

3 Zielsetzung und Zusammenfassung

Wolfgang Falk, Bernd Ahrends, Jürgen Böhner, Stefan Fleck, Raphael Habel, Henning Meesenburg, Heike Puhmann, Wendelin Weis

3.1 Zielsetzung

Das in diesem Forschungsbericht vorgestellte Projekt „Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ (WHH-KW) hatte das Ziel, die Wasserhaushaltsansprache in Standortkunde und Standortkartierung mit Hilfe von deterministischen Wasserhaushaltsmodellen wirklichkeitsnah, räumlich hochaufgelöst und dynamisch in Bezug auf den Klimawandel abzubilden. Für das Projekt förderliche Vorarbeiten zur Digitalisierung und Homogenisierung der Standortskarten der beteiligten forstlichen Partner über größere geographische Gebiete waren in vielen Bereichen bereits erfolgt und wurden in verschiedenen Forschungsprojekten weiterentwickelt. Die Ableitung flächig darstellbarer Stressindikatoren des Wasser- und Lufthaushalts für die nach Vorkommen häufigsten Baumarten Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und der in der Forstwirtschaft viel beachteten Douglasie dient zur Bewertung der aktuellen und zukünftigen Anbaueignung wichtiger Baumarten unter veränderten Klimabedingungen und ist damit Grundlage für eine risikoarme Forstwirtschaft.

Folgende Schritte wurden dafür bearbeitet:

- Standorts- und baumartenspezifische Parametrisierung eines bundesweit einheitlich genutzten Wasserhaushaltsmodells (LWF-Brook90) inklusive einer umfassenden Meta-Analyse zu den Modellparametern. Fokussierung auf die Modellparameter, die durch Sensitivitätsanalysen als besonders relevant identifiziert wurden. Validierung anhand von Messdaten des forstlichen Umweltmonitorings (Kapitel 4)
- Nutzung von Xylemsaftflussmessungen eines europäischen Datensatzes zur erweiterten Validierung der ausgewählten baumartenspezifischen Modellparameter für die Berechnung der Transpiration und ihrer Einschränkung bei Trockenheit (Kapitel 5)
- Fortschreibung der im Waldklimafonds-Projekt „WP-KS-KW“ entwickelten räumlich und zeitlich hochaufgelösten Klimadaten (1961-2020) sowie Downscaling und Adjustierung von Klimaszenarien unter Verwendung eines regionalen Klimaprojektionen-Ensembles für Deutschland (Kapitel 6)
- Exemplarische Bereitstellung von Klimadaten im Nowcast (6 Stunden Vorhersage) und Forecast (bis zu 5 Tage Vorhersage) für Testgebiete für zeitnahe Aussagen zur Bodenfeuchte (Kapitel 9)
- Ableitung und Überprüfung von Indikatoren zur Beurteilung des Wasserhaushalts (Kapitel 7)
- Unterfütterung der länderspezifischen Standortinformationssysteme mit quantitativen Bodeninformationen; Verknüpfung von flächigen Bodendaten, Reliefparametern aus digitalen Geländemodellen und regionalisiertem Klima zur deterministischen und standortsbezogenen Wasserhaushaltsmodellierung; Simulation und flächige Darstellung von Indikatoren des Wasser- und Lufthaushaltes für wichtige Baumarten in Deutschland (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche, Douglasie und Ansätze zur Übertragung auf Mischbestandstypen) in größeren Testregionen; Diskussion der Ergebnisse mit der Forstpraxis und Durchführung notwendiger Anpassungen (Kapitel 8 bis 12)
- Beurteilung der Auswirkungen wiederholter Trockenjahre auf den Wasserhaushalt (Kapitel 13)

3.2 Zusammenfassung

Das Ziel, die Wasserhaushaltsansprache in Standortkunde und Standortkartierung mit Hilfe von deterministischen Wasserhaushaltsmodellen möglichst wirklichkeitsnah, räumlich hochaufgelöst und dynamisch in Bezug auf den Klimawandel abzubilden, wurde für die Standortinformationssysteme der beteiligten Projektpartner erreicht. Dafür wurde eine allgemeingültige Parametrisierung des Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90 auf Basis von Literaturrecherchen und auf Grundlage einer umfassenden Validierungsdatenbank mit über einer Millionen Messwerte von insgesamt 59 Monitoring- und Versuchsflächen aus ganz Deutschland erarbeitet. Hierdurch wurde die generelle Übertragbarkeit des Wasserhaushaltsmodells auf die Einheiten der forstlichen Standortkartierung bundeslandübergreifend gewährleistet. Um den potenziellen Wasserverbrauch am Standort unabhängig von der Bestockung zu halten, wurden Standardbestände für Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus robur* L., *Qu. petraea*

(Mattuschka) Liebl.) definiert, die auf allen Standorten zur Anwendung kamen. Die großflächige, methodisch einheitliche Anwendung von LWF-Brook90 erlaubte so eine standortsübergreifend vergleichende Einschätzung des Wasserhaushalts.

Im Rahmen der Modellparametrisierung wurden wichtige Baumartenunterschiede berücksichtigt, sofern sie durch Literaturangaben und Messergebnisse der Versuchsflächen belegbar waren. Neben Festlegungen zu Durchwurzelung wurden Schätzfunktionen für Blatt- und Rindenoberflächen als zentrale Steuergrößen für Transpiration und Interzeption über allometrische Funktionen aus Baumdaten hergeleitet. Auch Literaturangaben zur maximalen Blattleitfähigkeit zeigten Unterschiede zwischen Baumarten. In Summe führte das in gut wüchsigen, geschlossenen Altbeständen zu einem größeren sommerlichen Wasserverbrauch der Laubbäume im Vergleich zu den Nadelbäumen. In der Gesamtverdunstung lag die Fichte durch ihre hohen Interzeptionsverluste knapp vor Eiche und Buche, gefolgt von der Kiefer mit der im Vergleich geringsten Evapotranspiration.

Sensitivitätsanalysen belegten den großen Einfluss von direkt auf die Transpiration wirkenden Parametern auf das Modellergebnis. Trotz Parametrisierung an einer Vielzahl von Waldbeständen bestehen gerade hier nach wie vor große Unsicherheiten und eine trennscharfe baumartenspezifische Wasserhaushaltssimulation bleibt schwierig. Zur Absicherung der erarbeiteten Parametrisierung wurden Modellanwendungen für Standorte mit Xylemsaftflussmessungen (SAPFLUXNET), die nicht zum Parametrisierungsdatensatz gehörten, durchgeführt und die Transpirationsraten verglichen. Insbesondere für die Baumarten Fichte, Buche, Eiche und Douglasie waren die Abweichungen zwischen Modellierung und Messwerten akzeptabel und bestätigten die für die Parametrisierung gewählten Blattleitfähigkeiten.

Zum Antrieb der Wasserhaushaltsmodellierung werden flächendeckende meteorologische Daten in täglicher Auflösung benötigt. Diese Daten wurden aus Messreihen der Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in einer räumlichen Auflösung von 250 x 250 m regionalisiert. Die aus einem Vorgängerprojekt stammende Zeitreihe wurde für den Gesamtzeitraum 1961-2020 verlängert. Deutlich wurde dabei der Unterschied zwischen den Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 bezüglich Erwärmung und Veränderungen des Niederschlagsregimes. Zusätzlich wurden Klimaprojektionen in gleicher räumlicher und zeitlicher Auflösung erzeugt, deren Grunddaten dem ReKliEs-Kernensemble als Teil des Euro-CORDEX-Ensembles für verschiedenen RCP-Szenarien entstammen. Der hohe Rechenaufwand erforderte eine Beschränkung auf wenige Kombinationen globaler und regionaler Klimamodelle. Berücksichtigung fanden dabei die drei Szenarien RCP 8.5, RCP 4.5 und RCP 2.6 in einer geeigneten, einheitlich gewählten Modellkombination und die Umsetzung des Szenarios RCP 8.5 in einer mittleren, feuchteren und trockeneren Ausprägung. Bei den verschiedenen Klimamodellläufen war die Adjustierung der Wetterdaten ein wesentlicher Schritt, der die Vergleichbarkeit zwischen historischen Läufen und Modelldaten herstellte. Im Zuge der Datenprozessierung wurden auch testweise Witterungsdaten im Now- und Forecast zur Verfügung gestellt, die durch nachgeschaltete Wasserhaushaltsmodellierung eine zeitnahe bis tagesaktuelle Darstellung von Veränderungen der standortspezifischen Bodenfeuchte ermöglichen.

Die Anwendung der Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte für die Standortinformationssysteme der beteiligten Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg und Bayern. Das entwickelte Verfahren ist dementsprechend auf unterschiedlichste Systeme anwendbar, sofern metrische Bodeninformationen für die enthaltenen Standortseinheiten als Eingangsgrößen für LWF-Brook90 zur Verfügung stehen. Als Maß für die Darstellung des Trockenstresses wurde das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration gewählt, das sich gegenüber anderen Indikatoren als praxistauglich und statistisch belastbar erwiesen hat. Die Ergebnisse der flächigen Anwendungen zeigen deutlich die Veränderung des Wasserhaushalts hin zu trockeneren Bedingungen zwischen den Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020. Außerdem wird die Bedeutung der einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts deutlich: Bei Jahresniederschlägen unter etwa 700 mm gewinnen Wasserspeicherkapazität im Boden und der reliefbedingte Strahlungseinfall an Bedeutung. Auffällig ist die Häufung sehr warmer und auch für die Wasserversorgung der Wälder kritischer Jahre seit Beginn des neuen Jahrtausends und insbesondere im vergangenen Jahrzehnt. Der Anteil trockener Standorte liegt in diesem Zeitraum bereits höher als in den untersuchten Prognosen für gemäßigte Klimaprojektionen. Klimaverhältnisse im RCP 8.5 prognostizieren dagegen eine weitere Verknappung des Wasserangebots im Wald, insbesondere bei einer saisonalen Umverteilung der Niederschläge mit häufigeren sommerlichen Trockenperioden.

Die Bedeutung von mehrjährigen Dürren wurde an den Ergebnissen der Jahre 2018 bis 2020 untersucht. Besonders

das Jahr 2020 lässt erkennen, dass eine unzureichende Auffüllung des Bodenwasserspeichers im Winter sommerliche Trockenheit verstärken kann. Solche Verhältnisse erscheinen bisher aber noch selten und regional beschränkt. Hohe Temperaturen und mangelnde Sommerniederschläge entscheiden in erster Linie über den Wassermangel in der Vegetationsperiode. Da anzunehmen ist, dass der Klimawandel die Wahrscheinlichkeit aufeinanderfolgender Trockenjahre erhöht, ist häufiger nach Trockenjahren mit einer unzureichenden Auffüllung des Bodenspeichers zu rechnen und entsprechend mit einem höheren Trockenstressrisiko im folgenden Jahr.

Die Zusammenschau der Ergebnisse des Projekts „Standortfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel“ belegt eindringlich, dass die modellgestützte und dynamische Quantifizierung von Kenngrößen des Wasserhaushaltes die Standortkartierung dabei unterstützt, bestehende Verfahren zu objektivieren, zu erweitern und zu aktualisieren. Die Ergebnisse rücken die Bedeutung von Standortinformationen auch im Klimawandel weiter in den Mittelpunkt der forstlichen Entscheidung und gehen damit über einfache klimatische Ansätze hinaus.

3.3 Summary

The project partners achieved the goal to describe the water balance within their respective site information mapping systems as realistically as possible, spatially highly resolved and dynamically in relation to climate change using deterministic water balance models. For this purpose, a universal parameterization of the hydrological model LWF-Brook90 was developed based on literature research and a comprehensive validation database with more than one million observed values from a total of 59 monitoring and experimental sites across Germany. This ensured the general transferability of the water balance model to the mapping units of forest site evaluation systems in Germany. In order to keep the potential water consumption at the site independent of the stand stocking, standard stands were defined for Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Pedunculate and Sessile oak (*Quercus robur* L., *Qu. petraea* (Mattuschka) Liebl.), which were applied to all sites. Thus, the largescale, methodologically uniform application of LWF-Brook90 allowed for a comparative assessment of hydrological conditions across sites.

Within the framework of model parameterization, important differences between tree species were taken into account, as far as they could be substantiated by literature data and observations from the monitoring and experimental plots. In addition to rooting depth, allometric functions for leaf and bark surfaces as most sensitive variables for transpiration and interception were derived from tree data. Literature data of maximum leaf conductance also showed differences between tree species. For well-grown, closed mature stands, this resulted in greater growing season water consumption by deciduous trees as compared to conifers. With respect to total annual evapotranspiration, spruce was just ahead of oak and beech due to its high interception losses, whereas pine revealed the lowest evapotranspiration rates.

Sensitivity analyses proved the great effect of parameters directly controlling transpiration for the model out-put. Although the parameterization is based on many forest stands, there are still large uncertainties, and it remains difficult to simulate the water balance for specific tree species. The elaborated parameter set was validated against transpiration rates from sites with xylem sap flow measurements (SAPFLUXNET). Especially for the tree species spruce, beech, oak, and Douglas fir, the deviations between simulated and observed values were acceptable and confirmed the respective leaf conductance chosen for parametrization.

Area-wide meteorological data in daily resolution are required to drive the water balance modelling. These data were obtained using observed data from climate stations of the German Weather Service, which were regionalized to a spatial resolution of 250 x 250 m. The time series from a previous project was extended for the entire period 1961-2020. The comparison of the climate reference periods 1961-1990 and 1991-2020 reflects a clear warming trend and changes of the precipitation regime. In addition, climate projections with the same spatial and temporal resolution were generated, whose basic data originate from the ReKliEs core ensemble as part of the Euro-CORDEX ensemble for different RCP scenarios. The high computational effort required a limitation to a few combinations of global and regional climate models. Consideration was given to the three scenarios RCP 8.5, RCP 4.5 and RCP 2.6 in one suitable model combination for all three scenarios and the implementation of the scenario RCP 8.5 in a medium, wetter and drier characteristic. For the different climate model runs, the adjustment of the weather data was an essential step that ensured the comparability between historical runs and model data. In the course of the data processing, now and forecast weather data were also made available for test purposes, which,

through immediate water balance modelling, allow for a near real-time to daily estimation of site-specific soil moisture.

The application of the water balance modelling was carried out for the site information systems of the participating federal states Lower Saxony, Saxony-Anhalt, Baden-Württemberg and Bavaria. Accordingly, the developed method is applicable to a wide variety of systems, provided that appropriate soil information for the included site units (e.g. providing information on texture and stone content for soil layers) is available as input variables for LWF-Brook90. The ratio of actual to potential transpiration was chosen as an indicator for the representation of drought stress, which has proven to be practical and statistically robust compared to other indicators. The results of the comprehensive applications clearly show the change of the water balance towards drier conditions between the climatic reference periods 1961-1990 and 1991-2020. Furthermore, the importance of the individual components of the water balance becomes clear: At annual precipitation below roughly 700 mm, soil water storage capacity and topography-dependent radiation become more important. The increase of very warm and critical years for the water supply of forests since the beginning of the new millennium and especially within the last decade is remarkable. The proportion of dry sites during this period was already higher than projected for moderate climate scenarios. On the other hand, a further shortage of water supply for forests are projected for the climate conditions of the RCP 8.5 scenario, especially when the projections assume a seasonal shift of precipitation with frequent summer droughts.

The significance of perennial droughts was examined using observations from 2018 to 2020. Especially the year 2020 indicates that insufficient recharge of soil water in winter can intensify summer droughts. However, such conditions appear to be rare and regionally limited to date. High temperatures and lack of summer precipitation are the primary determinants of water shortages during the growing season. Since climate change will likely increase the probability of successive dry years, insufficient recharge of the soil reservoir can be expected more frequently after dry years and, accordingly, a higher drought stress risk in the following year.

The synopsis of the results of the project "Site factor water budget in the context of climate change" impressively proves that the model-based and dynamic quantification of the water balance compounds supports site mapping through objectifying, expanding, and updating existing methods. The outcome spotlight the importance of site information for decision support in forestry, especially with respect to climate change, and thus go beyond simple climatic approaches.