächenhafter Datensätze für die Forstplanung am Beispiel von Hessen. *Allg. Forst Jagdztg.* 192, 193–218. <https://doi.org/10.23765/afjz0002085>
- Ahrends, B., Klinck, U., Klinck, C., Weis, W. (2018a): Herleitung flächiger Verwitterungsraten. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 113–149.
- Ahrends, B., Meesenburg, H., Wagner, M., Scheler, B., Fleck, S. (2013): Interzeption in Wäldern - Einfluss der Bestandesstruktur. *Freiburger Forstliche Forschung* 37–56.
- Ahrends, B., Scheler, B., Wagner, M., Fleck, S., Fortmann, H., Meesenburg, H. (2021b): Trends der Nährstoffbilanzen forstlich genutzter Intensiv-BDF in Niedersachsen. *Geoberichte* 39, 40–54. https://doi.org/10.48476/geober_39_2021
- Ahrends, B., Schmidt-Walter, P., Fleck, S., Köhler, M., Weis, W. (2018b): Wasserhaushaltssimulationen und Klimadaten. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 74–94.
- Ahrends, B., Schmidt-Walter, P., Meesenburg, H. (2017): Standortsinformationen für die Bundeswaldinventur in Niedersachsen, in: *NW-FVA (Ed.), Waldzustandsbericht Niedersachsen*. NW-FVA, pp. 24–27.
- Ahrends, B., Schmitz, A., Prescher, A.-K., Wehberg, J., Geupel, M., Andreae, H., Meesenburg, H. (2020): Comparison of Methods for the Estimation of Total Inorganic Nitrogen Deposition to Forests in Germany. *Front. For. Glob. Change* 3, 103. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00103>
- Ahrends, B., Steinicke, C., Köhler, M., Meesenburg, H. (2016): Ableitung des Grundwasserflurabstandes für Waldstandorte im niedersächsischen Tiefland. *Waldökologie Landschaftsforschung Naturschutz* 16, 69–81.

- Ahrends, B., Von Wilpert, K., Weis, W., Vonderach, C., Kändler, G., Zirlewagen, D., Sucker, C., Puhlmann, H. (2022b). Merits and Limitations of Element Balances as a Forest Planning Tool for Harvest Intensities and Sustainable Nutrient Management - A Case Study from Germany. *Soil Syst.* 6, 41. <https://doi.org/10.3390/soil-systems6020041>
- Albert, M., Leefken, G., Nuske, R., Ahrends, B., Suttmöller, J., Spellmann, H. (2016): Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 187, 161–185.
- Alveteg, M. (2006): PROFILE 5.1 for Windows.
- Andrist-Rangel, Y., Simonsson, M., Öborn, I., Hillier, S. (2013): Acid-extractable potassium in agricultural soils: Source minerals assessed by differential and quantitative X-ray diffraction. *J Plant Nutr Soil Sci* 176, 407–419.
- Armbruster, M., Matzner, E. (2000): Indikatoren des Stoffhaushalts von Waldökosystemen. *Berichte ANL* 24, 151–166.
- Arnold, P.W. (1960): Nature and mode of weathering of soil-potassium reserves. *J Sci Food Agric* 11, 285–292.
- Augustin, S., Bartens, H. (2001): Algorithmus zur Abschätzung der potentiell mobilisierbaren Schwefelmenge für saure Waldböden. *Arbeitshefte Boden* 2, 108–143.
- Bain, D.C., A., M., Wilson, M.J., Duthie, M.L. (1994): Chemical and mineralogical weathering rates and processes in an upland granitic till catchment in Scotland. *Water. Air. Soil Pollut.* 73, 11–27.
- Bain, D.C., Roe, M.J., Duthie, D.M.L., Thomson, C.M. (2001): The influence of mineralogy on weathering rates and processes in an acid-sensitive granitic catchment. *Appl. Geochem.* 16, 931–937.
- Baston, D. (2020): extractr: Fast Extraction from Raster Datasets using Polygons.
- Becker, R. (1999): Critical Load-Profile 4.2. Dokumentation (Deutsche Version). Modell und Handbuch unter: <http://www.oekodata.com>. Strausberg.
- Belyazid, S., Akselsson, C., Zanchi, G. (2019): Water limitation may restrict the positive effect of higher temperatures on weathering rates in forest soils. *Biogeosciences Discuss* <https://doi.org/10.5194/bg-2019-44>.
- Benning, R., Ahrends, B., Amberger, H., Danigel, J., Gauer, J., Hafner, S., Heinz, F., Janott, M., Mayer, S., Mette, T., Pieper, A., Puhlmann, H., Riek, W., Steinicke, C., Wallor, E., Petzold, R. (2020): The Soil Profile Database for the National Forest Inventory Plots in Germany Derived from Site Survey Systems. <https://wopenagardereceiveopenagarmods00049873> DOI 103220DATA20190625100522.
- Beudert, B., Bässler, C., Thorn, S., Noss, R., Schröder, B., Dieffenbach-Fries, H., Foullois, N., Müller, J. (2015): Bark Beetles Increase Biodiversity While Maintaining Drinking Water Quality: Bark beetles, biodiversity and drinking water. *Conserv. Lett.* 8, 272–281. <https://doi.org/10.1111/conl.12153>
- Bishop, T.F.A., Horta, A., Karunaratne, S.B. (2015): Validation of digital soil maps at different spatial supports. *Geoderma* 241–242, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.026>
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, N. und R., Hrsg.): (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Lieferung 1-3 mit 51 Kartentafeln - Bonn/Berlin 2000/2001/2003.
- Böckmann, T., Hansen, J., Hauskeller-Bullerjahn, K., Jensen, T., Nagel, J., Nagel, R.-V., Overbeck, M., Pampe, A., Peterleit-Bitter, A., Schmidt, M., Schröder, M., Schulz, C., Spellmann, H., Stüber, V., Suttmöller, J., Wollborn, P. (2019): Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. *Aus Dem Walde - Schriftenreihe Waldentwicklung Niedersachs.* 61, 170.
- Bol, R., Julich, D., Brödlin, D., Siemens, J., Kaiser, K., Dippold, M.A., Spielvogel, S., Zilla, T., Mewes, D., von Blanckenburg, F., Puhlmann, H., Holzmann, S., Weiler, M., Amelung, W., Lang, F., Kuzyakov, Y., Feger, K.-H., Gottselig, N., Klumpp, E., Missong, A., Winkelmann, C., Uhlig, D., Sohr, J., von Wilpert, K., Wu, B., Hagedorn, F. (2016): Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems—an almost blind spot in ecosystem research. *J Plant Nutr Soil Sci* 179, 425–438. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600079>
- Bonten, L., Mol-Dijkstra, J.P., Wiegger, R., Reinds, G.J. (2012): GrowUp: A tool for computing forest Growth, nutrient Uptake and litterfall, CCE Status Report: Modelling and Mapping of Atmospherically-induced Ecosystem Impacts in Europe. Coordination Centre for Effects, RIVM, Bilthoven.
- Bonten, L.T.C., Reinds, G.J., Posch, M. (2016): A model to calculate effects of atmospheric deposition on soil acidification, eutrophication and carbon sequestration. *Environ. Model. Softw.* 79, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.01.009>
- Borken, W., Matzner, E. (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167, 277–283. <https://doi.org/10.1002/jpln.200421354>

- Braun, S., Ahrends, B., Alonso, R., Augustin, S., García-Gómez, H., Hůnová, I., Karlsson, P.E., Karlsson, G.P., Schmitz, A., Thimonier, A. (2022): Nitrogen deposition in forests: Statistical modeling of total deposition from throughfall loads. *Front. For. Glob. Change* 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1062223>
- Bug, J., Heumann, S., Müller, U., Waldeck, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). *GeoBerichte* 19, 386.
- Campitelli, E. (2025): ggnewscale: Multiple Fill and Colour Scales in "ggplot2." R package version 0.5.1.
- CLRTAP (Ed.) (2017): Mapping critical loads for ecosystems. Chapter V., in: Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends, Texte. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Dämmgen, U., Matschullat, J., Zimmermann, F., Strogies, M., Grünhage, L., Scheler, b., Conrad, J. (2013a): Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany - evidence from long-term observations. Part 2: Precipitation, potential sea salt, soil and fly ash constituents. *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft Air Qual. Control* 72, 25–36.
- Dämmgen, U., Matschullat, J., Zimmermann, F., Strogies, M., Grünhage, L., Scheler, b., Conrad, J. (2013b): Emission reduction effects on bulk and wet-only deposition in Germany - evidence from long-term observations. Part 3: Sulphur and nitrogen compounds. *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft* 72, 330–339.
- De Martonne, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Météorologie* 2, 449–458.
- De Vries, W., De Jong, A., Kros, J., Spijker, J. (2021): The use of soil nutrient balances in deriving forest biomass harvesting guidelines specific to region, tree species and soil type in the Netherlands. *For. Ecol. Manag.* 479, 118591. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118591>
- De Vries, W., Leeters, E.E.J.M. (2001): Chemical composition of the humus layer, mineral soil and soil solution of 150 forest stands in the Netherlands in 1990 (No. 424.1), Alterra-rapport. Alterra, Green World Research, Wageningen.
- Dietrich, H., Wolf, T., Kawohl, T., Wehberg, J., Kändler, G., Mette, T., Röder, A., Böhner, J. (2019): Temporal and spatial high-resolution climate data from 1961 to 2100 for the German National Forest Inventory (NFI). *Ann. For. Sci.* 76, 6. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0788-5>
- Dultz, S. (2001): Veränderung des mineralogischen Stoffbestandes in Böden aus pleistozänen Sedimenten Nordwestdeutschland und deren Bedeutung für die Elementfreisetzung. *Ber Forschzent Waldökosyst Reihe A*, 1–201.
- Egli, M., Mirabella, A., Sartori, G. (2008). The role of climate and vegetation in weathering and clay mineral formation in late quaternary soils of the swiss and italian alps. *Geomorphology* 102, 307–324.
- Engardt, M., Simpson, D., Schwikowski, M., Granat, L. (2017): Deposition of sulphur and nitrogen in Europe 1900–2050. Model calculations and comparison to historical observations. *Tellus Ser B* 69, 1328945. <https://doi.org/10.1080/16000889.2017.1328945>
- Evers, J., Ahrends, B., Weis, W. (2019): Stickstoffstatus in der Bodenlösung und Stickstoffbilanz, in: Evers, J., Dammann, I., König, N., Paar, U., Stüber, V., Schulze, A., Schmidt, M., Schönfelder, E., Eichhorn, J. (Eds.), *Waldzustandsbericht Für Niedersachsen Und Bremen, Beiträge Aus Der NW-FVA*. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen, pp. 251–260. <https://doi.org/10.17875/gup2019-1162>
- Evers, J., Paar, U., Eichhorn, J. (2013): Bestätigt die BZE die Trophieeinschätzung der forstlichen Standortskartierung? *AFZ-DerWald* 14.
- Evers, Jan, Dammann, I., König, N. (2019): *Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen: Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)*, Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Universitätsverlag, Göttingen. <https://doi.org/10.17875/gup2019-1162>
- Federer, C.A., Vörösmarty, C., Feketa, B. (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J Hydrometeorol* 4, 1276–1290.
- Fichter, J., Bonnaud, P., Turpault, M.P., Ranger, J. (1998): Quantitative determination of minerals in acid forest soils of granite. *J Plant Nutr Soil Sci* 161, 129–139.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017): WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fleck, S., Ahrends, B., Meesenburg, H. (2023): Trockenstressgefährdung der Baumarten im Harz und Tiefland Niedersachsens. *Forstl. Forsch.ber. Münch.* 224, 122–138.
- Fleck, S., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Evers, J., Grüneberg, E., Ziche, D., Höhle, J., Schmitz, A., Weis, W., Schmidt-Walter, P., Andreae, H., Wellbrock, N. (2019): Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils,

- in: Wellbrock, N., Bolte, A. (Eds.), *Status and Dynamics of Forests in Germany: Results of the National Forest Monitoring*. Springer International Publishing, Cham, pp. 123–166. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5
- Frank, J., Stuanes, A.O. (2003): Short-term effects of liming and vitality fertilization on forest soil and nutrient leaching in a Scots pine ecosystem in Norway. *For. Ecol. Manag.* 176, 371–386. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00285-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00285-2)
- Futter, M.N., Klaminder, J., Lucas, R.W., Laudon, H., Köhler, S.J. (2012): Uncertainty in silicate mineral weathering rate estimates: source partitioning and policy implications. *Env. Res Lett* 7, 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/72/024025>
- Greve, M. (2015): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf den Stoffhaushalt. *Mitteilungen Aus Forschungsanstalt Für Waldökologie Forstwirtsch. Rheinl.-Pfalz* 73, 333.
- Guckland, A., Ahrends, B., Paar, U., Dammann, I., Evers, J., Meiwes, K.J., Schönfelder, E., Ullrich, T., Mindrup, M., König, N., Eichhorn, J. (2012): Predicting depth translocation of base cations after forest liming – results from long-term experiments. *Eur J Res* 131, 1869–1887. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0639-0>
- Gundersen, P., Callesen, I., de Vries, W. (1998): Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environ. Pollut.* 102, 403–407.
- Gustafsson, J.P., Akram, M., Tiberg, C. (2015): Predicting sulphate adsorption/desorption in forest soils: evaluation of an extended Freundlich equation. *Chemosphere* 119, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.067>
- Hafner, S., Ahrends, B., Köhler, M., Evers, J., Steinicke, C., Meeseburg, H. (2017): Ableitung von bodenphysikalischen Parametern für Waldstandorte in Schleswig-Holstein. Presented at the Jahrestagung der DBG
- Hannemann, J., Russ, A., Kallweit, R., Riek, W. (2016): Betrachtungen zu den Stoffbilanzen von Level II-Flächen in Brandenburg. *Eberswalder Forstl. Schriftenreihe* 63, 60–74.
- Harrison, R.B., Johnson, D.W., Todd, D.E. (1989): Sulfate Adsorption and Desorption Reversibility in a Variety of Forest Soils. *J. Environ. Qual.* 18, 419–426. <https://doi.org/10.2134/jeq1989.00472425001800040004x>
- Hedin, L.O., Granat, L., Likens, G.E., Adri Buishand, T., Galloway, J.N., Butler, T.J., Rodhe, H. (1994): Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature* 367, 351–354. <https://doi.org/10.1038/367351a0>
- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., Meeseburg, H. (2021): Spatial 3D mapping of forest soil carbon stocks in Hessen, Germany. *J Plant Nutr Soil Sci* <https://doi.org/10.1002/jpln.202100138>
- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., Steinicke, C., Meeseburg, H. (2020): Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: Regionwide application for stakeholders of Hesse, Germany. *Geoderma Reg.* 23, e00340. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00340>
- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., Steinicke, C., Meeseburg, H. (2020): Inference of forest soil nutrient
- Hijmans, R. (2025): raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.6-32.
- Hodson, M.E., Langan, S. (1999): Considerations of uncertainty in setting critical loads of acidity of soils: the role of weathering rate determination. *Env. Pollut* 106, 73–81. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00058-5)
- Hodson, M.E., Langan, S.J., Wilson, M.J. (1996): A sensitivity analysis of the PROFILE model in relation to the calculation of soil weathering rates. *Appl Geochem* 11, 835–844. [https://doi.org/10.1016/s0883-2927\(96\)00048-0](https://doi.org/10.1016/s0883-2927(96)00048-0)
- Höhle, J., König, N., Hilbrig, L., Bielefeld, J., Ziche, D., Grüneberg, E., Eickenscheidt, N., Ahrends, B., Wellbrock, N. (2016): Methodenüberblick und Qualitätssicherung, in: Wellbrock, N., Bolte, A., Flessa, H. (Eds.), *Dynamik Und Räumliche Muster Forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse Der Bodenzustandserhebung Im Wald 2006 Bis 2008*, Thünen Rep. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, pp. 6–43. <https://doi.org/10.3220/REP1473930232000>
- Houle, D., Lamoureux, P., Bélanger, N., Bouchard, M., Gagon, C., Couture, S., Bouffard, A. (2012): Soil weathering rates in 21 catchments of the Canadian Shield. *Hydrol Earth Syst Sci* 16, 685–697. <https://doi.org/10.5194/hess-16-685-2012>
- Huber, C., Baier, R., Göttlein, A., Weis, W. (2006): Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany. *Ecol Manage* 233, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.058>

- Jacobsen, C., Rademacher, P., Meesenburg, H., Meiwes, K.J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten - Literaturstudie und Datensammlung. Ber Forschzent Waldökosyst Reihe B; 69, 81.
- Jansen, M., Judas, M., Saborowski, J. (2002): Spatial Modelling in Forest Ecology and Management. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Johansson, M., Alveteg, M., Walse, C., Warfvinge, P. (1996): Derivation of Deposition and Uptake Scenarios, in: Knoflacher, M., Schneider, J., Soja, G. (Eds.), Exceedance of Critical Loads and Levels, Conference Papers. Wien/Vienna, pp. 318–324.
- Jönsson, C., Warfvinge, P., Sverdrup, H. (1995): Uncertainty in predicting weathering rate and environmental stress factors with the PROFILE model. *Water Air Soil Pollut* 81, 1–23. <https://doi.org/10.1007/BF00477253>
- Keuffel-Türk, A.B., Scheler, B., Höper, H., Ahrends, B., Meesenburg, H. (2021): Stoffeinträge durch Deposition. *GeoBerichte* 39, 193–210. https://doi.org/10.48476/geober_39_2021
- Kirchner, M., Fegg, W., Römmelt, H., Leuchner, M., Ries, L., Zimmermann, R., Michalke, B., Wallasch, M., Maguhn, J., Faus-Kessler, T., Jacobi, G. (2014): Nitrogen deposition along differently exposed slopes in the Bavarian Alps. *Sci Total Env.* 470–471, 895–906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.036>
- Klaminder, J., Lucas, R.W., Futter, M.N., Bishop, K.H., Köhler, S.J., Egnell, G., Laudon, H. (2011): Silicate mineral weathering rate estimates: Are they precise enough to be useful when predicting the recovery of nutrient pools after harvesting? *Ecol. Manage.* 261, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.040>
- Klinck, U., Rademacher, P., Scheler, B., Wagner, M., Fleck, S., Ahrends, B., Meesenburg, H. (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. *Geoberichte* 23, 163–174.
- Knust, C., Schua, K., Feger, K.-H. (2016): Estimation of Nutrient Exports Resulting from Thinning and Intensive Biomass Extraction in Medium-Aged Spruce and Pine Stands in Saxony, Northeast Germany. *Forests* 7, 302. <https://doi.org/10.3390/f7120302>
- Köhler, M., Steinicke, C., Evers, J., Meesenburg, H., Ahrends, B. (2016): Modellierung von Wasserhaushalts- und Nährstoffstufen im Rahmen der Niedersächsischen forstlichen Standortskartierung. *AFSV* 16, 83–94.
- Kolka, R.K., Grigal, D.F., Nater, E.A. (1996): Forest soil mineral weathering rates: use of multiple approaches. *Geoderma* 73, 1–21. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(96\)00037-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(96)00037-7)
- König, N., Forstmann, H., Lüter, K.L. (2009): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungs-Methoden des Umweltanalytik-Labors der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. Ber Forschzent Waldökosyst B75-78.
- Körner, P., Kronenberg, R., Gliksman, D., Bernhofer, C. (2021): REAL-Fog part 2: A novel approach to calculate high resolved spatio-temporal fog deposition: A daily fog deposition data set for entire Germany for 1949–2018. *J. Hydrol.* 599, 126360. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126360>
- Kravchenko, A.N., Robertson, G.P. (2011): Whole-profile soil carbon stocks: the danger of assuming too much from analyses of too little. *SSSAJ* 75, 235–240.
- Langan, S.J., Modson, M.E., Bain, D.C., Skeffington, R.A., Wilson, M.J. (1995): A preliminary review of weathering rates in relation to their method of calculation for acid sensitive soil parent materials. *Water. Air. Soil Pollut.* 85, 1075–1081.
- LBEG (1991): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000 - Grundkarte (GK25).
- LBEG (2021): Bodenkarte 1:50 000 (BK50). https://doi.org/10.48476/GEOBER_40_2021
- Lelong, F., Dupraz, C., Durand, P., Didon-Lescont, J.F. (1990): Effects of vegetation type on the biogeochemistry of small catchments (Mont Lozere, France). *J Hydrol* 116, 125–145.
- Lichstein, J.W., Simons, T.R., Shriener, S.A., Franzreb, K.E. (2002): Spatial autocorrelation and autoregressive models in ecology. *Ecol. Monogr.* 72, 445–463.
- Likens, G.E., Bormann, F.M., Pierce, R.S., Eaton, J.S., Johnson, N.M. (1977): *Biochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer, New York.
- Löfgren, S., Aastrup, M., Bringmark, L., Hultberg, H., Lewin-Pihlblad, L., Lundin, L., Karlsson, G.P., Thunholm, B. (2011): Recovery of Soil Water, Groundwater, and Streamwater From Acidification at the Swedish Integrated Monitoring Catchments. *AMBIO* 40, 836–856. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0207-8>
- Löfgren, S., Grandin, U., Stendera, S. (2014): Long-term effects on nitrogen and benthic fauna of extreme weather events: Examples from two Swedish headwater streams. *AMBIO* 43, 58–76. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0562-3>

- Lucas, R.W., Holmström, H., Lämas, T. (2014): Intensive forest harvesting and pools of base cations in forest ecosystems: A modeling study using the Heureka decision support system. *For. Ecol. Manag.* 325, 26–36.
- Malessa, V., Ahrends, B. (2001): Algorithmus der Silikatverwitterungsrate durch Implementierung des Modells "Profile" von Sverdrup und Warfinge in das Verfahren AcidProgress. *Arbeitshefte Boden* 144–155.
- Meesenburg, H., Ahrends, B., Fleck, S., Wagner, M., Fortmann, H., Scheler, B., Klinck, U., Dammann, I., Eichhorn, J., Mindrup, M., Meiwes, K.J. (2016): Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecol Indic* 65, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.013>
- Meesenburg, H., Ahrends, B., Kallweit, R., Scheler, B., Wagner, M., Fleck, S. (2014): Interzeption in Wäldern: eine (zu) wenig beachtete Größe des Wasserkreislaufs. *Forum Für Hydrol. U Wasserbewirtsch.* 34, 199–206.
- Meesenburg, H., Meiwes, K.-J., Rademacher, P. (1995): Long term trends in atmospheric deposition and seepage output in northwest german forest ecosystems. *Water Air Soil Pollut* 85, 611–616. <https://doi.org/10.1007/BF00476896>
- Meesenburg, H., Riek, W., Ahrends, B., Eickenscheidt, N., Grüneberg, E., Evers, J., Fortmann, H., Köng, N., Lauer, A., Meiwes, K.J., Nagel, H.-D., Schimming, C., Wellbrock, N. (2019): Soil Acidification in German Forest Soils, in: Wellbrock, N., Bolte, A. (Eds.), *Status and Dynamics of Forests in Germany*. Springer Nature Switzerland AG, pp. 93–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_4
- Meiwes, K.J., Mindrup, M. (2011): Indikatoren zur standörtlichen Bewertung der intensiven Biomassennutzung im Wald - Eine Literaturlauswertung, in: *Forschungsvorhaben: Möglichkeiten Und Grenzen Der Vollbaumnutzung - Ergebnisbericht (FKZ: 22015407)*. Göttingen, pp. 5–23.
- Meiwes, K.J., Rumpf, S., Ahrends, B., Rademacher, P., Nagel, J. (2013): Nährstoffexporte bei Vollbaumnutzung in Nordwestdeutschland - Einflussfaktoren und standörtliche Bewertung. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*. 99–108.
- Mellert, K.-H., Brendel, J., Göttlein, A., Kölling, C., Rucker, G. (2005): Risiko erhöhter Nitratkonzentrationen unter Wäldern im Raum München - Regionalisierung auf der Basis von Satellitendaten und genesteter Stichproben. *Waldökologie Online* 25–35.
- Missong, A., Holzmann, S., Bol, R., Nischwitz, V., Puhlmann, H., K, V.W., Siemens, J., Klumpp, E. (2018): Leaching of natural colloids from forest topsoils and their relevance for phosphorus mobility. *Sci Total Env.* 634, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.265>
- Mitchel, M.J., Fuller, R.D. (1988): Models of sulfur dynamics in forest and grassland ecosystems with emphasis on soil processes. *Biogeochemistry* 5, 133–163.
- NFP (Ed.) (2023a): *Forstliche Standortaufnahme - Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Mittelgebirge, Bergland und Hügelland.*
- NFP (Ed.) (2023b): *Forstliche Standortaufnahme - Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Pleistozänes (Diluviales) Flachland.*
- Olsson, M.T., Melkerud, P.-A. (2000): Weathering in three podzolized pedons on glacial deposits in northern Sweden and central Finland. *Geoderma* 94, 149–161.
- Ouimet, R., Duchesne, L. (2005): Base cation mineral weathering and total release rates from soils in three calibrated forest watersheds on the Canadian Boreal Shield. *Can J Soil Sci* 85, 245–260.
- Overbeck, M., Schmidt, M., Fischer, C., Evers, J., Schultze, A., Hövelmann, T., Spellmann, H. (2011): Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. *Forstarchiv* 82, 92–100.
- Paar, U., Evers, J., Dammann, I., König, N., Schulze, A., Schmidt, M., Schönfelder, E., Scheler, B., Ullrich, T., Eichhorn, J. (2016): *Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)*. Beitr. Aus Nordwestdtsch. Forstl. Vers. 15, 456.
- Paré, D., Thiffault, E. (2016): Nutrient Budgets in Forests Under Increased Biomass Harvesting Scenarios. *Curr. For. Rep.* 2, 81–91. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0030-3>
- Pebesma, E. (2018): Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *R J.* 10, 439. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>
- Peters, K., Eiden, R. (1992): Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest. *Atmos Env.* 26A, 2555–2564. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90108-W](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90108-W)
- Petzold, R., Benning, R. (2017): Standortkartierung – Wissen von gestern? *AFZ- Wald* 15/2017, 25–28.

- Petzold, R., Benning, R., Gauer, J. (2016): Bodeninformationen in den verschiedenen Standorterkundungssystemen Deutschlands: Gegenwärtiger Stand und Perspektiven. *AFSV, Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 16, 7–17.
- Piirainen, S., Finer, L., Starr, M. (2002): Deposition and leaching of sulphate and base cations in a mixed boreal forest in eastern finland. *Water. Air. Soil Pollut.* 131, 185–204.
- Posch, M., Vries de, W., Sverdrup, H. (2015): Mass Balance models to derive critical loads of nitrogen and acidity for terrestrial and aquatic ecosystems, in: Vries de, W., Hettelingh, J.-P., Posch, M. (Eds.), *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments, Environmental Pollution*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp. 171–205. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9508-1_6
- Posit team (2025): RStudio: Integrated Development Environment for R.
- QGIS.org (2025): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.
- R Core Team (2025): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rademacher, P., Meesenburg, H., Müller-Using, B. (2001): Nährstoffkreisläufe in einem Eichenwald-Ökosystem des nordwestdeutschen Pleistozäns. *Forstarchiv* 72, 43–54.
- Renger, M., Strebel, O. (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. *Wasser Boden* 32, 362–366.
- Renger, M., Wessolek, G. (1990): Auswirkungen von Grundwasserabsenkung und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. *Mitt Inst. Für Wasserwes. Univ. Bundeswehr Münch.* 386, 295–307.
- Reyer, C. (2013): The cascade of uncertainty in modeling forest ecosystem responses to environmental change and the challenge of sustainable resource management. Humboldt-Universität zu Berlin. (PhD). Math. Fak. II. Humboldt-Universität, Berlin.
- Riek, W. (2009): Quantifizierung des Risikos für Nitrataustrag aus brandenburgischen Waldökosystemen auf der Grundlage chemischer Oberbodeneigenschaften. *Eberswalder Forstl. Schriftenreihe Wald Im Klimawandel - Risiken Anpassungsstrategien* 42, 93–100.
- Riek, W., Russ, A., Kühn, D. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg. Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a. *Eberswalder Forstl. Schriftenreihe* 60, 172.
- Rumpf, S., Schönfelder, E., Ahrends, B. (2018): Biometrische Schätzmodelle für Nährelementgehalte in Baumkompartimenten. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 33–73.
- Schaap, M., Cuvelier, C., Hendriks, C., Bessagnet, B., Baldasano, J.M., Colette, A., Thunis, P., Karam, D., Fagerli, H., Graff, A., Kranenburg, R., Nyiri, A., Pay, M.T., Rouil, L., Schulz, M., Simpson, D., Stern, R., Terrenoire, E., Wind, P. (2015): Performance of European chemistry transport models as function of horizontal resolution. *Atmos. Environ.* 112, 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.003>
- Schaap, M., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Segers, A., Schlutow, A., Nagel, H.-D., Ritter, A., Banzhaf, S. (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland, Texte. Dessau-Roßlau.
- Schmidt, W., Stüber, V., Ullrich, T., Paar, U., Evers, J., Dammann, K., Hövelmann, T., Schmidt, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer, Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Univ.-Verl. Göttingen, Göttingen.
- Schmidt-Walter, P., Ahrends, B., Mette, T., Puhmann, H., Meesenburg, H. (2019): NFIWADS: The water budget, soil moisture, and drought stress indicators database for German National Forest Inventory (NFI). *Ann For. Sci* 76:39. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0822-2>
- Schmitz, A., Ahrends, B., Bolte, A., Herrmann, H., Moravek, A., Poulain, L., Wiedensohler, A., Sanders, T. (2025): Similar substance ratios in wet and dry deposition? Revisiting atmospheric base cation inputs to forests. *Submiss.*
- Schmitz, A., Ahrends, B., Herrmann, H., Moravek, A., Poulain, L., Sanders, T., Wiedensohler, A., Bolte, A. (2023): Underestimation of potassium in forest dry deposition? – A simulation experiment in rural Germany. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3358>
- Schneider, S. (1983): CO₂, Climate and Society: A Brief Overview, in: Chen, R., Boulding, E., Schneider, S. (Eds.), *Social Science Research and Climate Change*. Springer, Netherlands, pp. 9–15.

- Schneider, S., (1983): CO₂, Climate and Society: A Brief Overview, in: Chen, R., Boulding, E., Schneider, S. (Eds.), *Social Science Research and Climate Change*. Springer, Netherlands, pp. 9–15.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S., Johansson, M. (2003): Long-term development of acid deposition (1880-2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7, 436–446.
- Schrumpf, M., Schulze, E.D., Kaiser, K., Schumacher, J. (2011): How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories. *Biogeosciences* 8.
- Simonsson, M., Andersson, S., Andrist-Rangel, Y., Hillier, S., Mattsson, L., Öborn, I. (2007): Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. *Geoderma* 140, 188–198.
- Simonsson, M., Hillier, S., Öborn, I. (2009): Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma* 151, 109–120.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., Van Grinsven, H., Grizzetti, B. (Eds.) (2011): *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988>
- Sverdrup, H., deVries, W., Hendriksen, A. (1990): *Mapping Critical Loads*.
- Sverdrup, H., Oelkers, E., Erlandsson, M., Belyazid, S., Kurz, D., Akselsson, C. (2020): Improved parameterization of the weathering kinetics module in the PROFILE and ForSAFE models. *Biogeosciences*.
- Sverdrup, H., Thelin, G., Robles, M., Stjernquist, I., Sörensen, J. (2006): Assessing nutrient sustainability of forest production for different tree species considering Ca, Mg, K, N and P at Björnstorp Estate, Sweden. *Biogeochemistry* 81 (219–238). <https://doi.org/10.1007/S10533-006-9038-2>
- Sverdrup, H., Warfvinge, P. (1995): Estimating field weathering rates using laboratory kinetics., in: White, A.F., Brantly, S.L. (Eds.), *Chemical Weathering of Silicate Minerals*. Mineralogical Society of America, Washington, DC, pp. 485–541.
- Ulrich, B. (1986): Natural and anthropogenic components of soil acidification. *J Plant Nutr Soil Sci* 149, 702–717. <https://doi.org/10.1002/jpln.19861490607>
- Ulrich, B. (1994): Nutrient and Acid-Base Budget of Central European Forest Ecosystems, in: Godbold, D., Hüttermann, A. (Eds.), *Effects of Acid Rain on Forest Processes*. Wiley-Liss, New York, pp. 1–50.
- Ulrich, B., Shrivastava, M.B. (1978): Schätzung quantitativer Bodenparameter bei der forstlichen Standortskartierung am Beispiel des hessischen Berglands. *Forstw Cbl* 97, 41–50.
- Von Wilpert, K., Ahrends, B., Weis, W., Vonderach, C., Puhmann, H., Köhler, D., Sucker, C., Kändler, G., Nagel, J. (2018): Standortangepasste Nutzungsintensitäten und forstliche Handlungsoptionen. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 325–373.
- Vuorenmaa, J., Augustaitis, A., Beudert, B., Bochenek, W., Clarke, N., de Wit, H.A., Dirnböck, T., Frey, J., Hakola, H., Kleemola, S., Kobler, J., Krám, P., Lindroos, A.-J., Lundin, L., Löfgren, S., Marchetto, A., Pecka, T., Schulte-Bisping, H., Skotak, K., Srybny, A., Szpikowski, J., Ukonmaanaho, L., Váňa, M., Åkerblom, S., Forsius, M. (2018): Long-term changes (1990–2015) in the atmospheric deposition and runoff water chemistry of sulphate, inorganic nitrogen and acidity for forested catchments in Europe in relation to changes in emissions and hydrometeorological conditions. *Sci Total Env.* 625, 1129–1145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.245>
- Waldner, P., Braun, S., Rihm, B. (2019): Schlussbericht des Projekts Nitrate leaching risk mapping (NitLeach II). Kartierung des Risikos von erhöhtem Nitrataustrag im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000585539>
- Weiken, S., Ahrends, B., Schirrmeyer, F., Heitkamp, F. (2024): Regionalisierung bodenchemischer Indikatoren für niedersächsische Waldböden. Presented at the Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“, Göttingen.
- Weis, W., Ahrends, B. (2018): Nutzungsfreie Stoffbilanzen für die Punkte der BZE II. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 206–226.
- Weis, W., Raspe, S., Schäff, T. (2016): Nährstoffhaushalt und Biomassennutzung. Nährstoffbilanzen: Ein Instrument zur Abschätzung der Folgen intensiver forstlicher Nutzung. *LWF Aktuell* 11–15.
- Weis, W., Schäff, T., Köhler, D., Kölling, C. (2018): Stoffausträge mit dem Sickerwasser für die BZE II. Kap. 8., in: FVA BW, Abt. Boden und Umwelt (Eds.), *Holznutzung Und Nährstoffnachhaltigkeit – Abschlussbericht Zum Projekt „Energieholzernte Und Stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa)“*, Berichte Freiburger Forstliche Forschung. pp. 181–205.

- Wesely, M., Hicks, B.B. (2000): A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmos. Environ.* 34, 2261–2282. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00467-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00467-7)
- Wesselink, L.G., Van Grinsven, J.J.M., Grosskurth, G.F. (1994): Measuring and Modeling Mineral Weathering in an Acid Forest Soil, Solling, Germany. *Soil Sci Soc Am Spec Publi* 39, 91–110. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub39.c6>
- Wessolek, G., Duijnsveld, W.H.M., Trinks, S. (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *J Hydrol* 356, 17–27.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Renger, M. (Eds.) (2009): *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Bodenökologie und Bodengenese*. Berlin.
- Wickham, H. (2016): *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, 2nd ed. 2016. ed, Use R! Springer International Publishing : Imprint: Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Wood, S.N. (2006): *Generalized additive models: an introduction with R*, Texts in Statistical Science. Chapman Hall, Boca Raton.
- Wood, S.N. (2011): Fast Stable Restricted Maximum Likelihood and Marginal Likelihood Estimation of Semi-parametric Generalized Linear Models. *J. R. Stat. Soc. Ser. B Stat. Methodol.* 73, 3–36. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x>
- Zhang, L., He, Z., Wu, Z., Macdonald, A.M., Brook, J.R., Kharol, S. (2023): A database of modeled gridded dry deposition velocities for 45 gaseous species and three particle size ranges across North America. *J. Environ. Sci.* 127, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.05.030>
- Zhang, P., Sparks, D.L. (1990): Kinetics of selenate and selenite adsorption/desorption at the goethite/water interface. *Environ. Sci. Technol.* 24, 1848–1856.
- ZSGT (2016): *Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m (DGM10)*.

Baden-Württemberg:

- Ahrends, B., Klinck, U., Klinck, C., Weis, W. (2018): Herleitung flächiger Verwitterungsraten. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 113–149.
- Ahrends, B., von Wilpert, K., Weis, W., Vonderach, C., Kändler, G., Zirlwagen, D.; Sucker, C. u. Puhlmann, H. (2022): Merits and Limitations of Element Balances as a Forest Planning Tool for Harvest Intensities and Sustainable Nutrient Management - A Case Study from Germany. *Soil Systems*, 6, (2): 41.
- Albert, M., Nagel, J., Schmidt, M., Nagel, R.-V., Spellmann, H. (2022): Eine neue Generation von Ertragstafeln für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer in Nordwestdeutschland. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 22.
- Barkman, A., Alveteg, M. (2001) Effects of data uncertainty in the swedish critical load assessment for forest soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 125, 133-156.
- Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (STMELF) (2018): *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung - zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung*, 188 S.
- Daniel, C. J., Ter-Mikaelian, M. T.; Wotton, B. M.; Rayfield, B., Fortin, M.-J. (2017) Incorporating uncertainty into forest management planning: Timber harvest, wildfire and climate change in the boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 400, 542-554.
- De Vries, W.; De Jong, A.; Kros, J., Spijker, J. (2021): The use of soil nutrient balances in deriving forest biomass harvesting guidelines specific to region, tree species and soil type in the Netherlands. *For. Ecol. Manage.*, 479, 118591.
- Degenhardt, A. (2008): *Der Datenspeicher Wald für Brandenburg–Fortschreibung der Bestandesdaten von Verjüngungen mit Hilfe von Ertragstafelfunktionen*.
- De-Miguel, S.; Mehtatalo, L. u. Durkaya, A. (2014): Developing generalized, calibratable, mixed-effects meta-models for large-scale biomass prediction. *Can. J. For. Res.*, 44, 648-656.
- Dultz, S. (2001): Veränderung des mineralogischen Stoffbestandes in Böden aus pleistozänen Sedimenten Nordwestdeutschland und deren Bedeutung für die Elementfreisetzung. *Ber. Forsch.zent. Waldökosyst. Reihe A*, 1–201.
- Ellenberg, H. u. a.: *Zeigerwerte der Pflanzen in Mitteleuropa*. 3., erweiter. Aufl. Goltze, Göttingen 1992, ISBN 3-88452-518-2 (*Scripta Geobotanica* 18).

- FVA-BW (2018) Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit – Abschlussbericht zum Projekt ‚Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland (EnNa). Freiburger Forstliche Forschung, Berichte. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Hannemann, J., Russ, A., Kallweit, R., Riek, W. (2016): Betrachtungen zu den Stoffbilanzen von Level II-Flächen in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 63, 60–74.
- Hartmann P., Buberl, H., Puhlamn, H., Schäffer, J., Trefz-Malcher, G., Zirlewagen, D., von Wilpert, K., 2016: Waldböden Südwestdeutschlands. Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald von 1989 - 1992 und 2006 - 2008. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Verlag Kessel, Remagen, 328 S.
- Hartmann, P., Niethammer, M., Habel, R., Zirlewagen, D., Puhmann, H. (2024): Regionalisierung von Bodendaten für die Waldfläche Baden-Württembergs. *standort.wald*, 53, S.69-93.
- Hüttl, R.F., Schaaf, W. (1997): Magnesium Deficiency in Forest Ecosystems, *Nutrients in Ecosystems*.
- Kolb, E., Insinna, P., Göttlein, A. (2017): Nährstoffnachhaltigkeits-Karte für die Wälder Lichtensteins. In: *AFZ-DerWald*, S.66-69.
- Kolb, E., Mellert, K. H., Göttlein, A. (2019): Nährstoffstatus naturnaher Böden in Europa. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*.
- Kolka, R. K.; Grigal, D. F., Nater, E. A. (1996): Forest soil mineral weathering rates: use of multiple approaches. *Geoderma*, 73, 1-21.
- Kublin, E. (2003) Einheitliche Beschreibung der Schaffform – Methoden und Programme –BDATPro. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122, Nr. 3: 183–200. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2003.00183.x>.
- Landesbetrieb Forst Brandenburg (LFE) (2016): Hilfstafeln für den Forstbetrieb Grafische Ertragstafelauszüge für das nordostdeutsche Tiefland. Eberswalde, 3. Auflage als pdf-Version im Februar 2016
- Li, H., Wu, J. (2006): Uncertainty analysis in ecological studies. In: Wu, J.; Jones, K.B.; Li, H. u. Loucks, O.L.: *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. S. 45-66.
- Meesenburg, H., Riek, W., Ahrends, B., Eickenscheidt, N., Grüneberg, E., Evers, J., Fortmann, H., Köng, N., Lauer, A., Meiwes, K.J., Nagel, H.-D., Schimming, C., Wellbrock, N. (2019): Soil Acidification in German Forest Soils, in: Wellbrock, N., Bolte, A. (Eds.), *Status and Dynamics of Forests in Germany*. Springer Nature Switzerland AG, pp. 93–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_4
- Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg (MLR) (1993): *Hilfstabellen für die Forsteinrichtung*.
- MLR (1993) *Hilfstabellen für die Forsteinrichtung zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung*. Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Puhmann, H., Ahrends, B., Köhler, D., Weis, W. (2018): Keine Zuwachsverluste im Stammholz riskieren. Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial erhöht das Risiko unzureichender Nährstoffversorgung. *Holz-Zentralblatt* 38, 880–882.
- Riek, W., Russ, A., Kühn, D. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg. Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 60, 172.
- Riek, W., Russ, A., Martin, J. (2012): Soil acidification and nutrient sustainability of forest ecosystems in the northeastern German lowlands - Results of the national forest soil inventory. *Folia Forestalia Polonica A*, 187–195.
- Rumpf, S., Schöfelder, E., Ahrends, B (2018): "Biometrische Schätzmodelle für Nährelementgehalte in Baumkompartimenten." *Freiburger Forstliche Forschung* 101: 33-73.
- Stahr, K., Feger, K.H., Zahrei, M., Papenfuss, K.H. (1995): Estimation of Weathering Rates in Small Catchments on Bärhalde Granite (Black Forest, SW Germany), in: Churchman, G.J., Fitzpatrick, R.W., Eggleton, R.A. (Eds.), *Clays Controlling the Environment*. Proc. 10th Int. Clay Conf., Adelaide, Australia, July 18–23, 1993, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia. pp. 494–498.
- Standortkundliche Geofachdaten. Landesforstverwaltung BW / ForstBW. Kartengrundlage: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (<http://www.fva-bw.de>)
- Sverdrup, H., G. Thelin, M. Robles, I. Stjernquist, J. Sörensen (2006): Assessing nutrient sustainability of forest production for different tree species considering Ca, Mg, K, N and P at Björnstorp Estate, Sweden. *Biogeochemistry* 81: 219-238.

Umweltatlas Berlin (2020): Kriterien zur Bewertung der Bodenfunktionen. Nährstoffversorgung des Oberbodens (S-Wert). URL: <https://www.berlin.de/umweltatlas/boden/bodenfunktionskriterien/2020/methode/> (letzter Zugriff 10.03.2025).

Van Laar, A., Akça, A., (2007): Forest mensuration. Vol. 13. Springer Science and Business Media.

Vonderach, C., Kändler, G., Dormann, C. F. (2018): Consistent Set of Additive Biomass Functions for Eight Tree Species in Germany Fit by Nonlinear Seemingly Unrelated Regression. *Annals of Forest Science* 75, Nr. 2 : 49. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0728-4>.

Vonderach, C., Kublin, E., Bösch, B., Kändler, G. (2023): rBDAT: Implementation of BDAT Tree Taper Fortran Functions. R package version 1. 0.0. R-Package.

Wolff, B., Bonk, S., Hölzer, W., Frömdling, D. (1998): Abschlußbericht zum Verbundprojekt „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im globalen Wandel: Strategie für eine integrierte Wirkungsanalyse und –bewertung“ Kurztitel: „Deutsche Waldstudie“. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg.

Yanai, R. D.; Battles, J. J.; Richardson, A. D.; Blodgett, C. A.; Wood, D. M., Rastetter, E. B. (2010): Estimating Uncertainty in Ecosystem Budget Calculations. *Ecosystems*, 13, 239-248.

Yue, C., 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.005>.

Zirlewagen, D. (2021). Aktualisierungen und Neuerstellungen von Regionalisierungen von Bodendaten im Rahmen des Notfallplans Wald gegen Baumschäden in Baden-Württemberg. Kenzingen.

HNEE/LFE:

Böhner, J., Dietrich, H., Kawohl, T., Wehberg, J. (2023): Temporal and spatial high-resolution climate data (1961-2020) for the German National Forest Inventory derived from observations (Version 2023_fv0.01) [Datensatz]. DOI: 10.25592/uhhfdm.11413

Dietrich, H., Wolf, T., Kawohl, T., Wehberg, J., Kändler, G., Mette, T., Röder, A., Böhner, J. (2019): Temporal and spatial high-resolution climate data from 1961-2100 for the German National Forest Inventory (NFI). *Annals of Forest Science* 76, 6. DOI: 10.1007/s13595-018-0788-5.

DSW2 (2021): Datenspeicher Wald. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE) [Datensatz].

DWD (2019): Klimareport Brandenburg. 1. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 44 S.

Pfeiffer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänslar, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C., Jacob D. (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere* 6, 677-698. DOI:10.3390/atmos6050677

Riek, W., Russ, A. (2016): Regionalisierung: Ableitung von Flächenaussagen aus Fallstudien und BZE. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63, S 191–205.

Russ, A. (2015): Regionalisierung des Wasser- und Kohlenstoffhaushalts für die Waldfläche Brandenburgs. *Bodenökologie und Bodengenese*, Bd. 44, 164 S.

Schaap, M., Banzhaf, S., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Nagel, H.-D., Schlutow, A., and Segers, A. (2018): Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. UBA-Texte 79/2018. Abschlussbericht zum BMU/UBA UFOPLAN-Projekt 3714 64 2010. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Schulze, G., Kopp, D., Wirner, M (2013): Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland (Standortserkundungsanleitung) SEA 95. Teil C, 178 S.

Weis, W., Ahrends, B., Fleck, S., Habel, R., Wellpott, A. (2023a): Modellparameter zur Abbildung des Standortswasserhaushalts mit LWF-Brook90. *Forstliche Forschungsberichte München* 224, S. 22 – 52.

Weis, W., Wellpott, A., Falk, W. (2023b): Neubeurteilung des Wasserhaushalts in der bayerischen Standortskartierung. *Forstliche Forschungsberichte München* 224, S. 94 – 111.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Projektkoordination und klimatisches Anbaurisiko von etablierten und alternativen Baumarten

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die Schwerpunkte der LWF lagen in der Projektkoordination, der Modellierung des klimatischen Anbaurisikos von etablierten und alternativen Baumarten in Deutschland sowie der praxisorientierten Umsetzung digitaler Standortinformationssysteme in Bayern. Auch die Schaffung einer gemeinsamen Datengrundlage durch den Aufbau einer Bodenprofilatenbank und die Adjustierung des Klimadatensatzes der Universität Hamburg als Grundlage für alle in diesem Verbundvorhaben durchgeführten Berechnungen erfolgten durch die LWF.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Koordination

Die Koordination des Gesamtprojekts lag bei der LWF. Dies umfasste das Vertreten des Gesamtprojekts gegenüber dem Projektträger, die Koordination der Berichterstattung (Zwischenbericht und Abschlussbericht) sowie die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern. In diesem Rahmen war die LWF dafür zuständig, dass die inhaltlichen, alle Partner betreffenden Arbeitspakete untereinander diskutiert, abgestimmt und die Ergebnisse den Partnern zur Verfügung gestellt wurden. Dies betraf in erster Linie die Ergebnisse zur standortgerechten Baumartenwahl im Klimawandel (Anbaurisiko), Nährstoffansprüche von Baumarten und nährstoffnachhaltige Waldbewirtschaftung. Ein weiterer Schwerpunkt der Koordinationsstelle lag in der Sicherstellung der Einhaltung von Zeitplänen und Meilensteinen sowie in der Vorbereitung und Durchführung von Online- und Präsenztreffen in Göttingen, Freiburg, Eberswalde und Freising, mit jeweils unterschiedlicher thematischer Schwerpunktsetzung.

In Bayern war es zudem aus datenschutz- und nutzungsrechtlichen Gründen notwendig die Zustimmung der forstlichen Zusammenschlüsse zur Weiterverarbeitung der forstlichen Standortdaten einzuholen. Hierfür wurde eine (Muster-)Vereinbarung über die Nutzung, Weiterverarbeitung und Weitergabe von Daten der terrestrischen Standortserkundung in Bayern zwischen LWF, VfS und den forstlichen Zusammenschlüssen entworfen. Die erste Vereinbarung dieser Art wurde mit der WBV Cham-Roding am 03.11.2023 pressewirksam unterzeichnet.

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

Die Bearbeitung dieses Arbeitspakets erfolgte überwiegend durch den Verein für forstliche Standortserkundung in Bayern e.V. (VfS) mit Unterstützung der LWF. Als Beispielgebiete wurden die Forstbetriebsgemeinschaft Nürnberger Land und die beiden Waldbesitzervereinigungen Cham/Roding und Kronach-Rothenkirchen ausgewählt. Die Auswahlkriterien orientierten sich dabei an der Abdeckung unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse, Ausgangssubstrate sowie der Bereitschaft zur Mitwirkung durch die örtlichen Beteiligten (Forstbehörden und Waldbesitzervereinigungen/Forstbetriebsgemeinschaften).

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

Die inhaltlich und hinsichtlich der Verschlüsselung harmonisierten Standorteinheiten wurden über einen Algorithmus mit Informationen aus labortechnisch analysierten Bodenprofilen verknüpft, um bodenphysikalische und -chemische Kennwerte abzuleiten, die für die Berechnung des Bodenwasserhaushalts und der Nährstoffbilanzen benötigt wurden.

Die harmonisierten Standorteinheiten werden über einen Algorithmus mit Informationen aus labortechnisch analysierten Bodenprofilen verknüpft, um bodenphysikalische und -chemische Kennwerte abzuleiten, die für die Berechnung des Bodenwasserhaushalts und der Nährstoffbilanzen benötigt werden.

Erstellung einer neuen Bodenprofildatenbank

Die bisher an der LWF verfügbare, für das bayerische Standortinformationssystem BaSIS (2012) entwickelte Bodendatenbank umfasst 2.087 qualitätsgesicherte, labortechnisch analysierte Bodenprofile. Eine Vorauswertung zeigte jedoch, dass für ca. 25% der nahezu 5.500 in Bayern vorkommenden unterschiedlichen Standorteinheiten keine hinreichend passenden Profile gefunden werden konnten. Damit für die vielen Kartier- bzw. Standorteinheiten in Bayern eine ausreichende Anzahl an Bodenprofilen für eine Profiltzuweisung zur Verfügung stehen, wurden in die bestehende LWF-Bodendatenbank zusätzliche Profile aus der umfangreichen BIS-Datenbank (Boden-Informationssystem) des LfU importiert, hierunter auch eine ganze Reihe an neuen Profilen. Mit Blick auf den Import wurden Struktur und Metadaten der BIS-Datenbank inkl. aller Schlüsselnamen nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005) erfasst und in einer Metadatenbank dokumentiert. Da die Gesamtdatenbank sehr komplex ist, wurden für die forstliche Anwendung eine vereinfachte, auf die relevanten Daten reduzierte Profildatenbank erstellt und von MS Access in eine PostgreSQL-Datenbank der LWF übertragen.

Ergänzung fehlender Analysedaten an Bodenprofilen

Die in die LWF-Profildatenbank importierten Informationen zu den Bodenprofilen waren oft unvollständig, so dass fehlende Messwerte aus Laboranalysen durch Klassen-Mittel- bzw. Schätzwerte aus der Geländeansprache ergänzt werden mussten. Ferner wurden folgende Verfahren zur Vervollständigung der Daten angewendet:

- **Interpolation fehlender Werte:** Wenn angrenzende höher und tiefer liegende Horizonte ein identisches Substrat aufweisen, wurden fehlende Kennwerte aus den vorhandenen Informationen der angrenzenden Horizonte übernommen bzw. interpoliert.
- **Pedotransferfunktionen:** Die Trockenrohdichte wurde vorwiegend über die Regression von Weis (Weis et al. 2019) und die Feldkapazität sowie Retentionsparameter nach Teepe (Teepe et al. 2003) berechnet. Eine Interpolation anhand der KA5-Tabellen (Ad-hoc-AG Boden 2005, Tab. 70-79) erfolgte nur, wenn Parameter fehlten. Aktuelle und effektive Kationenaustauschkapazitäten wurden in Anlehnung an die beim Aufbau des Bayerischen Standortinformationssystems (BaSIS) verwendete Methodik näherungsweise aus dem pH-Wert abgeleitet (Beck J. und Dietz E. 2012).
- **Statistische Vervollständigung,** wenn keines der beiden o.g. Verfahren ein Ergebnis lieferte: Abschätzung 11 abhängiger Variablen (pH-Wert, Carbonatgehalt, org. Kohlenstoff, Trockenrohdichte, Ton-/Schluff-/Sand-Gehalt, Skelettanteil, Stickstoff, Basensättigung, KAK effektiv) über 8 Prädiktoren (Horizontsymbol/-variante, Substratsymbol, ÜBK-Einheit, Bodentyp/-variante, Neigungsklasse, Relief-form) mit unterschiedlicher Genauigkeit durch Minimierung der Residuen von Standardabweichung und Median bzw. durch logarithmische Regressionen und Minimierung der Mittleren Quadratischen Abweichungen. Die Qualität des Schätzwertes wurde anhand von Ähnlichkeit und Streuung beurteilt.
- **Extrapolation** der Bodenprofile auf 2 m Tiefe: Um zusätzlich zu den Wasserhaushaltsstufen Eingangparameter für die Verwitterungsmodelle in AP 5 zu erzeugen, wurden 20.239 Bodenprofile auf 2 m Tiefe extrapoliert. Der Skelettgehalt wurde über die Zunahme vom letzten zum vorletzten Horizont oder vom letzten Horizont zur Profiloberfläche extrapoliert. Ab 95% Skelettgehalt wurde ein Fels-, dazwischen ein Übergangshorizont ergänzt. Bei O/C- und A/C-Böden wurde immer ein Felshorizont ohne Übergang ergänzt.

Bewertung der Bodenprofile hinsichtlich ihrer Eignung

Im nächsten Schritt wurde bewertet, wie gut jedes Bodenprofil der Datenbank zu einer Standorteinheit passt. Dazu wurden die Profile und Standorteinheiten jeweils nach 13 physikalischen und chemischen Parametern eingestuft (siehe Tabelle 33). Da die Übereinstimmung der Profile mit allen 13 Zielparametern oftmals sehr gering war, wurden Profile speziell für die Ableitung physikalischer Kennwerte zur Modellierung des Wasserhaushalts (Physik) und Profile für die Ableitung chemischer Kennwerte zur Modellierung des Nährstoffhaushalts (Chemie) gewählt sowie allgemeine Profile, die sowohl für die Physik als auch für die Chemie verwendet werden können. Auf dieser Grundlage wurden fünf allgemeine Parameter für Physik und Chemie gewählt, zusätzlich vier Parameter nur für die Physik und vier nur für die Chemie:

Diese 13 Parameter wurden für jedes Bodenprofil der Profildatenbank abgeleitet. Die Profilbewertung erfolgte, indem die Abweichungen zwischen Standorteinheit und Profil für jeden Parameter auf einer Skala von 0 (ungeeignet) bis 100 (optimal bzw. keine Abweichung) berechnet wird.

Tabelle 33: Parameter für die Profilbewertung

Parameter	Bezeichnung	Profil-Typ
1	Substrat/Bodenart Oberboden	Allgemein (Physik und Chemie)
2	Deckschicht/Tongründigkeit	Allgemein (Physik und Chemie)
3	Fels-/Rohböden	Allgemein (Physik und Chemie)
4	Moorböden	Allgemein (Physik und Chemie)
5	Aueböden	Allgemein (Physik und Chemie)
6	Skelettgehalt	Physik (Wasserhaushalt)
7	Gesamtgründigkeit	Physik (Wasserhaushalt)
8	Wasserversorgung	Physik (Wasserhaushalt)
9	Wechselfeuchte/Staunässe	Physik (Wasserhaushalt)
10	Humusreichtum/-form	Chemie (Nährstoffhaushalt)
11	Löß/Flugsand	Chemie (Nährstoffhaushalt)
12	Carbonat-/Dolomitgehalt	Chemie (Nährstoffhaushalt)
13	Nährstoffreichtum/Podsolierung	Chemie (Nährstoffhaushalt)

Ergebnisse der Profilbewertung (Profileignung)

Die Parameter wurden mit der Profilqualität zu einer Gesamtbewertung (Profileignung) multipliziert. Diese ist bei der Chemie aufgrund der höheren Ähnlichkeit der Profile höher als bei der Physik. Jedoch reduziert sich die Gesamtzahl der Profile, weil die Profilqualität bzw. ihre Vollständigkeit bei den chemischen Parametern wesentlich geringer ist als bei den physikalischen (siehe Abbildung 90 – „Gute Profile“ haben eine Profileignung $\geq 70\%$, die „Besten Profile“ $\geq 95\%$ des Leitprofils mit der höchsten Profileignung). Als sogenanntes „Leitprofil“ wird hier das Profil mit der besten Eignung, d. h. der höchsten Übereinstimmung bezeichnet.

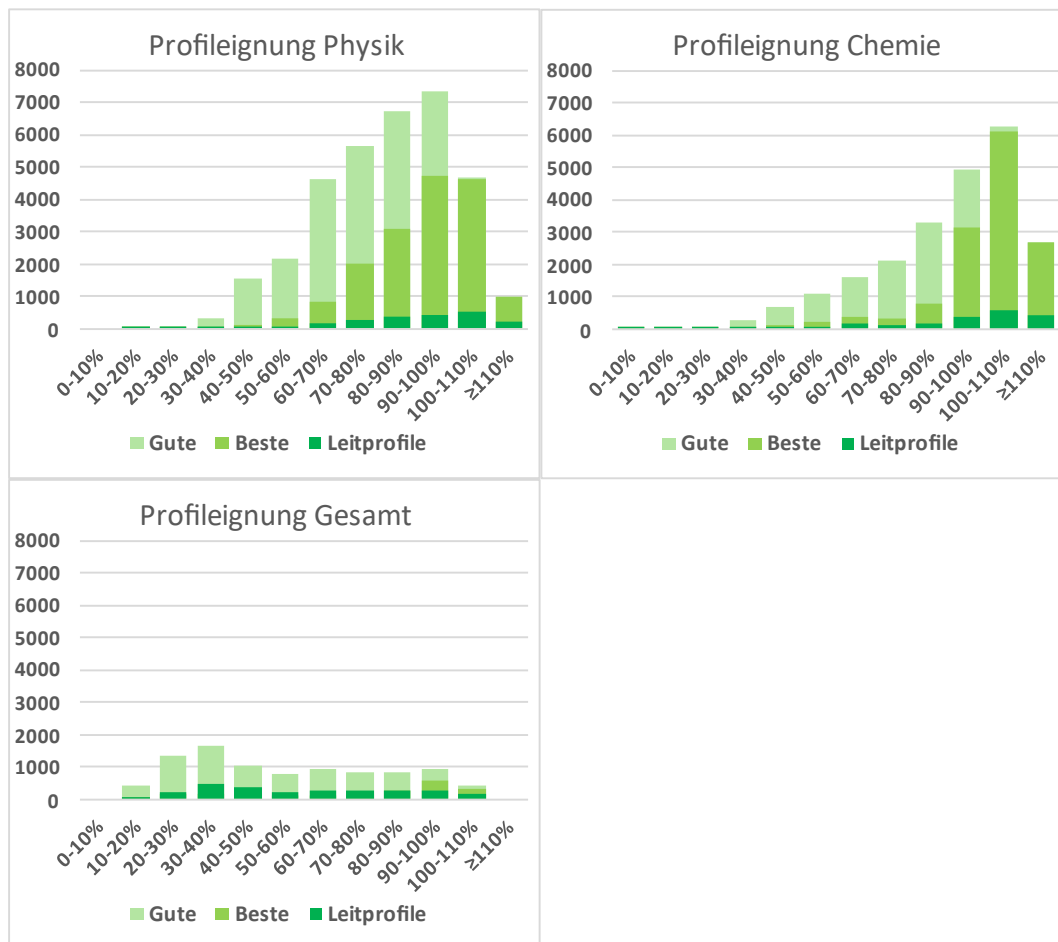


Abbildung 90: Gesamtbewertung (Profileignung) Physik, Chemie und Gesamt (y-Achse, Anzahl der Profile)

Berücksichtigung der Übersichtsbodenkarte

Da Parameter wie Skelettgehalt, Gründigkeit, Nährstoffreichtum und Deckschichten nur teilweise und andere Parameter wie Geologie/Substrat oder Bodentyp in der forstlichen Standorteinheit in Bayern nicht erfasst sind, wird im vorliegenden Verfahren ergänzend auch die geologisch-bodenkundlich ausgerichtete Übersichtsbodenkarte 1:25.000 (ÜBK25) berücksichtigt, die diese Informationen enthält. Ziel ist es, die hochaufgelösten Standortpolygone mit den stärker bodenkundlich ausgerichteten und standardisierten Informationen der ÜBK zu kombinieren bzw. zu füllen. Dies bedeutet, dass aus dem Profil-Pool nur solche Profile gewählt werden, bei denen die ÜBK-Einheit des Profils jener der ÜBK in näherer oder weiterer Entfernung um das Standortpolygon entspricht. Da die ÜBK grundsätzlich in einem größeren Maßstab kartiert ist als die Standortkarte und Kleinstandorte oftmals nicht gesondert ausgewiesen sind, erfolgt die Bodenprofilzuordnung in Leveln unterschiedlicher räumlicher Fixierung auf die ÜBK, die verschiedene räumliche Entfernungen vom Standortpolygon zur ÜBK-Einheit zulassen:

Tabelle 34: Level bzw. räumliche Fixierung auf die ÜBK25 (Maximalentfernung zu passender ÜBK-Einheit)

L	Level / Maximalentfernung	Kommentar / Gewichtung
L3	identische ÜBK-Einheit 200 m um Standortpolygon	Puffer um Polygon, Gewicht=Flächenanteil der ÜBK-Einheit im Umkreis
L2	identische ÜBK-Einheit im Kartiergebiet	Gewicht=Flächenanteil der ÜBK-Einheit im Kartiergebiet
L1	ähnliches Substrat im Umfeld um das Kartiergebiet	Gewicht=Flächenanteil des Substrats in den Kartiergebieten
L0	reine Profilbewertung ohne ÜBK-Einheit	keine Berücksichtigung der ÜBK-Einheit (nur Ähnlichkeit/Qualität)

Die Level liefern pro Standortpolygon die am besten geeigneten Profile mit unterschiedlicher räumlicher Berücksichtigung der Übersichtsbodenkarte und wurden in verschiedenen Varianten kombiniert. Nach systematischen Variantenstudien wurden aus über 1.500 Varianten die zwei ausgewählt, die die zwei gegenläufigen Teilziele (viele Profile vs. stabile ÜBK-Einheit) am besten erfüllten, und daraus eine mittlere ausbalancierte Variante gebildet.

Letztlich wurden die drei Varianten zu einem sog. **Ensemble** kombiniert, das die besten Ergebnisse erzielte: Die mittlere Profilähnlichkeit, also die Übereinstimmung mit der Standorteinheit beträgt 83% (aufgrund des Produkts der 13 Prüf- und Übereinstimmungsparameter ein sehr guter Wert), für 86% der Polygone konnten zumindest drei Profile (zur Medianbildung) gefunden werden und die ÜBK-Einheiten sind relativ stabil: Auf 86% der Fläche gibt es eine dominante Einheit und auf 63% eine mit über 75% Anteil.

Zusammenfassung und Fazit

Die Zuweisung von labortechnisch analysierten und umfassend bodenkundlich beschriebenen Bodenprofilen zu den Polygonen der konventionellen Standortkartierung (Standorteinheiten) konnte im Projekt mithilfe folgender Schritte umgesetzt werden:

- Detaillierte Dokumentation der Metadaten der BIS-Datenbank
- Aufbereitung und Import von 21.062 Profilen in eine vereinfachte Bodenprofildatenbank
- Export der Profildatenbank und Programmierung aller (Pedotransfer-)Funktionen in PostgreSQL
- Entwicklung innovativer Methoden zur Vervollständigung fehlender Informationen in der Profildatenbank und zur Verlängerung von Bodenprofilen auf 2m Tiefe
- Zuweisung von 13 bodenphysikalischen und -chemischen Prüf- und Übereinstimmungsparametern zu den Standorteinheiten und den Bodenprofilen
- Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Profileignung
- Entwicklung einer Profileinstufung nach Prinzipien der Fuzzy Logic, d.h. Beurteilung der Profilähnlichkeit zwischen Bodenprofilen und Standorteinheiten inkl. Profilqualität und -eignung
- Zuweisung von Bodenprofilen zu Standorteinheiten durch Auswahl und Reihung geeigneter Profile, die der räumlich nächstgelegenen ÜBK-Einheit in der Übersichtsbodenkarte (ÜBK25) entsprechen
- Bewertung der Profileignung auf räumlich unterschiedlich aufgelösten Leveln (L0 bis L3)
- Kombination der Level zu drei optimierten Varianten und einem Ensemble
- Analyse der Ergebnisse und Defizite inkl. Empfehlungen zur weiteren Qualitätssicherung

Die entwickelten Verfahren sind geeignet, um ähnliche bzw. gut geeignete Profile für jede in den Beispielgebieten vorkommende Standorteinheit auszuwählen. Ein Meilenstein ist die Kombination der räumlich hoch aufgelösten Standortkarte mit der räumlich geringer aufgelösten aber stärker bodenkundlich ausgerichteten und strukturierten Übersichtsbodenkarte. Für eine bayernweite Übertragung der entwickelten Methoden besteht allerdings noch Entwicklungspotenzial in der teil-automatisierten Zuordnung der Bodenprofile zu den über 1 Mio. Polygonen der Standortkartierung.

Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten

Das Flow Chart in Abbildung 91 zeigt noch einmal schematisch die notwendigen Schritte für die Herleitung der Artverbreitungsmodelle hinter dem Anbaurisiko und für die Berechnung des Anbaurisikos aus den Klima- und Standortdaten im Projekt StWM-KPW:

- Auf der Datenseite (Kästen Klimadaten, Standortdaten, Inputdaten). wurden für die *Modellherleitung* die bestehenden Artverbreitungsmodelle an der LWF mit aktuellen europaweiten Artverbreitungsdaten und Klimadaten des CHELSA-Datensatzes 1981-2010 harmonisiert. Es handelt sich dabei um rein klimatisch angesteuerte Artverbreitungsmodelle, basierend auf den Parametern Sommertemperatur, Wintertemperatur und Sommerniederschlag. Zur Bestimmung des Einflusses der nutzbaren Feldkapazität und der Nährstoffkennziffer wurden artspezifische Trends in den europaweiten Daten

untersucht, letztendlich aber expertengesteuert und gesondert vom Klimarisiko aus den Artverbreitungsmodelle eingespeist (s.u.). Für die *Anwendung* der Modelle in StWM-KPW wurden von den zur Auswahl stehenden Klimadaten die Beobachtungsdaten (observed) des UHH-Datensatzes für die Klimaperiode 1991-2020 und die MPIESM-CLM Modelle für die Emissionsszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 in der Klimaperiode 2071-2100 verwendet (vgl. Seite 31). Klimatische Transferfunktionen kamen nicht zum Tragen, da systematische klimatische Unterschiede zwischen dem Modellkalibrierungsdatensatz CHELSA und dem Anwendungsdatensatz der UHH vernachlässigbar waren. Bezüglich der Bodeneigenschaften lag die Herausforderung weniger in der Anwendung der Pedotransferfunktion für die Herleitung der nutzbaren Feldkapazität nFK (nach Teepe et al. 2003), sondern eher in der Berücksichtigung länderspezifischer Feinheiten in der Definition der Basenausstattung und Hydromorphie (Stauwasser, Grundwasser, Moore und Überflutung). Neben der nFK überprägen diese Standortfaktoren auf vielen Standorten das über die Artverbreitungsmodellen resultierende klimatische Anbaurisiko.

- Auf der Produktseite stehen (1) Artverbreitungsmodelle, als Ergebnis der Modellherleitung, sowie die Prozesskette von (2) Vorkommenswahrscheinlichkeit aus den (rein klimatisch getriebenen) Artverbreitungsmodellen und ihre Risiko-Einwertung („Klimarisiko“), über (3) die standörtliche Modifikation aufgrund nutzbarer Feldkapazität, Basenausstattung und Hydromorphie der Böden (s.o.) hin zu, (4) finalen Anbaurisiko, das in die fünf Klassen (sehr gering, gering, erhöht, hoch und sehr hoch) eingeteilt wird (vgl. Tabelle 8).

Flow Chart Anbaurisiko

Projekt StWM-KPW: T. Mette, LWF, 13.02.2023

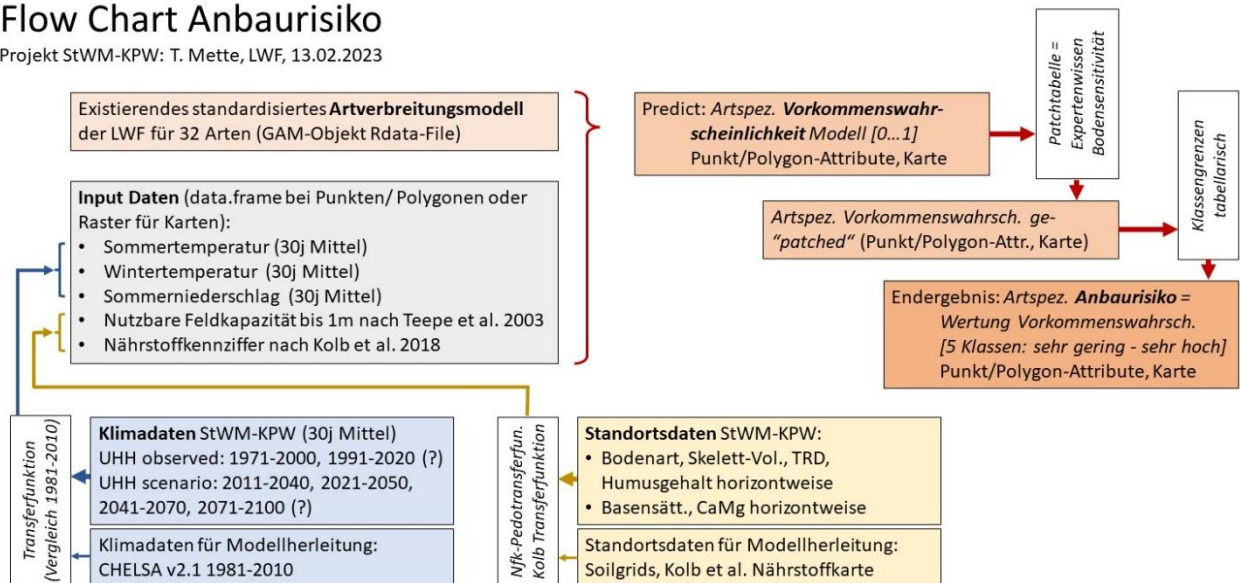


Abbildung 91: Flow Chart zur Herleitung der Artverbreitungsmodelle für das Anbaurisiko und für die Berechnung des Anbaurisos aus den Klima- und Standortdaten im Projekt StWM-KPW (mit Stand 13.02.2023).

Die Ergebnisse für die neun StWM-KPW Beispielgebiete mit insgesamt 1.645.030 Datensätze sind in einer SQLite-Datenbank zusammengestellt und auf Seite 44 ff. veranschaulicht.

Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt

Die Modellierung des Wasserhaushalts in den Projektgebieten erfolgte aufbauend auf den im Rahmen des FNR-Projekts WHH-KW erarbeiteten und in diesem Teilvorhaben adaptierten Daten und Methoden. Als Untersuchungszeitraum wurden die Perioden 1961-1990 (Vergangenheit) und 1991- 2020 (Gegenwart) sowie 2071-2100 für ein mildes und hartes Emissionsszenario (RCP 4.5 und RCP 8.5) festgelegt. Für den Abgleich des modellierten mit dem kartierten Wasserhaushalt, wurden die Wasserhaushaltsziffern der Standortkartierung in die Wasserhaushaltsklassen nach WHH-KW transformiert. Dies erfolgte durch Umkehr der Wasserhaushalts-Skala und durch Ergänzung von drei weiteren Wasserhaushaltsklassen (vgl. Tabelle 25 Seite 97). Mithilfe eines verbesserten Postprocessing-Verfahrens konnte für jedes Standortpolygon das Bodenprofil mit

der größten Übereinstimmung zwischen modelliertem Wasserhaushalt und dem zum Zeitpunkt der Kartierung angesprochenen Wasserhaushalt ausgewählt werden. Dieses Verfahren wurde auch für die Modellierung der anderen Szenarien (Gegenwart, mildes und hartes Emissionsszenario) verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichung zwischen modelliertem und kartiertem Wasserhaushalt noch relativ hoch ist. Für eine höhere Qualität der Modellergebnisse müssten wesentliche Bodeninformationen v.a. Gründigkeit, Skelettgehalt und Geländeform im Wasserhaushaltsmodell noch stärker berücksichtigt werden.

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Eine GIS-basierte Verarbeitung der Daten und Bereitstellung der Ergebnisse ist aufgrund des räumlichen Datencharakters unumgänglich. Bei den Inputdaten handelt es sich sowohl um Rasterdaten (Topographie und Klima) als auch um Vektordaten (Bodeneinheiten). Bei den Produkten handelt es sich primär um Vektordaten, die für gänige Ausspielwege technisch und anwenderseitig leichter handhabbar sind.

Während für die Zusammenstellung der Information aus verschiedenen Geodatensätzen GIS-Operationen wie Verschneidung und koordinatenspezifische Datenextraktion nötig sind, kann die Weiterverarbeitung der Daten GIS-unabhängig erfolgen. Dazu wurde einerseits die schon genannte SQLite Datenbank aufgesetzt, die über die GIS-ID Spalte jederzeit mit den (räumlichen) Geometriedaten verbunden werden kann.

Technisch wurden die Bearbeitungsschritte im Wesentlichen in R, Python und PostgreSQL durchgeführt. SQLite-Datenbanken wurden als einfaches Data-Sharing-Format zwischen den Partnern genutzt. Das Anbaurisiko wird als GIS-Produkt im System BayWIS (bayerisches Waldinformationssystem) der bayerischen Forstverwaltung aktualisiert. Des Weiteren ist eine Veröffentlichung der Standortkartierung und Baumarteneignung über den webbasierten VfS-Viewer geplant, der den forstlichen Zusammenschlüssen im Privatwald direkten Zugriff zu den GIS-Informationen ermöglicht.

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

Nutzung von Standortinformationen

In Bayern war es aus datenschutz- und nutzungsrechtlichen Gründen erforderlich die Zustimmung der forstlichen Zusammenschlüsse zur Weiterverarbeitung der forstlichen Standortdaten einzuholen. Hierfür wurde eine Vereinbarung über die „Nutzung, Weiterverarbeitung und Weitergabe von Daten der terrestrischen Standorterkundung in Bayern“ zwischen LWF, VfS und den forstlichen Zusammenschlüssen erarbeitet und mit den Beteiligten in den Projektgebieten geschlossen. Die erste Vereinbarung dieser Art wurde am 03.11.2023 mit der WBV Cham-Roding pressewirksam abgeschlossen (s. Abbildung 92). Das Interesse an den weiterentwickelten Standortinformationen in Bayern reicht weit über die Projektgebiete hinaus. Mittlerweile haben schon über 100 forstliche Zusammenschlüsse ihr Einverständnis zur gemeinschaftlichen Nutzung und Weiterentwicklung der Daten der konventionellen Standortkartierung erteilt.



Abbildung 92: Ausgewählte regionale Pressemeldungen über die Unterzeichnung der Nutzungsvereinbarungen zur gemeinschaftlichen Weiterentwicklung und Inwertsetzung der Daten der konventionellen forstlichen Standortkartierung in Bayern.

Austausch mit der Praxis

Um die Akzeptanz des Vorhabens durch die Waldbesitzer/-innen zu gewährleisten, wurden auf bayerischer Seite entsprechende Informationsveranstaltungen auf Jahreshauptversammlungen der forstlichen Zusammenschlüsse durchgeführt und die Organe der Bayerischen Forstverwaltung mit eingebunden. Hierfür wurden auch Zwischen- und Endergebnisse auf wissenschaftlichen Tagungen und bei den forstlichen Vertretern und Waldbesitzer/-innen der Beispielgebiete vorgestellt. Hierzu zählten unter anderem folgende Veranstaltungen:

- AFSV-Tagung (11.10.-14.10.2023): Präsentation und Diskussion der Methodik zur Sicherung, Harmonisierung und Weiterentwicklung konventioneller Standortinformationen in Bayern am Beispiel des Kartiergebiets „Teuschnitz“ der WBV Kronach-Rothenkirchen
- LWFregional Mittelfranken (03.07.2024): Vortrag zum Thema „Klima- und Standortwandel im Blick – Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis Beispiel Nürnberger Land“ mit anschließender Diskussionsrunde
- Tagung zum Boden des Jahres in der Bodenseeregion (A/D/CH) Wald.Boden.Klima.Wandel (22.-24.10.2024); Exkursionspunkt Lindau/Hangnach, Klimawandel, Bodeninformationen und Baumartenwahl.
- Präsentation und Diskussion der vorläufigen Produkte im Pilotgebiet der WBV-Cham-Roding am 27.11.2024
- BaSIS-Workshops (12/2024 – 01/2025): Austausch zwischen LWF und Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten über neue Datengrundlagen für ein aktualisiertes Anbaurisiko im Bayerischen Standortinformationssystem (BaSIS)
- LWFregional Oberfranken (29.04.2025): Vortrag zum Thema „Wald-, Klima- und Standortwandel zwischen Steigerwald und Fichtelgebirge – Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis“ mit anschließender Diskussionsrunde

Wünsche und Verbesserungsvorschläge, insbesondere zur praxisorientierten Darstellungsweise wurden so weit möglich im Entwicklungsprozess berücksichtigt.

Ausspielwege

Die weiterentwickelten Standortinformationen sollen den forstlichen Zusammenschlüssen mittelfristig in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden. Hierbei übernimmt der Verein für forstliche Standorterkundung in Bayern e.V. (VfS), wie bereits in der Vergangenheit für die forstlichen Zusammenschlüsse eine wichtige Rolle bei der Datenhaltung und -übermittlung. In Abhängigkeit von den Nutzungsgewohnheiten und der technischen

Ausstattung der Waldbesitzer/-innen werden aktuell Wege und Möglichkeiten erarbeitet, wie die einzelnen Waldbesitzer/-innen die Informationen in einer für sie geeigneten und datenschutzkonformen Weise erhalten und abrufen können. Diese reichen von einfachen, konventionellen papierbasierten Lösungen für den Kleinprivatwald (laminierte Ausdrucke von Standortkarte und Baumarteneignungstabelle) bis hin zu layered pdfs und open source GIS-Lösungen. Ergänzend stehen den Waldbesitzer/-innen die Informationen der weiterentwickelten Standortdaten auch im Rahmen der kostenfreien Beratungsleistung der zuständigen staatlichen Revierleiter/-innen über das verwaltungsinterne GIS-System BayWIS (Bayerisches Waldinformationssystem) zur Verfügung.

Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Tabelle 35: Vorträge über Ziele, Vorgehensweisen und Ergebnisse des Projektes und der Weiterentwicklung von Standortinformationen

Zeitpunkt	Berichterstattung
Oktober 2023	Klaas Wellhausen: Vortrag „Sicherung und Weiterentwicklung von Standorterkundungsdaten in Bayern (Projekt StWM-KPW) – Aktueller Stand und weiteres Vorgehen“ im Rahmen der 197. Ausschusssitzung des Bayerischen Waldbesitzerverbands e.V. (Waldbauernschule Kelheim).
Oktober 2023	Klaas Wellhausen: Vortrag „Sicherung und Weiterentwicklung der Daten der Standorterkundung in Bayern (Projekt StWM-KPW) – Aktueller Stand und weiteres Vorgehen“ im Rahmen der Informationstagung für Vorstände und Geschäftsführer der Waldbesitzervereinigungen/Forstbetriebsgemeinschaften in Bayern (Kelheim).
November 2023	Sandra-Maria Hipler: Vortrag „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald. Klima – Nährstoffe – Wasserhaushalt (StWM-KPW)“ im Rahmen des FNR-Statusseminars (Klein)Privatwald (Göttingen).
Februar 2024	Klaas Wellhausen, Stephan Garnreiter: Vortrag „Sicherung und Weiterentwicklung von Standorterkundungsdaten in Bayern – Aktueller Stand und weiteres Vorgehen“ im Rahmen der Geschäftsführer-Besprechung FV Oberpfalz (Regensburg)
Februar 2024	Stephan Garnreiter: Vortrag „Bestand, bisherige Nutzung und Weiterentwicklung der VfS-Standortdaten“ im Rahmen der Strategiesitzung des Vereins für forstliche Standorterkundung in Bayern e.V. (Kelheim)
März 2024	Klaas Wellhausen, Sandra-Maria Hipler: Vortrag „Klimawandel, Standortinformationen und Baumartenwahl – Den Frankenwald der Zukunft gestalten!“ auf der Jahreshauptversammlung der WBV Kronach-Rothenkirchen (Neukenroth)
März 2024	Tobias Mette, Stephan Garnreiter: Vortrag „Klimawandel, Standortinformationen und Baumartenwahl – Den Wald der Zukunft gestalten!“ auf der Jahreshauptversammlung der FBG Pegnitz (Pegnitz)
Mai 2024	Tobias Mette: Vortrag „Erfahrungen im Einsatz von digitalen Werkzeugen bei der Baumartenwahl – Projekt Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald (StWM-KPW)“ im Rahmen des FNR Online-Seminars zum Thema „Baumartenwahl im Klimawandel: Prognosetools zur Risikoabschätzung“.
Mai 2024	Klaas Wellhausen: Vortrag „Sicherung und Weiterentwicklung von Standorterkundungsdaten in Bayern – Aktueller Stand und weiteres Vorgehen“ im Rahmen der Mitgliederversammlung FV Schwaben (Erkheim)
Juni 2024	Klaas Wellhausen: Vortrag „Sicherung und Weiterentwicklung von Standorterkundungsdaten in Bayern – Aktueller Stand und weiteres Vorgehen“ im Rahmen der Mitgliederversammlung FV Mittelfranken (Dürrwangen)
September 2024	Klaas Wellhausen, Stephan Garnreiter: Vortrag „Weiterentwicklung der VfS-Standortdaten i.W. im Rahmen des Projektes StWM-KPW“ im Rahmen der Mitgliederversammlung des Vereins für forstliche Standorterkundung in Bayern e.V. (Kelheim)
April 2025	Klaas Wellhausen: Vortrag „Wald-, Klima- und Standortwandel zwischen Steigerwald und Fichtelgebirge – Grundlagen und Hilfsmittel für die forstliche Praxis; LWF regional Oberfranken (Kulmbach)
Mai 2025	Klaas Wellhausen: Impulsvortrag „Standortgerechtes Waldmanagement im Kleinprivatwald (StWM-KPW) – Möglichkeiten und Grenzen bei der Bereitstellung digitaler Standortinformationen“ im Rahmen der FNR-Onlinetagung zum Thema „Digitalisierung und Klimaschutz – Möglichkeiten der Forst- und Holzwirtschaft“.

Geplante Veröffentlichungen:

Artikel in der Zeitschrift LWFaktuell zum Thema „Zukunftsfähige Standortinformationen für den Kleinprivatwald in Bayern“ (Erscheinungstermin: Herbst/Winter 2025)

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Die Bodenprofildatenbank wurde um 21.062 Profile aus der aktuellen BIS-Datenbank des LfU erweitert. Anhand dieser Daten werden die qualitativen, beschreibenden Informationen der konventionellen Standortkartierung durch numerische, weiter verrechenbare Informationen ergänzt bzw. ersetzt.
- Komplexe Algorithmen zur Zuweisung der begrenzten Anzahl labortechnisch analysierter Leitprofile zu den rund 1,0 Mio. Polygonen der konventionellen Standortkartierung wurden entwickelt und ermöglichen die Ableitung bodenphysikalischer und -chemischer Kenngrößen zur Modellierung des Wasserhaushalts und der Nährstoffbilanzen
- Klimadynamische Anbaurisikokarten für 32 Baumarten können erstellt werden. Sie unterstützen die privaten Waldbesitzer/-innen bei der richtigen Baumartenwahl unter Berücksichtigung der standörtlichen Risikofaktoren, des Wasserangebots und der zu erwartenden Klimaveränderung und fördern damit ein standortgerechtes Waldmanagement
- Aktuelle Ergebnisse aus der Standortforschung werden in Zusammenarbeit mit staatlichen und nicht-staatlichen Stellen der forstlichen Beratung den forstlichen Zusammenschlüssen über online-Dienste oder papierbasiert zur Verfügung gestellt

Teilvorhaben 2: Erweiterte Standortinformationen für Bayern

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben 2 wurden die Arbeitspakete 2, 3, 8 und 9 bearbeitet. Die Aufgabenschwerpunkte lagen bei der Akquise fehlender Standortdaten und der Aktualisierung bestehender Daten sowie bei der Zuweisung von Bodenprofilen zu den Standorteinheiten. Ebenso wurden im Teilvorhaben 2 regelmäßig Karten für Öffentlichkeitsarbeit, z.B. bei Vorträgen, Präsentationen und Internetauftritt sowie für Nutzungsvereinbarungen für die forstlichen Zusammenschlüsse erstellt. Auch die Mitarbeit bei der Entwicklung einer praxisorientierten Darstellungsform der weiterentwickelten Standortkarten waren eine der Aufgaben.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

Festlegung der Beispielgebiete

Als Beispielgebiete wurden drei unterschiedliche Teilregionen beziehungsweise forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse von privaten Waldbesitzern (Waldbesitzervereinigungen (WBV), Forstbetriebsgemeinschaften (FBG)) ausgewählt: die Forstbetriebsgemeinschaft (FBG) Nürnberger Land sowie die Waldbesitzervereinigungen (WBV) Cham-Roding und Kronach-Rothenkirchen. Die Auswahl dieser Regionen erfolgte gezielt anhand mehrerer Kriterien: Unterschiede im geologischen Ausgangssubstrat, variierende klimatische Rahmenbedingungen (insbesondere hinsichtlich Sommertemperatur und Jahresniederschlägen), Unterschiede in Besitzstrukturen (z. B. Anteil von Kleinprivat- vs. Körperschaftswald), die Größe der Flächen sowie die Verfügbarkeit der VfS-Standortdaten und die Bereitschaft der örtlichen Akteure zur Mitwirkung.

Die Daten der Standortkartierung in Bayern sind in der Regel in Kartiergebiete gegliedert. Diese orientieren sich im kleinen und mittleren Privatwald im Wesentlichen an den Zuständigkeits- d. h. Vereinsgebieten der Forstlichen Zusammenschlüsse (Forstbetriebsgemeinschaften und Waldbesitzervereinigungen), die zugleich als seinerzeitige Auftraggeber der Standortkartierung agierten. Innerhalb dieser Zuständigkeitsgebiete dienen die Gemeindegrenzen häufig als Abgrenzung der einzelnen Kartiergebiete.

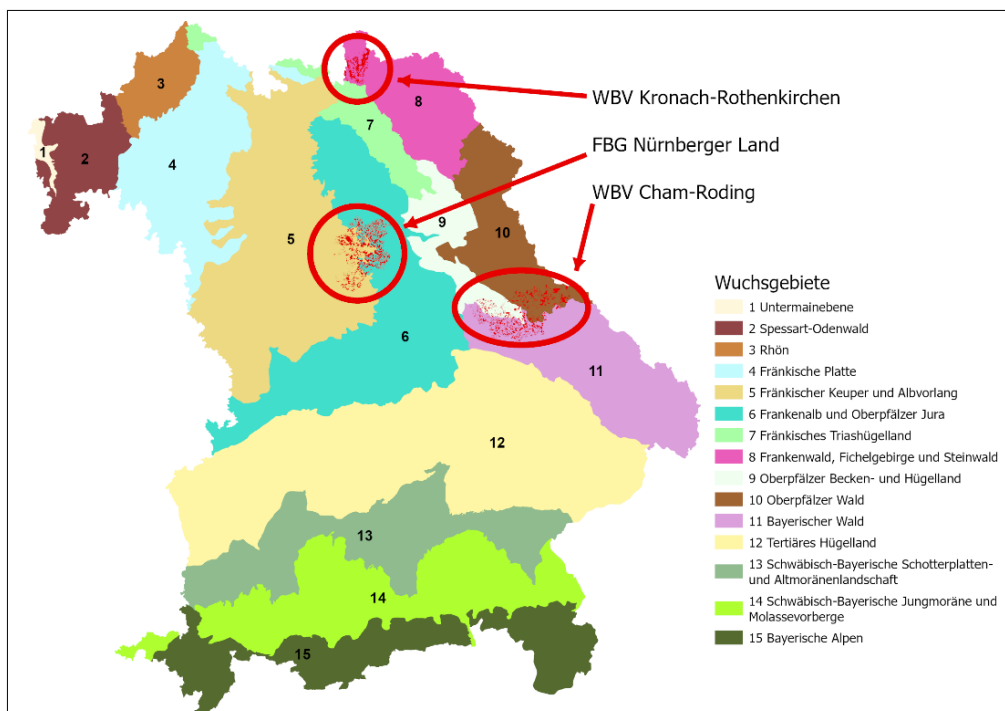


Abbildung 93: Die räumliche Lage der drei Beispielgebiete in Bayern

FBG Nürnberger Land

Das Gebiet der Forstbetriebsgemeinschaft Nürnberger Land liegt am Übergang zwischen der Fränkischen Alb und dem Fränkischen Keuper und Albvorland. Es umfasst etwa 23.400 Hektar, aufgeteilt in sieben Kartiergebiete, die im Zeitraum von 1999 bis 2008 bearbeitet wurden. Die Höhenlage reicht von kollinen bis in submontane Höhenlagen. Geologisch ist das Gebiet sehr heterogen aufgebaut: Die vorherrschenden Ausgangsgesteine reichen von Malm, Dogger und Lias über Oberkreide bis hin zu Feuerletten und Flugsanden. Diese Vielfalt bedingt ein breites Spektrum an Standortverhältnissen. Klimatisch zeigt sich ein gemäßigt-warmes, teils kontinentales Klima mit moderaten Niederschlagsmengen. Die Region weist einen hohen Anteil an Kleinprivatwald auf und ist daher für die Weiterentwicklung der Standortdaten bestens geeignet. Das Nürnberger Land stand bereits in zwei vorausgegangenen Projekten im Fokus: „Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) und die „Machbarkeitsstudie zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der standortkundlichen Datenbasis in Bayern“ (Projekt HarmStok).

WBV Cham-Roding

Das Einzugsgebiet der WBV Cham-Roding liegt im Vorderen Bayerischen Wald und erstreckt sich bis in das Oberpfälzer Becken- und Hügelland im Westen sowie in den Oberpfälzer Wald im Nordosten. Die insgesamt zehn Kartiergebiete wurden zwischen 1988 und 2002 aufgenommen und umfassen rund 26.000 Hektar. Die Höhenlage reicht von kollin bis montan. Geologisch dominieren stark verwitterte Gneise, begleitet von Einschaltungen aus Quarz, Oberkreide sowie lokalen Ablagerungen wie Feuerletten, Flugsanden und Löss. Der Standortcharakter ist insgesamt stark durch die Reliefenergie, Verwitterung und Hangneigung geprägt. Das Klima ist hier durch höhere Jahresniederschläge und kühlere Sommertemperaturen als im bayerischen Durchschnitt gekennzeichnet, insbesondere im Übergang zum Inneren Bayerischen Wald. Neben dem Körperschaftswald ist der Privatwald – teils auch in kleinstrukturierter Besitzform – stark vertreten. Der hohe geologische Kontrast zu den anderen Beispielregionen war ein wichtiger Auswahlgrund.

WBV Kronach-Rothenkirchen

Die dritte Beispielregion, die Waldbesitzervereinigung Kronach-Rothenkirchen, liegt im nordöstlichen Bayern und gehört naturräumlich zum Frankenwald. Zum Projektbeginn lagen hier zunächst zwei Kartiergebiete vor, die im Laufe des Projekts durch die Akquise weiterer analoger Standortkarten und Kartieroperats um zwei zusätzliche Gebiete ergänzt werden konnten. Insgesamt umfasst die Region nun vier Kartiergebiete mit einer Fläche von etwa 6.850 Hektar, von denen über die Hälfte erst projektbegleitend digitalisiert und harmonisiert wurden. Die Höhenlage reicht von submontanen bis montanen Stufen. Geologisch dominieren hier Schichten des Karbons sowie des Rotliegenden – eine Besonderheit in Bayern, die sich deutlich von den anderen beiden Gebieten abhebt. Klimatisch ist die Region durch ein feucht-kühles Mittelgebirgsklima geprägt, mit langen Wintern und relativ hohen Niederschlägen. Die Datenergänzung in Kronach-Rothenkirchen ermöglichte eine praxisnahe Erprobung des entwickelten Verfahrens zur Harmonisierung und Konsolidierung historischer Standortdaten.

Alle drei Beispielgebiete liegen in unterschiedlichen Wuchsgebieten (WG 5, 6, 8, 9, 10 und 11; vgl. Abbildung 93), wodurch auch auf regionaler Ebene ein breites Spektrum naturräumlicher Bedingungen abgedeckt wird. Dies gewährleistet, dass die gewonnenen Erkenntnisse und Verfahren auf verschiedene forstliche Rahmenbedingungen übertragbar sind.

Tabelle 36: Vergleichsübersicht zu den drei Beispielgebieten

Beispielgebiet	Anzahl Kartiergebiete	Fläche [ha]	Kartierzeiträume	Höhenstufen	Geologie
FBG Nürnberger Land	7	23.395	1999 - 2008	kollin, submontan	Malm, Dogger, Lias, Oberkreide, Feuerletten, Flugsande
WBV Cham-Roding	10	25.991	1988 - 2002	kollin bis montan	Gneis, Oberkreide, Quarz, Flugsande, Feuerletten, Löss
WBV Kronach-Rot-henkirchen	4 (davon 2 neu)	6.850 (davon 3.701 neu)	1989 - 2002	submontan, montan	Karbon, Rotliegendes

Akquise der Standortdaten

Die Datenerhebung in den ausgewählten Beispielgebieten wurde zur Mitte der Projektlaufzeit erfolgreich abgeschlossen. Damit stand für diese Regionen ein konsolidierter, digitaler Bestand an Standortinformationen zur Verfügung, der als Grundlage für die methodische Weiterentwicklung genutzt werden konnte.

Parallel dazu wurde auch die Vervollständigung des bayernweiten Datenbestands weiter vorangetrieben. Aufbauend auf den bereits vorhandenen, vom VfS gesicherten und digitalisierten Standortdaten wurde in enger Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) eine Akquise-Initiative gestartet. Ziel hierbei ist es, bislang fehlende Standortinformationen zu identifizieren, aufzubereiten und in digital nutzbarer Form verfügbar zu machen. Der regionale Schwerpunkt dieser Aktivitäten lag vor allem in Unterfranken, wo bislang große Lücken im digitalen Datenbestand bestanden.

Der entstehende Datensatz bildet die Grundlage dafür, die im Projekt entwickelten Methoden und Verfahrensschritte künftig nicht nur auf die Beispielregionen, sondern auf die gesamte Waldfläche Bayerns übertragen zu können. Diese stellt einen bedeutenden Fortschritt für die Verfügbarkeit von Standortinformationen dar und unterstreicht den hohen Mehrwert der Digitalisierung und Harmonisierung historischer Kartenbestände.

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

Die Zuweisung der 6-ziffrigen Standorteinheiten zu den labortechnisch analysierten Bodenprofilen erfolgte schwerpunktmäßig durch die LWF. Grundlage hierfür bildeten die vom VfS kartierten Standortpolygone, die dieser in Form von GIS-Daten und einer relationalen Datenbank zur Verfügung stellte.

Da die Standortkartierungen in Bayern über mehrere Jahrzehnte und durch viele verschiedene Kartierer erfolgten, wurde in einer von VfS, LWF und TUM unter Beteiligung der BaySF durchgeführten „Machbarkeitsstudie zur Vereinheitlichung und Harmonisierung der standortkundlichen Datenbasis in Bayern“ (Projekt Harm-Stok) versucht die z.T. unterschiedlichen Verschlüsselungssysteme in Staats-, Privat- und Körperschaftswald aneinander anzugleichen (Weis et al., 2018 b). Im Rahmen dieser Studie wurde der traditionell 3-ziffrige Standortcode um wertvolle Zusatzinformationen aus den Standortoperaten erweitert und eine neue 6-ziffrige Standortverschlüsselung generiert. Die Zuweisung der Standorteinheiten erfolgte manuell, da ein automatisiertes Verfahren aufgrund der Unterschiede hinsichtlich Informationstiefe, Darstellung und Kodierung der Standortinformationen in den einzelnen Kartiergebieten nicht möglich war. Im Nachgang war eine Verifizierung über die entsprechenden Standortbeschreibungen in den Operaten für eine bayernweite Vereinheitlichung der Daten erforderlich, um etwaige Widersprüche, die durch den Kodierungsvorgang auftreten konnten zu klären und zusätzliche Informationen zu standörtlichen Besonderheiten (Trophie) aus den Operaten zu ergänzen. Eine stichpunktartige Validierung dieser 6-ziffrigen Standorteinheiten erfolgte zu Beginn des Projekts, da sie die Grundlage für die Zuordnung von Analysedaten an Bodenprofilen bildeten.

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Um die Weiterentwicklung der Standortinformationen in Bayern für die Forstlichen Zusammenschlüsse nutzbar zu machen, werden Produkte aus der Weiterentwicklung der VfS-kartierten Waldflächen in den VfS-Viewer Plus integriert. Der VfS-Viewer ist ein Q-GIS basiertes Informationssystem, welches von den ehemaligen Auftraggebern der Kartierungen – und damit Inhabern der Nutzungsrechte an den Standortinformationen, überwiegend forstwirtschaftliche Zusammenschlüsse aber auch Kommunen und Privatwaldbesitzer/-innen - des VfS genutzt werden kann. Die Standortinformationen können über den Internetbrowser abgerufen werden, alternativ können die dort ersichtlichen Daten auch in einen WMS-Dienst eines bestehenden GIS-Systems der Anwender eingebunden werden.

Bisher enthält der VfS-Viewer die vektorisierten Standortinformationen zum Stand des jeweiligen Kartierzeitpunktes, d.h. die Einschätzung des Wasserhaushalts der Standorte und die Baumartenempfehlungen entsprechen schwerpunktmäßig dem Stand der 80er bis 90er Jahre. Nichtsdestotrotz bietet dieses System in Bezug auf die Bodeneigenschaften wertvolle Informationen für waldbauliche Fragestellungen. Mithilfe der in diesem Projekt angewendeten Methoden können nun der aktuelle und zukünftige Wasserhaushalt objektiv abgebildet und die Baumarteneignung klimadynamisch dargestellt werden.

Gleichzeitig fließen die Produkte der weiterentwickelten Standortinformationen in das verwaltungsinterne Bayerische Waldinformationssystem (BayWIS) ein und werden von den Beratungsförsterinnen und -förstern der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Bayern für die Beratung der Waldbesitzer/-innen verwendet.

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

Informationen für die potenziellen Anwender und Rückmeldungen

Zur Förderung der Akzeptanz und zur aktiven Einbindung der Rechteinhaber der Standortdaten wurden im Projektverlauf zahlreiche Informationsveranstaltungen durchgeführt. Vertreter von LWF und VfS präsentierten das Projekt unter anderem auf Geschäftsführertagungen, Mitgliederversammlungen von Waldbauernvereinigungen, Fachtagungen und Exkursionen. Ein zentraler Aspekt dabei: Die bayerischen Standortdaten unterliegen im Privatwald besonderen Nutzungsrechten. Eine offene Kommunikation ist daher unerlässlich, um Zustimmung für die Weiterverwendung und Weiterentwicklung der Daten zu erhalten – insbesondere, wenn diese flächendeckend für Beratung und Planung eingesetzt werden sollen.

Inhaltlich lag der Fokus der Veranstaltungen auf folgenden Kernbotschaften:

- Überblick über Flächenanteile und Digitalisierungsstand der forstlichen Standortkartierung in Bayern
- Darstellung der Notwendigkeit, die bestehenden (statischen) Standortdaten vor dem Hintergrund des Klimawandels in ein dynamisches System zu überführen
- Einblick in das FNR-Projekt StWM-KPW, insbesondere in die methodische Weiterentwicklung der Standortinformationen (Harmonisierung, Bodenprofilzuordnung, vereinheitlichter Bodenwasserhaushalt...)
- Ausblick auf die geplanten Endprodukte anhand von Prototypenkarten

Ergänzend wurden gezielt Rückmeldungen aus den Teilnehmerkreisen eingeholt. Kritik und Anregungen flossen unmittelbar in die Weiterentwicklung der Produkte und Darstellungsformen ein. Drei konkrete Beispiele zeigen, wie diese Rückmeldeschleifen gestaltet waren:

Beispiele dazu:

- **AFSV -Tagung (Arbeitskreis Forstliche Standorts- und Vegetationskunde):** Hier wurden exemplarisch die forstlichen Standortdaten des Kartiergebietes Teuschnitz im Landkreis Kronach digitalisiert, harmonisiert und die Methodik der Bodenprofilzuweisung und Wasserhaushaltsmodellierung vorgestellt - in enger Zusammenarbeit zwischen VfS und LWF.

- **Workshop bei der WBV Cham-Roding (November 2024):** Anwesend waren Vertreterinnen und Vertreter der WBV, der zuständigen Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, des VfS sowie Waldbesitzende. Ein Zwischenstand der Produkte wurde vorgestellt und diskutiert.
- **Erkenntnisse aus Gruppenarbeiten:** Besonders wertvoll waren die Rückmeldungen zur kartografischen Darstellung der Endprodukte. Dabei wurde die Balance zwischen Informationsdichte und Übersichtlichkeit intensiv diskutiert. Ein häufig genannter Wunsch war die Möglichkeit, Kartenausschnitte direkt aus dem GIS-System heraus in druckfähiger Form exportieren zu können, da viele Nutzerinnen und Nutzer im Beratungskontext weiterhin mit Papierkarten im Wald arbeiten.

Umsetzung

Die Nutzeroberfläche des bereits bestehenden und von einigen Forstlichen Zusammenschlüssen genutzten VfS-Viewers wurde im Rahmen einer Eigeninitiative des VfS bzw. GIS-Dienstleister modernisiert und dient nun als GIS-Anwendung zur Auspielung der weiterentwickelten Standortinformationen.

Im August 2024 führte der VfS eine Umfrage unter den forstlichen Zusammenschlüssen durch, um den Bedarf und die Akzeptanz für eine Nutzung des Viewers zu ermitteln. Das Ergebnis war eindeutig: Neben den bisherigen rund 20 Nutzern zeigten 42 weitere Zusammenschlüsse konkretes Interesse an einer künftigen Nutzung.

Diese Entwicklung zeigt deutlich das gestiegene Interesse an praxisnah aufbereiteten Standortinformationen. Die Weiterentwicklung des Systems trägt dazu bei, Standortdaten für die waldbauliche Planung und Beratung attraktiver und nutzerfreundlicher zu gestalten. In beiden Systemen, also dem VfS-Viewer und BayWIS, werden Informationen in intuitiv verständlichen Karten dargestellt.

Enthalten sind unter anderem:

- Legende zu den Standorteinheiten
- Bodenwasserhaushalt für mehrere Klimaszenarien
- tabellarische Auflistung aller Standorte im Kartiergebiet
- Anbaurisikoabschätzung für ausgewählte Baumarten

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

In Teilvorhaben 2 konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

1. Weiterentwicklung der Standortinformationen

- In Zusammenarbeit mit der LWF wurden Wasserhaushaltskarten für vier Klimaszenarien erstellt, basierend auf dem Projekt WHH-KW (Weis et al. 2023).
- Der VfS hat mit Unterstützung der LWF Farblayer und Signaturen für die weiterentwickelten Standortkarten in GIS-Anwendungen erstellt und eine entsprechende Legende erarbeitet.
- Die Standortinformationen wurden hinsichtlich Darstellung und Wasserhaushalt harmonisiert und modernisiert und können als digitale Karten in GIS-Systeme integriert werden. Der VfS war an diesem Prozess beteiligt.

2. Etablierung standardisierter Workflows

- Im Projektverlauf wurden strukturierte Abläufe von der Datenakquise über die Digitalisierung und Harmonisierung bis hin zur Weiterentwicklung der Standortinformationen etabliert.
- Die Prozesse umfassen auch die rechtliche Absicherung durch Zustimmungserklärungen der Rechteinhaber.
- Diese Workflows können für künftige Projekte und neue Dateneingänge direkt übernommen werden und erleichtern die Umsetzung erheblich.

-

3. Verbesserung der GIS-Anwendungen

- Im VfS-Viewer können die zusätzlichen Informationen in Form von Standortkarten mit Legenden, Standorttabellen und Anbaurisikoabschätzungen in absehbarer Zeit zur Verfügung gestellt werden.
- Die digitale Kartendarstellung ist intuitiv, differenziert und praxisnah aufgebaut.

4. Einheitliche Einwertung und Visualisierung

- Der im Projekt entwickelte Entwurf für das neue Kartendesign und die verschlüsselten Standortinformationen ermöglichen eine gebietsübergreifende, einheitliche Darstellung.
- Die Anlehnung an etablierte Darstellungsformen und die Einbindung von Feedback aus der Praxis erhöhen die Akzeptanz bei den Anwendern.
- Die neue Darstellung hat das Potenzial, künftig als Standard in Beratung und Ausbildung eingesetzt zu werden. Voraussetzung dafür ist die weitere Beteiligung von Anwendern aus der Praxis und weiterer Einbezug von Feedback.

5. Beteiligung an Vereinbarungen zur Datennutzung

- Der VfS war an der Erstellung von Nutzungsvereinbarungen beteiligt, insbesondere durch das Erstellen von Übersichtskarten der kartierten Flächen der Forstlichen Zusammenschlüsse und tabellarischer Flächenaufstellungen.

Nebenprodukte

Klärung und Sicherung bisher fehlender Standortinformationen

- Der Überblick zur Standortkartierung in Bayern wurde aktualisiert.
- Der Verbleib von ca. 250.000 ha ursprünglich nicht dokumentierter Fläche konnte größtenteils nachvollzogen werden.
- Weitere Bestände sind erfasst und werden in parallelen bzw. anschließenden Projekten bearbeitet.

Steigende Nachfrage und Sichtbarkeit des Themas

- Das Thema Standortkartierung wurde durch Vorträge, Veranstaltungen und direkte Gespräche mit forstlichen Zusammenschlüssen stärker in den Fokus gerückt.
- Die Nachfrage beim VfS nach Standortinformationen ist spürbar gestiegen: Im Zuge einer Umfrage im August 2024 meldeten sich 42 neue Interessenten für den VfS-Viewer.

Beitrag zur praxisnahen Darstellung

- Der VfS hat bei der Entwicklung einer benutzerfreundlichen Darstellungsform der Standortkarten mitgewirkt.
- Rückmeldungen aus Workshops (z. B. mit der WBV Cham-Roding) flossen direkt in die Optimierung der Kartenansicht und Informationsdichte ein.
- Die Möglichkeit zum Kartenausdruck bleibt im VfS-Viewer für Beratung und praktische Anwendungen erhalten.

Teilvorhaben 3: Standortbezogenes Nährstoffangebot und erweiterte Standortinformationen für Nordwestdeutschland

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel dieses Teilvorhabens war es, für forstliche Standorteinheiten die nicht nutzungsabhängigen Bilanzglieder der Nährstoffbilanz zu ermitteln. Dies umfasst den Nährstoffeintrag durch Deposition, die Nährstofffreisetzung durch Verwitterung der Bodenminerale und den Nährstoffverlust mit dem Sickerwasseraustrag. Bestehende Ansätze sollen hinsichtlich des aktuellen Forschungsstandes aktualisiert und bezüglich einer Anwendung auf Grundlage forstlicher Standortinformationen im Kleinprivatwald angepasst werden.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

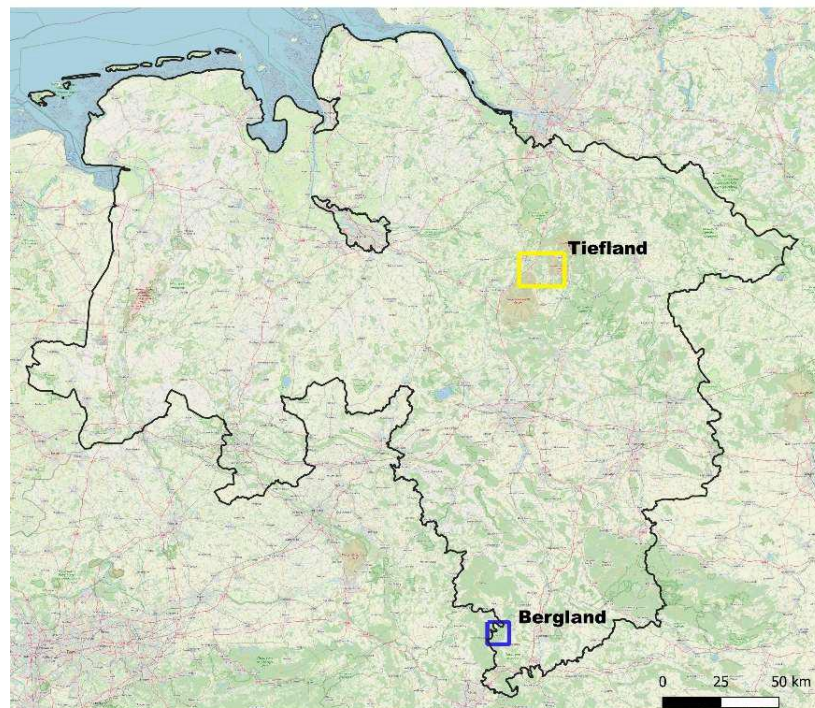


Abbildung 94: Übersichtskarte der ausgewählten Beispielgebiete in Niedersachsen.

Aktuelle Daten der Standortkartierung wurden für zwei Beispielgebiete in Niedersachsen zusammengestellt. Im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA befinden sich zwar auch die Bundesländer Hessen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt. Allerdings wird in Sachsen-Anhalt das ostdeutsche Kartierverfahren angewandt, welches bereits durch die LFEE für Brandenburg beschrieben wird. Im Trägerland Hessen wurden bereits Verfahren entwickelt, um Elemente der Standortkartierung flächenhaft bereitzustellen (Ahrends et al., 2023, Heitkamp et al., 2020). Schleswig-Holstein und Niedersachsen verwenden ein einheitliches Verfahren, daher gelten die erarbeiteten Verfahren für die beispielhaften Flächen im niedersächsischen Berg- und Tiefland ebenso für Schleswig-Holstein.

Der „finale“ Datensatz für die Beispielgebiete enthält alle aktuellen Standortkartierungsinformationen des Landes- und Privatwaldes und wurde durch das Niedersächsische Forstplanungsamt und die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt geprüft. Für nicht kartierte Flächen wurden die Standorttypen mit Methoden des Digital Soil-Mapping (DSM) geschätzt. Die Kombination von Kartierungen im Landes- und Privatwald und mit Hilfe von DSM geschätzten Standorteinheiten in einem Untersuchungsgebiet, ermöglicht eine sehr einfache graphische Überprüfung der Standortkartierungen. Die direkte Gegenüberstellung der verschiedenen Daten-

grundlagen zeigt, ob in den Grenzbereichen zwischen Feldkartierungen und DSM auffällige Sprünge hinsichtlich der Zielgrößen auftreten, oder ob die drei Kartierverfahren in einem landschaftlich und maßstäblich harmonischen Kontext nebeneinander existieren können, ohne dass gravierende Widersprüche zwischen den Methoden auftreten (vgl. Ahrends et al., 2023).

Das erste Beispielgebiet liegt südöstlich von Soltau im Heidekreis auf einer Höhe von 48-120m ü. N.N. (ZSGT, 2016). Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,9°C mit einem mittleren Jahresniederschlag von 767 mm (Fick and Hijmans, 2017). Die betrachtete Waldfläche ist 14.153 ha groß. Das Gebiet wird dominiert von Braunerden, Gleyen und Podsolen sowie einzelnen Moorflächen (LBEG, 2021), überwiegend aus Geschiebedecksand (LBEG, 1991). Das zweite Beispielgebiet liegt (nord)westlich von Löwenhagen im Kreis Göttingen auf einer Höhe von 107-409 m ü. N.N. (ZSGT, 2016). Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,2°C mit einem mittleren Jahresniederschlag von 835 mm (Fick and Hijmans, 2017). Die betrachtete Waldfläche ist 4.137 ha groß. Das Gebiet wird dominiert von Braunerden bis Parabraunerden (LBEG, 2021) und befindet sich im mittleren Buntsandstein (LBEG, 1991). Ausgewählt wurden die beiden Gebiete, um die Unterscheidung zwischen Bergland und Tiefland in der niedersächsischen Standortkartierung widerzuspiegeln. Für Bergland- und Tieflandstandorte werden in Niedersachsen zwei unterschiedliche Kartieranleitungen verwendet (NFP, 2023a, 2023b), die systematisch zusammen passen. Darin werden der Wasserhaushalt (Zahlen 1-29 BL, 31-44 TL) sowie das Substrat und die Lagerung differenziert betrachtet. Lediglich die Benennung der Nährstoffversorgung ist identisch. Die niedersächsische Standortkartierung ist detailliert, weit fortgeschritten und eine geeignete Grundlage für die Regionalisierung und Bilanzierung von Bodennährstoffen (Evers et al., 2013; Köhler et al., 2016; Petzold et al., 2016).

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

Eine direkte Zuordnung von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften, wie Korngrößenzusammensetzung, Trockenrohddichte, Skelettgehalt, Basensättigung, Nährelementvorräte im Boden etc. zu den niedersächsischen Standorttypen existiert nicht flächendeckend. Daher war es Ziel des Arbeitspakets eine Profilbeschreibung zu jeder Kennziffer der Standortkartierung in den beiden Untersuchungsgebieten zu generieren. Hierfür mussten bestehende Ansätze aus den Projekten WP-KS-KW (Benning et al., 2020; Hafner et al., 2017), WHH-KW (Fleck et al., 2023) und Klimaschutzplan Hessen (Heitkamp et al., 2020) für die Standorteinheiten der Untersuchungsgebiete angepasst und erweitert werden.

Bodenphysikalische Eigenschaften

Die niedersächsische Standortkartierung unterscheidet mit zwei verschiedenen Schätzrahmen zwischen Mittelgebirge, Berg- und Hügelland (NFP, 2023a) und dem pleistozänen (diluvialen) Tiefland (NFP, 2023b). Die beiden Schätzrahmen wurde in den Projektregionen „Soltau“ (TL) und „Löwenhagen“ (BL) flächendeckend für die Waldflächenpolygone der Standortkartierung angewandt. Zusätzlich liegen Bodenprofilaufnahmen von zahlreichen standortkundlich erfassten Waldstandorten in Niedersachsen vor, die den in den Projektregionen vorkommenden Standorttypen entsprechen.

In der niedersächsischen Standortkartierung werden Lageparameter wie Steilabsturz, Hangfuß oder Kuppe und ihre Beziehung zum Wasserhaushalt von Berg- bzw. Tieflandstandorten in der Wasserhaushaltszahl (WHZ, 1-29, bzw. 31-44) verschlüsselt. Das Bodensubstrat und die Bodenschichtung werden in der Substratzahl (1-7 bzw. 1-9) und der Lagerungszahl (bis zu 8 bzw. 9 Unterscheidungen) kategorisiert und die Nährstoffausstattung in der Nährstoffzahl (einheitlich 1-6) (vgl. Geländeökologischer Schätzrahmen, Abbildung 96). Diese Kategorien sind jeweils anhand von auffindbaren Merkmalen beschrieben und ergeben in ihrer Kombination den Grundtyp eines Standorts. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit weitere Besonderheiten und Differenzierungen als Variante des Grundtyps festzuhalten (weitere 69 Unterscheidungsmerkmale). Insgesamt ist die für das Bodenprofil bedeutende Information dadurch auf mehreren Variablen verteilt – eine Zuordnung von physikalischen Bodeneigenschaften wie Korngrößenzusammensetzung oder Trockenrohddichte zu den Standorttypen existierte für die Untersuchungsgebiete bisher nicht. Aus diesem Grund musste die Zuordnung anhand der vorliegenden Bodenprofilaten von zahlreichen standortkundlich erfassten Waldstandorten erst generiert werden. Hierfür wurden die Horizontabfolgen und Horizontmächtigkeiten aller zu einem Standorttyp

vorliegenden Profile verglichen und durch Mittelwertbildung der nach Experteneinschätzung relevanten Merkmale ein Leitprofil erstellt (Abbildung 95).

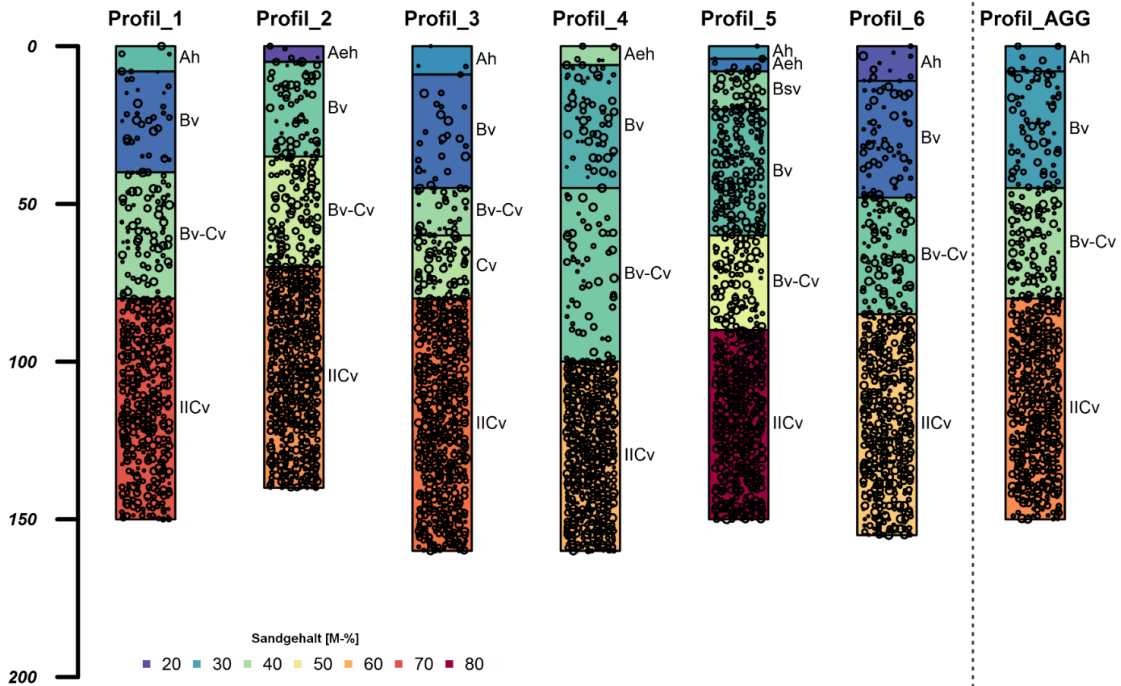


Abbildung 95: Expertenbasierte Aggregation der sechs zu einem niedersächsischen Standorttyp vorliegenden Bodenprofile zu einem Leitprofil (rechts), das eine typische Horizontabfolge, typische Horizontmächtigkeiten und gemittelte bodenphysikalische Eigenschaften aufweist (Ahrends et al., 2017).

<p>...3. Schwächer und besser verlehnte Sande, kiesige Sande, geschiebeführende Sande</p> <p>- Geschiebesande -</p>	<p>...4 mit stärkerer Sandlöß- oder Lößbeeinflussung über unverlehnten Sanden</p>	<p>zweischichtige Böden; 30 bis 70 cm mächtige, verlehnte, sandlöß-/ lößbeeinflusste Sande (schluffige Sande, meist Sandlöß-Geschiebesandfließerden) über unverlehnten Sanden</p>
	<p>...5 mit Sandlöß-/ Lößüberlagerung oder mit Sandlöß-/ Lößzwischenlagen</p>	<p>zwei- und mehrschichtige Böden; bis 30 cm mächtige Sandlöße / Lößlehme oder sandlößähnliche Feinsande über verlehnten Sanden, diese teilweise über unverlehnten Sanden, auch schichtenweise Sandlöß-/ Lößlehmzwischenlagen in verlehnten Böden</p>
	<p>...6 mit lehmiger oder schluffiger Sandunterlagerung oder -einlagerung</p>	<p>mehrschichtige Böden; stark anlehmige bis verlehnte Sande (meist Geschiebesande) über unverlehnten Sanden (meist Schmelzwassersande), diese mit erheblichen Ein- und Zwischenlagerungen von Knollen, Zonen und Bänken aus Geschiebelehmen (Geschiebelehmreste); im Übergang Tiefland → Bergland: über 70 cm mächtige pleistozäne, verlehnte Sande über basenarmen Silikatgesteinen</p>
	<p>...7 mit Lehmunterlagerung</p>	<p>zweischichtige Böden; über 50 cm mächtige, stark anlehmige bis verlehnte Sande (meist Geschiebesande) über mächtigen Geschiebelehmen im Unterboden in mindestens 70 cm Tiefe (oft erst nach Zwischenschaltung unverlehnter Sande)</p>

Abbildung 96: Auszug aus dem Geländeökologischen Schätzrahmen (NFP 2023b). Anwendungsbereich: Pleistozänes (Diluviales) Flachland. Dargestellt ist die verbale Charakterisierung von Profileigenschaften (Bodenart, Schichtung, Ausgangsgestein, etc.) anhand der Substratgruppen und Lagerungsverhältnisse, die bei der Profildableitung Berücksichtigung fand.

Fehlende Leitprofile wurden unter Berücksichtigung der verfügbaren Standortinformationen aus bestehenden Profilcharakterisierungen (vgl. auch Abbildung 96) abgeleitet. Dabei wurde mindestens nach den Grundtypen unterschieden und bei ausreichender Datengrundlage auch nach Varianten weiter differenziert. Berücksichtigt wurden auch die Varianten zur Moordifferenzierung und von freiem Carbonat im Unterboden (Ca-Variante). Weitere Informationen zu der Aggregationsmethode (Abbildung 95) sind bei Hafner et al. (2017) zu finden. Der Bodentyp wurde abschließend unter den Vorgaben zur Bodentypenableitung nach KA5 (AG Boden 2005) aus den Horizontbezeichnungen abgeleitet.

Im Projekt StWM-KPW wurden zur Abschätzung der Verwitterungsraten auch geologische Informationen benötigt. Hierzu sind die Angaben aus der Standortkartierung in der vorliegenden Form jedoch zu unpräzise. So

können sich z.B. unter der flächenhaft sehr bedeutenden Substratzahl 2.2 Gesteine wie Grauwacken, Ton-schiefer, Kieselschiefer, Granite, Buntsandsteine und sonstige Sandsteine sowie basenarme Fließerden ver-bergen. Um diese Angaben regional besser differenzieren zu können, wurden die Angaben aus der BK50 von Niedersachsen zum Bodenartlichen Profiltyp (z.B. It=^t = tiefer Lehmtou über Tonstein) und zum Geologischen Profiltyp (z.B. Los/gf=fl = flacher Sandlöss über tiefem glazifiviatilem Sand über Fließerde) bei den horizont-spezifischen Angaben zum Ausgangsgestein der Bodenbildung berücksichtigt.

Bodenbeprobung

Zur Vorauswahl der Probenahmestandorte wurden Bodenkarten, geologische Karten sowie Informationen zur Standortkartierung verschnitten und analysiert. Der Fokus lag dabei auf den Standorten, die entweder in dieser Form noch nicht in der BZE beprobt wurden und (nährstoffliche) Besonderheiten aufwiesen oder aber sich als flächenhaft bedeutsam erwiesen. Die endgültige Entscheidung zur Probenahme wurde direkt im Gelände ge-troffen. Hierbei wurde durch einen Bagger an zuvor festgelegten Punkten der Boden ausgehoben und im Beisein eines erfahrenen Standortkartierers bewertet und der Standorttyp angesprochen. Auf diese Weise konnten insgesamt 17 Baggerprofile umfassend beschrieben und beprobt werden. Zusätzlich zu den horizont-bezogenen Mineralbodenproben wurden für jeden Standort 3-4 Humusproben aus dem Wurzelbohrer nach dem BZE-Schema erfasst und zu einer Probe zusammengefasst.

Mit dieser Methodik konnte eine hohe Bandbreite an Standorten von verschiedensten Bestandestypen, Hu-musformen und Bodentypen abgedeckt werden (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 37: Übersicht der durch die Geländeaufnahme erfassten Humusformen, Bestandes- und Bodentypen.

	Aufgenommene Standorte
Bestände	Nadel-, Laub-, und Mischwälder, Windwurfllächen
Humusformen	F-Mull, Moder, Rhizomoder, moderartiger Rohhumus
Hauptbodentypen	Parabraunerden, Braunerden, Podsole, Gleye, Pseudogleye, Stagnogleye

Im Bergland erfolgte die Beprobung ausschließlich auf Privatwaldflächen, deren genaue Standorte aufgrund von Datenschutz hier nicht dargestellt werden dürfen. Die eingeschränkte Variabilität und Erreichbarkeit der Profile führte zu dem Entschluss, nur 7 Bergland-Profile aufzunehmen, die ca. 1m tief waren. Aufgenommene Standortziffern und -varianten waren dort: (1): 9.3.2.3 s; (2): 13.3+.3.4 f; (3): 14.3-.2.3 d; (4): 18.4+.3.2 s; (5): 22.4.3.2 d; (6): 24.3.2.3; (7): 24.3+.2.2 f,l.

Im Tiefland konnten wie geplant 10 Profile aufgenommen werden (s. Abbildung 97), die zum Großteil 2m tief waren.

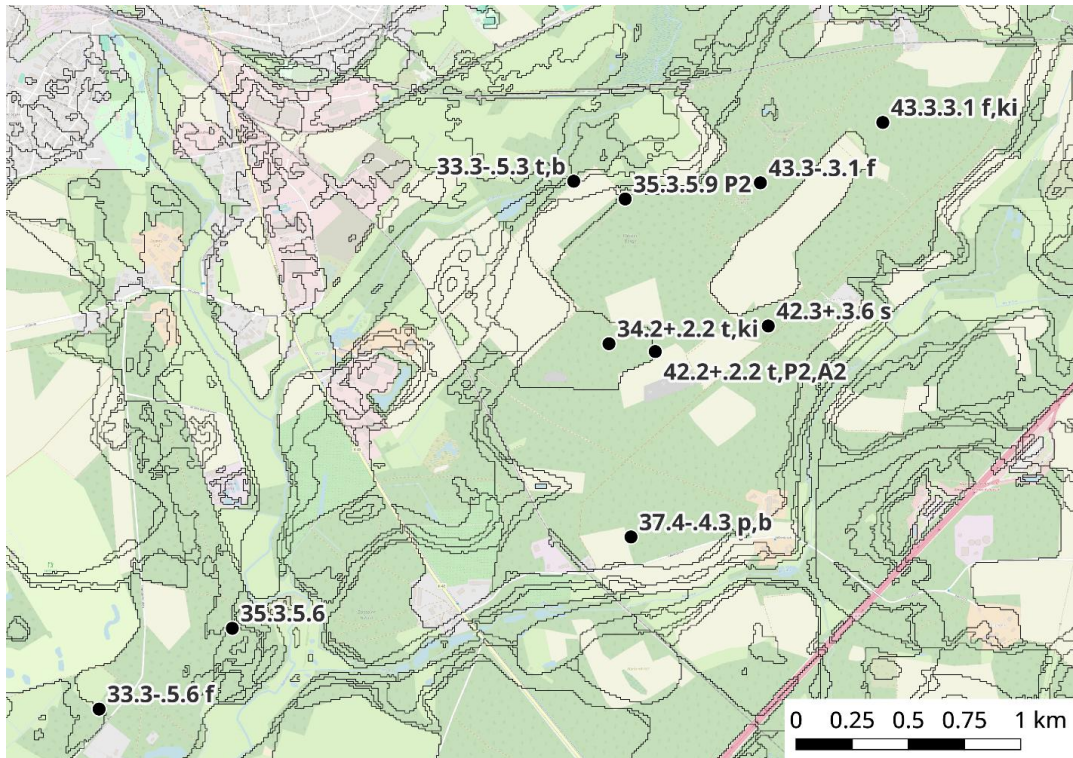


Abbildung 97: Beprobte Standorte südöstlich von Soltau (Testgebiet „Tiefland“) mit aufgenommenen Standortziffern und -varianten in vorgeschätzten STOK-Polygonen (Kenntnisstand des Gebiets zu dem Aufnahmezeitpunkt der Profile).

Evaluierung der bodenchemischen Standorteigenschaften

Abschließend konnten die Ergebnisse der Bodenbeprobungen mit den Modellergebnissen der regionalisierten Bodenchemie verglichen und als Evaluierung angewandt werden. Es ist jedoch hierbei immer zu beachten, dass es sich um Punktdaten handelt, die einer hohen kleinräumlichen Variabilität unterliegen. Alle Proben wurden im Umweltanalytik-Labor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) mittels Königswasseraufschluss (Humusproben) und Gesamtaufschluss (Mineralboden) untersucht. Zudem wurden C/N- und pH-Bestimmungen durchgeführt sowie Humusgehalte und die Basensättigung gemessen. Die Laborwerte ermöglichten eine Aufdeckung von Modellfehlern und eine Verifizierung der Modell-Genauigkeit. Gleichmaßen konnten 24 beprobte Profile der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK) aus den Jahren 2019-2013, die in den Beispielgebieten liegen, verwendet werden. Weitere 5 Profile der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) fallen ebenfalls in die Gebiete. Da diese in die Modellparametrisierung mit eingeflossen sind, werden sie hier nur zum Vergleich mit angeführt (vgl. Abbildung 98). Durch die aktuellen Kartieraktivitäten in den beiden Beispielregionen können insgesamt 37 Profilpunkte mit abgeleiteten Informationen aus einer Feldkartierung verglichen werden. Bei lediglich 9 Punkten konnte ausschließlich auf die Vorschätzung der Standortkartierung durch das „Digital Soil Mapping“ zurückgegriffen werden.

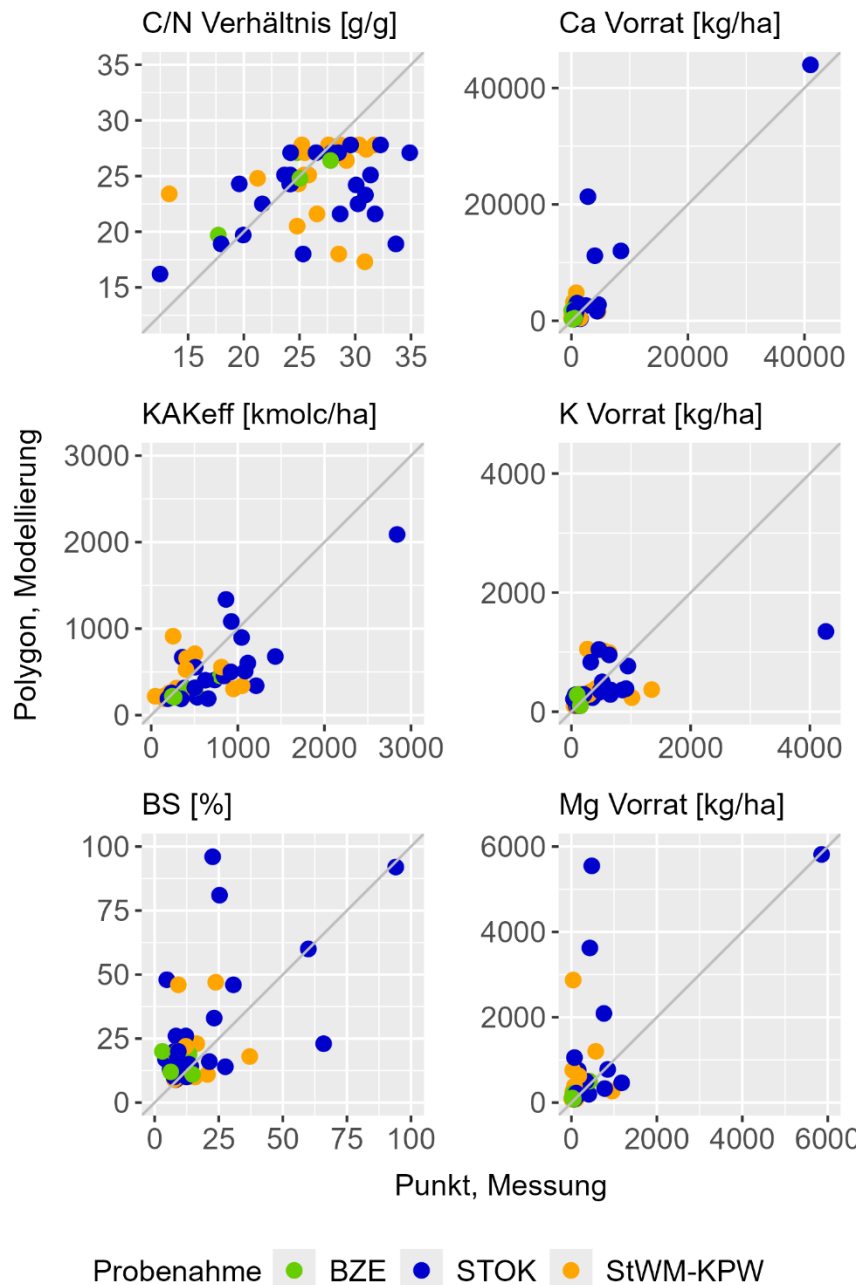


Abbildung 98: Scatterplots zum Vergleich von modellierten Polygondaten und Punktdaten aus bodenchemischen Probenahmen der BZE, Standortkartierung und zusätzlich erhobenen Bodenprofilen.

Abweichungen zwischen gemessenen Punktwerten und den durch die Schätzmodelle abgeleiteten Werten für die jeweiligen Polygone der Standortkartierung (s. Abbildung 98) können verschiedene Ursachen haben. Die unterschiedlichen Fehler können sich entlang einer Kaskade akkumulieren (Reyer, 2013; Schneider, 1983) und entsprechend können die Abweichungen von der 1:1 Linie mitunter sehr hoch werden, z.B. einzelne Punkte bei den Kaliumvorräten (vgl. Abbildung 98). Neben den Unsicherheiten durch die statistischen Schätzmodelle kommen weitere Unsicherheiten durch die in den Modellen verwendeten räumlichen Eingangsdaten hinzu. Neben Fehlern bei der Feldkartierung, die die lokale bodenchemische Situation nur mit großen Unsicherheiten abschätzen kann, bestehen weitere Unsicherheiten aus der Regionalisierung von weiteren Eingangsdaten und der Flächenabgrenzung bei der eigentlichen Kartierung. Daher können besonders in den Randbereichen der Polygone die bodenchemischen und –physikalischen Parameter deutlich vom angenommenen Flächenwert abweichen. Hinzu kommen kleinräumliche lokale Besonderheiten des Bodens, die bei der Kartierung generalisiert wurden.

Vor dem Hintergrund der vorab angesprochenen Unsicherheiten und dem methodischen Problem beim Vergleich von Punkt- und Flächendaten (Bishop et al., 2015) ist die Qualität der geschätzten bodenchemischen Variablen als durchaus positiv zu bewerten. Es zeigt sich aber auch, dass z.B. zur Ausweisung von kalkungsbedürftigen Flächen wahrscheinlich zusätzliche bodenchemische Analysen notwendig sind.

Für Abbildung 99 wurde hinsichtlich der Evaluierung nach Ableitungen aus der Feldkartierung und nach Ableitungen aus den digital ermittelten Standortdaten differenziert. Es zeigt sich, dass die Residuen bei der Feldkartierung i.d.R. näher an der Null-Linie liegen.

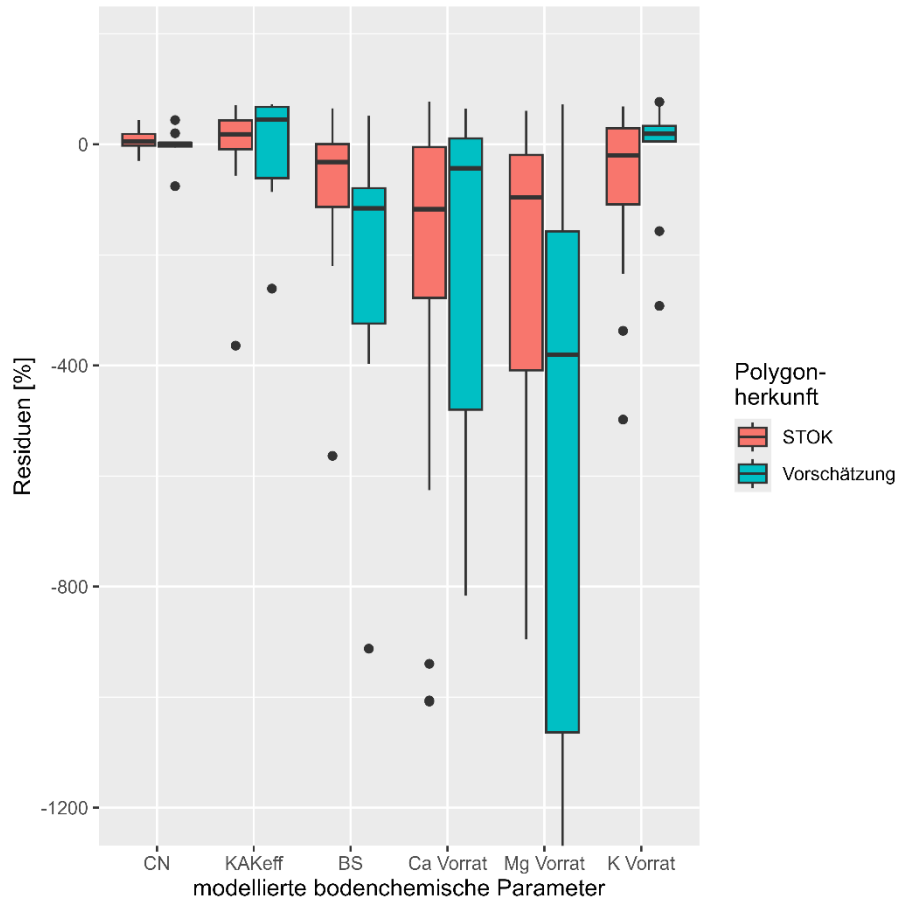


Abbildung 99: Boxplots der prozentuellen Residuen der regionalisierten Polygonwerte zu den gemessenen Profilwerten, unterschieden in STOK-Polygone und Vorschätzungs-Polygone.

Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen

Unsicherheitsbetrachtungen

Tabelle 38: Methoden der Unsicherheitsbestimmung für die nutzungsfreie Stoffbilanz. Die Berechnung erfolgte auf Parameterebene und schließt nicht die jeweiligen Unsicherheiten der einfließenden Variablen mit ein. Für die ermittelten Fehlerwerte des relativen mittleren Quadratwurzelfehlers (rRMSE) wird der Wertebereich über die Elemente Ca, Mg und K und die Baumarten Buche, Eiche, Kiefer, Douglasie und Fichte angegeben.

Parameter	rRMSE	Quelle des Fehlerwerts	Einfließende Variablen
Verwitterung (V)	35-64%	Modell (reg., GAM, angepasst an PROFILE (vgl. Ahrends et al., 2018a, Tab. 11.1; CLRTAP, 2017)	Temperatur, Wassergehalt, TRD, Verwitterungsoberfläche, Gesamtelementgehalte, [Tiefe, Schichtmächtigkeit]
Deposition (D)	39-78%	Vgl. Kap. 2.1.3.2	Nassdeposition + DDF Modell (Bestandesdaten, DGM, Windgeschwindigkeit, Seesalzkonzentration)
Vorrat (B)	51-155%	Für Niedersachsen: Modell angepasst nach Heitkamp et al. (2020)	Spezifische Oberfläche, Trophie, weitere Parameter je nach Element: Basensättigung, Podsoligkeit, Waldtyp, Bodenregion, -klasse, Ariditätsindex, Karbonat, Skelettanteil, Substratgruppe
Austrag (A):		Formel der Var[XY] für unabhängige Zufallsvariablen	Kationenanteil (Fraction) multipliziert mit Anionenaustrag
- Kationenanteil	27-31%	Modell (GAM) angelehnt an NIBIS Methodenleitfaden (Bug et al., 2020)	pH, Wuchsgebiet, weitere Parameter je nach Element: Ariditätsindex, Bodenart, -region, BS, Karbonatkohlenstoff, org. Kohlenstoff, Gesamtelementgehalt
- Anionenaustrag:		Formel der Var[X+Y]	N + SO ₄ -S + Cl
Stickstoff (N)	147%	Modell (GAMM) angepasst an (Borken und Matzner, 2004; Fleck et al., 2019; Waldner et al., 2019)	Gesamtdeposition, C:N, Jahresmittelniederschlag, pH, [Vorbestand, Erhebungsjahr]
Sulfatschwefel (SO ₄ -S)	90%	Modell (GAM), angelehnt an Critical Loads Manual (CLRTAP, 2017)	Sulfatdeposition, Ariditätsindex, TRD, Bodenart, pH
Chlorid (Cl)	36-46%	~ Chloriddeposition (s. Kap. 1.3.2)	s.o.

Ableitung von Depositionsszenarien

Auch wenn der Bearbeitungsschwerpunkt der Nährstoffbilanzierung auf den aktuellen Rahmenbedingungen lag, wurden auch Bilanzierungen für die jeweiligen Klimaszenarien und Referenzperioden (2041-2070; 2071-2100) durchgeführt. Bei den Wasserhaushaltssimulationen und der Abschätzung der Verwitterungsraten konnten die klimatischen Parameter der Klimaszenarien direkt als Inputgrößen verwendet werden. Bei den Depositionen wurden relative Entwicklungen der Gesamtdepositionen angewandt (Ahrends et al., 2022a). Diese wurden für Stickstoff und Sulfatschwefel für die RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 8.5 aus der Arbeit von Engardt et al. (2017) abgeleitet. Hierbei wurden die Ergebnisse aus dem EMEP- und dem MATCH-Modell gemittelt. Langzeitstudien zum Depositionsprozess (Dämmgen et al., 2013a, 2013b; Hedin et al., 1994; Meesenburg et al., 1995) zeigen, dass Ca²⁺ und Mg²⁺ zumindest teilweise dem Trend der SO₄-S-Deposition folgen. Daher wird davon ausgegangen, dass der nicht-marine Anteil der Deposition dieser Elemente zumindest teilweise mit menschlichen Aktivitäten in Verbindung gebracht werden kann und denselben Trend wie die SO₄-S-Kurve des Standorts aufweist (Johansson et al., 1996). Für K⁺ und Cl⁻ wurde auch der Einfluss emissionsmindernder Maßnahmen berücksichtigt (Dämmgen et al., 2013a), der aber nicht ganz so stark ausgeprägt ist wie bei

SO₄-S. Weitere Details zu den Annahmen und den Skalierungsfaktoren für die basischen Kationen finden sich in Höhle et al. (2016).

Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt

Die Abschätzung der Sickerwasserrate und der Bodenwassergehalte wurde mit dem TUB-BGR-Verfahren (Wessolek et al., 2009, 2008) durchgeführt. Der ursprünglich von Renger und Strebel (1980) entwickelte und von Renger und Wessolek (1990) modifizierte regressionsanalytische Ansatz ist bundesweit einsetzbar (s. Hydrologischer Atlas von Deutschland, BMU, 2003). Das TUB-BGR-Verfahren benötigt Daten der Niederschlagshöhe und der Gras-Referenzverdunstung. Ferner werden Informationen zur nutzbaren Feldkapazität (nFK), zur effektiven Durchwurzelungstiefe, zur Landnutzung und zu Geländeeigenschaften verwendet. Die praktische Umsetzung erfolgt in Anlehnung an die Methodenbeschreibung des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®) (Bug et al., 2020). Folgende Modifikationen wurden durchgeführt: (1) Bei der Berechnung der potenziellen Verdunstung wurde die Hangneigung und Exposition berücksichtigt (vgl. Wessolek et al., 2009), (2) in der publizierten Form unterscheidet das TUB-BGR-Verfahren zwischen Laub-, Nadel- und Mischwald. Die Unterscheidung erfolgt im Modell durch eine baumartenspezifische Korrektur der potenziellen Evapotranspiration. Diese Korrektur erfolgt über einfache konstante Korrekturfaktoren, die unter den folgenden Annahmen abgeleitet wurden.

In der Arbeit von Schmidt-Walter et al (2019) stimmen die mit LWF-Brook90 berechneten mittleren Sickerwasserraten (1981-2010) sehr gut mit den mit dem TUB-BGR-Verfahren berechneten Werten für Laubwälder überein. Entsprechend wurde zwischen Buche und Eiche keine weitere Differenzierung mehr vorgenommen. Auch wenn Eichen tendenziell etwas höhere Transpirationsraten aufweisen können (vgl. Fleck et al., 2023), können die Interzeptionsraten bei der Eiche etwas niedriger ausfallen (Ahrends et al., 2013). Bei der Fichte zeigte sich bei dem Modellvergleich jedoch eine etwas stärkere Abweichung von den mit dem Nadelwald-Parametersatz in TUB-BGR berechneten mittleren Sickerwasserraten. Die Steigung der Regressionsgeraden lag deutlich unter eins, was auf eine geringere Sickerwasserrate bei Verwendung von LWF-Brook90 hinweist. Schmidt-Walter et al. (2019) begründen die Abweichungen mit der Nadelwald-Parametrisierung in TUB-BGR, die nicht zwischen Kiefern und Fichtenwäldern unterscheidet. Kiefernwälder erreichen im Vergleich zu Fichtenwäldern geringere Interzeptionsraten (Meeseburg et al., 2014). Des Weiteren sind geringere Transpirationsverluste anzunehmen (Fleck et al., 2023). Entsprechend wurde der Korrekturfaktor (1 für Nadelwald) für die Fichte (1,02) etwas erhöht und für die Kiefer (0,98) etwas niedriger angesetzt. Für die Douglasie lassen sich im Vergleich zur Fichte etwas geringere Transpirationsverluste vermuten (Fleck et al., 2023). Entsprechend wurde ein Korrekturfaktor von 1,01 verwendet.

Für die Abschätzung des Wassergehaltes kann für Waldböden ein Standardwert von 0,2 m³ m⁻³ verwendet werden (Malessa and Ahrends, 2001; Sverdrup et al., 1990). Für eine stärkere Berücksichtigung von bodenartenspezifischen Unterschieden wird in der Modell-Dokumentation von PROFILE 4.2 (Deutsche Version) die Verwendung der nutzbaren Feldkapazität empfohlen (Becker, 1999). Die Verwendung der nutzbaren Feldkapazität als Proxy für den Bodenwassergehalt kann insbesondere in niederschlagsärmeren Regionen und Substraten mit geringen Speicherkapazitäten zu einer erheblichen Überschätzung der Verwitterungsraten führen. Eine solche Fehleinschätzung der Wassergehalte hätte erhebliche Auswirkungen, da der Wassergehalt ein bestimmender Modellparameter ist (Dultz, 2001; Hodson et al., 1996; Jönsson et al., 1995). Entsprechend wurde eine Korrekturfunktion entwickelt, um die aus der nutzbaren Feldkapazität (nFK) abgeleiteten Wassergehalte in trockenen Jahren besser abzubilden. Der Berechnungsansatz geht zunächst davon aus, dass oberhalb einer jährlichen „unkritischen“ Wasserversorgung die Wassergehalte aus der nFK abgeschätzt werden können. Als „unkritisch“ wurde definiert, wenn die Wasserversorgung eines Standortes ohne Berücksichtigung der nFK (WV_{nFK}) ausreicht, um den Wasserbedarf der aktuellen Evapotranspiration (AET) abzudecken. Die Entsprechende Wasserversorgung ergibt sich aus dem Sommerniederschlag (NS) und dem kapillaren Aufstieg (kA).

$$WV_{nFK} = NS + kA$$

Entsprechend wird die Korrekturfunktion angewendet, wenn:

$$AET - WV_{nFK} > 0$$

d.h., der Wasserbedarf der AET nicht ausschließlich aus den Sommerniederschlägen und dem kapillaren Aufstieg gedeckt werden kann.

Da das entsprechende Wasserdefizit ($WD = AET - WV_{nFK}$) der maximalen Entleerung der nFK am Ende der Vegetationsperiode entspricht, wird WD durch 12 geteilt, um eine Annäherung an den mittleren Wassergehalt im Jahr zu erhalten. Diese vereinfachte Abschätzung ist notwendig, da im Regelfall in den Wintermonaten von einer vollständigen Sättigung des Bodens auszugehen ist. Entsprechend wird in den jeweiligen Jahren, die nFK zur Abschätzung des Bodenwassergehaltes (WGB) wie folgt korrigiert:

$$WG_B = \frac{\left(nFK_{BT} - \frac{(AET - WV_{nFK})}{12} \right)}{\frac{BT}{100}} \cdot 0,001$$

wobei BT die Bezugstiefe der Berechnungen mit dem TUB-BGR-Verfahren ist.

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Für die Beispielgebiete in Niedersachsen, Baden-Württemberg, Bayern und für das Bundesland Brandenburg wurden Karten für alle Stoffbilanz-Glieder erstellt und zur visuellen Evaluierung und Darstellung genutzt. Dies erfolgte in QGIS (QGIS.org, 2025) sowie in RStudio (Posit team, 2025; R Core Team, 2025), insbesondere mithilfe der Pakete ‚sf‘ (Pebesma, 2018), ‚raster‘ (Hijmans, 2025), ‚ggplot2‘ (Wickham, 2016) und ‚ggnewscale‘ (Campitelli, 2025) sowie den Grundkarten von OpenStreetMap.

Im Folgenden werden Beispielkarten gezeigt, die die örtlichen und parameterspezifischen Unterschiede besonders verdeutlichen. Diese Karten können auch verwendet werden, um den Forstpraktiker/-innen die Funktionsweise der Nährstoffbilanzierung zu erläutern und somit das Vertrauen in die erzielten Ergebnisse zu erhöhen.

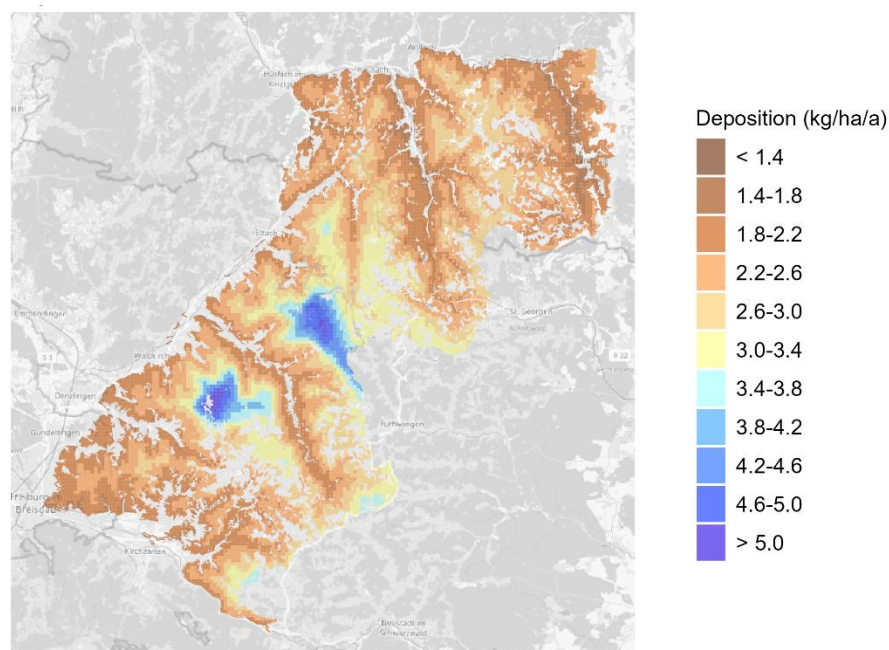


Abbildung 100: Kaliumdeposition für Fichten im mittl. Schwarzwald, Baden-Württemberg, im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.

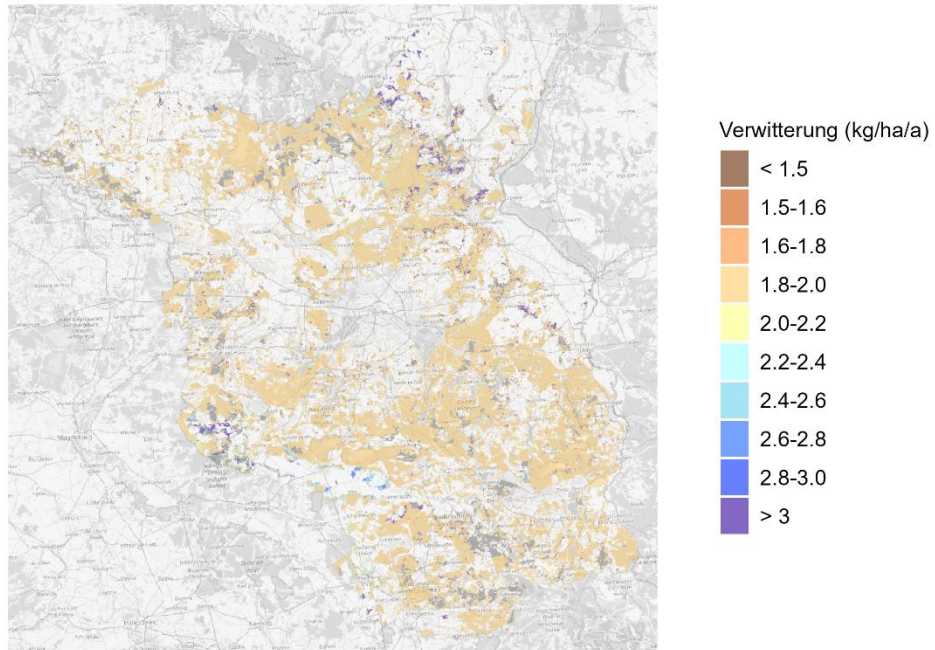


Abbildung 101: Kaliumverwitterung für Kiefern in Brandenburg im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.

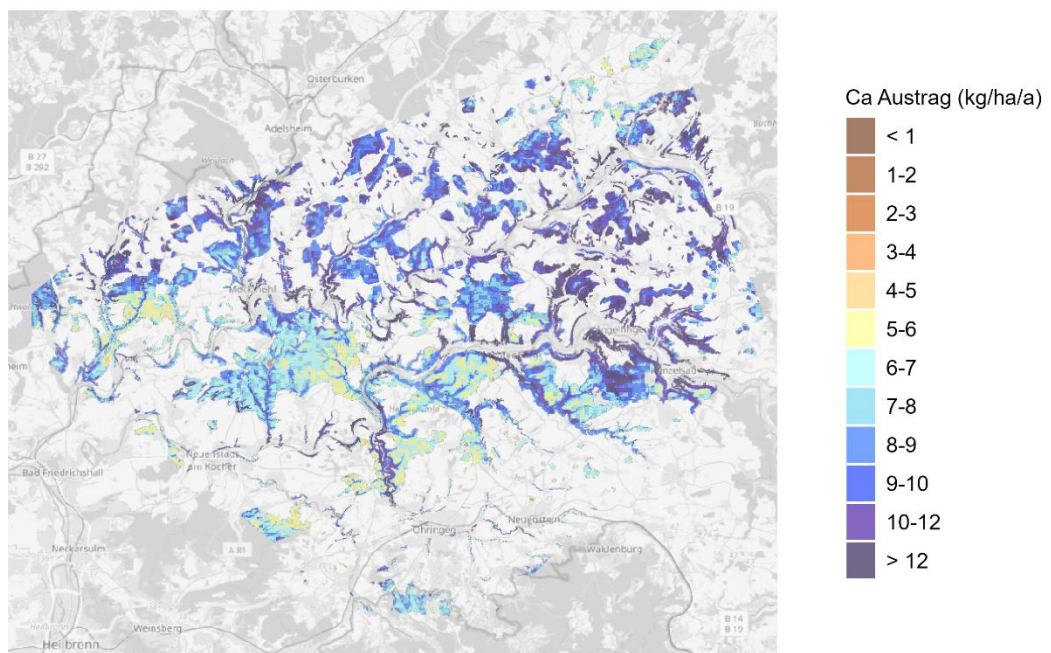


Abbildung 102: Calciumaustrag mit dem Sickerwasser für Fichten in der Kocher-Jagst-Landschaft, Baden-Württemberg, im Szenario ‚Real‘ 1991-2020.

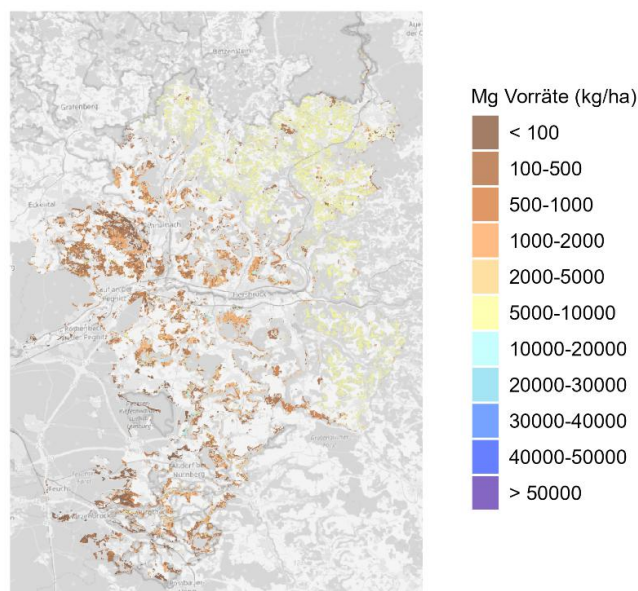


Abbildung 103: Magnesiumvorräte im Nürnberger Land, Bayern.

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl existieren bereits für Hessen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt (Bsp.: <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem/hessen>). Für Niedersachsen laufen aktuell die Vorbereitungen für den Umzug von einem analogen auf ein entsprechendes digitales Beratungsinstrument.

Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Ausgewählte methodische Ergebnisse wurden publiziert (Braun et al., 2022; Schmitz et al., 2023), oder liegen aktuell als Manuskript vor (Schmitz et al., 2025). Der neu entwickelte Ansatz zur Ableitung von bodenchemischen Kennwerten für die Einheiten der niedersächsischen Standortkartierung wurde auf einer Fachtagung präsentiert (Weiken et al., 2024). Desweiteren sind mehrere Veröffentlichungen in der AFSV-Schriftenreihe "Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz" geplant. Durch diese Zeitschrift kann vermutlich am besten, sowohl die wissenschaftliche Qualitätssicherung über die Evaluation im Peer-Review-Verfahren als auch der Praxistransfer der Ergebnisse erfolgen.

Veröffentlichungen

Braun, S., **Ahrends, B.**, Alonso, R., Augustin, S., García-Gómez, H., Hůnová, I., Karlsson, P.E., Karlsson, G.P., Schmitz, A., Thimonier, A. (2022) Nitrogen deposition in forests: Statistical modeling of total deposition from throughfall loads. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1062223>.

Schmitz, A., **Ahrends, B.**, Herrmann, H., Moravek, A., Poulain, L., Sanders, T., Wiedensohler, A., and Bolte, A.: Underestimation of potassium in forest dry deposition? – A simulation experiment in rural Germany, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-3358, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3358>, 2023.

Weiken, S., Ahrends, B., Schirrmeister, F und F. Heitkamp (2024): Regionalisierung bodenchemischer Indikatoren für niedersächsische Waldböden. Tagung „Wasser- und Stoffhaushalt von Wäldern unter Stress“ am 24. – 26. April 2024, Göttingen.

Geplante Veröffentlichungen

Schmitz, A., Ahrends, B., Bolte, A., Hartmut Herrmann, H. Moravek, A., Laurent Poulain, L. Alfred Wiedensohler, A., Sanders, T (2025): Similar substance ratios in wet and dry deposition? Revisiting atmospheric base cation inputs to forests.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Für die Privatwaldflächen in den nordwestdeutschen Beispielregionen konnten weiterentwickelte Standortinformationen bereitgestellt werden. Diese umfassen viele Angaben, die über das Spektrum einer klassischen Standortkartierung hinausgehen, u.a. Elementvorräte, C/N-Verhältnisse, Basensättigung, effektive Kationenaustauschkapazität, Sickerwasserraten, Bodenfeuchte. Viele im Privatwald bisher nicht kartierte Flächen wurden zunächst mit Methoden des Digital-Soil-Mapping (DSM) hinsichtlich des Standorttyps geschätzt und mit im Projektverlauf durchgeführten Kartierungen abgeglichen. Hierbei zeigt sich, dass DSM-Ansätze ein sehr wertvolles Instrument sein können, um die Feldkartierung zu unterstützen und insbesondere den Kartierungsfortschritt im Privatwald zu beschleunigen. Über die kartierten und/oder geschätzten Standorttypen konnten bodenphysikalische (Bodenart, Skelettgehalt, Trockenrohddichte, nFK usw.) und -chemische Eigenschaft (C/N-Verhältnisse, Elementvorräte, Basensättigungen usw.) abgeleitet werden. Zur Ableitung der bodenchemischen Kenngrößen wurden die für Hessen entwickelten Modelle von Heitkamp et al. (2020) so modifiziert, dass sie auch für das niedersächsische Berg- und Tiefland angewendet werden können. Die abgeleiteten Kenngrößen der Waldböden wurden mit Hilfe von umfangreichen Gelände- und Laborarbeiten evaluiert.

Ausgehend von den Vorarbeiten aus dem EnNa-Projekt (Ahrends et al., 2022b) wurden die bestehenden Methoden der Nährstoffbilanzierung so angepasst, ergänzt und erweitert, dass Bilanzierungen nicht nur für Umweltmessnetze (BWI, BZE, Level II; Ahrends et al., 2017) abgeleitet werden können, sondern auch in den flächenhaft vorliegenden Daten der bundeslandspezifischen Standortkartierungssysteme implementiert werden können. Die Anwendung der entsprechenden Methoden erfolgte in den Beispielregionen für die Deposition, die Verwitterung und die Sickerwasserausträge. Aus den Bilanzgliedern wurden zunächst die nutzungs-freien Stoffbilanzen ermittelt. Anhand dieser Grundlagen wurden für die Beispielregionen verschiedene Baumarten- und Nutzungsszenarien hinsichtlich ihrer Nährstoffnachhaltigkeit evaluiert.

In enger Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK) wurde die Einspeisung der Nährstoffbilanz-Ergebnisse in die ‚Waldbesitzer-App‘ diskutiert. Es bietet sich jedoch an, das von der NW-FVA etablierte Tool ‚Beratungsinstrument für eine klimaangepasste Baumartenwahl‘ (BaEm) zu erweitern, da somit eine einheitliche Informationsgrundlage für die Bundesländer Hessen, Schleswig-Holstein, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen geschaffen werden kann.

Teilvorhaben 4: Standortgerechtes Waldmanagement in Baden-Württemberg, Schwerpunkt Nutzungsentzüge

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im vorliegenden Teilvorhaben des Verbundvorhabens wurden die Arbeitspakete 2, 3, 5, 7, 8, und 9 für Baden-Württemberg bearbeitet. Zudem lag ein Schwerpunkt des Teilvorhabens auf der Entwicklung einer Methodik für die Berechnung der Nutzungsentzüge (AP 5), welche anschließend auf alle anderen beteiligten Bundesländer übertragen wurde. Zusätzlich hat sich die FVA-BW im Arbeitspaket 10 beim Wissenstransfer und der Veröffentlichung der Projektergebnisse beteiligt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

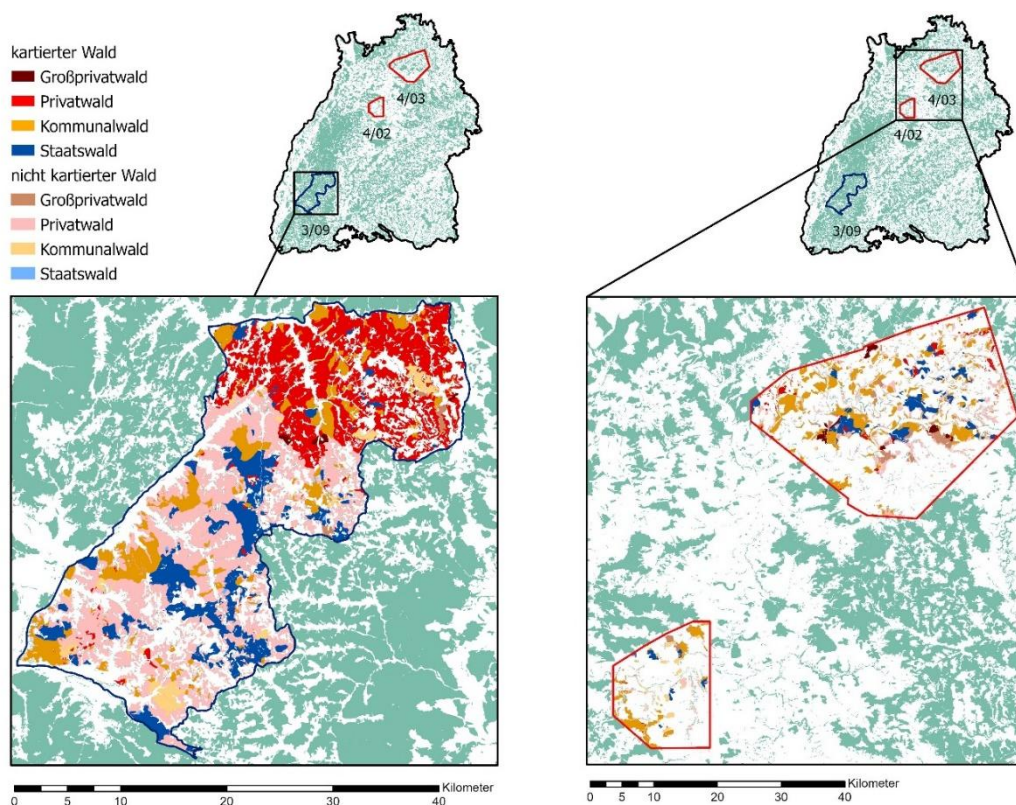


Abbildung 104: Waldbesitzarten im kartierten und nicht kartierten Bereich der Beispielgebiete von BW.

In AP 2 wurden durch die FVA-BW Beispielgebiete für Baden-Württemberg festgelegt. Es sollten vorrangig Gebiete mit aktuell abgeschlossener oder laufender Standortkartierung verwendet werden. Damit sollte sichergestellt werden, dass aktuelle Kartierverfahren im Hinblick auf die Projekterfordernisse geprüft und Anforderungen aus dem Projekt heraus direkt bei der laufenden Standortkartierung berücksichtigt werden können. Zwei der drei Beispielgebiete liegen in den Wuchsbezirken 4/02 (Weinbaugebiet von Stuttgart, Maulbronn u. Heilbronn) und 4/03 (Kocher-Jagst-Landschaft und Südrand des Baulands). Ausschlaggebend für die Auswahl war, dass in diesen Regionen aktuelle Kartierungen vorliegen, sie einen hohen Anteil an Kleinprivatwald aufweisen und aufgrund der vielfältigen Ausgangssubstrate (Muschelkalk, Lettenkeuper, Feinlehmdecken) eine hohe standörtliche Vielfalt bieten. Dies zeigt sich auch in der Basenausstattung der Böden in Wuchsgebiet 4/02 und 4/03, die zwischen den Typen 1 (basenreiche Gesamtböden) und 4 (basenhaltiger Untergrund) des Basensättigungstiefenverlaufs variiert. Die schlechteren Bewertungen treten vor allem im Beispielgebiet 4/03 auf. Die Summe der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (S-Wert) weist in den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 eine große Streuung auf. Es sind sowohl nährstoffarme (S-Wert < 25 mol m⁻²)

als auch nährstoffreiche Böden ($S\text{-Wert} \geq 50 \text{ mol m}^{-2}$) vorhanden (Umweltatlas Berlin 2020). Der Mittelwert des S-Werts liegt bei 34 mol m^{-2} und befindet sich damit im mittleren Bereich. Zusätzlich wurde der Wuchsbezirk 3/09 (Mittlerer Schwarzwald zwischen Kinzig und Dreisam) als Beispielgebiet einbezogen. Auch hier ist der Anteil an Kleinprivatwald hoch. Der Schwarzwald ist durch eine geringe Nährstoffausstattung auf Granit, Gneis und Sandstein geprägt. Die Böden sind überwiegend sauer (pH meist unter 4) und tief basenarm (Basensättigungstiefenverlauf Typ 5). Der S-Wert liegt nur vereinzelt über 10 mol m^{-2} und zeigt damit fast flächendeckend nährstoffarme Böden an (Umweltatlas Berlin, 2020). Daher ist eine Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit in diesem Gebiet besonders relevant.

In Abbildung 104 ist der Anteil der kartierten Fläche für die unterschiedlichen Waldbesitzarten in den Beispielgebieten dargestellt. Im Beispielgebiet 4/02 und 4/03 sind insgesamt nur 21% des Privatwaldes kartiert. Der Flächenanteil des Privatwaldes beträgt dort ca. 40% der Waldfläche (ca. 10.000 ha). Der Staats- und Kommunalwald ist zum Großteil kartiert (99% und 88%). Im Beispielgebiet 3/09 ist der Anteil des kartierten Privatwaldes mit 42% vergleichsweise hoch, was auch darauf zurückzuführen ist, dass der Privatwald dort insgesamt rund 70% der gesamten Waldfläche ausmacht (ca. 35.000 ha). Besonders im nördlichen Teil des Gebiets wurde ein großer Teil des Privatwaldes kartiert, während im Süden die Datenlage weniger umfassend ist. Der Staats- und Kommunalwald hingegen ist nahezu vollständig erfasst, mit einem Kartierungsgrad von 99% bzw. 98%. Die nicht kartierten Flächen stellen also zum allergrößten Teil Privatwald dar.

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

Verwendete Datenquellen in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurde die Bodendatenbank mit einer Kombination aus regressionsbasierten regionalisierten Bodendaten, Daten aus der Standortkarte der Standortkartierung (STOKA) und Daten aus der Bodenkarte der geologischen Landesaufnahme (BK50) gefüllt. Die regionalisierten Bodendaten beruhen auf einem großen Datensatz von Punktmessungen (BZE-, und BWI-Messungen) und wurden von einem externen Dienstleister über multiple Regressionsmodelle flächig im Rasterformat von $25 \times 25 \text{ m}^2$ zur Verfügung gestellt (Zirlewagen 2021). Die Bodendaten der Regionalisierungen spiegeln die Bodenverhältnisse im Zeitraum von 2000 bis 2020 wider, da die meisten für die Modellierung stammenden Bodendaten während dieser Zeit aufgenommen wurden (Hartmann et al. 2024). Aufgrund eines hohen Anteils an nicht kartierten Flächen im Privatwald wurden für alle verfügbaren Parameter die regionalisierten Bodendaten verwendet, weitere Parameter ließen sich zum Teil anhand der regionalisierten Bodendaten ableiten. Um das Datenvolumen zu reduzieren und robustere Werte zu gewährleisten, wurden die regionalisierten Bodendaten auf eine Auflösung von $50 \times 50 \text{ m}^2$ aggregiert. Für Parameter, die nicht über die regionalisierten Bodendaten abgedeckt sind, wurden Informationen aus der STOKA und der BK50 verwendet. Zur Zusammenführung der unterschiedlichen Datenquellen in der SQLite-Datenbank wurden spezielle Programmerroutinen entwickelt, die eine nachvollziehbare und reproduzierbare Umformatierung sicherstellen.

In Tabelle 39 sind die in der Bodendatenbank zusammengeführten Parameter und deren Datenquellen gelistet. Die Wahl der Datenquellen wurde primär anhand der Verfügbarkeit und gutachterlichen Einschätzung getroffen. Für einige Parameter wurde eine Validierung und Unsicherheitsabschätzung anhand einer Datenbank aus über 200.000 Bohrstockdaten durchgeführt. Die Aufnahme und Analyse zusätzlicher Bodenprofile wurde vor dem Hintergrund der großen Heterogenität der Bodeneigenschaften und dem großen Anteil an nicht kartierter Fläche im Kleinprivatwald (KPW) als nicht praktikabel für einen großflächig repräsentativen Informationsgewinn eingeschätzt. Die Priorität wurde stattdessen auf die Analyse der vorhandenen umfangreichen Bohrstockdatenbank gelegt.

Tabelle 39: Verwendete Datenquellen der Parameter aus der Bodendatenbank für die Beispielgebiete in Baden-Württemberg.

Regionalisierte Bodendaten	Hergeleitet über regionalisierte Bodendaten	BK50	STOKA	LWF-Brook90 Modellierung
<ul style="list-style-type: none"> - Basensättigung - Basenverlaufstyp - C/N-Verhältnis - effektive Kationen-austauschkapazität (KAK_{eff}) - organischer Kohlenstoffgehalt - pH_{KCL}-Wert - Skelettgehalt - Stickstoffgehalt - Textur - Trockenrohddichte 	<ul style="list-style-type: none"> - Kationengehalte (Ca, Mg, K, Na) - Nährkraft (wo keine STOKA) - Nährstoffklasse nach Kolb - nutzbare Feldkapazität 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausgangsgestein - Bodentyp - Carbonatgehalt (wo keine STOKA) - Grund- und Stauwassereinfluss (wo keine STOKA) - Humusform - Standorteinheit - Stratigraphie - Substrat 	<ul style="list-style-type: none"> - Carbonatgehalt - Grund- und Stauwassereinfluss - Nährkraft 	<ul style="list-style-type: none"> - Bestandesniederschlag - mittlerer Wassergehalt - Sickerwasser - Terrestrische Wasserhaushaltsstufen

Die STOKA wurde nur für wenige Parameter herangezogen, da sie im Kleinprivatwald zu großen Teilen nicht vorliegt und die Verwendung regionalisierter Bodendaten auf der gesamten Fläche ein einheitliches Vorgehen darstellt. Für die Bewertung der Stau- und Grundwasserbeeinflussung wurde die Standortkartierung (wo vorliegend) verwendet, da diese Information in anderen Datenquellen nicht so kleinräumig vorliegt. Für Flächen, an denen keine Standortkartierung vorliegt, wurde die Stau- und Grundwasserbeeinflussung anhand der BK50 bewertet. Zur Einstufung des Grundwassereinflusses wurde zusätzlich eine von der Hydrologie der Universität Freiburg bereitgestellte Grundwasserflurabstandskarte herangezogen. In Fällen, in denen diese Karte einen höheren Grundwasserstand auswies als die aus der STOKA oder BK50 abgeleiteten Werte, wurde der Wert der Grundwasserflurabstandskarte übernommen. Die Nutzung der verschiedenen Datenquellen sowie die Methodik zur Ableitung von Parametern aus den vorhandenen Bodendaten wurden intern bei der FVA detailliert dokumentiert, um eine vollständige Nachvollziehbarkeit sicherzustellen.

Herleitung von zusätzlichen Parametern

Einige der Parameter, die für weitere APs benötigt wurden, waren in Baden-Württemberg nicht verfügbar, teils ließen sich diese Parameter (Nährstoffklasse, Nährkraft, Kationengehalte) anhand vorhandener Parameter über statistische Modelle (random Forest, multiple lineare Regression), empirische Modelle oder gutachterliche Einteilung herleiten.

Für die Nährstoffklasse nach Kolb et al. (2019) und die Nährkraft nach Wolff et al. (1998) wurde eine Klassifizierung anhand von regionalisierten Bodendaten entwickelt. Die Nährstoffklasse nach Kolb et al. (2019) ist zwar europaweit verfügbar, allerdings nur in sehr grober Auflösung. Da die kleinräumige Variabilität für die Bewertung am Standort allerdings entscheidend sein kann, wurde eine Klassifizierung anhand bodenchemischer Parameter (pH -Wert, Basenverlaufstyp, S-Wert) entwickelt. Die Einteilung nach Kolb wurde verwendet, um die Klassengrenzen für die Einteilung nach Bodendaten so zu setzen, dass sich eine vergleichbare, aber feiner aufgelöste Einteilung ergibt. Dazu wurden die Wertebereiche der Bodenparameter innerhalb der Nährstoffklassen der ursprünglichen Klassifizierung verglichen, um geeignete Grenzen für die Einteilung zu identifizieren. Die Einteilung wurde über einen Entscheidungsbaum mittels geschachtelter *if-else*-Abfragen durchgeführt (Abbildung 105).

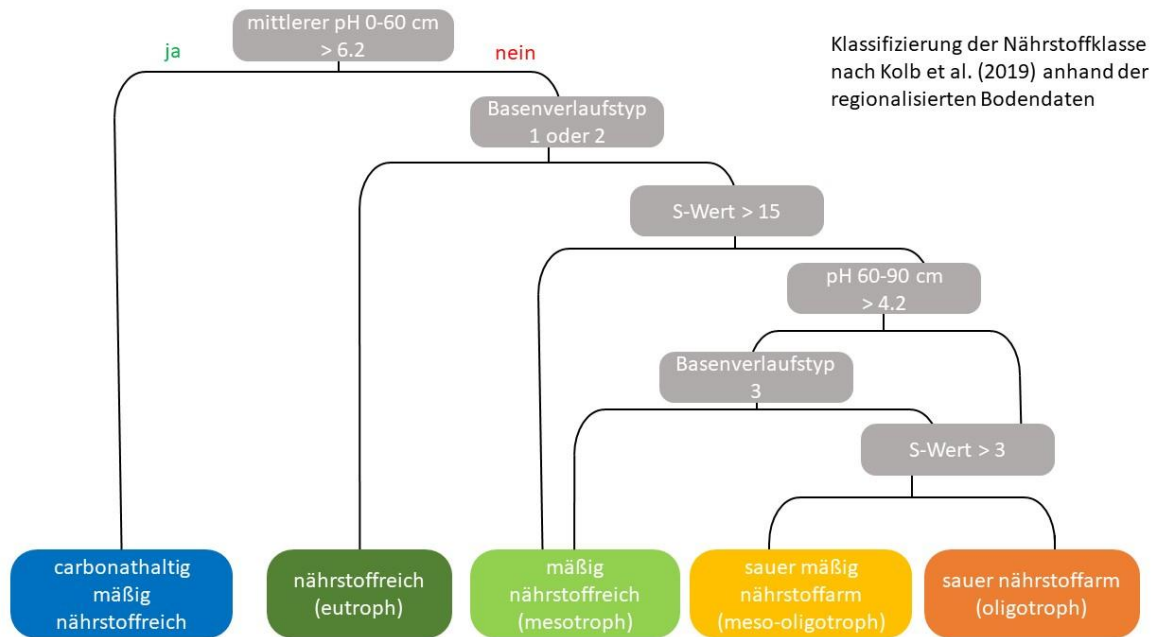


Abbildung 105: Entscheidungsbaum zur Abschätzung der Nährstoffklasse nach Kolb et al. (2019) anhand von bodenchemischen Parametern.

Die Nährkraft nach Wolff et al. (1998) wurde basierend auf der STOKA klassifiziert und, wo diese nicht vorlag, anhand bodenchemischer Parameter bestimmt. In Gebieten mit STOKA Daten wurden mittels der kartierten Artzusammensetzung der Krautschicht die Ellenbergzeigerwerte berechnet. Die abgeleiteten Ellenbergzeigerwerte wurden anschließend in Nährkraftklassen eingeteilt. Anschließend wurden – in Anlehnung an die Klassifizierung der Nährstoffklasse nach Kolb - für Flächen mit STOKA-Daten geeignete Klassengrenzen ermittelt. Diese ermöglichen eine Abschätzung der Nährkraft auch für nicht kartierte Bereiche.

Zur Herleitung der Kationengehalte (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) wurden statistische Modelle an Daten der Bodenzustandserhebung (BZE) gefittet, um die Kationengehalte in Abhängigkeit von bereits regionalisierten Parametern abschätzen zu können. Folgende Parameter haben sich als geeignete Prädiktoren erwiesen:

numerische Parameter: Basensättigung, effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}), pH-Wert, Tongehalt

kategorielle Parameter: Regionalisierungsregionen (Straten), bei Magnesium auch Kalkung (ja/nein)

Bei der Modellselektion wurden multiple lineare Regressionen (GLM) und random Forest Modelle verglichen. Die Robustheit der Modelle wurde mittels Kreuzvalidierung für den BZE-Datensatz verglichen, außerdem wurde bei den modellierten Rastern die Modellunsicherheit abgeschätzt, indem die Abweichung der Summe der Kationenanteile ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$) von 100% der basengesättigten KAK_{eff} bestimmt wurde.

Die random Forest Modelle haben bei der Modellselektion etwas bessere Ergebnisse erzielt und wurden daher für das weitere Vorgehen verwendet. Als Zielvariable wurden die Anteile der Kationen an der basengesättigten KAK_{eff} verwendet, die überall Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Lediglich bei Natrium wurde der absolute Wert als Zielvariable verwendet, da sich, wenn die Natriumanteile modelliert wurden, teilweise Werte deutlich außerhalb des Wertebereichs der BZE-Messungen ergaben.

Die modellierten Kationenanteile wurden anschließend korrigiert, damit die Summe der Kationenanteile überall 100% ergibt. Dazu wurde die Summe der Kationenanteile ermittelt und als Korrekturfaktor verwendet. Danach wurden die Kationenanteile mit der basengesättigten KAK_{eff} multipliziert, um die Kationengehalte zu berechnen.

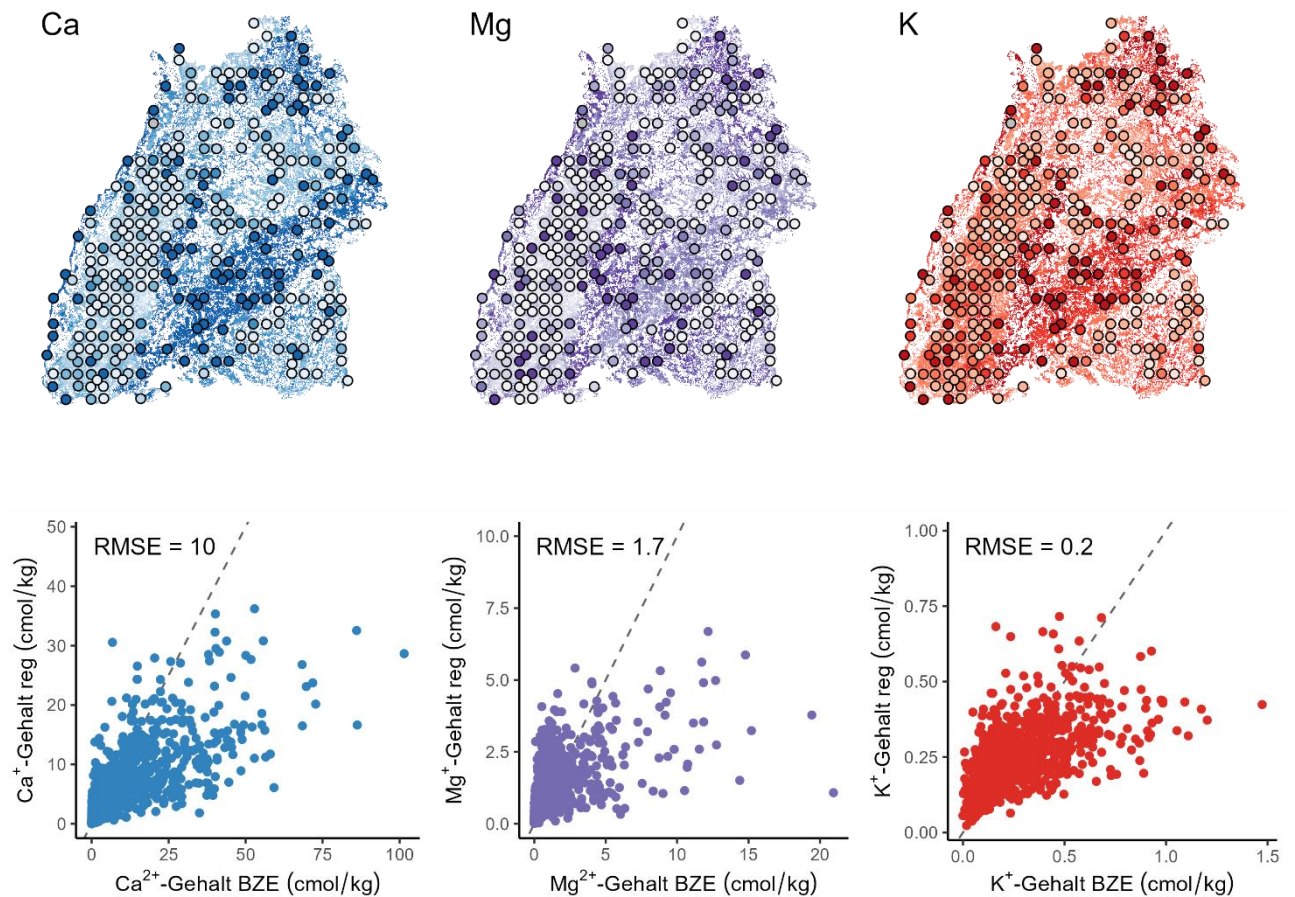


Abbildung 106: Regionalisierte (reg) und an BZE-Punkten gemessene Kationengehalte (Ca, Mg und K) als Karte und als Scatterplot dargestellt.

In Abbildung 106 sind die regionalisierten Kationengehalte im Vergleich zu den BZE-Messungen dargestellt. Da die Eingangsparameter der Modelle ebenfalls modellierte Werte sind, wurden die Unsicherheiten aus der Regionalisierung der Eingangsparameter weitergetragen. Bei allen drei Hauptkationen ist eine Unterschätzung im hohen Wertebereich zu sehen. Diese lässt sich dadurch erklären, dass die KAK_{eff} , die bei allen Modellen ein wichtiger Prädiktor war, bei der Regionalisierung im hohen Wertebereich tendenziell unterschätzt wurde. Die Ergebnisse unterliegen daher einer großen Unsicherheit. Zur groben Einschätzung, ob an einem Standort eher niedrige oder hohe Kationengehalte zu erwarten sind, bieten die Regionalisierungen dennoch eine wertvolle Orientierung.

Validierung der Parameter

Für einige Parameter (WHH, Textur, pH-Wert) wurde eine Validierung und Unsicherheitsabschätzung anhand einer Datenbank aus über 200.000 Bohrstock-Aufnahmepunkten (AUPs) durchgeführt. Da in den Beispielgebieten nur in einem kleinen Bereich Bohrstockdaten vorhanden sind, wurden für die Validierung Daten aus ganz Baden-Württemberg verwendet. Um die Sand-, Schluff- und Tongehalte der AUPs mit den regionalisierten Werten zu vergleichen, mussten die AUPs nach den Tiefenstufen der Datenbank (0-10, 10-30, 30-60, 60-90cm) aggregiert werden. Dazu wurden alle Tiefen einer Bohrstockaufnahme, die innerhalb einer Tiefenstufe lagen, anteilig gemittelt. Anschließend wurden die aggregierten AUP-Daten in ein $200 \times 200 \text{m}^2$ Raster überführt und um die kleinräumige Streuung zu minimieren für jede Rasterzelle gemittelt.

Abbildung 107 zeigt Boxplots der Sand-, Schluff und Tongehalte der AUPs und der Regionalisierungen je Wuchsgebiet. Die Anteile in den unterschiedlichen Wuchsgebieten stimmen weitgehend gut überein, es zeigen

sich aber in manchen Wuchsgebieten voneinander abweichende Muster. Im Schwarzwald wurde z.B. der Sandgehalt bei den Regionalisierungen zumeist niedriger und der Schluffgehalt höher eingeschätzt als bei den AUPs. Die regionalisierten Werte haben im Vergleich zu den Bohrstockdaten einen RMSE (Root-Mean-Square-Error) von ca. 10-20%. Dabei ist zu beachten, dass auch die Bohrstockansprachen einer Unsicherheit unterliegen, da sie nicht auf Laboranalysen beruhen, was einen Teil der Streuung zwischen den Datenquellen erklärt.

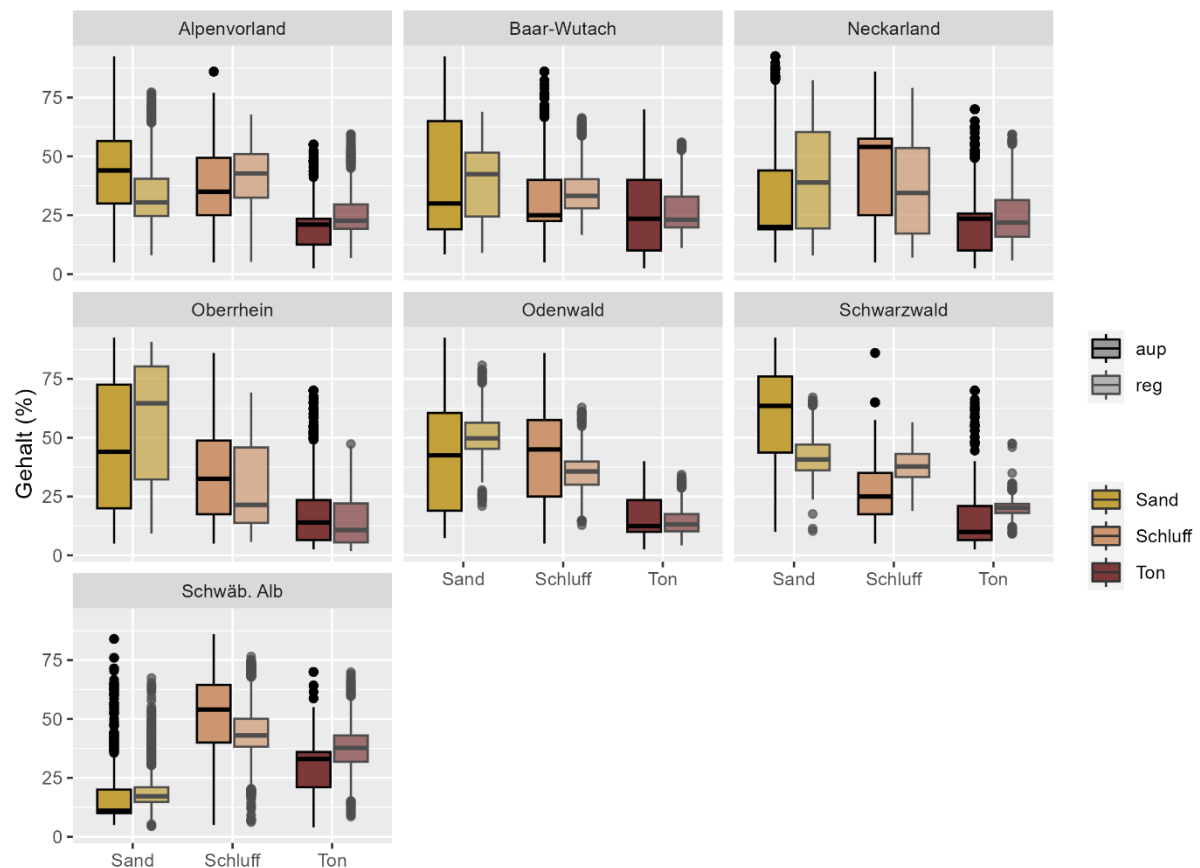


Abbildung 107: Boxplots der Sand-, Schluff- und Tongehalte der AUPs und der Regionalisierungen (reg) nach Wuchsgebiet.

Neben den Texturdaten wurden auch die Wasserhaushaltsstufe und der pH-Wert über die Bohrstockdaten validiert. Beim pH-Wert wurde die Säurestufe der Bohrstockansprache mit den regionalisierten pH-Werten verglichen. In Abbildung 108 ist der regionalisierte pH-Wert der vier Tiefenstufen als Boxplot für die Säurestufen der Bohrstockdaten dargestellt. Hier gibt es teilweise deutliche Unterschiede zwischen den Datenquellen. Einige Standorte, die in den AUPs als stark sauer eingestuft wurden, zeigen in der Regionalisierung einen pH-Wert über 6. Umgekehrt gibt es Punkte, die laut AUP alkalisch sind, in der Regionalisierung jedoch einen pH-Wert unter 4 aufweisen. Für den Großteil der Daten liegt der regionalisierte pH-Wert im erwarteten Bereich der in den AUPs angegebenen Säurestufe. Besonders der pH-Wert in der Tiefenstufe 4 (60-90cm) weist einen klaren Zusammenhang mit den Säurestufen der AUPs auf.

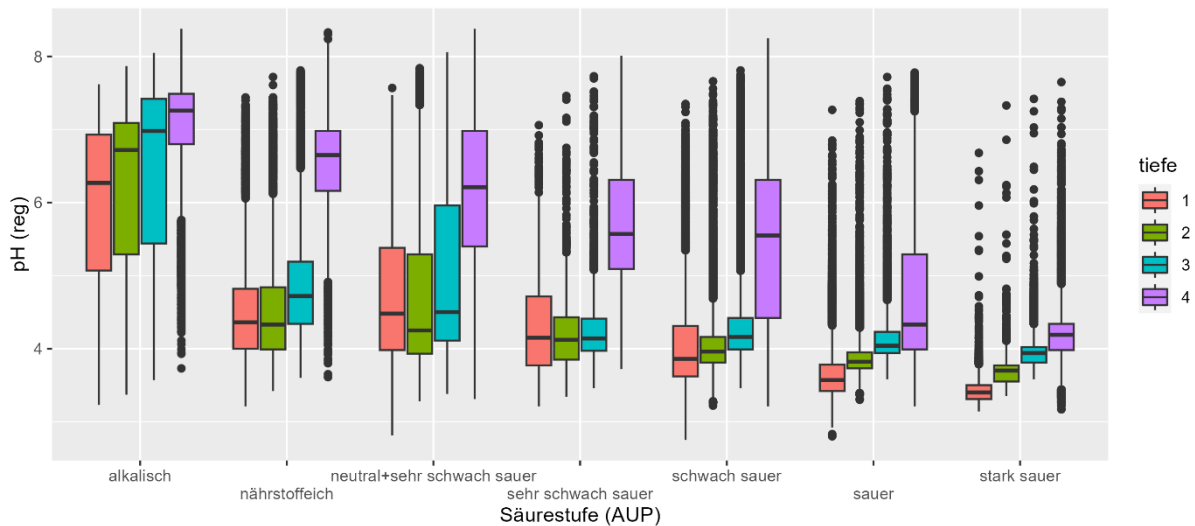


Abbildung 108: Säurestufe nach AUP im Vergleich mit den regionalisierten pH-Werten je Tiefenstufe.

Der Wasserhaushalt (WHH) wurde für die Datenbank aus mehreren Datenquellen zusammengestellt. Die terrestrischen Wasserhaushaltsstufen wurden mit der LWF-Brook90 Modellierung bestimmt. Für Stau- und Grundwasserböden wurde zuerst die STOKA genutzt, falls diese nicht vorlag, kam die BK50 zum Einsatz. Die Validierung des WHH wurde deshalb auch für die unterschiedlichen Datenquellen getrennt betrachtet. Die Stau- und Grundwassereinschätzung der STOKA beruht auf Bohrstockaufnahmen im Bestand und ist daher die verlässlichste Quelle. Die Grund- und Stauwassereinschätzung über die BK50 stimmt häufig nicht mit den AUPs überein, ist allerdings der einzige verfügbare Anhaltspunkt für den nicht kartierten Bereich. Zwar ist, wenn laut BK50 ein Stauwasserboden vorliegt, laut AUPs selten ein Grundwasserboden vorhanden oder umgekehrt. Allerdings sind sehr viele Punkte in der BK50 als Stau- oder Grundwasser eingeteilt, bei denen laut AUP terrestrische WHH-Klassen vorliegen. Dies liegt vermutlich unter anderem an den deutlich größeren Polygonen, wodurch der angegebene WHH nicht für den gesamten Bereich des Polygons repräsentativ ist. Zusammengefasst sind auf etwa 60% der Fläche, die laut BK50 Stauwasserböden aufweist, auch in der STOKA Stauwasserböden verzeichnet. Bei den Grundwasserböden ist der Anteil mit etwa 40% noch geringer.

Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen

Die nutzungsfreie Stoffbilanz stellt mittlere Stoffflüsse eines Systems dar, weshalb auch die Nährstoffentzüge mittlere Flüsse darstellen müssen, um eine Bewertung perspektivischer Nutzungsintensitäten zu ermöglichen. Zur Ermittlung der mittleren Nährstoffentzüge über eine Umtriebszeit wurden verschiedene Schritte durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die Gesamtbiomasse sowie die Biomasse verschiedener Baumkompartimente der ausscheidenden Bestände mithilfe von Biomassefunktionen nach Vonderach et al. (2018) berechnet. Für die Analyse kamen landesspezifische Ertragstablen zum Einsatz, diese enthalten Werte zu allen wichtigen Wachstums- und Ertragsvariablen für Waldbestände. Die Nährstoffgehalte der Biomassekompartimente der ausscheidenden Bestände wurden anschließend mithilfe biometrischer Schätzmodelle nach Rumpf et al. (2018) berechnet. Hierzu wurden von den Projektpartnern Informationen zur Stickstoffdeposition und zum Basensättigungsgrad bereitgestellt. Anschließend wurden verschiedene Ernteszenarien definiert, um den gesamten Biomasse- und Nährstoffexport zu berechnen. Im letzten Schritt wurden die Nachhaltigkeitsindikatoren berechnet, die privaten Waldbesitzer/-innen als Orientierungshilfe für die Bewirtschaftung ihrer Wälder dienen können. Zur Quantifizierung der Fehlerterme und um das Vertrauen in die Modellierung zu festigen, wurde abschließend eine Unsicherheitsanalyse vorgenommen.

Ertragstablen und Baumarten

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurde auf die fünf Hauptbaumarten Fichte, Eiche, Kiefer, Douglasie und Buche fokussiert. Zur Schätzung der Gesamtbiomasse stehender und ausscheidender Bestände sowie

ihrer verschiedenen Kompartimente wurden klassische Ertragstabellen verwendet (Tabelle 40). Ertragstabellen dienen in der Forstwirtschaft als Referenz für die allgemeine Bestandsentwicklung, um die potenzielle Produktivität eines Waldbestands im Laufe der Zeit abzuschätzen. Sie liefern tabellarische Daten, die das erwartete Wachstum, Volumen oder die Biomasse von Bäumen unter bestimmten Bedingungen wie Baumart, Alter, Standortqualität (ausgedrückt in Bonitäten oder Standortklassen), Managementpraktiken (z.B. Durchforstungsregime) und Umtriebszeit zeigen (van Laar et al., 2007). Umtriebszeiten variieren je nach Baumart, Bundesland und Standortqualität aufgrund unterschiedlicher Wachstumsraten, klimatischer Bedingungen, Bodenfruchtbarkeit und Produktionszielen (Tabelle 41).

Tabelle 40. Quelle zur Ertragstabellen unterschiedlicher Bundesländer

Bundesland	Source
Baden-Württemberg (BW)	Baden-Württemberg (1993)
Bayern (BY)	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten(2018)
Brandenburg (BRB)	Degenhardt et al. (2008)
Niedersachsen (NWD)	Albert et al. (2021)

Tabelle 41. Die Altersspanne und damit die maximale Umtriebszeit nach Baumart und Bundesland.

Alter	Buche		Douglasie		Eiche		Fichte		Kiefer	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
BW	30	150	20	100	20	180	20	120	30	120
BY	30	140	20	120	20	180	10	120	10	120
BRB	1	150	1	120	1	180	1	120	1	150
NWD	25	150	15	120	15	180	20	120	20	120

Die Bonitäten verschiedener Baumarten decken oft einen größeren Bereich ab, z.B. eine absolute Bonität: drei bis zehn für Buchen in Baden-Württemberg oder eine relative Bonität: eins bis fünf für Fichten in Bayern. Zur Reduzierung der Komplexität und zur Vereinheitlichung wurden drei verschiedene Klassen definiert ("gut", "mittel", "schlecht"), für die die zugehörige Bonität basierend auf den Perzentilen 0,17, 0,50 und 0,83 dieser Ertragstabellen berechnet wurde (siehe Tabelle 42).

Tabelle 42. Die Einordnung von Bonitäten (G: "Gut", M: "Mittel", S: "Schlecht") berechnet nach Perzentilen und in den Bonitätseinheiten der jeweiligen Ertragstabellen (BW: dGz100; andere Bundesländer: Ertragsklasse).

Baumart/Bonität	BW			BY			NWD			BRB		
	G	M	S	G	M	S	G	M	S	G	M	S
Buche	9.0	7.0	4.0	1.5	2.5	4.0	-1.0	1.0	3.0	-1.0	2.0	5.0
Douglasie	18.0	15.0	11.0	1.0	2.0	2.5	0.0	2.0	3.0	0.0	2.0	4.0
Eiche	8.0	6.0	4.0	1.0	2.0	3.5	-1.0	1.0	3.0	0.0	2.0	4.0
Fichte	14.0	11.0	7.0	1.5	2.5	4.0	0.0	1.0	3.0	1.0	3.0	5.0
Kiefer	9.0	7.0	5.0	1.5	3.0	4.5	0.0	1.0	3.0	-1.0	1.0	4.0

Gesamtbilanz und Bewertung

Um den berechneten Nährstoffentzügen, die aus der geernteten Biomasse resultieren, eine praktische Bedeutung zu verleihen, haben wir den Nutzungsindikator der nutzungsfreien Stoffbilanz (nfSB; EnNa-Projekt)

und die Gesamtbilanz (GB) in kombinierter Weise verwendet. Das Ziel der Berechnung ist die Ableitung von Informationen über das Ausmaß möglicher Nutzungsszenarien (wie zuvor definiert) sowie über die damit verbundenen Sortimentsstrukturen und potenziellen Närelementdefizite.

Die gemeinsame Bewertung aller Elemente und Szenarien wurde mittels eines Entscheidungsbaums durchgeführt (Abbildung 109). Dieser Entscheidungsbaum ermöglicht eine gemeinsame Bewertung aller Elemente und Szenarien, indem er die nutzungsfreie Stoffbilanz (nfSB) und die Gesamtbilanz (GB) in verschiedene Kategorien einteilt. Basierend auf den Werten von nfSB und GB, werden spezifische Bewertungen wie "nfSB negativ", "nfSB < MIN" oder "nfSB > REAL" abgeleitet.

Eine mögliche Übersetzung dieser Klassifizierung in Bewirtschaftungsempfehlungen für die gemeinsame Bewertung aller Elemente und Szenarien wird in Tabelle 20 (Kapitel Gesamtbilanz und Bewertung) dargestellt.

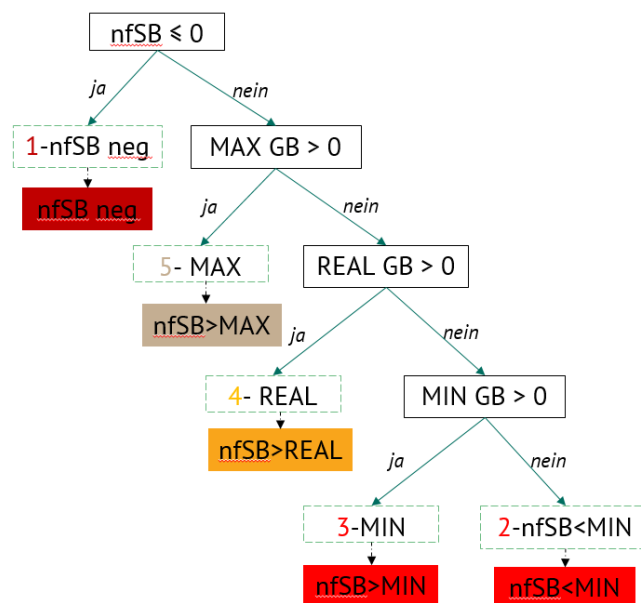


Abbildung 109. Die gemeinsame Bewertung aller Elemente und Szenarien wurde mittels eines Entscheidungsbaums durchgeführt.

Zusätzliche Ergebnisse in Baden-Württemberg; Gesamtbilanz und Gesamtbewertung: Vergleich der unterschiedlichen Beispielgebiete

Die Gesamtbilanz der verschiedenen Baumarten in den Beispielgebieten in Baden-Württemberg wurde erfolgreich modelliert, ebenso wie deren Gesamtbewertung. Der Übersichtlichkeit halber wird in diesem Kapitel nur eine Auswahl der Ergebnisse präsentiert. Dabei werden jeweils eine Baumart (Buche), eine Bonität (Mittel) und ein Szenario (REAL) und die drei Elemente (Ca, Mg und K) wiedergegeben.

In Abbildung 110 werden die Nährstoffentzüge von Buche in den drei unterschiedlichen Beispielgebieten dargestellt. Bei Ca gibt es einen klaren Unterschied in den Nährstoffentzügen zwischen den Beispielgebieten. Bei Mg und K ist der Unterschied innerhalb der Beispielgebiete deutlich geringer. Dies lässt sich besser in Abbildung 111 (links) beobachten. Im Durchschnitt betragen die modellierten Werte für Ca 8,14, 12,7 und 11,8 kg ha⁻¹ a⁻¹ für die Beispielgebiete 3/09, 4/02 bzw. 4/03. Die Werte für K mit 5,7, 5,9 bzw. 5,7 kg ha⁻¹ a⁻¹ und für Mg 1,7, 2,0 bzw. 1,8 kg ha⁻¹ a⁻¹ liegen eng beieinander. Dies lässt sich auf eine geringe maximale Basensättigung zurückführen (siehe Anhang Teilvorhaben 4, Arbeitspaket 2). Dieser Parameter hat häufig einen erheblichen Einfluss auf den Nährstoffgehalt innerhalb der verschiedenen Biomassekompartimente (Rumpf et al., 2018).

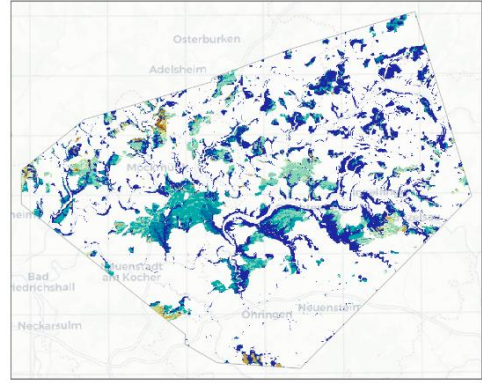
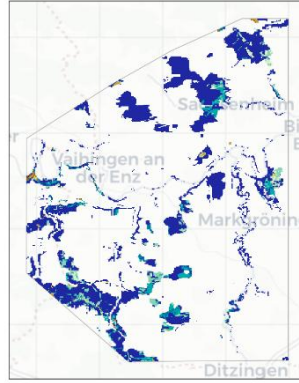
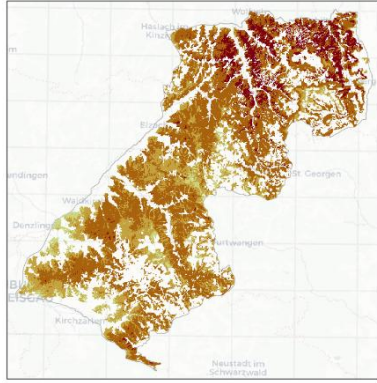
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Buche; Bonität: mittel; Parameter: GB; Element: Ca; Szenario: REAL

3/09: mittlerer Schwarzwald

4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz

4/03: Kocher-Jagst-Landschaft



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

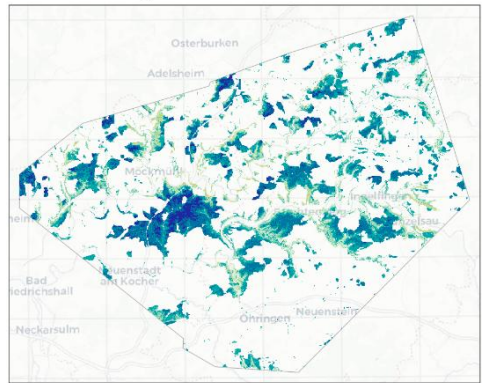
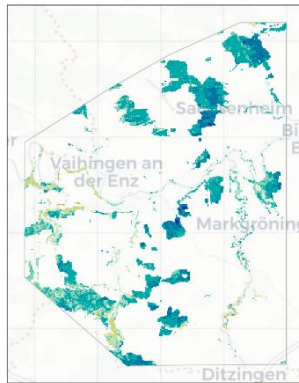
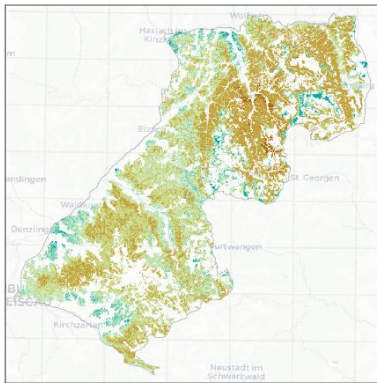
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Buche; Bonität: mittel; Parameter: GB; Element: K; Szenario: REAL

3/09: mittlerer Schwarzwald

4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz

4/03: Kocher-Jagst-Landschaft



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

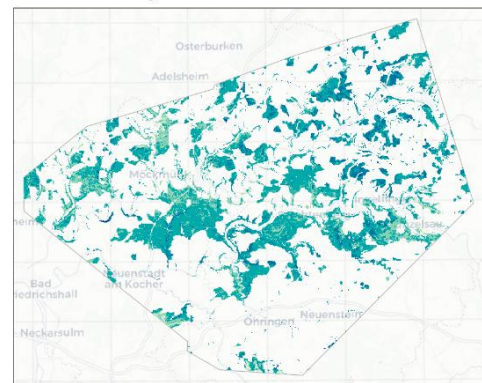
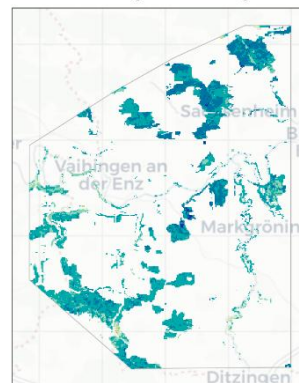
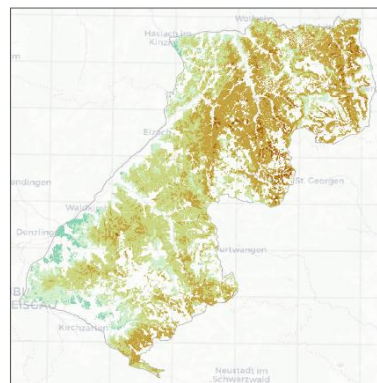
Testgebiete Baden-Württemberg

Art: Buche; Bonität: mittel; Parameter: GB; Element: Mg; Szenario: REAL

3/09: mittlerer Schwarzwald

4/02: Weinbaugebiet Vaihingen/Enz

4/03: Kocher-Jagst-Landschaft



Quelle: FVA BW + Projektpartner, FNR-Projekt StWM-KPW 2025

Abbildung 110. Die berechnete Gesamtbilanz für Buche mittlerer Bonität in den drei unterschiedlichen Beispielgebieten in Baden-Württemberg.

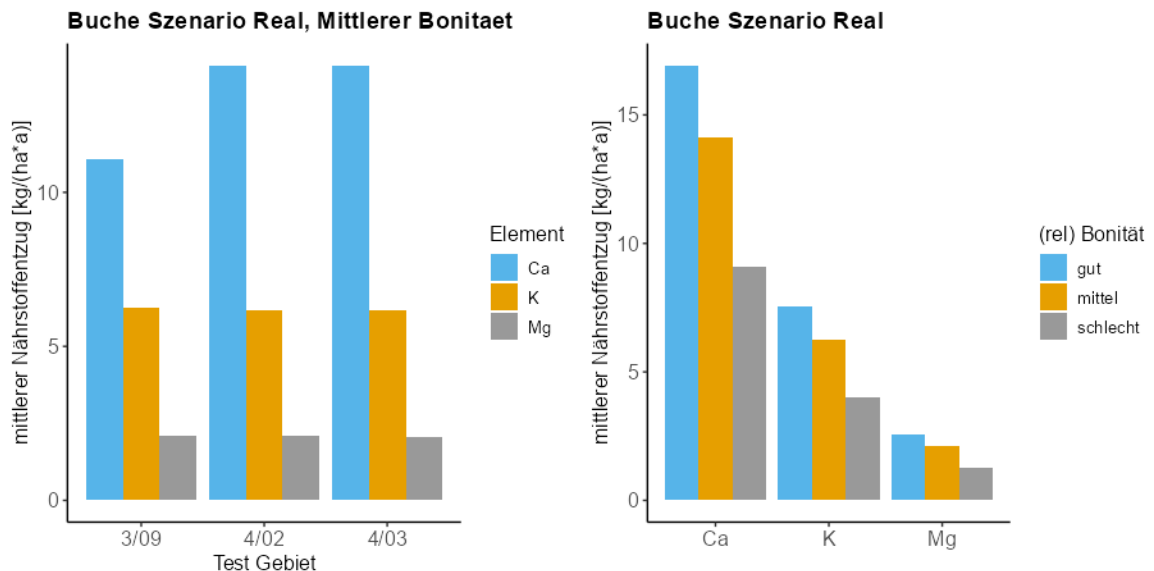


Abbildung 111: Berechnete mittlere Nährstoffzüge in den Beispielgebieten (links) und nach Bonitäten (rechts) in Baden-Württemberg.

Ein größerer Unterschied in den berechneten Nährstoffzügen lässt sich zwischen den Bonitätsklassen feststellen: Gut (11,2; 2,1; 6,9), Mittel (9,6; 1,7; 5,7), Schlecht (6,2; 1,1; 3,7) für Ca, Mg, bzw. K in $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Siehe auch Abbildung 111 rechts. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bessere Bonitäten im Allgemeinen mit einer höheren Biomasseproduktion in die Berechnung eingehen und somit auch mehr Nährstoffe gebunden sind.

In Abbildung 112 wird die Gesamtbewertung für die mittlere Bonität von Buche dargestellt. Im Allgemein ist die Gesamtbewertung im Beispielgebiet 3/09 für alle Baumarten schlechter als in den Beispielgebieten 4/02 und 4/03. Aufgrund der niedrigeren Basensättigung im Beispielgebiet 3/09 (siehe auch Kapitel Nährstoffbilanzen) fällt die Gesamtbewertung deutlich schlechter aus als im Vergleich zu den Beispielgebieten 4/02 und 4/03. Tatsächlich zeigen sich auf großer Fläche negative Werte selbst ohne Berücksichtigung der Holzernte. Dies bedeutet, dass bei der Bewirtschaftung insbesondere die Frage nach der Nährstoffnachhaltigkeit eine relevante Rolle spielen sollte (z.B. „nur Stammholznutzung“; siehe auch Tabelle 20).

In den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 ist die Bewertung deutlich besser. Der Großteil der Fläche zeigt, dass ein MAX-Szenario möglich ist (Derbholznutzung mit evtl. Kronennutzung; siehe Tabelle 20). Ein kleinerer Teil der Fläche wird als „MIN neg.“ bewertet, für den eine Stammholznutzung (keine Kronennutzung) empfohlen wird. Es zeigt sich, dass eine kleinräumige Planung notwendig ist.

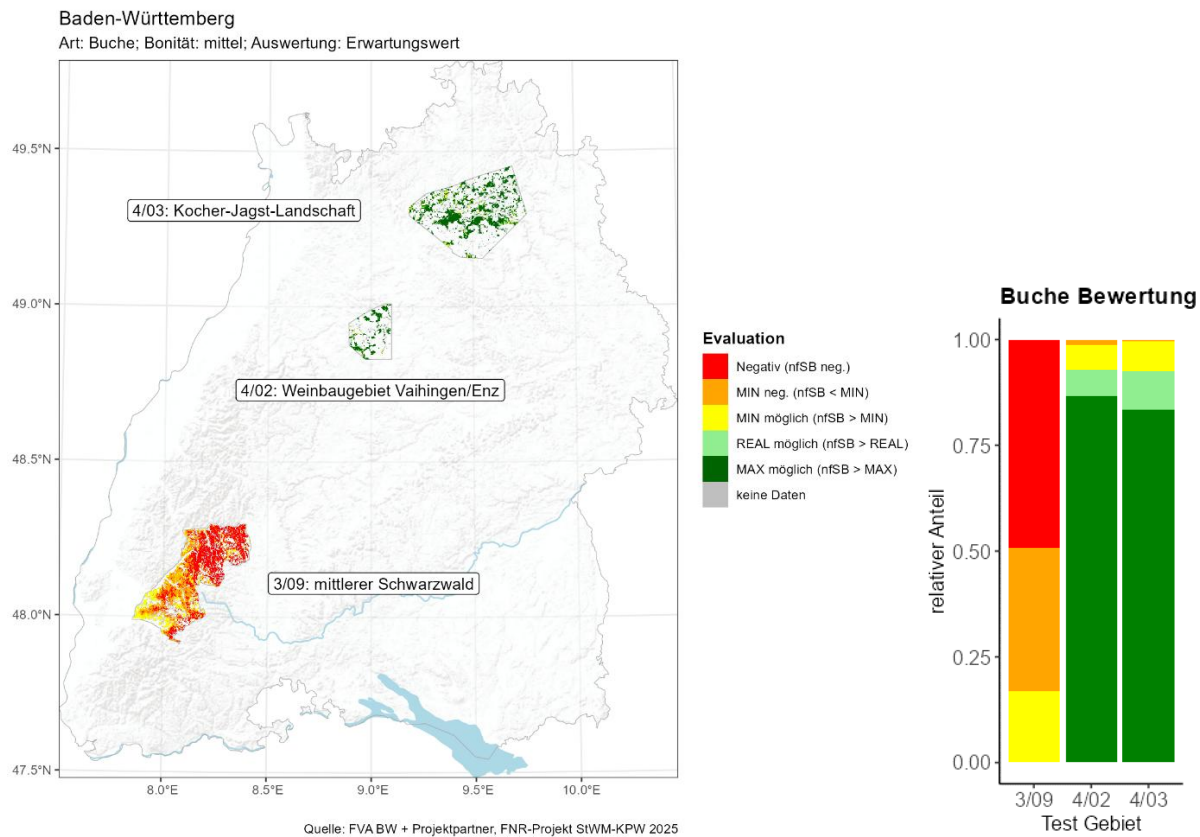


Abbildung 112. Räumliche Gesamtbewertung von Buche (links), und relativer Anteil von der Gesamtbewertung für die mittlere Bonität Buche in den Beispielgebieten (rechts)

Verhältnis zwischen Holzernteentzügen und Sickerwasserausträgen

Um eine Vorstellung zu bekommen, welche Rolle die Nährstoffentzüge mit der Holzernte für die Gesamtbilanz der einzelnen Elemente spielen, kann das Verhältnis zwischen Holzernteentzüge (HAR) und Sickerwasserausträgen (LEA) gebildet werden (FVA-BW, 2018). Dieser elementspezifische Quotient erreicht den Wert eins, falls beide Größen gleich groß sind. Dominieren die Nährstoffentzüge mit der Holzernte wird der Quotient deutlich größer eins, dominieren die Sickerwasserausträge entsprechend deutlich kleiner eins (aber immer größer Null). In Tabelle 43 ist eine Übersicht für die Baden-Württembergischen Beispielgebiete dargestellt. Auffällig ist, dass bei den meisten Baumarten und Elementen die Klasse " $\geq 1/1$ " am häufigsten vorkommt, was darauf hindeutet, dass die Nährstoffentzüge durch die Holzernte oft mindestens so hoch sind wie die Sickerwasserausträge. Besonders bei Kalium (K) zeigt sich in den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 ein hoher Anteil an Standorten in der Klasse " $\geq 4/1$ ", was auf hohe Bedeutung der Holzernteentzüge im Vergleich zu den Sickerwasserausträgen hinweist. Mg hingegen weist hingegen häufig niedrigere Quotienten auf, insbesondere bei Eiche und Douglasie, was auf geringere Entzüge im Vergleich zu den Sickerwasserausträgen schließen lässt.

Tabelle 43: Klassifizierter Quotient aus Nährstoffentzügen durch die Holzernte und Sickerwasserausträge für die drei Beispielgebiete, fünf Baumarten und drei Elemente in Baden-Württemberg. Der Quotient ist eingeteilt nach festen Verhältnissen und die Werte in den Spalten geben den Anteil [%] an Standorten wieder, die in diese Klasse fallen. Fett gedruckt ist die jeweils häufigste Klasse.

Testgebiet	Baumart	Element	Quotient Holzernteentzüge zu Sickerwasseraustrag							
			Anteil Standorte [%]							
			< 1/4	< 1/3	< 1/2	< 1/1	≥ 1/1	≥ 2/1	≥ 3/1	≥ 4/1
3/09	Buche	Ca	0	0	0,1	16,3	64,6	8,6	1,6	0,2
3/09	Buche	K	0	0	0	0,2	25,2	40,7	14,7	10,6
3/09	Buche	Mg	0,3	6,3	34,7	45,2	4,8	0	0	0
3/09	Eiche	Ca	0	0	0	12,4	64,3	11,9	2,1	0,5
3/09	Eiche	K	0	0	0	5,3	62,5	17,7	4,4	1,5
3/09	Eiche	Mg	76,4	10,7	3,9	0,3	0	0	0	0
3/09	Fichte	Ca	0	0	1,5	39,2	47,7	2,7	0,2	0
3/09	Fichte	K	0	0	2,3	45,4	39	4	0,5	0,1
3/09	Fichte	Mg	52,9	23,9	11,7	2,8	0	0	0	0
3/09	Douglasie	Ca	0,1	1,5	14,6	64,5	10,5	0,2	0	0
3/09	Douglasie	K	0	0	0,5	31,9	51,3	6,3	1,1	0,2
3/09	Douglasie	Mg	79,7	9	2,5	0,1	0	0	0	0
3/09	Kiefer	Ca	0,4	4,2	21,4	58,4	6,8	0,2	0	0
3/09	Kiefer	K	0	1,2	10,1	60,7	17,6	1,6	0,1	0
3/09	Kiefer	Mg	58,6	20,7	9,6	2,4	0	0	0	0
4/02	Buche	Ca	0	0	0,4	12,3	38,3	31,1	1,4	0
4/02	Buche	K	0	0	0	0	0	0	0	83,5
4/02	Buche	Mg	0	0	3	25,5	54,7	0,3	0	0
4/02	Eiche	Ca	0	0	1,5	16,1	37,2	28,6	0,1	0
4/02	Eiche	K	0	0	0	0	0	0	0	83,5
4/02	Eiche	Mg	39,3	31,5	12	0,7	0	0	0	0
4/02	Fichte	Ca	0	0,9	7	24,7	50,9	0	0	0
4/02	Fichte	K	0	0	0	0	0	0	0	83,5
4/02	Fichte	Mg	6,6	9,8	49,4	17,7	0,1	0	0	0
4/02	Douglasie	Ca	7,6	8,2	14,6	52,8	0,2	0	0	0
4/02	Douglasie	K	0	0	0	0	0	0	0	83,5
4/02	Douglasie	Mg	38,6	35,5	9,1	0,4	0	0	0	0
4/02	Kiefer	Ca	11	8,5	12,6	50,6	0,7	0	0	0
4/02	Kiefer	K	0	0	0	0	0,2	3,9	9	70,4
4/02	Kiefer	Mg	8	11,2	42	22,2	0,1	0	0	0
4/03	Buche	Ca	0	0	0	6,4	73,6	6,4	0	0
4/03	Buche	K	0	0	0	0	0	0	0	86,5
4/03	Buche	Mg	0	0,1	3,4	59	24	0	0	0
4/03	Eiche	Ca	0	0	0,1	9,1	73,1	4,2	0	0
4/03	Eiche	K	0	0	0	0	0	0	0	86,5
4/03	Eiche	Mg	52,9	30,2	3,4	0	0	0	0	0
4/03	Fichte	Ca	0	0	2,5	56,6	27,4	0	0	0
4/03	Fichte	K	0	0	0	0	0	0,1	0,4	85,9
4/03	Fichte	Mg	17,1	31,3	31,6	6,4	0	0	0	0
4/03	Douglasie	Ca	1,8	7,2	33,7	43,8	0	0	0	0
4/03	Douglasie	K	0	0	0	0	0	0	0,1	86,4
4/03	Douglasie	Mg	59,9	22,6	4	0	0	0	0	0
4/03	Kiefer	Ca	4,6	6	34,3	41,6	0	0	0	0
4/03	Kiefer	K	0	0	0	0	0,5	3,5	7,6	74,9

Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt

Für die drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg konnten die Wasserhaushaltsmodellierungsroutinen aus WHH-KW erfolgreich angewandt werden. Der Wasserhaushalt für die Klimawandelszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 wurde modelliert und mit Modellergebnissen für den aktuellen Zustand verglichen. Außerdem konnten Eingangparameter für die Verwitterungsparameter aus AP5 aus den Modellen abgegriffen werden. Dazu wurden die Bodenprofile überall auf 2 m Tiefe extrapoliert und die Modellergebnisse bis 1 m Tiefe abgegriffen.

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Der Wasserhaushalt wurde in den Wasserhaushaltsstufen im GIS dargestellt.

Das Thema Nährstoffbilanzierung wurde in Zusammenarbeit mit Teilvorhaben 3 umfassend aufgearbeitet und die relevanten Zielgrößen (Bilanzterme, nutzungsfreie Stoffbilanz, Gesamtbilanz, klassifizierte Bewertung) für die Nutzung in GIS-Systemen abgeleitet. Der webbasierte Prototyp eines Nährstoffrechners basiert ebenfalls auf der Auswertung dieser räumlichen Daten unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bestockung.

Kombination der Nährstoffbilanzen mit dem aktuellen Nährstoffzustand der Böden

Für die Waldböden in Baden-Württemberg wurde neben den in Arbeitspaket 5 berechneten Nährstoffbilanzen ein Ansatz entwickelt, um den aktuellen Nährstoffzustand der Böden darzustellen. Hierfür wurden geeignete Bodenparameter aus vorhandenen Regionalisierungen der Waldböden ausgewählt und zu zwei Indizes zusammengeführt. Diese Regionalisierungen entstanden im Rahmen des „Notfallplans für den Wald Baden-Württemberg“ im Jahr 2021 und decken die gesamte Waldfläche des Bundeslands ab (Zirlewagen 2021). Die Rasterkarten mit einer Auflösung von 25x25m² liefern ergänzende Informationen für die regionale Analyse der Waldböden (Hartmann et al. 2024).

Der Säureindex basiert auf dem pH_{KCl}-Wert in 0-10cm Bodentiefe sowie dem Basensättigungstiefenverlauf und gibt Aufschluss über den Versauerungsgrad der Böden und dessen Einfluss auf die Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen. Der Nährstoffvorratsindex wurde aus dem S-Wert und dem C/N-Verhältnis in 0-10cm Bodentiefe abgeleitet. Die Methodik zur Erstellung der Indizes folgt einem einheitlichen Schema: Jeder Parameter wurde anhand gutachterlich definierter Grenzwerte in fünf Kategorien von „sehr gut“ bis „mangelhaft“ eingestuft. Den Kategorien wurden Indexwerte von 0 bis 1 zugewiesen, wobei höhere Werte eine ungünstigere Bewertung widerspiegeln. Für jeden Index wurden zwei Bodenparameter ausgewählt, deren Indexwerte addiert wurden, um eine Gesamtbewertung zu erhalten.

Tabelle 44: Klassifizierungstabelle der Parameter, die jeweiligen Indexwerte wurden in den beiden Indizes kombiniert.

Klassifizierung	Indexwert	S-Wert [mol _c Mg ⁻¹]	C/N-Verhältnis (0 – 10 cm)
Sehr gut	0	≥ 50	< 12
Gut	0.25	25 bis < 50	12 bis < 16
Befriedigend	0.5	10 bis < 25	16 bis < 20
Ausreichend	0.75	5 bis < 10	20 bis < 25
Mangelhaft	1	< 5	≥ 25
Klassifizierung	Indexwert	pH _{KCl} Wert (0 – 10 cm)	Basensättigungstiefenverlauf
Sehr gut	0	≥ 5	Typ 1
Gut	0.25	4,2 bis 5	Typ 2
Befriedigend	0.5	3,8 bis 4,2	Typ 3
Ausreichend	0.75	3 bis < 3,8	Typ 4 und Typ 6
Mangelhaft	1	< 3	Typ 5

Die beiden Indizes wurden anhand von Vegetationsdaten validiert, die an über 200.000 kartierten Flächen der Standortkartierung in Form von Zeigerwerten nach Ellenberg et al. (1996) aufbereitet wurden. Der Säureindex zeigte dabei eine starke Korrelation ($|\rho| = 0,79$) mit den Säurezeigerwerten (R-Zeiger), während der Nährstoffvorratsindex eine starke Korrelation ($|\rho| = 0,57$) mit den Nährstoffzeigerwerten (N-Zeiger) aufwies. Zur besseren visuellen Darstellung wurde die Indexsumme in drei Kategorien unterteilt und für jeden Index eine Ampelkarte erstellt (siehe Tabelle 45). Auch die Nährstoffbilanzen wurden entsprechend in drei Kategorien zusammengefasst und als Ampelkarte dargestellt (siehe Tabelle 46).

Tabelle 45: Je drei Werte der Indexsumme werden zu einer Bewertung und Ampelfarbe zusammengefasst.

Indexsumme	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
Bewertung	Gut			Befriedigend			Mangelhaft		

Tabelle 46: Zusammenfassung der Nährstoffbilanzen auf drei Ampelkategorien.

MAX möglich (nfSB > MAX)	REAL möglich (nfSB > REAL)	MIN möglich (nfSB > MIN)	MIN neg. (nfSB < MIN)	Negativ (nfSB neg.)
Gut		Befriedigend	Mangelhaft	

Anschließend wurden die Ampelkarten der drei Indikatoren (Nährstoffvorrats- und Säureindex, Nährstoffbilanzen) miteinander kombiniert, was verschiedene mögliche Kombinationen ergab, die an einem Standort vorherrschen können. Diese wurden wiederum in vier Kategorien zusammengefasst (siehe Tabelle 47). Die Bewertung erfolgt dabei anhand der Empfindlichkeit der Standorte gegenüber Nährstoffentzügen und unterteilt sich in die Kategorien „unempfindlich“, „schwach empfindlich“, „empfindlich“ und „sehr empfindlich“. Diese Kategorien wurden von Kolb et al. (2017) abgeleitet. Hierbei gibt es Kombinationen, die kritisch hinterfragt werden müssen, beispielsweise wenn der Nährstoffvorratsindex eine „gute“ Bewertung anzeigt, die Nährstoffbilanzen jedoch „mangelhaft“: reichen hier die großzügigen Nährstoffvorräte aus, um an diesem Standort die kritische Nährstoffbilanzbewertung auszugleichen? Aktuell erfolgt die Bewertung konsequent nach dem Bewertungsschema in Tabelle 46. Um diese und weitere Fragen zu klären, wird über das Projekt hinaus an diesem Thema weitergearbeitet, um praxisgerechte Bewertungsregeln zu entwickeln

Tabelle 47: Kombinationsmöglichkeiten des Säureindex, des Nährstoffvorratsindex und den berechneten Nährstoffbilanzen.

Kategorie	Kombinationsmöglichkeiten
Unempfindlich	3x Grün
Schwach empfindlich	≥1 Gelb und kein Rot
Empfindlich	1x Rot, sonst Grün oder Gelb
Sehr empfindlich	2x Rot oder 3x Rot auf den Index Karten

Die Karten des Nährstoffvorrats- und Säureindex sind für die Beispielgebiete in Abbildung 113 dargestellt und verändern sich für die Kombination mit den Nährstoffbilanzen der verschiedenen Baumarten nicht. Die unterschiedlichen Gesamtbewertungen beruhen auf den Nährstoffbilanzen der Baumarten. Diese sind für die gesamten Beispielgebiete berechnet worden, unabhängig davon ob die Baumarten dort tatsächlich vorkommen. So können Bereiche aufgezeigt werden, die für die jeweilige Baumart kritischer sind als für andere, wenn diese dort wachsen würden (siehe Abbildung 114).

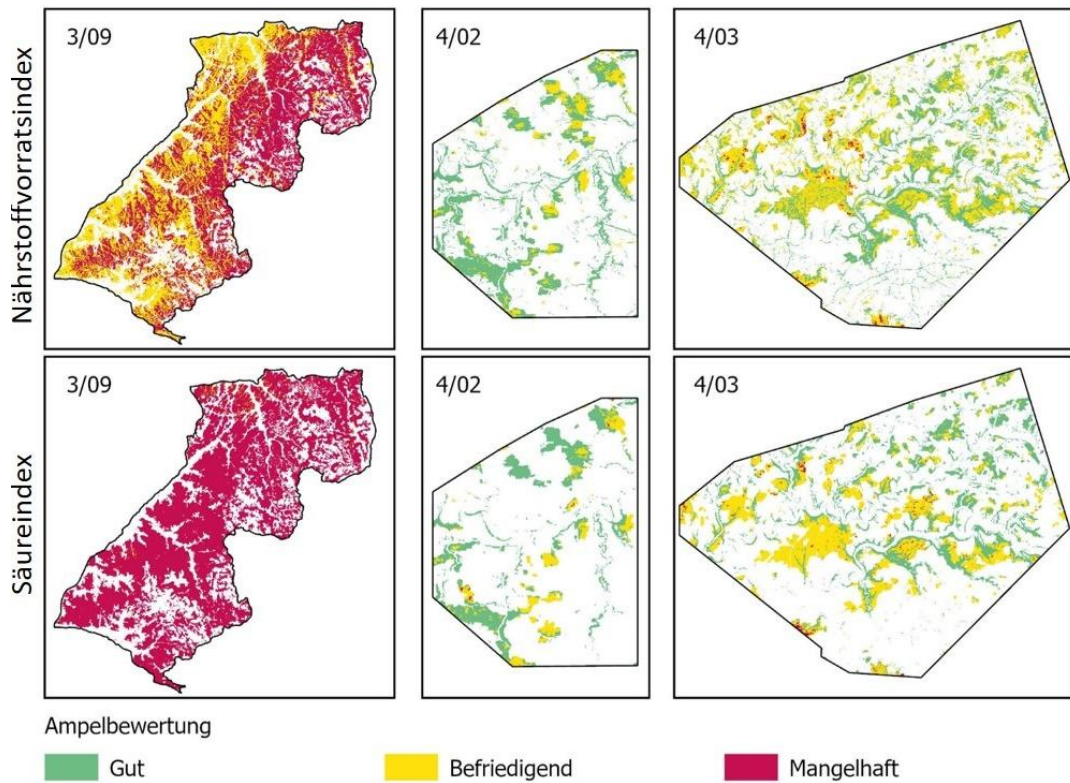


Abbildung 113: Ampelkarten des Nährstoffvorratsindex (= Nährstoffvorrat) und des Säureindex (= Nährstoffverfügbarkeit) für die drei Beispielgebiete in Baden-Württemberg

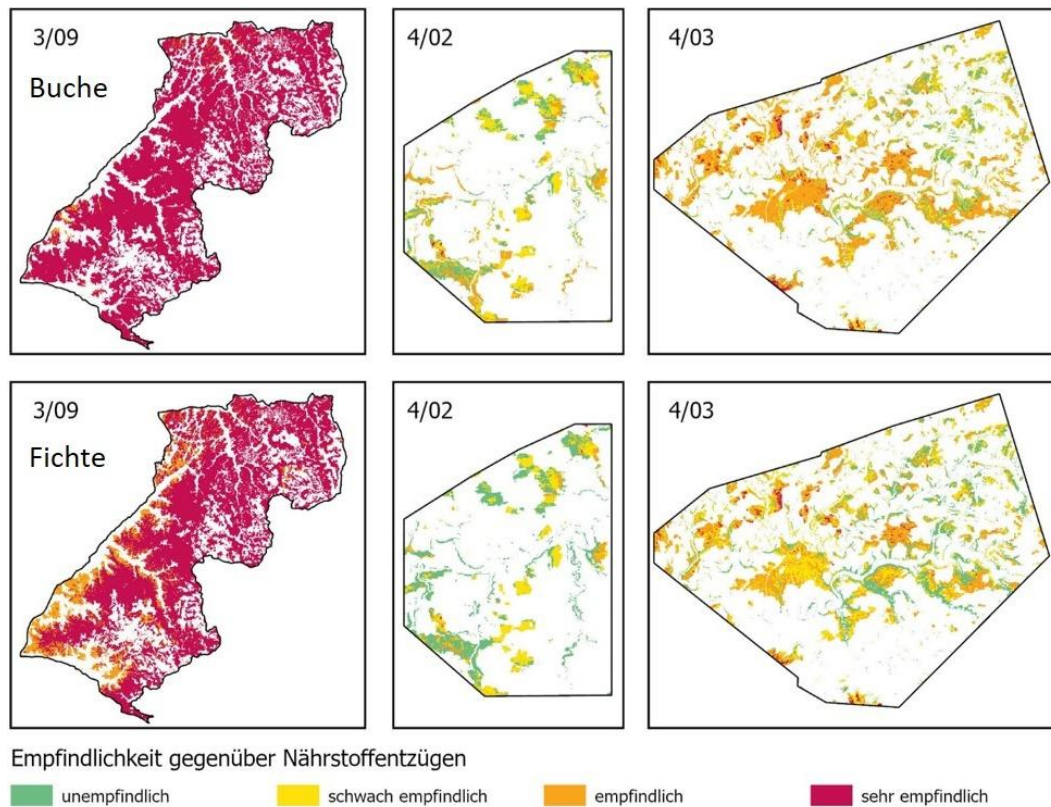


Abbildung 114: Gesamtbewertung der Nährstoffsituation in den Beispielgebieten durch die Kombination zwischen Nährstoffvorratsindex, Säureindex und den Nährstoffbilanzen. Im Beispiel wurden die Bilanzen für die Baumarten Buche und Fichte genommen (Bonität = mittel, Szenario = REAL, Auswertung = Erwartungswert, Bodenvorrat = 0)

Die Baumartenwahl hat einen Einfluss auf die Bewertung der Nährstoffgesamtsituation (siehe Tabelle 48). Es ist zu erkennen, dass die drei hier gezeigten Nadelbaumarten zu einer besseren Bewertung der Nährstoffnachhaltigkeit an den Standorten führen, während insbesondere die Buche mehr „sehr empfindliche“ Standorte aufweist. Hierbei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass es sich um ein theoretisches Produkt handelt, da die Berechnungen unabhängig davon durchgeführt worden sind, ob die Baumart und Bonität dort tatsächlich vorkommt. Es zeigen sich jedoch unterschiedliche Verteilungen der Bewertung je nach Baumart, was gerade in Hinblick auf sich verändernde Umweltbedingungen und Baumartenzusammensetzung der Wälder, eine interessante Betrachtung ist. Um die aktuellen Verhältnisse zu bewerten, bietet es sich an, die vor Ort dominierenden Baumarten darzustellen (siehe Abbildung 79). Für das im Schwarzwald liegende Testgebiet 3/09 ist das die Baumart Fichte, wohingegen in den Beispielgebieten 4/02 und 4/03 im Neckarland Baumartenmischungen überwiegen, in denen die Laubbaumarten Buche, Ahorn und Eiche dominieren.

Tabelle 48: Baumartenunterschiede der Kombinationskarten für die Beispielgebiete. Unabhängig, ob die Baumart tatsächlich dort vorkommt. Die Prozente geben die Verteilung der Bewertungen an, wenn in den drei Beispielgebieten jeweils ausschließlich die jeweilige Baumart vorkommen würden.

Kategorie	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer	Douglasie
Unempfindlich	5,83%	8,59%	10,39%	11,16%	10,69%
Schwach empfindlich	9,30%	16,53%	12,31%	19,41%	14,78%
Empfindlich	18,75%	18,31%	20,17%	16,29%	19,34%
Sehr empfindlich	66,13%	56,57%	57,13%	53,14%	55,19%

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

Für die Umsetzung der Projektergebnisse fand ein intensiver Austausch mit der Praxis statt. In einem Workshop zum Thema „Nährstoffnachhaltigkeit in der Forstwirtschaft – Aktuelle Ergebnisse und Konsequenzen für das betriebliche Handeln“ wurden die Ergebnisse mit der Landesforstverwaltung in Stuttgart, Vertretern des Staatsforstbetriebs und dem Regierungspräsidium Freiburg (Referat 84 „Waldnaturschutz, Biodiversität und Waldbau“) diskutiert. Dabei wurden vergangene und aktuelle Projektergebnisse vorgestellt und intensiv über Herausforderungen und Chancen einer nährstoffnachhaltigen Waldbewirtschaftung diskutiert. Im Rahmen der Waldstrategie von Baden-Württemberg ist geplant, sich aufbauend auf den Projektergebnissen von StWM-KPW mit dem Aspekt der Nährstoffnachhaltigkeit weiter auseinanderzusetzen.

Eine der größten Herausforderungen im Projekt war es, auf der einen Seite das Bedürfnis aus der Praxis nach klaren Handlungsempfehlungen zu erfüllen, während auf der anderen Seite die große Unsicherheit der Daten im nicht kartierten Privatwald berücksichtigt werden musste. Diese Unsicherheit führt oft nur zu groben Einstufungen, die lediglich als Anhaltspunkt für Bewirtschaftungsentscheidungen dienen können. Bei der Einschätzung des Anbaurisikos ist beispielsweise für einige Baumarten ein Stauwasserboden ein starker Risikofaktor, im nicht kartierten Bereich sind die Flächen jedoch aus der grob aufgelösten BK50 übernommen, die auf Flurstückebene sehr ungenau ist. Demnach kann die angegebene Information nur als Hinweis betrachtet werden, dass eine Stauwasserbeeinflussung wahrscheinlich ist. Im Idealfall sollte dies vor Ort überprüft werden.

Es wurde ein webbasierter Prototyp eines Nährstoffrechners entwickelt, mit dem es möglich ist für Standorte innerhalb der Beispielgebiete mit einer konkreten, vorgegebenen Bestockung Nährstoffnachhaltigkeitsindikatoren abzuleiten. Außerhalb der Beispielgebiete können die Zustandindikatoren standortpezifisch ausgelesen werden und so ein erster Eindruck für den eigenen Standort gewonnen werden.

Arbeitspaket 10: Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse

Zeitpunkt	Berichterstattung und Veröffentlichung der Ergebnisse
Mai 2024	Poster: Hartmann, P.; Niethammer, M.; Osterholt, L.; Habel, R.; Puhlmann, H. (2024). Bodenregionalisierungen als Grundlage einer flächendeckenden Standortsbewertung. <i>Tagung der Sektion Waldernährung im DFVVA</i>
Oktober 2024	Vortrag: Puhlmann, H. (2024) Bodenfruchtbarkeit: Gefährdung und Schutz einer begrenzten Ressource. Bodensymposium „Waldboden: Überfordertes Multitalent?“, Stuttgart Niethammer, M.; Habel, R.; Hartmann, P. (2024) Nährstoffsituation der Waldböden – Genügend Nährstoffe für die Wälder der Zukunft? Bodensymposium „Waldboden: Überfordertes Multitalent?“, Stuttgart
Dezember 2024	Masterarbeit im Rahmen des Projekts zum Thema „Validierung und Optimierung eines Nährstoffindex für die Waldböden Baden-Württembergs“ von Moritz Niethammer

Für die Veröffentlichung der Ergebnisse wurde Kontakt mit den Betreibern der „Waldexpert“-App aufgenommen, in der für Waldbesitzer/-innen flurstückbezogene Daten für Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt werden. Da vor der Veröffentlichung in der App die Datenqualität und der Nutzen für die Waldbesitzer/-innen von den Betreibern der App noch überprüft werden muss, ist die Veröffentlichung derzeit noch nicht abgeschlossen.

Geplante Veröffentlichungen:

Artikel zur Nährstoffsituation der Waldböden im Waldzustandsbericht 2025 von Baden-Württemberg

Paper: Nutrient export by harvesting: a comparative analysis for Germany and possibilities for extensification

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens die verfügbaren Standortdaten für den Kleinprivatwald zusammenzustellen und die Datenqualität zu prüfen, wurde im Rahmen des Projekts erreicht. Da der Kleinprivatwald zu großen Teilen nicht kartiert ist, wurde größtenteils auf regionalisierte Bodendaten zurückgegriffen. Diese zeigten zwar bei der Validierung durchaus eine große Unsicherheit, stellen aber die Beste verfügbare Bewertungsgrundlage für den nicht kartierten Bereich dar.

Das Thema Nährstoffbilanzen wurde umfassend in Zusammenarbeit mit Teilvorhaben 3 aufgearbeitet. Es liegen als wesentliche Ergebnisse Karten zu mehreren Zielgrößen (Bilanzterme, nutzungsfreie Stoffbilanz, Gesamtbilanz, klassifizierte Bewertung) vor, die verschiedene Baumarten, Bonitäten, Elemente, Holzernteintensitäten darstellen und integrieren. Die genutzten Modelle sind in einem R-Paket (NUTS) abgelegt, gleiches gilt für die Bilanzterme der nutzungsfreien Stoffbilanz (R-Paket NUTSdata). Darauf aufbauend wurde eine webbasierte „Shiny-App“ entwickelt, die es erlaubt für ganz konkrete Standorte innerhalb der Beispielgebiete unter Angabe der konkreten Bestockung eine Bewertung abzuleiten.

Teilvorhaben 5: Erweiterte Standortinformationen für Brandenburg

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die HNEE war zusammen mit der LFE für die praxisorientierte Umsetzung der Projektziele in Brandenburg zuständig. Dazu sollten die im Rahmen des Teilvorhabens in Brandenburg vorliegenden Standortdaten um flächig vorhandene aktuelle Datensätze, z.B. zum Klima ergänzt sowie mit Ergebnissen aus Vorgängerprojekten und aus dem laufenden Projekt über ein GIS-Projekt verknüpft werden. Für die Modellierung eines einheitlichen Wasserhaushalts wurde auf die Methoden und Ergebnisse aus dem Projekt WHH-KW zurückgegriffen und diese auf die Waldflächen Brandenburgs übertragen. Aus den gesamten für Brandenburg hergeleiteten Daten sollten praxisrelevante Informationen extrahiert und in einer Standort-App nutzerfreundlich zur Verfügung gestellt werden.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

Für Brandenburg wurden keine Beispielgebiete ausgewiesen, es wurde die gesamte Brandenburger Waldfläche berücksichtigt. Als Waldfläche wurde die Vereinigungsfläche der Geodatensätze der Standortkarte, der Forstgrundkarte und der ATKIS-Waldkarte verwendet. Über die Waldfläche wurde ein 100 m x 100 m Raster gelegt und Standortinformationen aus der Standortkarte an den Rasterpunkten abgegriffen.

Die Modellierung von Feinbodenformen in nicht kartierten Waldgebieten erfolgte nach der im Waldklimafonds - Projekt „Entscheidungsunterstützung zur Verteilung und Begrenzung von Risiken für die Forstwirtschaft vor dem Hintergrund des Klimawandel“ (DSS-RiskMan, FKZ: 28WB401502) verwendeten Methode. Dabei handelte es sich um optimal beschnittene Klassifikationsbäume, die mit dem CART-Algorithmus berechnet wurden. Die Auswahl von Kovariablen erfolgte dabei nach dem SCORPAN-Ansatz. Daher stammten die Kovariablen aus den Bereichen (1) Boden: Merkmale aus der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200), (2) Klima: Mittelwerte der Klimanormalperiode (1961-1990), (3) Vegetation: Corine Landbedeckungsdaten, (4) Relief: zahlreiche Derivate aus dem Digitalen Geländemodell mit Gitterweite 25m (DGM25), (5) Ausgangsgestein: Merkmale aus der BÜK200 und (6) Alter: Informationen aus der Geologischen Übersichtskarte 1:250.000 (GÜK250). In das Modell gingen auch die ebenfalls im Projekt DSS-RiskMan modellierten Grundwasserflurabstände ein. Danach erfolgte punktbezogen die Zuordnung zu Standortformengruppen, Wasserhaushalts- und Nährkraftstufen.

In der Standortkarte werden für zahlreiche Flächen mehr als eine Standortform ausgewiesen. Ein Grund dafür ist die enge Verzahnung der Standortformen. Diese Flächen werden als Wechselstandorte bezeichnet. Für die weitere Bearbeitung im Projekt ist es notwendig diese aufzulösen und allen Rasterpunkten innerhalb eines Wechselstandortes eine eindeutige Standortform zuzuordnen. Dabei wurde nach den Merkmalen Feinbodenform, Grundwasserstufe, unterlagerte Böden und Übersandungen differenziert. Zur Unterscheidung der Feinbodenformen wurde eine Diskriminanzanalyse mit den erklärenden Relief - Kovariablen durchgeführt, die auch bei der Modellierung der Feinbodenformen bei nicht kartierten Waldflächen genutzt wurden. Die kartierten Anteilszehntel der einzelnen Standortformen wurden in den Wechselstandorten bei der Diskriminanzanalyse als a priori Wahrscheinlichkeiten eingesetzt. Bei den übrigen zu differenzierenden Merkmalen wurde der topographische Positionsindex bzw. die Grundwassertiefe genutzt. Die Standortformen wurden nach kartierten Anteilszehntel aufgeteilt. Ein Beispiel ist in Abbildung 115 dargestellt. In der 125,5ha großen Fläche wurden die Standortformen schwach grundwasserbeeinflusste Bärenthorener Sand-Braunerde (Bäs6) und grundwasserfreie Lichtenower Fuchssand-Braunerde (LnS) mit den Anteilen 60% und 40% kartiert. Es kann sowohl nach Feinbodenform als auch nach Grundwasserstufe differenziert werden. Da angenommen wird, dass die Differenzierung nach Grundwasserstufe zu besseren Ergebnissen führt als die Differenzierung zwischen den Feinbodenformen Bäs und LnS mittels Diskriminanzanalyse wird ersteres als Merkmal zur Unterscheidung verwendet. Die Standortformen werden den Rasterpunkten mittels Grundwasserstufe, Anteilszehntel und topographischem Positionsindex zugeordnet. Die Anteile der Standortformen bleiben im Ergebnis gleich.

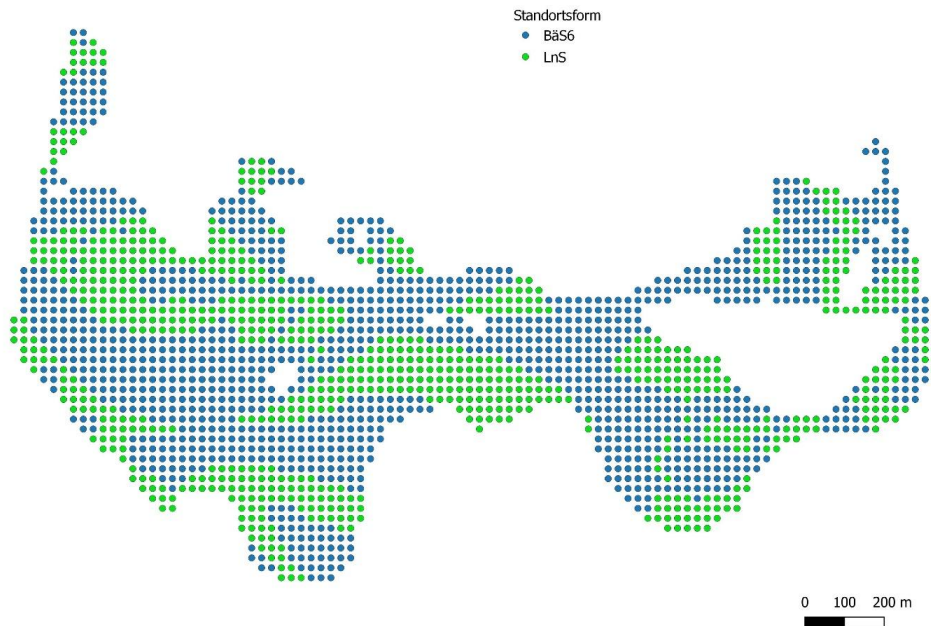


Abbildung 115: Beispiel für die Auflösung eines Wechselstandortes mit den Standortformen BäS6 und LnS. Dargestellt sind die den Rasterpunkten im Ergebnis zugewiesenen Standortformen.

Den Standortformen konnten anhand der Merkmale Feinbodenform, Übersandung und Unterlagerung, die im Projekt DSS-RiskMan entwickelten Modellbodenprofile zugeordnet werden. Ausgenommen waren Sonderstandorte, einschließlich Kipp- und Schüttstandorte. Für Komplexstandorte konnten nur teilweise Modellbodenprofile zugeordnet werden. Bei Komplexstandorten handelt es sich um eng verzahnte Standortmosaik, bei denen mehr als drei verschiedene Standortformen vorkommen. Bei Komplexstandorten bei den Informationen zur den vorkommenden Feinbodenform digital vorlagen, wurden dieselben Methoden angewandt, wie für Wechselstandorte beschrieben.

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

Um für die gesamte Brandenburger Waldfläche Bodenkennwerte zu erhalten, wurde auf bereits etablierte Methoden des „Digital Soil Mapping“ zurückgegriffen. Diese Methoden wurden ebenfalls bereits im Projekt DSS-RiskMan entwickelt und angewandt. Dabei wurden bodenchemische und -physikalische Eigenschaften für ein 100m-Raster mit Hilfe eines auf dem SCORPAN-Ansatz basierenden Verfahrens modelliert. Zu den modellierten Größen gehörten Kohlenstoffgehalt, Trockenrohdichte, pH(KCl)-Wert, Basensättigung, Kationenaustauschkapazität und Basenvorräte sowie nutzbare Feldkapazität (Russ, 2015, Riek und Russ, 2016). Die Modelle basieren auf Analysedaten von BZE2-Messpunkten und zusätzlichen Bodenanalysen, Ableitungen aus dem DGM25, Klimakennwerte sowie Wald- und Laubholzanteil. Die Größen wurden jeweils tiefenstufenweise nach den BZE-Tiefenstufen modelliert. Im Projekt wurden die im DSS-RiskMan - Projekt etablierten Modellfunktionen mit aktuellen Eingangsdaten bezüglich Wald- und Laubholzanteil angewandt.

Für C/N-Verhältnisse wurden im Projekt Modellfunktionen entwickelt. Diese sind für die Abschätzung der Verwitterungsraten im Arbeitspaket 6 notwendig. Dazu wurden Regressionsfunktionen auf Grundlage der Daten von 317 BZE-Punkten entwickelt. Als Regressoren gingen bodenchemische und -physikalische Kenngrößen, klimatische Prädiktoren, Daten zur atmosphärischen Hintergrundbelastung mit Stickstoff (Schaap et al., 2018), sowie aus einem DGM25 abgeleitete Reliefparameter ein. Angaben zu Waldtyp und Waldanteil wurden aus Copernicus-Landbedeckungsdaten 2015 entnommen. Für die Regression wurde ein schrittweises Variablenselektionsverfahren eingesetzt.

Ein Vergleich von modellierten und gemessenen Bodeneigenschaften wurde anhand der BZE-Daten und zusätzlichen Bodendaten an insgesamt 426 Punkten durchgeführt. Dazu wurden jedem BZE-Punkt aus den vier umgebenen Rasterpunkten die am besten bezüglich des Bodentyps und Grundwasserflurabstands passenden Rasterpunkte ausgewählt und ihre Kennwerte gemittelt (Abbildung 116).

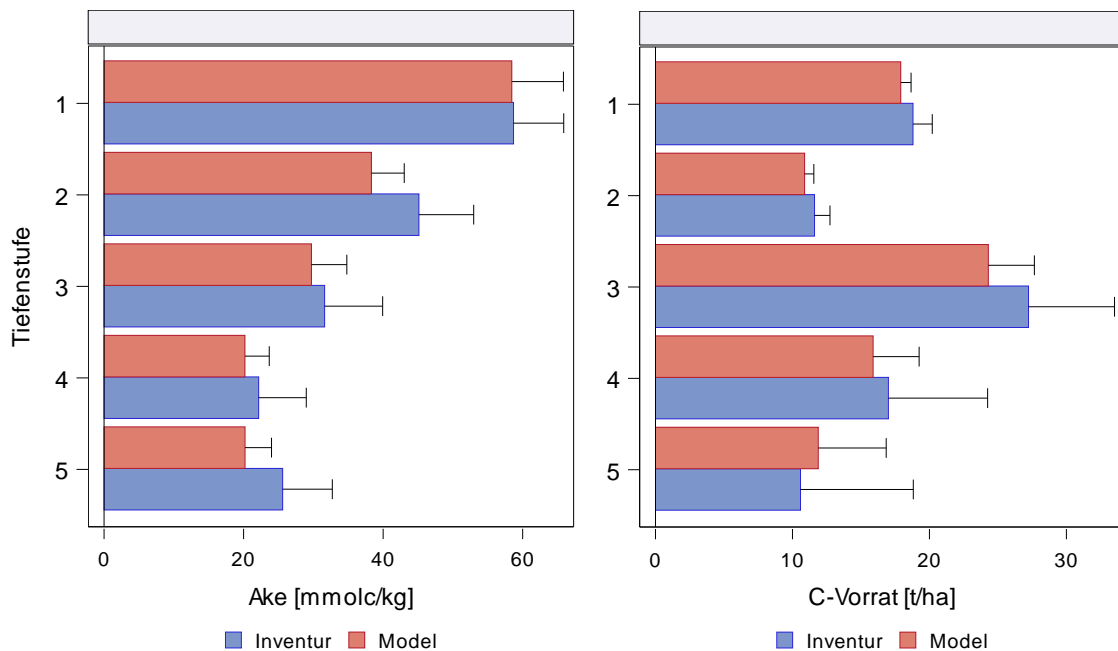


Abbildung 116: Vergleich von gemessenen mit modellierten Werten der Austauschkapazität (links) und des Kohlenstoffvorrates (rechts) des Feinbodens an Brandenburger Probepunkten (n = 426), mit Tiefenstufe 1 = 0-5 cm, 2 = 5-10 cm, 3 = 10-30 cm, 4 = 30-60 cm und 5 = 60-90 cm Bodentiefe.

Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten

In diesem Arbeitspaket wurden die vom Projektpartner bereitgestellten Ergebnisse weiterverarbeitet. Die Baumarten wurden anhand der vom Projektpartner übermittelten Vorkommenswahrscheinlichkeiten in verschiedene Klassen eingruppiert.

Arbeitspaket 6: Nährstoffansprüche von Baumarten

Zu diesem Arbeitspaket erfolgten Zuarbeiten. Die Daten des Datenspeicher Wald (DSW) wurden hinsichtlich alternativer Baumarten ausgewertet. Dazu wurden die räumlich expliziten DSW-Daten (DSW2 2021) an den 100m-Rasterpunkten ausgelesen und hinsichtlich Baumarten und Standortformengruppe gefiltert. Es wurden nur Datensätze ausgelesen, an denen eine Behandlungseinheit (=Bestand) eindeutig einer Standortformengruppe zugeordnet werden konnte. Dieser Datensatz wurde an den Projektpartner LFE übermittelt. Anschließend wurden vom Projektpartner LFE die hinsichtlich Nährstoffansprüche erstellten Baumartengruppen übermittelt. Diese wurden in die GIS-Arbeitsumgebung überführt.

Arbeitspaket 7: Wasserhaushalt

Für die Wasserhaushaltsmodellierung wurden Methoden aus WHH-KW (Weis et al. 2023a und b) weitestgehend übernommen. Von besonderer Bedeutung ist dabei eine von der LWF Freising zur Verfügung gestellte Modifikation des Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90. Diese erlaubt die Berücksichtigung von Grundwassereinfluss durch Hinzufügen eines neuen Parameters.

Für die Modellierung des Wasserhaushalts wurde eine neue Programmumgebung aufgebaut. Dazu wurden in Python Module programmiert, die die notwendigen Eingangsdaten für LWF-Brook90 aufbereiteten, das Modell ansteuerten und den Modell-Output verarbeiteten. Dies war nötig, da zum einen das modifizierte LWF-Brook90 Modell angesteuert werden musste und zum anderen die großen Datenmengen besondere Anforderungen an die Datenverarbeitung stellten. Vom Projektpartner LWF wurde der Klimadatensatz von Dietrich et al. (2019) und Böhner et al. (2023) als NetCDF-Dateien bereitgestellt. Die Daten wurden zur besseren Handhabung für Brandenburg ausgeschnitten. Dafür wurde das R-Paket "Terra" genutzt.

Voruntersuchungen ergaben, dass es im Rahmen des Projektes zeitlich nicht möglich sein würde für alle 1.07 Mio. Punkte des Rasters der Gesamtwaldfläche den Wasserhaushalt mit LWF-Brook90 zu modellieren. Daher

wurde beschlossen, eine Stichprobe von 13.000 Punkten auszuwählen und für diese jeweils für die Bestandstypen Waldkiefer, Rotbuche und Traubeneiche die Wasserhaushaltsimulation für die historische Messperiode 1961-2020 und die Modellläufe des MPI-ESM Modells für die historische Vergleichsperiode 1971-2000 sowie für die Projektionen RCP 4.5 und RCP 8.5 durchzuführen. Die Auswahl der Flächen erfolgte dabei zufällig.

Anschließend wurden ausgewählte Wasserhaushaltskenngrößen in jährlichen Zeitintervallen mittels linearer Regressionsmodelle statistisch auf den gesamten Datensatz übertragen. Als Prädiktoren gingen ein: (1) LAI, (2) Baumart, (2) TUB-BGR-Sickerungsrate, (3) Niederschlag, (4) pot. Evapotranspiration, (5) durchschnittlicher Tagesniederschlag, (6) Hangneigung und -ausrichtung, (7) Schluff- und Tongehalt, (8) Torf-Anteil und (9) Grundwassertiefe. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anpassung größtenteils gut gelang (vgl. Tabelle 49). Bei einer Grundwassertiefe von < 1m und für Tonböden ergab sich die Notwendigkeit zu einer nachträglichen Feinjustierung der Ergebnisse. Das Verfahren ermöglichte eine weniger rechenaufwendige Abschätzung von Wasserhaushaltskenngrößen für die Waldfläche Brandenburgs bei gleichzeitiger Beibehaltung bestandes- und standortspezifischer Ausprägungen, die von einem prozessorientierten Modell wie LWF-Brook90 erfasst werden können.

Tabelle 49: Kenngrößen der statistischen Modelle für die Hochrechnung der mit LWF-Brook90 ermittelten Wasserhaushaltskenngrößen auf das gesamte 100m-Raster.

	RSQ	CV [%]	RMSE
Bestandesniederschlag [mm]	0.89	2.7	12.0
Theta (100cm) []	0.97	10.9	0.01
Sickerung (100 cm) [mm]	0.89	9.2	12.7
Trockenstresstage (TI < 0.7) [n]	0.86	26.4	3.2
Transpirationsdefizit [mm]	0.86	26.4	6.1

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Für die Projektbearbeitung wurde eine GIS-Arbeitsumgebung aufgebaut. Über die Brandenburger Waldfläche wurde ein 100m-Punkteraster gelegt. An diesen Punkten wurden alle relevanten Daten zusammengeführt:

- Standortkarte 2021, Untere Forstbehörde des Landes Brandenburg.
- Forstgrundkarte Brandenburg 2021, Untere Forstbehörde des Landes Brandenburg.
- ATKIS-Basis-DLM © GeoBasis-DE/LGB, dl-de/by-2-0, 2021
- MoorFIS, Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (MIL) des Landes Brandenburg, 2013.
- Grundwasserflurabstand, Darstellung auf der Grundlage von Daten des Landes Brandenburg, 06/2013, Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (MUGV)
- Vorläufige Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:250.000 (BUEK250), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2021.
- Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:250.000 (GÜK250), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2021.
- Digitales Geländemodell DGM25 Brandenburg, ©Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg 2004.
- Dominant Leaf Type 20m, HRL Forest Product, © European Union, Copernicus Land Monitoring Service 2015 European Environment Agency (EEA)
- PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland (Schaap et al., 2018).
- 250m-Klimadatensatz der Universität Hamburg (Dietrich et al., 2019, Böhner et al., 2023).

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

Um den Bedarf an Standortinformationen und die individuellen Kenntnisse darüber bei Kleinprivatwaldbesitzer/-innen zu ermitteln, wurde eine Fragebogenaktion durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse wurde die Entscheidung getroffen eine Smartphone-App zu erstellen, in der Standortinformationen auf einfache Weise als Indikatoren präsentiert werden. Zusätzlich soll ein erläuterndes Beiwerk entstehen, eine „Standortfibel“, in der boden- und standortkundliche Grundkenntnisse vermittelt werden.

Es wurde beschlossen, als Smartphone-App das frei verfügbare QField (<https://qfield.org>) zu nutzen und die Informationen in Form eines 100x100m-Rasters als Download zur Verfügung zu stellen. Damit ist es möglich, die Informationen sowohl auf einem PC als auch unterwegs auf dem Smartphone abzurufen. Für die QField-App wurden, basierend auf dem in der GIS-Umgebung erstellten 100m-Raster, Kenngrößen aus verschiedenen Themenbereichen ausgewählt und in einfache Indizes überführt.

Weitere Details zu diesem Arbeitspaket finden sich im Hauptteil des Berichts.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Für Brandenburg wurde ein Prototyp einer QField-Anwendung entwickelt, der aus einem 100m-Punkteraster besteht, das über die gesamte Brandenburger Waldfläche gelegt ist. An den Rasterpunkten können standortspezifische Informationen abgerufen werden, die die Themen Klima, Boden, Wasserhaushalt, Baumarteneignung und nachhaltige Nutzungsintensität abdecken. Die Daten der verschiedenen Themenbereiche wurden für die QField-Anwendung in einfache Indizes überführt, die es auch Nutzern ohne fachliches Hintergrundwissen ermöglichen, deren Bedeutung intuitiv zu erfassen.

Daten zu bodenchemischen und -physikalischen Kenngrößen stehen als erweiterte Standortinformationen an den 100m-Rasterpunkten zur Verfügung (Abbildung 117). Die Eignung des Standorts für Baumarten hinsichtlich ihrer Ansprüche an Nährstoffe und Klima kann für Gruppen von Baumarten, die sich in ihren Ansprüchen ähneln, an den Rasterpunkten abgelesen werden.

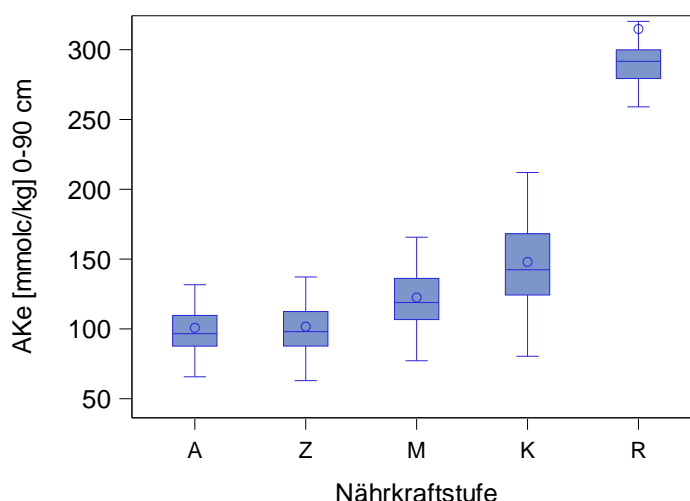


Abbildung 117: Modellierter Kationenaustauschkapazität nach Nährkraftstufe der SEA (Schulze et al., 1993) für grundwasserferne Böden des 100m-Rasters. Darstellung der Nährkraftstufen ohne „+“ - und „C“ - Stufen.

Die im Teilvorhaben gewonnenen Ergebnisse zum Wasserhaushalt zeigen eine deutliche Zunahme des Trockenstresses zwischen den Perioden 1961-1990 und 1991-2020 sowie eine zukünftige Zunahme des Trockenstressrisikos in beiden verwendeten Emissionsszenarien im Zeitraum 2071-2100. Die Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien sind dabei gering. Substrateigenschaften und Grundwasseranschluss können die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in gewissem Maße abmildern.

Teilvorhaben 6: Nährstoffansprüche von Hauptbaumarten und wichtigen alternativen Baumarten in Deutschland

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens 6 bestand darin, die Nährstoffansprüche der Hauptbaumarten sowie relevanter alternativer Baumarten in Deutschland systematisch zu erfassen und in einem einheitlichen Rahmen darzustellen. Grundlage hierfür war eine umfassende Literaturrecherche. Des Weiteren war vorgesehen, Daten von brandenburgischen forstlichen Versuchsflächen in die Auswertungen zum Nährstoffbedarf der Baumarten einzubeziehen. Die betrachteten Baumarten umfassten neben den in Deutschland etablierten Hauptbaumarten auch standortheimische Neben- und Mischbaumarten sowie potenziell klimaresiliente Arten aus Südeuropa, dem östlichen Mittelmeerraum und Nordamerika, die für künftige klimatische Bedingungen in Deutschland relevant sein könnten.

Außerdem wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HNEE modellbasiert abgeleitete Boden- und Standortinformationen in einem Referenzgebiet – dem Choriner Waldgebiet – durch Geländeerhebungen und Laboranalysen validiert. Dabei standen besonders heterogene Bereiche (sogenannte Wechsel- und Komplexstandorte) im Fokus, die entlang systematisch angelegter 1km-Transekte untersucht wurden.

Ein weiterer Fokus des Teilvorhabens 6 war die deskriptiv-statistische und kartographische Darstellung sowie die Plausibilitätsprüfung der modellierten Standortdaten. Zur praxisnahen Aufbereitung der Daten in einem geografischen Informationssystem (GIS) und für die Entwicklung einer Standort-App wurde zudem eine Befragung von Kleinprivatwaldbesitzer/-innen durchgeführt. Sie diente der Erhebung ihres Kenntnisstands und Informationsbedarfs und floss direkt in die GIS-Anwendung sowie in die Weiterentwicklung des Gesamtprojekts ein.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung der Beispielgebiete und Akquise der Standortdaten

In Brandenburg wurden keine Projektgebiete ausgewählt. Hier erfolgte die Umsetzung der Projektziele landesweit auf Grundlage eines die gesamte Waldfläche abdeckenden 100x100m-Punktenetzes.

Arbeitspaket 3: Zuordnung und ggf. Ergänzung von Analysedaten an Bodenprofilen

In enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner HNEE wurden modellbasiert abgeleitete Boden- und Standortinformationen in einem Referenzgebiet – dem Choriner Waldgebiet – durch Geländeerhebungen und Laboranalysen validiert. Hier wurden insbesondere Komplex- und Wechselstandorte untersucht. Auf diesen Standorten weist die Standortkarte für zahlreiche Flächen mehr als eine Standortform aus. Zur Überprüfung der modellierten Bodenformen wurde mit Bohrstock (1m) und Peilstange (2m) anhand von Bohrkernansprachen (Horizonte, Substratschichtung) die vorhergesagten Bodenformen überprüft. Insgesamt wurden 95 Bodenpunkte kartiert.

Aus den Geländeuntersuchungen und zusätzlichen Laboranalysen ergab sich mit Blick auf die Reliabilität der regionalisierten Standorteigenschaften folgendes Fazit:

Die modellierten Feinbodenformen stimmten in 57% der Fälle exakt mit den kartierten Feinbodenformen überein und wiesen in weiteren 12% der Fälle zumindest ähnliche Ausprägungen auf. Die größten Abweichungen deuten auf Unsicherheiten bei der Schätzung des Grundwasserstandes hin.

Auch bei der Modellierung chemischer Bodenparameter (pH-Wert, Basensättigung) traten Einschränkungen auf. Zwar ermöglichen die Schätzwerte eine grundsätzliche Annäherung an die Messdaten ($R^2 = 0,48$ für pH-Wert; $R^2 = 0,43$ für Basensättigung), doch bleibt die Genauigkeit auf kleinräumiger Ebene begrenzt. Um

Scheingenauigkeiten zu vermeiden, erfolgte die Bewertung der Schätzdaten in breiten Klassen. Zusätzlich wurden alle veröffentlichten Daten mit einer Angabe zur Datensicherheit versehen, die sich nach der Eindeutigkeit der Standortinformationen an den jeweiligen Bezugspunkten richtet.

Die im Projekt eingesetzten Methoden des Digital Soil Mapping lieferten wertvolle Grundlagen zur kleinräumigen Erschließung bodenkundlicher Informationen, stoßen jedoch – wie auch die klassische Standortkartierung – bei stark heterogenen Standorten an systembedingte Grenzen. Eine vorsichtige Interpretation der Daten sowie die transparente Kommunikation von Unsicherheiten sind daher unerlässlich.

Arbeitspaket 4: Klimagetriebene Artverbreitungsmodelle etablierter und alternativer Baumarten

Eine zentrale Grundlage für standörtlich fundierte Baumartenempfehlungen in Brandenburg bildet die Baumartenmischungstabelle (BMT) des MLUK (2022). Diese berücksichtigt neben waldbaulichen Erfahrungen aus der Vergangenheit auch generelle Annahmen zu den erwarteten klimatischen Veränderungen, die für Brandenburg tendenziell trockenere und wärmere Bedingungen prognostizieren. Die BMT dient somit als Orientierungshilfe für die Entwicklung resilienter Wälder durch eine möglichst hohe Baumartenvielfalt und Risikostreuung im Sinne eines „adaptiven Waldmanagements“.

Im Arbeitspaket 4 (AP4) wurden mithilfe klimagetriebener Artverbreitungsmodelle sowohl etablierte als auch alternative Baumarten hinsichtlich ihrer Eignung neu bewertet und Prognosen zur künftigen Baumartenzusammensetzung erstellt. Die Ergebnisse dieser Artverbreitungsmodelle wurden mit den standortbasierten Empfehlungen der Baumartenmischungstabelle sowie mit den Befunden zu den Nährstoffansprüchen alternativer Baumarten der Literaturstudie des Arbeitspaketes 6 (AP6) verknüpft. Im Ergebnis entstanden unter Berücksichtigung standörtlicher Empfehlungen und Klimaszenarien insgesamt 5 standortspezifische Baumartengruppen mit jeweils baumartenspezifischen Angaben zum Anbaurisiko bei mildem bzw. hartem Klimaszenario.

Arbeitspaket 5: Nährstoffbilanzen

In diesem Arbeitspaket wurden in enger Kooperation mit der HNEE die für die Nährstoffbilanzierung notwendigen Eingangsdaten aufbereitet und die vom Projektpartner bereitgestellten Ergebnisse weiterverarbeitet.

Arbeitspaket 6: Nährstoffansprüche von Baumarten

Für die Auswertung der Literatur wurden insgesamt 330 nationale und internationale Quellen zu den Standortansprüchen von Baumarten gesichtet und in einer Zotero-Datenbank dokumentiert. Darunter fanden sich Baumartensteckbriefe, Eignungstabellen und Anbauempfehlungen der Forstverwaltungen sowie Metastudien mit Standortbezug. 22 ausgewählte Quellen wurden einer vertiefenden statistischen Analyse unterzogen. Auf dieser Basis konnte ein Ranking in Form von acht Baumartengruppen entwickelt werden, die sich signifikant hinsichtlich eines Z-transformierten Indexwertes (Z-Score) zum Nährstoffbedarf unterscheiden. Die Gruppenzuordnung wurde durch ergänzende Auswertungen spezialisierter nationaler und internationaler Fachliteratur überprüft. Insgesamt wurden 56 Baumarten in Gruppen mit vergleichbarem Nährstoffbedarf eingeteilt. Innerhalb einer Gruppe gelten die Baumarten als ähnlich zu bewerten, während sie sich deutlich von den Gruppen mit abweichenden Ansprüchen unterscheiden. Für alternative Baumarten mit bislang unzureichender Datengrundlage lassen sich somit – basierend auf ihrer Gruppenzugehörigkeit – fundierte Aussagen zu ihrer Behandlung und Bewertung ableiten.

In Arbeitspaket 6 war zudem vorgesehen, Daten von brandenburgischen forstlichen Versuchsflächen in die Auswertungen zum Nährstoffbedarf der Baumarten mit einzubeziehen. Ziel war es, die Beziehung zwischen standörtlicher Nährkraftstufe und Wuchsleistung alternativer Baumarten zu untersuchen, um daraus Rückschlüsse auf deren Ansprüche an die Nährstoffverfügbarkeit zu ziehen. Insgesamt konnte eine Auswahl von

158 geeigneten Versuchsflächendatensätzen hierfür herangezogen werden. Für jede Fläche und Baumart wurden die absolute und die relative Bonität als Indikator für die Wuchsleistung berechnet und die Fünftel-Nährkraftstufe nach SEA95 anhand der jeweiligen Feinbodenformen hergeleitet. Dabei wurden auch zusätzliche Bodenaufnahmen auf den Versuchsflächen herangezogen. Insgesamt weisen die Bonitäten der Baumarten keine bzw. keine klar interpretierbaren Zusammenhänge zu den Nährkraftstufen auf. Dieses ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Stichprobenumfänge für die einzelnen Baumarten relativ gering sind und dass nicht für alle Nährkraftstufen Daten vorliegen. Zum anderen dürften waldbauliche Effekte der unterschiedlichen im Fokus der jeweiligen Fragestellung stehenden Behandlungsvarianten die natürlichen Zusammenhänge zum Standort überlagern. Des Weiteren ist die Höhenbonität möglicherweise nicht hinreichend als Indikator für die Quantifizierung des artspezifischen Nährstoffanspruches geeignet bzw. sind die hier monokausal betrachteten Zusammenhänge für eine statistisch signifikante Beweisführung zu schwach ausgeprägt.

Arbeitspaket 8: Umsetzung in geografischen Informationssystemen (GIS)

Im Rahmen des AP 8 waren die Projektergebnisse für Brandenburg in ein geografisches Informationssystem zu überführen, das es den Kleinprivatwaldbesitzer/-innen ermöglicht, leicht verständliche und anwenderbezogene Standortinformationen direkt bzw. über die sie beratenden staatlichen und nichtstaatlichen Akteure abzurufen. In Brandenburg erfolgte dies für die gesamte Waldfläche, indem praxisrelevante Informationen in einer GIS-Arbeitsumgebung zusammengestellt wurden. Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden deskriptiv-statistische und kartographische Darstellungen der verschiedenen Standortinformationen erarbeitet und diese einer systematischen Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Die Standortinformationen werden für den Nutzer in einer QField-Anwendung zur Verfügung gestellt. Anhand dieser Applikation können im Gelände per Smartphone oder Tablet Standortinformationen zu Klima, Boden, Wasserhaushalt, Baumarteneignung und nachhaltige Nutzungsintensität auf einem 100x100m-Raster abgerufen werden. Die Ergebnisse einer Umfrage (siehe AP 9) zeigten, dass die Kleinprivatwaldbesitzer/-innen zum Teil nur begrenztes standortkundliches Grundwissen aufweisen. Daher wurden die Informationen zu den Themen in einfache Indikatoren überführt, deren Bedeutung intuitiv zu erfassen ist. Die Validierung der modellbasierten Standortdaten im Gelände zeigte, dass die Vorhersagegenauigkeit an besonders heterogenen Standorten, sogenannten Komplexstandorten, eingeschränkt sein kann. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, wurden alle veröffentlichten punktbezogenen Boden- und Standortinformationen mit einer Angabe zur Datensicherheit versehen, die sich aus dem zugrundeliegenden Ableitungsalgorithmus und der Datenbasis ableitet.

Um die Informationen zugänglicher zu machen und das standortkundliche Grundwissen der Nutzer zu stärken und zu erweitern, wird die QField-Applikation von einem analogen, fachlich erläuternden Handbuch begleitet (Standortfibel). Beide Produkte werden als frei verfügbarer Download zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 9: Umsetzung in die Praxis

In Kooperation mit der Forstpraxis wurde entschieden, welche Beratungsmodelle und Informationssysteme mit Blick auf ihre Praxistauglichkeit und die Akzeptanz bei den Anwender/-innen realistisch sind bzw. was bei der Vermittlung konkreter Modelle besonders zu beachten ist. Für Brandenburg erfolgte dies anhand von Vorgesprächen und einer Onlinebefragung der Waldbesitzer/-innen, die im Projektablauf vorgezogen und gleich zu Beginn des Projektes durchgeführt wurde. Die Befragung diente der Erhebung des Kenntnisstands der Waldbesitzer/-innen sowie des konkreten Informationsbedarfs. Die Ergebnisse der Befragung flossen direkt in die Konzeption der GIS-Anwendung ein und unterstützten die Weiterentwicklung des Gesamtprojekts.

Im Ergebnis konnte auf eine Gesamtstichprobe von N=230 weitgehend komplett ausgefüllter Fragebögen zugegriffen werden. Der Rücklauf setzte sich aus insgesamt 109 Umfragen zusammen, die online beantwortet wurden (47,4%) und 121 Fragebögen, die in ausgedruckter Form zurückkamen, davon 118 (51,3%) direkt über die Waldbauernschule Brandenburg und 3 (1,3%) über einen Hoheitsförster.

86,1% der Befragten wünschten sich mehr Informationen zum Thema Standort bzw. Boden. Die Anpassung an den Klimawandel bzw. der Erhalt von Wald waren für die Befragten nach der Holzproduktion die wichtigsten Ziele bei der Waldbewirtschaftung. 62,2% der befragten Waldbesitzer/-innen gaben Boden bzw. Standort bereits jetzt als wichtiges bzw. das aus ihrer Sicht wichtigste Kriterium bei der Baumartenwahl an. Hier zeigt sich das Potenzial, welches die Bereitstellung von entsprechend aufbereitetem Fachwissen hat. Gerade angesichts zukünftiger Klimaveränderungen liegt hier eine große Chance, Waldbesitzer/-innen in die Lage zu versetzen, evidenzbasierte und damit bessere Entscheidungen für die standortgerechte Baumartenwahl und Waldbewirtschaftung zu treffen.

Der Bedarf für praxisorientierte Informationsbereitstellung zu Standort bzw. Boden ist demnach da und wird von vorhandenen Informationsquellen bisher nicht oder nur zum Teil befriedigt. Das Geoportal wird von einigen der Befragten genutzt, ist aber in der aktuellen Form für die Darstellung insbesondere auf Smartphone oder Tablet nicht optimal. In diesem Zusammenhang hat die Umfrage auch gezeigt, dass über zentrale boden- und standortkundliche Fachtermini nur ein geringes Wissen vorliegt, das insofern über den reinen Transfer von Standortdaten hinausgehend, vermittelt werden sollte. Wenn wir, wie im Fall der „Standortfibel“ auch über ein Printmedium Wissen vermitteln wollen, sollte dieses in einer besonderen Form gestaltet werden, die sich deutlich von übrigen Lehrbüchern und Praxis-Handreichungen abhebt (z.B. Aufklapptexte, vgl. „Praxishandbuch Naturschutz im Buchenwald“ (MLUK 2021)). Derzeit besteht an einem Handbuch mit Illustrationen gemäß der vorliegenden Abfrage nur ein geringes Interesse. Darüber hinaus wurde im Juni 2024 im Rahmen eines Projekttreffens in Eberswalde eine Exkursion organisiert und dazu Waldbesitzer/-innen für den fachlichen Austausch an einem konkreten Punkt des 100x100m-Rasters eingeladen. In Form eines Praxis-Workshops wurden beispielhaft an drei Bodenprofilen die punktbezogenen Standortdaten und vorläufigen waldbaulichen Empfehlungen sowie entsprechende alternative Visualisierungs- und Vermittlungsmöglichkeiten vorgestellt und diskutiert. Es nahmen ca. 30 Personen an dem Workshop teil. Darunter unter anderem Kleinprivatwaldbesitzer/-innen, Mitarbeiter/-innen des LFEs sowie Förster/-innen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Teilvorhaben 6 konnten auf der Grundlage einer Literaturrecherche insgesamt 56 Baumarten entsprechend ihres Nährstoffbedarfs in Gruppen mit vergleichbarem Anspruch eingeordnet werden. Baumarten innerhalb einer Gruppe sind dabei als standörtlich ähnlich zu bewerten. Für alternative Baumarten mit bislang unzureichender Datenlage lassen sich – basierend auf ihrer Gruppenzugehörigkeit – nun fundierte Aussagen zur Bewertung und Behandlung im forstlichen Kontext ableiten.

Für die standortbasierte Baumartenempfehlung im Land Brandenburg wurden die Ergebnisse dieser Literaturrecherche mit den Befunden der Artverbreitungsmodelle (AP 4) sowie der in Brandenburg etablierten Baumartenmischungstabelle des MLUK (2022) verknüpft. Im Ergebnis wurden unter Berücksichtigung standörtlicher Empfehlungen und Klimaszenarien insgesamt 5 Baumartengruppen ausgewiesen, wobei innerhalb jeder Gruppe einzelne Baumarten hinsichtlich ihres Risikos bei mildem bzw. hartem Klimawandel zusätzlich gekennzeichnet sind. Diese Baumartengruppen bilden eine fachlich fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung eines digitalen Entscheidungstools und wurden in die geplante Anwendung in der Standort-App integriert.

Die aufbereiteten Informationen zu den Themenbereichen Klima, Boden, Wasserhaushalt, Baumarteneignung und nachhaltiger Nutzungsintensität wurden in ein GIS überführt und sollen der Praxis über eine QField-Anwendung kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Die Applikation basiert auf einem brandenburgweiten Punkteraster mit einer Auflösung von 100x100m.