

Erweiterung der Forstlichen Standortkarte von Nordrhein-Westfalen auf der Grundlage von Klimaprojektionen und zur Entwicklung von Karten zur Eignung von Baumarten und Waldentwicklungstypen

- Projektbericht -

Bearbeitung: Stefan Schulte-Kellinghaus (GD NRW),
Alexander Weller (LB WH NRW),
Ingo Wolff (LANUV)

Datum: 11.11.2020

Zitierweise: Schulte-Kellinghaus, S., Weller, A., Wolff, I. 2020: Erweiterung der
Forstlichen Standortkarte von Nordrhein-Westfalen auf der Grundlage
von Klimaprojektionen und zur Entwicklung von Karten zur Eignung
von Baumarten und Waldentwicklungstypen - Projektbericht

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Auftrag und Aufgabenstellung	9
3	Die Forstliche Standortkarte für Nordrhein-Westfalen.....	10
3.1	Kurzbeschreibung der Forstlichen Standortkarte für Nordrhein-Westfalen	10
3.2	Berechnung des Gesamtwasserhaushalts in der FSK50	11
3.3	Gesamtwasserhaushalt sickerwassergeprägter Standorte	13
3.3.1	Wasserspeichervermögen des Bodens	14
3.3.2	Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit.....	14
3.3.3	Ersteinstufung des Wasserhaushalts	15
3.3.4	Zu- und Abschläge auf Basis der Reliefanalyse	17
3.3.5	Endeinstufung der Wasserhaushaltsklasse	19
3.4	Gesamtwasserhaushalt stauwassergeprägter Standorte.....	19
3.5	Gesamtwasserhaushalt grundwassergeprägter Standorte	20
4	Klimaszenarien für die FSK50	21
4.1	Auswahl der Klimaszenarien	21
4.2	Einbindung der Klimaszenarien in die FSK50.....	22
4.3	Einfluss der Klimaprojektionen auf die FSK50	23
4.3.1	Forstliche Vegetationsperiode	23
4.3.2	Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit	26
4.3.3	Gesamtwasserhaushaltsstufen	29
4.4	Unsicherheiten und methodische Einschränkungen bei den FSK50-Varianten auf Basis der Klimaprojektionen.....	33
5	Dürreempfindlichkeit.....	35
5.1	Grundlegendes und Methodik	35
5.2	Einfluss der Klimaprojektionen auf die Dürreempfindlichkeit.....	37
6	Standorteignungskarten für ausgewählte Baumarten	39
6.1	Grundlegendes und Methodik	39
6.2	Einfluss der Klimaprojektionen auf die Standorteignung ausgewählter Baumarten.....	41
7	Waldentwicklungstypen-Empfehlungskarten nach Standorttypen des Waldbaukonzepts NRW	45
7.1	Grundlegendes und Methodik	45
7.2	Einfluss der Klimaprojektionen auf die Empfehlungswürdigkeit ausgewählter Waldentwicklungstypen	49
8	Kartendarstellung	52
9	Bereitstellung als Internetdienst.....	54
10	Ausblick FSK5	55
11	Fazit.....	56
12	Literaturverzeichnis.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellungsbeispiel der FSK50 aus dem Raum Warstein	10
Abbildung 2:	Methodischer Ablauf bei der Ermittlung des Gesamtwasserhaushalts sickerwassergeprägter Standorte	13
Abbildung 3:	Grenzen der Wasserhaushaltsstufen in Abhängigkeit von der gewichteten nutzbaren Feldkapazität (nFK) und der klimatischen Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationsperiode (KWBv); der grüne Rahmen zeigt die aktuell in NRW vorkommenden Bedingungen	15
Abbildung 4:	Exemplarische Ersteinstufung eines Standortes mit 90 mm nFK bei einer KWBv von +40 mm; vergrößerter Ausschnitt der Grafik aus Abbildung 3 (X-Achse: KWBv, Y- Achse: nFK)	16
Abbildung 5:	Bodenfeuchteindex (BFI) für Nordrhein-Westfalen nach Auswertung des DGM10 durch die Scilands GmbH; geringe Werte gelb und rot, hohe Werte grün und blau .18	
Abbildung 6:	Historischer Temperaturverlauf (schwarz) und projizierte Temperaturverläufe bis 2100 aus den individuellen Modellberechnungen für NRW nach RCP2.6- (grün), RCP4.5- (gelb) und RCP8.5-Szenario (rot); Datenquelle: DWD: Brien et al. (2020) auf Grundlage von EURO-CORDEX und ReKlies-DE, Stand: DWD- Referenzensemble v2018.....	21
Abbildung 7:	Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW für den Zeitraum 1981-2010.....	24
Abbildung 8:	Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100	24
Abbildung 9:	Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100	25
Abbildung 10:	Aufteilung der im Waldbaukonzept verwendeten Vegetationszeit-Stufen in der Klimanormalperiode 1981-2010 und im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Modellensembles der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs	26
Abbildung 11:	Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW für den Zeitraum 1981-2010.....	28
Abbildung 12:	Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100.	28
Abbildung 13:	Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100.	29
Abbildung 14:	Aufteilung sickerwassergeprägter Wasserhaushaltsstufen in der Klimanormalperiode 1981-2010 und den Ergebnissen der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der beiden ausgewählten Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs	30
Abbildung 15:	Gesamtwasserhaushalt in NRW für den Zeitraum 1981-2010	31
Abbildung 16:	Gesamtwasserhaushalt in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100.....	32

Abbildung 17: Gesamtwasserhaushalt in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100.....	32
Abbildung 18: Darstellungsbeispiel für die Kartenauswertung zur Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten (Lippischer Wald, Horn-Bad Meinberg)	37
Abbildung 19: Einstufung der Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten in der Klimanormalperiode 1981-2010 und dem Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Medianwerte der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs	38
Abbildung 20: Standortansprüche von Waldbaumarten; Übersicht aus der überarbeiteten 2. Auflage des Waldbaukonzepts NRW (MULNV 2019, S.164/165); nach Asche u. Schulz 2010, verändert	40
Abbildung 21: Standortgerechtigkeit der Baumarten Buche, Stieleiche, Traubeneiche, Fichte, Kiefer und Douglasie in der Klimanormalperiode 1981-2010 und dem Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs.....	41
Abbildung 22: Standorteignung der Baumart Fichte im Arnsberger Wald (Lattenberg) im Rahmen der Klimanormalperiode 1981-2010	43
Abbildung 23: Standorteignung der Baumart Fichte im Arnsberger Wald (Lattenberg) im Rahmen des Klimaszenarios RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100	43
Abbildung 24: Standorteignung der Baumart Traubeneiche im Arnsberger Wald (Lattenberg) im Rahmen der Klimanormalperiode 1981-2010	44
Abbildung 25: Standorteignung der Baumart Traubeneiche im Arnsberger Wald (Lattenberg) im Rahmen des Klimaszenarios RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100	44
Abbildung 26: Empfehlung von Waldentwicklungstypen anhand von Standorttypen; aus dem Waldbaukonzept NRW (S. 64/65).....	46
Abbildung 27: Darstellungsbeispiel für die Karte "WET-Empfehlungen nach Standorttypen"; Farben kennzeichnen den Wasserhaushalt, Schraffierungen die Nährstoffversorgung	47
Abbildung 28: Darstellungsbeispiel für einen flächenindividuellen Report der Kartenanwendung „WET-Empfehlungen nach Standorttypen“.....	48
Abbildung 29: Flächenanteil mit Anbauempfehlung für ausgewählte Buchen- (WET 20-28) und Eichen-Waldentwicklungstypen (WET 12-14) in der Klimanormalperiode 1981-2010 und für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs	49
Abbildung 30: Flächenanteil mit Anbauempfehlung für ausgewählte Kiefern (WET 62 u. 69), Fichten- (WET 82), Tannen- (WET 88) und Douglasien-Waldentwicklungstypen (WET 92 u. 96) in der Klimanormalperiode 1981-2010 und für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs	50
Abbildung 31: Forstliche Standortkarte auf der Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000 in der WMS-Darstellung; Ausschnitt: Nationalpark Eifel, südwestlich des Rursees; Gesamtwasserhaushalt mit farbigem Raster, Nährstoffhaushalt mit Ziffern; die Grenzlinien gelten nur für den Nährstoffhaushalt.....	52
Abbildung 32: Layerstruktur der FSK50 und ihrer Varianten	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassen des Gesamtwasserhaushalts (Wasserhaushaltsstufen) in der Forstlichen Standortkarte NRW	11
Tabelle 2: Parameter der Modellierung der forstlichen Standorteigenschaften, die für NRW zur Verfügung stehen.....	12
Tabelle 3: Klassifizierung der Gesamtwasserhaushalt-Indexwerte für vorwiegend sickerwassergeprägte Böden	19
Tabelle 4: Klassen des Gesamtwasserhaushalts bei stauwassergeprägten Böden	20
Tabelle 5: Klassen des Gesamtwasserhaushalts bei grundwassergeprägten Böden	20
Tabelle 6: Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) für NRW (räumliche Extremwerte)	23
Tabelle 7: Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationsperiode in NRW (räumliche Extremwerte)	27
Tabelle 8: Stufen der Dürreempfindlichkeit mit farblicher Darstellung in der Karte und den zugrundeliegenden Gesamtwasserhaushalts-Indexwerten (GWHx) und Wasserhaushaltsstufen	36
Tabelle 9: Stufen zur Standortgerechtigkeit von Baumarten und Bedeutung für Vitalität und Produktionsrisiko	39
Tabelle 10: Gliederung der drei Standortkriterien Vegetationszeit, Gesamtwasserhaushalt und Nährstoffversorgung im Waldbaukonzept NRW (S. 64-71); Schlüsselnummer in eckigen Klammern	45

Verwendete Abkürzungen:

ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BFI	Bodenfeuchteindex
BK5	Großmaßstäbige Bodenkarte zur Standorterkundung von NRW 1 : 5.000
BK5F	Großmaßstäbige Bodenkarte zur forstlichen Standorterkundung von NRW 1 : 5.000
BK50	Bodenkarte von NRW 1 : 50.000
DGM10	Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m
DWD	Deutscher Wetterdienst
FK	Feldkapazität
ForstGIS	Forstverwaltungsinternes webbasiertes Geoinformationssystem
FSK5	Forstliche Standortkarte 1 : 5.000
FSK50	Forstliche Standortkarte 1 : 50.000
GD NRW	Geologischer Dienst NRW
GIS	Geografisches Informationssystem
GOF	Geländeoberfläche
GWH	Gesamtwasserhaushalt; siehe auch WHH
GWHx	Gesamtwasserhaushalt-Indexwert
HYRAS	Hydrologische Rasterdatensätze des DWD
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change („Weltklimarat“)
IT.NRW	Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
KWB	Klimatische Wasserbilanz
KWBv	Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LB WH NRW	Landesbetrieb Wald und Holz NRW
MULNV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW
nFK	Nutzbare Feldkapazität; synonym auch nWSK = nutzbare Wasserspeicherkapazität
RCP	representative concentration pathway („repräsentativer Konzentrationspfad“); dient der Beschreibung des Verlaufs der absoluten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre in den Klimaszenarien des aktuellen IPCC-Klimaberichtes
Veg10	Forstliche Vegetationszeit (Anzahl Tage > 10 °C Tagesmitteltemperatur); auch Forstliche Vegetationsperiode
WET	Waldentwicklungstyp(en)
WFS	Web Feature Service
WHH	Wasserhaushalt; siehe auch GWH
WMS	Web Map Service

1 Einleitung

Die forstliche Standortkartierung erfasst die Wuchsbedingungen der Waldstandorte hinsichtlich Klima, Wasser- und Nährstoffversorgung. Sie ist damit in der Lage, sowohl das Potenzial als auch die Risiken der unterschiedlichen Standorte zu bewerten. Wie am Klimawandel, an Grundwasserabsenkungen und Immissionseinflüssen leicht nachzuvollziehen ist, besitzen die Standortbedingungen eine zeitlich und räumlich dynamische Komponente.

In Kombination mit den Standortansprüchen der Baumarten ist der forstliche Standort die zentrale Grundlage für waldbauliche Planungen und Entscheidungen. Aufbauend auf den bei der Kartierung ermittelten Standortmerkmalen können gezielt Baumarten ausgewählt werden, für die sowohl unter ökonomischen als auch ökologischen Aspekten die besten Erfolgsaussichten bestehen.

Alle Bundesländer verfügen heute über mehr oder weniger detaillierte forstliche Standortkarten oder forstlich-standortkundliche Auswertungen. In Abhängigkeit von den verfügbaren Datengrundlagen und der historischen Entwicklung der Standortkartierung sind die verwendeten Methoden zur Differenzierung der Forststandorte jedoch sehr unterschiedlich. Insbesondere weichen die Stufen des Wasser- und Nährstoffhaushalts hinsichtlich ihrer Herleitung, Bezeichnungen und Skalierungen mehr oder weniger stark voneinander ab. In der Forstlichen Standortaufnahme, dem sogenannten Blauen Buch (Arbeitskreis Standortkartierung 2016), werden die Vorgehensweisen der einzelnen Bundesländer ausführlich beschrieben und einander gegenübergestellt. Schmidt et al. (2015) vergleichen darüber hinaus sehr detailliert die Kartierverfahren der nordwestdeutschen Bundesländer.

Das Land Nordrhein-Westfalen hat im Landesforstgesetz (§ 60 Abs. 4) eine auf das gesamte Landesgebiet bezogene forstliche Standortkartierung als Grundlage für die sachgerechte Prüfung und Durchführung von Erst- und Wiederaufforstungen festgeschrieben. Schon frühzeitig entschied die Landesforstverwaltung NRW, im Rahmen der forstlichen Standorterkundung alle Bodeninformationen als neutrale Grundlagendaten vom Geologischen Dienst im Gelände nach einheitlicher Methode erheben zu lassen (Eidmann 1957; Mückenhausen 1957). Diese Entscheidung mit Weitblick versetzt NRW heute in die Lage, anspruchsvolle GIS-Modellierungen zu Fragen der Standorteigenschaften im Klimawandel auf eine solide Datenbasis zu stellen, wie es anderen Bundesländern nur in Ausnahmefällen möglich ist.

Nordrhein-Westfalen verfügt heute für knapp zwei Drittel der Landeswaldfläche über genaue Bodenkarten im Maßstab 1 : 5.000 (BK5F). Für das gesamte Landesgebiet liegt die digitale mittelmaßstäbige Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (BK50) vor. Beide Kartenwerke stehen neben ihrer Verwendung für die forstliche Standorterkundung als Informationsgrundlagen für viele weitere Anwendungsbereiche zur Verfügung, zum Beispiel für Fragen des Grundwasser- und Naturschutzes sowie des Bodenmonitorings.

Heute ist es möglich, die nach standardisierten Regelwerken erhobenen Bodeninformationen mit aktuellen digitalen Klimadaten und hochauflösenden Geländemodellen im Rahmen anspruchsvoller Modellierungen zu verknüpfen. Das Ergebnis sind praxisorientierte Auswertungen, die über leistungsfähige Informationssysteme als digitale Kartendienste (WMS, WFS) sowohl der Landesverwaltung als auch der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

Im Dezember 2018 wurde die Forstliche Standortkarte für Nordrhein-Westfalen (FSK50) als eine solche digitale, frei verfügbare Kartenanwendung veröffentlicht. Auf Basis der FSK50 wurden im Anschluss Karten zur Standorteignung wichtiger Baumarten und zur Anbauempfehlung von Waldentwicklungstypen (WET) des ebenfalls 2018 erschienenen Waldbaukonzepts NRW erstellt. Weiterhin wurden aus den Daten der FSK50 Karten zur potenziellen Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten abgeleitet. Zur waldbaulichen Risikoprävention wurden zusätzlich Varianten für zwei ausgewählte Klimaszenarien berechnet. Diese greifen auf die Daten der für Deutschland zur Verfügung stehenden Modellensembles der etablierten Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 des Weltklimarats IPCC für die ferne Zukunft (2071-2100) zurück.

2 Auftrag und Aufgabenstellung

Das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW (MULNV) beauftragte am 08.11.2019 den Geologischen Dienst NRW (GD NRW), den Landesbetrieb Wald und Holz NRW (LB WH NRW) und das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) damit, Varianten für die Forstliche Standortkarte 1 : 50.000 (FSK50) auf Grundlage von Klimaprojektionen zu erstellen. Darüber hinaus sollten, aufbauend auf der aktuellen FSK50 und den Klimaprojektionen, digitale Karten zur Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten, zur Standorteignung ausgewählter Baumarten sowie zur Anbauempfehlung von Waldentwicklungstypen (WET), gemäß der Empfehlungen des Waldbaukonzepts NRW (MULNV 2018), entwickelt werden.

Die zu erstellenden FSK50-Varianten auf Basis der Klimaprojektionen sollen die Waldbesitzenden bzw. Waldbewirtschaftenden dabei unterstützen, im Zuge des Klimawandels möglichst risikoarme waldbauliche Entscheidungen zu treffen. Insbesondere die seit 2018 andauernden, trockenheitsbedingten Kalamitätsschäden in den Wäldern NRWs machen Empfehlungen für eine standortgerechte und klimaangepasste Wiederbewaldung zahlreicher Schadflächen notwendig.

Ziel dieser Arbeiten sind somit die folgenden Kartenauswertungen:

- zwei zusätzliche Varianten der FSK50 auf Grundlage von Klimaprojektionen auf Basis von zwei ausgewählten Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100
- Karten zur potenziellen Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten für die aktuelle Klimanormalperiode (1981-2010) sowie für zwei unterschiedliche Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100
- Standorteignungskarten für 16 ausgewählte Laub- und Nadelbaumarten für die aktuelle Klimanormalperiode (1981-2010) sowie für zwei unterschiedliche Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100
- Karten zur Anbauempfehlung von Waldentwicklungstypen basierend auf den Standorttypen und Empfehlungen des Waldbaukonzepts NRW für die aktuelle Klimanormalperiode (1981-2010) sowie für zwei unterschiedliche Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100

Die Anforderungen an diese Kartensysteme waren:

- Verwendung von Klimadaten bzw. Klimaprojektionsdaten des LANUV bzw. des DWD
- Kennzeichnung der Produkte als Dienstleistung für die Landesforstverwaltung
- Bereitstellung in üblichen IT-Formaten der Landesverwaltung (internetbasierter Dienst) unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des öffentlich zugänglichen Informationsportals „Waldinfo.NRW“
- Verwendung identischer Methodik für alle Varianten der FSK50
- Anwendbarkeit der Methodik auf die in Arbeit befindliche großmaßstäbige FSK5

3 Die Forstliche Standortkarte für Nordrhein-Westfalen

3.1 Kurzbeschreibung der Forstlichen Standortkarte für Nordrhein-Westfalen

Die nachhaltige Bewirtschaftung unserer Wälder hängt entscheidend von ihrer Anpassung an den Wasser-, Nährstoff- und Wärmehaushalt ihrer Standorte ab. Im Auftrag der Landesforstverwaltung hat der Geologische Dienst NRW (GD NRW) hierfür die Forstliche Standortkarte (FSK50) entwickelt. Die FSK50 stellt die wesentlichen Entscheidungsgrundlagen für eine standortangepasste Baumartenwahl und Waldbehandlung bereit. Die Kartenanwendung wurde Ende 2018 veröffentlicht und steht jedem Interessierten über das Informationsportal „Waldinfo.NRW“ (<https://www.waldinfo.nrw.de/>) zur freien Verfügung.

Bei der FSK50 handelt es sich zusammengefasst um eine Auswertung der Bodenkarte im Maßstab 1 : 50.000 (BK50) in Verbindung mit aktuellen Klimadaten (Klimanormalperiode 1981-2010) und hochauflösenden Reliefdaten (DGM10). Als Ergebnis zeigt die FSK50 Informationen zum forstlichen Standort, wie in der Abbildung 1 beispielhaft dargestellt. Zur Beschreibung der Standorte werden drei Faktoren angezeigt:

- **Gesamtwasserhaushalt**
- **Nährstoffhaushalt** (Basengehalt)
- **Vegetationszeit** (Wärmehaushalt)

Diese drei Standortfaktoren werden im Waldbaukonzept NRW zur Ausweisung von Baumartenempfehlungen und Waldentwicklungstypen (WET) herangezogen.



Abbildung 1: Darstellungsbeispiel der FSK50 aus dem Raum Warstein

Die Angaben zum Nährstoffhaushalt (Basengehalt) stammen aus der Bodenkartierung. Die forstliche Vegetationszeit (Veg10) ist definiert durch die durchschnittliche Anzahl an Tagen pro Jahr mit einer Tagesmitteltemperatur > 10°C und kann verhältnismäßig leicht anhand der Klimadaten berechnet werden. Die Ermittlung des Wasserhaushalts ist jedoch wesentlich komplexer und beinhaltet mehrere Eingangsdaten. Da, neben der Dauer der Vegetationsperiode, insbesondere der Faktor Gesamtwasserhaushalt im Klimawandel einer starken Veränderung unterworfen ist, wird in den nachfolgenden Abschnitten die Berechnung des Wasserhaushalts in der FSK50 erläutert.

3.2 Berechnung des Gesamtwasserhaushalts in der FSK50

Der Wasserhaushalt eines Forststandortes wird durch die Bodeneigenschaften, die Lage im Relief und die klimatische Situation bestimmt. Aus ihrer Zusammenschau ergibt sich der Gesamtwasserhaushalt. Bestimmende Elemente für den Gesamtwasserhaushalt sind unter anderem:

- **Boden:** Wasserspeichervermögen, Hangzugwasser, Grundwassereinfluss, Stauwassereinfluss, Durchwurzelbarkeit
- **Relief:** Hangrichtung, Hangneigung, Hangposition
- **Klima:** Niederschlag, Temperatur, Wind

Tabelle 1: Klassen des Gesamtwasserhaushalts (Wasserhaushaltsstufen) in der Forstlichen Standortkarte NRW

Ausprägung	Klasse des Gesamtwasserhaushalts
vorwiegend durch Sickerwasser geprägte Standorte	1 sehr trocken
	2 trocken
	3 mäßig trocken
	4 mäßig frisch
	5 frisch
	6 sehr frisch
vorwiegend durch Stauwasser geprägte Standorte	7 wechsell trocken
	8 mäßig wechselfeucht
	9 wechselfeucht
	10 staunass
vorwiegend durch Grundwasser geprägte Standorte	11 grundfrisch
	12 grundfeucht
	13 feucht
	14 nass

Aus der Kombination von Boden-, Klima- und Reliefdaten werden für die Forstliche Standortkarte 14 Klassen des Gesamtwasserhaushalts (GWH; synonym Wasserhaushaltsstufen) abgeleitet (siehe Tabelle 1). Die verwendeten Begriffe haben in der forstlichen Standorterkundung eine lange Tradition. Die Klassen charakterisieren den „*standortstypischen, jahreszeitlichen Verlauf von Bodendurchfeuchtung, -durchlüftung und der davon abhängigen Bodenerwärmung mit Hilfe von Indizien über mindestens eine Klimaperiode (30 Jahre)*“ (Arbeitskreis Standortkartierung 2016, S. 275).

Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise zur Ermittlung der sickerwasser-, staunässe und grundwassergeprägten Stufen des Gesamtwasserhaushalts zusammenfassend beschrieben. Für die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Varianten zur FSK50 und den daran anknüpfenden Auswertungen ist es wichtig, die grundlegende Methodik zur Herleitung des Wasserhaushalts nochmal aufzuzeigen. Die gesamte Methodik kann im Detail an dieser Stelle jedoch nicht aufgegriffen werden und ist bei Interesse dem ausführlichen Projektbericht zur FSK50 zu entnehmen (Dworschak u. Schulte-Kellinghaus 2018).

Ziel bei der Entwicklung der FSK50 war es ein, landesweit einheitliches, maßstabsadäquates Modell auf Basis der für NRW verfügbaren Daten zu entwickeln. Alle Eingangsparameter und deren Datenquellen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Parameter der Modellierung der forstlichen Standorteigenschaften, die für NRW zur Verfügung stehen

Parameter		Quelle
Bodendaten	Bodenartenschichtung: - Bodenarten - Anteile der Bodenarten - Bodenskelett-Anteile - Humusgehalte - Karbonatgehalte - Schichtmächtigkeiten - Grundwasserstufen - Staunässestärke und -tiefenbereiche - Basengehalte	Bodenkarte, basierend auf der Ansprache der Bodenkartierer im Gelände; an Bodenaufgrabungen und bei Einzelproben abgesichert durch ergänzende Laboranalysen
	nutzbare Feldkapazität je Bodenart	Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5)
Klimadaten	klimatestische Wasserbilanz (1981-2010)	FIS Klimaanpassung, räumlich interpolierte Daten, aggregiert als Monatswerte (DWD, LANUV) 1 x 1 km Raster
	Dauer der forstlichen Vegetationsperiode (1981-2006)	DWD (HYRAS-Datensatz), auf Basis von Stationsdaten räumlich interpolierte Tageswerte (Lufttemperatur) 5 x 5 km Raster
Reliefdaten	DGM10	Geobasis NRW
	- Bodenfeuchteindex - direkter topografischer Strahlungsgenuss	Scilands GmbH, auf Basis DGM10

3.3 Gesamtwasserhaushalt sickerwassergeprägter Standorte

Die vom Geologischen Dienst entwickelte Methode zur Ermittlung des Gesamtwasserhaushalts bei sickerwassergeprägten Standorten setzt sich maßgeblich aus drei Faktoren zusammen: dem Wasserspeichervermögen des Bodens, der Klimatischen Wasserbilanz innerhalb der forstlichen Vegetationszeit sowie einer Reliefanalyse auf Basis des DGM10. In Abbildung 2 ist der methodische Ablauf zur Bestimmung des Gesamtwasserhaushalts sickerwassergeprägter Standorte skizziert. Die einzelnen Komponenten werden in den nachfolgenden Abschnitten kurz erläutert.

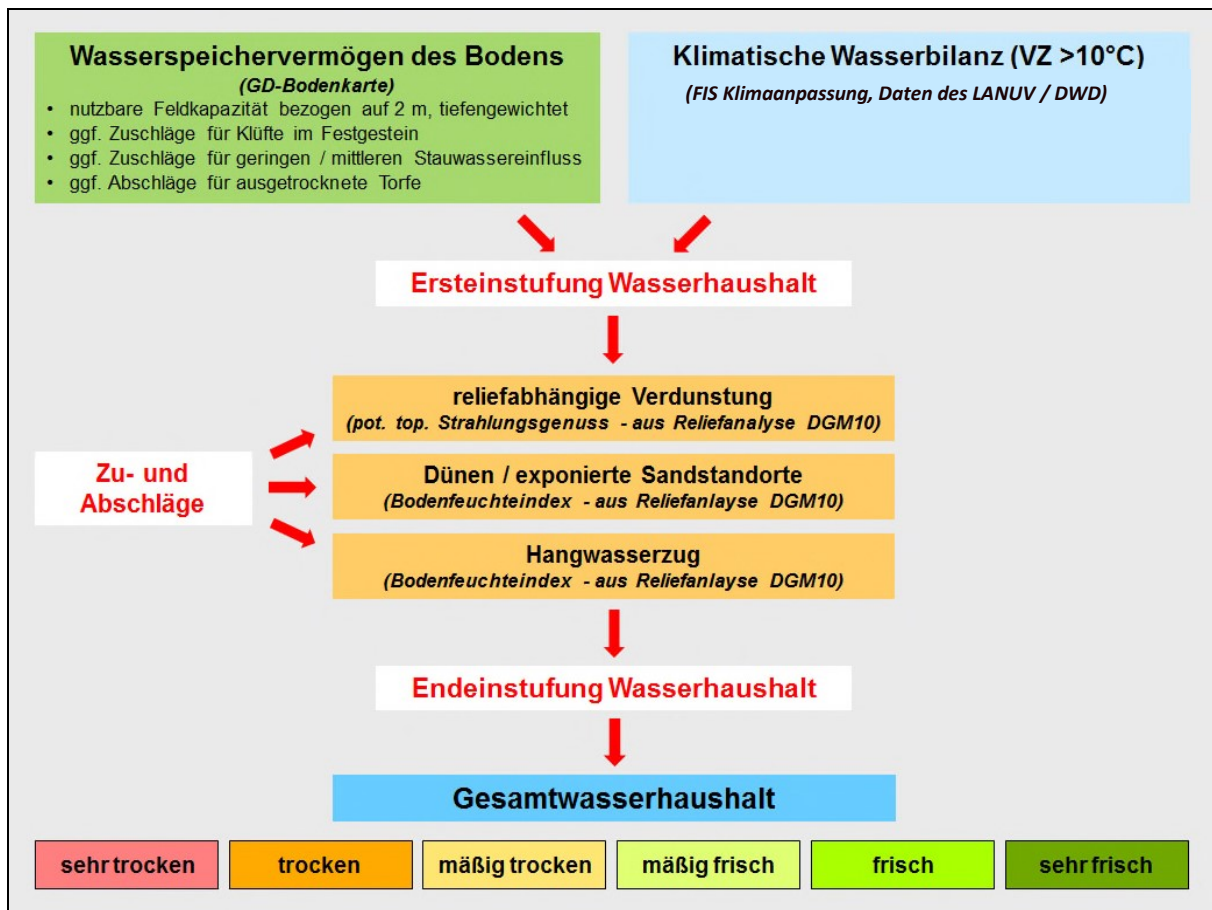


Abbildung 2: Methodischer Ablauf bei der Ermittlung des Gesamtwasserhaushalts sickerwassergeprägter Standorte

3.3.1 Wasserspeichervermögen des Bodens

Zentrale bodenkundliche Größe bei der Wasserhaushaltsbewertung sickerwassergeprägter Standorte ist die nutzbare Feldkapazität (nFK, synonym nutzbare Wasserspeicherkapazität (nWSK)). Die nFK beschreibt die maximale Wassermenge, die ein Boden pflanzenverfügbar entgegen der Schwerkraft speichern kann (AD-HOC-AG Boden 2005; Arbeitskreis Standortskartierung 2016; E DIN 4220 2017; GD NRW 2008; GD NRW 2011). Berechnet wird die nFK je Bodenartenschicht aus dem Anteil der Bodenarten bei mittlerer Lagerungsdichte, korrigiert durch volumenprozentuale Abschläge für den Grobbodenanteil (Skelettgehalt) beziehungsweise durch Zuschläge für den Humusgehalt. Die Aufsummierung der tiefengewichteten nFK aller Bodenartenschichten über die Bezugstiefe der Berechnung ergibt die gesamte nFK des Bodenkörpers. Soweit die Durchwurzelbarkeit nicht durch Festgestein, Grund- oder Stauwasser begrenzt ist, stellen die obersten 20 dm die Bezugstiefe der Berechnung dar. Um das Durchwurzelungsverhalten von Waldbäumen bestmöglich abzubilden, wird hierbei eine Tiefengewichtung vorgenommen (0-6 dm Tiefe = 100 % nFK, 7-12 dm Tiefe = 60 % nFK, 13-20 dm Tiefe = 20 % nFK). Zum Teil werden bei klüftigen Gesteinen oder geringen bis mittleren Stauwassereinfluss pauschale Zuschläge auf die nFK gewährt oder im speziellen Fall ausgetrockneter Torfe auch Abschläge.

3.3.2 Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit

Für die Erstellung der FSK50 wurden vom LANUV die aktuell verfügbaren Klimadaten für NRW (1981-2010), auf Grundlage der Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), bereitgestellt. Von diesen Daten ist die Klimatische Wasserbilanz (KWB) die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung der Wasserverfügbarkeit vor Ort. Sie ergibt sich aus der Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung (Evapotranspiration) einer Kultur, wobei für Referenzzwecke Grasland gewählt wird. Die KWB stellt damit eine quantitative Gegenüberstellung von Wassergewinn und -verbrauch in einem bestimmten Gebiet für einen festgelegten Zeitraum dar. Für die aktuelle Klimanormalperiode 1981-2010 liegen monatliche Mittelwerte der KWB im 1 x 1 km Raster vor.

Für den forstlichen Standort ist insbesondere die KWB innerhalb der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) von Bedeutung, da innerhalb dieses Zeitraumes die Bäume wachsen, Fotosynthese betreiben und Wasser verdunsten. Die Länge der Forstlichen Vegetationsperiode (Veg10) ergibt sich aus der Anzahl an Tagen im Jahr mit einer Tagesmitteltemperatur von $> 10^{\circ}\text{C}$. Zum Zeitpunkt der Erstellung der FSK50 lagen für die Veg10 nur Mittelwerte für den Zeitraum 1981-2006 in einer 5 x 5 km Auflösung vor.

Auf Basis der Veg10 und der monatlichen KWB-Werte wird die KWBv berechnet. Da die Veg10 auf Basis von Tageswerten vorliegt, kann bestimmt werden, auf welche Monate sich die Veg10 am jeweiligen Standort verteilt. Die nur monatlich vorliegenden Daten der KWB werden dabei anteilig für Frühjahr und Herbst aufsummiert. Die KWBv, die entsprechend der Veg10, im 1 x 1 km Raster bestimmt wird, kann dann jeder Bodenfläche als Attribut zugewiesen werden. Je nach Lage des Rasterzellenmittelpunkts und Größe der Bodenflächen müssen zur Zuweisung der Klimadaten Puffer verwendet werden (1/3 bis 2/3 Rasterweite).

3.3.3 Ersteinstufung des Wasserhaushalts

Aus der nFK der Bodenfläche und ihrer zugeordneten KWBv wird eine Ersteinstufung des Gesamtwasserhaushalts (GWH) sickerwassergeprägter Standorte vorgenommen. Grundlage sind die in Abbildung 3 dargestellten Beziehungen. Der Verlauf der Kurven wurde gutachterlich festgelegt und ist das Ergebnis von Auswertungen unterschiedlicher Quellen:

- Einstufung von Standorten durch die vorliegenden historischen Forstlichen Standortkarten in verschiedenen regional-klimatischen Situationen
- Einstufung von Standorten durch erfahrene ehemalige Standortkartierer der Landesforstverwaltung NRW, insbesondere in Verbindung mit Geländebegehungen
- Einstufung von Standorten durch standortkundlich versierte, erfahrene Bodenkartierer des GD NRW
- Vergleich mit der Einstufung ähnlicher Böden in dem Projekt der Digitalen Forstlichen Standortklassifikation (Asche u. Schulz 2005)
- Vergleich mit der rheinland-pfälzischen Klassifikation, in Bezug auf den grundsätzlichen Kurvenverlauf (Eder 1980; Arbeitskreis Standortkartierung 2016, S.285)

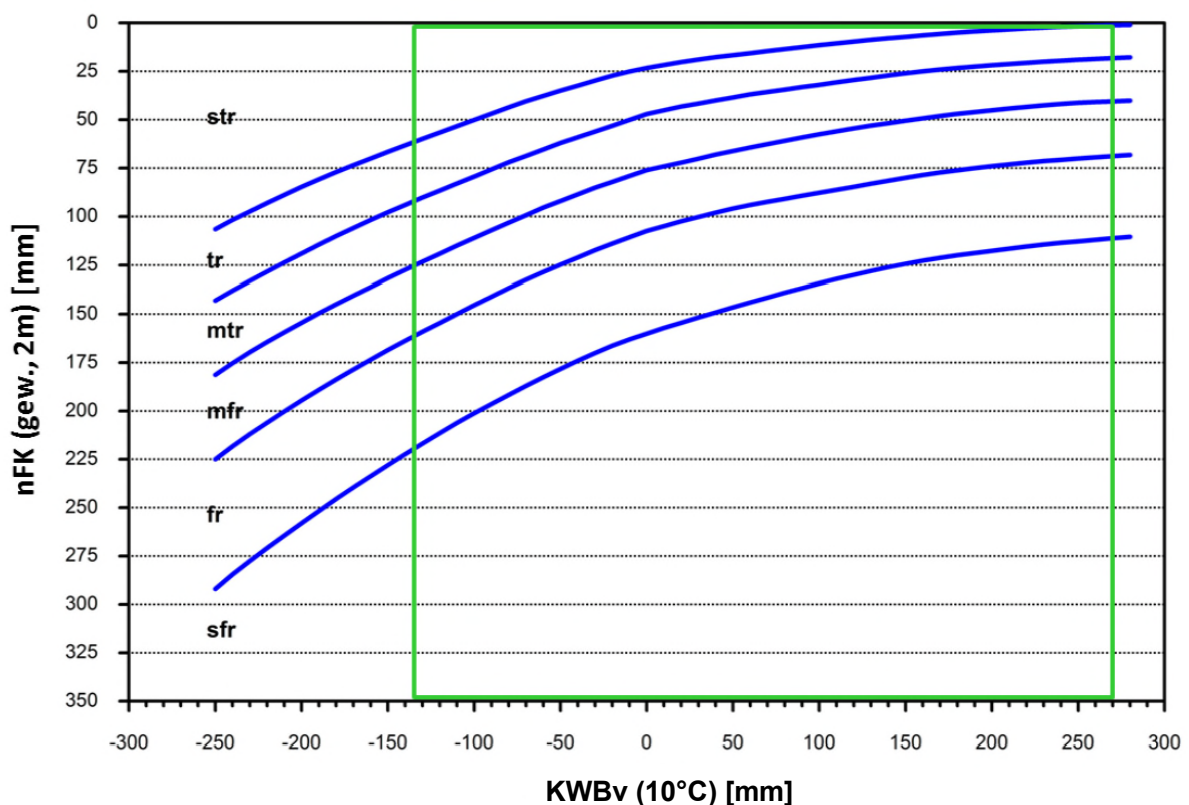


Abbildung 3: Grenzen der Wasserhaushaltsstufen in Abhängigkeit von der gewichteten nutzbaren Feldkapazität (nFK) und der klimatischen Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationsperiode (KWBv); der grüne Rahmen zeigt die aktuell in NRW vorkommenden Bedingungen

Bei der Ersteinstufung erhalten die Standorte in Abhängigkeit von nFK und KWBv Indexpunkte. Anhand des Indexpunktwertes lässt sich die Wasserhaushaltsklasse bestimmen (siehe Abbildung 4). Im Beispielfall erhält ein Standort mit 90 mm nFK und +40 mm KWBv 4,3 Punkte und liegt damit in der Stufe „mäßig frisch“, nahe der Grenze zu „frisch“. Die Festlegung der Grenzen bei sickerwassergeprägten Böden geht davon aus, dass:

- Böden mit gleicher nFK und gleicher KWBv landesweit in die gleiche Wasserhaushaltsklasse eingestuft werden
- Böden mit gleicher nFK bei steigender KWBv zunehmend frischer eingestuft werden
- Böden mit gleicher nFK bei abnehmender KWBv zunehmend trockener eingestuft werden
- mit steigender KWBv der Einfluss des Niederschlagsüberschusses den Standort immer stärker prägt, so dass die Klassenbereiche schmaler werden
- mit sinkender KWBv der Einfluss des Niederschlagsmangels und damit des Wasserspeichervermögens des Bodens für den Standort bedeutender wird, so dass die Klassenbereiche breiter werden

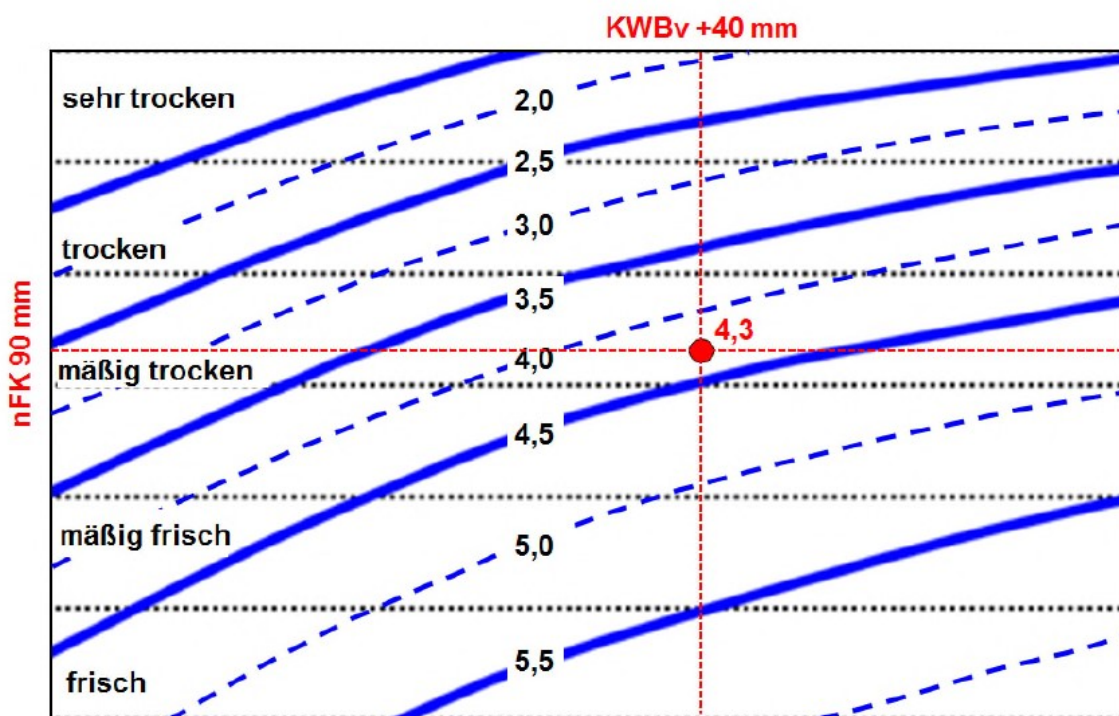


Abbildung 4: Exemplarische Ersteinstufung eines Standortes mit 90 mm nFK bei einer KWBv von +40 mm; vergrößerter Ausschnitt der Grafik aus Abbildung 3 (X-Achse: KWBv, Y-Achse: nFK)

3.3.4 Zu- und Abschläge auf Basis der Reliefanalyse

Die Indexwerte des Gesamtwasserhaushalts der Bodenflächen aus der Ersteinstufung nach nFK und KWBv werden auf Grundlage der nachfolgend kurz beschriebenen Reliefauswertung modifiziert.

Als Basis für die Reliefauswertungen wurde durch das Ingenieurbüro Scilands GmbH (Göttingen) eine Reliefanalyse mit den Daten des DGM10 durchgeführt. Das Raster von 10 x 10 m gilt für standortkundliche Auswertungen als gute Arbeitsbasis (Arbeitskreis Standortkartierung 2016, S. 17). Im Rahmen der FSK nutzt der GD NRW diese Daten zur differenzierten Bewertung der Einstrahlung (Sonn- und Schatthänge) sowie zur Abschätzung reliefgesteuerter Prozesse im Wasserhaushalt der Standorte (Hangwasserzug, Dünen).

Zur Beurteilung reliefabhängiger Verdunstung wurde der aus dem DGM10 abgeleitete „Direkte topografische Strahlungsgenuss“ verwendet. Berücksichtigt werden dabei Exposition, Geländeneigung, Abschattung, absolute Geländehöhe und Breitengrad sowie der jeweilige Sonnenstand (Köthe 2017). Gebiete mit geringem oder höherem topografischen Strahlungsgenuss werden stufenlos normiert und dienen zur Modifikation der Indexwerte aus der Ersteinstufung der Bodenflächen. Die Größenordnung der reliefbedingten Modifikation des Wasserhaushalts durch Zu- und Abschläge auf die Einstufung orientiert sich an den Zu- und Abschlägen für Sonn- und Schatthänge und Hangwasserzug, die Shrivastava und Ulrich (1977) beschreiben. Die Modifikation geht davon aus, dass im Extremfall zwischen sonnenabgewandter und sonnenzugewandter Lage eine Differenzierung von maximal einer Wasserhaushaltsstufe anzunehmen ist.

Die Scilands GmbH berechnet mit ihrer Methode des "Modifizierten Bodenfeuchteindex (W1)" den reliefabhängigen Wasserhaushalt der Landschaft, unabhängig davon, ob Wasser oberflächlich oder unterirdisch abfließt. Der Indexwert einer Zelle des DGM hängt unter anderem davon ab, wie viele Zellen des DGM ein Gefälle in Richtung der betrachteten Zelle haben und theoretisch in diese Zelle entwässern. Die geringsten Werte finden sich dementsprechend auf Kuppen oder Rücken, die keinen Zufluss besitzen. Diese kommen vor allem in den Mittelgebirgsregionen vor, aber auch in isolierten erhöhten Lagen des Münsterlandes oder des Rheinlandes. In der Abbildung 5 ist der Bodenfeuchteindex (BFI) für ganz Nordrhein-Westfalen dargestellt. Die dimensionslosen Werte des BFI dienen dazu, weitere Reliefeinflüsse auf den Wasserhaushalt der Standorte zu erfassen.

Die Erfahrung forstlicher Standortkundler, dass Dünen und andere exponierte Sandstandorte häufig trockener sind als umgebene flache Sandstandorte, wird mit Hilfe des BFI nachvollzogen. Standorte mit Böden aus 2 m Sand ohne Grundwasser- oder Staunässe-Einfluss werden dazu als potenzielle Dünen aus der Bodenkarte selektiert und die Gesamtwasserhaushalts-Indexwerte (GWHx) mit den normierten Werten modifiziert.

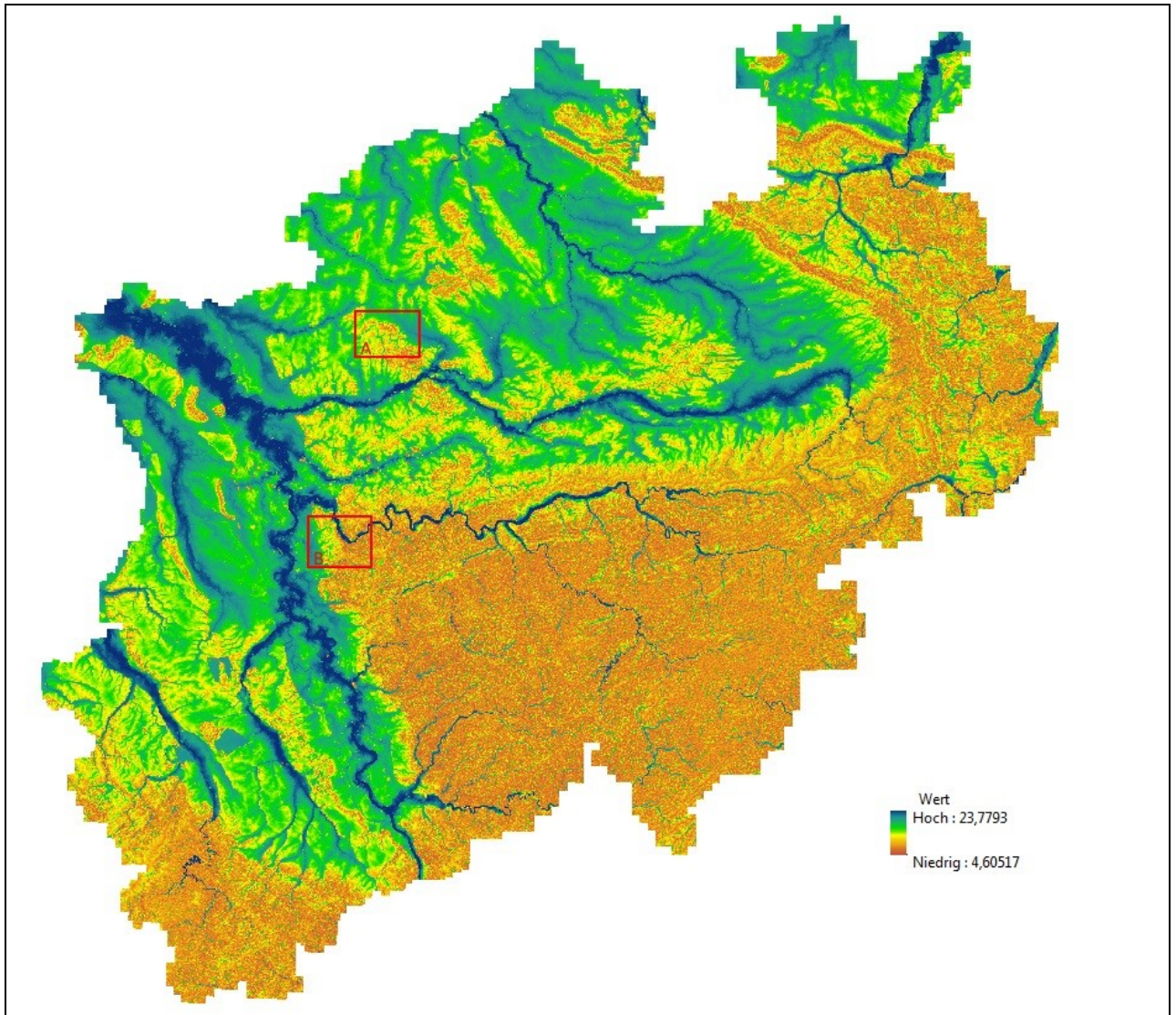


Abbildung 5: Bodenfeuchteindex (BFI) für Nordrhein-Westfalen nach Auswertung des DGM10 durch die Scilands GmbH; geringe Werte gelb und rot, hohe Werte grün und blau

Im Bergland kann Hangzugwasser, auch als Interflow oder Zwischenflächenabfluss bezeichnet, Standorte an Mittel- und Unterhängen mit Zuschusswasser versorgen. Die Mengen sind unmittelbar abhängig vom jeweiligen oberhalb gelegenen Einzugsgebiet.

Hangzugwasser, das relevant für den forstlichen Standort werden kann, entsteht überwiegend in Gebieten mit Niederschlagsüberschuss, also einer positiven klimatischen Wasserbilanz während der Vegetationsperiode (KWBv). Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass in Gebieten mit höherem Niederschlagsüberschuss bei ansonsten gleicher Lage im Relief mehr Wasser zur Verfügung steht, das hangabwärts verlagert werden kann und die Wasserversorgung am Mittel- und Unterhang verbessert.

Sowohl die räumliche Verteilung der entsprechenden Hanglagen als auch die Menge des Hangzugwassers wird mit Hilfe des BFI abgeleitet. In Bereichen mit positiver KWBv und Reliefpositionen außerhalb von Tälern oder Auen werden die Werte des BFI, mit der KWBv gewichtet und stufenlos normiert, zur Modifikation des Indexwertes der Ersteinstufung des Wasserhaushalts der Böden verwendet.

3.3.5 Endeinstufung der Wasserhaushaltsklasse

Die Endeinstufung des Wasserhaushaltes eines Standortes erfolgt in der FSK50 durch die Summierung des Indexpunktes aus der Ersteinstufung (siehe Abbildung 4) mit den jeweiligen Zu- und Abschlägen aus der Reliefanalyse. Anhand des daraus resultierenden Gesamtwasserhaushalt-Indexwertes (GWHx) wird abschließend die Klasse des Gesamtwasserhaushalts abgeleitet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Klassifizierung der Gesamtwasserhaushalt-Indexwerte für vorwiegend sickerwassergeprägte Böden

Gesamtwasserhaushalt-Indexwert	Klasse des Gesamtwasserhaushalts
GWHx < 1,5	sehr trocken
GWHx 1,5 - < 2,5	trocken
GWHx 2,5 - < 3,5	mäßig trocken
GWHx 3,5 - < 4,5	mäßig frisch
GWHx 4,5 - < 5,5	frisch
GWHx >= 5,5	sehr frisch

3.4 Gesamtwasserhaushalt stauwassergeprägter Standorte

Stauwasser ist ein nur zeitweise vorhandenes Bodenwasser, das sich auf einer tonreichen, dichtgelagerten und/oder verfestigten Bodenzone infolge einer verzögerten Versickerung des Niederschlagswassers bildet. In der Vegetationszeit wird das Stauwasser meist mehr oder weniger vollständig verbraucht. Tiefsitzender und schwächer ausgeprägter Stauwasser einfluss ist, im Sinne eines Wasserrückhalts, für den Baumbestand eher positiv zu bewerten, während oberflächennahe und stärkere Staunässe zur Behinderung der Durchwurzelung sowie zu schlechter Erwärmung und Luftmangel führt.

Durch Staunässe geprägte und dominierte Böden (z.B. Pseudogleye und Stagnogley) werden nach den Kriterien Staunässestärke und Obergrenze der Staunässe (nicht tiefer als 3 dm unter GOF) unmittelbar den Gesamtwasserhaushaltsstufen „mäßig wechselfeucht“, „wechselfeucht“ und „staunass“ zugeordnet (vgl. Tabelle 4). Beim Sonderfall „wechselfeucht-trocken“ handelt es sich um staunässegeprägte Böden in Gebieten mit negativer KWBv und niedriger nFK (< 55 mm), deren Staukörper bereits oberhalb einer Tiefe von 4 dm ansteht. Bei der Bodenkartierung im Gelände werden die Staunässeverhältnisse nach allen zur Verfügung stehenden Kriterien, einschließlich Geländelage, Vegetation und Humusform, integrierend bewertet. Weitergehende Berechnungen, wie bei den sickerwassergeprägten Böden, sind hier deshalb nicht notwendig.

Tabelle 4: Klassen des Gesamtwasserhaushalts bei stauwassergeprägten Böden

Klasse des Gesamtwasserhaushalts	Stauässestärke	weitere Kriterien
wechsel trocken	mittel	nFK gering KWBv negativ Obergrenze Staukörper < 4 dm
mäßig wechselfeucht	mittel	
wechselfeucht	stark	
staunass	sehr stark	

3.5 Gesamtwasserhaushalt grundwassergeprägter Standorte

Grundwasser ist unterirdisches Wasser, das Hohlräume zusammenhängend ausfüllt, der Schwerkraft unterworfen ist und sich durch Gefälle bzw. durch unterirdische Druckpotenziale bewegen kann. Im Gegensatz zu Stauwasser ist Grundwasser normalerweise ganzjährig vorhanden. Es unterliegt jedoch jahreszeitlich typischen Schwankungen in der Tiefenlage des Vorhandenseins sowie in Abhängigkeit vom jeweiligen Vorfluter oder anthropogenen Einflüssen. Zusätzlich zur nFK liefern durch Grundwasser beeinflusste Böden durch kapillar aufsteigendes Grundwasser weiteres pflanzenverfügbares Wasser nach.

Durch Grundwasser geprägte Standorte werden anhand der Grundwasserstufen den Wasserhaushaltsklassen „nass“, „feucht“, „grundfeucht“ oder „grundfrisch“ zugeordnet (siehe Tabelle 5). Kennzeichnend ist hierbei der mittlere Schwankungsbereich des Grundwassers unterhalb der Geländeoberfläche (GOF) während des hydrologischen Sommerhalbjahres (Mai - Oktober).

Eine Besonderheit ergibt sich für die Klasse „grundfrisch“ aufgrund des vergleichsweise tief liegenden Grundwasserschwankungsbereiches. Als „grundfrisch“ gelten in der FSK50 nur Standorte, für die sich nach der Ersteinstufung nach nFK und KWBv die Klasse „mäßig trocken“ oder „mäßig frisch“ ergibt (vgl. Abbildung 3). Bei solchen Böden ist von einer deutlichen Verbesserung des Wasserhaushalts durch Grundwasser auszugehen. Ergibt die Ersteinstufung „trocken“ oder „sehr trocken“ wird angenommen, dass das sehr tief anstehende Grundwasser von den Pflanzenwurzeln nur schwer erreichbar ist. Bei „frischer“ oder „sehr frischer“ Ersteinstufung ist zu erwarten, dass der sehr tiefe Grundwassereinfluss keinen nennenswert positiven Mehrwert verspricht. In beiden Fällen wird der Standort als rein sickerwassergeprägter Standort bewertet anstelle von „grundfrisch“.

Tabelle 5: Klassen des Gesamtwasserhaushalts bei grundwassergeprägten Böden

Klasse des Gesamtwasserhaushalts	Grundwasserstufe	Grundwasserschwankungsbereich
nass	GW1 GW1A, GW1B	0-4 dm 0-2 dm, 2-4 dm
feucht	GW2 GW2A	4-8 dm 6-10 dm
grundfeucht	GW3	8-13 dm
grundfrisch	GW4	13-20 dm abhängig von nFK & KWBv

4 Klimaszenarien für die FSK50

4.1 Auswahl der Klimaszenarien

Die klimatischen Gegebenheiten und ihre Veränderungen durch den anthropogenen Klimawandel beeinflussen die derzeitige und zukünftige Struktur des Waldes und seine Bewirtschaftung (LANUV 2018). Für die zukünftigen möglichen Standortbedingungen im Zeitraum 2071-2100 liefern die verfügbaren Klimaprojektionen (Datenquelle DWD: Brien et al. (2020) auf Grundlage von EURO-CORDEX und ReKlies-DE, Stand DWD-Referenzensemble v2018.) eine weite Bandbreite an möglichen zukünftigen Werten für Temperatur, Niederschlag und weiteren Klimagrößen. Die aktuell vom DWD genutzten Klimaprojektionen basieren auf drei verschiedenen Szenarien des Weltklimarats (IPCC), die beschreiben, wie sich die Treibhausgaskonzentrationen und somit das Klima zukünftig entwickeln könnten: Dem sogenannten „Klimaschutz“-Szenario (RCP2.6), dem sogenannten „moderaten“ Szenario (RCP4.5) mit etwas höheren Treibhauskonzentrationen als beim „Klimaschutz“-Szenario, und dem sogenannten „weiter wie bisher“-Szenario (RCP8.5) mit stetig steigenden Treibhausgaskonzentrationen (vgl. Moss et al. 2010). Bereits das „moderate“ Szenario (RCP4.5) führt zu nicht mehr handhabbaren und unumkehrbaren Veränderungen auf der Erde (vgl. Schellnhuber et al. 2016; Steffen et al. 2018).

Für jedes dieser drei Szenarien wurden mit mehreren Klimamodellen zahlreiche Berechnungen durchgeführt, die dann für jede Klimagröße jeweils eine mögliche zukünftige Entwicklung (Projektion) wiedergeben (siehe Abbildung 6). Die Projektionen des DWD für das „weiter wie bisher“-Szenario (RCP8.5) stammen zum Beispiel aus 21 Modellläufen. Jeder Modellauf ist dabei als gleich wahrscheinlich anzusehen, weshalb Klimaexperten häufig eine Bandbreite der Gesamtergebnisse darstellen.

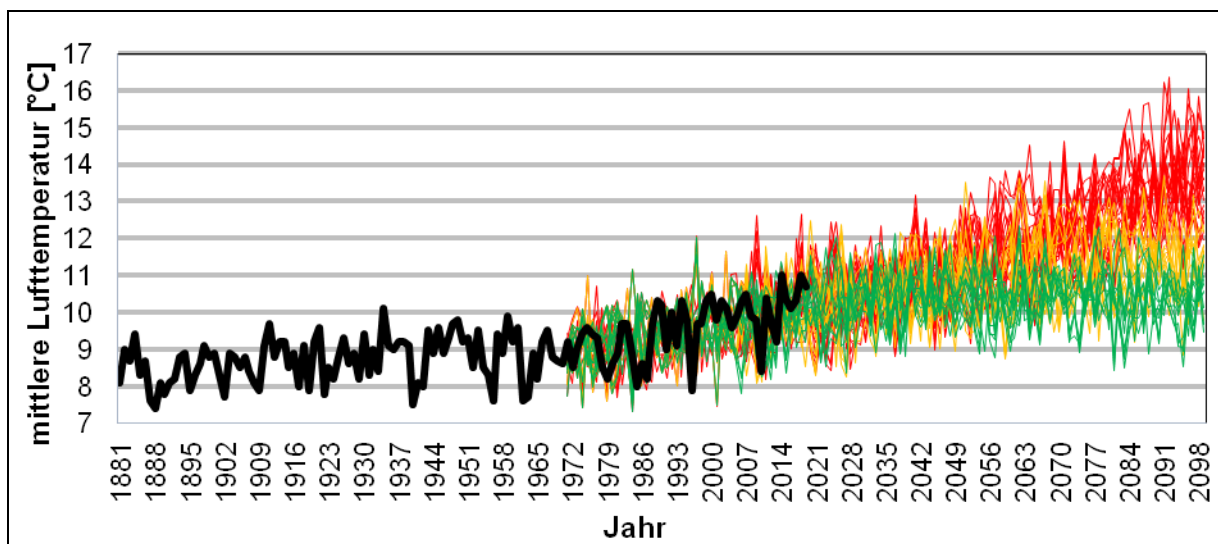


Abbildung 6: Historischer Temperaturverlauf (schwarz) und projizierte Temperaturverläufe bis 2100 aus den individuellen Modellberechnungen für NRW nach RCP2.6- (grün), RCP4.5- (gelb) und RCP8.5-Szenario (rot); Datenquelle: DWD: Brien et al. (2020) auf Grundlage von EURO-CORDEX und ReKlies-DE, Stand: DWD-Referenzensemble v2018.

Für die Berechnung der möglichen Standortbedingungen der fernen Zukunft (2071-2100) in der FSK50 sind die beiden Klimagrößen „Forstliche Vegetationszeit“ (Veg10) und „Klimatische Wasserbilanz“ (KWB) notwendig (vgl. Kapitel 3.3). Wie üblich, wurde für beide Parameter jeweils der 30-jährige Mittelwert (2071-2100) verwendet. Für die konkrete Berechnung wurden jeweils die Median-Werte für die Veg10 und für die Monatswerte der KWB aus den beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 ausgewählt. Im Sinne der Risikoprävention lag die Zielsetzung darin, die möglichen, teils gravierenden und unvermeidbaren Folgen abzubilden. Daher wurde sich für die genannten Szenarien entschieden und nicht das RCP2.6 verwendet. Obwohl alle Ergebnisse der Modellensembles als gleich wahrscheinlich anzusehen sind, wurden hier die Mediane der beiden Klimaszenarien ausgewählt, da sie bereits erhebliche Veränderungen in der Länge der Veg10 und der monatlichen KWB erkennen lassen. Diese sollen bei der Wiederbewaldung hinreichend berücksichtigt werden können, um potenzielle Waldschäden so gering wie möglich zu halten.

4.2 Einbindung der Klimaszenarien in die FSK50

Veränderungen der Veg10 aus den Projektionsergebnissen der beiden Klimaszenarien führen unmittelbar zu einer Veränderung der Forstlichen Vegetationsperiode in der FSK50. Weiterhin führen Veränderungen der Werte für die Veg10 und die KWB-Monatswerte zu einer neuen KWBv, damit zu einem veränderten GWHx, was wiederum zu Verschiebungen bei den Wasserhaushaltsklassen führen kann.

Entsprechend der vereinfachten Annahme, dass sich die forstliche Vegetationsperiode von Mai bis September erstreckt, waren für die aktuelle Klimanormalperiode 1981-2010 die Tage der Vegetationsdauer gleichmäßig auf Sommer sowie anteilig auf Frühjahr und Herbst aufgeteilt worden (vgl. Kapitel 3.3.2). Da sich im Vergleich der Klimadaten und insbesondere der phänologischen Daten eine stärkere Verlängerung der Vegetationsperiode im Frühjahr zeigt als im Herbst, wurde für die Berechnung der Veg10 auf Basis der Klimaprojektionen zu den beiden Klimaszenarien die Verlängerung der Vegetationsperiode über die Sommermonate hinaus zu 2/3 dem Frühjahr und zu 1/3 dem Herbst zugeteilt. Bei einer Neuberechnung der FSK50 auf Basis neuer Klimadaten für die Klimanormalperiode 1991-2020 wird dieses Vorgehen voraussichtlich auch auf das Basisszenario der FSK50 angewendet werden.

Im ersten Schritt der Auswertung werden den Flächen der Bodenkarte die ausgewählten Projektions-Klimadaten Veg10 und KWBv zugewiesen. Dies geschieht durch Verschneidung der Bodenpolygone mit den Rasterzellen. Dabei werden den Bodenpolygonen alle Werte von Rasterzellmittelpunkten, die innerhalb der Polygone einschließlich eines Puffers fallen, zugewiesen und gemittelt.

Auf Basis der nFK und der zugewiesenen KWBv-Werte wird im ersten Auswerteschritt die Ersteinstufung und Berechnung des Indexwertes (GWHx) vorgenommen. Diese erfolgt nach den festgelegten Kurvenverläufen der Grenzen der Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen). Die Vorgehensweise ist damit methodisch identisch zur Berechnung der FSK auf Basis aktueller Klimadaten (siehe Kapitel 3.3.3), um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Im folgenden Schritt erfolgt ebenfalls die Modifikation der GWHx-Werte auf Grundlage der Reliefauswertungen. Der Einfluss der Einstrahlung und Beschattung (potenzieller topographischer Strahlungsgenuss) bleibt unverändert gegenüber der FSK50 mit aktuellen Klimadaten. Die aus der Reliefanalyse abgeleiteten Zuschläge für Hangzugwasser reduzieren sich aufgrund der veränderten KWBv. Bereiche mit positiver KWBv sind deutlich kleiner und die positiven KWBv-Werte geringer.

4.3 Einfluss der Klimaprojektionen auf die FSK50

4.3.1 Forstliche Vegetationsperiode

Wie man anhand der Tabelle 6 sehen kann, verlängert sich die Forstliche Vegetationszeit (Veg10) auf Grundlage der Ergebnisse der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien im Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zum Zeitraum 1981-2010 erheblich. Während der Minimum-Wert in NRW im Zeitraum 1981-2010 bei knapp 125 Tagen im Bereich des Sauerlands lag, erhöht er sich in den ausgewählten Szenarien auf 158 bzw. 185 Tage. Ebenso steigt auch der Maximum-Wert, der im Bereich des Niederrheins auftritt. So projizieren die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die beiden ausgewählten Klimaszenarien Regionen mit bis zu 221 oder gar 249 Tagen $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur im Zeitraum 2071-2100. Betrachtet man den Mittelwert, so nimmt die Veg10 von 1981-2010 zu 2071-2100 im Szenario RCP4.5 um ca. 20 Tage zu. Im Szenario RCP8.5 sind es sogar im Schnitt 45 Tage mehr.

Tabelle 6: Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) für NRW (räumliche Extremwerte)

Räumliche Verteilung in NRW	Klimanormalperiode 1981-2010	Szenario RCP4.5, Median des Modellensembles 2071-2100	Szenario RCP8.5, Median des Modellensembles 2071-2100
Minimum	124,7 Tage	158,3 Tage	185,3 Tage
Maximum	202,9 Tage	221,1 Tage	248,6 Tage
Mittelwert	179,5 Tage	198,8 Tage	224,4 Tage

Die Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, dass es für die Veg10 in NRW nach wie vor regionale Unterschiede gibt. Betrachtet man zunächst den gemessenen Zeitraum 1981-2010, so erkennt man, dass selbstverständlich die Veg10 bzw. allgemein die Temperatur in den bewaldeten Mittelgebirgslagen deutlich niedriger ist als im Tiefland. Die kürzesten Vegetationsperioden sind im Sauer- und Siegerland sowie der Eifel anzutreffen. Die längsten Perioden tauchen entlang des Rheins auf, hier schwerpunktmäßig zwischen Köln und Duisburg. Diese Unterschiede zwischen Berg- und Tiefland bleiben auch in den Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 bestehen.

Neben den regionalen Unterschieden kann man in den Kartendarstellungen auch sichtbare Unterschiede zwischen den beiden Klimaszenarien erkennen. Bereits im „moderaten Szenario“ RCP4.5 bewegt sich die Veg10 im Zeitraum 2071-2100 im dichtbewaldeten Bergland auf dem Niveau, wie sie heute in den meisten Tieflandbereichen vorkommt (160-180 Tage). Im „weiter-wie-bisher“-Szenario“ RCP8.5 ist sie im Zeitraum 2071-2100 so lang, wie heute in den wärmsten Regionen NRWs (180-200 Tage). Demgegenüber werden für das Niederrheinische Tiefland und die Niederrheinischen Bucht Längen der Vegetationsperioden (230-250 Tage) projiziert, die man sich aus heutiger Sicht kaum vorstellen kann.

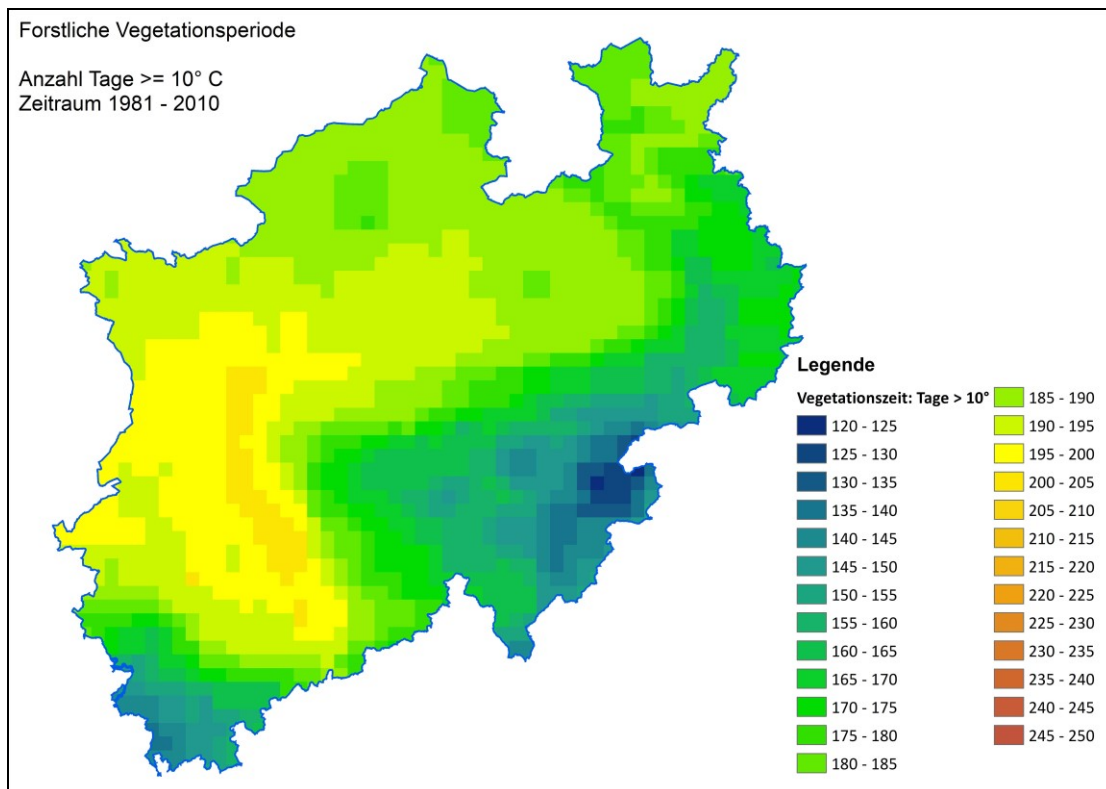


Abbildung 7: Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^\circ\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW für den Zeitraum 1981-2010

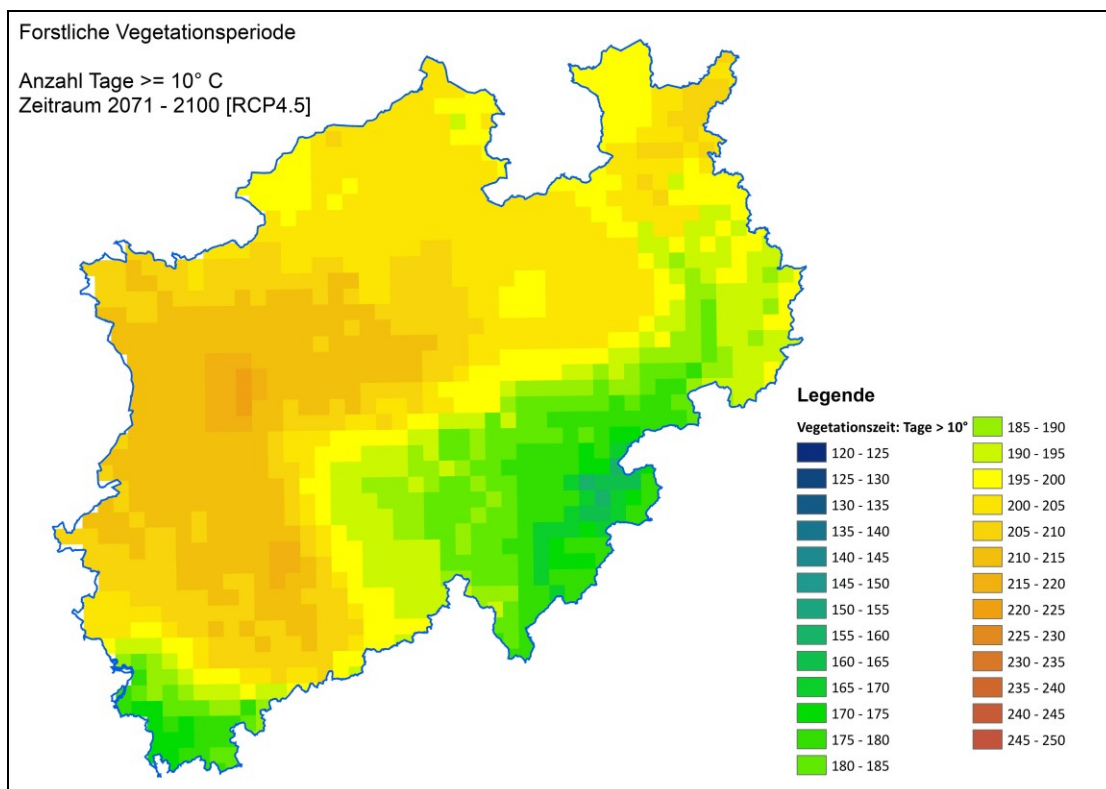


Abbildung 8: Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^\circ\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

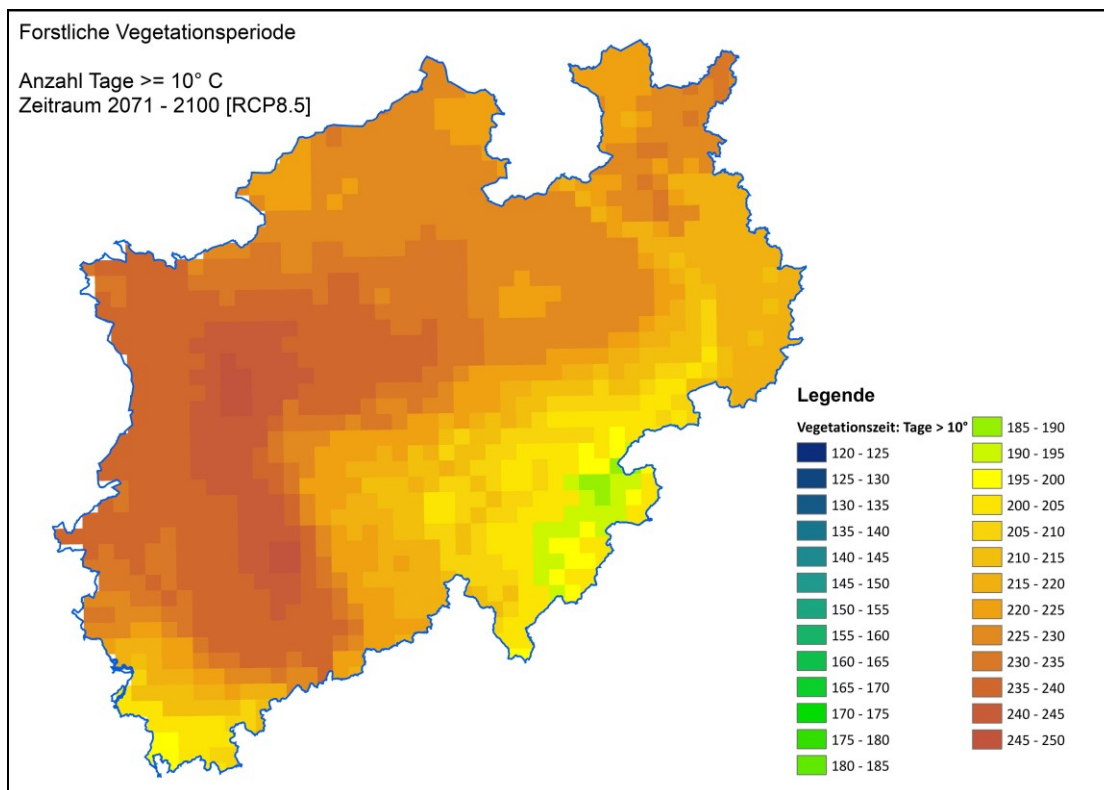


Abbildung 9: Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Jahr $\geq 10^\circ\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

Im Rahmen des Waldbaukonzeptes werden für Empfehlungen von Waldentwicklungstypen (WET) derzeit vier verschiedene Vegetationszeit-Stufen genutzt (siehe MULNV 2018, S. 32-33 u. S. 64-71). Zum besseren Verständnis werden diese vier Stufen mit den aktuellen Höhenstufen in Verbindung gebracht. Die vier Vegetationszeitstufen des Waldbaukonzeptes gliedern sich wie folgt auf:

- Vegetationszeit < 130 Tage (\approx montan/obermontan)
- Vegetationszeit 130-144 Tage (\approx submontan)
- Vegetationszeit 145-160 Tage (\approx kollin)
- Vegetationszeit > 160 Tage (\approx planar)

In Abbildung 10 ist dargestellt, wie sich die Vegetationszeit-Stufen aktuell anteilig auf die Waldfläche in NRW verteilen (Klimanormalperiode 1981-2010) und wie die Verteilung in den beiden RCP-Szenarien ist. Wie bereits aus den obigen Darstellungen zu vermuten, sorgt der Anstieg der Vegetationszeit hier zu gravierenden Änderungen. In der Klimanormalperiode 1981-2010 fallen bereits 65 % der Waldflächen in die Stufe > 160 Tage. 23 % der Waldflächen sind der Stufe 145-160 zuzuordnen, während 130-144 mit 11 % und < 130 mit gerade mal 1 % auch jetzt schon nur gering vertreten sind. In den beiden RCP-Szenarien läuft die Entwicklung dahin, dass beinahe ausschließlich (> 99,8 %) die Stufe > 160 in NRW vorkommt. Die Folge ist, dass dementsprechend auch nur noch die WET-Empfehlungen dieser Stufe innerhalb der Varianten der FSK Berücksichtigung finden. Das hat, wie man an späterer Stelle sieht, ganz entscheidende Auswirkungen auf die Empfehlung bestimmter WET.

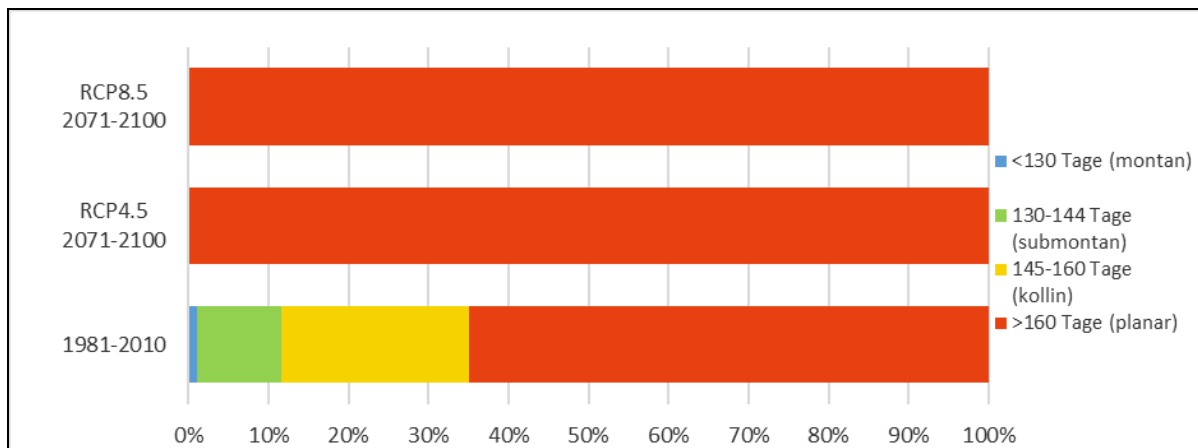


Abbildung 10: Aufteilung der im Waldbaukonzept verwendeten Vegetationszeit-Stufen in der Klimanormalperiode 1981-2010 und im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Modellensembles der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

4.3.2 Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit

In den Klimaprojektionen wird die Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit (KWBv) von den Faktoren Temperatur und Niederschlag maßgeblich beeinflusst. Die Temperaturen bestimmen die Dauer der Vegetationsperiode (Veg10), anhand derer als Bezugszeitraum die anteilige Summenbildung der KWBv geschieht (vgl. Kapitel 3.3.2). Der stetige Anstieg der Veg10 in den Ergebnissen der Klimaprojektionen bewirkt hierbei durchweg, dass sich der Bezugszeitraum der KWBv erhöht. Die projizierten Niederschläge sowie die Temperaturen, welche die Höhe der potenziellen Verdunstung bestimmen, steuern gemeinsam die KWB-Monatswerte und damit in Summe die KWBv.

Im Vergleich zur Veg10 lassen die räumlichen Extremwerte bei der KWBv keine einheitlichen Tendenzen erkennen (siehe Tabelle 7). In der Klimanormalperiode 1981-2010 lag die KWBv im Minimum bei -135 mm, im Maximum bei 271 mm, was an sich schon eine große Spanne darstellt. Der Mittelwert war mit 4,3 mm noch so gerade im positiven Bereich. Vergleicht man diese Ausgangssituation mit den Zahlen aus dem moderaten Klimaszenario RCP4.5 für 2071-2100, so ist eine negative Entwicklung erkennbar. Minimaler und maximaler Wert für die KWBv sinken merklich ab. Auch der Mittelwert befindet sich mit -47,6 mm deutlich im negativen Bereich. Es zeichnet sich somit ab, dass die Veg10 zunimmt, zugleich aber die KWBv und damit das pflanzenverfügbare Wasser innerhalb der verlängerten Vegetationsperiode abnehmen. Beim „weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5 setzt sich diese negative Entwicklung nicht so konsequent fort. Auch hier verringert sich der Minimumwert gegenüber der Klimanormalperiode 1981-2010 oder dem Szenario RCP4.5. Ebenso nimmt der Mittelwert ab, dieser ist aber nur geringfügig niedriger als bei RCP4.5. Demgegenüber erhöht sich sogar der Maximalwert auf 197 mm und ist damit etwas höher als bei dem Szenario RCP4.5. Insgesamt werden die Verhältnisse also „extremer“ durch die höhere Spannweite der räumlichen Verteilung. Obwohl sich die Veg10 beim Szenario RCP8.5 in Bezug zu RCP4.5 nochmal merklich erhöht, reduziert sich die KWBv bzw. allgemein der Niederschlag nur vergleichsweise wenig, wohingegen die Spannweite zwischen Minimum und Maximum innerhalb NRWs weiter zunimmt.

Tabelle 7: Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationsperiode in NRW (räumliche Extremwerte)

Räumliche Verteilung in NRW	Klimanormalperiode 1981-2010	Szenario RCP4.5, Median des Modellensembles 2071-2100	Szenario RCP8.5, Median des Modellensembles 2071-2100
Minimum	-135,1 mm	-168,3 mm	-200,9 mm
Maximum	271,0 mm	183,6 mm	197,0 mm
Mittelwert	4,3 mm	-47,6 mm	-59,0 mm

Wie auch schon bei der Veg10, bestehen auch bei der KWBv regionale Unterschiede, wie Abbildung 11 bis Abbildung 13 zeigen. Zunächst einmal fällt hier die gröbere Auflösung auf zwischen der Klimanormalperiode 1981-2010 mit Daten im 1 x 1 km-Raster im Vergleich zu den Klimaprojektionen der beiden ausgewählten Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100, deren Daten „nur“ in einem 5 x 5 km-Raster zur Verfügung stehen. Dies führt in den Ergebnissen der beiden Klimaszenarien unweigerlich zu einer geringeren räumlichen Auflösung und zu teils großen Sprüngen zwischen benachbarten Rasterzellen. Daher sollte erfahrungsgemäß immer ein größerer räumlicher Bereich (min. 9 Rasterzellen) betrachtet werden und keine einzelne Rasterzelle. Diese im Vergleich zur Periode 1981-2010 gröbere Auflösung und Sprünge zwischen den Rasterzellen wirken sich nicht nur auf die KWBv, sondern auch auf den darauf aufbauenden Gesamtwasserhaushalt aus, was bei der Ergebnisinterpretation im Vorfeld unbedingt zu berücksichtigen ist.

Betrachtet man zunächst einmal nur die Klimanormalperiode 1981-2010, so zeigt sich, dass die KWBv in den dichtbewaldeten Mittelgebirgsregionen Eifel, Bergisches Land, Sauer- und Siegerland sowie dem Eggegebirge im positiven Bereich liegt, aufgrund vergleichsweise hoher Niederschläge (vgl. auch LANUV 2018). Demgegenüber zeigen die Regionen Ostwestfalen-Lippe, die Westfälische Bucht und das Niederrheinische Tiefland eine ausgeglichene bis leicht negative, im Bereich der Niederrheinischen Bucht (Köln-Bonn) auch eine ausgeprägt negative KWBv. Diese hohe Differenz zwischen Tief- und Bergland besteht auch in den Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100. Im Szenario RCP4.5 nimmt die KWBv insgesamt stark ab, jedoch in den Berglandregionen stellenweise weniger stark als im Tiefland. So gibt es auch in diesem Klimaszenario nach wie vor Bereiche mit einer mittleren bis hohen positiven KWBv. Sehr auffällig ist jedoch die große Spannweite an Werten zwischen den Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. Im Szenario RCP8.5 ist im Tiefland die KWBv mit Werten von -150 bis -200 mm wie zu erwarten merklich niedriger als bei RCP4.5. Demgegenüber ist die KWBv in einigen Berglandbereichen, schwerpunktmäßig dem Bergischen Land und dem Oberen Sauerland, so hoch, dass annähernd Werte der aktuellen Klimanormalperiode 1981-2010 erreicht werden. Eine ausführliche Betrachtung der KWBv-Monatswerte zeigt, dass in diesen Regionen höhere Niederschläge in den Frühjahrs- und Herbstmonaten bei zugleich verlängerter Vegetationszeit hierfür verantwortlich sind. Diese überlagern in der Summenbildung die deutlich trockener werdenden Sommermonate. Eine zunehmende Ungleichverteilung der Niederschläge mit unter Umständen für Bäume problematisch langen Trockenphasen im Sommer kann jedoch zurzeit nicht explizit in der FSK50 berücksichtigt bzw. dargestellt werden. Es fehlen bisher die standortkundlichen Informationen und dementsprechend der methodische Ansatz, wie eine ungleiche Niederschlagsverteilung innerhalb der Vegetationsperiode bei der Einstufung des Gesamtwasserhaushalts berücksichtigt werden kann.

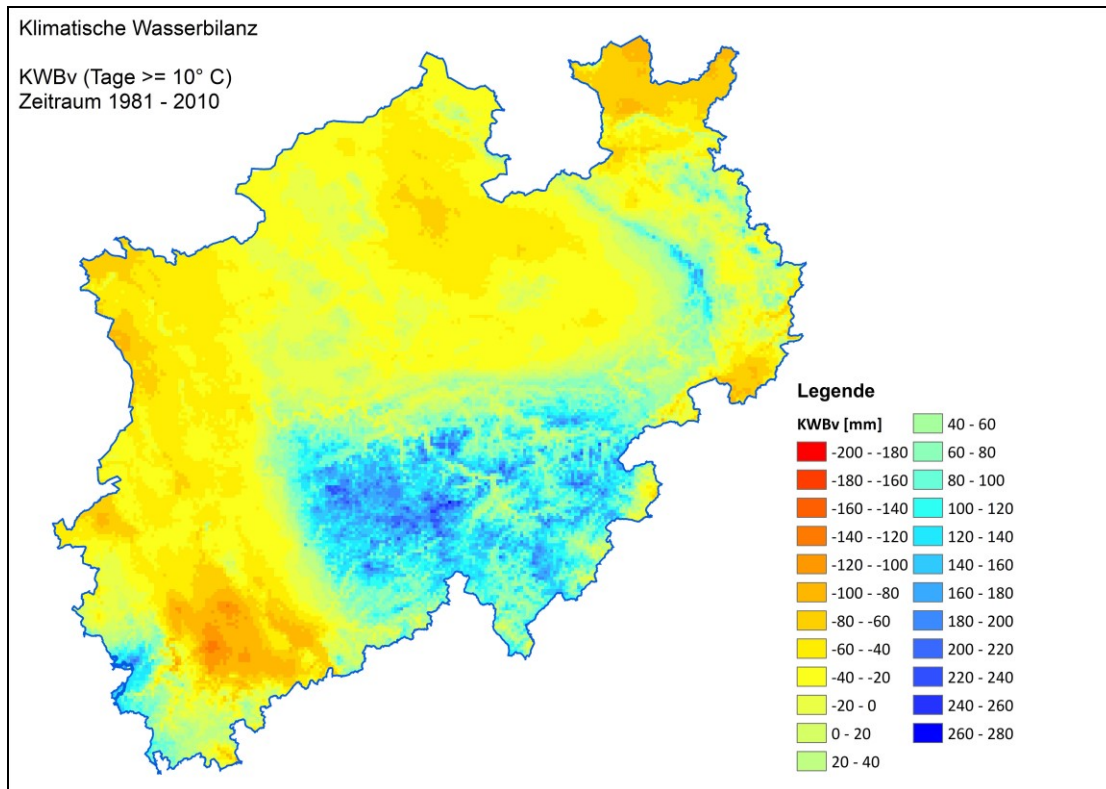


Abbildung 11: Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW für den Zeitraum 1981-2010

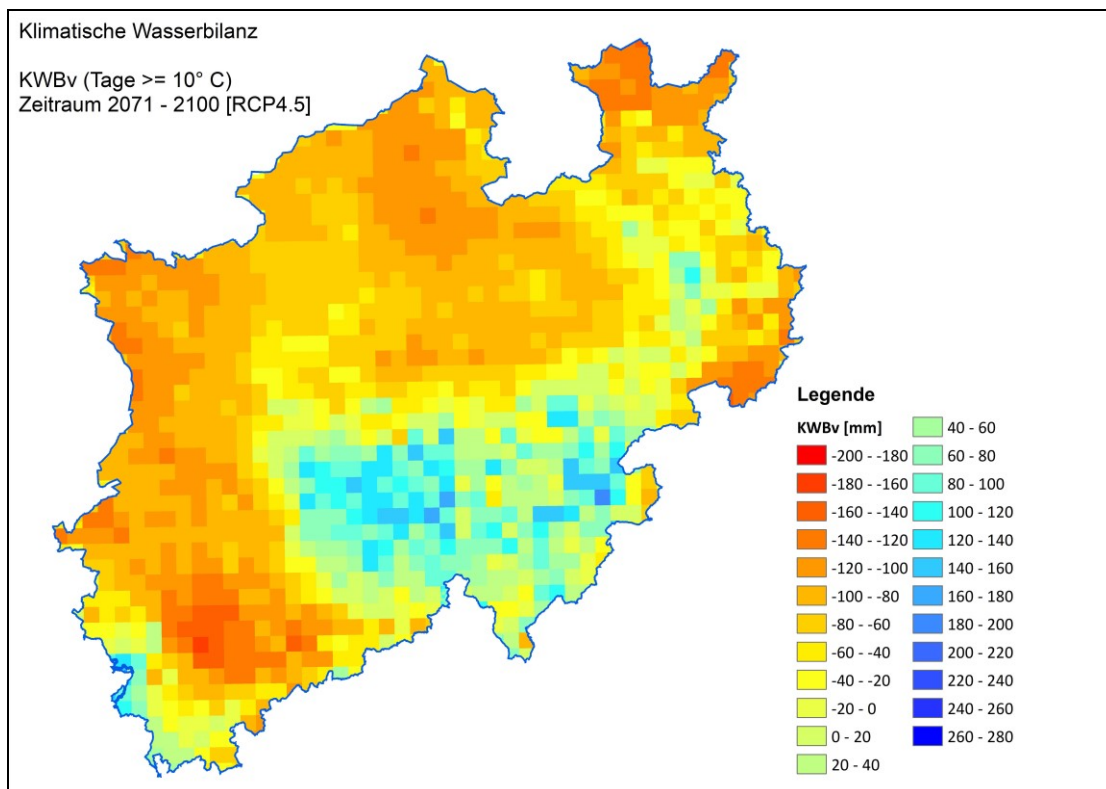


Abbildung 12: Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

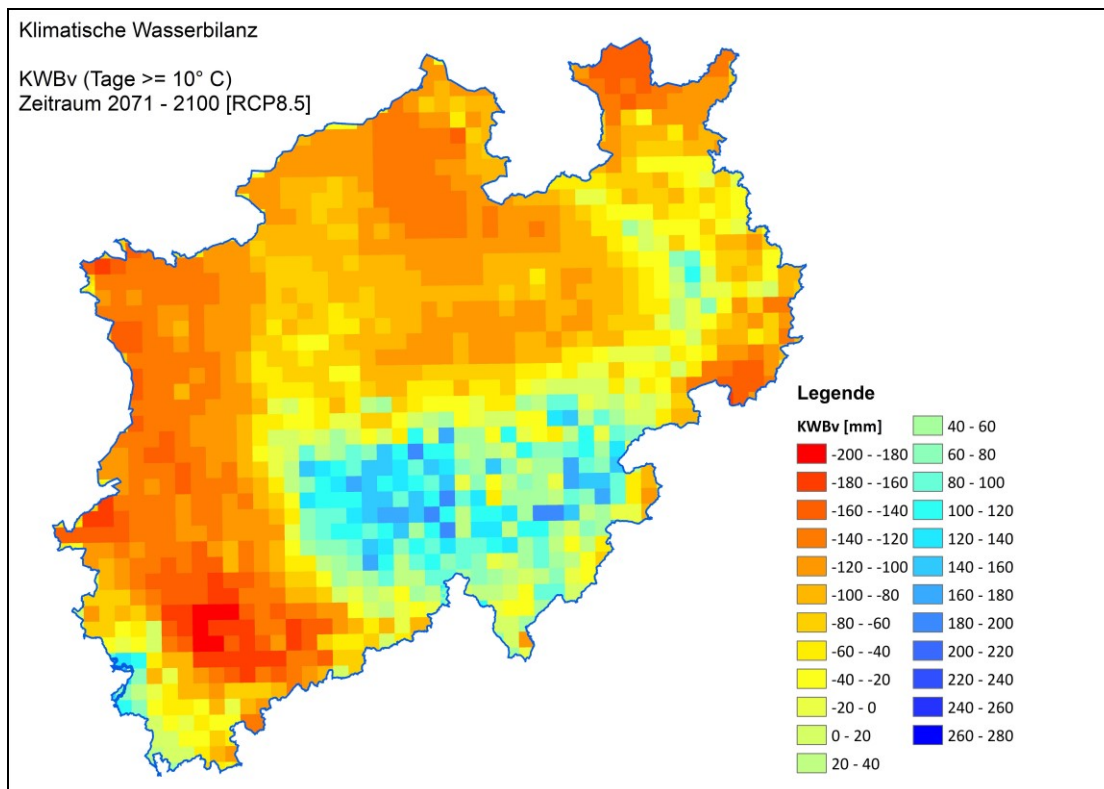


Abbildung 13: Klimatische Wasserbilanz in der Forstlichen Vegetationszeit (KWBv) in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

4.3.3 Gesamtwasserhaushaltsstufen

Wie im Kapitel 3.3 erläutert, setzen sich die sickerwassergeprägten Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) hauptsächlich aus der nFK des Bodens sowie der KWBv zusammen, ergänzt um Zu- und Abschläge aus einer Reliefanalyse. Die Ersteinstufung erfolgt dabei nach festgelegten Kurvenverläufen, die die Grenzen der WHH-Stufen definieren (vgl. Abbildung 3). Die derzeitigen Kurvenverläufe decken den Bereich der für 1981-2010 gemessenen KWBv-Werte ab (siehe grüner Rahmen in Abbildung 3). In den beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 werden jedoch KWBv-Werte für den Zeitraum 2071-2100 projiziert, die geringer sind als die aktuell für NRW vorherrschenden Bedingungen. Daher mussten hier die Kurvenverläufe für die niedrigen KWBv-Werte auf Basis der aktuellen Beziehungen extrapoliert werden, da keine Vergleichswerte zur Validierung in NRW zur Verfügung stehen. Die Extrapolation beruht auf dem prinzipiellen Verlauf der an den bisherigen Klima- und Standortverhältnissen entwickelten und validierten Verläufen:

- bei gleicher nFK abnehmende GWHx-Werte bei abnehmender KWBv, d.h. Absinken der Kurven,
- bei abnehmender KWBv zunehmende Bedeutung der KWBv gegenüber der nFK, d.h. zunehmende Abstände zwischen den Kurven.

In der Konsequenz bedeutet das, dass mit abnehmender KWBv die Kurvenneigung zunimmt und die Abstände zwischen den WHH-Stufen größer werden.

Im Rahmen der Ergebnisse der beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 für den Zeitraum 2071-2100 ändert sich der Parameter KWBv, was bei sickerwassergeprägten Standorten zu einer Neueinstufung des WHH führen kann. Standorte, die sich in ihrer Einstufung nicht verändern, sind all die von Grundwasser (grundfeucht, feucht, nass) sowie die von Staunässe (mäßig wechselfeucht, wechselfeucht; staunass) geprägten Standorte. Diese machen rund 205.000 ha (24 %) der Waldfläche NRWs aus. Im Rahmen des verwendeten Modells zur Einstufung des Gesamtwasserhaushalts gibt es noch keinen Ansatz, inwieweit sich diese Standorte im Klimawandel verändern könnten. Bei Jahresniederschlagssummen, die sich voraussichtlich nicht sehr stark verändern, ist derzeit noch keine Entwicklungstendenz beim Grundwasser, insbesondere für die Grundwasserverhältnisse während der Vegetationszeit, abzusehen. Grundwasserabsenkungen sind derzeit immer auf anthropogenen Einfluss zurückzuführen. Ebenso bleiben stauwassergeprägte Böden auch bei einer Verschiebung der Niederschläge innerhalb des Jahres in ihrer Ausprägung immer noch wechselfeucht, auch wenn sich die Trocken- und Nassphasen im Jahresverlauf verschieben oder die Wechsel zwischen Trocken- und Nassphasen ausgeprägter werden können.

Die Abbildung 14 zeigt die Aufteilung der sickerwassergeprägten WHH-Stufen für die Klimanormalperiode 1981-2010 sowie deren Veränderung in den Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien. Hier zeichnen sich klare Tendenzen ab. „Sehr trockene“ und „trockene“ Flächen nehmen von < 2 % auf 5,6 % in RCP4.5 und sogar 7,7 % in RCP8.5 zu. Auch der Anteil „mäßig trockener“ Standorte steigt von derzeit 9,8 % auf 15,1 % bzw. 15,3 % merklich an. Die WHH-Stufe „mäßig frisch“ nimmt bei RCP4.5 von 19,2 % auf 24,1 % zu, bei RCP8.5 nur auf 22,2 %. Während die trockeneren Stufen erkennbar zunehmen, verringern sich dementsprechend die besser wasserversorgten drastisch. Die Stufe „frisch“ verringert sich von 33,1 % auf 23,1 % in RCP4.5 und 22,9 % in RCP8.5. Ebenso nimmt der Anteil an „sehr frischen“ Standorten von aktuell 11,2 % in beiden ausgewählten Szenarien auf 7,0 % ab. Insbesondere eine Verschiebung von „frisch“ in „mäßig frisch“ oder „mäßig frisch“ in „mäßig trocken“ hat für die WET-Empfehlung entscheidende Auswirkungen, aufgrund der Aggregation der WHH-Stufen im Waldbaukonzept, wie man an späterer Stelle sieht.

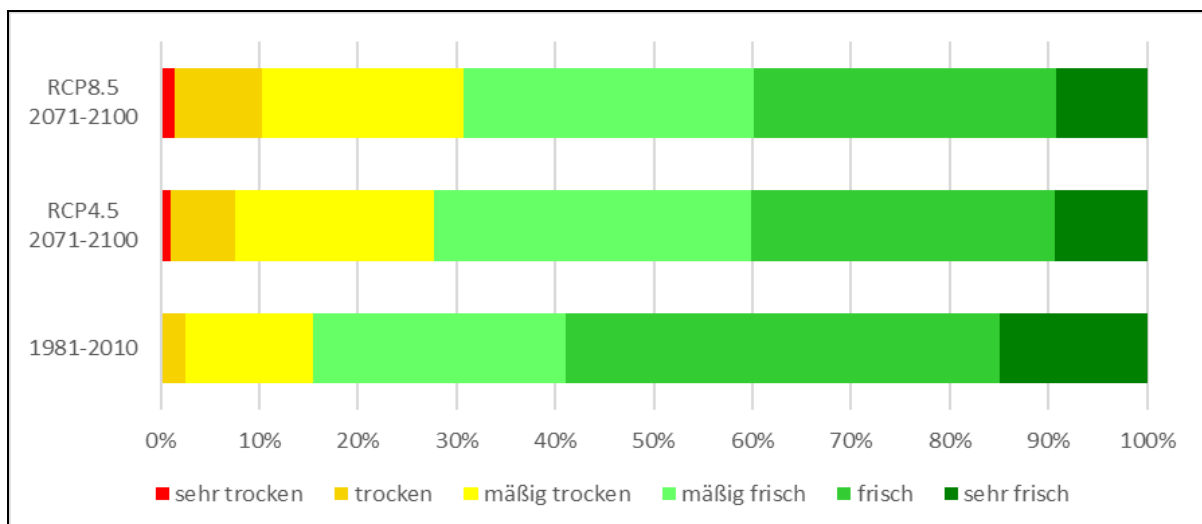


Abbildung 14: Aufteilung sickerwassergeprägter Wasserhaushaltsstufen in der Klimanormalperiode 1981-2010 und den Ergebnissen der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der beiden ausgewählten Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

Wie schon bei der KWBv, zeigen sich auch bei den WHH-Stufen regionale Unterschiede in den Ergebnissen (vgl. Abbildung 15 bis Abbildung 17). Was im Vergleich der Klimanormalperiode 1981-2010 mit den Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auffällt ist, dass überall mosaikartig viele Standorte eine WHH-Stufe trockener werden, bei den Ergebnissen für das Szenario RCP8.5 entsprechend mehr als bei RCP4.5. Es sind aber auch Bereiche erkennbar, bei denen sich die Einstufung des WHH in den Klimaprojektionen nicht ändert. Insbesondere fallen hier Gebiete ins Auge, die aktuell als "sehr frisch" oder „frisch“ eingestuft sind und trotz sinkender KWBv "sehr frisch" bzw. „frisch“ bleiben. Der Vergleich mit der zugrundeliegenden Bodenkarte (BK50) zeigt, dass es sich dabei oftmals um Gebiete mit mächtigen Wasserspeicherkapazitäten handelt (z.B. Lössböden der Niederrheinischen Bucht oder am Haarstrang). Die nFK ist in diesen Fällen so groß, dass die Standorte auch bei merklich negativer KWBv in ihrer WHH-Stufe verbleiben. Darüber hinaus gibt es auch im Bergischen Land sowie Sauer- und Siegerland Bereiche, für die sich keine Änderung der WHH-Stufe ergibt. Wie in Kapitel 4.3.2 bereits erläutert, handelt es sich hier um Gebiete, für die sich punktuell keine starken Veränderungen der KWBv ergeben und/oder die KWBv trotz Reduktion noch in einem ausreichend positiven Bereich verbleibt. Auch wenn sich in den genannten Fällen die WHH-Stufe nicht reduziert, so kommt es jedoch nahezu überall zu einer Verringerung des zugrundeliegenden Gesamtwasserhaushalts-Indexwertes (GWHx; siehe Kapitel 3.3.5). Ob die Reduktion des GWHx zu einer anderen WHH-Stufe führt, hängt jeweils davon ab, ob sich ein Standort innerhalb seiner Stufe eher im oberen Bereich (nächst feuchtere Stufe) oder im unteren Bereich (nächsttrockenere Stufe) befindet. Dementsprechend führt eine Verringerung um bis zu 0,25 Indexpunkte nur selten zu einer Verschiebung der WHH-Stufe, eine Reduktion über 0,50 Indexpunkte jedoch recht häufig.

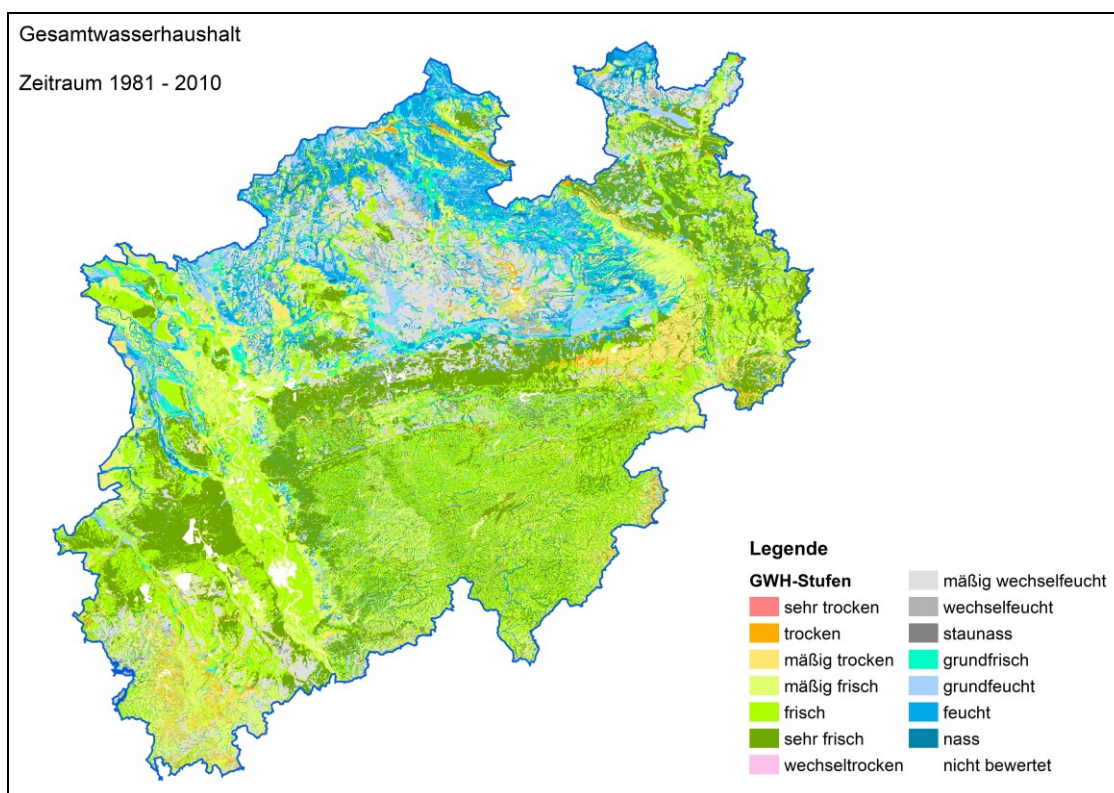


Abbildung 15: Gesamtwasserhaushalt in NRW für den Zeitraum 1981-2010

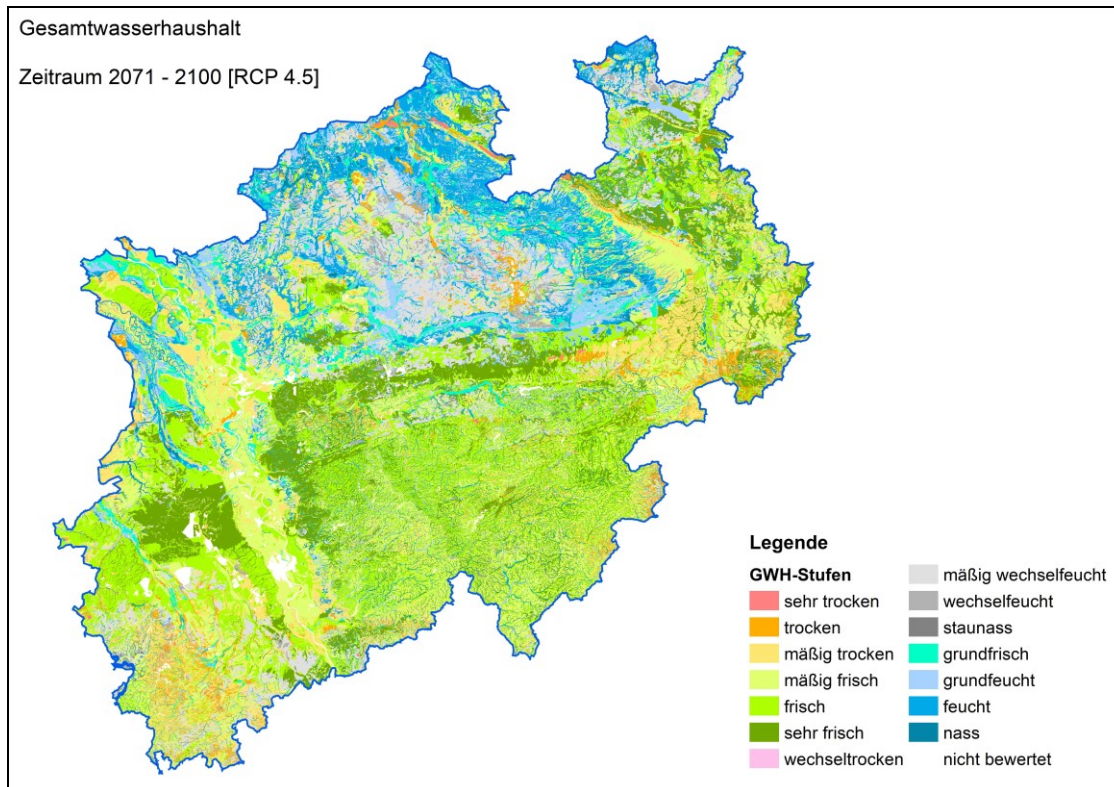


Abbildung 16: Gesamtwasserhaushalt in NRW im Klimaszenario RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

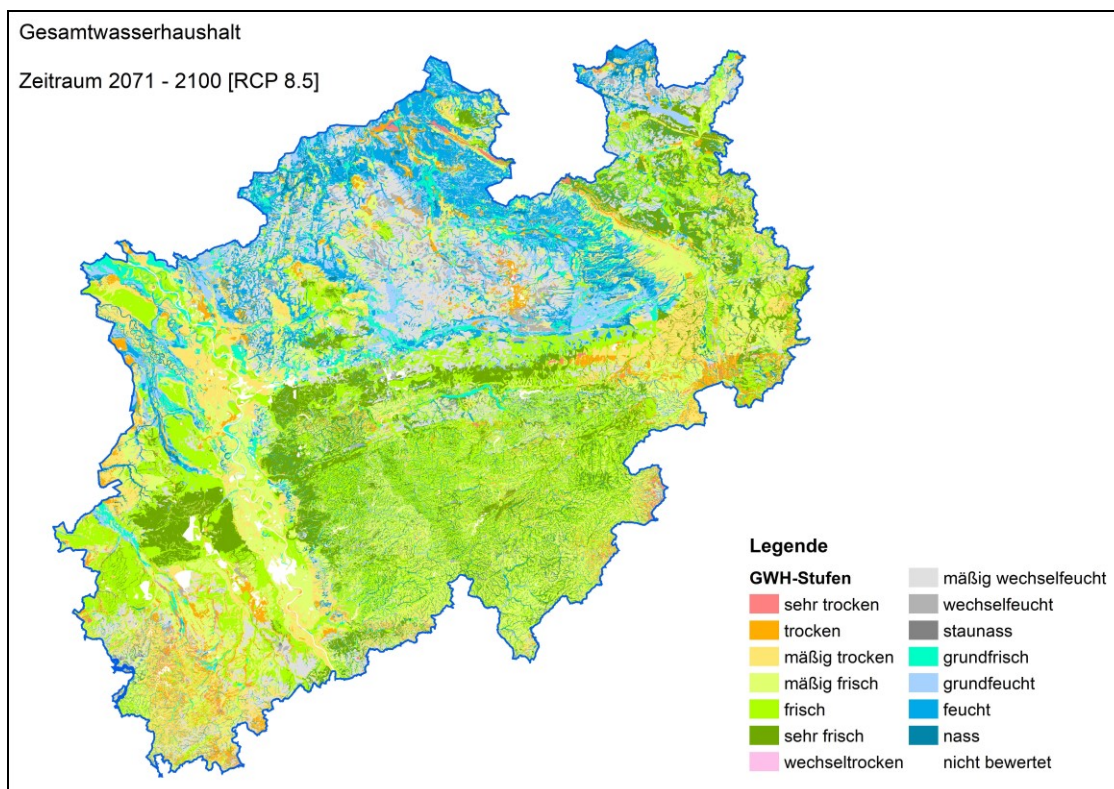


Abbildung 17: Gesamtwasserhaushalt in NRW im Klimaszenario RCP8.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

Neben den gezeigten Flächenauswertungen wurde, im Sinne einer Plausibilitätsprüfung, auch eine punktuelle Einzelfallbetrachtung für mehrere Waldstandorte durchgeführt. Für 50 verschiedene, über NRW verteilte Waldstandorte (verdichtet im Bergland), wurden die standörtlichen Basisdaten, die aktuelle Einstufung (Klimanormalperiode 1981-2010) und die Einstufungen in den beiden Varianten für den Zeitraum 2071-2100 gegenübergestellt. Diese Einzelfallbetrachtungen untermauerten die aus den flächigen Auswertungen gewonnenen Eindrücke.

Bei den 50 Einzelfallbetrachtungen reduzierte sich der WHH in 20 Fällen bei RCP4.5 und in 25 Fällen bei RCP8.5 um eine Stufe im Vergleich zur Klimanormalperiode 1981-2010. In einem Fall kam sogar eine Reduktion um zwei Stufen vor. Das bedeutet, dass die veränderten Klimaparameter in den Klimaprojektionen bei der Hälfte aller Standorte zu einer Verschlechterung des WHH um eine Stufe führen. Auf der anderen Seite bleibt bei gut der Hälfte aller beobachteten Standorte die WHH-Stufe unverändert, aufgrund der bereits genannten Gründe (hohe nFK; weiterhin ausreichend positive KWBv). Auch wenn es bei diesen Fällen zu keiner Verschiebung der WHH-Stufe kommt, so ist jedoch immer eine Reduktion innerhalb der jeweiligen Stufe, also beim GWHx, zu beobachten. Innerhalb dieser Einzelfallbetrachtung gab es im Sauer- und Siegerland sowie im Bergischen Land ebenfalls einige Standorte, wo die KWBv im „weiter-wie-bisher“-Szenario RCP8.5 im Vergleich zum „moderaten“ Szenario RCP4.5 höher ist. Dies sorgt jedoch bei keinem dieser Fallbeispiele dazu, dass die WHH-Stufe beim Szenario RCP8.5 höher (frischer) ausfällt, als beim RCP4.5-Szenario. Diese Einzelfallbetrachtung bestätigte damit, dass auch bei gleichbleibenden oder leicht zunehmenden Niederschlägen, keine vollkommen fragwürdigen oder zu optimistischen Ergebnisse entstehen, die beim Anwender waldbauliche Risikoentscheidungen provozieren. Sie zeigt aber auch, dass die Ergebnisse aufgrund der räumlichen Unsicherheit der Daten der Klimaprojektionen nur mit Vorbehalt zu interpretieren sind.

4.4 Unsicherheiten und methodische Einschränkungen bei den FSK50-Varianten auf Basis der Klimaprojektionen

Bei der Nutzung der FSK50 muss die Datengrundlage bedacht werden, um zu keinen unangemessenen Schlüssen zu kommen. Dies gilt umso mehr für die beiden Varianten auf Grundlage der Klimaprojektionen, die auf Basis von Modellensembles der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 (jeweils Median) für die ferne Zukunft (2071-2100) berechnet wurden. Die beiden Varianten zur FSK50 werden nach dem gleichen methodischen Ablauf berechnet, wie das Basisszenario mit Messdaten der Periode 1981-2010. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die Varianten der FSK50 enthalten aber mehrere Unsicherheitsfaktoren, die berücksichtigt werden müssen. Diese sind zusammengefasst wie folgt:

- Die verwendeten Klimaprojektionsdaten beruhen nicht auf Messwerten, sondern sind das Ergebnis komplexer Modellrechnungen, die Ergebnisse mit einer erheblichen Streubreite liefern, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten gleich wahrscheinlich sind.
- Für die Berechnung der Varianten der FSK50 kann nicht mit Spannen gerechnet werden, sondern es müssen feste Werte verwendet werden. Verwendet wurde für die Parameter KWB sowie Veg10 jeweils der Median aus den Modellensembleergebnissen.

- Die Klimamodelle liefern Ergebnisse für die KWB und Veg10 in einem 5 × 5 km-Raster. Da die Rasterzellen mit 5 × 5 km sehr groß sind, kommt es bei stärkerem Relief (Bergland) zu großen Sprüngen zwischen benachbarten Zellen. Außerdem hängt ein Rasterzellwert entscheidend davon ab, ob der Rasterzellmittelpunkt im Hang, im Tal oder auf einer Kuppe liegt, die möglicherweise alle von derselben Rasterzelle abgedeckt werden.
- Die unterschiedliche Auflösung zwischen den Daten der Klimanormalperiode 1981-2010 mit KWB-Daten im 1 x 1 km-Raster im Vergleich zu den Ergebnissen der Klimaprojektionen mit Daten im 5 x 5 km-Raster für den Zeitraum 2071-2100 führt in den beiden Varianten der FSK50 unweigerlich zu einer geringeren räumlichen Auflösung und ebenfalls zu nicht ganz nachvollziehbaren Sprüngen zwischen benachbarten Rasterzellen.
- Die Basis der Berechnung des Gesamtwasserhaushalts der FSK50 und ihrer Varianten ist gleichermaßen die Bodenkarte BK50 in Verbindung mit den Reliefdaten. Das Ziel ist es, Ergebnisse mit vergleichbarer räumlicher Auflösung und methodisch gleichgewichtigem Einfluss der Boden- und Reliefeigenschaften zu erzeugen. Deshalb wurde bewusst in Kauf genommen, dass die rasterzellscharfe Verwendung der Klimaprojektionsdaten eine erhöhte Unsicherheit der Ergebnisse mit sich bringt.
- Für den Bereich der KWBv, der in NRW von den aktuellen Klimadaten abgedeckt wird (KWBv \geq -125 mm), ist die nFK-KWBv-Beziehung durch standortkundliche Erfahrung validiert. Die Erweiterung der Beziehung bis KWBv $<$ -125 mm ist eine Extrapolation der bestehenden Beziehungen ohne die Möglichkeit zur standortkundlichen Validierung in NRW.
- In beiden Szenarien, aber insbesondere im Szenario RCP8.5, werden gerade auch in Teilen des Berglands höhere Frühjahrs- und Herbstniederschläge projiziert, welche bei der summarischen Berechnung der KWBv über die erheblich trockener werden den Sommermonate „hinwegtäuschen“. Diese zunehmende Ungleichverteilung der Niederschläge mit unter Umständen für Bäume problematisch langen Trockenphasen im Sommer kann jedoch bisher nicht explizit in der FSK50 berücksichtigt bzw. dargestellt werden.

In Anbetracht dieser Punkte ist daher, bei gleicher Maßstabsbegrenzung und gleicher Detailliertheit der Darstellung, von einer größeren fachlichen Unsicherheit und einer geringeren räumlichen Auflösung bei den Varianten der FSK50 auszugehen. Die Ergebnisse bzw. Aussagekraft der Klimamodelle, obschon recht gut, werden sich in Anbetracht der Brisanz und des gewachsenen gesellschaftlichen Interesses in den nächsten Jahren deutlich weiterentwickeln. Insbesondere eine höhere räumliche Auflösung zukünftiger Modelle ist für die standortkundliche Bewertung von großer Bedeutung. Hinzu kommt, dass auch das Basis-szenario der FSK50 mit Vorliegen neuer Messdaten (Klimanormalperiode 1991-2020) angepasst werden kann und dadurch neue Vergleichsmöglichkeiten entstehen. Im Hinblick auf den Klimawandel muss ebenso die Methodik zur standortkundlichen Herleitung der Wasserhaushaltsstufen kontinuierlich geprüft und fortentwickelt werden. Zum Beispiel hinsichtlich der Veränderung wechsel- und grundfeuchter Standorte oder zur Berücksichtigung bzw. Gewichtung längerer Trockenphasen im Sommer sowie einer verstärkten Ungleichverteilung von Niederschlägen im gesamten Jahresverlauf.

5 Dürreempfindlichkeit

5.1 Grundlegendes und Methodik

Unter Dürre versteht man einen Mangel an Wasser, der im Vergleich zu üblichen Werten durch

- weniger Niederschlag,
- höhere Verdunstung infolge erhöhter Temperatur oder infolge verstärkten Winds

verursacht wird.

Im Allgemeinen werden drei Typen von Dürre unterschieden:

- *Meteorologische Dürre* oder *klimatologische Trockenheit* entsteht, wenn über einen längeren Zeitraum unterdurchschnittliche Niederschläge fallen.
- Eine langfristige meteorologische Dürre führt zur *hydrologischen Dürre*, in der die Wasserstände von Gewässern oder die Grundwasserstände unter einen Normalwert fallen. Die Wasserreserven sind dadurch geringer als nach statistischem Durchschnitt zu erwarten wäre.
- Bodentrockenheit und in Folge davon *landwirtschaftliche* bzw. *forstliche Dürre* beschreiben einen Wassermangel im durchwurzelten Raum des Bodens, so dass es zu wenig Wasser für eine durchschnittliche landwirtschaftliche Produktion von Nutzpflanzen oder für das gesunde Wachstum von Waldbäumen gibt. Das kann an langandauernd zu geringen Niederschlägen liegen, bei grundwassergeprägten Standorten aber auch eine Folge absinkender Grundwasserspiegel sein.

Die *Dürreempfindlichkeit* eines Standortes ist eine statische Eigenschaft, die als Kombination der Eigenschaften des Bodens sowie morphologischer und klimatischer Einflussfaktoren den Standort charakterisiert. Sie ist unabhängig von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von meteorologischer oder von hydrologischer Dürre bzw. von Bodentrockenheit. Eine Dürregefahr besteht, zeitlich variabel, auf Standorten, für die eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Dürre gegeben ist. Sie ist umso größer, je größer die Dürreempfindlichkeit des Standortes ist und je wahrscheinlicher (länger anhaltend) das Auftreten von Dürre ist.

Ein Dürreerisiko lässt sich nur abschätzen, wenn zusätzlich zur Dürregefahr auch bekannt ist, wie groß mögliche Schäden auf dem Standort als Folge einer Dürre sind. Um eine Dürregefahr zu beurteilen, sind deshalb Informationen über die Witterung erforderlich. Um ein Dürreerisiko für einen Waldbestand zu beurteilen, sind neben der Dürregefahr zusätzlich Angaben zum Bestand und damit zu den möglichen Schäden notwendig.

Auf Basis der Forstlichen Standortkarte wird deshalb die potenzielle Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten abgeleitet, die die Grundlage für weitere Beurteilungen darstellt. Die Einstufung der Dürreempfindlichkeit erfolgt in fünf Stufen von „hoch, (sehr) trocken“ bis „gering“, wie in Tabelle 8 zu sehen. Die Dürreempfindlichkeitsstufen ergeben sich aus den Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) der FSK50 bzw. im Detail aus den Werten des Gesamtwasserhaushalts-Index (GWHx), anhand dessen sich die WHH-Stufen ableiten. Wie schon in Kapitel 3.3 erläutert bilden die Faktoren nFK und KWBv die Datenbasis des GWHx, ergänzt um die in Kapitel 3.3.4 beschriebenen wasserhaushaltsrelevanten Reliefeinflüsse (z.B. Hanglage oder Exposition).

Da die Einstufung der Dürreempfindlichkeit auf den GWHx fußt, werden die WHH-Stufen der FSK50 hinsichtlich ihrer Dürreempfindlichkeit differenziert bewertet (vgl. Tabelle 8). So wird u.a. die Stufe "mäßig frisch" gemäß ihrer Tendenz zu den "mäßig trockenen" oder zu den "frischen" Standorten aufgeteilt in die Empfindlichkeitsstufen "mittel bis hoch" (Tendenz zum mäßig trockenen Standort) sowie "gering bis mittel" (Tendenz zum frischen Standort). Mäßig wechselfeuchte und wechselfeuchte Standorte sowie grundfrische und grundfeuchte Standorte werden hier wie die sickerwassergeprägten behandelt. Dies entspricht dem realen Verlauf in der Vegetationsperiode oder auch während Trockenphasen, wenn das Stauwasser verbraucht ist bzw. das Grundwasser soweit abgesunken, dass kein Wasser mehr für die Versorgung der Bäume zur Verfügung steht. Wechselfeuchte und staunasse sowie feuchte und nasse Standorte sind hingegen so stark von einem Wasserüberschuss auch innerhalb der Vegetationsperiode geprägt, dass ihre Dürreempfindlichkeit als „gering“ eingeschätzt wird.

Tabelle 8: Stufen der Dürreempfindlichkeit mit farblicher Darstellung in der Karte und den zugrundeliegenden Gesamtwasserhaushalts-Indexwerten (GWHx) und Wasserhaushaltsstufen

Bewertung	Farbe	GWHx	Wasserhaushaltsstufen
hoch, (sehr) trocken	rot	< 2,5	sehr trocken
			trocken
			wechselfeucht
hoch	orange	2,5 bis < 3,5	mäßig trocken
			mäßig wechselfeucht (< 3,5)
			grundfrisch (< 3,5)
			grundfeucht (< 3,5)
mittel bis hoch	gelb	3,5 bis < 4,0	mäßig frisch (< 4,0)
			mäßig wechselfeucht (< 4,0)
			grundfrisch (< 4,0)
			grundfeucht (< 4,0)
gering bis mittel	gelblich	4,0 bis 4,5	mäßig frisch (> 4,0)
			mäßig wechselfeucht (> 4,0)
			grundfrisch (> 4,0)
			grundfeucht (> 4,0)
gering	hellgrün	> 4,5	frisch
			sehr frisch
			wechselfeucht
			staunass
			feucht
			nass

Auf Grundlage der Wasserhaushaltsstufen der FSK50 bzw. des GWHx sowie für die beiden FSK50-Varianten wird jeweils eine Karte zur Dürreempfindlichkeit abgeleitet. Anders als bei der FSK50 wird hier die Kartendarstellung unter Nutzung von ATKIS-Daten auf die Waldgebiete NRW beschränkt. Die Abbildung 18 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der Dürreempfindlichkeits-Karte für den Lippischen Wald südwestlich Horn-Bad Meinberg.

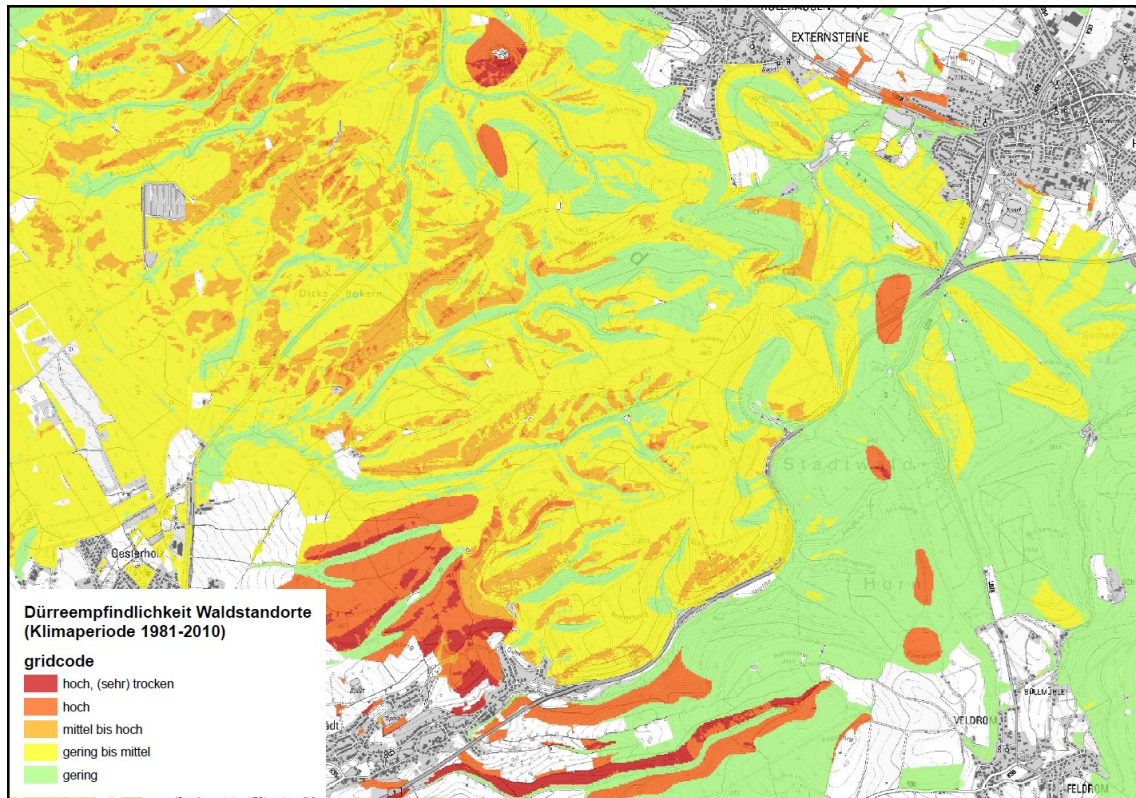


Abbildung 18: Darstellungsbeispiel für die Kartenauswertung zur Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten (Lippischer Wald, Horn-Bad Meinberg)

5.2 Einfluss der Klimaprojektionen auf die Dürreempfindlichkeit

Wie schon unter Kapitel 4.3.3 erläutert, sorgen die Ergebnisse der Klimaprojektionen der Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 für den Zeitraum 2071-2100 in der FSK50 zu einer Verschiebung der WHH-Stufen bzw. des zugrundeliegenden GWHx. Das führt folglich auch in den Kartenauswertungen zur Dürreempfindlichkeit zu unterschiedlich bewerteten Standorten. Das Diagramm in Abbildung 19 stellt die Anteile der verschiedenen Dürreempfindlichkeitsstufen für die Klimanormalperiode 1981-2010 und den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der beiden ausgewählten RCP-Klimaszenarien vergleichend dar.

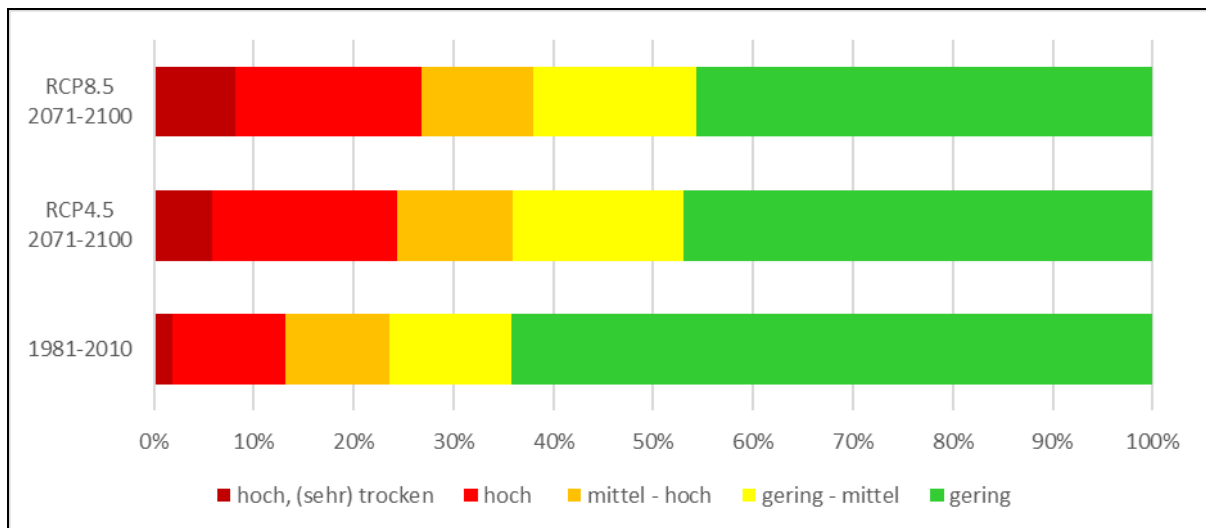


Abbildung 19: Einstufung der Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten in der Klimanormalperiode 1981-2010 und dem Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Medianwerte der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

In der Klimanormalperiode 1981-2010 liegt der Anteil an Waldstandorten mit einer (sehr) hohen Dürreempfindlichkeit bei ca. 13 %. Es handelt sich hierbei vornehmlich um Böden, die ohnehin nur wenig Wasser speichern können, da insbesondere der Steingehalt sehr hoch ist und/oder das Festgestein hoch ansteht. Auf diesen Standorten sorgen bereits kurzzeitig ausbleibende Niederschläge zu Engpässen in der Wasserversorgung der Waldbäume. Demgegenüber weisen ca. 64 % der Waldflächen in der aktuellen Klimanormalperiode eine geringe Dürresensibilität auf. Diese Standorte besitzen eine hohe Bodenwasserspeicherkapazität (nFK), sind ganzjährig an Grundwasser angeschlossen und/oder durch ausreichend hohe und regelmäßige Niederschläge gekennzeichnet. Auch über ungewöhnlich lange Trockenphasen hinweg steht den Bäumen hier ausreichend Wasser zur Verfügung. Ungefähr 23 % aller Standorte weisen aktuell eine mehr oder minder mittlere Dürreempfindlichkeit auf und können zumindest über eine gewisse Zeitspanne mit unterdurchschnittlichen Niederschlägen noch ausreichend Wasser bereithalten.

Analog zu den WHH-Stufen zeigt sich im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Klimaprojektionen für die RCP-Szenarien (Median von RCP4.5 und RCP8.5) eine Verschiebung der Dürreempfindlichkeit hin zum Schlechten. Während die nFK der Böden gleichbleibt, führt die Reduktion der KWBv vielerorts zu einem verminderten GWHx und einer Standortdrift, teils zur nächst trockeneren Stufe, teils innerhalb der WHH-Stufe. Da die Wasserversorgung also im Schnitt geringer wird, können meteorologische Dürren mit langanhaltend unterdurchschnittlichen Niederschlägen wiederum stärker ins Gewicht fallen. Folglich nimmt die potenzielle Dürreempfindlichkeit vieler Waldstandorte zu. So steigt der Anteil an Standorten mit (sehr) hoher Dürreempfindlichkeit auf 24 % bei RCP4.5 und sogar 27 % bei RCP8.5. Flächen mit geringer Dürreempfindlichkeit nehmen hingegen von über 60 % auf 46-47 % ab. Standorte mit einer geringen bis mittleren Sensitivität nehmen mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen leicht zu, während diejenigen mit einer mittleren bis hohen Empfindlichkeit in Summe annähernd unverändert bleiben.

Zusammenfassend zeigt sich, dass zurzeit annähernd 2/3 aller Waldflächen hinsichtlich ihrer Dürresensitivität als weitestgehend unkritisch eingestuft werden können. In den Ergebnissen der Klimaprojektionen für die beiden Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 für den Zeitraum 2071-2100 hingegen sind es weniger als 50 %, während über 1/4 der Flächen eine hohe potenzielle Empfindlichkeit aufweisen.

6 Standorteignungskarten für ausgewählte Baumarten

6.1 Grundlegendes und Methodik

Die Einstufung der Standortgerechtigkeit von Baumarten basiert auf der Publikation „Standortgerechte Baumartenwahl in Nordrhein-Westfalen“ (Asche 2001). In dieser Entscheidungshilfe sind für 44 verschiedene Baumarten, 30 Laubholz- und 14 Nadelholzarten, die jeweiligen ökologischen Ansprüche bzw. physiologischen Amplituden dargestellt. Diese geben den zum Zeitpunkt der Veröffentlichung forstwissenschaftlichen Erkenntnisstand wieder (u.a. Ellenberg 1996, Burschel u. Huss 1987, Dengler et al. 1972, AID-Infodienst 2000), in Form der in NRW damals üblichen standörtlichen Gliederung. Die Standortgerechtigkeit der Baumarten wird hierbei anhand von drei Standortkriterien beurteilt:

- **Mindestlänge der Vegetationszeit**
- **Trophiestufe** (Nährstoffversorgung)
- **Gesamtwasserhaushalt** (Wasserhaushaltsstufe)

Wie in Tabelle 9 dargestellt, wird die Standortgerechtigkeit einer Baumart, davon abgeleitet Vitalität und Produktionsrisiko, in Form eines Ampelsystems dargestellt.

Tabelle 9: Stufen zur Standortgerechtigkeit von Baumarten und Bedeutung für Vitalität und Produktionsrisiko

Farbe	Stufe	Bedeutung
grün	standortgerecht	hohe Vitalität und geringes Produktionsrisiko
gelb	bedingt standortgerecht	eingeschränkte Vitalität und mittleres Produktionsrisiko
rot	nicht standortgerecht	geringe Vitalität und hohes Produktionsrisiko

Um die baumartenspezifischen Standortsansprüche von Asche (2001) mit den Standortsangaben aus der FSK50 in Einklang zu bringen, mussten einige Anpassungen vorgenommen werden. Zunächst wurden die damals verwendeten fünf Trophiestufen an die heutige Nomenklatur mit sechs Stufen angepasst: von ehemals Stufe 1 = „sehr gut“ bis 5 = „sehr schwach“ hin zu Stufe 1 = „sehr nährstoffarm“ bis 5 = „sehr nährstoffreich“ bzw. 6 = „sehr nährstoffreich, kalkdominiert“. Die Differenzierung in sehr nährstoffreich mit Kalkdominanz (6) und ohne (5) wurde für kalkempfindliche Baumarten, wo nötig (z.B. Schwarzerle und Kiefer), entsprechend berücksichtigt. Abbildung 20 zeigt die überarbeitete Übersicht mit angepassten Trophiestufen, wie sie derzeit in der 2. Auflage des Waldbaukonzepts NRW (S. 164/165) zu sehen ist.

Die in der Darstellung verwendete grafische Untergliederung („Dreiteilung“) der einzelnen Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) konnte nur teilweise auf die standörtlichen Angaben der FSK50 übertragen werden. Bei den sickerwassergeprägten WHH-Stufen „sehr trocken“ bis „sehr frisch“ konnte die hier dargestellte Untergliederung anhand des Gesamtwasserhaushalt-Indexwertes (GWHx) angewendet werden (vgl. Kapitel 3.3.5). Bei den grund- und stauwassergeprägten Stufen war dieses Vorgehen nicht möglich, da diese WHH-Stufen direkt aus den Angaben der Bodenkartierung abgeleitet werden (vgl. Kapitel 3.4 u. 3.5). Eine Unterteilung, beispielsweise in mehr oder weniger „grundfrisch“, weniger oder stärker „wechselfeucht“, ist auf dieser Basis nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die baumartenspezifischen Ansprüche an die grund- und stauwassergeprägten WHH-Stufen immer zu ganzen Stufen auf- oder abgerundet.

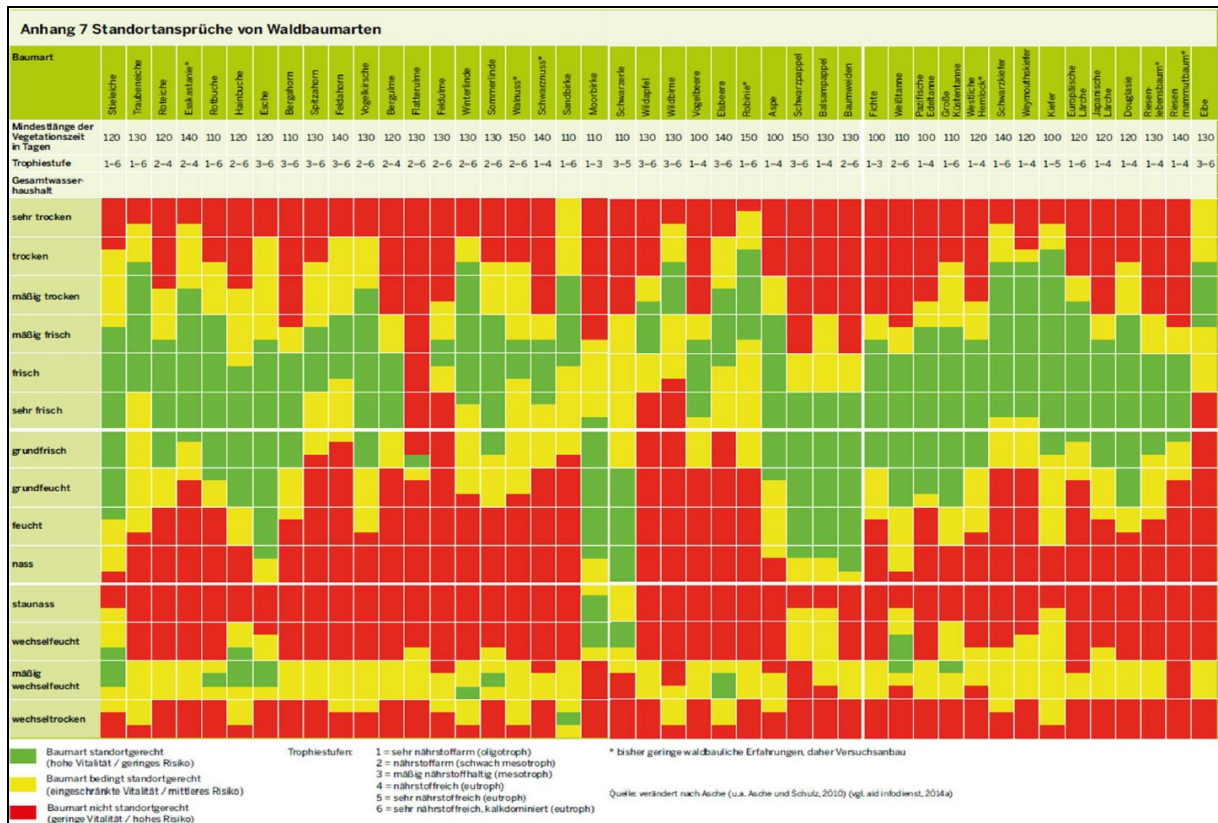


Abbildung 20: Standortansprüche von Waldbaumarten; Übersicht aus der überarbeiteten 2. Auflage des Waldbaukonzepts NRW (MULNV 2019, S.164/165); nach Asche u. Schulz 2010, verändert

Durch Verschneidung der Standortsangaben Vegetationszeit, Nährstoffhaushalt und Wasserhaushalt aus der FSK50 mit den jeweiligen Standortansprüchen der Baumarten konnten entsprechende Baumarten-Standorteignungskarten erstellt werden. Zum derzeitigen Stand wurden Eignungskarten für die folgenden 16 Baumarten angefertigt: Stieleiche, Traubeneiche, Roteiche, Esskastanie, Buche, Bergahorn, Vogelkirsche, Winterlinde, Sandbirke, Schwarzerle, Fichte, Weißtanne, Große Küstentanne, Kiefer, Europäische Lärche und Douglasie. Bei Bedarf können auch für weitere Baumarten entsprechende Eignungskarten berechnet und bereitgestellt werden.

Unter Verwendung der FSK50-Varianten, mit veränderten Werten zur Vegetationszeit und zum Wasserhaushalt, ließen sich in einem zweiten Schritt Baumarten-Standorteignungskarten für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 (jeweils Median) berechnen. Als Ergebnis stehen für die 16 o.g. Baumarten jeweils drei verschiedene Kartenauswertungen zur Verfügung, die dem Waldbesitz als Entscheidungshilfe bei der standortgerechten Baumartenwahl im Klimawandel unterstützen sollen.

6.2 Einfluss der Klimaprojektionen auf die Standorteignung ausgewählter Baumarten

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen für die zwei unterschiedlichen Klimaszenarien mit veränderten Bedingungen bei der Vegetationszeit und beim Wasserhaushalt wirken sich unterschiedlich stark auf die Standortgerechtigkeit einzelner Baumarten aus. Die Abbildung 21 vermittelt einen Eindruck, wie sich die Standortgerechtigkeit der sechs Hauptbaumarten Buche, Stieleiche, Traubeneiche, Fichte, Kiefer und Douglasie unter Anwendung der Klimaprojektionen verändert.

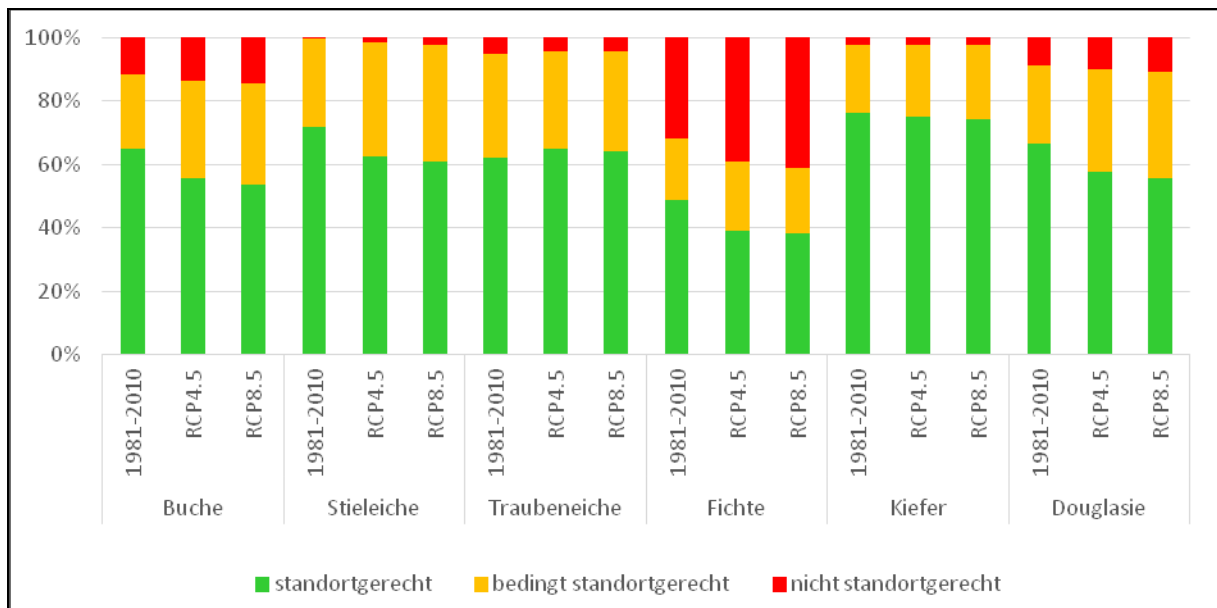


Abbildung 21: Standortgerechtigkeit der Baumarten Buche, Stieleiche, Traubeneiche, Fichte, Kiefer und Douglasie in der Klimanormalperiode 1981-2010 und dem Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

Für die Buche sind negative Tendenzen erkennbar, wenn auch nicht in besorgniserregendem Maße. Uneingeschränkt standortgerechte Bereiche nehmen von derzeit 65 % auf 53-56 % in den Ergebnissen der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien ab. Zugleich nehmen bedingt geeignete und ungeeignete Standorte leicht zu. Auch innerhalb der projizierten Klimaveränderungen bleibt die Buche aber auf mehr als der Hälfte aller Waldflächen standortgerecht.

Bei der Stieleiche nehmen zwar standortgerechte Flächen zugunsten bedingt standortgerechter geringfügig ab (-10 %), die Veränderungen sind aber vergleichsweise marginal. Waldflächen ohne Standorteignung für die Stieleiche sind mit < 3 % nach wie vor sehr selten.

Die trockenheitstolerante Traubeneiche zeigt als einzige Baumart sogar positive Entwicklungen. Für sie standortgerechte Bereiche nehmen in den Ergebnissen der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der beiden ausgewählten Klimaszenarien geringfügig zu (+3 %) und gänzlich ungeeignete ab (-1 %). Damit ist die Traubeneiche auch unter den klimatischen Bedingungen, die auf Grundlage der RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 für den Zeitraum 2071-2100 projiziert werden, für gut 2/3 der Waldflächen NRWs bedenkenlos zu empfehlen.

Wie zu erwarten, verliert die trockenheitsempfindliche Fichte merklich an potenzieller Anbaufläche. Derzeit ist sie noch für knapp 50 % aller Waldflächen standörtlich geeignet. Bei dem hier projizierten trocken-warmen klimatischen Verhältnissen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien ist aber auf 3/5 aller Flächen mit einem mittleren (bedingt standortgerecht) bis hohen Anbaurisiko (nicht standortgerecht) zu rechnen. Da in Teilen des Berglands die Ergebnisse der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Szenarien jedoch nach wie vor eine positive KWBv oder gar gleichbleibende zeigen (vgl. Kapitel 4.3.2), fällt die Veränderung weniger stark aus als erwartet. Trotzdem zeigen die Ergebnisse aber auch längere Trockenphasen im Sommer. Um keine risikobehafteten waldbaulichen Entscheidungen zu provozieren, sind bei solch bekanntermaßen trockenheitsanfälligen Baumarten wie der Fichte unter Umständen weitere Standortkriterien heranzuziehen, beispielsweise eine maximale Vegetationszeit.

Für die trockenresistente Kiefer ergeben sich kaum Unterschiede. Auch unter den klimatischen Bedingungen, die sich auf Grundlage der Klimaprojektionen für die beiden ausgewählten Klimaszenarien für den Zeitraum 2071-2100 ergeben, bieten rund 75 % aller Waldflächen NRWs der Kiefer standörtlich gute Wuchsbedingungen. Wie bei der Stiel- und Traubeneiche liegt der Anteil nichtstandortgerechter Waldflächen bei unter 5 %, was die Baumart als überaus klimastabil kennzeichnet.

Vergleichbar mit der Buche, zeigen auch bei der Douglasie die verwendeten Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien einen leichten Rückgang standortgerechter Bereiche um 9-11 % zugunsten bedingt standortgerechter. In Summe gibt es jedoch nur wenige Waldflächen auf denen die Douglasie im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten RCP-Szenarien gänzlich ungeeignet ist bzw. ein hohes Anbaurisiko erwarten lässt (< 12 %).

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen am Beispiel des Arnsberger Waldes (Lattenberg), wie sich die Standortgerechtigkeit der beiden unterschiedlichen Baumarten Fichte und Traubeneiche in der Klimanormalperiode 1981-2010 und unter den veränderten klimatischen Bedingungen des Klimaszenarios RCP4.5 für den Zeitraum 2071-2100 darstellt. Diese Kartenausschnitte verdeutlichen nochmal grafisch die bereits genannten Tendenzen der Flächenauswertungen.

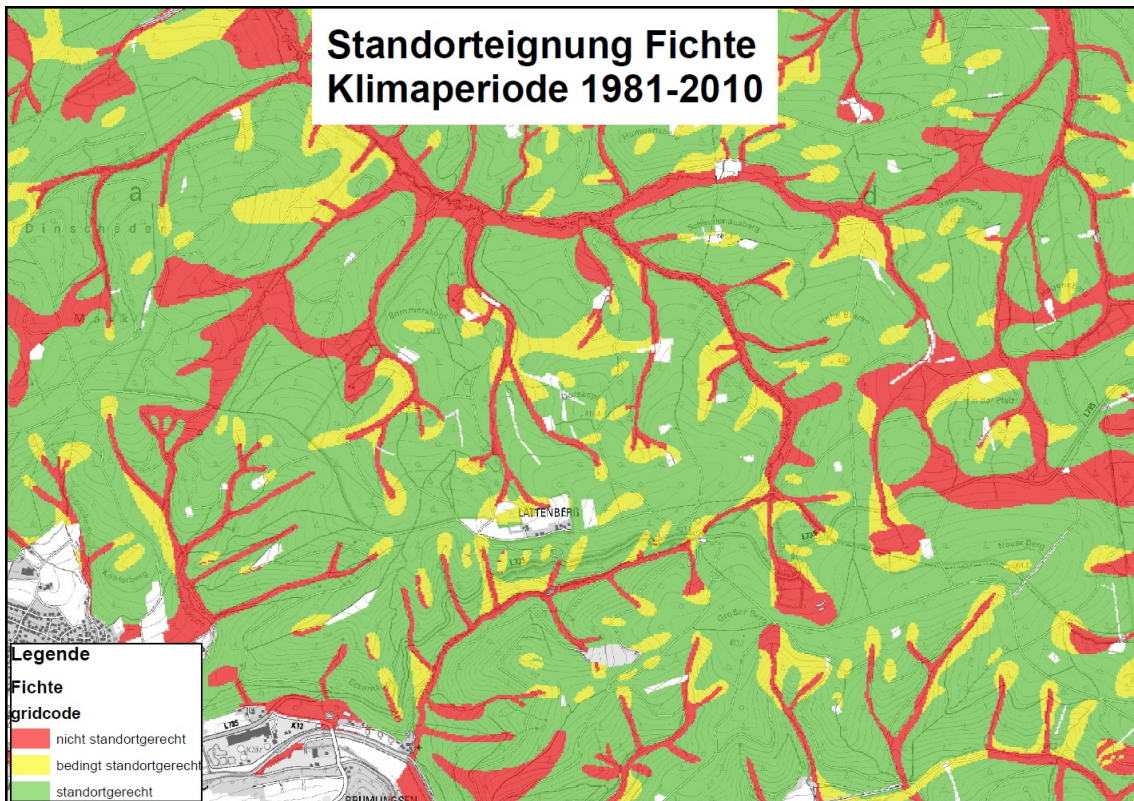


Abbildung 22: Standorteignung der Baumart Fichte im Arnberger Wald (Lattenberg) im Rahmen der Klimanormalperiode 1981-2010

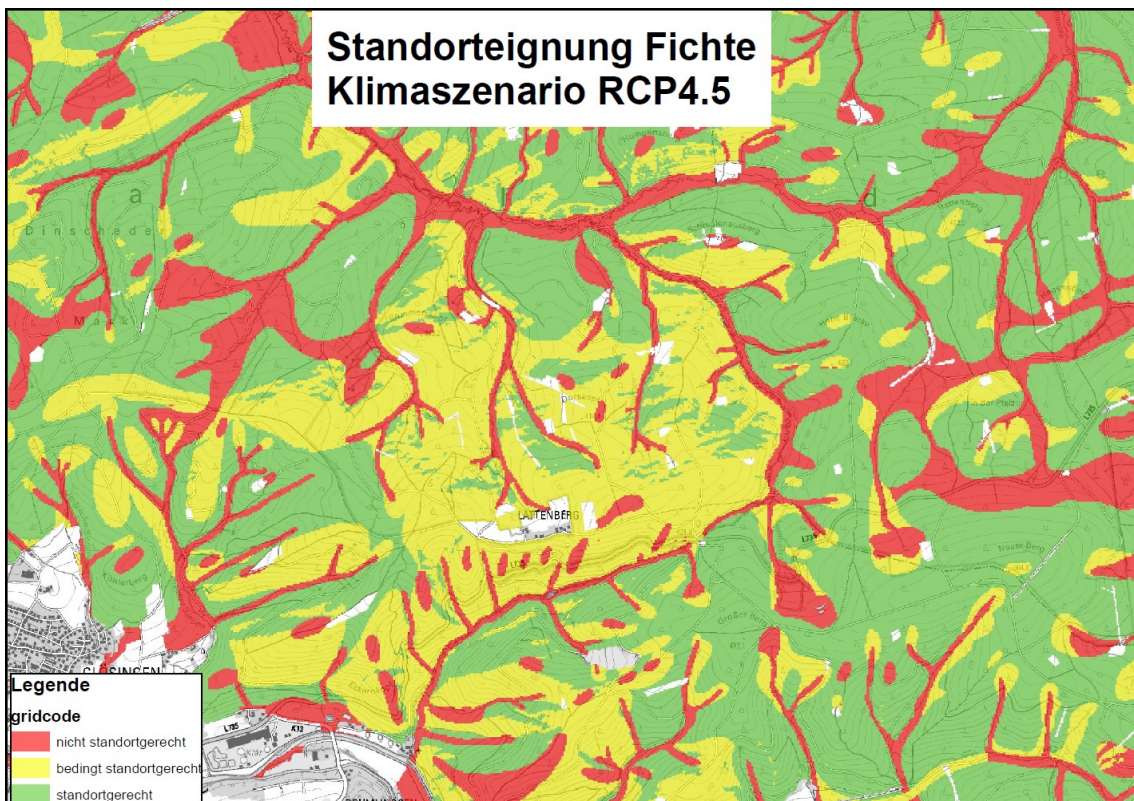


Abbildung 23: Standorteignung der Baumart Fichte im Arnberger Wald (Lattenberg) im Rahmen des Klimaszenarios RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

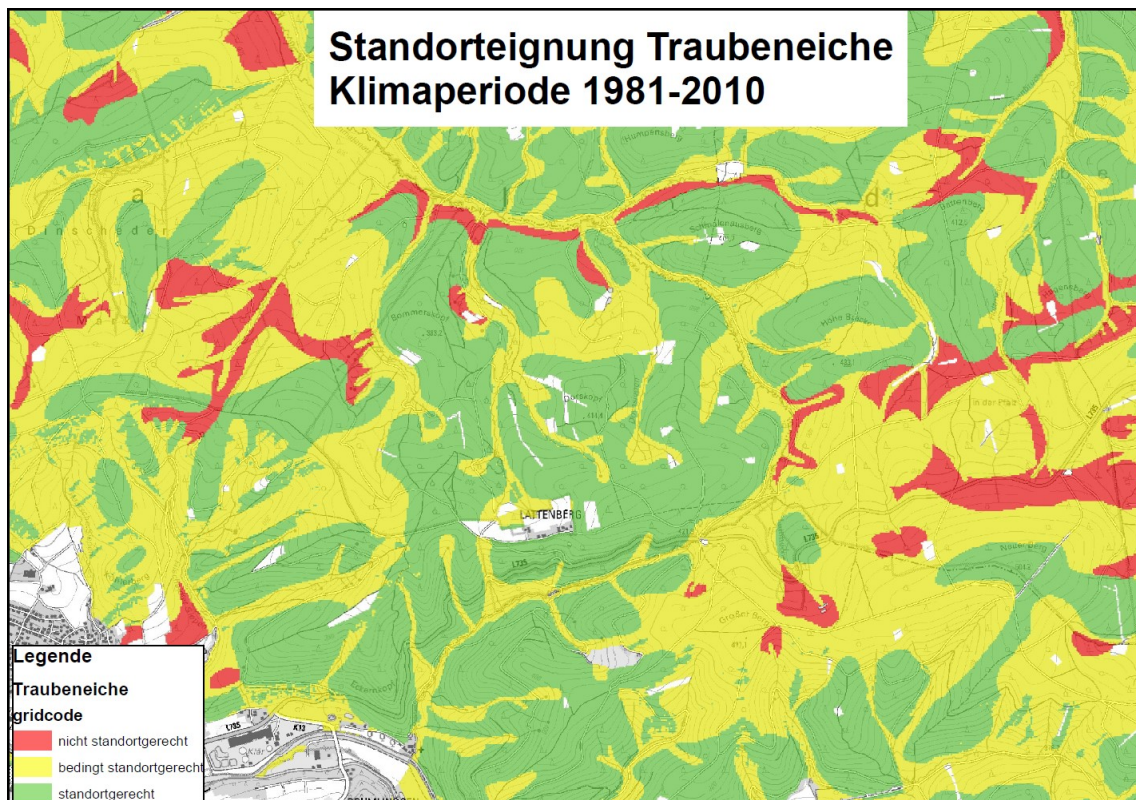


Abbildung 24: Standorteignung der Baumart Traubeneiche im Arnberger Wald (Lattenberg) im Rahmen der Klimanormalperiode 1981-2010

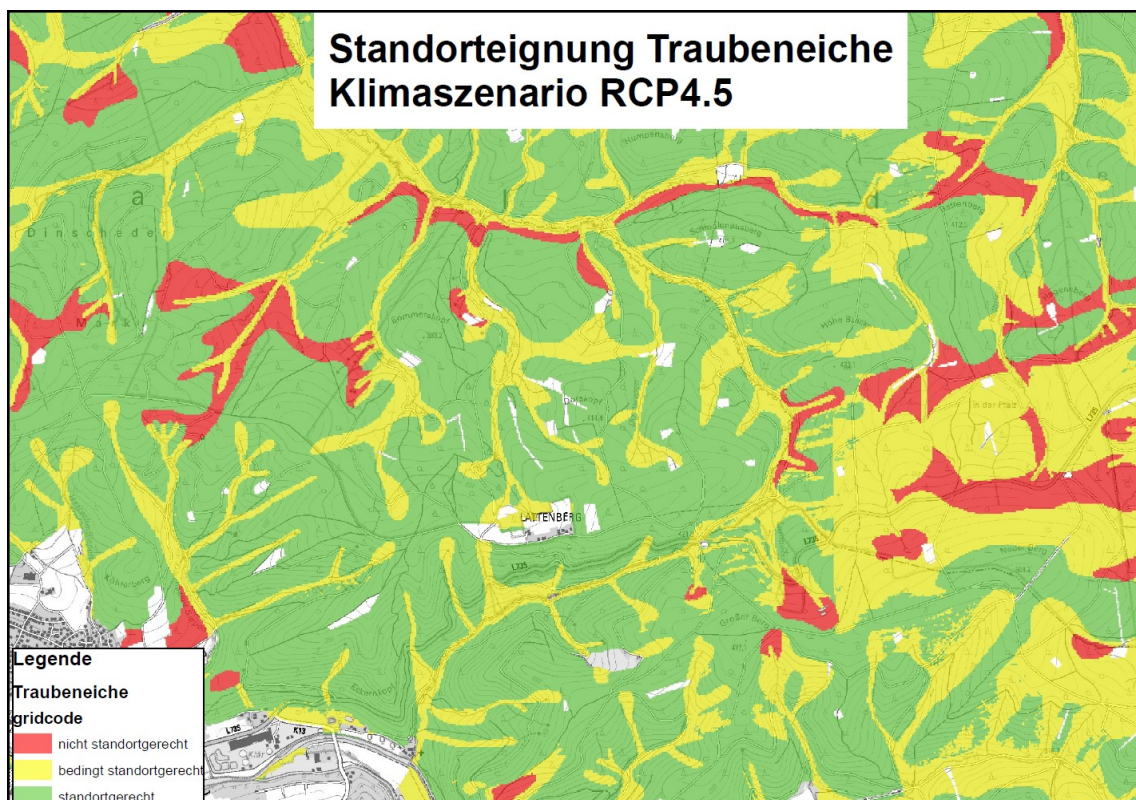


Abbildung 25: Standorteignung der Baumart Traubeneiche im Arnberger Wald (Lattenberg) im Rahmen des Klimaszenarios RCP4.5, Median des Modellensembles für den Zeitraum 2071-2100

7 Waldentwicklungstypen-Empfehlungskarten nach Standorttypen des Waldbaukonzepts NRW

7.1 Grundlegendes und Methodik

Die drei Standortkriterien Vegetationszeit, Gesamtwasserhaushalt und Nährstoffversorgung dienen nicht nur der Bewertung der Standorteignung einzelner Baumarten, sondern werden überdies auch im Rahmen des Waldbaukonzepts NRW (MULNV 2018) genutzt, um Anbauempfehlungen für die dort beschriebenen Waldentwicklungstypen (WET) abzuleiten. Im Waldbaukonzept wird die Kombination aus diesen drei Standortkriterien zu 72 verschiedenen Standorttypen zusammengefasst. Zur einfacheren Handhabung werden hier die 14 Wasserhaushaltsstufen (WHH-Stufen) der FSK50 zu sechs Gesamtwasserhaushaltsstufen aggregiert. Ebenso werden die sechs Stufen der Basenversorgung aus der FSK50 zu drei Nährstoffversorgungsstufen aggregiert. Die Vegetationszeit ist in vier Stufen gegliedert (siehe auch Kapitel 4.3.1). Aus der Kombination der vier Vegetationszeitstufen, sechs Gesamtwasserhaushaltsstufen und drei Nährstoffversorgungsstufen ergeben sich die 72 verschiedenen Standorttypen (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Gliederung der drei Standortkriterien Vegetationszeit, Gesamtwasserhaushalt und Nährstoffversorgung im Waldbaukonzept NRW (S. 64-71); Schlüsselnummer in eckigen Klammern

Vegetationszeit	Gesamtwasserhaushalt	Nährstoffversorgung
<130 Tage (montan / obermontan) [1]	mäßig trocken, trocken, sehr trocken, wechselfeucht [10]	eutroph (nährstoffreich, sehr nährstoffreich) [30]
	mäßig frisch [20]	
130-144 Tage (submontan) [2]	frisch, sehr frisch, grundfrisch, grundfeucht [30]	mesotroph (mäßig nährstoffhaltig) [20]
145-160 Tage (kollin) [3]	mäßig wechselfeucht, wechselfeucht [40]	
>160 Tage (planar) [4]	hangfeucht, feucht [50]	schwach mesotroph / oligotroph (nährstoffarm / sehr nährstoffarm) [10]
	nass, staunass [60]	

Die Abbildung 26 aus dem Waldbaukonzept (S.64/65) zeigt exemplarisch für die Vegetationszeitstufe >160 Tage, welche WET je nach Gesamtwasserhaushalt und Nährstoffversorgung empfohlen werden. Jeder weiße Kasten in der dargestellten Matrix stellt dabei einen Standorttyp mit einer spezifischen Auswahl an empfohlenen WET dar.

Waldentwicklungstypen nach Standortfaktoren						
Vegetationsbedingungen, Vegetationszeit (Tage ≥ 10 °C Tagesmitteltemperatur) > 160 Tage, in Anlehnung an planare Höhenstufe						
Vegetationszeit > 160 Tage	Gesamtwasserhaushaltsstufe					
	mäßig trocken bis sehr trocken, wechsellustig	mäßig frisch	frisch bis sehr frisch, grundfrisch bis grundfeucht	mäßig wechselfeucht bis wechselfeucht	hangfeucht, feucht	nass, staunass
Nährstoffversorgung	eutroph (basenreich)					
	12 13 23 21 29 31 69 96	12 13 20 23 21 27 29 31 69 92 96	12 13 20 23 21 27 29 31 32 69 92 98	12 13 40 14 31 32 88 98	12 13 40 14 31 32 69 88 98	12 13 40 32
	mesotroph (mäßig basenhaltig)					
schwach mesotroph/oligotroph (basenarm)						
Waldentwicklungstypen						
Eichenmischwälder		Buchenmischwälder		Weitere Laubmischwälder		Nadelmischwälder
12 Eiche-Buche/Hainbuche	20 Buchenmischwald	31 Edellaubbäume (trocken)	62 Kiefer-Buche/Lärche	88 Tannenmischwald		
13 Eiche-Edellaubbäume	21 Buche-Eiche/Roteiche	32 Edellaubbäume (frisch)	68 Kiefern-mischwald	92 Douglasie-Buche		
14 Eiche-Birke-Kiefer	23 Buche-Edellaubbäume	40 Schwarzerle	69 Kiefer-Douglasie	96 Douglasie-Küstentanne		
	27 Buche-Lärche	42 Roteiche-Buche/ Große Küstentanne	82 Fichtenmischwald	98 Douglasienmischwald		
	28 Buche-Fichte/Tanne	44 Birke-Schwarzerle	84 Fichte-Vogelbeere/Birke			
	29 Buche-Douglasie					

■ Feldausdruck bezüglich des standortlichen Potentials besonders geeigneten Waldentwicklungstypen
 ■ Farbliche Kennzeichnung der Kompatibilität der Waldentwicklungstypen mit Waldlebensraumtypen der FFH-RL, bezüglich der Baumartenmischung bzw. der Höhenstufe (■ = voll, ■ = eingeschränkt, ■ = keine), verpflichtend für Wald LRT in FFH Gebieten, dort zudem grundsätzlich kein Einbringen lebensraumfremder Baumarten, staatliche Verpflichtung für den Erhalt der Waldlebensraumtypen auch außerhalb von FFH-Gebieten mit verschiedenen Umsetzungsansätzen
 ■ Berücksichtigung evtl. weiterer naturschutzrechtlicher Einschränkungen bezüglich der Baumartenmischung (z. B. nach Erhaltungszielen für ein FFH-Gebiet oder nach sonstigem Bundes- oder Landesnaturschutzrecht)

■ Naturschutzfachliche Informationsangebote bei Fachinformationssystemen (Umweltdaten vor Ort) sowie Informations- und Beratungsangebote der unteren Landesbehörden (Regionalforstämter, Naturschutzbehörde bei den Kreis- und kreisfreien Städten)
 ■ Möglichkeit der Veränderung der Eingangsgrößen Vegetationszeit und Wasserhaushalt für die Auswahl der Waldentwicklungstypen je nach berücksichtigtem Szenario zu den Auswirkungen des Klimawandels über den Produktionszeitraum (Standortort)

Abbildung 26: Empfehlung von Waldentwicklungstypen anhand von Standorttypen; aus dem Waldbaukonzept NRW (S. 64/65)

Um eine Kartenanwendung für die WET-Empfehlungen zu erstellen, wurde aus den Standortfaktoren Vegetationszeit, Wasserhaushalt und Nährstoffversorgung der FSK50 eine Karte mit den im Waldbaukonzept verwendeten Standorttypen generiert. Die Standorttypen sind in dieser Kartenanwendung grafisch differenziert dargestellt und mit einer Schlüsselnummer versehen, wie in Abbildung 27 zu sehen. Der Wasserhaushalt wird hier über Farben symbolisiert, die Nährstoffversorgung mittels Schraffur. Die in der Legende abgebildete Schlüsselnummer des Standorttypen ergibt sich aus der Kombination der einzelnen Schlüsselnummern der drei Standortfaktoren (vgl. Tabelle 10). So steht beispielsweise die Schlüsselnummer 4-20-10 für den Standorttypen: Vegetationszeit „>160 Tage“, Wasserhaushalt „mäßig frisch“, Nährstoffversorgung „schwach mesotroph / oligotroph“.

Die Kartenanwendung verfügt über einen flächenindividuellen Report, der sich per Mausklick im WMS aufrufen lässt (siehe Abbildung 28). In diesem Report sind als Kopfdaten alle Standortinformationen aus der zugrundeliegenden FSK50 hinterlegt. Neben Angaben zu den drei Standortkriterien Forstliche Vegetationsperiode, Gesamtwasserhaushalt und Nährstoffversorgung ist hier auch der dazugehörige Standorttyp des Waldbaukonzepts mit Schlüsselnummer benannt. Darüber hinaus sind auch die zur Bestimmung des Wasserhaushalts wichtigen Parameter nFK und KWBv einsehbar.

Kernstück des Reports ist die Auflistung aller für diesen Standorttyp geeigneten WET. Wie im Waldbaukonzept werden die WET dabei hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit den Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie farblich differenziert dargestellt (siehe auch Abbildung 26). Ebenso werden, gemäß ihrer erwarteten Wuchseleistung auf dem Standorttyp, besonders geeignete WET hervorgehoben. Für weitergehende Informationen sind darüber hinaus auch die jeweiligen WET-Steckbriefe aus dem Waldbaukonzept verlinkt und können bei Bedarf eingesehen werden (vgl. Waldbaukonzept NRW S. 41-63).

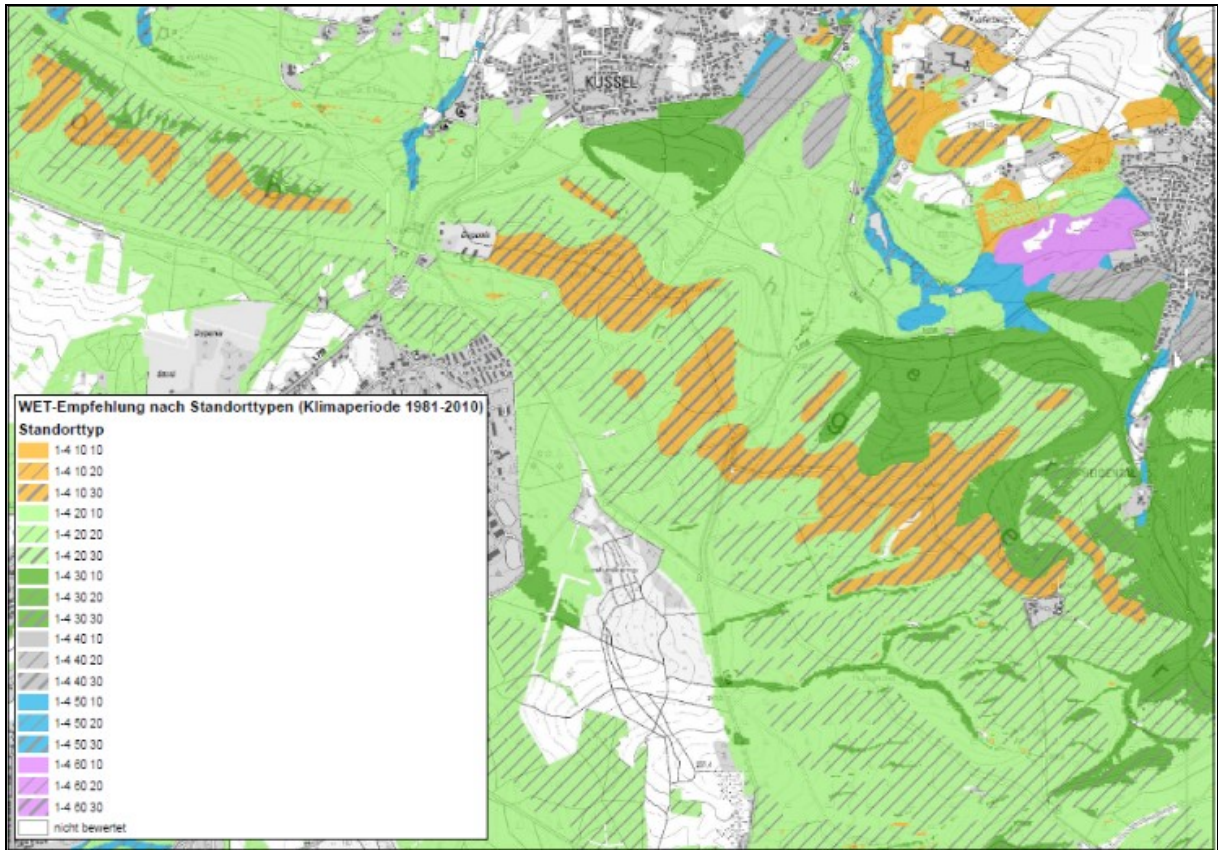


Abbildung 27: Darstellungsbeispiel für die Karte "WET-Empfehlungen nach Standorttypen"; Farben kennzeichnen den Wasserhaushalt, Schraffierungen die Nährstoffversorgung



 Forstliche Standortkarte (FSK50) auf Grundlage der BK50 Geologischer Dienst NRW - im Auftrag der Landesforstverwaltung		
Informationen zum Standort		
Forstliche Vegetationsperiode (Tage >10°C)	175 Tage	
Gesamtwasserhaushalt	mäßig trocken	
Nährstoffversorgung	im Mittel sehr basenreich	
Wasserspeichervermögen des Bodens (nFK)	23 mm	
Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (KWbV)	55 mm	
Bewertung nach Waldbaukonzept NRW		
Standorttyp	4 10 30 : Vegetationszeit > 160 Tage ; mäßig trocken bis sehr trocken, wechsellustig ; eutroph (basenreich)	
besonders geeignete Waldentwicklungstypen (WET)		
WET mit voller Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
WET13	WET 13: Eiche-Edellaubbäume	
WET mit eingeschränkter Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
WET31	WET 31: Edellaubbäume (trocken)	
WET ohne Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
kein WET vorhanden		
weitere geeignete Waldentwicklungstypen (WET)		
WET mit voller Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
WET12	WET 12: Eiche-Buche / Hainbuche	
WET23	WET 23: Buche-Edellaubbäume	
WET mit eingeschränkter Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
WET21	WET 21: Buche-Eiche / Roteiche	
WET29	WET 29: Buche-Douglasie	
WET ohne Kompatibilität zu Waldlebensraumtypen der FFH-Richtlinie		
WET69	WET 69: Kiefer-Douglasie	
WET96	WET 96: Douglasie-Küstentanne	
<p>Farbliche Kennzeichnung der Kompatibilität der Waldentwicklungstypen mit Waldlebensraumtypen der FFH-RL, bezüglich der Baumartenmischung bzw. der Höhenstufe (hellblau = voll, dunkelblau = eingeschränkt, violett = keine), verpflichtend für Wald-LRT in FFH-Gebieten. In FFH-Gebieten zudem grundsätzlich kein Einbringen lebensraumbfremder Baumarten, staatliche Verpflichtung für den Erhalt der Waldlebensraumtypen auch außerhalb von FFH-Gebieten mit verschiedenen Umsetzungsansätzen.</p>		
<p align="center">Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen – Landesbetrieb – De-Greif-Str. 195 • D-47803 Krefeld • Fon: 02151 897-0 • Internet: www.gd.nrw.de • E-Mail: boden@gd.nrw.de</p>		

Abbildung 28: Darstellungsbeispiel für einen flächenindividuellen Report der Kartenanwendung „WET-Empfehlungen nach Standorttypen“

7.2 Einfluss der Klimaprojektionen auf die Empfehlungswürdigkeit ausgewählter Waldentwicklungstypen

Wie auch bei den Kartenauswertungen zur Standorteignung der einzelnen Baumarten, zeigen sich auch bei den WET-Empfehlungskarten unter Anwendung der Klimaprojektionen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien verschiedene Tendenzen. Es gibt eine Reihe von WET, die im Rahmen der Klimaprojektionen auf weniger Standorten empfohlen werden als zurzeit (Klimanormalperiode 1981-2010). Auf der anderen Seite gibt es auch WET, die sich unter den projizierten Klimaveränderungen als erstrebenswert darstellen. Die Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen wie sich für ausgewählte WET der Anteil an Waldflächen mit einer Anbauempfehlung im Rahmen der Klimaprojektionen verändert.

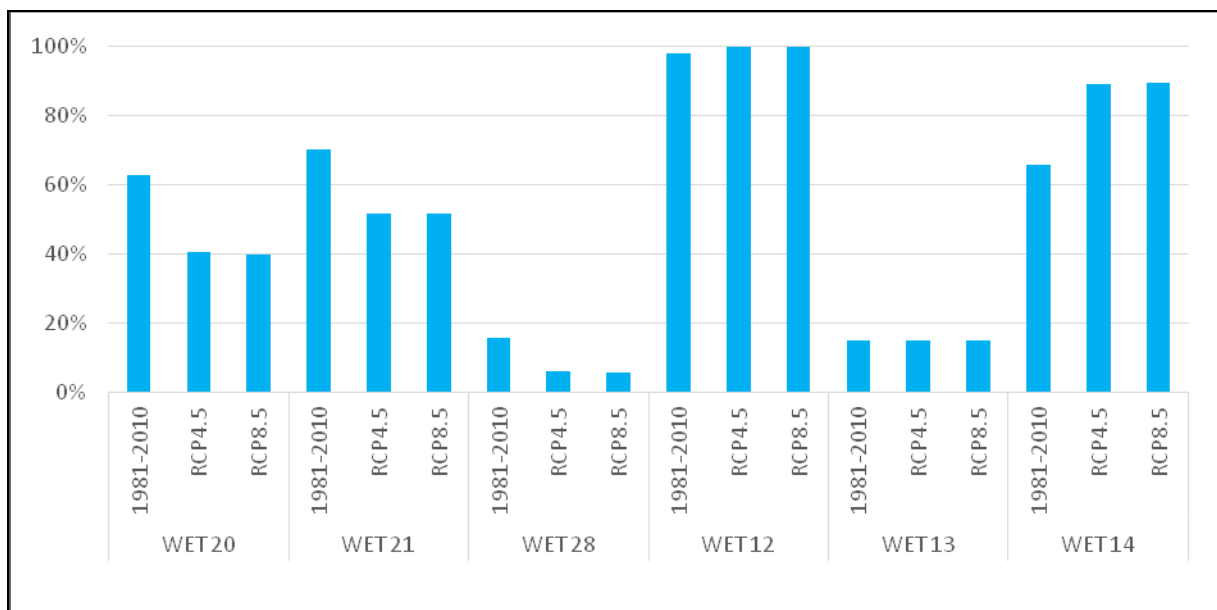


Abbildung 29: Flächenanteil mit Anbauempfehlung für ausgewählte Buchen- (WET 20-28) und Eichen-Waldentwicklungstypen (WET 12-14) in der Klimanormalperiode 1981-2010 und für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

Bei den Buchen-WET sind im Schnitt negative Entwicklungen erkennbar. Beim WET 20 (Buchenmischwald) und WET 21 (Buche-Eiche/Roteiche) nimmt der Flächenanteil mit einer Anbauempfehlung ab, beide sind aber auch weiterhin von hoher Bedeutung. Die Kombination aus Buche und Fichte/Tanne (WET 28) ist nach den Klimaprojektionen nur noch auf wenigen Waldflächen zielführend. Im Detail ergeben sich diese Änderungen bei den Buchen-WET weniger aus der Verschiebung des Wasserhaushalts ins trockenere, sondern vielmehr aus der Verschiebung der Forstlichen Vegetationszeit in die letzte Stufe „>160 Tage“ (vgl. Kapitel 4.3.1 u. Abbildung 10).

Anders sieht es bei den Eichen-WET aus. Der WET 12 mit der Kombination aus Eichenarten und Buche bzw. Hainbuche steht unter den projizierten Veränderungen als absoluter Gewinner dar. Durch Anstieg der Vegetationszeit in den Ergebnissen der Klimaprojektionen für die ausgewählten Szenarien für den Zeitraum 2071-2100 gibt es nur noch Standorttypen die eine Anbauempfehlung für den WET 12 aufweisen. Auch der WET14 aus Eiche, Birke und Kiefer profitiert hiervon sichtbar. Zurzeit wird der WET für 2/3 aller Waldflächen empfohlen, für den Zeitraum 2071-2100 steigt der Anteil nach den Klimaprojektionen für die ausgewählten Szenarien auf beinahe 90 % an. Demgegenüber zeigt der WET13 (Eiche-Edellaubbäume) bei Veränderung der Vegetationszeit und des Wasserhaushalts minimale bzw. vernachlässigbare Änderungstendenzen.

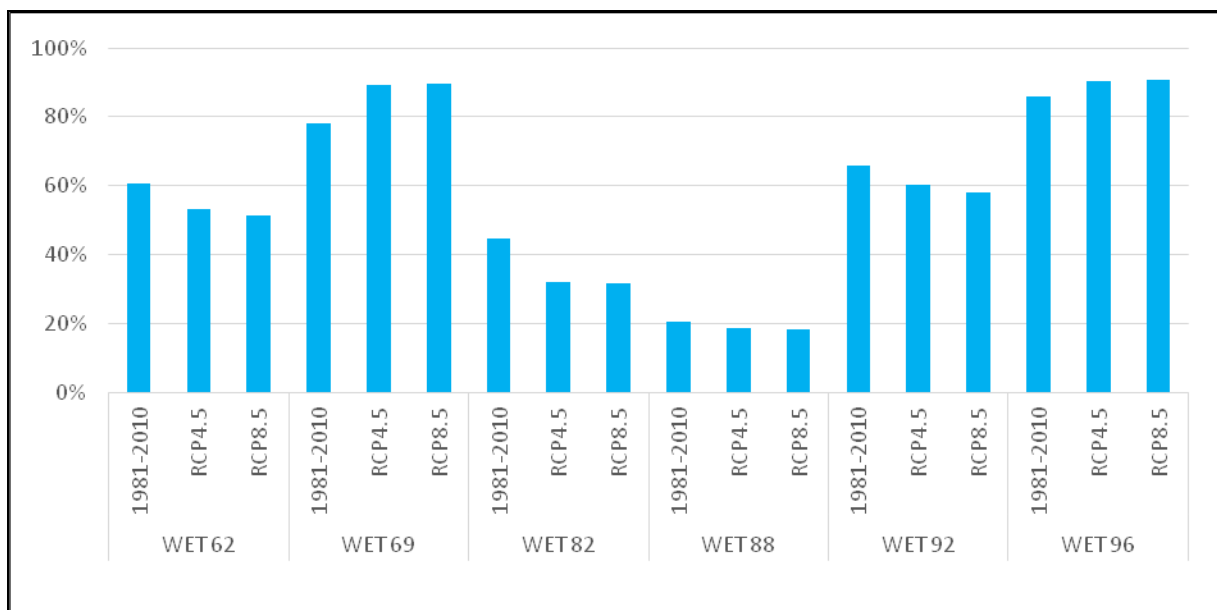


Abbildung 30: Flächenanteil mit Anbauempfehlung für ausgewählte Kiefern (WET 62 u. 69), Fichten- (WET 82), Tannen- (WET 88) und Douglasien-Waldentwicklungstypen (WET 92 u. 96) in der Klimanormalperiode 1981-2010 und für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Mediane der Klimaprojektionen der beiden Klimaszenarien bezogen auf die Waldfläche NRWs

Bei den Kiefern-WET sind, je nach Begleitbaumart, unterschiedliche Entwicklungen zu beobachten. Der WET 62 mit Buche und Lärche verliert geringfügig, unter 10 %, an empfohlener Anbaufläche, ist aber auch nach den Ergebnissen der Klimaprojektionen auf Basis der ausgewählten Szenarien für den Zeitraum 2071-2100 noch auf gut der Hälfte aller Waldflächen empfehlenswert. Die Mischung aus Kiefer und Douglasie (WET 69) zeigt hingegen positive Tendenzen, so dass dieser WET nach den Klimaprojektionen für die ausgewählten Szenarien im Zeitraum 2071-2100 nur noch für ca. 10 % aller Flächen keine Empfehlung erhält.

Anders der WET 82 (Fichtenmischwald). Zurzeit weist der WET noch für 45 % aller Waldflächen in NRW eine potenzielle Anbauempfehlung auf. Nach den projizierten Klimaverhältnissen auf Basis der ausgewählten Szenarien sinkt diese Anbauempfehlung auf unter 1/3 im Zeitraum 2071-2100.

Demgegenüber präsentiert sich der WET 88, mit nennenswerten Anteilen der Weißtanne anstelle der Fichte, als überaus klimastabil. Hier sind keine auffallend negativen Veränderungen für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Szenarien erkennbar. Der Waldflächenanteil mit einer Empfehlung nimmt um nur ca. 2 % ab.

Ähnlich wie bei den Kiefern-WET, hat auch bei den Douglasien-WET die Begleitbaumart Einfluss auf die Empfehlungswürdigkeit. Beim WET 92 (Douglasie-Buche) steigt der Flächenanteil ohne Empfehlung für den Zeitraum 2071-2100 geringfügig um 6-8 %, stellt aber auch nach den Klimaprojektionen auf Basis der ausgewählten Klimaszenarien für gut über die Hälfte alle Waldflächen eine geeignete Wahl dar. Der ohnehin für viele Standortkombination empfohlene WET 96 (Douglasie-Große Küstentanne) gewinnt für den Zeitraum 2071-2100 auf Basis der beiden Szenarien nochmal an potenziell geeigneter Fläche hinzu, so dass er für 90 % aller Waldflächen in NRW lohnenswert erscheint.

Im Rahmen dieser Flächenauswertungen zeigt sich, dass die durch die klimatische Wasserbilanz bedingte Veränderung der Wasserhaushaltsstufen weitaus weniger Einfluss auf die WET-Empfehlungen hat, als die Erhöhung der forstlichen Vegetationszeit. Im Detail ist es so, dass in der Klimanormalperiode 1981-2010 potenziell 72 verschiedene Standorttypen mit jeweiligen WET-Empfehlungen in NRW vorkommen. Der projizierte Anstieg der Vegetationszeitdauer für den Zeitraum 2071-2100 nach den beiden ausgewählten Klimaszenarien sorgt dafür, dass fast ausschließlich die Vegetationszeit-Stufe „>160 Tage“ vorkommt. Dadurch sind nur noch annähernd 18 Standorttypen für NRW relevant, was entscheidenden Einfluss auf die WET-Empfehlungen hat. Die Einteilung der Vegetationszeit-Stufen im Waldbaukonzept muss daher mittelfristig erweitert werden, um die Bedingungen im Klimawandel hinreichend zu erfassen und auch zukünftig differenzierte WET-Empfehlungen bereitstellen zu können.

8 Kartendarstellung

Die Kartendarstellung der FSK50-Varianten orientiert sich an der Darstellung der Basis-FSK50. Aus Gründen der Wiedererkennbarkeit und erleichterten Orientierung wird das gesamte Informationspaket in eine gleichartige Gliederung von Kartenlayern mit gleichartiger Kartengestaltung aufgeteilt.

Als oberste Ebene wird ein Gruppenlayer gezeigt, der die eigentliche Standortkarte enthält (siehe Abbildung 31). Sie wird flächendeckend für NRW, unabhängig von der aktuellen Nutzung, als potenzielle Waldflächen dargestellt und enthält:

- den Gesamtwasserhaushalt in 14 Klassen (6 sickerwassergeprägte Klassen, 4 stauwassergeprägte Klassen, 4 grundwassergeprägte Klassen) als Flächenfarben,
- den Nährstoffhaushalt in 6 Klassen als weiße Einschreibung,
- die Ausweisung einer Wärmehaushaltsstufe (Höhenstufe) abgeleitet aus der klimatischen Auswertung "Länge der Vegetationszeit" als violette Einschreibung.

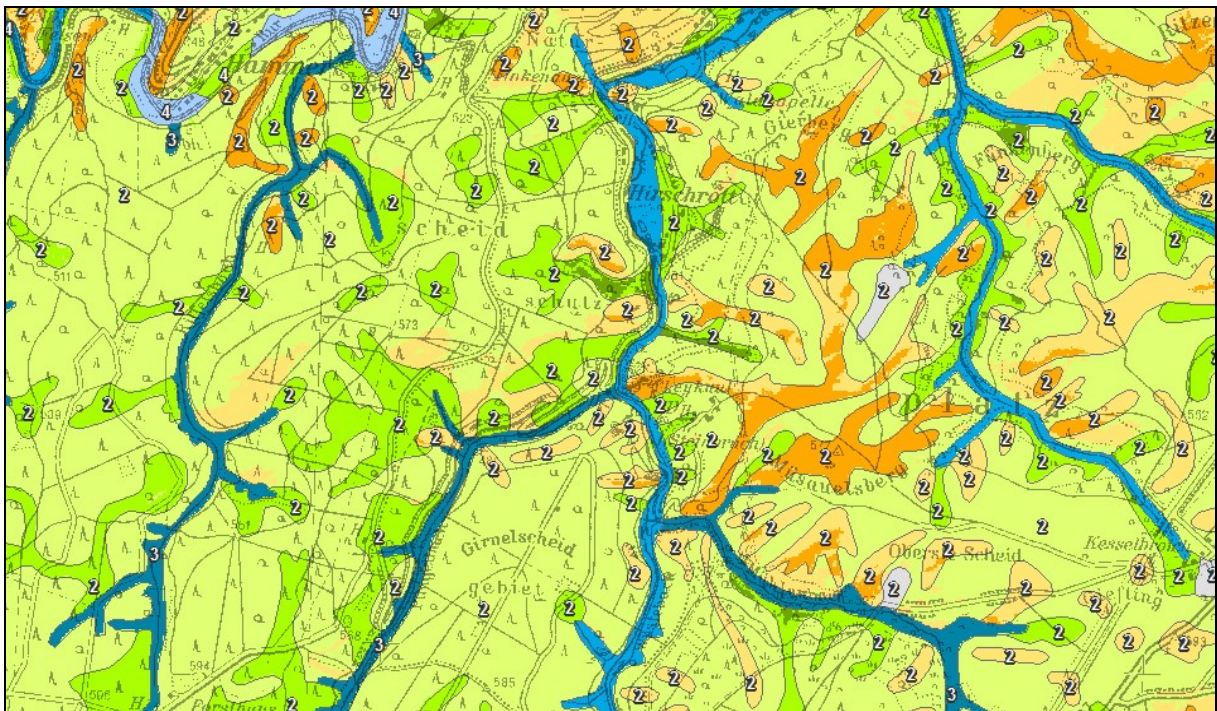


Abbildung 31: Forstliche Standortkarte auf der Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000 in der WMS-Darstellung; Ausschnitt: Nationalpark Eifel, südwestlich des Rurseees; Gesamtwasserhaushalt mit farbigem Raster, Nährstoffhaushalt mit Ziffern; die Grenzlinien gelten nur für den Nährstoffhaushalt

Alle folgenden Darstellungsebenen zeigen nur noch Informationen für die ATKIS-Waldflächen.

Auf den Gruppenlayer der Forstlichen Standortkarte folgt der Layer mit den Standorttypen für die Empfehlung der Waldentwicklungstypen des Waldbaukonzepts NRW (vgl. Abbildung 32). Der dritte Layer zeigt die Karte zur potenziellen Dürreempfindlichkeit von Waldstandorten. Als viertes Element folgt wiederum ein Gruppenlayer, der die 16 Einzellayer für die Standort-eignung der 16 ausgewählten Baumarten umfasst.

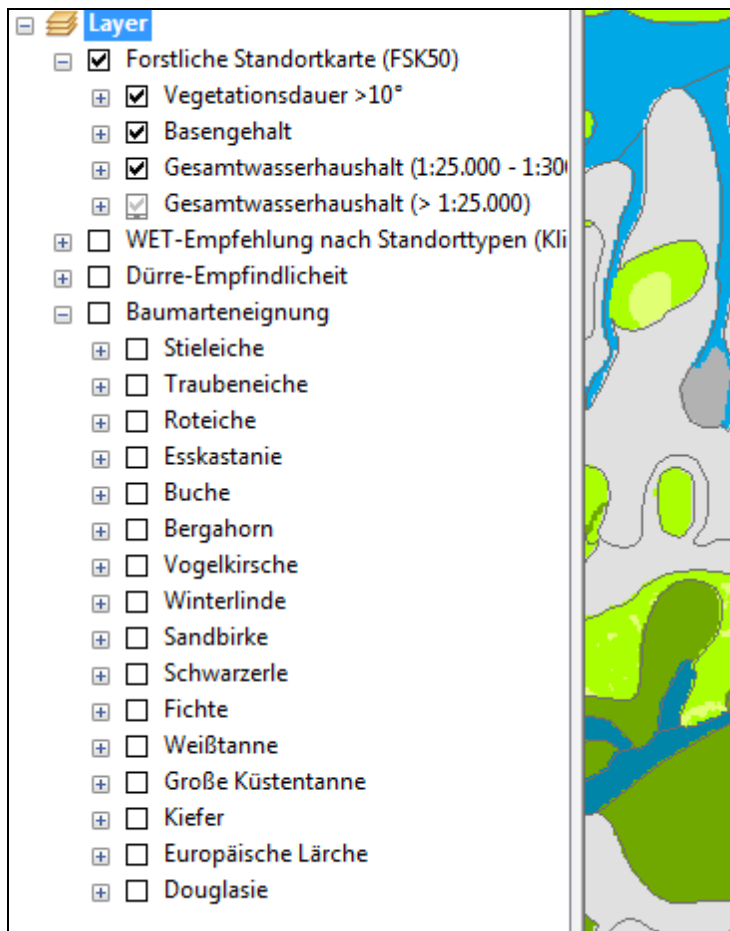


Abbildung 32: Layerstruktur der FSK50 und ihrer Varianten

9 Bereitstellung als Internetdienst

Die Forstliche Standortkarte auf Grundlage der BK50 wurde im Jahre 2018 vom Landesbetrieb Information und Technik Nordrhein-Westfalen (IT.NRW) als frei zugänglicher WMS bereitgestellt und in das Portal Waldinfo.NRW integriert. Der WMS ist aus fachlichen und technischen Gründen auf einen maximalen Darstellungsmaßstab von 1 : 18.000 eingestellt, als minimaler Maßstab ist aus Gründen der Ladezeiten ein Maßstab von 1 : 300.000 vorgesehen.

Dieser WMS kann von Nutzern in eine Web-Anwendung wie TIM-Online, GEOviewer oder in ein lokales GIS eingebunden werden.

Der Titel des WMS lautet: "IS FSK50 Forstliche Standortkarte 1 : 50.000 von NRW (Übersichtskarte), auf Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000".

Die Adresse des WMS lautet:

<https://www.wms.nrw.de/gd/fsk050?>

Zudem wurde ein Download als ATOM-Feed eingerichtet.

Seit dem 2. Oktober 2020 stehen auch die FSK50-Varianten als WMS zur Verfügung und werden in das Portal Waldinfo.NRW integriert.

Die weiteren Adressen der einzelnen Dienste lauten:

https://www.wms.nrw.de/gd/fsk050_rcp45?

https://www.wms.nrw.de/gd/fsk050_rcp85?

Die Titel sind:

„IS FSK 50 RCP4.5 Forstliche Standortkarte 1 : 50.000 von NRW (Übersichtskarte), auf Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000 und Klimaprojektionen nach Szenario RCP4.5 - WMS“

und

„IS FSK 50 RCP8.5 Forstliche Standortkarte 1 : 50.000 von NRW (Übersichtskarte), auf Grundlage der Bodenkarte 1 : 50.000 und Klimaprojektionen nach Szenario RCP8.5 – WMS“

10 Ausblick FSK5

Die Auswertung und Darstellung der Bodenkarte 1 : 5.000 zur Forstlichen Standorterkundung wurde methodisch angepasst. Sie enthält die standortkundliche Auswertung nach identischer Methode wie die FSK50.

Ebenfalls wurde die Forstliche Standortkarte auf Grundlage der BK5F (FSK5) mittlerweile berechnet. Sie enthält neben der eigentlichen Standortkarte – wie bei der FSK50 – auch die Darstellungen der Standorttypen nach Waldbaukonzept, der potenziellen Dürreempfindlichkeit und der Baumarteneignungen.

Die Daten wurden im Oktober 2020 an IT.NRW übergeben. Je nach Kapazitäten der Programmierer bei IT.NRW werden die erneuerte BK5F und die FSK5 als WMS bis Anfang 2021 freigeschaltet werden können.

Die FSK5 ist auch mit den Varianten der klimatischen Verhältnisse im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Klimaprojektionen für die gleichen ausgewählten Klimaszenarien berechnet worden. In Anbetracht der viel höheren räumlichen und fachlichen Auflösung der zugrundeliegenden BK5F ist allerdings der sorgfältige Umgang mit den notwendigerweise unsicheren, aber scheinbar gleichermaßen hochaufgelösten FSK5-Varianten von großer Bedeutung!

11 Fazit

Mithilfe der auf den Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5 vom Weltklimarat basierenden und von DWD und LANUV für NRW aufbereiteten Klimaprojektionen (jeweils Mediane) für die ferne Zukunft (2071-2100) konnten erfolgreich zwei Varianten für die FSK50 berechnet werden. Die Neuberechnung der FSK50-Varianten mit Daten der RCP-Szenarien zur Forstlichen Vegetationszeit und zur Klimatischen Wasserbilanz zeigen für den Zeitraum 2071-2100 flächendeckende Veränderungen der forstlichen Standorte.

Für die Dauer der Forstlichen Vegetationsperiode wird im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der ausgewählten Szenarien überall ein starker Anstieg projiziert, die Einstufung des Gesamtwasserhaushalts nimmt zudem vielfach um eine Stufe ab. Trotz der durch die Modelle projizierten klimatischen Veränderungen gleichbleibende Wasserhaushaltsstufen sind auf hohe Speicherkapazitäten im Boden oder im Bergland auf in der Summe nach wie vor ausreichende Niederschläge zurückzuführen.

Auf Basis der Standortdaten aus der FSK50 ließen sich Standorteignungskarten für ausgewählte Baumarten sowie Empfehlungskarten für die Waldentwicklungstypen (WET) aus dem Waldbaukonzept NRW erstellen. Die beiden Varianten der FSK50 zeigen auch bei den darauf aufbauenden Kartenauswertungen merkliche Verschiebungen.

Bei Betrachtung einzelner Baumarten gewinnt nur die Traubeneiche im Zeitraum 2071-2100 auf Basis der Klimaprojektionen potenziell standortgeeignete Fläche hinzu. Buche, Stieleiche und Douglasie verzeichnen leichte Einbußen, die Fichte auch größere, während für die Kiefer keine nennenswerte Veränderung zu erkennen ist.

Bei den WET profitieren insbesondere die Eichen- und in Teilen die Kiefern-WET von den veränderten klimatischen Verhältnissen. Demgegenüber verlieren die Buchen-WET leicht an Flächen mit Anbauempfehlung, die Fichten-WET merklich. Die Empfehlungswürdigkeit von Douglasien-WET hängt stark von der Nebenbaumart ab.

Es gibt verschiedene methodische Ungenauigkeiten, ebenso wie klimamodellbedingte Unsicherheiten. Die Genauigkeit der Klimamodelle wird sich durch die Weiterentwicklung in den Modellgenerationen in den nächsten Jahren sicherlich verbessern. Hinzu kommt, dass auch das Basisszenario der FSK50 mit Vorliegen neuer Messdaten (Klimanormalperiode 1991-2020) angepasst wird und dadurch neue Vergleichsmöglichkeiten entstehen. Im Hinblick auf den Klimawandel muss ebenso die Methodik zur standortkundlichen Herleitung der Wasserhaushaltsstufen kontinuierlich geprüft und fortentwickelt werden. Zum Beispiel hinsichtlich der Veränderung wechsel- und grundfeuchter Standorte im Klimawandel oder zur Berücksichtigung bzw. Gewichtung längerer Trockenphasen im Sommer sowie einer verstärkten Ungleichverteilung von Niederschlägen im gesamten Jahresverlauf.

Darüber hinaus wird man die baumartenspezifischen Kriterien zur Standortgerechtigkeit überarbeiten müssen und auch das Waldbaukonzept NRW mit seinen Waldentwicklungstypen kontinuierlich an die sich verändernden Standortbedingungen anpassen müssen.

12 Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG Boden 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl.; Hannover
- AID Infodienst 2000: Standortansprüche der wichtigsten Waldbaumarten, 8. Aufl.: Bonn (Auswertungs- u. Informationsdienst f. Ernährung, Landwirtschaft und Forsten)
- Asche, N. 2001: Standortgerechte Baumartenwahl in Nordrhein-Westfalen. Eine Entscheidungshilfe. AFZ-DerWald 16/2001: 826-829
- Asche, N., Schulz, R. 2005: Forstliche Standorterkundung mit digitalen Werkzeugen. Ein neuer Weg in Nordrhein-Westfalen. – Wertermittlungsforum 23: 129-132; Hannover
- Asche, N., Schulz, R. 2010: Standortgerechte Baumartenwahl in Nordrhein-Westfalen. Wuchsgebiet Sauerland - Eine Entscheidungshilfe unter Berücksichtigung des Klimawandels, Göttingen (Cuvillier Verlag)
- Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 2016: Forstliche Standortaufnahme – Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen, 7. Aufl.; Eching (IHW-Verlag)
- Brienen, S., Walter, A., Brendel, C., Fleischer, C., Ganske, A., Haller, M., Helms, M., Höpp, S., Jensen, C., Jochumsen, K., Möller, J., Krähenmann, S., Nilson, E., Rauthe, M., Razafimaharo, C., Rudolph, E., Rybka, H., Schade, N., Stanley, K. 2020: Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks; online verfügbar unter: <https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/SPT101.html>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2020
- Burschel, P., Huss, J. 1987: Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis; Hamburg/Berlin (Paul Parey Verlag)
- Dengler, A., Bonnemann, A., Röhrig, E. 1972: Grundriß des Waldbaus. Ein Lehr- und Handbuch, 4. Aufl. Band 1 u. 2; Hamburg/Berlin (Paul Parey Verlag)
- Deutscher Wetterdienst 2019: Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien; Offenbach am Main (Deutscher Wetterdienst, Zentrales Klimabüro Offenbach); online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_RCP-datensatz_node.html, zuletzt aufgerufen am 20.08.2020
- Dworschak, M., Schulte-Kellinghaus, S. 2018: Forstlich-standortkundliche Auswertungen auf Basis der Bodenkarte 1 : 50 000. Projektbericht; Krefeld (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen)
- Eder, W. 1980: Quantifizierung von bodenkundlichen Standortfaktoren als Grundlage für eine leistungsbezogene Standortkartierung insbesondere auf Bundsandsteinstandorten der Pfalz. – Mitt. A. Forsteinrichtung u. Waldbau, 23; Mainz (LFW Rheinland-Pfalz)
- E DIN 4220-2017: Neuentwurf zur DIN 4220: Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen); Berlin (Beuth-Verlag)
- Eidmann, F.E. 1957: Grundsätze und Organisation der forstlichen Standortkartierung in den öffentlichen Waldungen Nordrhein-Westfalens. –Allg. Forst- u. Jagd.-Ztg. 128: 65-68; Frankfurt/M. (Sauerländer's Verlag)
- Ellenberg, H. 1996: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht, 5. Stark veränderte und verbesserte Auflage; Stuttgart (Ulmer Verlag)

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2008: Anleitung zur Erfassung bodenkundlicher Daten (Datenschlüssel Bodenkunde 2008); Krefeld (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen), unveröffentlicht

Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen 2011: Richtlinie für die großmaßstäbige Bodenkartierung (Kartierrichtlinie 2011); Krefeld (Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen), unveröffentlicht

Köthe, R. 2017: Aufbereitung des DGM10 von Nordrhein-Westfalen und Ableitung morphometrischer Reliefparameter – Kurzdokumentation; Göttingen (Ing.-Büro Scilands), unveröffentlicht

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2018: Wald und Klima in Nordrhein-Westfalen. Ein Beitrag zum Landeswaldbericht; Recklinghausen

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2018: Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen – Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P. et al. 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463 (7282), S. 747–756

Mückenhausen, E. 1957: Grundsatzfragen der Bodenkartierung, insbesondere für die forstliche Standorterkundung in Nordrhein-Westfalen. – *Allg. Forst.- u. Jagdt.-Ztg.* 128: S. 69-78; Frankfurt/M (Sauerländer's Verlag)

Schellnhuber, H.J., Rahmstorf, S., Winkelmann, R. 2016: Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate change* 6 (7), S. 649–653

Schmidt, W., Stüber, V., Ullrich, T., Paar, U., Evers, J., Dammann, K., Hövelmann, T., Schmidt, M. 2015: Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortkartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. – *Beitr. Nordwestdeutsche Forstl. Versuchsanstalt* 12; Göttingen (Universitätsverlag)

Shrivastava, M.B., Ulrich, B. 1977: Schätzung quantitativer Bodenparameter bei der forstlichen Standortkartierung am Beispiel des hessischen Berglandes. – *Forstwiss. Centralblatt* 96: S. 186-200; Hamburg

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. 2018: Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (33), S. 8252-825