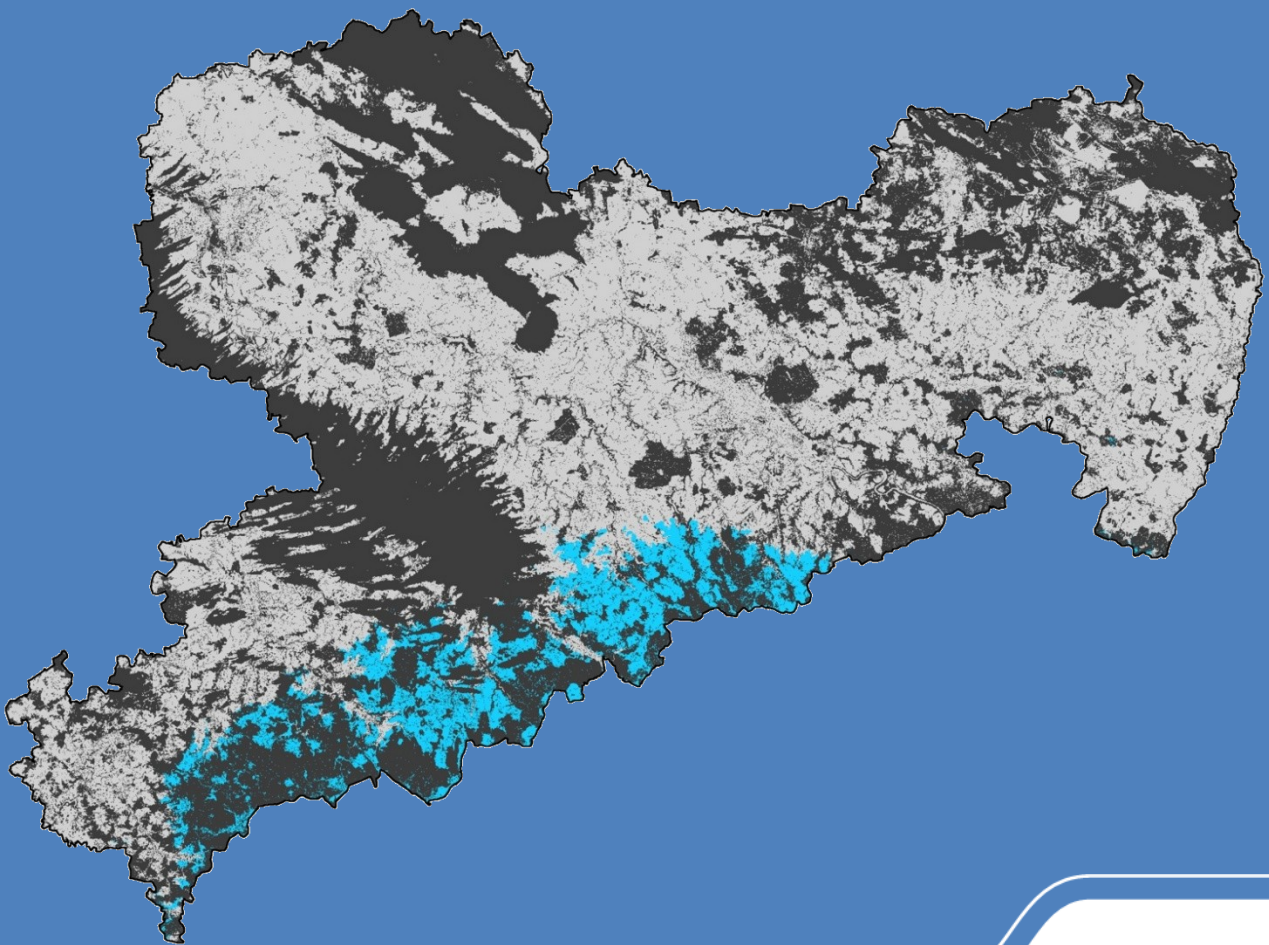




Schneemodellierung ESCIMOv2-R

Schriftenreihe, Heft 3/2026



Aktualisierung und zeitliche Fortschreibung der Schneemodellierung für das Gebiet des Freistaates Sachsen

Assoz. Prof. Dr. Thomas Marke,
Institut für Geographie, Universität Innsbruck

im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Zielsetzung	8
2 Modellupdate	9
2.1 Modellfunktionalität	9
2.1.1 Bestimmung des Phasenübergangs	9
2.1.2 Bestimmung der Schneetemperatur	10
2.1.3 Berechnung des Kälte- und Flüssigwasserspeichers	11
2.1.4 Das Waldbestandsmodell	11
2.1.5 Sonstige Erweiterungen	12
2.2 Modellstruktur	14
2.3 Modelleingaben	16
2.3.1 Meteorologische Eingaben	16
2.3.2 Statische Eingaben	17
2.3.3 Modelleinstellungen	18
2.4 Modellausgaben	21
2.4.1 Punktuelle Ausgaben	21
2.4.2 Flächenhafte Ausgaben	22
3 Modelloptimierung	23
4 Modell Parametrisierung	25
4.1 Auswahl der zur Parametrisierung verwendeten Stationen	25
4.2 Untersuchte Modellparameter und Prozessparametrisierungen	27
4.3 Sensitivität des Modells und finale Einstellungen	27
5 Modellevaluierung	31
5.1 Punktuelle Evaluation (Stationsdaten als Modellantrieb)	31
5.2 Punktuelle Evaluation (Rasterdaten als Modellantrieb)	38
5.3 Flächenhafte Evaluation (Rasterdaten als Modellantrieb)	43
Schlussfolgerungen und Ausblick	49
Literaturverzeichnis	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Simuliertes Auffüllen und Aufzehren des Interzeptionsspeichers durch Schneefall, Sublimation und Schmelze am Standort Vordersteinwald im Schwarzwald (MARKE ET AL. 2016).	12
Abbildung 2: Einblick in das in R implementierte Schneemodell ESCIMOv2-R.....	15
Abbildung 3: Effektiver Leaf Area Index (LAI _{eff}) für den Freistaat Sachsen in 100m räumlicher Auflösung, abgeleitet aus 15 Sentinel-3 Szenen für den Zeitraum 01.11.2022-28.02.2023, Datengrundlage COPERNICUS (2025a).	18
Abbildung 4: Punktausgabe für die Station Fichtelberg, NetCDF-Datei visualisiert durch das Panoply NetCDF-Programm der NASA (NASA 2025).	22
Abbildung 5: Flächenausgabe für den Freistaat Sachsen, NetCDF-Datei visualisiert durch das Panoply NetCDF-Programm der NASA (NASA 2025).	22
Abbildung 6: Performanz unterschiedlicher Rechenoperationen bei Durchführung der Operationen auf Zellbasis in R, auf Arraybasis in R, auf Zellbasis in einer ausgelagerten Subroutine in Fortran und auf Arraybasis in einer ausgelagerten Subroutine in Fortran.....	23
Abbildung 7: Räumliche Verteilung (links) und Höhenverteilung (rechts) der für die Parametrisierung und Validierung eingesetzten 80 Flagship Stationen über das Gebiet des Freistaates Sachsen.	25
Abbildung 8: Die für den Vergleich von Schneemodellierungen und -messungen herangezogenen 80 Flagship Stationen in Sachsen und die jeweilige Datenverfügbarkeit für die Winter 2010-2020.	26
Abbildung 9: Simulierte und gemessene Schneehöhe am Standort Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) für den Winter 2011/2012 bei Variation der Flüssigwasserkapazität sowie der Parametrisierung der langwelligen Einstrahlung, des Phasenübergangs und der Schneedichte.	28
Abbildung 10: Simulierte und gemessene Schneehöhe am Standort Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) für den Winter 2011/2012 bei Variation der Flüssigwasserkapazität sowie der Parametrisierung der langwelligen Einstrahlung, des Phasenübergangs und der Schneedichte.	29
Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der simulierten und beobachteten Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.....	35

Abbildung 12: Simulierte und beobachtete Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.	36
Abbildung 13: Räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen nach Simulationen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.	36
Abbildung 14: Werte unterschiedlicher Effizienzkriterien bei Betrachtung aller 80 Flagship Stationen in Sachsen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.	37
Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der simulierten und beobachteten Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten und Rasterdaten als Modellantrieb.	39
Abbildung 16: Simulierte und beobachtete Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.....	40
Abbildung 17: Räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen nach Simulationen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.	40
Abbildung 18: Werte unterschiedlicher Effizienzkriterien bei Betrachtung aller 80 Flagship Stationen in Sachsen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.	41
Abbildung 19: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 28.02.2019 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).	45
Abbildung 20: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 08.02.2020 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).	46
Abbildung 21: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 12.02.2022 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).	47
Abbildung 22: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 09.03.2022 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).	48

Abkürzungsverzeichnis

CSV	Comma Separated Values
CLMS	Copernicus Land Cover Monitoring Service
DGM	Digitales Geländemodell
ESCIMO	Energy balance Snow Cover Integrated Model
IA	Index of Agreement
LAI _{eff}	Effektiver Leaf Area Index
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MAE	Mean Absolute Error
NetCDF	Network Common Data Form
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PBIAS	Percentual Bias
R ²	Bestimmtheitsmaß
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
RMSE	Root Mean Squared Error
SCL	Scene Classification Layer
UTM	Universal Transverse Mercator

Zusammenfassung

Um die Auswirkungen klimawandelbedingter Veränderungen im Schneegebiet zu untersuchen und zu dokumentieren, wird am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) das Schneemodell ESCIMO in der Modellversion v1 (STRASSER UND MARKE, 2010) eingesetzt. Ziel des in diesem Bericht beschriebenen Projektes ist i) die zeitliche Fortschreibung der bereits vorliegenden Schneemodellierung für den Freistaat Sachsen (Zeitraum 1961-2023, 100m räumliche Auflösung, stündliche Simulationen, aggregiert zu Tageswerten) sowie ii) die Aktualisierung des in R implementierten Schneemodells ESCIMO von der derzeit verwendeten Modellversion v1 (STRASSER UND MARKE, 2010), hin zur erweiterten Modellversion v2 (MARKE ET AL., 2016). Neben dem inhaltlichen Update des Modells sollten auch technische Verbesserungen umgesetzt werden, z.B. hinsichtlich der verwendeten Dateiformate oder einer Optimierung von Rechenzeit und Speicherbedarf. Als Ergebnis des Projektes wurde das ESCIMOv2-R Modell gänzlich neu in R implementiert, wobei durch die Entwicklung performanter Funktionen sowie die Verwendung des NetCDF (Network Common Data Form)-Formats für Ein- und Ausgaben eine effiziente Nutzung von Rechen- und Speicherressourcen realisiert werden konnte. Was das Update des Schneemodells angeht, so wurde das Modell i) um einen verbesserten Ansatz zur Bestimmung der Niederschlagsphase über die Feuchtkugelttemperatur, ii) die Ableitung der Schneetemperatur über die Energiebilanz der Schneedecke, iii) die Berücksichtigung des Kälte- und Flüssigwasserspeichers sowie iv) um ein Waldbestandsmodell zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Waldbestand und Schneedecke erweitert. Für die Simulationen im Freistaat Sachsen wurden unterschiedliche Parameterwerte (z.B. im Bereich des Phasenübergangs) sowie Prozessbeschreibungen (z.B. im Bereich der langwelligen Einstrahlung) getestet um eine optimale Parametrisierung des Modells zu gewährleisten. Um die Genauigkeit des Modells zu prüfen, wurden die Modellrechnungen an 80 Stationen mit meteorologischen Messungen und Schneemessungen (am Punkt) sowie unter Verwendung von Sentinel-basierten Schneekarten (auf der Fläche) evaluiert. Was die Evaluierung am Punkt angeht, so wurden sowohl Modellrechnungen mit Stationsdatenantrieb, als auch Modellrechnungen mit meteorologischem Antrieb aus regionalisierten meteorologischen Stationsmessungen analysiert. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die unter Stationsdatenantrieb durchgeführten Modellrechnungen mit vergleichsweise geringeren Unsicherheiten verbunden sind. Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, dass sowohl die Evaluierung am Punkt als auch die auf der Fläche gezeigt haben, dass das ESCIMOv2-R Modell die raumzeitliche Entwicklung der Schneedecke in Sachsen mit zufriedenstellender Genauigkeit beschreibt. Als Endergebnis des Projektes liegen auf Stundenbasis durchgeführte, flächenhafte Simulationen des Schneewasseräquivalents und der Schneehöhe in einer räumlichen Auflösung von 100m und einer täglichen zeitlichen Auflösung für die Winter (Oktober-Mai) der Jahre 1961-2023 vor.

1 Zielsetzung

Um die Auswirkungen klimawandelbedingter Veränderungen im Schneegebiet in den Fachbereichen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Tourismus zu untersuchen und zu dokumentieren, wird am Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) das Schneemodell ESCIMO in der Modellversion v1 (STRASSER UND MARKE, 2010) eingesetzt. Im Rahmen einer Aktualisierung und inhaltlichen Erweiterung des Sächsischen Klimafolgenmonitorings soll in diesem Projekt i) eine zeitliche Fortschreibung der bereits vorliegenden Schneemodellierung für den Freistaat Sachsen sowie ii) eine Aktualisierung des in R implementierten Schneemodells ESCIMO von der derzeit verwendeten Modellversion v1 (STRASSER UND MARKE, 2010), hin zur erweiterten Modellversion v2 (MARKE ET AL., 2016), erfolgen. Neben dem inhaltlichen Update des Modells, sollen im Rahmen der Aktualisierung auch technische Verbesserungen umgesetzt werden, z.B. hinsichtlich der verwendeten Dateiformate oder einer Optimierung von Rechenzeit und Speicherbedarf. Die Hauptergebnisse und damit Leistungen des in diesem Bericht beschriebenen Projekts sind:

- Ein dokumentiertes und für den Freistaat Sachsen evaluiertes Setup von ESCIMOv2 implementiert in R (ESCIMOv2-R)
- Simulationen des Schneewasseräquivalents und der Schneehöhe für den Freistaat Sachsen (stündliche Modellrechnungen für den Zeitraum 1961-2023, auf Tageswerte aggregiert, 100x100m räumliche Auflösung)

Die flächenhaften Modellrechnungen basieren auf einem meteorologischen Antriebsdatensatz (Zeitraum 1961-2023, zeitliche Auflösung 1h, räumliche Auflösung 100x100m) der durch das LfULG bereitgestellt wird und die Grundvoraussetzung für die Durchführbarkeit des Projekts darstellt. Die Modellrechnungen werden für das Gebiet des Freistaates Sachsen im Koordinatensystem „ETRS1989, UTM Zone 33N“ (EPSG 25833) durchgeführt und die Ergebnisse in selbigem Koordinatensystem ausgegeben. Da der flächenhafte Antriebsdatensatz erst nach dem vierten Projektmonat bereitsteht, wird die Modellentwicklung und -evaluation zunächst am Punkt durchgeführt und dann auf die Fläche übertragen.

Für die Simulationen im Freistaat Sachsen werden unterschiedliche Parameterwerte (z.B. für die Abschätzung der Niederschlagsphase) sowie Prozessbeschreibungen (z.B. zur Berechnung der langwelligen Einstrahlung) getestet um eine optimale Parametrisierung des Modells für das Untersuchungsgebiet zu gewährleisten.

Die Evaluierung der Modellergebnisse erfolgt zunächst für die Punktsimulationen durch Vergleich gemessener Schneehöhen mit Modellergebnissen, die durch Verwendung von meteorologischen Messungen am Punkt als Modelleingaben erzeugt wurden. Nach dem Übertrag des Modells auf die Fläche und erfolgreich durchgeführten Modellrechnungen für ganz Sachsen, werden die Modellausgaben für die Koordinaten der Schneemessstationen mit den dortigen Schneemessungen verglichen sowie in einem zweiten Schritt die flächenhaften Modellierungen mit aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Schneekarten evaluiert.

2 Modellupdate

2.1 Modellfunktionalität

Die Aktualisierung des derzeit zur Simulation der Schneedecke im Freistaat Sachsen eingesetzten Schneemodells (ESCIMOv1, STRASSER UND MARKE, 2010) hinsichtlich der in MARKE ET AL. (2016) beschriebenen Erweiterungen hin zur Modellversion ESCIMOv2 wurde zunächst am Punkt durchgeführt. Die Vorgehensweise, das R-Modell zunächst am Punkt (den Standorten der Klima- und Schneemessung in Sachsen) zu entwickeln und in einem zweiten Schritt auf die Fläche zu übertragen, steht im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit der für die Flächenrechnungen erforderlichen meteorologischen Rasterdaten, die erst im letzten Drittel des Projektes (ab Projektmonat 5) bereitstanden.

Die im Vergleich zu ESCIMOv1 neu implementierte Funktionalität umfasst v.a. die Erweiterung um:

- Einen verbesserten Ansatz zur Bestimmung der **Niederschlagsphase** über die Feuchtkugeltemperatur (anstatt über die Lufttemperatur wie in ESCIMOv1 realisiert)
- Einen Ansatz zur Berechnung der **Schneetemperatur** über die Energiebilanz der Schneedecke (anstatt der Abschätzung über die Lufttemperatur wie in ESCIMOv1 realisiert)
- Ansätze zur Berücksichtigung des **Kälte- und Flüssigwasserspeichers** in der Schneedecke
- Ein **Waldbestandsmodell** zur Modifikation der meteorologischen Bedingungen in Waldbeständen sowie zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Waldbestand und Schneedecke (z.B. der Schneeinterzeption sowie der Sublimation und Schmelze im Bereich der Baumkronen)

Im Folgenden soll die neu implementierte Funktionalität für die einzelnen Erweiterungen kurz beschrieben werden. Die Vielzahl der für diese Erweiterungen eingesetzten Gleichungen ist (sofern nicht anders angegeben) in MARKE ET AL. (2016) im Detail beschrieben.

2.1.1 Bestimmung des Phasenübergangs

Der Bestimmung der Niederschlagsphase kommt in der Schneemodellierung eine besondere Bedeutung zu, da eine realistische Abschätzung des Schneeniederschlags essentiell für eine akkurate Simulation des Schneedeckenaufbaus ist. Der in der Modellversion ESCIMOv1 implementierte Ansatz zur Bestimmung der Niederschlagsphase basiert auf der Lufttemperatur und berücksichtigt dadurch nicht, dass durch die Verdunstungskälte bei geringer Luftfeuchte auch bei vergleichsweise hohen Lufttemperaturen noch fester Niederschlag fallen kann. Um dem komplexen Zusammenspiel von Luftfeuchte und Temperatur bei der Bestimmung der Niederschlagsphase Rechnung tragen zu können, wird in der Modellversion ESCIMOv2 die Feuchtkugeltemperatur als Kriterium zur Phasentrennung eingesetzt. Als kombiniertes Maß für Temperatur und Luftfeuchte ermöglicht die Feuchtkugeltemperatur eine präzisere Bestimmung der Niederschlagsphase, sie wird in diesem Projekt nach STULL (2011) wie folgt abgeschätzt:

$$Tw = Ta * \operatorname{atan}\left[0.151977 * (RH + 8.313659)^{1/2}\right] + \operatorname{atan}(Ta + RH) - \operatorname{atan}(RH - 1.676331) + 0.00391838 * RH^{3/2} * \operatorname{atan}(0.023101 * RH) - 4.686035 \quad (1)$$

Tw *Feuchtkugeltemperatur [°C]*

Ta *Lufttemperatur [°C]*

RH *Relative Luftfeuchte [%]*

2.1.2 Bestimmung der Schneetemperatur

Die Schneetemperatur entscheidet im Modell darüber, ob Schnee schmilzt (ab Schmelztemperatur) oder der Schnee durch Energieeinträge zunächst auf Schmelztemperatur erwärmt werden muss. Während die Schneetemperatur in der Modellversion ESCIMOv1 gleich der Lufttemperatur angenommen wurde (mit einer maximalen Schneetemperatur von 0°C), berechnet der in der Version ESCIMOv2 implementierte Ansatz diese unter Berücksichtigung der Energiebilanz der Schneedecke. Dabei werden Änderungen in der Schneetemperatur nach MARKE ET AL. (2016) berechnet als:

$$dT = \frac{E_{t-1} * dt + RF_{t-1} * c_i}{(SWE_{t-1} + P_s) * c_s} \quad (2)$$

dT *Schneetemperaturänderung [K]*

E_{t-1} *Energiebilanz der Schneedecke zum vorherigen Zeitschritt [W/m²]*

dt *Zeitschrittlänge [s]*

RF_{t-1} *Wiedergefrierendes Wasser zum vorherigen Zeitschritt [mm]*

c_i *Schmelzenergie ($3.337 * 10^5$) [J/kg]*

SWE_{t-1} *Schneewasseräquivalent zum vorherigen Zeitschritt [mm]*

P_s *Schneeniederschlag [mm]*

c_s *Spezifische Wärme des Schnees (2100) [J/(kgK)]*

2.1.3 Berechnung des Kälte- und Flüssigwasserspeichers

Der Kältespeicher beschreibt den energetischen Zustand der Schneedecke und hängt in ESCIMOv2 unmittelbar von der Temperatur der Schneedecke ab (siehe MARKE ET AL., 2016):

$$C_c = \frac{(T_s - 273.16) * (SWE_{t-1} + P_s) * c_s}{c_i} \quad (3)$$

C_c	<i>Kältespeicher [mm]</i>
T_s	<i>Schneetemperatur [K]</i>
SWE_{t-1}	<i>Schneewasseräquivalent zum vorherigen Zeitschritt [mm]</i>
P_s	<i>Schneeniederschlag [mm]</i>
c_s	<i>Spezifische Wärme des Schnees (2100) [J/(kgK)]</i>
c_i	<i>Schmelzenergie von Eis ($3.337 * 10^5$) [J/kg]</i>

Die in ESCIMOv2 implementierte Berechnung des Flüssigwasseranteils in der Schneedecke ermöglicht die Speicherung von Wasser sowie die Berücksichtigung eines Wiedergefrierens von Wasser in der Schneedecke. Der Flüssigwasserspeicher wird nach MARKE ET AL. (2016) berechnet als:

$$C_{lw} = C_{lw\ t-1} + P_l - RF \quad (4)$$

C_{lw}	<i>Flüssigwasserspeicher [mm]</i>
$C_{lw\ t-1}$	<i>Flüssigwasserspeicher zum vorherigen Zeitschritt [mm]</i>
P_l	<i>Flüssiger Niederschlag [mm]</i>
RF	<i>Wiedergefrierendes Wasser [mm]</i>

Die kombinierte Betrachtung von Kälte- und Flüssigwasserspeicher erlaubt es, die zeitliche Verzögerung zwischen dem Einsetzen der Schneeschmelze und dem Ausfließen von Schmelzwasser aus der Schneedecke zu berücksichtigen und ist somit v.a. für wasserwirtschaftliche Anwendungen von großer Bedeutung.

2.1.4 Das Waldbestandsmodell

Das in ESCIMOv2 integrierte Waldbestandsmodell berücksichtigt den Umstand, dass sich die Schneebedingungen inner- und außerhalb des Waldes stark unterscheiden, aber meteorologische Beobachtungen im Wald für die Simulation des Schneedeckenauf- und -abbaus im Wald in der Regel nicht vorliegen. Um die Schneedeckenentwicklung im Wald dennoch abbilden zu können, werden außerhalb des Waldes verfügbare meteorologische Informationen zu Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit in ESCIMOv2 entsprechend des Einflusses des Waldbestands

auf diese Größen modifiziert. Die wesentliche Eigenschaft des Waldes, die hierbei Berücksichtigung findet, ist der effektive Leaf Area Index (LAI_{eff}) des Waldbestandes. Dieser beeinflusst im Modell neben der kurz- und langwelligen Einstrahlung im Waldbestand auch die Windgeschwindigkeit, die Temperatur, die Luftfeuchte sowie die Interzeption von festem Niederschlag. Dabei wird abgefangener Niederschlag im Modell durch Sublimationsverluste sowie durch Gravitation und Schmelze herabfallenden Schnee reduziert (siehe Abbildung 1).

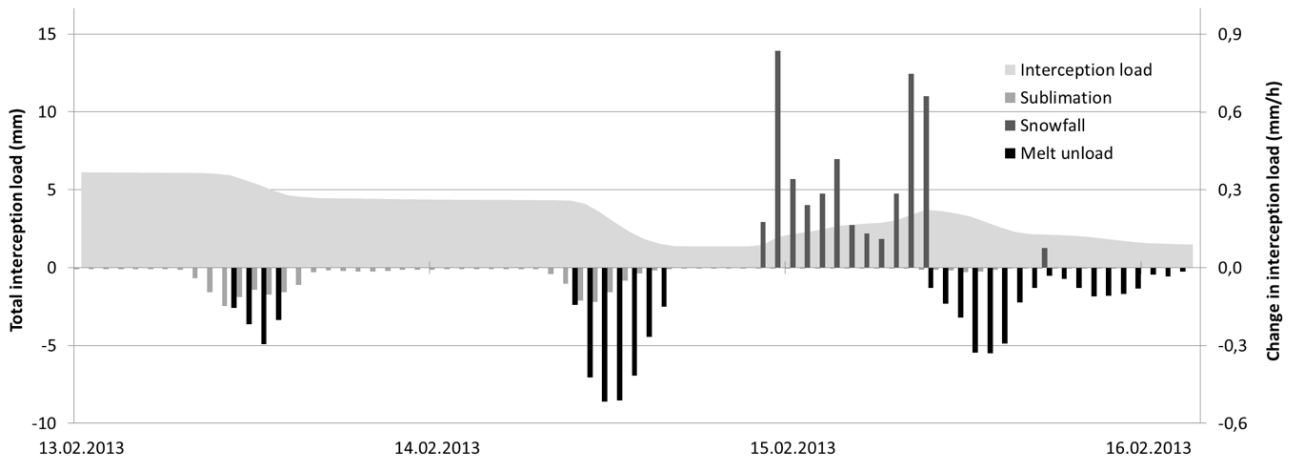


Abbildung 1: Simuliertes Auffüllen und Aufzehren des Interzeptionsspeichers durch Schneefall, Sublimation und Schmelze am Standort Vordersteinwald im Schwarzwald (MARKE ET AL. 2016).

2.1.5 Sonstige Erweiterungen

Neben der eben beschriebenen Funktionalität waren weitere Erweiterungen des Modells erforderlich, die nicht in MARKE ET AL. (2016) beschrieben werden. Dabei handelt es sich um Ansätze zur Parametrisierung der **langwelligen Einstrahlung** sowie der **Schneedichte** zur Ableitung der Schneehöhe aus simulierten Werten des Schneewasseräquivalents.

2.1.5.1 Parametrisierung der langwelligen Einstrahlung

Die langwellige Einstrahlung ist neben der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit, dem Niederschlag und der Globalstrahlung eine für die Modellrechnungen erforderliche Eingabegröße, die anders als die übrigen meteorologischen Größen aber weder an den in Sachsen befindlichen Klimastationen gemessen wird, noch als Teil des meteorologischen Flächendatensatzes bereitgestellt wird. Somit war es für die Modellrechnungen im Projekt erforderlich, die langwellige Einstrahlung über andere, verfügbare Information abzuleiten. Der in diesem Projekt in ESCIMOv2-R implementierte Ansatz wurde im Rahmen der Modellparametrisierung getestet und aufgrund seiner guten Performanz ausgewählt (siehe Kapitel 4.3). Er berechnet die langwellige Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen nach DILLEY UND O'BRIEN (1998) als:

$$LW_{clear} = 59.38 + 113.7 \left(\left(\frac{T}{273.16} \right) \right)^6 + 96.96 \sqrt{46.5 \frac{e}{T} / 2.5} \quad (5)$$

LW_{clear} *Langwellige Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen [W/m²]*
T *Lufttemperatur [K]*
e *Wasserdampfdruck [hPa]*

Die langwellige Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen wird anschließend durch einen Ansatz nach JACOBS (1978) unter Berücksichtigung der aktuellen Bewölkung modifiziert:

$$LW_{cloud} = (1 + a * CF) * LW_{clear} \quad (6)$$

LW_{cloud} *Langwellige Einstrahlung unter bewölkten Bedingungen [W/m²]*
LW_{clear} *Langwellige Einstrahlung unter wolkenlosen Bedingungen [W/m²]*
a *Empirischer Parameter (0.26) [-]*
CF *Wolkenbedeckung (0-1) [-]*

Die hierfür erforderliche Wolkenbedeckung wird zuvor nach LISTON UND ELDER (2006) über die Luftfeuchte im 700hPa Niveau abgeleitet. Im Vergleich zu anderen Ansätzen, welche die Bewölkung durch einen Vergleich der aktuellen kurzwelligen Einstrahlung zur potentiellen Einstrahlung abschätzen, hat diese Herangehensweise den Vorteil, dass auch in der Nacht Bewölkungswerte berechnet werden können. Letzteres ist für die kontinuierliche Bestimmung der stündlichen Energiebilanz der Schneedecke unabdingbar.

2.1.5.2 Parametrisierung der Schneedichte

Da die primäre Simulationsgröße des ESCIMO Modells das Schneewasseräquivalent darstellt, an den Stationen mit Schneemessungen in Sachsen aber lediglich die Schneehöhe gemessen wird, aber auch weil die Berechnung und Bereitstellung der täglichen Schneehöhe für den Freistaat Sachsen explizit gewünscht war, musste im Modell eine Parametrisierung der Schneedichte implementiert werden. Durch eine Abschätzung der Schneedichte (kg/m³) kann das Schneewasseräquivalent (kg/m²) in eine Schneehöhe (m) umgerechnet werden. Im Rahmen der Modellparametrisierung wurden verschiedene Ansätze getestet (siehe Kapitel 4.3) und dann ein Ansatz ausgewählt, der in ESSERY ET AL. (2013) im Detail beschrieben wird. Er berechnet die Schneedichte als:

$$\rho_s(t) = \rho_{max} + (\rho_s(t-1) - \rho_{max}) * \exp\left(-\frac{dt}{tp}\right)$$

(7)

$\rho_s(t)$	<i>Schneedichte zum aktuellen Zeitschritt [kg/m³]</i>
ρ_{max}	<i>Maximale Schneedichte [kg/m³] (500 kg/m³ für schmelzenden Schnee, 300 kg/m³ für kalten Schnee)</i>
$\rho_s(t-1)$	<i>Schneedichte zum vorherigen Zeitschritt [kg/m³]</i>
dt	<i>Zeitschrittlänge [h]</i>
tp	<i>Kompaktionszeit (200) [h]</i>

Die Schneedichte nimmt nach diesem Ansatz nach einem Schneefall von einer angenommenen Neuschneedichte (100 kg/m³) je nach Temperatur der Schneedecke mit der Zeit durch Kompaktion der Schneedecke mehr oder weniger schnell bis zu einer maximalen Schneedichte zu.

2.2 Modellstruktur

Das ESCIMOv2-R Modell wurde im Projekt zur Gänze neu in R programmiert. Die Notwendigkeit dafür resultierte aus den sehr umfangreichen Veränderungen in der Modellstruktur im Vergleich zur Vorversion, v.a. i) dem Umstieg auf das NetCDF (Network Common Data Form)-Format für Modelleingaben und -ausgaben, ii) dem Wechsel von mittlerweile nicht mehr unterstützen R Bibliotheken wie “rgdal” auf aktuelle Bibliotheken wie “Terra” sowie iii) die betriebssystemunabhängige Umsetzung durch Verzicht auf Windows-spezifische Batch-Dateien. Als Resultat dieser Entwicklungen liegt mit dem R-Skript „ESCIMOv2-R.R“ nun ein im Modellcode selbst übersichtlich dokumentiertes Schneemodell vor (siehe Abbildung 2), das sich hinsichtlich der Modellstruktur in folgende Teilbereiche untergliedern lässt:

- **Modelleinstellungen:** dieser Bereich beinhaltet die Definition von Pfad- und Dateinamen, des Start- und Enddatums für den Modelllauf, der Namen der Variablen für alle meteorologischen Eingabegrößen (z.B. der Temperatur) in den meteorologischen Antriebsdaten im NetCDF-Format, Information zum verwendeten Koordinatensystem (einschließlich der Benennung der X- und Y-Koordinatenvariablen in den NetCDF-Dateien) sowie gewünschte Ausgabevariablen als Modellergebnisse im NetCDF-Format.
- **Modellparameter und Konstanten:** dieser Bereich beinhaltet alle im Modell verwendeten Parameter und Konstanten einschließlich einer kurzen Beschreibung und deren physikalischen Einheiten.
- **Prozessierung von Modelleingaben:** dieser Bereich beinhaltet das Einlesen der statischen Modelleingaben (LAleff und Geländehöhe), der Projektionsparameter und der Koordinaten der gewünschten Punktausgaben.

- **Initialisierung der kontinuierlichen Modellvariablen:** dieser Bereich beinhaltet die Initialisierung sämtlicher kontinuierlichen Modellvariablen (die im Laufe eines Modellaufes aktualisiert werden, wie z.B. das Schneewasseräquivalent) einschließlich einer kurzen Beschreibung und deren physikalischen Einheiten.
- **Modellberechnungen:** dieser Bereich beinhaltet die Schleife über alle Modellzeitschritte und sämtliche für alle Zeitschritte durchgeführte Berechnungen. Ebenso enthalten ist die Initialisierung der nicht-kontinuierlichen Modellvariablen (die für jeden Zeitschritt unabhängig von deren vorherigen Werten neu berechnet werden, wie z.B. die Schneeschmelze) einschließlich einer kurzen Beschreibung und deren physikalischen Einheiten.
- **Schreiben von Modellausgaben:** dieser Bereich beinhaltet das Schreiben der Punkt- und Flächenausgaben im NetCDF-Format.

```
# ----- #
#                                     #
#           R-Version of the ESCIMO.spread v2 snow model           #
#           which was originally developed by Marke et al. (2016)   #
#           building upon earlier work by Strasser and Marke (2010) #
#                                     #
#           Code implementation in R by:                             #
#           Thomas Marke, University of Innsbruck 2024/2025        #
# ----- #

# ----- #
#                                     #
# Reference:                                                         #
#                                     #
# Marke, T., Mair, E., Förster, K., Hanzer, F., Garvelmann, J.,    #
# Pohl, S., Warscher, M. and Strasser, U. (2016): ESCIMO.spread (v2): #
# parameterization of a spreadsheet-based energy balance snow model for #
# inside-canopy conditions, Geosci. Model Dev., 9, 633-646,        #
# https://doi.org/10.5194/gmd-9-633-2016. #
# ----- #
|
# *****
# Setup screen
# *****
print('')
print('      +-+--+--+--+--+--+')
print('      |E|S|C|I|O|I|v|I|')
print('      +-+--+--+--+--+--+')
print('')

# *****
# Working environment
# *****

# Load libraries
library(this.path)      # Set working directory to the path of this script
library(lubridate)      # Support working with time information
library(RNetCDF)        # Read/write NetCDF data in R
library(fields)         # Create simple plots for grids
library(readxl)         # Read Excel data
library(writexl)        # Write Excel data
```

Abbildung 2: Einblick in das in R implementierte Schneemodell ESCIMOv2-R.

Neben dem eben beschriebenen Modell wurde ein zusätzliches R-Skript „ESCIMOv2-R_Functions.R“ entwickelt, welches einige umfangreichere Funktionen des Modells beinhaltet, die im Modell selbst verwendet werden. Zu diesen gehören Funktionen, wie die zur Berechnung der Bewölkung, der langwelligen Einstrahlung, der Schneedichte sowie Funktionen zur Berechnung der Zeilen-/Spaltenposition von Ausgabekoordinaten oder eigens entwickelte Funktionen zur rechenextensiven Berechnung von Temperaturminima und -maxima aus einem dreidimensionalen Rasterarray (Rasterdaten der letzten 24 Modellstunden) zur Modelllaufzeit.

Das Modell kann als R-Skript über die Kommandozeile aufgerufen werden, oder durch Ausführen des R-Skripts in RStudio gestartet werden. Während im Fall der Ausführung über die Kommandozeile alle Eingabeoptionen (z.B. Start- und Endzeitpunkt) als Argumente übergeben werden müssen, können diese im Fall der Ausführung über RStudio im Modell selbst definiert werden. Dabei sind diese beiden Ausführungsoptionen im Modell so realisiert, dass sobald Argumente beim Modellstart übergeben werden von einer Ausführung in der Kommandozeile ausgegangen wird, werden keine Argumente übergeben, werden alle Einstellungen aus dem Modellcode übernommen. Ein Beispiel für den Aufruf des Modells über die Kommandozeile ist im Modellcode bereitgestellt.

2.3 Modelleingaben

2.3.1 Meteorologische Eingaben

Das ESCIMOv2-R Modell benötigt für die Simulation der Energiebilanz der Schneedecke folgende 5 Eingabegrößen in stündlicher Auflösung für das Modellgebiet:

- Lufttemperatur (°C oder K)
- Relative Luftfeuchte (%)
- Windgeschwindigkeit (m/s)
- Niederschlag (mm)
- Globalstrahlung (W/m²)

Die für die Modellrechnungen am Punkt erforderlichen meteorologischen Eingaben wurden vom Auftraggeber bereitgestellt. Die erforderlichen Formatkonvertierungen vom Quellformat (eine Datei für den Zeitraum 1961-2023 pro Klimavariablen im CSV-Format) ins Zielformat des ESCIMOv2-R Modells (eine Datei pro Station mit allen Klimavariablen für den Zeitraum 1961-2023 im NetCDF-Format) konnten unter Verwendung geeigneter Bibliotheken in R im Rahmen eines Preprocessings durchgeführt werden.

Die flächenhaften Eingaben wurden in einem vorangehenden Projekt des Auftraggebers neu entwickelt und in 100m räumlicher und stündlicher zeitlicher Auflösung bereitgestellt. Anders als bei Verwendung der Stationsdaten als Eingaben für die Simulationen am Punkt, handelt es sich dabei um 5 Dateien im

NetCDF-Format für jeden Modelltag, welche für jede der oben genannten 5 Eingabegrößen die 24 stündlichen Datensätze für den zugehörigen Tag beinhalten. Dabei sind die Dateien durch das jeweilige Datum im Dateinamen gekennzeichnet (z.B. „TM_2020-01-01.nc“ für die Temperaturdaten des 1. Januars 2020) und in unterschiedlichen Ordnern (je ein Ordner pro Variable) abgelegt. Die Zusammensetzung der Dateinamen und die zugehörige Ordnerstruktur können im Modell entsprechend definiert und somit für zukünftige Studien leicht angepasst werden (siehe Kapitel 2.3.3). Ebenso sind die Namen der aus den NetCDF-Daten auszulesenden Variablen (z.B. „Temperatur“ für die Lufttemperatur) im Modell frei einstellbar.

2.3.2 Statische Eingaben

Die statischen Eingaben bestehen aus dem vom Auftraggeber bereitgestellten digitalen Geländemodell (DGM) sowie einem weiteren Datensatz, der den effektiven Leaf Area Index (LAI_{eff}) für das gesamte Untersuchungsgebiet und die Wintersaison darstellt. Die statischen Eingaben werden in einer NetCDF-Datei mit gleichen Eigenschaften (z.B. Ausdehnung, räumliche Auflösung, Projektion) wie die des zugehörigen meteorologischen Antriebs bereitgestellt. Der Copernicus Land Cover Monitoring Service (CLMS) stellt ein LAI-Produkt bereit, das auf der Sentinel-3 Satellitenmission beruht und den effektiven LAI auf globalem Maßstab in einer zehntägigen zeitlichen und einer räumlichen Auflösung von 300m darstellt (COPERNICUS 2025a). Die Verwendung eines ähnlichen Produkts mit 10m Auflösung (COPERNICUS 2025b) wurde aufgrund zu geringer Datenverfügbarkeit verworfen. Das verwendete 300m Produkt enthält wolkenbedingte Lücken, so dass eine einzelne Szene nicht direkt als Eingabe in das Modell verwendet werden konnte. Um eine lückenlose LAI_{eff} Karte zu erzeugen, wurden alle verfügbaren Winterszenen für den Zeitraum 01.11.2022-28.02.2023 heruntergeladen (15 Szenen) und bilinear auf die Modellauflösung von 100m interpoliert. Schließlich wurde für jede Zelle der durchschnittliche effektive LAI über alle verfügbaren Szenen gebildet (siehe Abbildung 3).

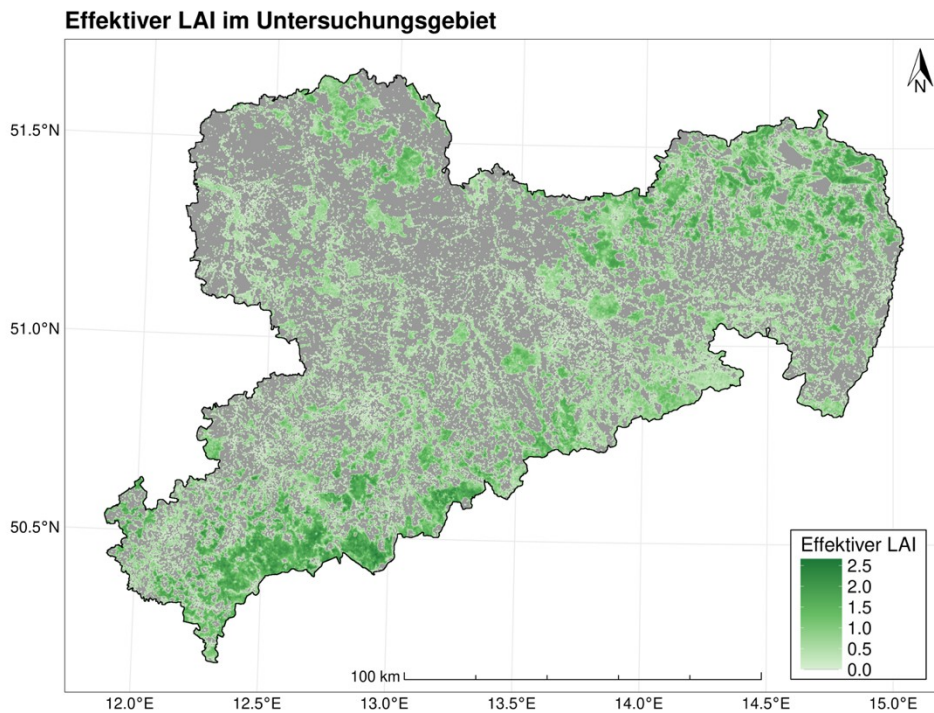


Abbildung 3: Effektiver Leaf Area Index (LAI_{eff}) für den Freistaat Sachsen in 100m räumlicher Auflösung, abgeleitet aus 15 Sentinel-3 Szenen für den Zeitraum 01.11.2022-28.02.2023, Datengrundlage COPERNICUS (2025a).

Diese Herangehensweise erlaubt es wolkenbedingte Lücken zu füllen und gleichzeitig die zeitliche Entwicklung der Vegetation im Winter zu berücksichtigen. Da das Bestandsmodell in ESCIMOv2-R lediglich für die Berücksichtigung von Waldgebieten geeignet ist, aber auch höhere effektive LAI Werte außerhalb des Waldes auftreten können (z.B. in landwirtschaftlich genutzten Flächen), wurde als nächster Schritt ein weiteres CLMS Produkt verwendet, um Nicht-Waldflächen auszumaskieren. Hierfür wurde das CLC+ Backbone 2018 Produkt (COPERNICUS 2025c) herangezogen, welches die Landbedeckung in 11 Klassen einteilt. Für alle Rasterzellen, die nicht als Klasse 2 (Nadelwald), Klasse 3 (sommergrüner Laubwald) oder Klasse 4 (immergrüner Laubwald) klassifiziert sind, wurde der effektive LAI auf 0 gesetzt, sodass nur tatsächliche Waldflächen im Modell als solche behandelt werden.

2.3.3 Modelleinstellungen

Das ESCIMOv2-R Modell kann sehr flexibel für die Berechnung der Schneebedingungen für unterschiedliche Gebiete und Zeiträume eingesetzt werden. Dafür kann eine Vielzahl an Einstellungen vorgenommen werden um das Modell an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Zu diesen Einstellungen gehören die Definition von:

1. Pfad- und Dateinamen der statischen und meteorologischen Modelleingaben sowie der gewünschten Modellausgaben auf Punkt und Fläche

Beispiel:

```
# Define path for meteorological input (with subfolders for all variables)
```

```
# and static (elevation, LAleff) input files
```

```
meteoinput='./Saxony/meteo/'
```

```
staticinput='./Saxony/static/saxony_static.nc'
```

```
# Define the names of meteo input pathes
```

```
temppath='TM/'
```

```
rhpath='RF/'
```

```
wspath='FM/'
```

```
precippath='RK/'
```

```
swinpath='RG/'
```

```
# Define the names of meteo input files
```

```
temppredate='TM_'
```

```
temppostdate='.nc'
```

```
rhpredate='RF_'
```

```
rhpostdate='.nc'
```

```
wspredate='FM_'
```

```
wspostdate='.nc'
```

```
precippredate='RK_'
```

```
precippostdate='.nc'
```

```
swinpredate='RG_'
```

```
swinpostdate='.nc'
```

```
# Define output path and file
```

```
escimooutput='./Saxony/output/output.nc'
```

```
outputpath='./Saxony/output/'
```

```
# Output locations
```

```
outputlocations='./Saxony/OutputLocations.xlsx'
```

2. Start- und Enddatum für den Modelllauf

Beispiel:

```
# Define start and end of model simulations
```

```
modelstart='2020-10-01'
```

```
modelend='2021-06-01'
```

3. **Namen der Variablen für Temperatur (K oder °C), Luftfeuchte (%), Windgeschwindigkeit (m/s), Niederschlag (mm) und Globalstrahlung (W/m²) in den meteorologischen Antriebsdaten im NetCDF-Format**

Die Temperatureingaben werden standardmäßig in °C verlangt (temp_unit='C'), jedoch sind durch Setzen der Variable temp_unit='K' auch Eingaben in K möglich.

Beispiel:

```
# Define the names of meteo input variables
tempvar='Temperatur'
rhvar='Relative Feuchte'
wsvar='Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe'
precipvar='RK'
swinvar='Globalstrahlung'
```

4. **Namen von Projektions- und Koordinatenvariablen in den statischen und meteorologischen Modelleingaben**

Beispiel:

```
# Define projection-related variables in static input file (used for NetCDF output)
crsvar='transverse_mercator'
projected=1
xvar='x'
yvar='y'
```

5. **Gewünschten Ausgabevariablen im NetCDF-Format**

Beispiel:

```
# Write all variables to file?
allout=0

# Define gridded outside canopy variables to be written to file
canopymaskout=1;outputmaskout=1;tempout=0;rhout=0;wsout=0;precipout=0;swinout=0;cloud-
coverout=0;lwinout=0;wetbulbtempout=0;shareliqprecipout=0;sharesolprecipout=0;liqprecip-
out=0;solprecipout=0;snowageout=0;snowalbout=0;snowtempout=0;vappresairout=0;vappressnow-
out=0;swradbalout=0;lwradbalout=0;latfluxout=0;sensfluxout=0;advflux-
liqout=0;advfluxsolout=0;ebalsnowout=0;potmeltout=0;coldcontmmout=0;sublimout=0;mel-
tout=0;refreezeout=0;liqwatcontout=0;outflowout=0;sweout=0;snowdensout=0;snowdepthout=0
```


Define gridded inside canopy variables to be written to file

```
radfracout=0;canfracout=0;canflowindexout=0;canswinout=0;canlwin-  
out=0;canwsout=0;canrhout=0;tminout=0;tmaxout=0;tmeanout=0;deltatout=0;canswabsout=0;reyn-  
oldout=0;nusseltout=0;sherwoodout=0;cansatvapout=0;satsdensvapout=0;watvapdifout=0;ome-  
gaout=0;ratemasslossout=0;sublimlosscoeffout=0;maxinterceptout=0;snowinterceptout=0;caninter-  
ceptloadout=0;canexposcoeffout=0;treesublimout=0;treemeltout=0;groundliqprecipout=0;ground-  
solprecipout=0;throughsolprecipout=0;cansnowageout=0;cansnowalbout=0;cansnowtem-  
pout=0;cansnowdeltatout=0;groundprecipout=0;canvappresairout=0;canvappressnowout=0;canlat-  
fluxout=0;canswradbalout=0;canlwradbalout=0;cansensfluxout=0;canadvflux-  
liqout=0;canadvfluxsolout=0;canebalsnowout=0;cancoldcontmmout=0;cansublimout=0;canpotmel-  
tout=0;canmeltout=0;canrefreezeout=0;canliqwatcontout=0;canoutflowout=0;cansweout=0;cans-  
nowdensout=0;cansnowdepthout=0
```

Define gridded combined variables (outside canopy+inside canopy) to be written to file

```
totsweout=1;totsnowdensout=0;totsnowdepthout=1
```

Da die unter 1 und 2 genannten Einstellungen in vielen Anwendungsfällen unterschiedlich ausfallen, können diese wahlweise im R-Skript eingestellt werden oder bei Aufruf des Modells über die Kommandozeile als Argumente übergeben werden. Dabei muss bei Übergabe der Argumente in der Kommandozeile die Reihenfolge der Argumente beachtet werden (args[1]-args[n], siehe Modellcode).

Bei den unter 3-5 genannten Einstellungen wird davon ausgegangen, dass diese weniger oft angepasst werden müssen, sie können deshalb ausschließlich im R-Skript selbst eingestellt werden. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass bei den unter 5 angesprochenen Modellausgaben auf der Fläche zwar (durch Setzen der jeweiligen Variable auf den Wert 1, z.B. snowdepthout=1) sämtliche Modellberechnungen ausgegeben werden können, das Schreiben jeder Ausgabegröße jedoch Rechenzeit und Speicherplatz beansprucht. Im Projekt wurde lediglich das kombinierte Schneewasseräquivalent und die kombinierte Schneehöhe (d.h. innerhalb und außerhalb des Waldbestandes) ausgegeben (totsweout=1;totsnowdepthout=1), dies sind die derzeit gesetzten Standardeinstellungen im Modell.

Für die Ausgabe von Ergebnissen für einzelne Rasterzellen, kann eine Datei im Excel-Format (*.xlsx) übergeben werden (siehe 1, outputlocations="./Saxony/OutputLocations.xlsx"), welche Ausgabepunkte und deren projizierte Koordinaten beinhaltet. Wird der Name dieser Datei auf „none“ gesetzt, werden die Ergebnisse der ersten Zeile und Spalte ausgegeben. Diese Ausgaben am Punkt beinhalten standardmäßig alle wichtigen Modellberechnungen.

2.4 Modellausgaben

2.4.1 Punktuelle Ausgaben

Die punktuellen Ausgaben werden durch Definition einer Datei mit den Koordinaten gewünschter Ausgabepunkte festgelegt (siehe Kapitel 2.3.3). Dadurch werden im Modellauf für jeden Ausgabepunkt, d.h.

die korrespondierende Rasterzelle, alle wichtigen Modellberechnungen in einer gesonderten NetCDF-Datei ausgegeben (siehe Abbildung 4). Zusätzlich wird eine Datei „UsedOutputLocations.xlsx“ in das Ausgabeverzeichnis geschrieben, in der festgehalten wird, mit welcher Zeilen- und Spaltenposition die einzelnen Ausgabepunkte korrespondieren.

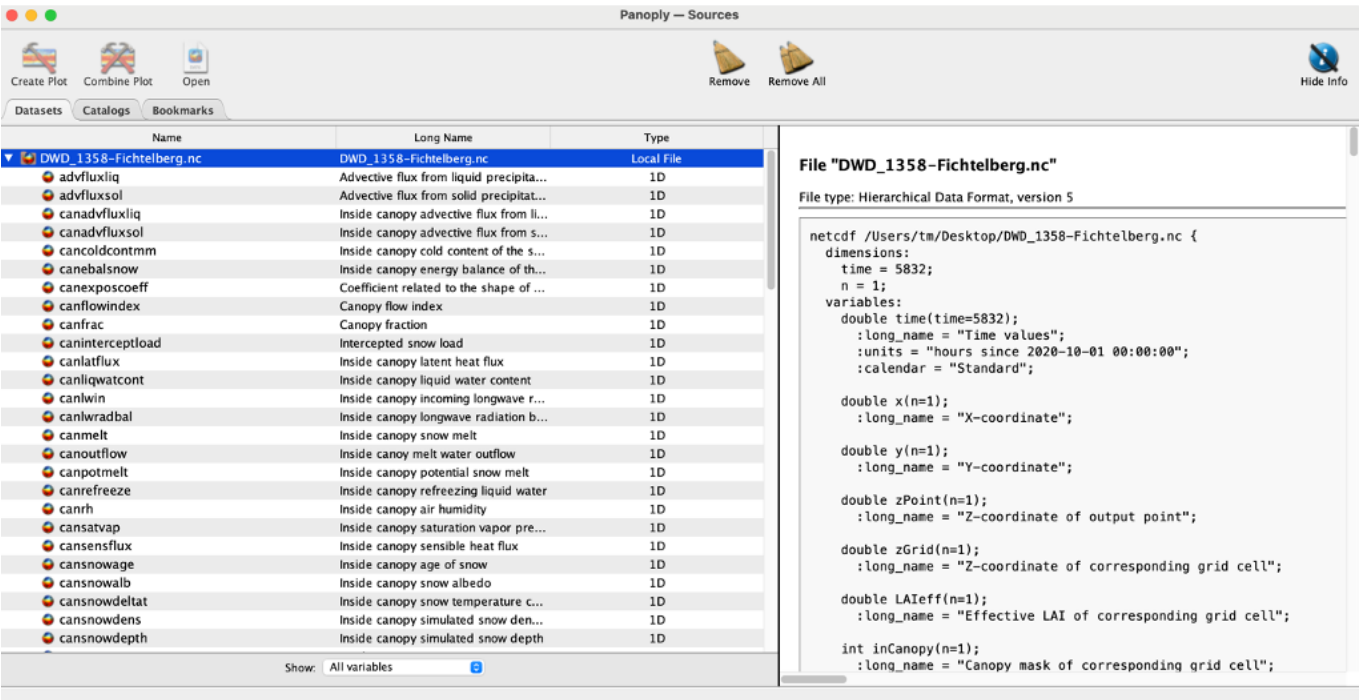


Abbildung 4: Punktausgabe für die Station Fichtelberg, NetCDF-Datei visualisiert durch das Panoply NetCDF-Programm der NASA (NASA 2025).

2.4.2 Flächenhafte Ausgaben

Die flächenhaften Modellausgaben werden durch Auswahl der gewünschten Ausgabevariablen im Programmcode festgelegt (siehe Kapitel 2.3.3). Hier werden alle gewählten Variablen in eine gemeinsame NetCDF-Datei geschrieben (siehe Abbildung 5).

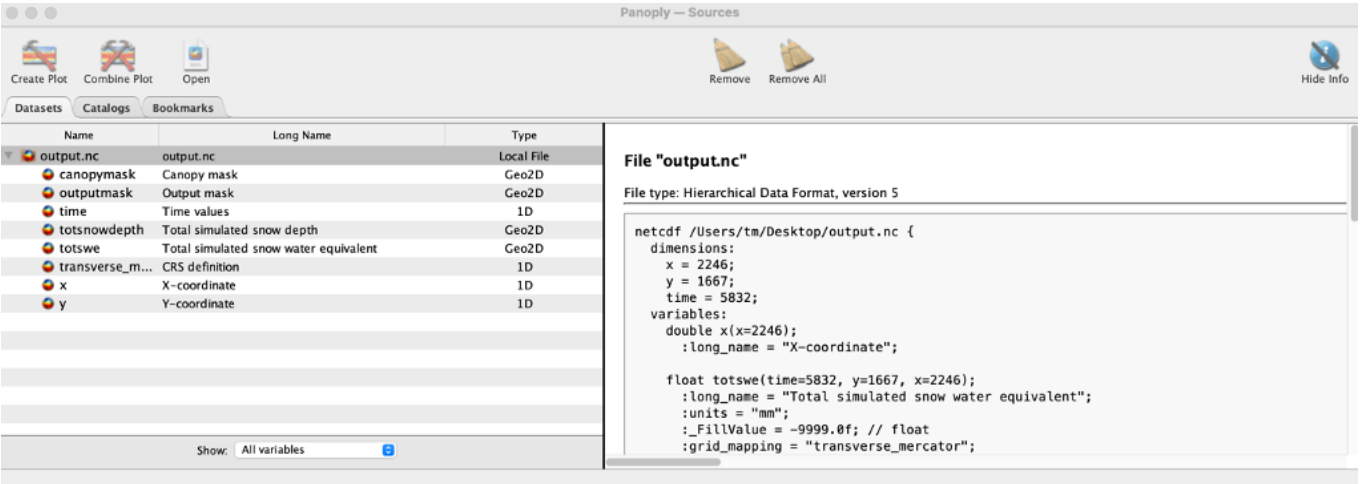


Abbildung 5: Flächenausgabe für den Freistaat Sachsen, NetCDF-Datei visualisiert durch das Panoply NetCDF-Programm der NASA (NASA 2025).

3 Modelloptimierung

Der durch die Modellerweiterungen erhöhte Rechenbedarf in Kombination mit der gewünschten hohen zeitlichen (1h) und räumlichen (100m) Auflösung erfordert eine Modelloptimierung hinsichtlich der benötigten Rechenzeit und Speicherressourcen. Die Untersuchungen zur Optimierung der Modellperformanz in Hinblick auf die erforderlichen Rechenzeiten beinhalten Maßnahmen wie die Optimierung der verwendeten Berechnungsansätze und Funktionen in R sowie die Auslagerung von Rechenoperationen in performantere Programmiersprachen (z.B. in Fortran).

Was die Optimierung der Berechnungsansätze in R angeht, so kann die Entwicklung der Funktionen „max3D()“ bzw. „min3D()“ als Beispiel angeführt werden. Diese ersetzen bei der Berechnung von Maximal- bzw. Minimalwerten über ein dreidimensionales Rasterarray die standardmäßig in R oft eingesetzte Funktion „apply()“. Letztere hat sich bei der Umstellung des Modells vom Punkt auf die Fläche um ein Vielfaches rechenintensiver gezeigt, als die unter Zuhilfenahme der Bibliothek „matrixStats“ selbst entwickelten Varianten.

Da die Entwicklung und Gegenüberstellung unterschiedlicher ESCIMOv2-R Modellvarianten (R vs. Aufruf von Fortran-Code in R) zur Performanzanalyse den Rahmen dieses Projektes sprengen würde, wurde die Performanzanalyse hinsichtlich unterschiedlicher Programmiersprachen durch ein numerisches Experiment realisiert. Dabei wurden zellbasierte (Schleifen über die Zeilen und Spalten eines Rasterdatensatzes) und arraybasierte (Matrizenberechnungen auf Basis eines Rasterdatensatzes) Standardoperationen (z.B. Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division) in R selbst sowie durch Aufrufen von Fortran Code in R durchgeführt (siehe Abbildung 6). Die durchgeführten Operationen wurden auf einem digitalen Geländemodell für Sachsen in 100m räumlicher Auflösung bei 100-maliger Wiederholung ausgeführt.

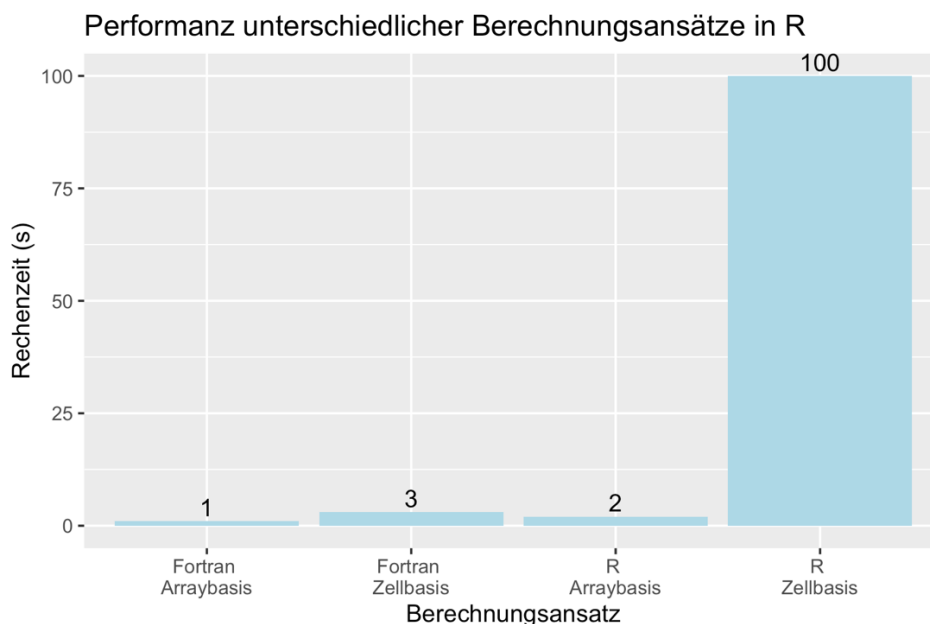


Abbildung 6: Performanz unterschiedlicher Rechenoperationen bei Durchführung der Operationen auf Zellbasis in R, auf Arraybasis in R, auf Zellbasis in einer ausgelagerten Subroutine in Fortran und auf Arraybasis in einer ausgelagerten Subroutine in Fortran.

Wie Abbildung 6 zeigt, können arraybasierte Operationen in beiden Sprachen weit performanter durchgeführt werden, als die gleichen Berechnungen auf Zellbasis. Zwar ließen sich die Modellberechnungen durch den Aufruf von Fortran Code in R in etwa um einen Faktor 2 beschleunigen, doch wurde im Projekt zugunsten der Übersichtlichkeit und der Lesbarkeit des Modellcodes auf eine zusätzliche Verwendung von Fortran im R Code verzichtet. Die Modellberechnungen in ESCIMOv2-R werden in diesem Projekt somit in R auf Arraybasis durchgeführt. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Rechenleistung moderner Computer alle 18 Monate verdoppelt (Rose's Law), wodurch sich derzeit bestehende Limitierungen in der Modellperformanz in absehbarer Zeit relativieren. Die derzeitige Rechenzeit für das außerordentlich große Modellgebiet des Freistaates Sachsen (1667 Zeilen, 2246 Spalten) beläuft sich bei stündlicher Modellierung auf ca. 8 Rechenstunden/Modelljahr (MacBook Pro M1 Pro, 10 Kerne, 16GB Arbeitsspeicher). Es gilt hier zu beachten, dass R standardmäßig bei Ausführung eines Skriptes nur einen Kern verwendet, die Anzahl der Kerne spielt also bei Rechnungen über eine Wintersaison keine Rolle, jedoch können einzelne Winter in separaten Modellläufen d.h. auf unterschiedlichen Kernen durchgeführt werden und so die Laufzeit für Modellierungen über mehrere Winter deutlich verringert werden.

Was den Bedarf an Arbeits- und Festplattenspeicher angeht, konnten durch Maßnahmen im Bereich des Lesens und Schreibens von Daten (z.B. durch sequentielles Lesen und Schreiben) sowie durch Umstellung auf das NetCDF-Format mit Möglichkeit zur Komprimierung von Modellein- und -ausgaben Verbesserungen erzielt werden. Die gewünschte Aggregierung der Modellergebnisse auf Tageswerte resultiert in einer zusätzlichen Verringerung des Bedarfs an Festplattenspeicher.

Die in diesem Projekt erzeugten Modellausgaben für das Schneewasseräquivalent und die Schneehöhe beanspruchen vor der Aggregierung auf Tageswerte ca. 180 GB für die stündlichen Modellausgaben für eine Wintersaison (Oktober-Mai). Die einzelnen Winter wurden separat gerechnet und anschließend auf Tageswerte aggregiert, wodurch der erforderliche Speicherplatz auf ca. 7.3 GB pro Wintersaison reduziert werden konnte. Zusätzliche Ausgabegrößen würden den benötigten Speicherbedarf natürlich entsprechend erhöhen.

Über die flächenhaften Ausgaben hinaus wurden punktuelle Ausgaben für die Lagekoordinaten von 80 Schneemessstationen erzeugt, die weitere 2.2 MB pro Wintersaison und Punktausgabe an Speicherplatz belegen. Diese Ausgaben beinhalten sämtliche Modellergebnisse, eine Auswahl einzelner Ausgabegrößen ist hier nicht erforderlich. Durch Aggregierung auf Tageswerte und Reduktion auf das simulierte Schneewasseräquivalent und die Schneehöhe, konnte die Dateigröße hier auf 90 KB pro Punktausgabe und Winter reduziert werden.

Eine zusätzliche Komprimierung der Modellausgaben im NetCDF-Format wurde nicht durchgeführt, da die Dateigrößen noch gut handhabbar waren und eine Komprimierung der Daten zu Genauigkeitsverlusten führen kann.

4 Modell Parametrisierung

4.1 Auswahl der zur Parametrisierung verwendeten Stationen

Für die Parametrisierung des Schneemodells war es erforderlich, die Auswirkungen unterschiedlicher Modellparameter und Prozessbeschreibungen auf die simulierte Schneehöhe zu untersuchen. Dies erfordert die Verfügbarkeit eines Datensatzes mit gemessenen Schneehöhen für eine ausreichend große Anzahl an repräsentativen Messstationen für das Modellgebiet. Über das ReKIS Datenzentrum (ReKIS 2025) konnten Schneehöhenmessungen an 360 Stationen in Sachsen für den Zeitraum 1961-2023 heruntergeladen werden. Da nicht alle verfügbaren Schneehöhenwerte an den Stationen direkte Messungen repräsentieren (z.T. wurden auch Schneehöhen abgeleitet bzw. interpoliert), wurden für die Analysen im Projekt nur Stationen betrachtet, an denen tatsächlich kontinuierliche Klima- und Schneemessungen vorliegen. Unter Berücksichtigung der für jeden stündlichen Zeitschritt verfügbaren Flags, welche auf die Entstehung der Schneewerte für die unterschiedlichen Stationen hinweisen, wurden insgesamt 80 „Flagship“ Stationen ausgewählt, die eine Datenverfügbarkeit von mindestens 95% in Bezug auf tägliche Schneehöhenmessungen für die Winter 2010-2020 aufweisen. Wie Abbildung 7 zeigt, wird durch die ausgewählten Flagship Stationen sowohl das Gebiet Sachsens über die Fläche (siehe Abbildung 7, links) als auch über die unterschiedlichen Geländehöhen im Modellgebiet (siehe Abbildung 7, rechts) zufriedenstellend abgedeckt.

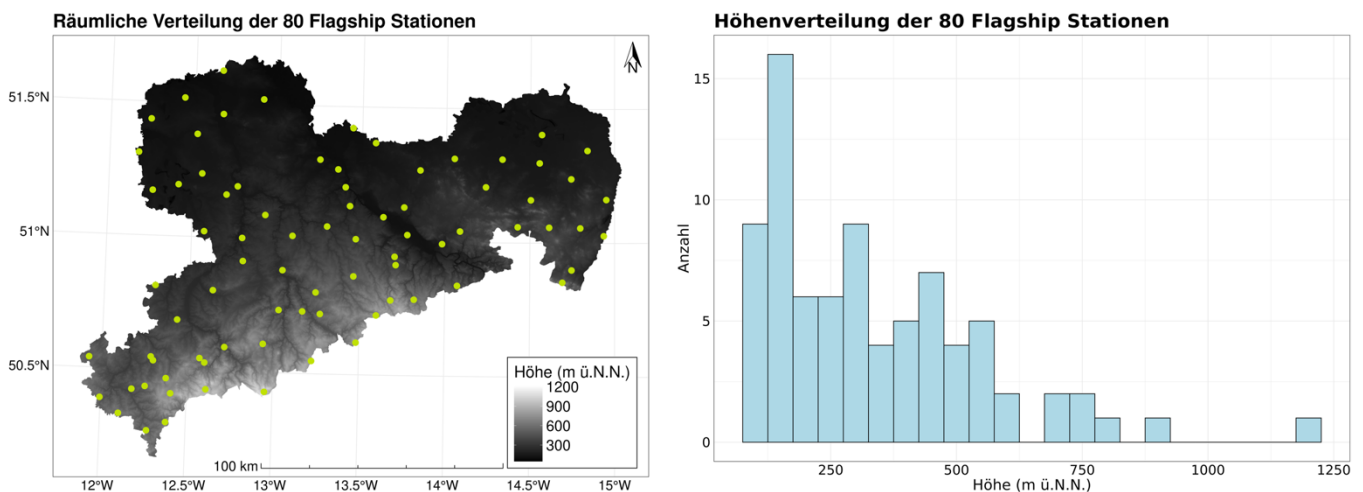


Abbildung 7: Räumliche Verteilung (links) und Höhenverteilung (rechts) der für die Parametrisierung und Validierung eingesetzten 80 Flagship Stationen über das Gebiet des Freistaates Sachsen.

Ein Überblick hinsichtlich der Datenverfügbarkeit an den 80 verwendeten Stationen sowie der Entstehung der dortigen Schneedaten (gemessen/interpoliert/abgeleitet) wird in Abbildung 8 gegeben. Wie die Abbildung zeigt, ist ein nur sehr geringer Teil der zur Parametrisierung und Evaluierung eingesetzten Schneedaten durch Interpolation bzw. andersartige Ableitung entstanden, von einer grundsätzlich hohen Qualität der Schneehöhendaten kann deshalb an dieser Stelle ausgegangen werden.

Datenverfügbarkeit an den 80 Flagship Stationen

Stationen mit mehr als 95% Originaldaten
für die Winter 2010-2020



Abbildung 8: Die für den Vergleich von Schneemodellierungen und -messungen herangezogenen 80 Flagship Stationen in Sachsen und die jeweilige Datenverfügbarkeit für die Winter 2010-2020.

4.2 Untersuchte Modellparameter und Prozessparametrisierungen

Während viele Modellparameter in ESCIMOv2-R auf physikalischen Grundlagen basieren und deshalb nicht modifiziert werden sollten, können andere Parameter gebietsspezifisch sein und damit an die jeweiligen Rahmenbedingungen im Modellgebiet angepasst werden. Die im Projekt vorgenommene Modellparametrisierung umfasst i) die Wahl geeigneter Werte für modellinterne Parameter (wie z.B. den maximalen Flüssigwassergehalt der Schneedecke) sowie ii) die vergleichende Analyse unterschiedlicher Prozessparametrisierungen (z.B. von Ansätzen zur Abschätzung der langwelligen Einstrahlung).

Die folgenden Parameter/Parametrisierungen wurden im Projekt für das Modellgebiet Sachsen hinsichtlich ihrer Performanz untersucht:

5 Parametrisierungen der langwelligen Einstrahlung [MAYKUT UND CHURCH (1973), IZIOMON ET AL. (2003), PRATA (1996) mit Bewölkungseffekt nach SUGITA UND BRUTSAERT (1993), SWINBANK (1963) mit Bewölkungseffekt nach JACOBS (1978), DILLEY UND O'BRIEN (1998) mit Bewölkungseffekt nach JACOBS (1978)]

- 2 Parametrisierungen der Schneedichte [ESSERY ET AL. (2013), ANDERSON (2006)]
- 3 Werte des maximalen Flüssigwasseranteils in der Schneedecke [2.5%, 5%, 10%]
- 3 Varianten des Übergangsbereichs von flüssigem zu festem Niederschlag beim Phasenübergang [0 °C Feuchtkugeltemperatur +0 °C, +1 °C, +2 °C]

4.3 Sensitivität des Modells und finale Einstellungen

Die unterschiedlichen Parameterwerte und Prozessparametrisierungen führen zum Teil zu sehr unterschiedlichen Modellergebnissen und spannen somit einen möglichen Ergebnisraum hinsichtlich der simulierten Schneehöhen auf. Dabei ist die Sensitivität des Modells auf die verschiedenen Parameter bzw. Prozessparametrisierungen unterschiedlich. Der Einfluss der untersuchten Parameterwerte bzw. Prozessparametrisierungen auf die simulierte Schneehöhe soll im Folgenden am Beispiel der Schneemessstationen „Jonsdorf Kurort“ (425 m ü.N.N) und „Fichtelberg“ (1213 m ü.N.N.) anhand der Abbildungen 9 und 10 veranschaulicht bzw. diskutiert werden.

Der maximal zulässige Flüssigwasseranteil bestimmt, wieviel Wasser relativ zum Gesamtschneewasseräquivalent der Schneedecke in dieser gehalten werden kann. Dieser Parameter hat folglich v.a. in der Schmelzperiode große Auswirkungen auf die modellierte Schneedecke (siehe Abbildung 10). Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Untersuchungen erwiesen unter Betrachtung der Ergebnisse an allen 80 Flagship Stationen einen Wert von 2.5 % als am besten geeignet. Dieser Wert stimmt gut mit den Erfahrungen aus anderen Studien überein (vgl. LIVNEH ET AL. 2010).

Die langwellige Einstrahlung auf die Landoberfläche durch die darüberliegende Atmosphäre wird anders als die kurzwellige Globalstrahlung durch die Sonne selten an meteorologischen Messtationen gemessen. Aufgrund fehlender Eingabewerte (am Punkt wie auf der Fläche) musste sie deshalb in diesem Projekt über die Lufttemperatur und die Bewölkung abgeleitet werden.

Ergebnisbreite der Schneehöhe durch verschiedene Parametrisierungen Jonsdorf Kurort (425m ü.N.N.)

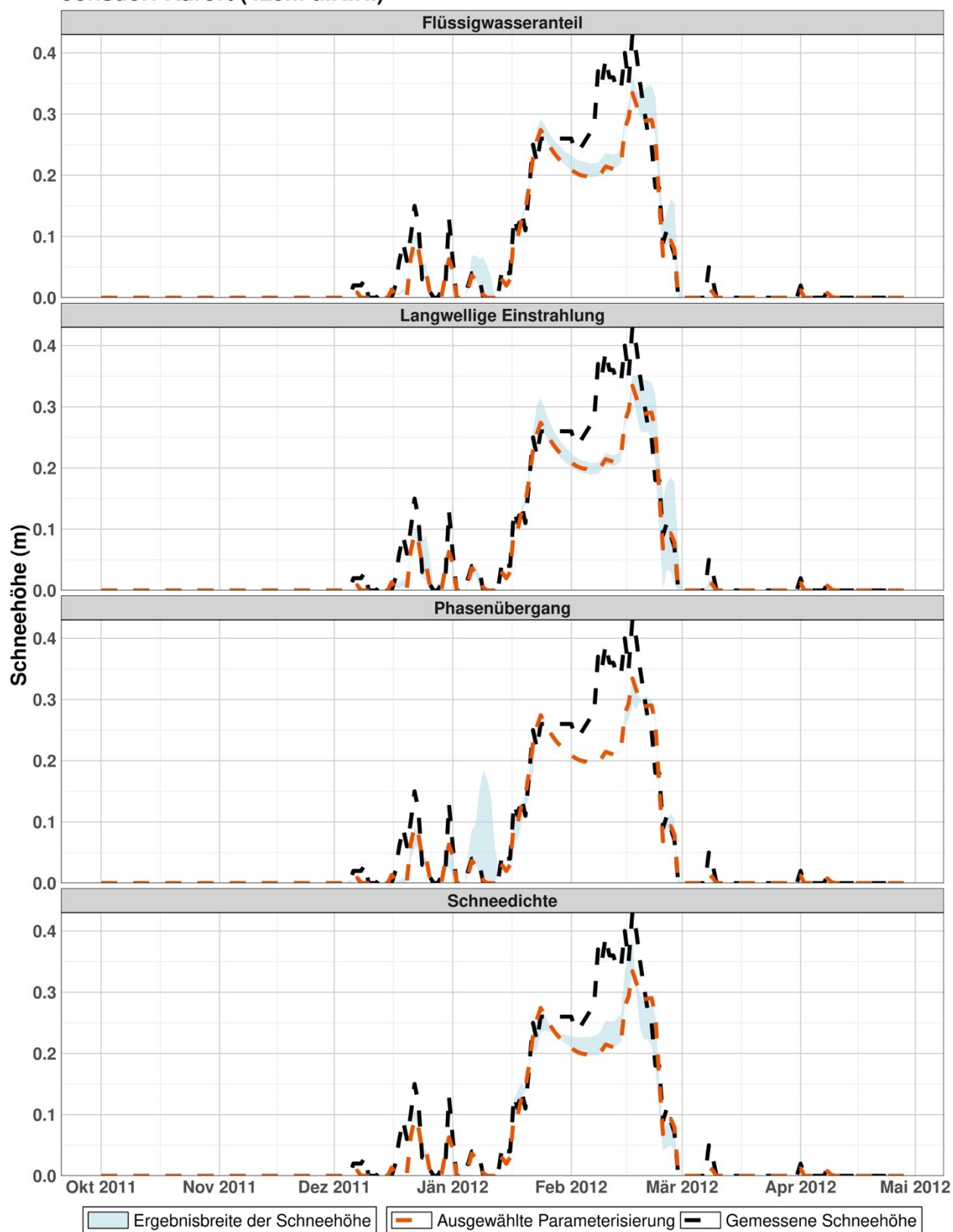


Abbildung 9: Simulierte und gemessene Schneehöhe am Standort Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) für den Winter 2011/2012 bei Variation der Flüssigwasserkapazität sowie der Parametrisierung der langwelligten Einstrahlung, des Phasenübergangs und der Schneedichte.

**Ergebnisbreite der Schneehöhe durch verschiedene Parametrisierungen
Fichtelberg (1213m ü.N.N.)**

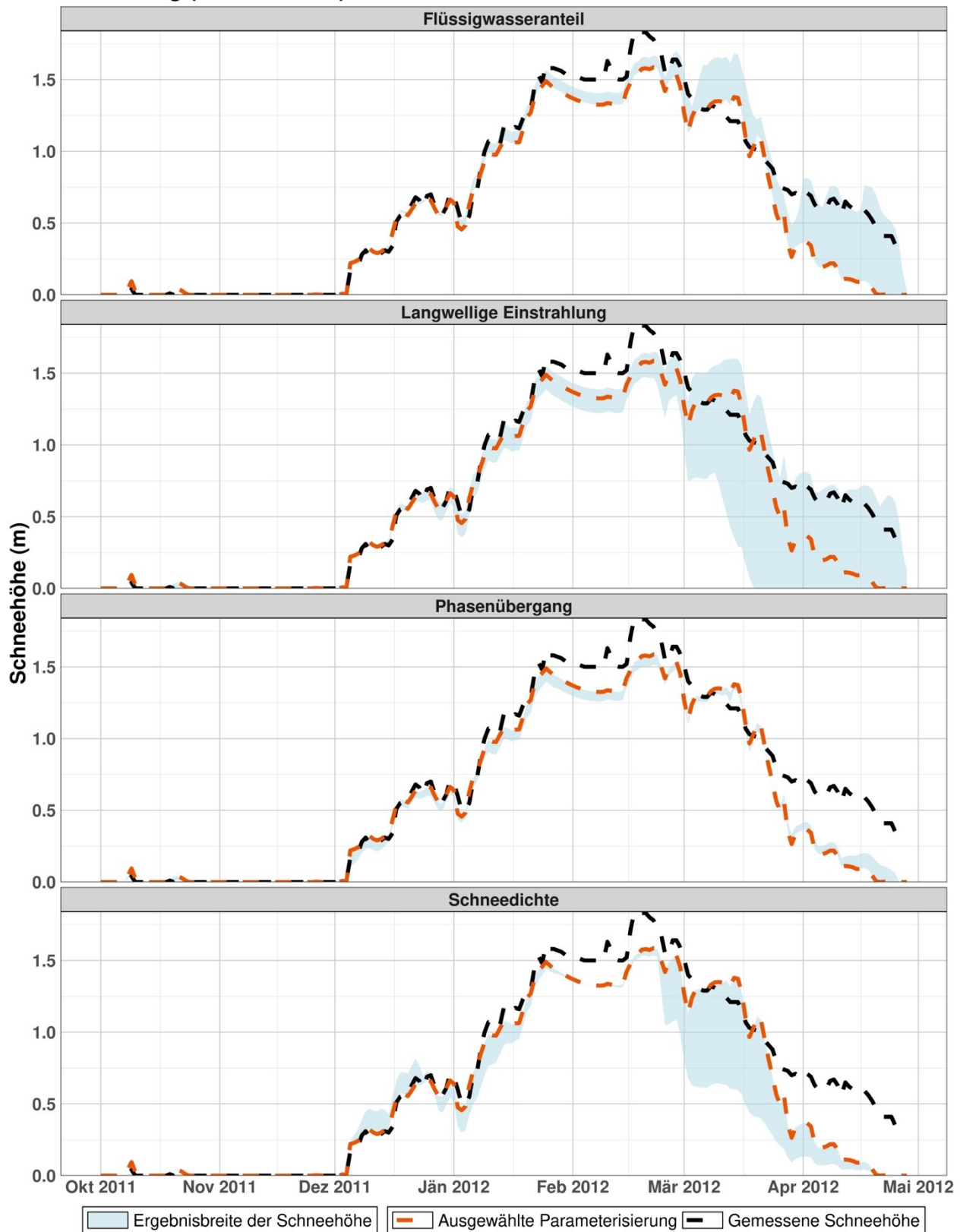


Abbildung 10: Simulierte und gemessene Schneehöhe am Standort Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) für den Winter 2011/2012 bei Variation der Flüssigwasserkapazität sowie der Parametrisierung der langwelligen Einstrahlung, des Phasenübergangs und der Schneedichte.

Hierfür steht in der Literatur eine Vielzahl an Verfahren zu Verfügung. Da die unterschiedlichen Verfahren z.T. sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern, wurden insgesamt 5 Verfahren in Hinblick auf Ihre Performanz im Modellgebiet untersucht. Wie die Abbildungen 9 und 10 beweisen, zeigen die Ergebnisse der Schneemodellierung v.a. an der Station Fichtelberg eine hohe Sensitivität auf den verwendeten Ansatz zur Ableitung der langwelligen Einstrahlung. Da Messungen der langwelligen Einstrahlung zur Evaluation der unterschiedlichen Ansätze nicht vorliegen, wurde der in dieser Studie eingesetzte Ansatz aufgrund seiner Performanz in der Schneemodellierung ausgewählt, wobei die Parametrisierung der langwelligen Einstrahlung nach DILLEY UND O'BRIEN (1998) mit Anpassung entsprechend der Bewölkungssituation nach JACOBS (1978) die besten Ergebnisse bei der Schneemodellierung ermöglichte. Die genaue Berechnung der langwelligen Einstrahlung nach diesem Ansatz ist in 2.1.5 beschrieben.

Der Einsatz unterschiedlich großer Übergangsbereiche beim Phasenübergang um den bewährten Schwellenwert der Feuchtttemperatur von 0°C hat nur sehr geringen Einfluss auf die Modellergebnisse gezeigt (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10). Die besten Ergebnisse wurden für einen Phasenübergang bei einer Feuchtkugeltemperatur von 0°C ohne Übergangsbereich [$0^{\circ}\text{C} \pm 0^{\circ}\text{C}$] erreicht, weshalb diese Einstellung für alle weiteren Modellrechnungen im Projekt verwendet wurde.

Der Berechnung der Schneedichte kommt eine besondere Bedeutung zu, da diese benötigt wird um das berechnete Schneewasseräquivalent (als primäre Berechnungsgröße des Schneemodells) in eine Schneehöhe (als Messgröße an den Schneemessstationen in Sachsen) zu übersetzen. Ungenauigkeiten in der Abschätzung der Schneedichte können trotz zufriedenstellend genau modelliertem Schneewasseräquivalent zu unzureichender Modellperformanz hinsichtlich der modellierten Schneehöhe führen. Wie die Abbildungen 9 und 10 zeigen, beeinflusst die Schneedichte v.a. im Spätwinter die Modellergebnisse, mit größeren Unterschieden in den erzielten Modellergebnissen an der Station Fichtelberg. Im Vergleich der beiden untersuchten Ansätze hat der in ESSERY ET AL. (2013) beschriebene Ansatz an den 80 Flagship Stationen die besseren Ergebnisse geliefert und wurde deshalb für alle folgenden Simulationen in dieser Studie ausgewählt. Die genaue Berechnung der Schneedichte nach diesem Ansatz ist in Kapitel 2.1.5 beschrieben.

Als Resultat der an den 80 Flagship Stationen in Sachsen durchgeführten Untersuchungen wurden zusammenfassend folgende optimale Parameterwerte bzw. Parametrisierungen für die Simulationen im Modellgebiet Sachsen ausgewählt:

- Parameterisierung der langwelligen Einstrahlung nach DILLEY UND O'BRIEN (1998) mit Bewölkungseffekt nach JACOBS (1978)
- Parametrisierung der Schneedichte nach ESSERY ET AL. (2013)
- Berücksichtigung eines maximalen Flüssigwasseranteils in der Schneedecke von 2.5%
- Abschätzung des Phasenübergangs über eine Feuchtkugeltemperatur von 0°C ohne Übergangsbereich [$0^{\circ}\text{C} \pm 0^{\circ}\text{C}$]

5 Modellevaluierung

5.1 Punktuelle Evaluation (Stationsdaten als Modellantrieb)

Die Evaluation des neu in R implementierten ESCIMOV2-R Models erfolgte aufgrund noch fehlender flächenhafter meteorologischer Antriebsdaten zunächst am Punkt. Dabei wurden für den Vergleich von simulierten und beobachteten Schneehöhen folgende Effizienzkriterien herangezogen:

- **Das Bestimmtheitsmaß (R^2):** R^2 ist eine statistische Kennzahl die angibt, wie gut ein Modell die Variabilität der Messung erklärt. Es liegt zwischen 0 und 1. Ein Wert von 1 bedeutet, dass das Modell die Daten perfekt erklärt, während ein Wert von 0 bedeutet, dass das Modell keine Erklärungskraft hat.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) * (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (8)$$

R^2	<i>Bestimmtheitsmaß</i>
O	<i>Beobachtete Werte</i>
P	<i>Vorhergesagte Werte</i>

- **Die Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE):** NSE beschreibt, wie gut die vom Modell vorhergesagten Werte mit den tatsächlichen beobachteten Werten übereinstimmen, dabei liegt der Wertebereich zwischen $-\infty$ und 1. Ein Wert von 1 bedeutet, dass das Modell die beobachteten Daten perfekt vorhersagt. Ein Wert von 0 zeigt an, dass das Modell so gut ist wie der Durchschnitt der beobachteten Werte. Negative Werte bedeuten, dass das Modell schlechter ist als die einfache Annahme, immer den Durchschnittswert zu verwenden.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>
O	<i>Beobachtete Werte</i>
P	<i>Vorhergesagte Werte</i>

- **Der Index of Agreement (IA):** IA, auf Deutsch auch Übereinstimmungsindex genannt, zeigt die Übereinstimmung zwischen vorhergesagten Werten und Beobachtungen. IA liegt zwischen 0 und 1, wobei ein Wert von 1 eine perfekte Übereinstimmung von Modell und Beobachtung anzeigt, ein Wert von 0, dass die Vorhersagen nur so gut sind wie das Mittel der Beobachtungen. IA berücksichtigt sowohl die Differenz zwischen den Vorhersagen und den Beobachtungen als auch die Differenz zwischen den Beobachtungen und ihrem Durchschnitt.

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

IA *Index of Agreement*
O *Beobachtete Werte*
P *Vorhergesagte Werte*

■ **Der Mean Absolute Error (MAE):** MAE, auf Deutsch auch mittlerer absoluter Fehler genannt, ist eine Kennzahl die angibt, wie groß die durchschnittliche Abweichung zwischen den vorhergesagten Werten eines Modells und den gemessenen Werten ist. Dabei wird der absolute Unterschied zwischen jeder Vorhersage und dem Messwert berechnet und somit ausgeschlossen, dass sich Unter- und Überschätzung durch das Modell ausgleichen können. Das Ergebnis zeigt, wie genau das Modell im Durchschnitt im Vergleich zu den Messungen ist, je kleiner der MAE, desto besser ist die Vorhersage des Modells.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (11)$$

MAE *Mean Absolute Error*
O *Beobachtete Werte*
P *Vorhergesagte Werte*

■ **Der Root Mean Squared Error (RMSE):** RMSE, auf Deutsch auch Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers genannt, zeigt, wie groß die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den vorhergesagten Werten und den Beobachtungen sind. RMSE wird berechnet, indem die Differenzen zwischen den vorhergesagten und den beobachteten Werten quadriert werden, der Durchschnitt dieser quadrierten Differenzen gebildet wird und dann die Quadratwurzel dieses Durchschnitts gezogen wird. Dadurch erhält man eine Maßeinheit, die mit den ursprünglichen Daten vergleichbar ist. Je kleiner der RMSE, desto genauer sind die Vorhersagen des Modells.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (12)$$

RMSE *Root Mean Squared Error*
O *Beobachtete Werte*
P *Vorhergesagte Werte*

■ **Der Percentual Bias (PBIAS):** Der PBIAS, auf Deutsch auch prozentuale Verzerrung genannt, ist eine Kennzahl, die angibt, wie stark ein Modell im Vergleich zu den tatsächlichen Beobachtungen systematisch abweicht. Der PBIAS wird in Prozent ausgedrückt und berechnet sich, indem die Summe der Differenzen zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Werten durch die Summe der tatsächlichen Werte geteilt wird, und das Ergebnis dann mit 100 multipliziert wird. Ein positiver PBIAS-Wert bedeutet, dass das Modell im Durchschnitt die Beobachtungen überschätzt, ein negativer PBIAS-Wert zeigt an, dass das Modell die Werte unterschätzt.

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

PBIAS *Percentual Bias*

O *Beobachtete Werte*

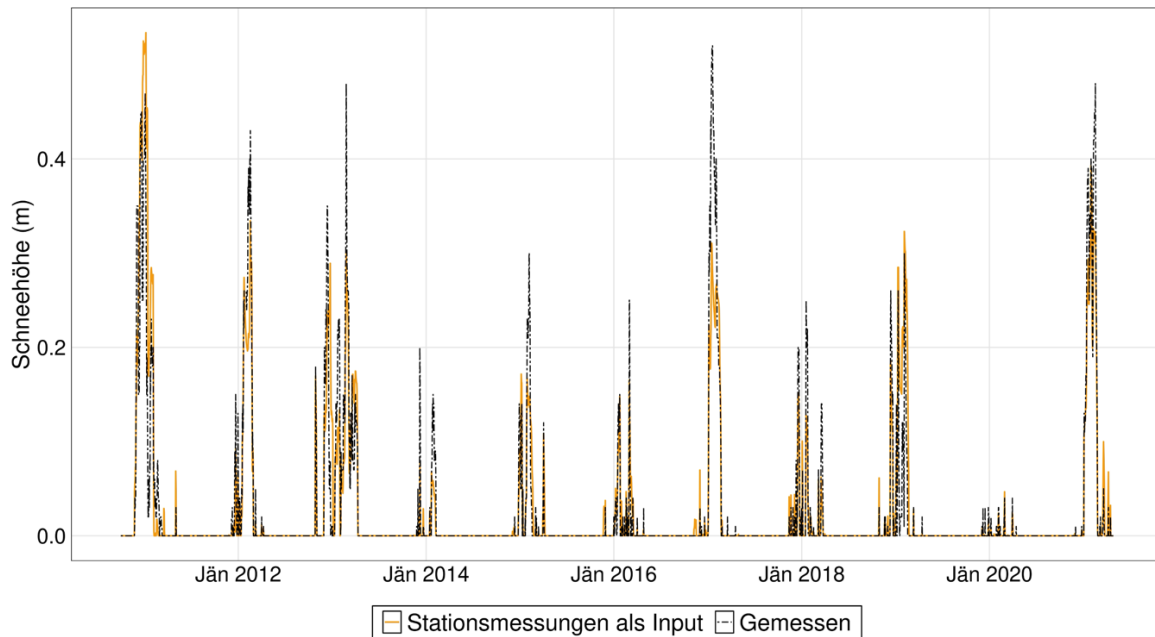
P *Vorhergesagte Werte*

Für die Modellrechnungen wurde die in Kapitel 4.3 beschriebene optimale Modellkonfiguration an den 80 Flagship Stationen über die Winter 2010 bis 2020 eingesetzt und die simulierten Schneehöhen mit den dortigen Schneemessungen verglichen. Wie exemplarisch für die Stationen Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) und Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) in Abbildung 11 und Abbildung 12 gezeigt, können die beobachteten Schneehöhen an den Standorten realistisch abgebildet werden. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass eine Evaluation anhand von Schneehöhen im Vergleich zu einer Betrachtung des Schneewasseräquivalents kritischer hinsichtlich der Modellperformanz ist, da zusätzliche Unsicherheiten durch die zur Umrechnung des Schneewasseräquivalents in eine Schneehöhe erforderliche Abschätzung der Schneedichte entstehen. Neben dem visuellen Vergleich der Jahresgänge und Punktwolken in Abbildung 11 und Abbildung 12, ermöglichen die in Abbildung 12 enthaltenen Effizienzkriterien eine quantitative Bewertung der Modellergebnisse. Mit einer Nash-Sutcliffe Modelleffizienz von 0.78 und 0.84 an den Stationen Jonsdorf Kurort und Fichtelberg, liegt die Modellperformanz an diesen Stationen etwas über dem in Abbildung 14 dargestellten Medianwert von 0.74 bei Betrachtung aller 80 Flagship Stationen. Folgt man Empfehlungen von MORASI ET AL. (2007) ist die Modellperformanz mit diesen NSE Werten als gut bis sehr gut zu bewerten. Die Simulationen an beiden Standorten zeigen mit einem PBIAS von -1.8 und -14.5 an den Stationen Jonsdorf Kurort und Fichtelberg eine gewisse Tendenz zur Unterschätzung der gemessenen Schneehöhen an diesen Stationen im Vergleichszeitraum. Demgegenüber zeigen die Simulationen an allen 80 Flagship Stationen mit einem PBIAS von 20.4 tendenziell eher eine Überschätzung der beobachteten Schneehöhen. Der im Vergleich zu den anderen dargestellten Effizienzkriterien hohe prozentuale Fehler lässt sich durch die in Sachsen z.T. sehr geringen winterlichen Schneehöhen erklären, wodurch kleinere absolute Fehler zu hohen prozentualen Abweichungen

führen. Diese Argumentation wird auch durch den sehr geringen mittleren absoluten Fehler (MAE) in Höhe von 0.01m Schneehöhe bei Betrachtung aller Flagship Stationen gestützt (siehe Abbildung 14).

Das R^2 mit einem Wert von 0.78 und 0.86 an den Stationen Jonsdorf Kurort und Fichtelberg zeigt, dass ein hoher Anteil der Gesamtvarianz der Schneehöhe an den beiden Stationen durch das Modell erklärt werden kann. Dies trifft auch auf die Simulationen an allen 80 Flagship Stationen zu, wie das R^2 mit einem Wert von 0.79 in Abbildung 14 zeigt.

**Linienplot Schneehöhensimulationen mit Stationsmessungen als Input
Station: Jonsdorf Kurort**



**Linienplot Schneehöhensimulationen mit Stationsmessungen als Input
Station: Fichtelberg**

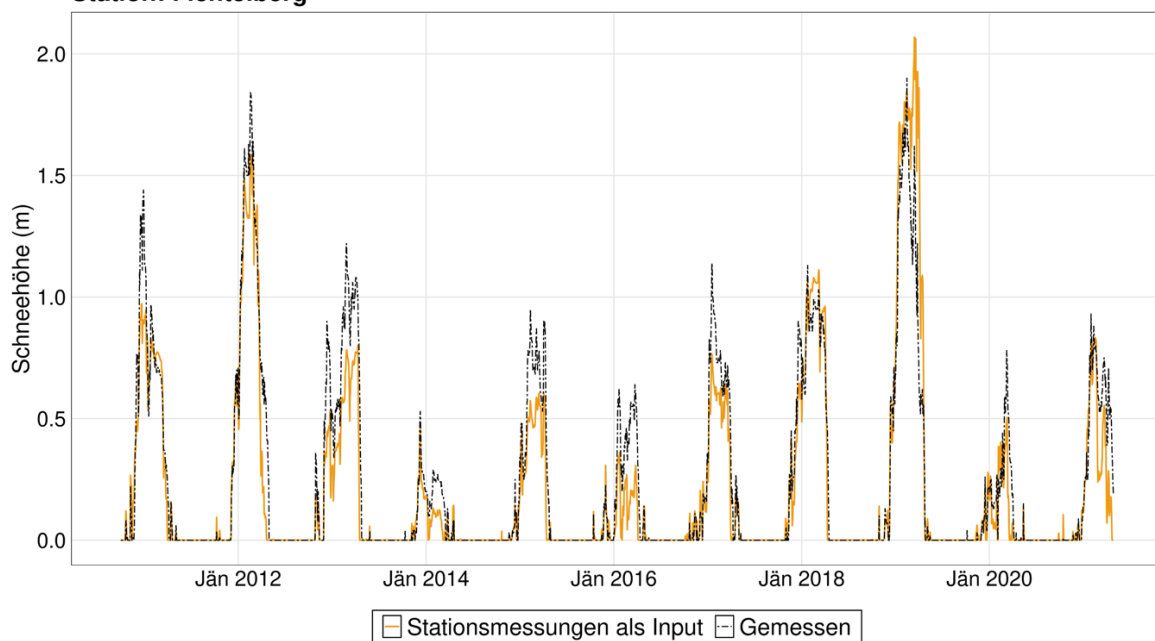


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der simulierten und beobachteten Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.

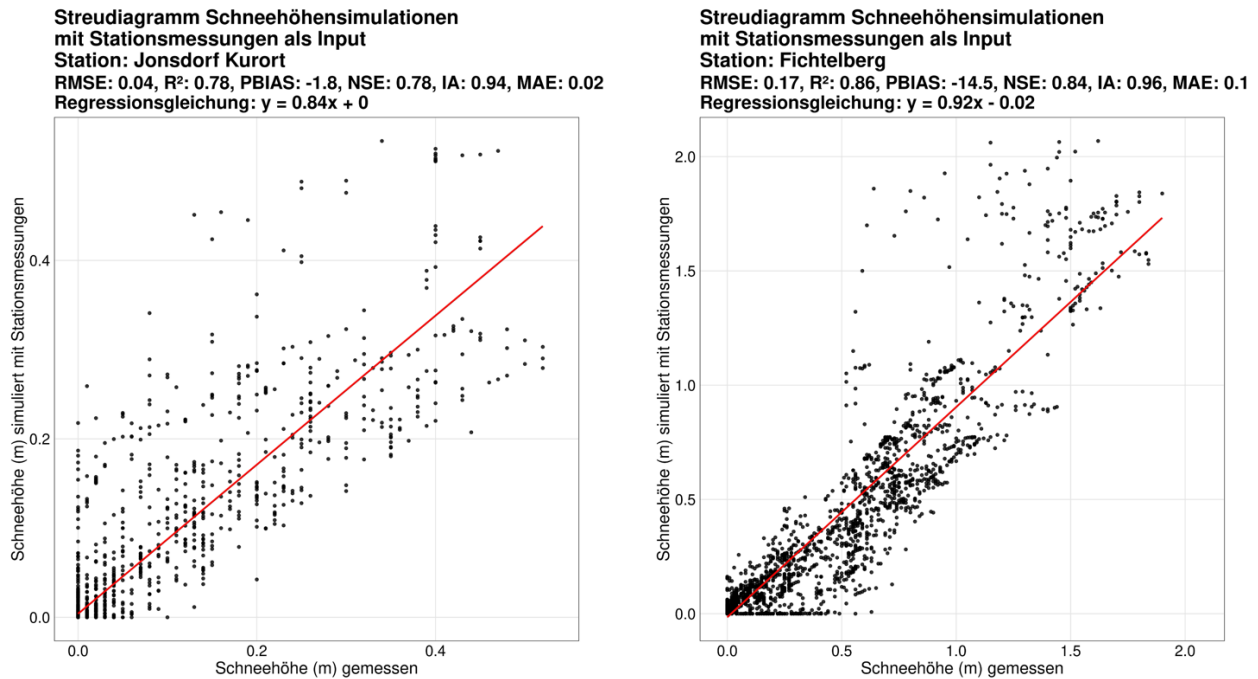


Abbildung 12: Simulierte und beobachtete Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.

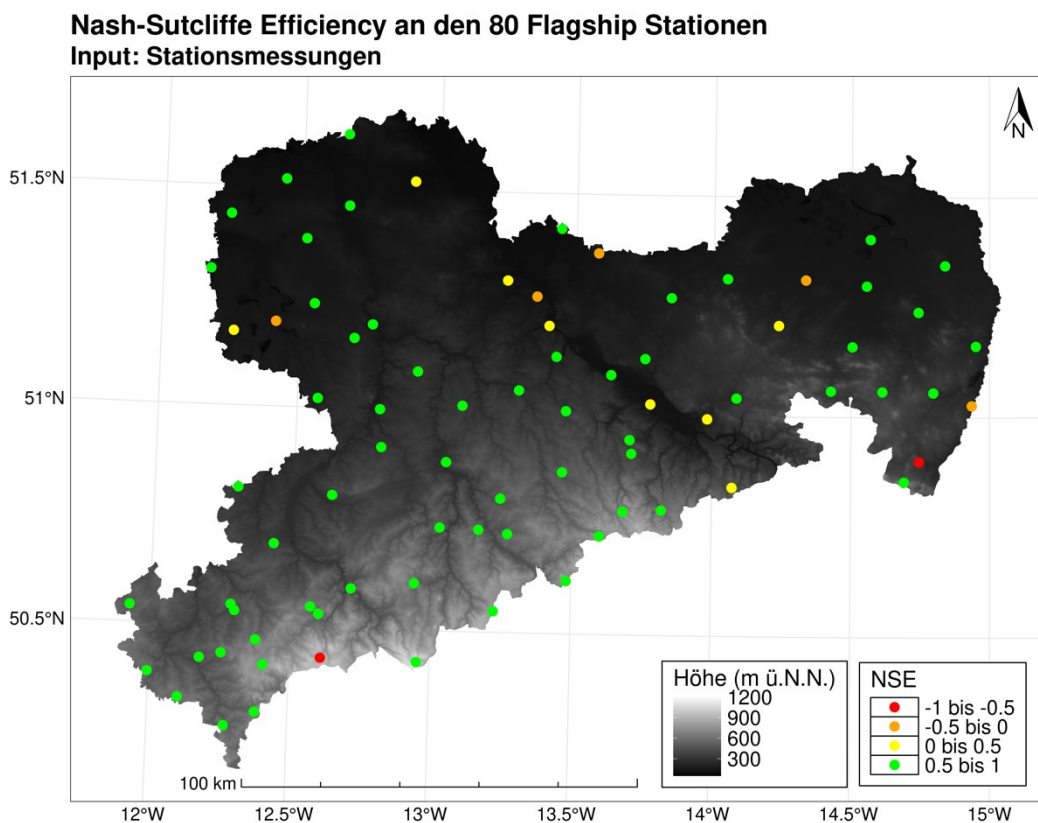


Abbildung 13: Räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen nach Simulationen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.

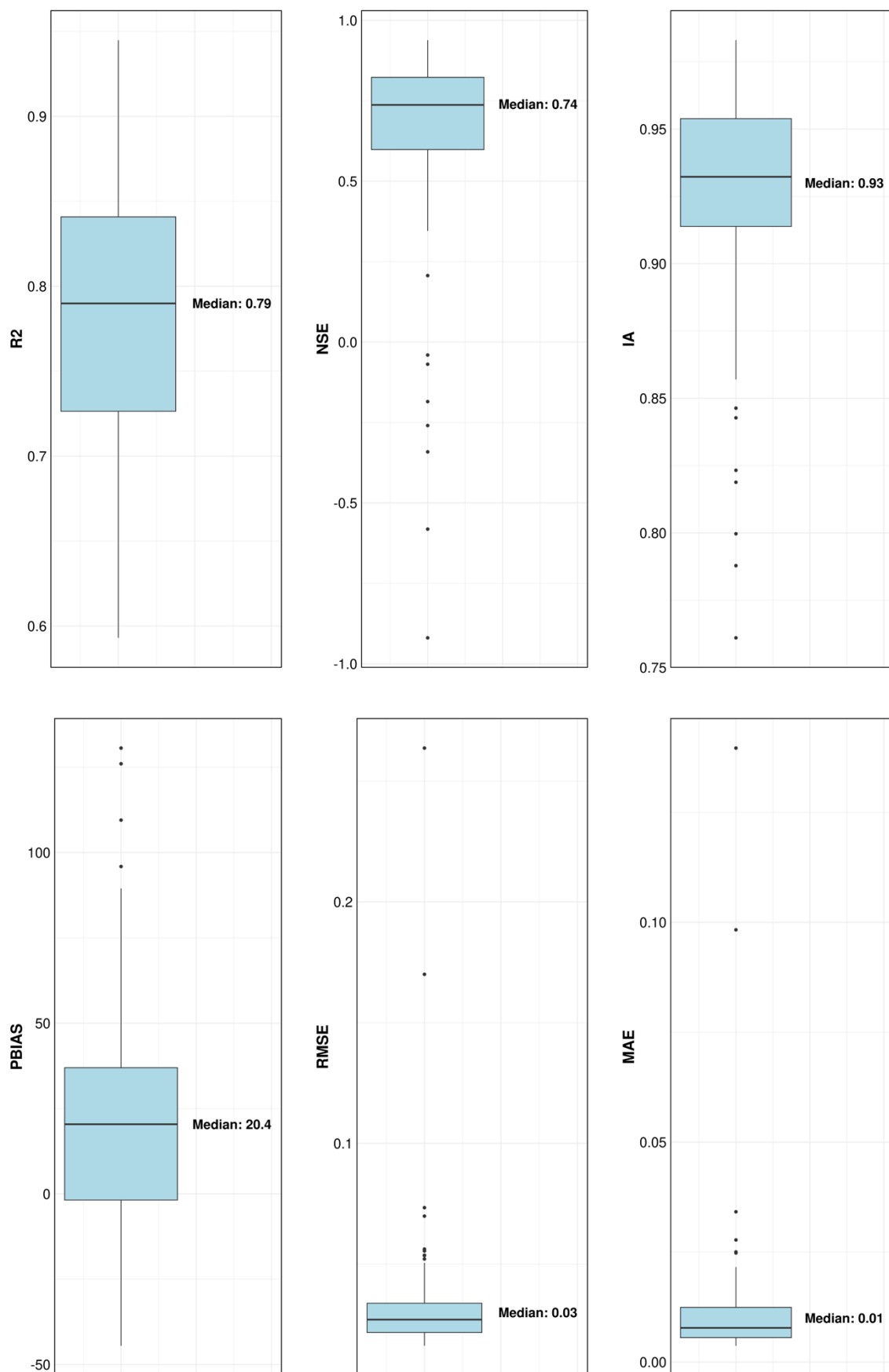


Abbildung 14: Werte unterschiedlicher Effizienzkriterien bei Betrachtung aller 80 Flagship Stationen in Sachsen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb.

Betrachtet man die räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen in Abbildung 13, so ist erkennbar, dass die Schneebedingungen an einem Großteil der Stationen mit NSE Werten über 0.5 (grün) abgebildet werden können, NSE Werte unter 0 (orange oder rot) kommen selten vor.

Im Vergleich zur bisher am LfULG in Verwendung befindlichen Vorversion des ESCIMO Models ($R^2 \sim 0.3$, $IA \sim 0.9$, $MAE \sim 1\text{cm}$, $RMSE \sim 3.0\text{cm}$, Werte abgelesen aus Abb. 16 in Hertel und Schlink, 2018) zeigen die Simulationen für die 80 Flagship Stationen und die Winter 2010-2020 nach Abbildung 14 eine ähnliche bzw. z.T. verbesserte Modellperformanz, auch wenn die Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Zeiträume und betrachteter Stationen nicht ohne Einschränkungen vergleichbar sind.

5.2 Punktueller Evaluation (Rasterdaten als Modellantrieb)

Analog zur Evaluation der Schneesimulationen unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb in Kapitel 5.1, soll im Folgenden nun eine Evaluation der Modellergebnisse unter Verwendung der bereitgestellten Rasterdaten als Modellantrieb vorgenommen werden. Dabei wurden aus den Simulationen für den Zeitraum 1961-2023 für das gesamte Modellgebiet Sachsens die Modellergebnisse an all jenen Rasterzellen ausgegeben, in denen eine der 80 Flagship Stationen zu liegen kommt. Derartige Punktausgaben können durch Bereitstellung der Lagekoordinaten im projizierten System in Form einer Excel-Tabelle in ESCIMOv2-R leicht erzeugt werden (siehe Kapitel 2.3.3).

Wie der zeitliche Verlauf der simulierten und beobachteten Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort und Fichtelberg zeigt (siehe Abbildung 15), werden die dortigen Schneehöhen für die Winter 2010-2020 auch unter Verwendung der Rasterdaten als Modelleingabe vom Modell realistisch reproduziert. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen unter Verwendung von Stationsdaten und Rasterdaten als Modellantrieb scheinen sehr gering und sind in den Liniendiagrammen kaum erkennbar.

Das Bestimmtheitsmaß nimmt mit Werten von 0.76 und 0.86 an den Stationen Jonsdorf Kurort und Fichtelberg im Vergleich zu den unter Stationsdaten als Modellantrieb erzeugten Ergebnissen (0.78 bzw. 0.86), nur unwesentlich geringere Werte an. Während der NSE Wert an der Station Jonsdorf Kurort mit einem Wert von 0.73 durchaus mit dem unter Stationsantrieb erhaltenen Wert von 0.78 vergleichbar ist, ist der NSE Wert an der Station Fichtelberg mit 0.56 unter Verwendung der Rasterdaten als Modellantrieb im Vergleichszeitraum deutlich geringer als der mit Stationsdaten als Modellantrieb erzielte Wert von 0.84. Vergleicht man die Werte des PBIAS von 2.9 und 39.1 an den Standorten Jonsdorf Kurort und Fichtelberg mit den unter Stationsdatenantrieb erhaltenen Werten von -1.8 und -14.5 (siehe Abbildung 12), so hat sich die im Fall des Stationsdatenantriebs beobachtete Unterschätzung der beobachteten Schneehöhen bei Verwendung der Rasterdaten als Modellantrieb in eine Überschätzung der beobachteten Schneehöhen an den Stationen Jonsdorf Kurort und Fichtelberg umgekehrt. Diese Unterschiede in den Modellergebnissen können durch Skaleneffekte (punktueller Schneehöhenmessungen

vs. mittlere Schneehöhen einer 100x100m Rasterzelle) sowie durch Unterschiede in den meteorologischen Eingaben erklärt werden. Letztere sind durch Lage einer meteorologischen Messstation in den hier untersuchten Rasterzellen zwar vergleichsweise gering, dennoch werden die Messwerte der in den Rasterzellen liegenden Stationen im Rahmen der Regionalisierung der meteorologischen Messungen nicht zwingend reproduziert.

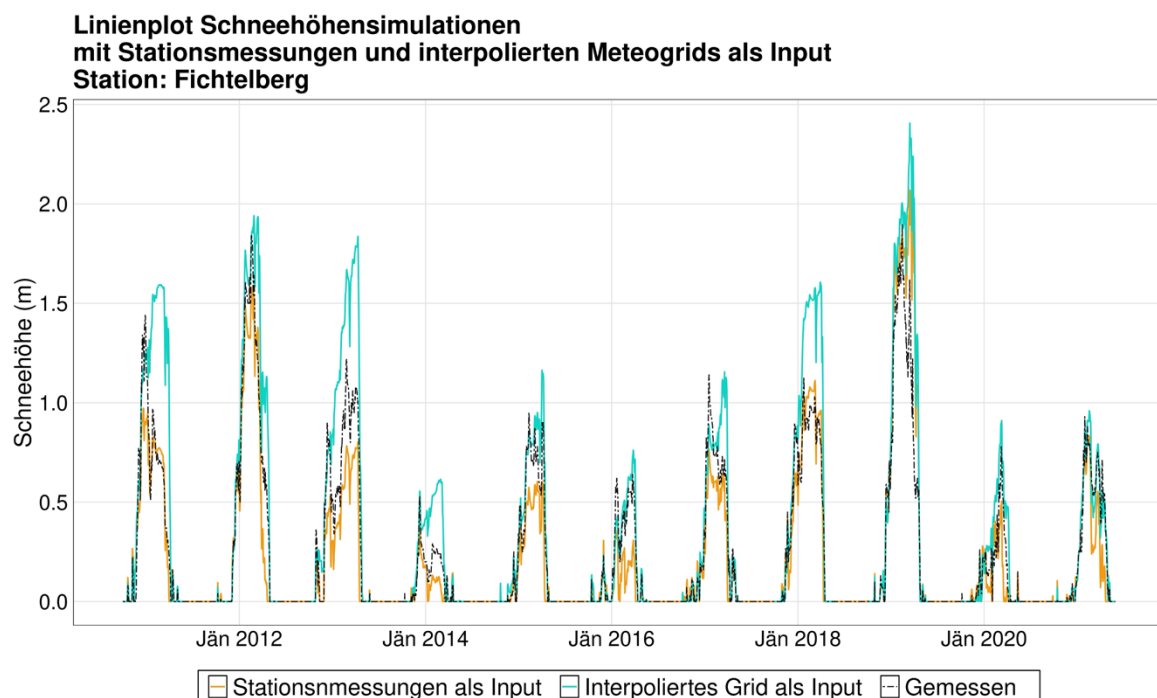
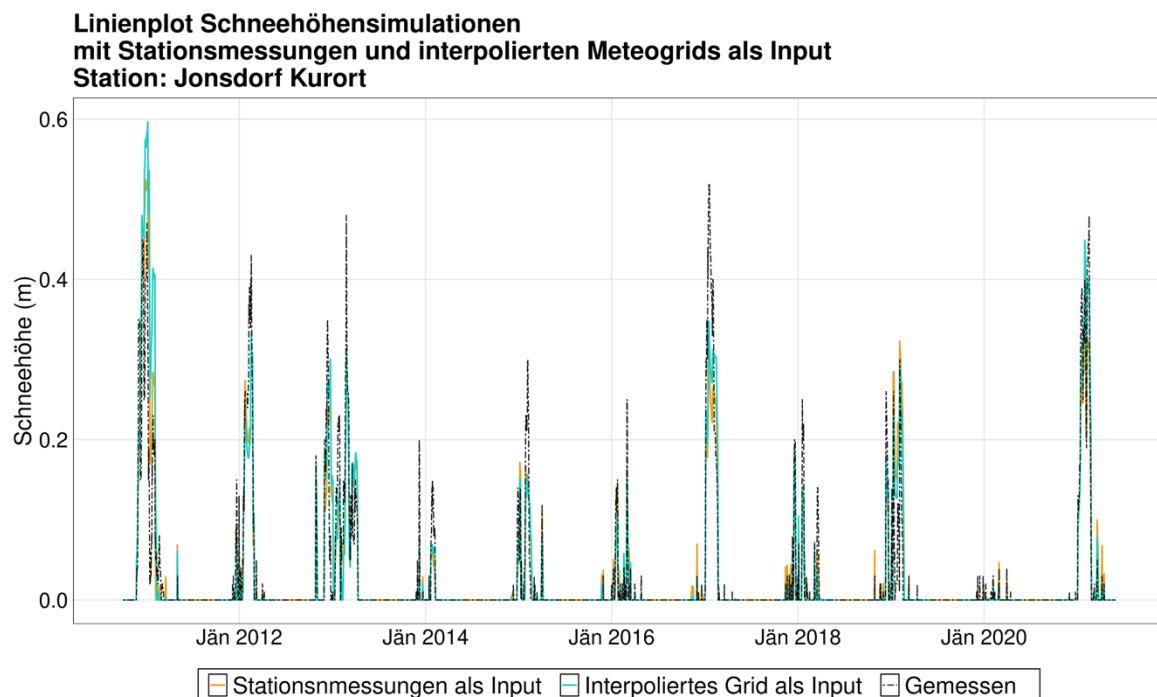


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der simulierten und beobachteten Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Stationsdaten und Rasterdaten als Modellantrieb.

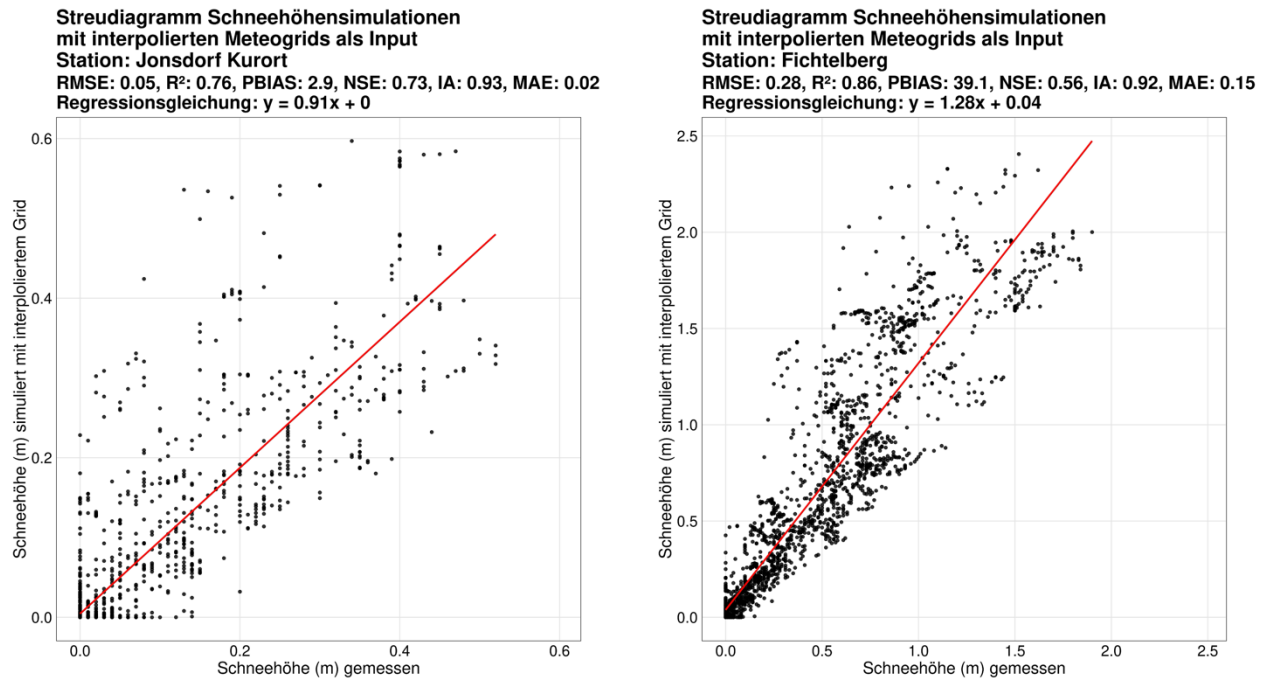


Abbildung 16: Simulierte und beobachtete Schneehöhe an den Standorten Jonsdorf Kurort (425 m ü.N.N.) und Fichtelberg (1213 m ü.N.N.) über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.

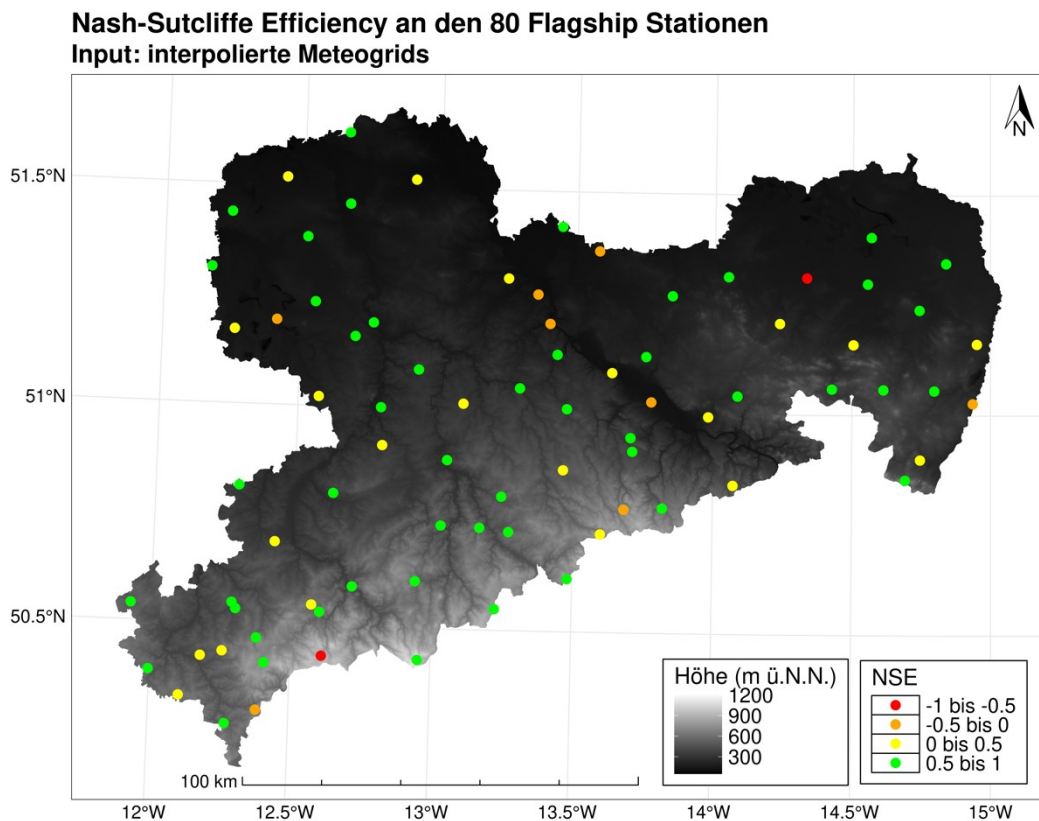


Abbildung 17: Räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen nach Simulationen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.

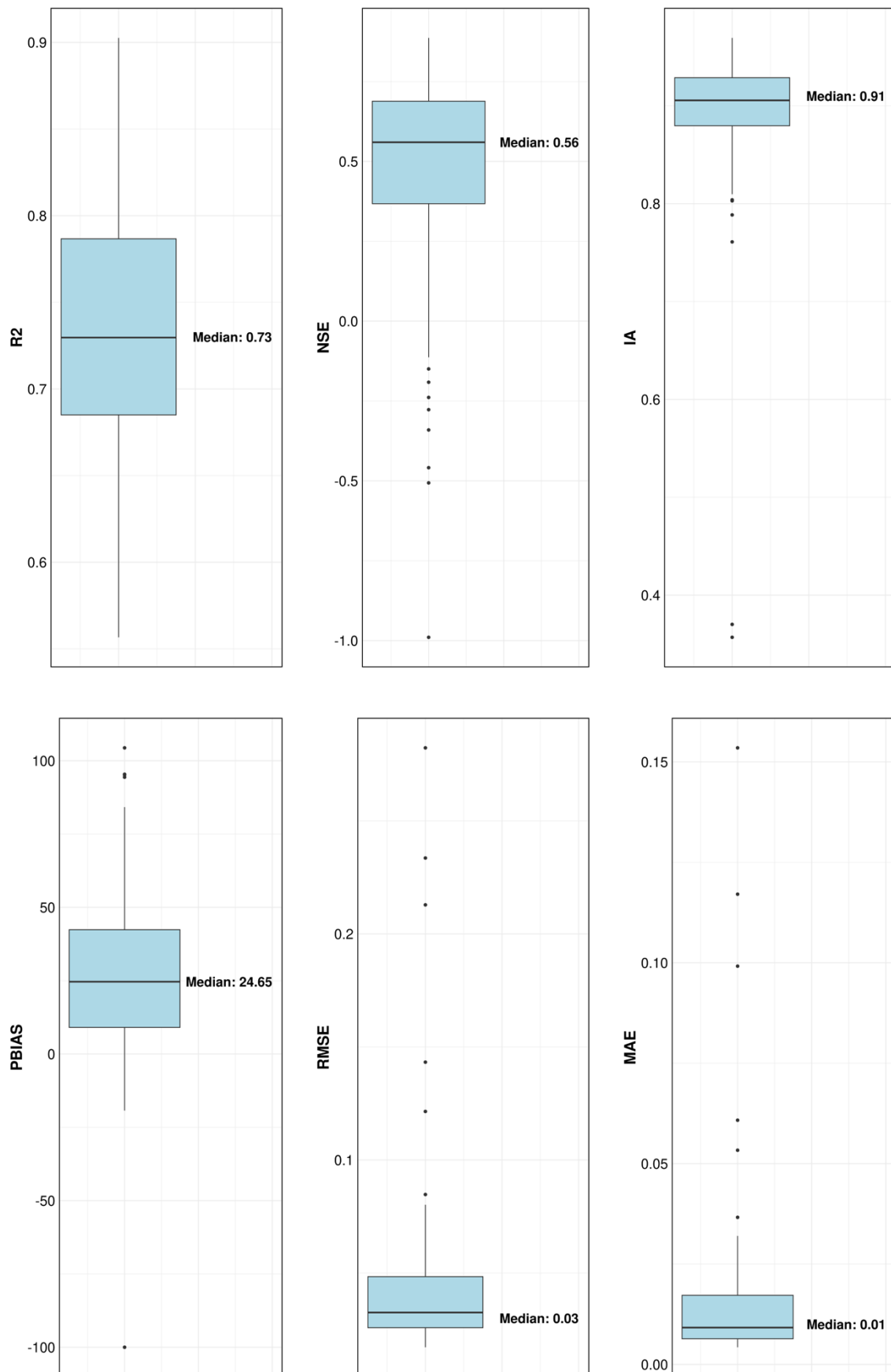


Abbildung 18: Werte unterschiedlicher Effizienzkriterien bei Betrachtung aller 80 Flagship Stationen in Sachsen über die Winter 2010-2020 unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb.

So wurden im Vergleich der Rasterdaten mit den korrespondierenden Stationsmessungen an der Station Fichtelberg über den Vergleichszeitraum der Winter 2010-2020 im Mittel deutliche Unterschiede, v.a. hinsichtlich der Temperatur (Rasterzelle -0.5°C), Windgeschwindigkeit (Rasterzelle -2.3 m/s) und Globalstrahlung (Rasterzelle -4%) festgestellt, die bei annähernd gleichem Niederschlag zu deutlich höheren Schneehöhen führen. Während geringere Temperaturen und Globalstrahlungswerte zu höheren Schneeniederschlägen und geringerer Schneeschmelze führen, kommt der Windgeschwindigkeit im Schneemodell was die Abschätzung des turbulenten Austauschs von sensibler und latenter Wärme angeht eine große Bedeutung zu, mit entsprechenden Auswirkungen auf die Energiebilanz und damit auf die Schneetemperatur bzw. die Schneeschmelze.

Vergleicht man die unter Stationsdaten und Rasterdaten als Antrieb erzielten Modellergebnisse an allen 80 Flagship Stationen, so zeigt sich auch hier eine tendenziell geringere Übereinstimmung der Modellberechnungen mit den Schneehöhemessungen im Fall der Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb. Während die Medianwerte von MAE und RMSE mit Werten von 0.01m und 0.03m identisch sind und R^2 und IA vergleichbare Werte erreichen, zeigen der NSE Wert von 0.56 und der PBIAS von 24.65 eine im Mittel etwas schlechtere Modellperformanz bei Verwendung der Rasterdaten als Modellantrieb.

Die räumliche Verteilung der NSE Werte an den 80 Flagship Stationen in Abbildung 17 zeigt ein sehr ähnliches Bild wie die unter Verwendung von Stationsdaten als Modellantrieb berechneten NSE Werte. Während die Modellperformanz an einigen Stationen abgenommen hat, sind aber bei genauem Vergleich auch Stationen erkennbar, an denen sich die Modellperformanz durch Verwendung der Rasterdaten als Modellantrieb verbessert hat. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass durch die Klassifizierung der NSE Werte in Abbildung 13 und Abbildung 17, nicht alle Unterschiede in der Modellperformanz durch einen visuellen Vergleich der Abbildungen zu Tage treten.

Die eben diskutierten Performanzanalysen für die Modellrechnungen unter Stationsdatenantrieb und Rasterdatenantrieb haben gewisse Unsicherheiten beim Übergang der Schneemodellierung vom Punkt auf die Fläche gezeigt. Diese können teilweise durch Skalenunterschiede (Schneesimulationen als Mittelwerte für $100\times 100\text{m}$ vs. Schneemessungen am Punkt) und die der Regionalisierung zugrundeliegende Methodik (keine Erhaltung der meteorologischen Messwerte an den Rasterzellen mit meteorologischen Messungen) erklärt werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Unsicherheiten im meteorologischen Antrieb, also dem Rasterdatensatz, aber auch in den Ergebnissen der Schneemodellierung, zwischen den Standorten der meteorologischen Messung höher sein werden, als an den Standorten der Messung. Um diese Unsicherheiten besser einschätzen zu können, wird im Folgenden eine Evaluation der Schneesimulationen unter Verwendung von Rasterdaten als Modellantrieb für das gesamte Modellgebiet anhand von Satellitendaten durchgeführt.

5.3 Flächenhafte Evaluation (Rasterdaten als Modellantrieb)

Zur flächenhaften Evaluierung der Modellsimulationen werden Daten der Satellitenmission Sentinel-2 (COPERNICUS 2025d) herangezogen. Sentinel-2 bietet eine räumliche Auflösung von 10m bis 60m, abhängig vom betrachteten Band, sowie eine zeitliche Auflösung von etwa drei Tagen im Gebiet des Freistaates Sachsen. Die Datenverfügbarkeit ist jedoch teilweise stark durch Wolkenbedeckung eingeschränkt, da für die Ableitung der Schneeeinformation ein optischer Sensor eingesetzt wird. Für die Validierung der Schneesimulationen wird der in jeder Level-2A-Szene enthaltene Scene Classification Layer (SCL) verwendet (SENTINELHUB 2025). Dieser Layer klassifiziert die Szenen mithilfe eines bewährten Algorithmus in 11 Klassen, die sich in „nicht verfügbare Pixel“ (Wolken, Wolkenschatten, topographische Schatten, defekte Pixel), „schneefreie Pixel“ (Vegetation, nicht-vegetative Flächen, Wasserflächen und nicht klassifizierte Bereiche) sowie „schneebedeckte Pixel“ unterteilen.

Für die Auswertung wurde eine Reklassifizierung in die 3 Kategorien „nicht verfügbar“, „schneefrei“ und „schneebedeckt“ vorgenommen. Analog zur Erstellung des LAI-Layers wurde zudem eine zusätzliche Klasse „Wald“ eingeführt. Dazu werden alle Pixel, die im CLC+ Backbone 2018 Produkt (COPERNICUS 2025c) einer Waldklasse (Nadelwald, sommergrüner Laubwald, immergrüner Laubwald) zugeordnet sind, im SCL als „Wald“ klassifiziert. Um einen Vergleich mit den Modelergebnissen zu ermöglichen, werden die Szenen schließlich auf die 100m Auflösung des Schneemodells übertragen. Somit enthält die finale Validierungsszene die Klassen „keine Daten“, „Wolkenbedeckung“, „Wald“, „kein Schnee“ und „Schnee“. Da nur qualitativ einwandfreie Szenen verwendet werden sollten, die das Modellgebiet zur Gänze abdecken, wurden aus den verfügbaren Szenen 4 geeignete Aufnahmen ausgewählt, die im Folgenden mit den Modelergebnissen verglichen werden. Dazu wird jeweils das passende Datum aus den Schneesimulationen ausgewählt und die Schneesimulationen für das Modellgebiet in einem nächsten Schritt ebenfalls reklassifiziert. Dabei wird eine binäre Einteilung in „Schnee“ und „kein Schnee“ vorgenommen, basierend auf einem SWE-Grenzwert von 1mm (siehe HANZER ET AL., 2016). Überschreitet der SWE-Wert eines Pixels diesen Schwellenwert, gilt das Pixel als schneebedeckt; andernfalls wird es als schneefrei eingestuft. Da die Schneebedingungen in bewaldeten Gebieten von den Sensoren des Sentinel Systems aufgrund des mehr oder weniger geschlossenen Kronendachs nicht korrekt erfasst werden können, wurden die Schneesimulationen in Waldbereichen von der Evaluation ausgeschlossen. Für eine Evaluation der Modellperformanz innerhalb von Waldbeständen wird an dieser Stelle auf MARKE ET AL. (2016) verwiesen.

Zur Bewertung der Modellergebnisse anhand der 4 Satellitenszenen wurde der Ansatz der F-Indizes von ARONICA ET AL. (2002) angewendet. Dabei werden 3 unterschiedliche F-Werte zur Bewertung herangezogen:

F1 zeigt den Anteil der korrekt als „Schnee“ bzw. „kein Schnee“ klassifizierten Pixelwerte im Simulationsergebnis an der Anzahl aller Pixel im Modellgebiet:

$$F1 = \frac{\sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n d}{n} \quad (14)$$

F1 F1 Index

a Schnee im Modell und Schnee im Satellitenbild

d kein Schnee im Modell und kein Schnee im Satellitenbild

n Anzahl aller Pixel

F2 zeigt den Anteil der korrekt als „Schnee“ klassifizierten Pixelwerte im Simulationsergebnis an der Anzahl aller Pixel im Modellgebiet, jedoch abzüglich der im Satellitenbild und im Modell als „schneefrei“ klassifizierten Pixel:

$$F2 = \frac{\sum_{i=1}^n a}{\sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n b + \sum_{i=1}^n c} \quad (15)$$

F2 F2 Index

a Schnee im Modell und Schnee im Satellitenbild

b Schnee im Modell und kein Schnee im Satellitenbild

c kein Schnee im Modell und Schnee im Satellitenbild

Dieser Index ist somit kritischer als F1, da die in beiden Datenquellen als „schneefrei“ identifizierten Flächen ausgeschlossen werden.

F3 zeigt den Anteil der korrekt als „Schnee“ klassifizierten Pixelwerte abzüglich der fälschlich als „Schnee“ klassifizierten Pixel im Simulationsergebnis an der Anzahl aller Pixel im Modellgebiet, jedoch abzüglich der im Satellitenbild und im Modell als „schneefrei“ klassifizierten Pixel:

$$F3 = \frac{\sum_{i=1}^n a - \sum_{i=1}^n b}{\sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n b + \sum_{i=1}^n c} \quad (16)$$

F3 F3 Index

a Schnee im Modell und Schnee im Satellitenbild

b Schnee im Modell und kein Schnee im Satellitenbild

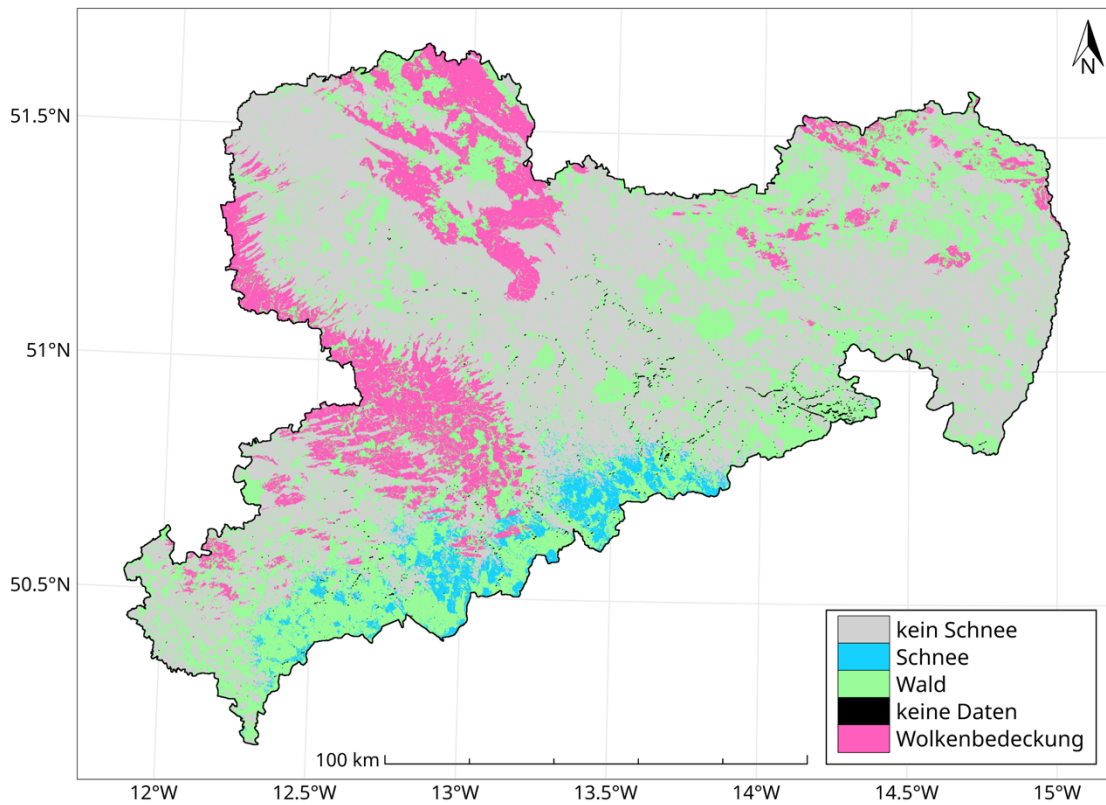
c kein Schnee im Modell und Schnee im Satellitenbild

Dieser Index ist somit kritischer als F1 und F2, da die in beiden Datenquellen als „schneefrei“ identifizierten Flächen ausgeschlossen werden und auch durch das Modell falsch als „Schnee“ klassifizierte Pixel mit in die Bewertung eingehen.

Die Ergebnisse der flächenhaften Evaluation anhand der 4 Satellitenszenen sind in Abbildung 19-22 zusammengefasst.

Schneebedeckung Sentinel-2

2019-02-28



Schneebedeckung simuliert (SWE \geq 1mm)

2019-02-28

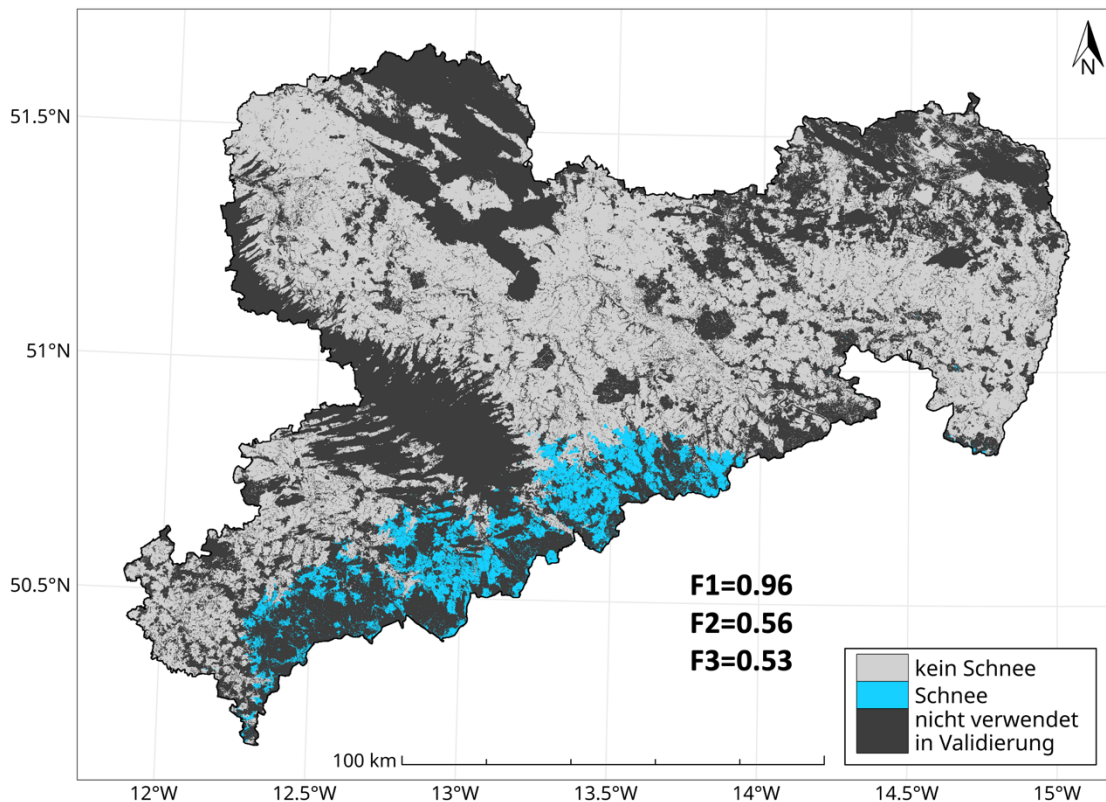
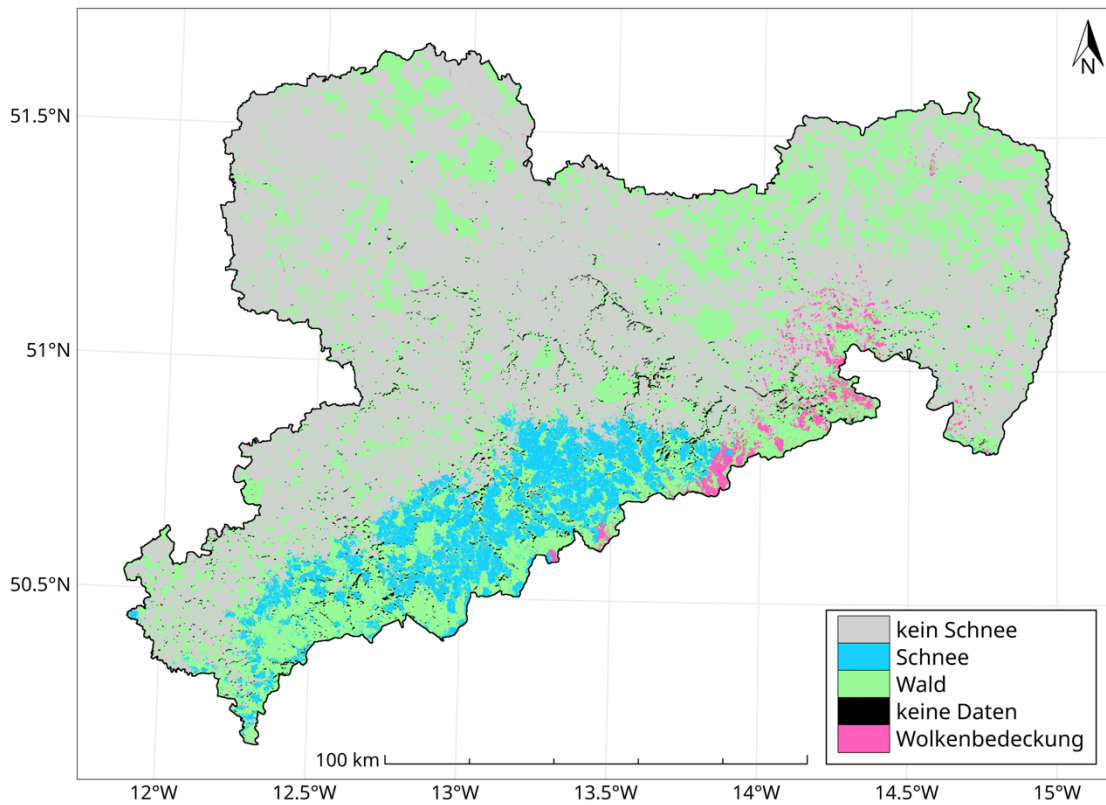


Abbildung 19: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 28.02.2019 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).

Schneebedeckung Sentinel-2

2020-02-08



Schneebedeckung simuliert (SWE \geq 1mm)

2020-02-08

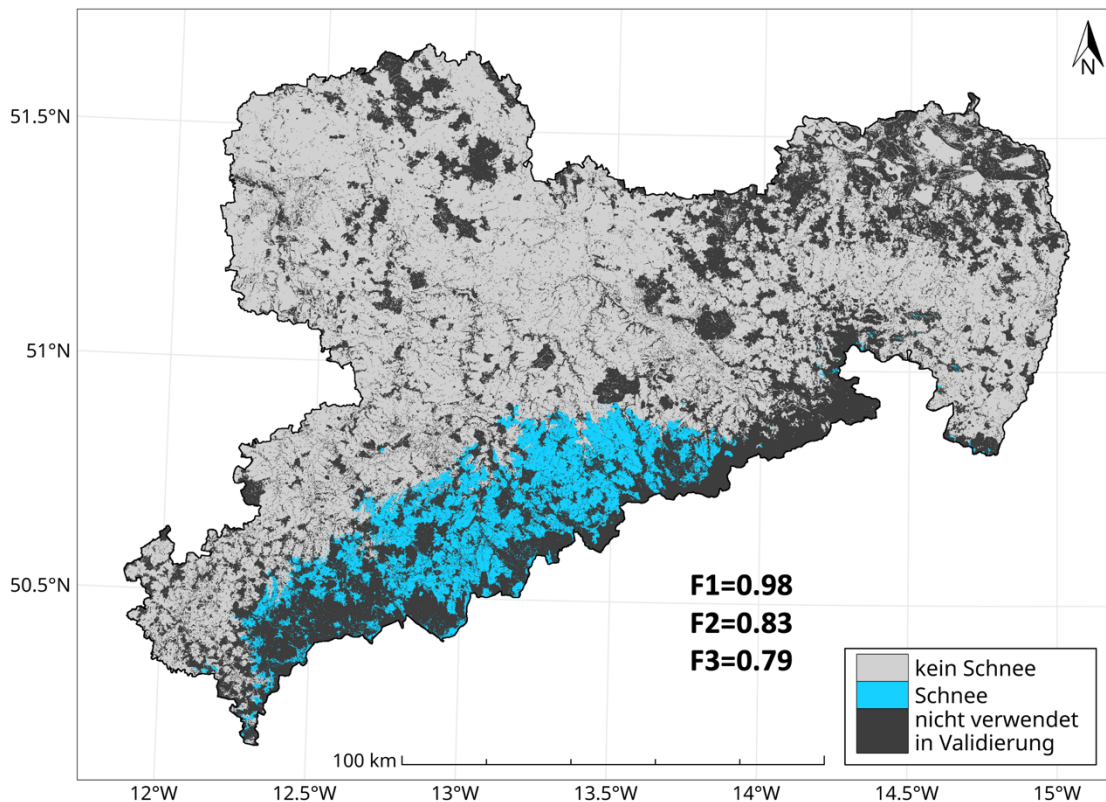
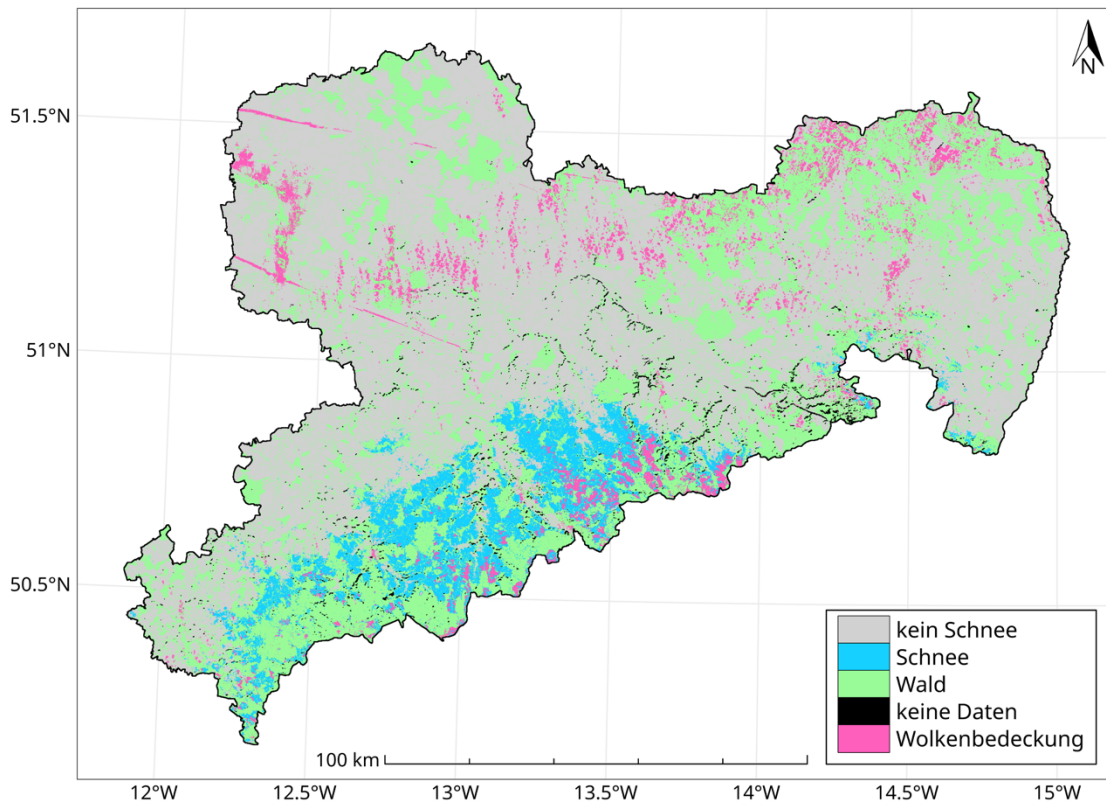


Abbildung 20: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 08.02.2020 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).

Schneebedeckung Sentinel-2

2022-02-12



Schneebedeckung simuliert (SWE \geq 1mm)

2022-02-12

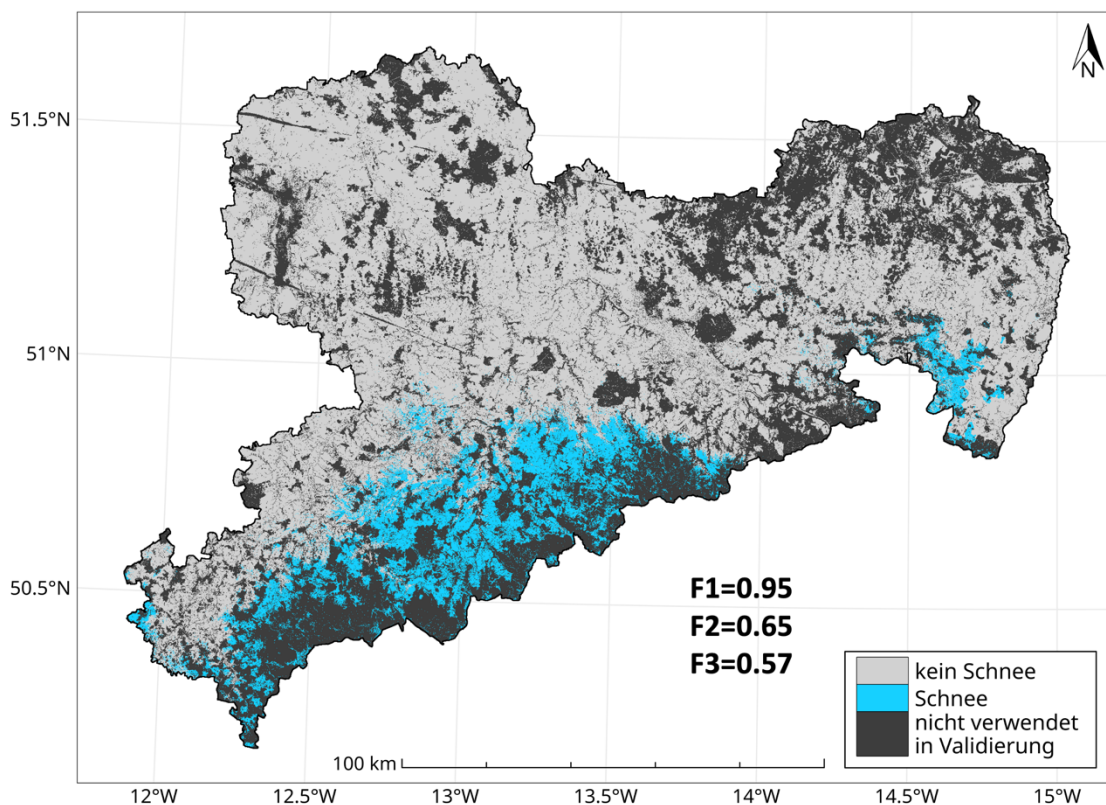
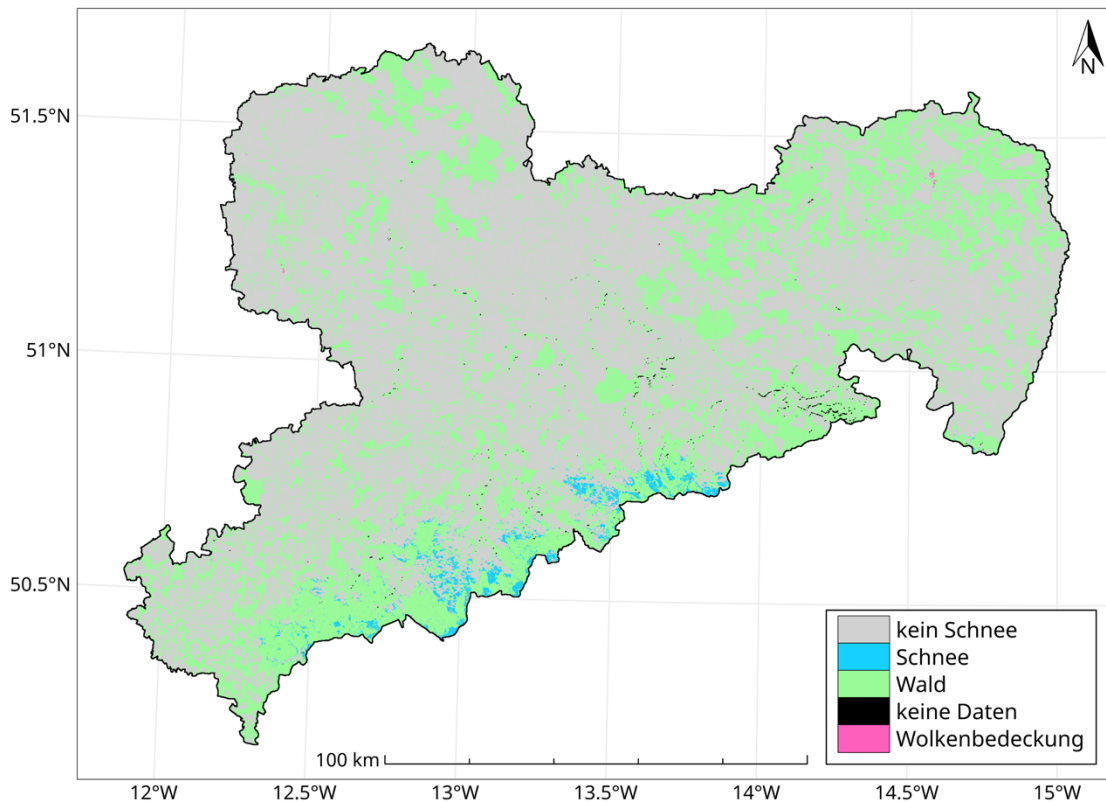


Abbildung 21: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 12.02.2022 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).

Schneebedeckung Sentinel-2

2022-03-09



Schneebedeckung simuliert (SWE \geq 1mm)

2022-03-09

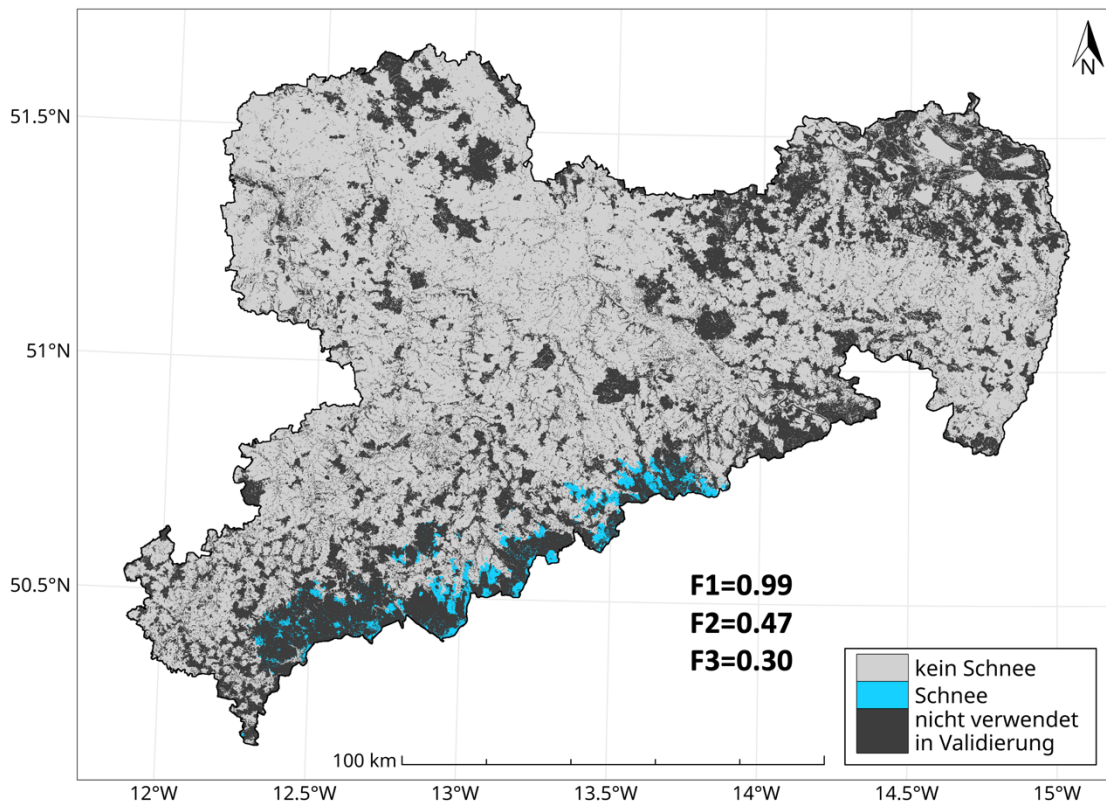


Abbildung 22: Die Schneeverteilung in Sachsen nach Ergebnissen des ESCIMOv2-R Modells und Sentinel-2 Daten für den 09.03.2022 einschließlich der zugehörigen F-Indizes nach ARONICA ET AL. (2002).

Wie der Vergleich von Modellergebnissen und Schneekarten aus Sentinel-2 Daten zeigt, wird die raumzeitliche Dynamik im Auf- und Abbau der Schneedecke in Sachsen durch das ESCIMOv2-R Modell gut abgebildet. Vor allem die im Vergleich zu anderen Studien (z.B. WARSCHER ET AL., 2013) hohen F1-Werte von 0.95 bis 0.99 zeigen die hohe Genauigkeit des Modells hinsichtlich der korrekten Vorhersage von schneebedeckten und schneefreien Flächen im Freistaat Sachsen. Wie die aufeinanderfolgenden Vergleichstermine vom 12.02.2022 und 09.03.2022 zeigen, wird das Ausapern der Schneedecke im Jahr 2022 mit hoher Genauigkeit abgebildet. Dabei kann die korrekte Vorhersage der Schneeverteilung zum Ende der Schneedeckenperiode als besonders anspruchsvoll bezeichnet werden, da für eine akkurate Reproduktion der Schneeverteilung zu diesem Zeitpunkt sowohl der Aufbau (Akkumulation), als auch der Abbau (Ablation) der Schneedecke hinreichend genau vom Modell abgebildet werden muss.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel des in diesem Bericht beschriebenen Projektes war es, die bereits vorhandene Schneemodellierung für den Freistaat Sachsen zeitlich fortzuschreiben (Zeitraum 1961–2023, 100m räumliche Auflösung, stündliche Simulationen, die zu Tageswerten aggregiert werden). Zum anderen sollte das in R implementierte Schneemodell ESCIMO von der derzeit verwendeten Version v1 (STRASSER UND MARKE, 2010) auf die erweiterte Version v2 (MARKE ET AL., 2016) aktualisiert werden. Neben inhaltlichen Verbesserungen des Modells konnten auch technische Optimierungen umgesetzt werden, beispielsweise hinsichtlich der verwendeten Dateiformate sowie der Effizienz hinsichtlich Rechenzeit und Speicherbedarf. Als Ergebnis des Projekts wurde das ESCIMOv2-Modell vollständig neu in R programmiert. Dabei wurden leistungsfähige Funktionen in R entwickelt und das NetCDF-Format für Ein- und Ausgaben genutzt, um eine effiziente Nutzung von Rechen- und Speicherressourcen zu gewährleisten. Als Ergebnis kann die Schneedecke im außerordentlich großen Modellgebiet des Freistaates Sachsen (1667 Zeilen, 2246 Spalten) bei stündlicher Modellierung in ca. 8 Rechenstunden/Wintersaison (hier: 1. Oktober – 31. Mai) mit einem Standardrechner simuliert werden. Dabei ist für eine Wintersaison und zwei Ausgabegrößen (hier: die Schneehöhe und das Schneewasseräquivalent) Festplattenspeicher von insgesamt ca. 180 GB für die stündlichen Modellausgaben einzuplanen. Da R standardmäßig bei Ausführung eines Skriptes nur einen Kern verwendet, kann die Laufzeit für Modellierungen über mehrere Winter durch eine Aufteilung auf separate Simulationsläufe weiter verringert werden. Weitere Einsparungen an Rechenzeit könnten, wie in diesem Bericht durch ein numerisches Experiment gezeigt, durch eine Auslagerung von Rechenoperationen in Fortran-Code erzielt werden, jedoch wurde zur Wahrung der Bedienbarkeit und Übersichtlichkeit in diesem Projekt auf eine Verwendung von Fortran Code verzichtet. Auch die Möglichkeit zur Definition von Gebietsausschnitten (z.B. innerhalb des großen Modellgebietes des Freistaates Sachsen), auf die sämtliche Modellrechnungen beschränkt werden können, wäre eine für zukünftige Projekte sinnvolle Modellerweiterung.

Das aktualisierte Schneemodell umfasst mehrere Erweiterungen: das Modell wurde u.a. um einen verbesserten Ansatz zur Bestimmung der Niederschlagsphase anhand der Feuchtkugeltemperatur ergänzt und die Schneetemperatur wird nun über die Energiebilanz der Schneedecke abgeleitet. Zudem wurde das Modell um die Berücksichtigung des Kälte- und Flüssigwasserspeichers erweitert, um eine akkuratere Simulation der Schneeschmelze gegen Ende der Schneedeckenperiode zu ermöglichen. Durch das neu implementierte Waldbestandsmodell kann bei flächenhaften Rechnungen der Einfluss des Waldes auf die Schneedecke berücksichtigt und damit eine differenzierte Berechnung des Schneedeckenauf- und -abbaus im Modellgebiet ermöglicht werden.

Für die Simulationen in Sachsen wurden verschiedene Parameter (z.B. bei der Abschätzung des Phasenübergangs) sowie Prozessbeschreibungen (z.B. bei der Berechnung der langwelligen Einstrahlung) getestet. Die im Rahmen der Modellparametrisierung durchgeführten Untersuchungen konnten sicherstellen, dass die im Modell eingesetzten Parameterwerte und Prozessbeschreibungen die Verhältnisse im Modellgebiet optimal abbilden.

Zur Überprüfung der Modellgenauigkeit wurden die Simulationsergebnisse an 80 Stationen mit Schneemessungen vor Ort verglichen. Aufgrund fehlender Messungen im Waldbestand, konnten allerdings nur Modellrechnungen außerhalb des Waldes evaluiert werden. Um die Schneesimulationen innerhalb des Waldbestandes zu evaluieren, wären für zukünftige Studien Schneehöhenmessungen oder Messungen des Schneewasseräquivalentes im Wald von Vorteil. Leider sind derartige Messungen mit hohem Aufwand verbunden und aufgrund der hohen raumzeitlichen Variabilität der Schneedecke im Wald oft nicht repräsentativ. Zusätzlich zur Evaluation an den 80 Schneemessstationen wurden im Projekt satellitenbasierte Schneekarten (Sentinel-Daten) für die flächenhafte Evaluation der Modellergebnisse herangezogen. Der Vergleich mit Fernerkundungsdaten hat gezeigt, dass auch die Schneebedingungen zwischen den Messtationen ausreichend genau vom Modell abgebildet werden. Auch hier konnten systembedingt nur die Modellrechnungen außerhalb des Waldes in der Evaluation berücksichtigt werden. Im Vergleich der unter Stationsdatenantrieb und Rasterdatenantrieb erzielten Modellergebnisse ist ein gewisser Genauigkeitsverlust bei den Rechnungen auf der Fläche beobachtet worden, der u.a. durch Skaleneffekte erklärt werden kann. Während bei den Modellierungen am Punkt sowohl die als Eingabe verwendeten meteorologischen Messungen als auch die zur Evaluation eingesetzten Schneehöhenmessungen die genauen Bedingungen am jeweiligen Punkt repräsentieren, bilden die im Fall der Modellierungen auf der Fläche verwendeten meteorologischen Rasterdaten sowie die erzeugten Schneemodellierungen die Bedingungen für eine 100x100m Rasterzelle ab. Da die meteorologischen Bedingungen sowie die Schneeverteilung innerhalb einer Rasterzelle kleinräumig variieren, kommt es bei einem Vergleich von Simulationen für Rasterzellen mit Punktmessungen der Schneehöhe zwangsläufig zu Abweichungen, wie in diesem Bericht am Beispiel der Station Fichtelberg gezeigt und diskutiert wurde. Insgesamt haben sowohl die punktuelle als auch die flächenhafte Evaluation gezeigt, dass das Modell ESCIMOv2-R die zeitliche und räumliche Entwicklung der Schneedecke in Sachsen zufriedenstellend abbildet.

Ganz grundsätzlich hängt die Genauigkeit der flächenhaften Modellierungen ganz wesentlich von der Qualität der als Antrieb verwendeten Rasterdaten ab. Da die Schneeschmelze in ESCIMO unter Berücksichtigung der Energiebilanz modelliert wird, könnte eine expositionsdifferenzierte Regionalisierung der Globalstrahlung inklusive der Berücksichtigung orographischer Abschattungseffekte die Ergebnisse der Modellierung v.a. in den sächsischen Gebirgsregionen in zukünftigen Studien weiter verbessern. Weitere Verbesserungen könnten durch die Berücksichtigung windinduzierten Schneetransportes, d.h. der Effekte der präferentiellen Deposition in Leelagen sowie der Schneeverlagerung aus windexponierten Lagen, erzielt werden. Geländeeffekte im Strahlungs- und Windbereich spielen v.a. bei der Simulation der Schneebedingungen in Gebirgsregionen bei entsprechend hoher räumlicher Auflösung eine bedeutende Rolle und können bereits bei der Regionalisierung der Stationsdaten Berücksichtigung finden (siehe MARKE, 2022). In zukünftigen Studien könnte das R-Programm „CliMap-R“ (MARKE 2022) zur Regionalisierung von meteorologischen Stationsmessungen eingesetzt werden und die unter Verwendung des resultierenden Datensatzes erzeugten Schneemodellierungen mit den in diesem Bericht beschriebenen Modellierungen an Punkt und Fläche verglichen werden, um den Einfluss topographischer Korrekturen in den meteorologischen Antriebsdaten auf die Schneedeckenmodellierung zu untersuchen.

Neben dem inhaltlichen Update des Modells im vorliegenden Projekt, konnten auch technische Verbesserungen erzielt werden. Während die Umstellung auf das NetCDF-Format (wie in dieser Studie erfolgt) bereits große Vorteile mit sich bringt (z.B. Möglichkeit des sequentiellen Lesens/Schreibens), könnten zukünftige Studien auch im Fall noch rechen- und speicherintensiverer Modellierungen (z.B. durch eine noch höhere räumliche Auflösung) von der Möglichkeit der Komprimierung von NetCDF-Dateien profitieren. Da Letztere jedoch mit Präzessionsverlusten einhergehen kann und die Dateigröße durch die Aggregation auf Tageswerte bereits stark reduziert werden konnte, wurde in diesem Projekt auf eine Komprimierung verzichtet.

Als Endergebnis liegen nun flächenhafte, stundenbasierte Simulationen des Schneewasseräquivalents und der Schneehöhe in einer räumlichen Auflösung von 100m und täglicher zeitlicher Auflösung für die Wintermonate (Oktober bis Mai) und den Zeitraum 1961-2023 für ganz Sachsen vor. Diese Daten bieten die Grundlage für sehr unterschiedliche Untersuchungen. So können aus den Simulationen z.B. klimawandelbedingte Veränderungen im Bereich der Schneedeckentage abgeleitet werden, die für den Winter Tourismus im Freistaat Sachsen von großer Bedeutung sind. Durch eine Untersuchung von Veränderungen in der saisonalen Speicherung von Wasser in der Schneedecke können darüber hinaus auch wasserwirtschaftliche Fragestellungen Anhand des in diesem Projekt erzeugten Schneedatensatzes bearbeitet werden.

Um den zukünftigen Einfluss des Klimawandels auf die Schneedecke zu quantifizieren, könnte das R-Programm CliMap-R (MARKE 2022) eingesetzt werden um verfügbare Klimaszenarien (z.B. des EURO-CORDEX Projektes, JACOB ET AL. 2014) auf systematische Fehler zu korrigieren und für den Freistaat Sachsen räumlich zu verfeinern. Die hierdurch erzeugten, hochaufgelösten Klimaszenarien können als Antrieb für das Schneemodell ESCIMOv2-R eingesetzt werden, um Szenarien zukünftiger Schneebedingungen in Sachsen zu berechnen, die wiederum die Grundlage für vielfältige Auswertungen bereitstellen würden.

Literaturverzeichnis

- ANDERSON, E. (2006): Snow Accumulation and Ablation Model – SNOW-17. Technischer Bericht, <https://www.weather.gov/media/owp/oh/hrl/docs/22snow17.pdf>, Abgerufen am 22.05.2025.
- ARONICA, G., BATES, P. UND HORRITT, M. (2002): Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. In: Hydrological Processes, 16, 2001–2016.
- COPERNICUS (2025A): Leaf Area Index 2014-present – version 1. Internetquelle, <https://land.copernicus.eu/en/products/vegetation/leaf-area-index-300m-v1.0>, abgerufen am 22.05.2025.
- COPERNICUS (2025B): Leaf Area Index 2016-present (raster 10 m), Europe, daily. Internetquelle, <https://land.copernicus.eu/en/products/vegetation/high-resolution-leaf-area-index>, abgerufen am 22.05.2025.
- COPERNICUS (2025C): CLCplus Backbone 2018. Internetquelle, <https://land.copernicus.eu/en/products/clc-backbone/clc-backbone-2018>, abgerufen am 22.05.2025.
- COPERNICUS (2025D): Überblick über die Sentinel-2 Mission. Internetquelle, <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>, abgerufen am 22.05.2025.
- DILLEY, A. C. UND O'BRIEN, D. M. (1998): Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124, 1391–1401, <https://doi.org/10.1002/qj.49712454903>.
- ESSERY, R., MORIN, S., LEJEUNE, Y. UND MENARD, C. (2013): A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. In: Advances in Water Resources, 55, 131–148.
- HANZER, F., HELFRICHT, K., MARKE, T. UND STRASSER, U. (2016): Multilevel spatiotemporal validation of snow/ice mass balance and runoff modeling in glacierized catchments. In: The Cryosphere, 10, 1859–1881.
- HERTEL, D. UND SCHLINK, U. (2018): Handbuch ESCIMO. Unveröffentlichter Methodenbericht.
- IZIOMON, M. G., MAYER, H. UND MATZARAKIS, A. (2003): Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: measurement and parameterization. In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65, 1107–1116.

- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., VAN MEIJGAARD, E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J.-F., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B. UND YIOU, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In: *Regional Environmental Change*, 14, 2, 563–578.
- JACOBS, J. D. (1978): Radiation climate of Broughton Island. In: *Energy Budget Studies in Relation to Fast-ice Breakup Processes in Davis Strait*, (Hrsg.): Barry, R. G. und Jacobs, J. D., Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper No. 26, University of Colorado, Boulder, 105–120.
- LISTON, G. UND ELDER, K. (2006): A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). In: *Journal of Hydrometeorology*, 7, 217–234.
- MARKE, T., MAIR, E., FÖRSTER, K., HANZER, F., GARVELMANN, J., POHL, S., WARSCHER, M., UND STRASSER, U. (2016): ESCIMO.spread (v2): Parameterization of a spreadsheet-based energy balance snow model for inside-canopy conditions. In: *Geoscientific Model Development*, 9, 633–646.
- MARKE, T. (2022): CliMap-R: an R package for the remapping of climate data in complex terrain - Application in a hydrological modelling context. International Mountain Conference (IMC2022), Innsbruck, 12.09.2022.
- MAYKUT, G.A. UND CHURCH, P.E. (1973): Radiation Climate of Barrow Alaska, 1962–66. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 620–628.
- MORIASI, D. N., ARNOLD, J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D. UND VEITH, T. L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. In: *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- NASA (2025): Das Panoply Software Paket der NASA, Internetquelle, <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>, abgerufen am 22.05.2025.
- PRATA, A. J. (1996): A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. In: *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 1127–1151.
- REKIS (2025): Regionales Klimainformationssystem - Klimadaten für Mitteldeutschland. https://rekisviewer.hydro.tu-dresden.de/viewer/rekis_domain/KlimRefDS_v3.0_1961-2023.Stationsdaten.html, Abgerufen am 22.05.2025.
- SENTINELHUB (2025): Sentinel-2 L2A Scene Classification Map. Internetquelle, <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/scene-classification/>, Abgerufen am 22.05.2025.
- STRASSER, U. UND MARKE, T. (2010): ESCIMO.spread - a spreadsheet-based point snow surface energy balance model to calculate hourly snow water equivalent and melt rates for historical and changing climate conditions. In: *Geoscientific Model Development*, 3, 643–652.

- STULL, R. (2011): Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature.
In: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 2267-2269.
- SUGITA, M. UND BRUTSAERT, W. (1993): Cloud effect in the estimation of instantaneous downward longwave radiation. In: Water Resources Research, 29, 599-605,
<https://doi.org/10.1029/92wr02352>.
- SWINBANK, W. C. (1963): Long-wave radiation from clear skies. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 89, 330–348.
- WARSCHER, M., STRASSER, U., KRALLER, G., MARKE, T., FRANZ, H., UND KUNSTMANN, H. (2013): Performance of complex snow cover descriptions in a distributed hydrological model system: A case study for the high Alpine terrain of the Berchtesgaden Alps. In: Water Resources Research, 49, 2619–2637

Herausgeber

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden

Telefon: +49|351|2612-0; Telefax: +49|351|2612-1099

E-Mail: Poststelle@lfulg.sachsen.de

www.lfulg.sachsen.de

Autor

Assoz. Prof. Dr. Thomas Marke

Alpine Climate and Water Research

Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Innrain 52f | A-6020 Innsbruck

Telefon: +43 512 507 54007; Telefax: +43 512 507 2895

E-Mail: thomas.marke@uibk.ac.at

Redaktion

Florian Kerl

Abteilung 5 | Referat 55

Söbrigener Str. 3a | 01326 Dresden-Pillnitz

Telefon: +49|351|2612-5502; Telefax: +49|351|2612-5099

E-Mail: florian.kerl@lfulg.sachsen.de

Bildnachweis

Thomas Marke (Titelseite)

Redaktionsschluss

31.07.2025

ISSN

1867-2868

Bestellservice

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei heruntergeladen werden aus der Publikationsdatenbank des Freistaates Sachsen (<https://publikationen.sachsen.de>).

Hinweis

Diese Publikation wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom LfULG (Geschäftsbereich des SMEKUL) kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Täglich für ein gutes Leben.

www.lfulg.sachsen.de