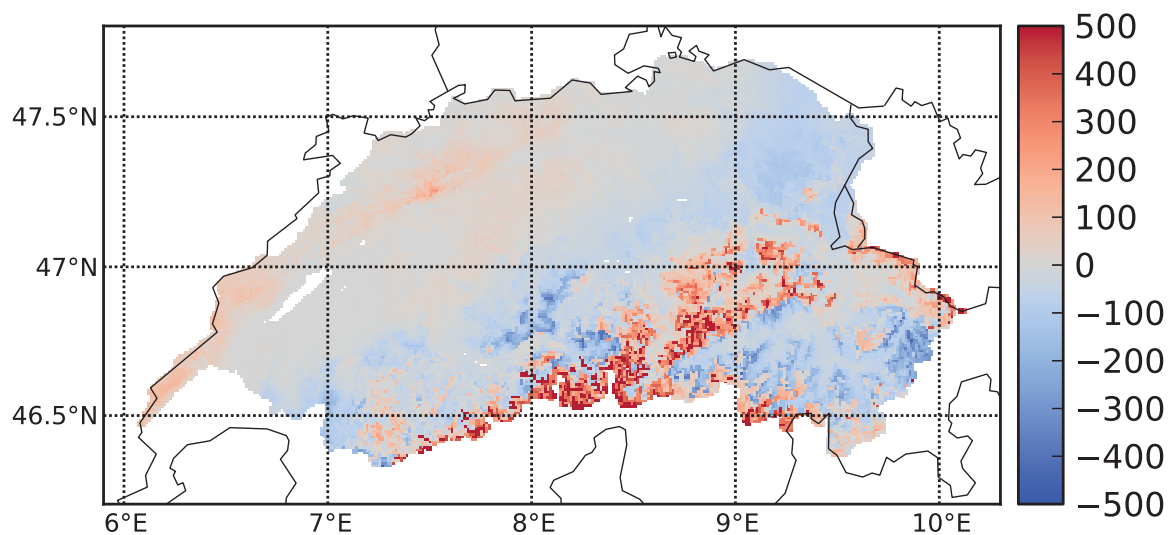


Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Clara Hohmann

**Validierung der Schneedeckenmodellierung eines
großskaligen hydrologischen Modells für alpine
Einzugsgebiete**



Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br. 12. November 2013

Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Clara Hohmann

**Validierung der Schneedeckenmodellierung eines
großskaligen hydrologischen Modells für alpine
Einzugsgebiete**

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler (Universität Freiburg)

Korreferent: Prof. Dr. Jan Seibert (Universität Zürich)

Betreuung: Dr.-Ing. Ingo Haag und Mario Böhm HYDRON GmbH

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br. 12. November 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Stand der Wissenschaft	2
1.3	Zielsetzung	3
1.4	Rheineinzugsgebiet bis Basel	4
1.5	Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM	5
1.5.1	Schneemodellierung	5
1.5.2	Schneemassentransport	9
2	Daten	11
2.1	Datenbeschaffung	11
2.1.1	Antriebsdaten für LARSIM	15
2.1.2	Vergleichsdaten	17
2.2	Datenplausibilisierung	19
2.3	Vergleich der Raster - räumliche und zeitliche Übereinstimmung	20
2.3.1	Anpassung der Raster von LARSIM und SLF	20
2.3.2	Räumliche Übereinstimmung	21
2.3.3	Zeitliche Übereinstimmung	22
2.4	Modelleinstellungen	22
3	Methodenentwicklung - Vergleich der flächenhaften SWE-Daten	24
3.1	Modellvalidierung anhand von Pegeldaten	24
3.2	Vergleichbarkeit des SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF}	24
3.3	Übersichtsauswertungen zum SWE-Vergleich	25
3.4	Räumliche Auswertung	26
3.4.1	Auswertung von Stichtagen	27
3.4.2	Korrelationsanalyse und multiple lineare Regression (räumlich)	27
3.5	Zeitliche Auswertung	33
3.5.1	Auswertung einzelner Elemente	33
3.5.2	Korrelationsanalyse (zeitlich)	34
4	Ergebnisse und Diskussion	39
4.1	Modellvalidierung anhand von Pegeldaten	39
4.2	Überblicksauswertungen zum SWE-Vergleich	41
4.3	Räumliche Auswertung	45
4.3.1	Auswertung von Stichtagen	45
4.3.2	Auswertung der Differenzen und Fehlermaße für die Korrelationsanalyse	53

4.3.3	Korrelationsanalyse und lineare Regression (räumlich)	57
4.3.4	Multiple lineare Regression (räumlich)	61
4.4	Zeitliche Auswertung	65
4.4.1	Auswertung einzelner Elemente	65
4.4.2	Korrelationsanalyse (zeitlich)	73
4.5	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	80
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	84
6	Literaturverzeichnis	87

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersichtskarte des Rhein-EZGs bis Basel mit den drei LARSIM mit Modellge- bieten.	4
1.2	Schematische Darstellung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Bremicker, 2000)	6
1.3	Zusammensetzung des Niederschlags aus Regen, Schnee und Regen-Schnee-Gemisch an der Klimastation Hohenpeißenberg in Abhängigkeit der Lufttemperatur . . .	7
1.4	Schematische Darstellung der Energiebilanz einer Schneedecke	8
2.1	Globalstrahlung an der Messstation Mathod für die Jahre von 1994 bis 2006. . .	19
2.2	Differenz der Höhen zwischen LARSIM und dem neuen Raster des SLF-Produktes.	21
3.1	Ausgewählte Elemente entlang eines Nord-Süd sowie eines Ost-West Transektes, unterlegt mit den mittleren Höhen aus LARSIM	34
4.1	Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Bern, Schöna an der Aare für das Jahr 2004.	39
4.2	Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Dipoldsau am Rhein für das Jahr 2002.	40
4.3	Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Basel, Rhein- halle am Rhein für das Jahr 1998.	40
4.4	Monatsmittelwerte in mm des SWE von LARSIM (reale Landnutzung), LARSIM- Wiese (Landnutzung nur Wiese) und dem SLF-Produkt.	42
4.5	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2002.	46
4.6	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2003.	48
4.7	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2003.	49
4.8	Differenzenkarte vom 24. Februar 2003 aus dem „Film der Differenzen“.	50
4.9	Boxplot für den Schneedeckenaufbau vom 15. Dezember.	51
4.10	Boxplot für die maximale Schneebedeckung am 7. April.	52
4.11	Boxplot für die Schneeschmelze am 1. Juni.	52
4.12	Räumliche Darstellung der maximalen Differenz (DIF_{max}) [mm] des Untersu- chungsgebietes.	53
4.13	Räumliche Darstellung der minimalen Differenz (DIF_{min}) [mm] des Untersu- chungsgebietes.	54
4.14	Räumliche Darstellung des Betrags der mittleren Differenz ($ DIF_{mean} $) [mm] des Untersuchungsgebietes.	54
4.15	Räumliche Darstellung der mittleren Differenz (DIF_{mean}) [mm] des Untersu- chungsgebietes.	55

4.16	Räumliche Darstellung des relativen Fehlers MAE_{norm} [mm] des Untersuchungsgebietes.	55
4.17	Räumliche Darstellung des relativen Fehlers ME_{norm} [mm] des Untersuchungsgebietes.	56
4.18	Einflussfaktoren gegen Differenzen und Fehlermaße mit eingezeichneter linearer Regression, sowie Angabe der Regressionsgleichung und daraus resultierendem R^2	59
4.19	Multiple lineare Regression gegen den relativen Fehler MAE_{norm} mit 1:1-Geraden.	63
4.20	Multiple lineare Regression gegen den Betrag der Differenz ($ DIF_{mean} $) mit 1:1-Geraden.	64
4.21	Scatterplots des LARSIM simulierten Schneewasseräquivalent (SWE_{LARSIM}) über das Schneewasseräquivalent des SLF-Produktes (SWE_{SLF}) mit eingezeichneter 1:1-Geraden ausgewählter Elemente. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen der einzelnen Elemente.	66
4.22	SWE-Ganglinien des Elementes 4255 über die Winterperiode 1998/1999 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	69
4.23	SWE-Ganglinien des Elementes 15188 über die Winterperiode 2002/2003 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	69
4.24	SWE-Ganglinien des Elementes 12587 über die Winterperiode 2004/2005 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	70
4.25	SWE-Ganglinien des Elementes 15188 über die Winterperiode 2005/2006 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	71
4.26	SWE-Ganglinien des Elementes 1684 über die Winterperiode 2001/2002 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	72
4.27	SWE-Ganglinien des Elementes 28472 über die Winterperiode 1999/2000 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.	73
4.28	Scatterplots mit jeweils verschiedener Fehlermaße bzw. Differenzen über mögliche Einflussfaktoren mit dargestellter und aufgeführter linearer Regressionsgeraden sowie der Angabe des R^2	76
4.29	Scatterplots der Gradienten der Differenzen mit linearer Regressionsgeraden sowie	79
6.1	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Höhe [m] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	iv
6.2	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Exposition [°] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	iv
6.5	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Temperatur [°C] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	v
6.3	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Hangneigung [°] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	v

6.4	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Niederschlag [mm] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	v
6.6	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Globalstrahlung [W/m^2] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	vi
6.7	Räumliche Darstellung des Einflussfaktor T_{Grenz} [$^{\circ}\text{C}$] für das gesamte Untersuchungsgebiet.	vi
6.8	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 1998.	vii
6.9	Karten der maximalen SWE vom 07. April 1999.	viii
6.10	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 1999.	ix
6.11	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 1999.	x
6.12	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2000.	xi
6.13	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2000.	xii
6.14	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2000.	xiii
6.15	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2001.	xiv
6.16	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2001.	xv
6.17	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2001.	xvi
6.18	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2002.	xvii
6.19	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2002.	xviii
6.20	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2003.	xix
6.21	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2004.	xx
6.22	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2004.	xxi
6.23	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2004.	xxii
6.24	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2005.	xxiii
6.25	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2005.	xxiv
6.26	Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2005.	xxv
6.27	Karten der maximalen SWE vom 07. April 2006.	xxvi
6.28	Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2006.	xxvii

Tabellenverzeichnis

1.1	In LARSIM implementierte Energiebilanzmodelle mit ihrer Verwendung der Energieströme sowie der für LARSIM benötigten Parameter.	8
2.1	Antriebsdaten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit gesammelt wurden.	12
2.2	Vergleichsdaten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit gesammelt wurden.	13
2.3	Daten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit für die Auswertung genutzt wurden.	14
2.4	Angaben über die Stationsanzahl der einzelnen meteorologischen Parameter für den Zeitraum von 1960 bis 2012 sowie die Angaben über korrigierte und herausgenommene Stationen	20
3.1	Einfärbung der Karte zur Übereinstimmung der Schneedeckenausdehnung	27
3.2	Einflussfaktoren mit Einheiten, die für die räumliche Korrelationsanalyse und multiple lineare Regression verwendet wurden	28
3.3	Metadaten aus LARSIM der Elemente die für die Auswertung genutzt wurden .	33
3.4	Einflussfaktoren mit Einheiten, die für die zeitliche Korrelationsanalysen verwendet wurden	35
4.1	Mittelwerte des SWE in mm gemittelt über den Untersuchungszeitraum (1998-2006) und das gesamte Untersuchungsgebiet	41
4.2	Maxima und Mittelwerte der einzelnen Winterperioden (01.11.-15.06.)	43
4.3	Korrelationsmatrix zwischen möglichen Einflussfaktoren und Differenzen sowie Fehlermaße der räumlichen Auswertung	58
4.4	Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers MAE_{norm} mit Angabe des R^2	62
4.5	Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers MAE_{norm} mit Angabe des $RMSE$	62
4.6	Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers $ DIF_{mean} $ mit Angabe des R^2	63
4.7	Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers $ DIF_{mean} $ mit Angabe des $RMSE$	64
4.8	Korrelationsmatrix zwischen möglichen Einflussfaktoren und Differenzen sowie Fehlermaßen der zeitlichen Auswertung	74
4.9	Korrelationsmatrix zwischen den möglichen Einflussfaktoren und den Gradienten der Differenzen	78

Zusammenfassung

Großskalige Wasserhaushaltsmodelle modellieren neben zahlreichen anderen Komponenten des Wasserhaushaltes auch die Schneedynamik im Einzugsgebiet (EZG). Die Kalibrierung und Validierung der Wasserhaushaltsmodellierung erfolgt in der Regel jedoch nur am Gebietsauslass (Pegel) und integriert somit über das gesamte EZG und unterschiedliche Prozesse. Ungenauigkeiten in der Schneemodellierung werden hierbei möglicherweise durch andere Prozesse kompensiert. In Einzugsgebieten mit großen Gebirgs- und Gletscheranteilen ist die Schneedynamik besonders bei der Betrachtung von Klimaveränderungen jedoch sehr entscheidend, weshalb eine zeit- und datenintensive unabhängige Validierung der Schneedeckensimulation unabdingbar erscheint. In dieser Arbeit wurde deshalb eine Validierung des flächigen Schneewasseräquivalents (SWE) des Wasserhaushaltsmodells LARSIM mit den SWE-Karten des Schweizer Schnee- und Lawinen Forschungsinstitutes (SLF) durchgeführt.

Das Untersuchungsgebiet umfasst den Schweizer Teil des Rhein-Einzugsgebietes (27 273 km²) mit einer Auflösung von 1 km². Analysiert wurden acht Winterperioden (1998 bis 2006) in Tagesschritten.

Bevor Methoden zur Validerung entwickelt und getestet werden konnten, musste jedoch zunächst ein plausibler Datensatz der hydro-meteorologischen Parameter (Niederschlag, Temperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Wind, Luftdruck sowie Abfluss) für die Modellierung mit LARSIM geschaffen werden. Mit Hilfe der hier entwickelten Methoden für eine raum-zeitliche Auswertung sollten vor allem folgende Fragen geklärt werden:

- Wo traten Diskrepanzen zwischen der SWE aus LARSIM und dem SLF-Produkt auf?
- Wann, also in welchen Zeiträumen lagen Diskrepanzen vor?
- Warum traten Diskrepanzen auf? (Identifizierung möglicher Einflussfaktoren und Fehlerquellen)

Der umfangreiche Datensatz wurde im ersten Schritt anhand von Mittelwerten über Raum und Zeit analysiert. Die Mittelwerte zeigten einerseits eine Tendenz der Überschätzung von LARSIM und andererseits eine Verzögerung des Abschmelzens.

Im zweiten Schritt erfolgte eine räumlich differenzierte Auswertung, bei der u.a. Karten des SWE und der Differenzen zwischen LARSIM und dem SLF-Produkt für charakteristische Stichtage im Jahr ausgewertet wurden. Um die räumlich-zeitliche Auswertung zu verbinden, wurden die Differenzkarten von jedem Tag als „Film“ hintereinander geschnitten. So konnten Bereiche der Über- und Unterschätzung gut visualisiert und lokalisiert werden, was wiederum die Plausibilität der Stichtagauswertung unterstützte. Dabei trat der Alpenhauptkamm mit besonders starken Überschätzungen durch LARSIM hervor. Graubünden und Teile des Alpenvorlandes wiesen jedoch besonders an den Talflanken eine leichte Unterschätzung auf.

Um die räumliche Auswertung zu vertiefen, wurde eine Korrelationsanalyse zwischen möglichen Einflussfaktoren einerseits und zwischen relativen Fehlermaßen und absoluten Differenzen an-

dererseits durchgeführt. Hierbei zeigten sich besonders große Zusammenhänge mit der Höhe. Die Zusammenhänge der einzelnen Einflussfaktoren mit den Fehlermaßen/Differenzen wurden mit Hilfe von Abbildungen visualisiert sowie mit einer einfachen linearen Regressionen weiter geprüft. Anschließend wurde ein multiples lineares Regressionsmodell aufgestellt. Als wichtigster Einflussfaktor stellte sich die Höhe heraus. Sie zeigte eine starke negative Korrelation ($r = -0.85$) zu dem relativen Fehlermaß und eine positive Korrelation ($r = 0.74$) zu dem Betrag der Differenz. Während der absolute Fehler also mit der Höhe signifikant zunimmt, wird der relative Fehler mit zunehmender Höhe geringer. Zudem zeigte sich, dass der Niederschlagsinput und die Grenztemperatur für den Übergang von Schnee zu Regen in LARSIM eine wichtige Rolle beim Vergleich der SWE spielen.

Zeitliche Analysen erfolgten zunächst über eine Auswertung einzelner Elemente. Der absolute Fehler wird mit zunehmendem Gebietsniederschlag größer. Die gebietsspezifische Grenztemperatur in LARSIM hatte hingegen deutlichen Einfluss auf den relativen Fehler der Schneesimulation. Bei den repräsentativen Elementen kam es sowohl zu Über- als auch zu Unterschätzungen des SWE. Bei einer Zeitreihenbetrachtung zusammen mit dem täglichen Niederschlag sowie der Temperatur stellte sich heraus, dass Diskrepanzen beim Niederschlagsinput auftraten. Der flächige Niederschlagsinput von LARSIM, die sogenannten HYRAS-Daten, schienen nicht immer mit dem SLF-Produkt zusammenzupassen. Bei der Analyse zeigte sich auch, dass die Grenztemperatur in LARSIM für Diskrepanzen zwischen dem SWE aus LARSIM und dem SWE des SLF-Produkts verantwortlich ist. Die Grenztemperatur wird in LARSIM als ein fester Wert für ein Gebiet festgelegt, und nicht dynamisch angepasst. Besonders ausgeprägte Diskrepanzen entstanden daher bei Niederschlägen um die 0°C .

Um das Verhalten des SWE von einem Zeitschritt zum nächsten besser verstehen zu können, wurden Gradienten der Differenzen gebildet und mit diesen eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Große Korrelationen ($r = 0.81$) traten zwischen dem maximalen Gradienten der Differenz und dem aktuellen Niederschlag auf. Die Zeitpunkte, an denen Fehleinschätzungen entstehen, und deren Ausmaß scheinen demnach stark vom Niederschlag beeinflusst zu werden.

Als zusätzlicher Einflussfaktor zeigte sich bei vielen Auswertungen der in LARSIM implementierte „Schneemassentransport“, bei dem Schnee nur bis zu einem gefälleabhängigen Schwellenwert akkumulieren kann. Schnee, der über diesen Schwellenwert fällt, wird an das nächste Element weitergegeben. Durch diese vereinfachte Weitergabe reicherte sich in einigen Bereichen unnatürlich viel Schnee an, was dazu führte, dass diese Elemente nicht mit dem SLF-Produkt vergleichbar waren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die hier angewendeten Methoden für eine Raum-Zeit-Auswertung des SWE geeignet sind und sich die Schneesimulation von LARSIM kritisch bewerten lässt. Eine Weiterführung dieses raum-zeitlichen Vergleichs wäre aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wünschenswert.

Schlüsselwörter: Schneesimulation, Schneewasseräquivalent (SWE), großskaliges Wasserhaushaltsmodell, LARSIM, flächige Validierung, SLF-Schneekarten

Abstract

Water balance models simulate snow dynamics within the catchment among many other components. However, the calibration and validation of the water balance models is usually only performed at the gauge and the discharge is integrated over the entire catchment and different processes. Therefore, inaccuracies within the snow modelling may be compensated by other processes. Especially in catchments dominated by mountains and glaciers, snow dynamics play a crucial role in the water budget for the region. The time- and data-intensive independent validation of snow cover simulation is essential for the assessment of regional water availability and the effects of climate change.

This work compares a comprehensive validation of snow water equivalent (SWE) from the water balance model LARSIM with snow maps from the Swiss Snow and Avalanche Research Institute (SLF).

The study area includes the Swiss region of the Rhine river basin (27 273 km²) with a resolution of 1 km². The investigation was conducted for the winter periods from 1998 to 2006 with a time step of day by day (1818 days in total).

Before different methods of validation were developed and tested, plausible and reliable data of hydro- and meteorological parameters like precipitation, temperature, relative humidity, global radiation, wind, pressure and discharge had to be compiled.

With the help of the subsequently engineered methods for spatio-temporal analysis, the following questions were addressed:

- Where did differences occur between the SWE from LARSIM and the SLF product?
- When exactly did these differences appear?
- Why did they occur? (Identification of possible factors and sources of error)

The extensive data set was firstly analyzed using mean values over space and time. On one hand, these mean values showed the tendency of overestimation of LARSIM, and on the other hand a delay of melting.

In the second step, a differentiated analysis over space was carried out. Within this analysis, SWE difference maps between SWE-LARSIM and SLF-SWE were constructed for characteristic reference dates. To connect the spatio-temporal analysis, the difference maps of each day were put together in a SWE-difference movie. Thus, the areas of over- and underestimation could be easily visualized and localized, which supported the possibility of the reference date maps. Here, the central parts of the Alps emerged with particularly high values of overestimation (LARSIM-SWE minus SLF-SWE). Less pronounced areas of underestimation were found in the south-eastern part of the research area (Graubünden) and in the valleys of the Alpine foothills. To intensify in the special analysis, a correlation analysis was computed using a variety of possible factors impacting SWE and snow cover distribution. Especially high correlations were found for the factor elevation. The relationships between the various factors and the error

mesures/differences were visualized using figures and further tested by the use of single linear regression. Subsequently, a multiple linear regression model was established. Elevation was found to be the most significant factor. It showed a strong negative correlation ($r = -0.85$) with respect to the mean absolute error, and a positive correlation ($r = 0.74$) to the absolute differences. While the absolute error is significantly increasing with elevation, the relative error decreases with increasing elevation. Furthermore, the factors „precipitation input“ and threshold temperature within LARSIM“ were found to play an important role in the comparison of SWE.

The first temporal analysis was performed via an evaluation of individual model elements. Both, over- and underestimation were found when comparing LARSIM-SWE and SLF-SWE over time using representative model elements. In a time series analysis of SWE including daily precipitation and temperature, it was shown that discrepancies within the precipitation input occurred. The HYRAS based precipitation data (precipitation data product with a resolution of 1 km², produced by the German Weather Service (DWD)) was not always in accordance with the SLF product. The analysis also showed that the constant „threshold temperature within LARSIM“ is responsible for discrepancies between LARSIM-SWE and the SLF-SWE. The „threshold temperature within LARSIM“ is a LARSIM-parameter with a constant value per basin (in units of [°C]). Without variation over time, this parameter led to strong discrepancies between LARSIM-SWE and SLF-SWE, in particular when precipitation occurred at 0°C air temperatures.

To better understand the behavior of SWE from one time step to the next, gradients of SWE-differences were calculated and a correlation analysis was performed. High correlation ($r = 0.81$) occurred between the maximum gradient of the SWE difference and precipitation. The time points, at which misperceptions arise, seem to be strongly influenced by precipitation.

As an additional factor, influencing the comparison of SWE, LARSIM's „snow mass transport“ was found to be accountable. With this snow mass transport mechanism turned on in LARSIM, snow can only accumulate up to a gradient-dependent threshold. When more snow fell and this threshold was exceeded, the surplus of snow was simply passed on to the next model element downhill. In areas with such unnaturally high snow accumulation, the simplified deliverance of snow downhill led to large SWE-differences when comparing LARSIM simulation output with the SLF product.

In a nutshell, the applied methods within this study for space-time analysis of SWE were found to be suitable and thus, the simulation of snow within LARSIM can be critically evaluated. A continuation of this spatio-temporal comparison (e.g. with the SLF-SWE upgraded product) would be desirable due to these promising results.

Keywords: snow simulation, snow water equivalent (SWE), large scale water balance models, LARSIM, validation over time and space, SLF snow maps

Danksagung

Ganz besonderer Dank gilt meinen Betreuern bei der HYDRON GmbH Ingo und Mario. Sie haben mir immer weiter geholfen und ohne sie wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form niemals möglich gewesen. Zudem möchte ich mich bei meinem Referenten Markus Weiler und Korreferenten Jan Seibert für Ideen im Laufe der Arbeit sowie für die Übernahme der Bewertung bedanken. Weiter gilt mein Dank allen Mitarbeitern der HYDRON GmbH, die mir im Laufe meiner Arbeit immer weiter helfen konnten. Besonders möchte ich mich noch bei Erkin bedanken, ohne den die vielen Python-Programmierungen nur schwer lösbar gewesen wären. Auch gilt mein Dank Andreas, der mir bei den HYRAS-Daten mit Rat und Tat zur Seite stand sowie Dirk, der mir die LARSIM-Versionen angepasst hat und Nóemie, die mir bei der Anpassung der Raster geholfen hat.

Meinen Dank möchte ich auch den Bereistellern der vielen verschiedenen Daten aussprechen. Hierbei sei Herr Bremicker besonders erwähnt, der es mir ermöglichte die LARSIM-Modelle sowie verschiedene Daten aus Baden-Württemberg zu nutzen.

Ganz besonderer Dank gilt auch den Korrekturleserinnen, ohne die diese Arbeit ein ganz anderes Bild zeigen würde. Deshalb möchte ich mich bei Merle, Frizi, Janina und Steffi für die vielen guten Verbesserungsvorschläge und das lange Durchhalten bedanken.

Abschließend möchte ich mich noch sehr bei meinen Eltern bedanken, die mich immer und in allem unterstützen.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Großskalige Wasserhaushaltsmodelle (WHM) nehmen in der Hydrologie einen wichtigen Platz bei der Analyse und Nachbildung des Wasserkreislaufes ein. Sie simulieren dabei u.a. die Schneeeakkumulation und die Schneeschmelze als zwei bedeutende Prozesse der Abflussbildung. Die sehr datenaufwändige Validierung der Schneedecksimulation kommt dabei jedoch oft zu kurz.

Schnee stellt einen großen Wasserspeicher dar, dessen Schmelzwasser im Frühjahr besonders starke Auswirkungen auf den Abfluss aber auch den gesamten Wasserkreislauf hat (Dutra et al., 2010). Besonders bei einem Einzugsgebiet (EZG) mit großen Gebirgs- und Gletscheranteil spielt der Abfluss aus Schmelzwasser die entscheidende Rolle (Barnett et al., 2005). Der Zeitpunkt und das Volumen der alljährlichen Schmelze hat u.a. große Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung, das Ökosystem sowie den Tourismus (Beniston, 2012). Zusätzlich zu der Schneeschmelze stellt der Schnee auch aufgrund der hohen Oberflächenalbedo eine wichtige Komponente des Klimasystems dar (Steger et al., 2012). Der Schnee ist zudem ein wichtiger Indikator für Klimavariationen, wegen der Sensitivität gegenüber Temperatur und Niederschlag (Hülser et al., 2012). Aufgrund des Anstiegs der globalen Lufttemperaturen werden sich deshalb die weltweiten Schneeressourcen signifikant verändern (Hosaka et al., 2005). Langfristige Veränderungen werden bei der Schneehöhe, dem Schneewasseräquivalent (SWE) und der Schneedeckenausdehnung auf der globalen, der regionalen und der lokalen Skala erwartet. Dadurch kommt es zu bedeutenden Auswirkungen für das Ökosystem, die menschliche Nutzung der Schneeressourcen und zu Auswirkungen auf das Klima selbst, aufgrund von Rückkopplungsmechanismen (Steger et al., 2012).

Großskalige WHM wurden in der Regel nur anhand des Abflusses am Pegel validiert. Dabei kommen jedoch verschiedene Probleme zusammen. Zum einen werden verschiedenen Abflussbildungsprozesse vermischt, zum anderen kommt es zu einer Kompensation weiterer Fehler wie z.B. Messfehler der Eingangsparameter. Der Niederschlag stellt eine wichtige Antriebsgröße bei hydrologischen Modellen dar, seine Messung und Interpolation auf die Fläche ist jedoch stark fehlerbehaftet. Verstärkt wird dieser Fehler noch bei der Messung von festem Niederschlag.

Um die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die schneebürtige Abflusskomponente und das Abflussregime belastbar abschätzen zu können, ist eine spezifische Validierung der Schneedynamik jedoch unabdingbar.

1.2 Stand der Wissenschaft

Großskalige WHM werden bei der Vorhersage von Hoch- und Niedrigwasser, aber auch für Abschätzung von Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt besonders häufig eingesetzt (LUWG und LFU, 2012). WHM werden hauptsächlich für die Modellierung des Abflusses verwendet, wobei eine Vielzahl von Abflussbildungsprozessen mit berücksichtigt werden können. Sie modellieren u.a. die Schneeakkumulation und die Schneeschmelze als einen Teil von vielen Abflussbildungsprozessen. Der Abfluss am Pegel stellt damit immer das Integral über das gesamte Pegelinzugsgebiet dar, sodass die verschiedenen Abflussbildungsprozesse sich vermischen. Durch eine Kalibrierung am Pegel können viele Ungenauigkeiten bei der Abbildung der verschiedenen Prozesse kompensiert werden.

Um die Trends der globalen Wasserressourcen in Form von Schnee zu verstehen, ist das Schneewasseräquivalent (SWE) die entscheidendste Größe (Sturm et al., 2010). Die Messung des SWE ist im Feld jedoch sehr aufwändig, weshalb es kein gut abgedecktes globales Messnetz gibt. Die Messung von Schneehöhen ist einfacher und leichter in automatisierter Form möglich. In der Schweiz werden an sehr viel mehr Stellen Schneehöhen gemessen als SWE (Sturm et al., 2010). Aufgrund der zeitintensiven Messung des SWE gibt es auf der regionalen Skala keine großräumigen Messungen, um die räumliche Verteilung des SWE gut zu bestimmen. Das Problem der Datenlage zeigt sich verstärkt im Gebirge, wo oft eine schroffe Topografie herrscht und es große Heterogenitäten bei den meteorologischen Bedingungen gibt. Aufgrunddessen kommt es auch zu heterogenen Verteilungen des SWEs (Anderton et al., 2004). Ein mögliches Potential zur Verbesserung der Datenlage liegt beim Einsatz von Fernerkundung (Hülser et al., 2012; Parajka und Blöchl, 2006). Es gibt jedoch noch keine Methode auf der Einzugsgebietsskala, die das SWE mit ausreichender Auflösung für Gebiete mit ausgeprägter Topografie zur Verfügung stellen kann (Anderton et al., 2004).

Für die Schweiz wird neuerdings vom Schweizer Schnee- und Lawinen Forschungsinstitut (SLF) ein flächiges SWE-Produkt entwickelt, welches auf einem $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Raster tägliche SWE-Karten beinhaltet. Erst jetzt bestand somit die Möglichkeit einen flächigen Vergleich von SWE-Karten mit einem flächigen Modell-Output zu bewerkstelligen. Mit dem Datenprodukt des SLFs sollte deshalb in dieser Arbeit eine Validierung der Schneemodellierung eines großskaligen WHMs mit flächigen SWE durchgeführt werden.

Bei der Methodenentwicklung für den Vergleich vom SWE ging es u.a. darum, mögliche Einflussfaktoren zu finden, die Auswirkungen auf die Abweichungen zwischen den zu vergleichenden SWE hatten. Bei Anderton et al. (2004) wurde der Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren und Vergleichsdaten mit Hilfe von Scatterplots, einer Korrelationsmatrix und eines multivariaten Regressionsmodells bestimmt. Das Untersuchungsgebiet war nur 320 m^2 groß und hatte eine räumliche Auflösung von 1 m^2 . Anderton et al. (2004) führen mögliche topografische Einflussfaktoren, die u.a. Auswirkungen auf maximale Schneehöhe und Dichte bei maximaler Schneehöhe zeigen könnten, auf. Erstens die Höhe, welche einen wichtigen Einfluss auf die Schneeakkumulation und -ablation hat. Zweitens der Hangneigungsgradient, der direkten Einfluss auf die Schneedeckenstabilität hat und somit auf die Schneeakkumulation und -umverlagerung. Als drittes wird die potentielle direkte Sonneneinstrahlung genannt. Bei Anderton et al. (2004) geht es um den Effekt, den Hangneigung, Exposition sowie Beschattung durch entfernte Topografie

auf die Strahlung haben und diese wiederum auf den Schnee. Als letztes wird der Einflussfaktor der Windexposition aufgeführt. Für diesen Index gehen sehr kleinräumige Faktoren in die Berechnung mit ein, die nicht auf ein 1 km^2 -Raster übertragen werden können. Als Ergebnis stellte sich heraus, dass die Schneehöhe und der Tag des Schneerückgangs stark beeinflusst sind von den Geländecharakteristika, sowie, dass eine starke topografische Abhängigkeit der Schneeverlagerung beim Wind liegt. Abschließend wurde eine binäre Regressionsbaummodellierung durchgeführt, die sich als einfache und effektive Methode herausstellte, um die Verbindungen zwischen Schneeverteilung und Geländevariablen zu bestimmen.

Neben den topografischen Einflussfaktoren sind auch die Einflüsse von meteorologischen Parametern nicht zu vernachlässigen. Nach Dutra et al. (2011) sind bei verschiedenen Antriebsdatensätzen für Modelle beim Parameter Niederschlag die größten Unterschiede zu erwarten. Besonders ausgeprägt zeigt sich dieser Effekt in komplexem Gelände. Hydrologische Modelle sind stark vom Niederschlags-Input beeinflusst, sodass der Niederschlag einen wichtigen Faktor bei der Validierung darstellt. Bei Carrera et al. (2010) hat sich gezeigt, dass der Niederschlag in hohen Lagen einen ausgeprägteren Einfluss auf das SWE zeigt als die Temperatur. In niedrigen Lagen wird hingegen die Temperatur wichtiger bei der Erklärung von SWE-Trends.

Die Validierung eines flächigen SWE als Modellausgabeparameter mit einem flächigen SWE-Vergleichsprodukt wurde in der Literatur bis dato nicht veröffentlicht. Deshalb stellt diese Arbeit einen wichtigen Beitrag für die räumliche und zeitliche Auswertung des SWE dar.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit war eine Validierung der Schneemodellierung eines großskaligen WHM. Hierzu wurde das WHM Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM) herangezogen. Der Vergleich erfolgte zwischen dem Schneewasseräquivalent des SLF-Produktes (SWE_{SLF}) und dem flächigen, mit LARSIM simulierten Schneewasseräquivalent ($\text{SWE}_{\text{LARSIM}}$). Da ein großskaliger flächenhafter Vergleich von SWE-Ganglinien nicht zu den üblichen Validierungsmethoden gehört, war es Ziel dieser Arbeit, Methoden für die Raum-Zeit Auswertung zu entwickeln. Dabei ging es zum einen um die Identifikation von Gebieten, die zur Über- bzw. Unterschätzung des SWE neigen (Wo liegen Diskrepanzen vor?). Zum anderen ging es darum, zu welchen Zeitpunkten bzw. in welchen Zeitperioden treten verstärkt Abweichungen zwischen den $\text{SWE}_{\text{LARSIM}}$ und dem SWE_{SLF} auf (Wann treten Diskrepanzen auf?). Abschließend sollte die Warum-Frage geklärt werden, indem maßgebliche Einflussfaktoren und Fehlerquellen der Abweichungen identifiziert wurden. Neben der Methodenentwicklung war ein wichtiger und notwendiger Teil dieser Arbeit plausible Input-Datensätze für das Modell zu schaffen, um so eine sinnvolle Auswertung der Ergebnisse überhaupt erst zu ermöglichen.

Das anfängliche Untersuchungsgebiet ist das Rhein-EZG bis Basel. Es hat eine Größe von ca. 36 000 km² und kann in zwei Bereiche untergliedert werden. Zum einen ist dies der Alpenrhein, der mit den Quellflüssen Vorderrhein und Hinterrhein in den Schweizer Alpen (Graubünden) entspringt und in den Bodensee mündet. Der Bodensee stellt ein natürliches Regulierungsbecken dar (Belz et al., 2007). Zum anderen handelt es sich dabei um den Hochrhein, welcher sich vom Bodensee bis zum Pegel Basel erstreckt. In diesem Teilabschnitt mündet auch die Aare. Wenn die Aare in den Rhein mündet, liegen die mittleren Abflüsse der Aare um etwa ein Viertel über denen des Rheins (Belz et al., 2007). Die Aare stellt demnach den wichtigsten Zufluss in diesem Flussabschnitt dar. Der Abfluss am Pegel Basel liegt im Mittel bei ca. 1 000 m³/s (Belz et al., 2007). Obwohl das Rhein-EZG bis Basel, also samt Aare, nur ca. ein Fünftel des gesamten Rhein-EZG beinhaltet, macht dieses Kopfgebiet am Pegel Lobith an der deutsch-niederländischen Grenze fast die Hälfte des Abflusses aus. Die Alpen haben also einen sehr großen Einfluss auf die Wasserführung des Rheins (Belz et al., 2007).

A map of the Swiss drainage basin of the Rhine river. The map shows the Rhine river flowing from the north towards the south, where it meets Lake Constance (Bodensee). The basin is divided into several sub-basins, each labeled with its name: Aargau, Glarus, Ob- und Nidwalden, Uri, Schwyz, Unterwalden, Thurgau, Appenzel A. u. S., Appenzel N. u. W., Valais, Fribourg, Neuchâtel, Jura, and Vaud. The map also shows the borders of Switzerland (Schweiz) and the surrounding countries: Germany (Hochrhein) to the north, France (Alsace) to the west, and Austria (Vorarlberg) to the east. The city of Basel is marked on the Rhine river. A north arrow is located in the top left corner.

Abb. 1.1: Übersichtskarte des Rhein-EZGs bis Basel mit den drei LARSIM mit Modellgebieten.

1.5 Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Das Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM) ist ein WHM, das sowohl in der wasserwirtschaftlichen Praxis als auch im universitären Bereich Anwendung findet (Bremicker, 2000; Ludwig und Bremicker, 2006). Es ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des mesoskaligen landgebundenen Wasserkreislaufes. LARSIM lässt sich als ein deterministisches Konzeptmodell klassifizieren, welches für die flächendetaillierte Anwendung konzipiert wurde (Bremicker, 2000).

Eingangsdaten für WHM (LARSIM) sind einerseits Systemdaten wie Geländehöhen, Landnutzung, Feldkapazität der Böden und Gerinnegeometrien und andererseits meteorologische Zeitreihen. Zusätzlich wird der Abfluss zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse genutzt (Bremicker, 2000; Ludwig und Bremicker, 2006). In Abb. 1.2 ist eine schematische Darstellung des WHM LARSIM dargestellt. Es veranschaulicht die einzelnen Komponenten, die bei der Modellierung mitberechnet werden. Als Eingangsdaten dienen Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung/Sonnenscheindauer, relative Feuchte, Luftdruck und Windgeschwindigkeit. In LARSIM werden wesentliche Teilprozesse des Wasserhaushaltes mit deterministischen Modellansätzen beschrieben (Bremicker, 2000): Interzeption, Evapotranspiration, Schneeakkumulation, -kompaktion, -schmelze, Bodenwasserspeicherung, Speicherung und lateraler Wassertransport in der Fläche sowie die Translation und Retention in Gerinnen und Seen. Zusätzliche Verfahren dienen zur Korrektur und Umrechnung meteorologischer Messgrößen. Die Interzeption, Evapotranspiration, Schnee und der Bodenwasserspeicher werden jeweils für jede Landnutzungs-kategorie einzeln modelliert. Eine ausführliche Beschreibung von LARSIM ist u.a. in Bremicker (2000) sowie in Ludwig und Bremicker (2006) zu finden.

1.5.1 Schneemodellierung

Bei der Wasserhaushaltsmodellierung ist die Wasserspeicherung in der Schneedecke als wichtige Einflussgröße nicht zu vernachlässigen (Bremicker, 2000). Im Folgenden werden die verschiedenen Möglichkeiten der Schneemodellierung und diesbezügliche Besonderheiten in LARSIM aufgeführt.

Die Modellierung des Schneespeichers wird in LARSIM für jede Landnutzung eines Teil-EZGs getrennt in Teilprozessen berechnet. Diese Prozesse sind nach Bremicker (2000):

- Akkumulation von Schnee
- potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr
- Setzung (Kompaktion) der Schneedecke als Folge des zunehmenden Anteils von flüssigem Wasser
- aktuelle Schneeschmelze in Abhängigkeit vom Anteil des flüssigen Wassers innerhalb der Schneedecke

Die Sublimation wird in LARSIM nicht modelliert, obwohl sie unter speziellen meteorologischen Bedingungen einen nicht unbedeutenden Einfluss auf den Wasserhaushalt einer Schneedecke haben kann (Bremicker, 2000). Bei hiesigen Regionen und längeren Zeiträumen ist die Schneeverdunstung für die Wasserbilanz von untergeordneter Bedeutung (DVWK, 1996). Sollte die

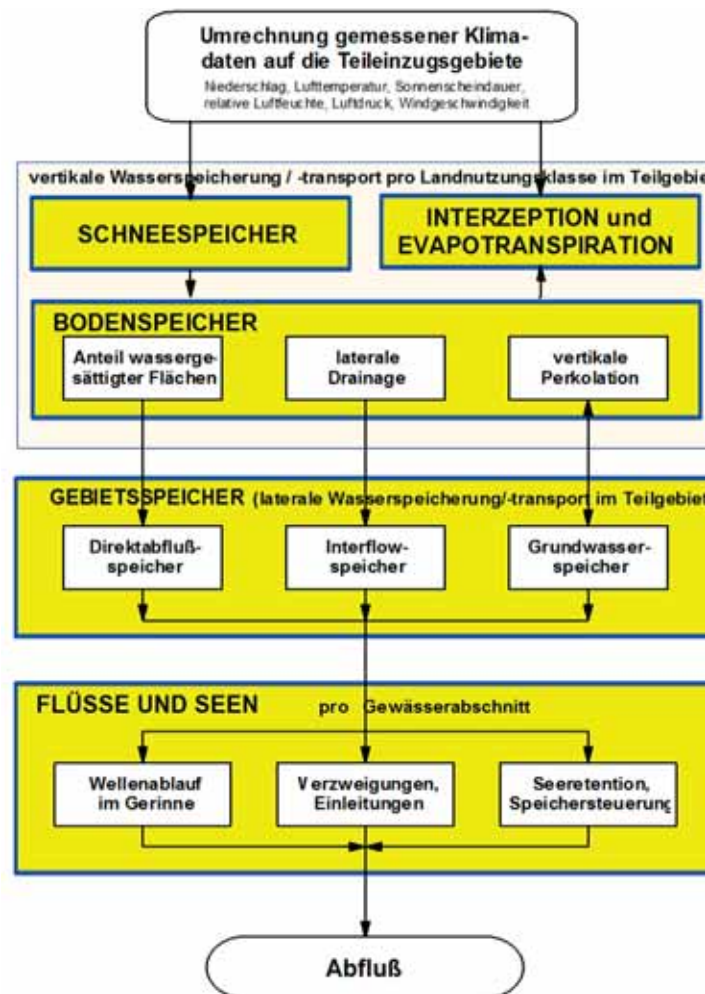


Abb. 1.2: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM (Bremicker, 2000)

Schneeverdunstung in LARSIM jedoch implementiert werden, scheint das Hauptproblem vor allem die Datenlage und die messtechnische Erfassung des Schneeniederschlags zu sein.

Bei der Akkumulation von Schnee ist die Unterscheidung, ob fester oder flüssiger Niederschlag im Teilgebiet fällt, von zentraler Bedeutung. Nach SFB81 (1980) (Haag und Bremicker, 2013) wird in LARSIM ein Modell verwendet, das diese Unterscheidung abhängig von der Grenztemperatur (T_{Grenz}) in °C und der bodennahen Lufttemperatur (T_{Luft}) in °C, gemessen 2 m über Grund, fällt. Nach Bremicker (2000) wird die Form des Niederschlags definiert als:

$$\begin{aligned} \text{Schneeniederschlag für } T_{Luft} &\leq T_{Grenz} \\ \text{Regenniederschlag für } T_{Luft} &> T_{Grenz} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Da die bodennahen Luftschichten nicht den Temperaturen in den höheren Luftschichten entsprechen müssen, ist diese bodennahe Temperatur ein ungenauer Indikator für festen bzw. flüssigen Niederschlag (Bremicker et al., 2013). Da aber keine Messwerte der höheren Luftschichten vorhanden sind, muss diese Lufttemperatur verwendet werden.

Durch T_{Grenz} als Kalibriergröße in LARSIM kann diese Abweichung angepasst werden. Eine Variation von -2°C bis $+3^{\circ}\text{C}$ scheint plausibel (Bremicker, 2000). Für mitteleuropäische Gebiete hat eine mittlere T_{Grenz} von $+0,5^{\circ}\text{C}$ gute Ergebnisse erzielt. Die Festlegung erfolgt dabei je

Pegelkontrollbereich (PKB), das heißt ein Untersuchungsbereich bekommt immer die gleiche T_{Grenz} . Der in Abb. 1.3 deutlich sichtbare allmähliche Übergang von Schnee zu Regen wird nicht berücksichtigt (Haag und Bremicker, 2013).

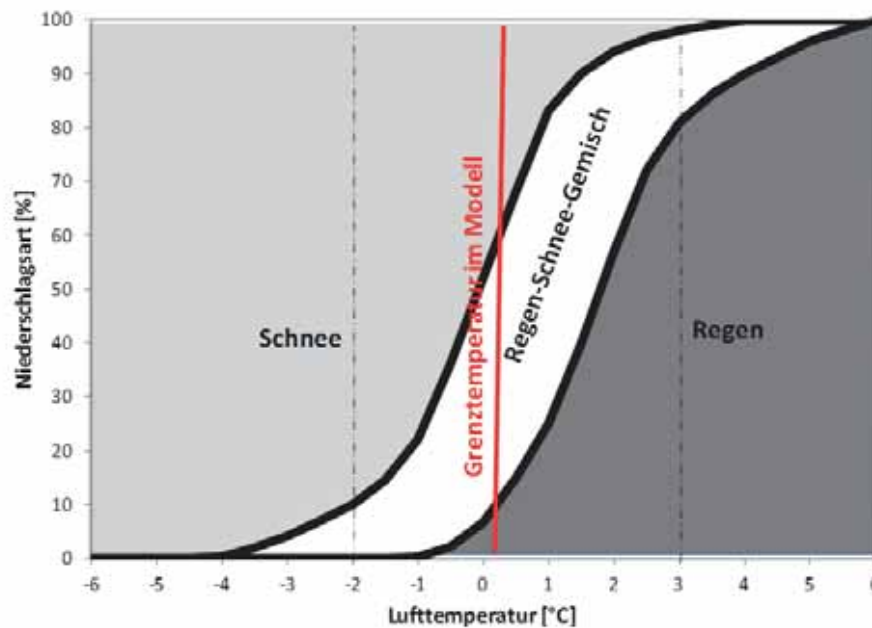


Abb. 1.3: Langjährige Zusammensetzung des Niederschlags aus Regen, Schnee und Regen-Schnee-Gemisch an der Klimastation Hohenpeißenberg in Abhängigkeit der Lufttemperatur (aus SFB81(1980), verändert) und einer beispielhaften Grenztemperatur des Modells (Haag und Bremicker, 2013).

Ist eine Schneedecke aufgebaut, hängt die weitere Entwicklung von der Energiebilanz und der Setzung ab (Tarboton und Luce, 1996). In LARSIM sind unterschiedlich komplexe Verfahren für die Schneesimulation implementiert, welche modular kombiniert werden können. Die Verfahren, sowie die für LARSIM benötigten Parameter sind in Tab. 1.1 aufgeführt.

Die Modellierung der Schneedynamik kann in drei Aspekte unterteilt werden: Akkumulation, Energiebilanz und Setzung mit tatsächlicher Schmelze. Welches Modul für diesen Bereich in LARSIM ausgewählt wird, hängt stark von der Fragestellung, der raum-zeitlichen Auflösung und der Datenlage ab (Haag und Bremicker, 2013). Die Energiebilanzansätze zeigen unterschiedlich starke Vereinfachungen der vollständigen Energiebilanz in einer Schneedecke. Das einfachste Verfahren ist das „Grad-Tag-Verfahren“. Bei der „vollständigen Energiebilanz“ können alle Energieströmen aus Abb. 1.4, eine schematische Darstellung der Schneebilanz in einer Schneedecke, berücksichtigt werden. In Tab. 1.1 sind die Verfahren mit den betrachteten Energieströmen aus Abb. 1.4 sowie den in LARSIM benötigten Parameter aufgeführt. Im Folgenden werden die einzelnen Berechnungsansätze der Energiebilanz sowie die Setzung und Schmelze der Schneedecke kurz erläutert. Eine ausführliche Beschreibung der Ansätze wird in Bremicker et al. (2013) gegeben.

Das Grad-Tag-Verfahren wird aufgrund der Einfachheit häufig bei der Schneesimulation eingesetzt. Die Lufttemperatur ist das alleinige integrale Maß für die Schneesmelze (Haag und Bremicker, 2013). In LARSIM besteht nach Haag und Bremicker (2013) die Möglichkeit, zwischen zwei Optionen zu wählen: Zum einen kann die Energiebilanz über das Grad-Tag-Verfahren

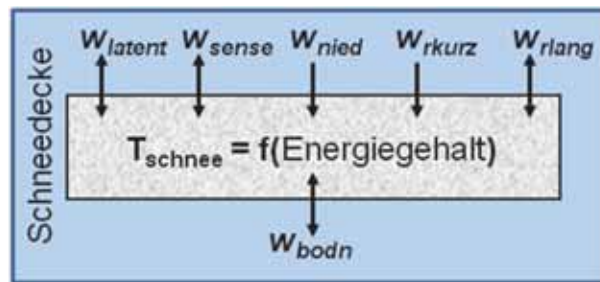


Abb. 1.4: Schematische Darstellung der Energiebilanz einer Schneedecke mit W_{latent} = Strom latenter Wärme, W_{sense} = Strom fühlbarer Wärme, W_{nied} = Energieeintrag durch flüssigen Niederschlag, W_{rkurz} = kurzweilige Strahlungsbilanz, W_{rlang} = langwellige Strahlungsbilanz und W_{bodn} = Bodenwärmestrom (Haag und Bremicker, 2013).

Tab. 1.1: In LARSIM implementierte Energiebilanzmodelle mit ihrer Verwendung der Energieströme sowie der für LARSIM benötigten Parameter.

Energiebilanz	Energieströme	Parameter in LARSIM
Grad-Tag-Verfahren	Lufttemperatur (alleinige integrale Maß)	Lufttemperatur
Knauf vereinfacht	W_{bodn} W_{nied} W_{sense}	Lufttemperatur Niederschlag Windgeschwindigkeit
Knauf erweitert	zusätzlich: W_{latent} W_{rkurz}	zusätzlich: relative Feuchte Globalstrahlung/ Sonnenscheindauer
Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model UEB	gesamte Energiebilanz	wie Knauf erweitert
Vollständige Energiebilanz (mit Zusatzoptionen)	expliziter Berücksichtigung aller Energieströme	wie Knauf erweitert

berechnet werden, und die Setzung und tatsächliche Schmelze anhand des Bertle-Verfahrens bestimmt werden. Zum anderen kann die tatsächliche Schmelze unmittelbar aus dem Grad-Tag-Verfahren bestimmt werden. Die Setzung wird implizit über das Grad-Tag-Verfahren ermittelt. Knauf (1980) erläutert das Berechnungsverfahren der Schneesetzung nach Bertle (1966) unter der expliziten Berücksichtigung der relevanten Setzungsvorgänge wie Kompaktion, Umkristallisation und Retention von flüssigem Wasser.

Das vereinfachte und das erweiterte Knauf-Verfahren basieren auf Knauf (1980), mit Berechnungen des Abflusses aus Schneedecken. Das vereinfachte Knauf-Verfahren betrachtet den W_{bodn} als konstanten Wert. Der Energieeintrag durch flüssigen Niederschlag W_{nied} und den Strom fühlbarer Wärme (W_{sense}) als integrales Maß für alle Austauschvorgänge mit der Atmosphäre gehen mit in die Berechnungen ein (Haag und Bremicker, 2013). Das erweiterte Knauf-Verfahren berücksichtigt explizit den Strom latenter Wärme (W_{latent}) sowie die kurzweilige Strahlungsbilanz

($W_{r\text{kurz}}$). Bei beiden Knauf-Verfahren kann die Setzung der Schneedecke vernachlässigt werden oder das Bertle-Verfahren zur expliziten Berechnung der Setzung verwendet werden (Haag und Bremicker, 2013).

Eine Modifikation des Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB) (Tarboton und Luce, 1996) ist in LARSIM implementiert. Es wird die gesamte Energiebilanz der Schneedecke berücksichtigt.

Der Zustand der Schneedecke wird bei diesem Ansatz ausschließlich auf der Grundlage des Wasseräquivalents und des Energiegehalts bestimmt (Haag und Bremicker, 2013). Aus diesem Grund ist es nicht möglich, dieses Verfahren mit dem Bertle-Verfahren für die Setzung des Schnees zu kombinieren. Die Setzung sowie das Schmelzwasser an der Basis der Schneedecke wird mit einer Rückhaltefunktion und einem vereinfachten Darcy-Ansatz bestimmt (Tarboton und Luce, 1996).

Die in Abb. 1.4 dargestellten Energiebilanz kann in LARSIM unter expliziter Berücksichtigung aller Energieströme berechnet werden. Bei der Wasserbilanz wird aus dem turbulenten Strom latenter Wärme resultierende Sublimation, Verdunstung oder Kondensation an der Schneeoberfläche mitberücksichtigt (Haag und Bremicker, 2013). Es erfolgt eine explizite Berechnung des Energiegehaltes der Schneedecke sowie die resultierende Schneetemperatur und die Rückkopplung mit den Energieströmen. Der Einfluss der Vegetation wird vereinfacht abgebildet. Eine ausführliche Beschreibung der Methode der vollständigen Energiebilanz findet sich in Haag und Bremicker (2013).

1.5.2 Schneemassentransport

Die LARSIM-Option „SCHNEE-MASSENTRANSPORT“ stellt den Massentransport von Schnee und Eis (Schneedrift, Lawinen, Gletscherfließen) in vereinfachter Weise dar (LARSIM-Online-Hilfe, 2013). Damit wird verhindert, dass ein kontinuierlicher, endloser Aufbau der Schneedecke stattfindet. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass Schnee in Abhängigkeit vom Gefälle nur bis zu einem bestimmten Schwellenwert akkumulieren kann. Wird dieser Schwellenwert in einem Element überschritten, wird der den Schwellenwert überschreitende Anteil des Schnees in das nachfolgende Element verfrachtet (LARSIM-Online-Hilfe, 2013). Dieser „überschüssige“ Schnee wird so lange an das nachfolgende Element weitergegeben, bis der Grenzwert nicht mehr überschritten wird.

Der elementspezifische Schwellenwert wird wie folgt berechnet (Bremicker et al., 2013). Das Gefälle dient als Grundlage und wird bestimmt durch:

$$Gef = \frac{HOT - HUT}{TAL} \quad (1.2)$$

mit

Gef	[‰]	Mittleres Gefälle im Teilgebiet (= Rasterelement in LARSIM)
HOT	[m]	Mittlere obere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet
HUT	[m]	Mittlere untere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet
TAL	[km]	Mittlere Fließlänge der Zuflüsse im Teilgebiet

Der gefälleabhängige, elementspezifische Schwellenwert der Schneeakkumulation wird bestimmt als:

$$SW_{transport} = MSW \cdot \left[\frac{100 + SpwPr}{100} - \frac{SpwPr}{50 \cdot (1 + \exp(\gamma \cdot (MGef - Gef)))} \right] \quad (1.3)$$

mit

$SW_{transport}$	[mm]	Elementspezifischer (gefälleabhängiger) Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation
MSW	[mm]	Mittlerer Schwellenwert für die maximale Schneeeakkumulation bei mittlerem Gefälle ($MGef$)
$SpwPr$	[%]	Prozentuale Spannweite des Schwellenwertes bezogen auf MSW
$MGef$	[‰]	Gefälle, bei dem der Schwellenwert gleich MSW ist
γ	[-]	Steigung der Beziehung bei $MGef$

2 Daten

2.1 Datenbeschaffung

Für den Antrieb der Wasserhaushaltsmodelle und die Validierung des Modellergebnisses wurde eine Anzahl verschiedener Daten benötigt. Diese Daten wurden von diversen Datenquellen (Organisationen) angefordert. Alle Daten wurden für das Rhein-EZG bis Basel mit einer zeitlichen Auflösung von Tagen gebraucht. Bei der weiteren Beschreibung wird zwischen Antriebsdaten und Vergleichsdaten unterschieden. Wie unter Abschnitt 1.5 beschrieben, benötigt LARSIM die meteorologischen Parameter Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung/Sonnenscheindauer, Wind und Luftdruck für die Wasserhaushaltsmodellierung. Als Vergleichsdaten können Schnee- und Abflussdaten dienen. In Tab. 2.1 und Tab. 2.2 sind alle Daten und Datenprodukte, die im Laufe dieser Arbeit gesammelt wurden, aufgeführt. In Tab. 2.3 sind die Daten und Datenprodukte aufgeführt die als Antriebsdaten oder Vergleichsdaten aufgeführt, die für das weitere Vorgehen genutzt wurden.

Das gmd-Format für LARSIM

LARSIM benötigt alle Eingangsdaten in einem einheitlichen Format. Dabei steht in LARSIM das gmd-, syn und hmoz-Format zur Auswahl. In dieser Arbeit wurden für die LARSIM-Bearbeitung alle Antriebsdaten in das gmd-Format überführt. Neben den reinen Zeitreihen sind in einer gmd-Datei auch Metadaten gespeichert. Hierzu gehören verschiedenen Stationseigenschaften wie eine vierstellige Stationskennung, der Stationsname sowie die geografische Lage mit Koordinaten und Höhe. Zusätzlich sind eine Abkürzung des hydro-meteorologischen Parameters und dessen Einheit, der Anfangs- und Endzeitpunkt des Zeitintervalls sowie die Intervalllänge (hier: Tageswerte) aufgeführt (LARSIM-Online-Hilfe, 2013). Für diese Arbeit wurden für jeden Parameter und jedes Modellgebiet eine gmd-Datei erstellt, die jene Stationen enthielt, für welche im Zeitraum von 1960 bis 2012 Daten vorlagen.

Tab. 2.1: Antriebsdaten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit gesammelt wurden.

Antriebsdaten	Region	Parameter	Auflösung	Einheit	Zeitraum	Format	Datenquelle
HYRAS Flächenprodukt	Rhein-EZG bis Basel	Niederschlag Version 2.0	1x1 km, Tag	mm	1951-2006	.netcdf	DWD
		Temperatur Version 1.01	"	°C	"	"	"
		Relative Luftfeuchte Version 1.01	"	%	"	"	"
		Niederschlag Version 1.0	"	mm	"	.asc	"
Meteorologische Stationsdaten	Modellgebiet Bodensee/ Hochrhein	Windgeschwindigkeit	Tageswerte	m/s	1960-2012	.xml	DWD
		Sonnenscheindauer	"	h	"	"	WebWerdis
		Luftdruck	"	hPa	"	"	"
		Niederschlag	"	mm	"	"	"
		Mittlere Temperatur	"	°C	"	"	"
		Relative Luftfeuchte	"	%	"	"	"
		Windgeschwindigkeit	"	m/s	1960-2012	.csv	Meteo Schweiz
		Sonnenscheindauer	"	h	"	"	IDAweb
		Globalstrahlung	"	W/m ²	"	"	"
		Luftdruck	"	hPa	"	"	"
Flächenprodukt	Schweiz	Niederschlag	"	mm	"	"	"
		Mittlere Temperatur	"	°C	"	"	"
		Relative Luftfeuchte	"	%	"	"	"
		Temperatur	1x1 km, Tag	°C	1961-2013	.netcdf	Meteo Schweiz
		Niederschlag	"	mm	"	"	"
		Relative Sonnenscheindauer	"	%	1981-2013	"	"
		Globalstrahlung	"	W/m ²	2004-2011	"	"

Tab. 2.2: Vergleichsdaten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit gesammelt wurden.

Vergleichsdaten	Region	Parameter	Auflösung	Einheit	Zeitraum	Format	Datenquelle
Flächenprodukt	Schweiz	SWE	1x1 km; Tag	mm	1998-2012	.asc	SLF
Stationsdaten	Schweiz	Gesamtschneehöhe	Tageswerte	cm	1960-2012	.csv	IDAweb
		Abendmessung (17:40)	„	„	„	„	„
		Morgenmessung (05:40)	„	„	„	„	„
MODIS Flächenprodukt	Bodensee/ Hochrhein	SWE	„	mm	1960-2013	.xml	WebWerdis
		Schneeflächen -verteilung			2000 -2012	.tif	MODIS Web
Pegeldaten	Bodensee	Abfluss	Tageswerte (16 Pegel)	m ³ /s	1961-2003	.gmd	LUBW
	Hochrhein	Abfluss	Stundenwerte (22 Pegel)	„	1996-2012	.syn	„
			Tageswerte (5 Pegel)	m ³ /s	1961-2003	.gmd	„
			Stundenwerte (16 Pegel)	„	1996-2012	.syn	„
	Schweiz	Abfluss	Tageswerte 105 Pegel	m ³ /s	verschieden	.asc	BAFU

Tab. 2.3: Daten und Datenprodukte, welche im Laufe dieser Arbeit für die Auswertung genutzt wurden.

	Region	Parameter	Einheit	Auflösung	Zeitraum	Format	Datenquelle
Antriebsdaten							
HYRAS	gesamtes Untersuchungsgebiet	Temperatur	°C	1x1 km	1951 – 2006	.netcdf	DWD
		Niederschlag	mm	”	”	”	”
Meteorologische Parameter	Bodensee/ Hochrhein	Relative Feuchte	%	”	”	”	”
		Windgeschwindigkeit	m/s	30 Stationen	1960-2012	.xml	WebWerdis
	Schweiz	Sonnenscheindauer	h	37 Stationen	”	”	”
		Luftdruck	hPa	19 Stationen	”	”	”
		Windgeschwindigkeit	m/s	231 Stationen	”	.csv	IDAweb
Vergleichsdaten	Bodensee Hochrhein Schweiz	Globalstrahlung	W/m ²	74 Stationen	”	”	”
		Luftdruck	hPa	165 Stationen	”	”	”
		Abfluss	m ³ /s	22 Pegel	1996-2012	.syn	LUBW
	Schweiz	Abfluss	”	16 Pegel	”	”	”
		Abfluss	”	105 Pegel	verschieden	.asc	BAFU
SWE-Produkt	Schweiz	SWE-Karten	mm	1x1 km	1998 – 2013	.asc	SLF

2.1.1 Antriebsdaten für LARSIM

Die unterschiedlichen Datenquellen (Deutschland, Schweiz) lieferten, wie leider zu erwarten, Daten in verschiedenen Formaten. Als Hauptdatenquelle für die meteorologischen Stationsdaten in der Schweiz diente das Datenportal der MeteoSchweiz für Lehre und Forschung (IDAweb) und das Dependance in Deutschland „Web-based Weather Request and Distribution System“ (WebWerdis). Als flächenhafte Eingangsdaten dienten die HYRAS-Daten vom Deutscher Wetter Dienst (DWD), die das gesamte Untersuchungsgebiet abdeckten. Im Folgenden sind, nach Datenquellen sortiert, die Antriebsdaten für LARSIM und deren Aufbereitung beschrieben.

HYRAS-Daten

Die Hauptantriebsdaten Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte lagen als Rasterdaten in 1x1 km Auflösung für das gesamte Untersuchungsgebiet vor. Es handelt sich um sogenannte HYRAS-Daten, die vom DWD als Datenprodukt erzeugt wurden (siehe auch Rauth et al. (2013)). Die drei Modellgebiete sind hierbei mit einem 1x1 km Raster als Tagesdaten für den Zeitraum von 1951 bis 2006 komplett abgedeckt. Bei der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte wurde die neueste Version der HYRAS-Daten (Versionsnummer 1.01) verwendet, welche im Weiteren als „neue HYRAS-Daten“ bezeichnet werden. Beim Niederschlag wurden die „alten HYRAS-Daten“ mit der Versionsnummer 1.0 und nicht die „neuen“ mit der Nummer 2.0 verwendet. Beim Niederschlag wurde das alte Datenprodukt verwendet, da es beim neuen Datenprodukt zum Teil zu großen Abweichungen beim Vergleich von alten und neuen Monatsmittelwerten gekommen war. Da es jedoch nicht Teil dieser Arbeit war, eine genaue Prüfung z.B. mit Stationsdaten durchzuführen, musste man sich für eine Variante entscheiden. Die alten HYDRAS-Daten wurden in der Vergangenheit bei vielen Projekten der HYDRON GmbH genutzt und haben dort mit LARSIM zu plausiblen Ergebnissen geführt. Bei der Lufttemperatur konnten keine Abweichungen festgestellt werden, weshalb die neuen HYRAS-Temperaturdaten verwendet wurden. Die relative Luftfeuchte lag in der 1x1 km Auflösung nur als neue HYRAS-Daten vor. Da die relative Luftfeuchte aber auf eine ähnliche Weise wie die Lufttemperatur erzeugt wurde, wurden die Daten als entsprechend plausibel wie die Lufttemperaturdaten eingeschätzt.

Bei den HYRAS-Niederschlagsdaten ist zusätzlich noch zu beachten, dass keine Korrektur des systematischen Fehlers erfolgte (HYRAS-Zwischenbericht, 2010). Dieser systematische Fehler wird bei der Niederschlagsmessung vor allem durch Wind und Verdunstung beeinflusst. Nach Sevruck (1982) kann der Fehler bis zu 10 % betragen. Bei der Tagesmitteltemperatur ist laut HYRAS-Zwischenbericht (2010) zu beachten, dass über das großflächige Gesamtgebiet und durch länderabhängig unterschiedliche Aufzeichnungsintervalle nicht immer länderabhängigen unterschiedlichen Aufzeichnungsintervalle nicht immer das gleiche Mittel benutzt wurde. An einigen Stationen ergibt sich das Tagesmittel aus der maximalen und minimalen Temperatur. An anderen Stationen wird der Mittelwert aus den drei Beobachtungszeitpunkten (7, 14 und 21 Uhr) gebildet. Die daraus entstehenden Abweichungen der Tagesmittel werden laut dem HYRAS-Zwischenbericht (2010) bei den HYRAS-Daten nicht beachtet.

Da die HYRAS-Daten für die gesamte Bundesrepublik sowie großer Flussgebiete, wie z.B. den

Rhein vorlagen, empfahl es sich, einen räumlichen Ausschnitt zu definieren und diese anschließend zu verwenden. Die alten HYRAS Niederschlagsdaten verwendet wurden, lagen im asc-Format vor. Es wurden räumliche Ausschnitte für die drei Modellgebiete (Schweiz, Bodensee und Hochrhein) erstellt und die angepassten Dateien in das gmd-Format überführt. Für das Ausschneiden und das Umwandeln des Formates wurden von der HYDRON GmbH eigens erstellte Fortranprogramme hintereinander ausgeführt. Der erste Schritt war die Erstellung von Koordinatendateien mit Hilfe von ArcGIS für die drei Modellgebiete. Anschließend wurde das Fortranprogramm „regnie2csvvar“ für die Umwandlung des asc-Format in ein csv-Format genutzt. Da die Zwischenprodukte sehr groß waren, wurden die Umwandlungsschritte in Fünfjahresblöcken durchgeführt. Der nächste Schritt erfolgte über das Fortranprogramm „csv2gmd“, das die csv-Datei in eine für LARSIM lesbare gmd-Datei umwandelt. Anschließend wurden die Stationsnamen mit Hilfe des Fortranprogrammes „gmdstatnamrepl“ angepasst. Nach dem Durchlaufen dieser Programme wurde eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Hierzu wurden u.a. mit Hilfe des Fortranprogrammes „gmdmitteln2list“ Mittelwerte erstellt und diese in ArcGIS visualisiert. Die neuen HYRAS-Daten lagen im netcdf-Format vor. Das Umwandeln dieses Formates in das gmd-Format wurde von der HYDRON GmbH übernommen. Der so bereitgestellte Ausschnitt umfasste die drei Modellgebiete inklusive eines 6 km Puffer. Anschließend wurde für jedes der drei Modellgebiete ein räumlicher Ausschnitt erstellt.

Modellgebiet WHM Schweiz (IDAweb)

Die Parameter Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer und Luftdruck wurden über IDAweb vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz (Meteo Schweiz) für den Zeitraum von 1960 bis 2012 als Tageswerte heruntergeladen (Zugriff Mai bis Juni 2013). Diese sind in Tab. 2.1 aufgeführt. Zusätzlich wurden die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte heruntergeladen. Die zweite Datengruppe (HYRAS-Parameter) wurde jedoch aufgrund der vorhandenen HYRAS-Daten bei der weiteren Bearbeitung nicht verwendet. Die Anzahl der Stationen (Tab. 2.3) sowie die Zeiträume waren bei den einzelnen Parametern sehr unterschiedlich.

Da der Untersuchungszeitraum im Laufe der Arbeit aufgrund der Datenverfügbarkeit auf die Jahre 1998 bis 2006 festgelegt wurde (siehe Abschnitt 2.3.3), konnte die Globalstrahlung für die Modellierung mit LARSIM verwendet werden. Eine Einbeziehung der Sonnenscheindauer war nicht notwendig, da für diesen Zeitraum keine wichtigen zusätzlichen Bereiche abgedeckt werden konnten.

Die Daten von IDAweb wurden als csv-Dateien heruntergeladen. Sie entsprachen jedoch nicht dem Standard-csv-Format, wo alle Messstationen nebeneinander aufgeführt waren. Stattdessen sind diese Stationsdaten blockweise untereinander gruppiert. Deshalb wurde für jeden Parameter ein neues Python-Skript geschrieben, dass alle Stationsdaten parameterweise in das gmd-Format überführte.

Modellgebiet WHM Bodensee und WHM Hochrhein (WebWerdis)

Über WebWerdis des DWDs wurden die meteorologischen Stationsdaten der Modellgebiete Bodensee und Hochrhein heruntergeladen (Zugriff Mai bis Juni 2013). Wie schon für die Schweiz wurden die Parameter Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Luftdruck sowie zusätzlich Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte heruntergeladen. Die drei zuletzt genannten Parameter wurden in diesen Gebieten auch über die flächigen HYRAS-Daten abgedeckt. Da keine Globalstrahlungsdaten vorlagen, wurde die Sonnenscheindauer genutzt. Die Anzahl der Stationen sind in Tab. 2.3 aufgeführt.

Die WebWerdis-Daten lagen alle im xml-Format vor. Unter Mithilfe der HYDRON GmbH wurde ein Python-Skript erstellt, um dieses Format in das für LARSIM benötigte gmd-Format zu überführen. Nach Einsatz dieses Python-Skriptes lagen die Parameter Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Luftdruck für den Einsatz in LARSIM in einzelnen gmd-Dateien vor.

Anpassung der Koordinatensysteme

Bei der Bearbeitung der verschiedenen Datenquellen war die Beachtung des jeweiligen Koordinatensystems und gegebenenfalls dessen Umprojektion sehr wichtig. Die Daten vom Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz (Meteo Schweiz) wurden im Schweizer Koordinatensystem „CH 1903“ bereitgestellt. Das LARSIM-WHM Schweiz arbeitet ebenfalls im „CH 1903“-Koordinatensystem, sodass es nötig war, die HYRAS-Daten für dieses Gebiet umzuprojizieren. Die Umprojektion erfolge mit dem von der HYDRON GmbH zur Verfügung gestellten Fortranprogramm „gmd_koordchange“. In LARSIM werden die Koordinaten in der Einheit [km] angegeben, sodass hier bei den Antriebsdaten für LARSIM an vielen Stellen eine Anpassung nötig war. Die WHM Bodensee und Hochrhein arbeiten mit dem Gauß-Krüger-Koordinatensystem in Zone 3 (GK3). Auch hier erfolgte eine Anpassung aller Antriebsdaten an GK3 in die Einheit [km].

2.1.2 Vergleichsdaten

Als Vergleichsdaten lagen unterschiedliche Schnee- und Abflussdaten vor. Das Hauptaugenmerk der Arbeit lag auf dem flächenhaften Vergleich des SWE. Hierfür wurde das flächenhafte Datenprodukt des SLFs zur Verfügung gestellt, das die SWE für die gesamte Schweiz in einem 1x1 km Raster abdeckt. Neben diesem SLF-Produkt lagen auch Stationsdaten vor. Für den Bereich Bodensee und Hochrhein wurden über WebWerdis SWE-Daten heruntergeladen. Auch diese wurden von einem HYDRON-Mitarbeiter vom xml-Format in das gmd-Format überführt. Bei der IDAweb-Plattform lagen keine täglichen SWE-Daten vor, weshalb hier auf die Schneehöhen zurückgegriffen wurde. Die täglichen Schneehöhen lagen, wie alle Daten von IDAweb, als csv-Datei vor und wurden mit Hilfe eines angepassten Python-Skripts in das gmd-Format überführt.

Neben den Schneedaten lagen auch Abflussdaten verschiedener Pegel vor. Für die Schweiz wurden Daten von 105 Pegeln für den Untersuchungszeitraum (1998-2006) bereitgestellt. Die Daten wurden als asc-Dateien vom Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) geliefert und mit Hilfe eines neu geschriebenen Python-Skripts in das gmd-Format überführt.

Für die Gebiete Bodensee und Hochrhein wurden Tages- und Stundendaten von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zur Verfügung gestellt. Da die Tagesdaten nur bis 2003 vorlagen, wurden für den nachfolgenden Zeitraum Stundenwerte auf Tageswerte aggregiert. Die Stundenwerte lagen von 1996 bis 2012 vor und wurden für die Validierung der Modelle verwendet. Beim Aggregieren von Stundenwerten im syn-Format zu Tageswerten im gmd-Format wurden die syn-Dateien mit Hilfe des von der HYDRON GmbH bereitgestellten Fortranprogrammes „syn_std2tag“ von Stundenwerte auf Tageswerte zusammengefasst. Anschließend wurde das Fortranprogramm „syn2gmd“ genutzt, um die Daten in das gmd-Format umzuformatieren. Für das WHM Bodensee lagen daraufhin aggregierte Tagesdaten für 22 Pegel über den Zeitraum von 1996 bis 2012 als eine gmd-Datei vor. Für das WHM Hochrhein waren es 16 Pegel über den selben Zeitraum.

Das Datenprodukt vom SLF

Die SWE-Karten, die vom SLF erstellt wurden, zeigen eine Abschätzung der Verteilung der Schneewasserressourcen in der Schweiz. Die Datenbasis bildeten Daten von Messfeldern und Stationen im flachen Gelände, wobei für den nachfolgenden Zeitraum Daten von 170 Stationen verwendet wurden. Die Karten zeigen Flachfeldreferenzwerte, also das SWE, das an einer flachen Stelle, gemittelt auf 1x1 km, gemessen wurde. Da die SWE-Karten auf Stationsdaten basieren, beziehen sie sich nur auf unbewaldete Flächen, die frei von störenden Einflüssen sind. Das heißt, die Landnutzung, .Landnutzung, wie Wald- oder auch Wasserflächen, werden nicht mit in die Berechnung einbezogen. Überspitzt könnte gesagt werden, die ganze Schweiz ist eine große Wiese, die aus 1x1 km flachen Rasterzellen besteht.

Im ersten Arbeitsschritt des SWE-Mappings werden Schneehöhen mit Hilfe eines Schneedichtemodells in SWE umgerechnet. Über die mittlere Dichte der Schneedecke sind das SWE und die Schneehöhe verknüpft als:

$$SWE = \text{Schneehöhe} \cdot \text{mittlere Dichte der Schneedecke} \quad (2.1)$$

(Jonas et al., 2009) haben gezeigt, dass bei der Auswertung von über 10 000 einzeln gemessenen Schneeprofilen der Schweizer Alpen hatte sich gezeigt, dass die Korrelation zwischen Schneehöhe und SWE relativ hoch war. Die Dichte lässt sich jedoch nicht so leicht ableiten, da offenbar auch andere Faktoren eine entscheidende Rolle spielten. Das hier für die SWE-Berechnung genutzte spezielle Schneedichtemodell ist in Jonas et al. (2009) ausführlich beschrieben.

Nach der Berechnung des SWE mit dem Schneedichtemodell wurden die Daten mit einem speziell für Schneedaten entwickelten Verfahren auf ein 1x1 km Raster interpoliert. Dabei wurde regional ein Höhentrend berechnet, das heißt, es wurde regional analysiert, wie das SWE über die verschiedenen Höhen verteilt war. Anhand von umliegenden Stationen wurde für jedes Kartenpixel errechnet, wie groß die wahrscheinlichste lokale Abweichung vom regionalen Höhentrend war.

2.2 Datenplausibilisierung

Wie in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, wurden die Antriebsdaten in das für LARSIM lesbare gmd-Format überführt. Anschließend wurden die Daten mithilfe eines gmd-Viewers begutachtet. Die einzelnen Stationen wurden jeweils visuell auf mögliche Ausreißer, Trends oder Datensprünge hin untersucht. Fehlerhafte Stationen wurden komplett herausgenommen oder einzelne Zeitpunkte bzw. Zeiträume auf Fehlwerte gesetzt. Fehlerhafte Stationen waren zum Beispiel jene mit physikalisch unplausiblen Werten. Bei anderen zeigten sich starke Sprünge im zeitlichen Verlauf, die z.B. auf Erneuerungen von Messgeräten zurückgeführt werden können. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Globalstrahlung. Diese Station wurde aufgrund der gut sichtbaren Veränderungen der Maxima und der unplausiblen Werte von Mitte 1994 bis Mitte 1995 nicht in die Modellierung einbezogen. In Tab. 2.4 ist aufgeführt, wie viele Stationen bei jedem einzelnen Parameter korrigiert wurden. Die Anzahl der Korrekturen zeigt, dass eine Plausibilisierung notwendig war, um so einen belastbaren und realitätsnahen Datensatz für die Modellierung einsetzen zu können. Ohne solch einen plausiblen Datensatz wären die nachfolgenden Auswertungen nicht aussagekräftig.

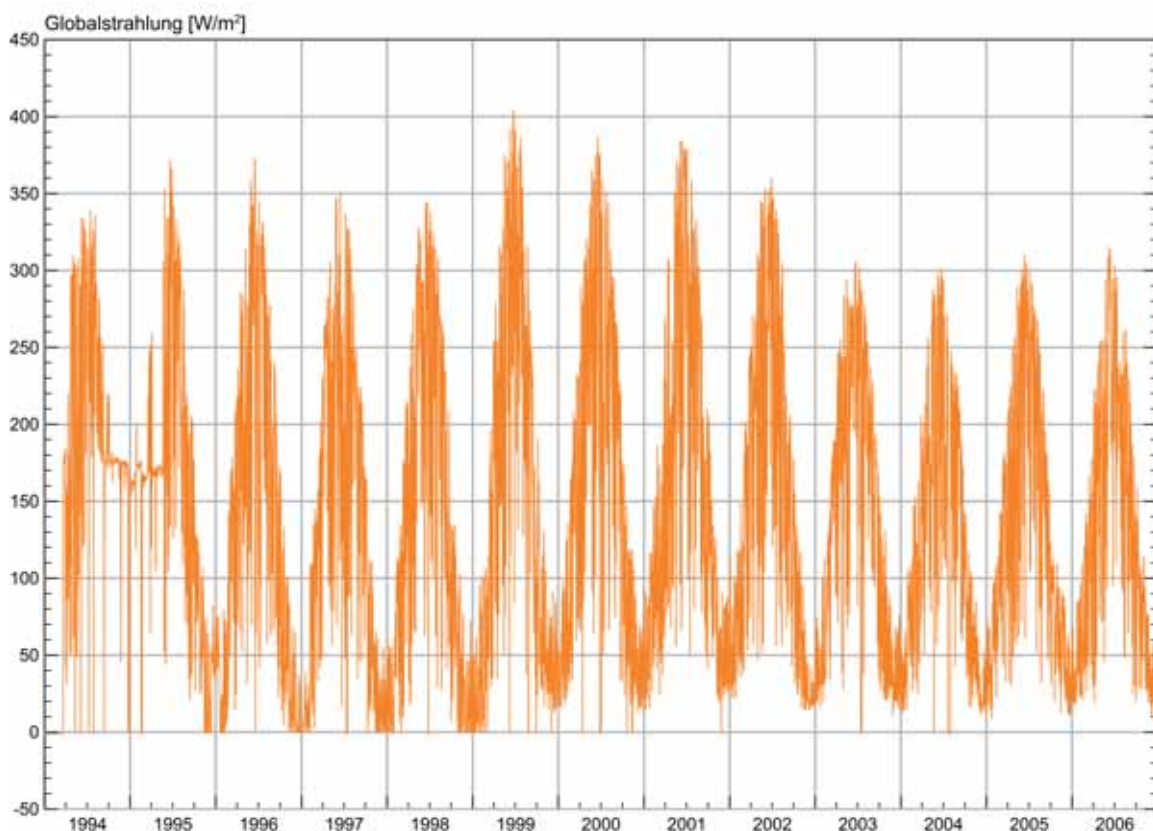


Abb. 2.1: Globalstrahlung an der Messstation Method für die Jahre von 1994 bis 2006.

Tab. 2.4: Angaben über die Stationsanzahl der einzelnen meteorologischen Parameter für den Zeitraum von 1960 bis 2012 sowie die Angaben über korrigierte und herausgenommene Stationen

Stationsdaten	Stations- anzahl	korrigierte Stationen	herausgenommene Stationen	Stationsanzahl nach Korrektur
Schweiz				
Globalstrahlung	74	1	1	73
Sonnenscheindauer	120	9	11	109
Luftdruck	165	9	4	161
Wind	231	66	23	208
Abfluss	105	6	0	105
Bodensee & Hochrhein				
Sonnenscheindauer	37	1	4	33
Luftdruck	19	0	2	17
Wind	30	1	2	28
Abfluss	38	0	0	38

2.3 Vergleich der Raster - räumliche und zeitliche Übereinstimmung

2.3.1 Anpassung der Raster von LARSIM und SLF

Bei dem Vergleich der Raster von LARSIM und dem SLF-Produkt zeigte sich ein räumlicher Versatz von 500 m und zwar sowohl in Nord-Süd als auch West-Ost-Richtung. Das heißt, der Mittelpunkt einer LARSIM-Rasterzelle entsprach exakt dem Eckpunkt einer SLF-Rasterzelle. Ein direkter Vergleich war somit nicht möglich. Da mehrere LARSIM-Läufe durchgeführt wurden, wurde das SLF-Raster an das LARSIM-Raster angepasst. Dazu wurde jedes der 1x1 km Rasterelemente geometrisch geviertelt. Anschließend wurden jeweils vier Viertel wieder zu einer neuen SLF-1-km²-Rasterzelle zusammengefügt und zwar derart, dass eine perfekte Übereinstimmung mit den LARSIM-Rasterzellen entstand. Diese neuen SWE-Rasterelemente wurden für die weitere Auswertung genutzt und im Folgenden mit SLF-Daten angesprochen.

Die geometrische Anpassung wurde mithilfe von Programmen aus dem operationellen Hochwasservorhersagebetrieb des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz LUWG durchgeführt. Um die Programme nutzen zu können, wurden die asc-Dateien des SLFs in binär-Dateien umgewandelt und mithilfe von „Bigie.exe“ (Binäre Gebietsmittelrechnerin) auf das Zielraster (= LARSIM-Raster) zugeschnitten. Anschließend wurden mit „N_Gebiete.exe“ (Niederschlagsgebiete) über die so erstellte Gebietsdatei die neuen Daten für jedes Rasterelement flächengewichtet berechnet. Die Ausgabe erfolgte im hmf-Listen-Format, die für jedes Rasterelement eine neu berechnete Zeitreihe beinhaltete. Diese Listen wurde in Python eingelesen und für die weitere Verarbeitung vorbereitet.

Für die Überprüfung, welche Auswirkungen diese Verteilung haben könnte, wurden die Höhen aus LARSIM mit den „bigiesierten“ (neu zusammengesetzte Höhen aus den Vierteln) Höhen des SLF-Produktes verglichen.

Die mittlere Höhe der Elemente wird in LARSIM bestimmt als

$$Höhe_{LARSIM} = \frac{HOT + HUT}{2} \quad (2.2)$$

mit

$Höhe_{LARSIM}$	[m]	Mittlere Höhe des Teilgebiets (= Rasterelement in LARSIM)
HOT	[m]	Mittlere obere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet
HUT	[m]	Mittlere untere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet

Differenz der Höhe der beiden Raster wird dann berechnet als

$$DIF_{Höhe} = Höhe_{LARSIM} - Höhe_{SLF(bigie)} \quad (2.3)$$

mit

$DIF_{Höhe}$	[m]	Differenz der mittleren Höhen der Rasterelemente
$Höhe_{SLF(bigie)}$	[m]	Neu zusammengesetzte Höhen des SLF-Produkts

Die maximale Differenz, also die Abweichung der Höhe aus LARSIM nach oben lag bei 363 m, die nach unten bei -275 m. Die mittlere Abweichung der beiden Höhenraster betrug 12 m. In Abb. 2.2 sind die Differenzen der Höhen, die nach Gl. (2.3) berechnet wurden, aufgeführt. Es zeigten sich keine Bereiche, in denen die Differenzen besonders ausgeprägt sind. Die Bereiche der höheren Lagen zeigten zum Teil stärkere Differenzen als das tiefer gelegene Mittelland. Um diesen möglichen Fehler nicht zu vernachlässigen, wurde der Faktor $DIF_{Höhe}$ bei weiteren Auswertungen mit untersucht.

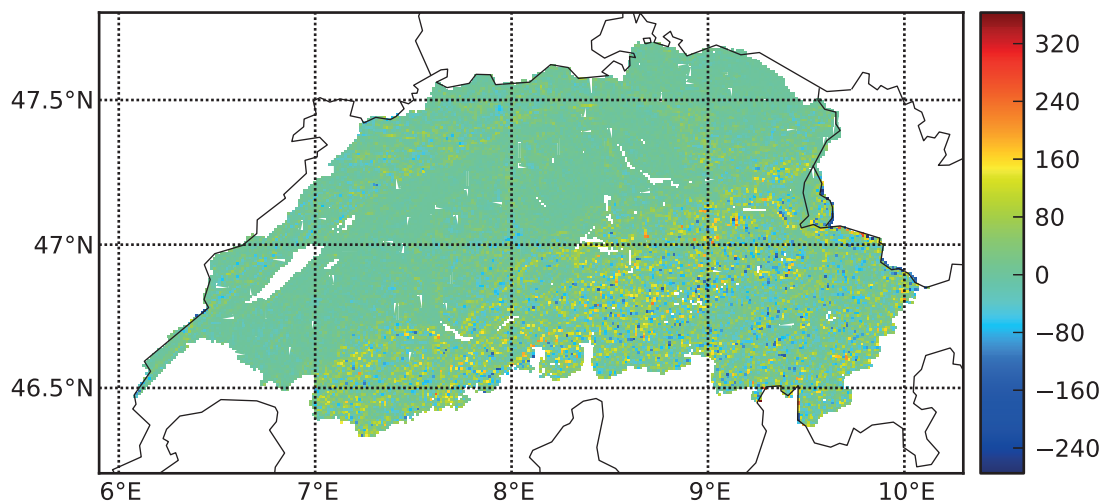


Abb. 2.2: Differenz der Höhen zwischen LARSIM und dem neuen Raster des SLF-Produktes.

2.3.2 Räumliche Übereinstimmung

Nachdem das SLF-Raster angepasst wurde, konnte eine räumliche Verschneidung erstellt werden. Räumlich deckt LARSIM das Rhein-EZG bis Basel mit den drei Modellen WHM Schweiz, WHM

Bodensee und WHM Hochrhein in einem 1x1 km Raster ab. Die flächigen Vergleichsdaten vom SLF lagen für die gesamte Schweiz im 1x1 km Raster vor, nicht aber für die anderen Teile des Rhein-EZG. Es konnten also nur die Rasterelemente bei dem flächigen Vergleich genutzt werden, die Teil der Schnittmenge des SLF-Produktes (29 737 km²) und des LARSIM WHM (29 448 km²) waren. Die Auswahl für den Vergleich wurde mithilfe von ArcGIS getroffen. Die Anpassung der Datensätze von LARSIM und dem SLF-Produkt wurde in Python umgesetzt. Die übereinstimmende Fläche hatte eine Größe von 27 273 km² und wird im Folgenden als Untersuchungsgebiet bezeichnet.

2.3.3 Zeitliche Übereinstimmung

Neben der räumlichen Übereinstimmung ist auch die zeitliche Übereinstimmung für die nachfolgenden Vergleiche zu gewährleisten. Aus der zeitlichen Übereinstimmung der Antriebs- und Vergleichsdaten ergibt sich der Untersuchungszeitraum, der eine Auswertung in dieser Arbeit ermöglichte. Die Antriebsdaten für LARSIM lagen meist vom 01.01.1960 bis zum 31.12.2012 vor, wobei die HYRAS-Daten sogar schon am 01.01.1951 begannen. Die HYRAS-Daten lagen jedoch nur bis zum 31.12.2006 vor, was zu einer zeitlichen oberen Beschränkung führte. Die Daten vom SLF lagen immer nur für die Schneeperiode vor, das heißt es waren für jede Winterperiode Daten vom 01.11. bis 15.06. des Folgejahres vorhanden. Sie begannen am 01.11.1998, der unteren zeitlichen Grenze.

Für alle Analysen wurden deshalb die Daten vom 01.11.1998 bis zum 15.06.2006 verwendet. Dabei ist zu bemerken, dass wegen der Sommerlücke beim SLF-Produkt stets 4,5 Monate im Sommer wegfallen. Insgesamt lagen so, 1818 Tage zum Vergleich vor, für die alle Antriebsdaten sowie flächige Vergleichsdaten vorhanden waren. Die flächigen SWE-Daten aus LARSIM und die SWE-Karten der SLFs wurden so verkürzt, dass beide Zeitreihen die gleiche Länge aufwiesen und so eine Vergleichbarkeit ermöglicht wurde.

2.4 Modelleinstellungen

Da für die weitere Auswertung nur der Schweizer Teil des Rhein-EZGs genutzt wurde (siehe Abschnitt 2.3.2), wurden die WHM Bodensee und Hochrhein nur für die korrekte Modellierung des Abflusses benötigt. Die beiden WHM gaben über eine Ausgabefunktion in LARSIM den Abfluss am jeweiligen Modellgebietsauslass an das WHM Schweiz weiter. Deshalb erfolgte die Modellvalidierung anhand von Pegeldaten für alle drei WHM. Zu beachten ist noch, dass keine Korrektur des Niederschlagsfehlers durchgeführt wurde.

Die Einstellung der Schneemodellierung waren bei dem WHM Bodensee und dem WHM Hochrhein sehr viel älter als die im WHM Schweiz. Es wurden folgende Methoden gewählt (ausführliche Erklärungen der Optionen in LARSIM-Online-Hilfe (2013)):

- SCHNEE: KNAUF, VEREINFACHT
- SNOW-COMPACTON 2 (Bertle Verfahren)

Da im weiteren Verlauf der Arbeit die SWE der Modellgebiete von Bodensee und Hochrhein nicht auf Schnee analysiert wurden, musste hier keine Anpassung an neuere Schneeooptionen

in LARSIM erfolgen. Die beiden Modelle hatten lediglich den Abfluss an das WHM Schweiz weitergegeben und so eine plausible Validierung der Abflüsse ermöglicht.

Beim WHM Schweiz waren folgende LARSIM-Optionen der Schneemodellierung aktiv (ausführliche Erklärungen der Optionen in LARSIM-Online-Hilfe (2013)):

- SCHNEE: KNAUF, 2006 (Vollständige Energie Bilanz)
- SNOW-COMPACTION 2 (Bertle Verfahren)
- EINGABE KNAUF-PARAMETER
- BODENTEMPERATUR
- SCHNEE-MASSENTRANSPORT

Für notwendigen Parameter für die Option des Schneemassentransports waren gesetzt mit:

<i>MSW</i>	1500 mm
<i>SpwPr</i>	50 %
<i>MGef</i>	100 %
γ	0.005

Aufgrund des relativ großen Gebiets des WHM Schweiz war es nur möglich, eine im akzeptablen Zeitrahmen lauffähige LARSIM-Version für ein Jahr zu erzeugen. Um LARSIM-Läufe für alle acht Jahre sowie die zwei Einschwingjahre zu ermöglichen, wurden deshalb die einzelnen Jahre über einen Batchbefehl nacheinander aufgerufen. Die optimierte Laufzeit eines LARSIM-Laufes für ein Jahr betrug etwa 100 Minuten. So lag die Laufzeit des gesamten Untersuchungszeitraumes bei etwas weniger als 17 Stunden. Die Ausgabedateien der einzelnen Läufe wurden zusammengefasst und mit Hilfe des Fortranprogrammes „gmd_kombi“ zu einer einzigen Zeitreihe für jedes Element in der gmd-Datei zusammengefügt. Da durch die große Datenmenge die Kapazitäten von Python erreicht wurde, war eine schrittweise Weiterbearbeitung notwendig. Als erstes wurde die LARSIM- Ausgabedatei mit einem neu geschriebenen Python-Skript auf das SWE, bzw. in LARSIM auf den Parameter „Wasseräquivalent der Schneedecke“ in mm/Zeitschritt (Summe aus fester und flüssiger Phase innerhalb der Schneedecke), verkürzt. In einem nächsten Schritt wurde diese gmd-Datei in eine csv-Datei umgewandelt, da diese einfacher einzulesen ist und weniger Arbeitsspeicher benötigt. Die csv-Datei wurde anschließend für die weiter Bearbeitung in Python eingelesen.

Im Laufe dieser Arbeit wurden zwei verschiedene LARSIM-Läufe ausgewertet. Bei dem ersten LARSIM-Lauf wurde mit realer Landnutzung modelliert. Bei dem zweiten LARSIM-Lauf kam es zu einer Anpassung der Landnutzung. Bei allen Elementen, die keine 100 % aus Wasserflächen zeigen, wurde die Landnutzung in LARSIM auf 100 % „Grünland, intensiv“ gesetzt. Diese Anpassung war notwendig, um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} zu gewährleisten (siehe Abschnitt 2.1.2). Da bei dem SLF-Produkt keine unterschiedlichen Landnutzungen beachtet wurden, mussten zudem die Elemente, die in LARSIM mit 100 % Wasserfläche in die Modellierung eingegangen, aus den Auswertungen ausgeschlossen werden. So wurden bei beiden Läufen 363 Elemente entfernt und es standen letztlich 27 380 km², das heißt 27 380 Rasterzellen a 1 km², für den Vergleich zur Verfügung.

3 Methodenentwicklung - Vergleich der flächenhaften SWE-Daten

Bei der Datenauswertung in dieser Arbeit stellte sich nach der Modellvalidierung anhand von Pegel­daten zuerst die Frage, wo und wann es Abweichungen bzw. Übereinstimmungen zwischen den flächig in LARSIM modellierten SWE und dem flächigen SWE-Datenprodukt des SLFs gab. Es handelt sich demnach um eine raum-zeitliche Fragestellung. Bei der zeitlichen Komponente war es wichtig zu berücksichtigen, dass Schnee ein „Gedächtnis“ hat. Hierbei stand die Methodenentwicklung erst einmal im Vordergrund. Im zweiten Schritt sollten dann die Ursachen für etwaige Unterschiede beleuchtet werden. Hierbei wurde mithilfe verschiedener Methoden versucht, Einflussfaktoren zu finden, die Auswirkungen auf die Modellergebnisse zeigten.

3.1 Modellvalidierung anhand von Pegel­daten

Bei der Modellvalidierung war es wichtig, herauszufinden, ob das Modell plausible Ergebnisse lieferte, oder ob eine Nacheichung nötig war. Die Anzahl der validierten Pegel hat sich hauptsächlich nach den im Modell bereits implementierten Pegel gerichtet. Eine Implementierung weiterer Pegeln in das Modell wäre sehr zeitintensiv gewesen und hätte nicht zu einer Verbesserung der Information über die Güte des Modells geführt.

Die Modellvalidierung erfolgte nach dem ersten LARSIM-Lauf mit der realen Landnutzung. Im WHM Schweiz wurden an siebzehn Pegeln die gemessene und die mit LARSIM modellierte Abflussganglinie visuell geprüft. Beim WHM Bodensee wurden fünfzehn Pegel genauso validiert, und beim WHM Hochrhein geschah dies an fünf Pegeln.

Eine integrale Überprüfung der Schneesimulation anhand des Vergleichs zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen. Für zukünftige Arbeiten wäre eine solche Betrachtung als Ergänzung zu einer flächenhaften Auswertung wünschenswert.

3.2 Vergleichbarkeit des SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF}

Um das SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF} vergleichbar zu machen, waren die im Folgenden erläuterten Anpassungen notwendig. Für alle in den nachfolgenden Kapiteln erläuterten Auswertungen, wurden alle Elemente ausgeschlossen, bei denen LARSIM 100% Wasserflächen aufweist (siehe hierzu Abschnitt 2.4). Die Überblicksauswertungen erfolgten sowohl mit dem ersten LARSIM-Lauf mit der realen Landnutzung als auch mit dem zweiten LARSIM-Lauf, in dem alle Landnutzen auf 100 % „Wiese“ gesetzt wurden. Bei allen weiteren Auswertungen wurde, wie schon

in Abschnitt 2.4 erwähnt, ausschließlich der zweite LARSIM-Lauf mit der angepassten Landnutzung („Wiese“) verwendet. Dieser wird für die weitere Auswertungen mit LARSIM und das SWE mit SWE_{LARSIM} angesprochen. Zusätzlich wurden alle Elemente für die Auswertungen ausgeschlossen.

Da einige Elemente des SWE_{LARSIM} sehr hohe und sich nicht verändernde Zeitreihen aufzeigten, wurde für die räumliche und zeitliche Auswertung gemäß Kapitel 3.4 und 3.5 eine weitere Anpassung vorgenommen. Diese Anpassung war physikalisch angemessen, da eine ständige Akkumulation von Schnee nicht realistisch ist. Es kommt immer wieder zu Schneeeumverlagerungen durch Wind und Lawinen. Diese Phänomene waren in LARSIM nicht vollständig implementiert, sondern wurden durch das Modul „Schneemassentransport“ (siehe Abschnitt 1.5.2) vereinfacht beschrieben. Bei diesem Modul kam es aufgrund der Schneeweitergabe zu verstärkter Schneeakkumulation in bestimmten Elementen. Um die Vergleichbarkeit des SWE_{LARSIM} zu dem SWE_{SLF} zu wahren, wurden deshalb die Elemente herausgenommen, die im Laufe des Untersuchungszeitraumes nie komplett abgeschmolzen waren. Hierfür wurde der Schwellenwert auf 1 mm gesetzt und damit 221 Elemente ausgeschlossen.

3.3 Übersichtsauswertungen zum SWE-Vergleich

Da der räumliche sowie zeitliche Datenumfang groß war, sollten die ersten Auswertungen dazu dienen, einen ersten Überblick und ein „Gefühl“ für die Daten zu bekommen. Ziel war es, durch räumliche und zeitliche Mittel, die Ergebnisse visuell in Abbildung und Tabellen zu fassen. In diesem Abschnitt wird neben dem Vergleich des simulierten SWEs in LARSIM (Landnutzung „Wiese“) und dem SWE_{SLF} auch der Vergleich der verschiedenen Landnutzungen erläutert.

Die SWE Mittel- und Maximalwerte wurden jeweils für LARSIM mit realer Landnutzung, mit Landnutzung „Wiese“ und für das SLF-Produkt bestimmt. Für den ersten Überblick wurden die Mittelwerte aller Monate der betrachteten Winterperioden berechnet und über die gesamte Fläche gemittelt (Gl. 3.1). Man erhielt also eine Flächengemittelwert für jeden Monat in der Untersuchungsperiode.

$$SWE(M_Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m SWE_j \right]_i \quad (3.1)$$

mit

M_Y	Wintermonat M (von November-Juni) des Jahres Y (von 1998-2006)
$i = 1 \dots n$	Zähler der Zeitschritte, Tage im Monat M_Y
$j = 1 \dots m$	Zähler der LARSIM-Elemente im Untersuchungsgebiet
$SWE(M_Y)$ [mm]	gemittelte SWE über das Untersuchungsgebiet und einen Monat

Mit Gl. (3.2) wurden die mittleren monatlichen SWE über alle acht Winterperioden des Untersuchungszeitraumes bestimmt.

$$SWE(M_{ALL}) = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 SWE(M_Y)_k \quad (3.2)$$

mit

M_{all}	Wintermonat M (von November-Juni) über alle Jahre
$k = 1 \dots 8$	Zähler für die Untersuchungsjahre 1998 bis 2006
$SWE(M_{ALL})$ [mm]	Mittleres monatliches SWE über alle acht Jahre

Zudem wurden die räumlichen SWE für jede Winterperiode unabhängig vom Ort im Untersuchungsgebiet zum Vergleich verwendet (Gl. 3.3).

$$SWE_{maxALL} = MAX_{i=1}^n \left[MAX_{j=1}^m SWE(j)_i \right] \quad (3.3)$$

mit

$i = 1 \dots n$	Zähler der Zeitschritte, in einer Winterperiode
SWE_{maxALL} [mm]	Maximales SWE für jede Winterperiode unabhängig vom Ort im Untersuchungsgebiet

Auch die Mittelwerte des SWE über das Untersuchungsgebiet und die jeweilige Winterperiode wurden als Überblicksvergleich genutzt (Gl. 3.4).

$$SWE_{meanALL} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m SWE(j)_i \right] \quad (3.4)$$

mit

$SWE_{meanALL}$ [mm]	Mittelwert des SWE über das Untersuchungsgebiets und die jeweilige Winterperiode
----------------------	--

3.4 Räumliche Auswertung

Bei der räumlichen Auswertung wurde mithilfe von Kartendarstellungen an Stichtagen ein erster Überblick über die räumliche Verteilung des SWE erlangt. Anschließend wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt und ein multiples lineares Regressionsmodell aufgestellt. Bei der Auswertung wurde viel mit der Differenz des SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} gearbeitet. Dafür wurde das SWE_{LARSIM} von dem SWE_{SLF} subtrahiert. Positive Differenzen zeigten demnach eine Überschätzung des SWE_{LARSIM} an und negative eine Unterschätzung.

3.4.1 Auswertung von Stichtagen

Bei der Auswertung von räumlich verteilten Daten lag eine Darstellung der Daten in Form von Karten nahe. Die Stichtage waren der 15. Dezember für die Akkumulationsphase, der 7. April für die maximale Schneedecke und der 1. Juni für die Schmelzperiode.

Neben der Kartendarstellung des SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} sowie ihrer Differenz wurden Karten erstellt, die Unterschiede in der räumlichen Ausdehnung der Schneedecke darstellen. Dazu wurden Bereiche wie in Tab. 3.1 aufgeführt, eingefärbt. Als Schwellenwert für den Übergang von „Schnee“ zu „kein Schnee“ wurde dabei auf 5mm SWE festgelegt.

Tab. 3.1: Einfärbung der Karte zur Übereinstimmung der Schneedeckenausdehnung

Vergleich	Farbe
Schnee bei LARSIM und kein Schnee bei SLF	rot
Kein Schnee bei LARSIM und Schnee bei SLF	blau
Schnee bei beiden	gelb
Kein Schnee bei beiden	türkis

Der Winter 2002/2003 hatte sich als repräsentativ herausgestellt, weshalb dieser zur Darstellung im Hauptteil der Arbeit ausgewählt wurde. Die Karten für die anderen Winterperioden werden im Anhang gezeigt. Die jeweils vier Karten wurden besonders für die Stichtag 15. Dezember 2002, 7. April 2003 und 1. Juni 2003 ausgewertet. Um einen Überblick über alle Jahre des Untersuchungszeitraumes zu erhalten, wurden Boxplots der drei Zeitpunkte für alle Jahre erstellt. Die Boxplots dienen auch dazu, mögliche Tendenzen der Über- oder Unterschätzungen in den verschiedenen Phasen erkennen zu können.

Neben der Betrachtung der Stichtage wurde aus den Differenzkarten ein „Film“ erstellt. Dazu wurden für jeden Tage des Untersuchungszeitraumes (1818 Tage) eine Abbildung erstellt und diese anschließend mit einer Geschwindigkeit von 0.2 Sekunden pro Bild abgespielt. So war eine raum-zeitliche Auswertung möglich. Der Film befindet sich auf einer CD im Anhang dieser Arbeit.

3.4.2 Korrelationsanalyse und multiple lineare Regression (räumlich)

Für die Identifikation und Bewertung räumlich differenzierter Ursachen für die Unterschiede zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} wurde die Methode der Korrelationsanalyse und anschließend die der multiplen linearen Regression angewendet.

Für die Auswertung, welche Einflussfaktoren zu Abweichungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} führen könnten, wurde zunächst mögliche räumlich differenzierte Einflussfaktoren gesammelt. Hierbei wurde überlegt, welche Faktoren Auswirkungen auf das SWE und im Besonderen auf die modellierten Werte des SWE haben. Da das SWE als ein gemittelter Wert für jede 1 km² Rasterzelle vorlag, sollten die Faktoren für die räumliche Auswertung auch in diesem 1 km² Raster vorliegen. Mögliche Einflussfaktoren könnten „topografische“ Faktoren wie Höhe, Hangneigung und Exposition sein. Die mittlere Höhe der LARSIM-Rasters wurde analog zur Verwendung innerhalb des Modells berechnet als:

$$Höhe_j = \frac{HOT_j + HUT_j}{2} \quad (3.5)$$

mit

j		Zähler der LARSIM-Elemente des Untersuchungsgebietes
<i>HOT</i>	[m]	Mittlere obere Höhe der Zuflüsse im Rasterelement von LARSIM
<i>HUT</i>	[m]	Mittlere untere Höhe der Zuflüsse im Rasterelemente von LARSIM
<i>Höhe</i>	[m]	Mittlere Höhe der Rasterelemente aus LARSIM

Die Hangneigung und Exposition wurden mittels ArcGIS aus einem 25m x 25m Digitalen Höhen Modell (DHM) berechnet. Dabei wurde die Hangneigung in % und die Exposition in ° (Nord = 0°, Ost = 90°, Süd = 180° und West = 270°) zuerst für jedes 30x30 m Pixel erzeugt und anschließend auf das 1km x 1km Raster aus LARSIM aggregiert. Die Hangneigung und Exposition zeigten somit einen gemittelten Wert für jedes 1 km² Rasterelement an.

Als spezieller Einflussfaktor diente die Differenz der Höhe aus LARSIM und der neu berechneten, geviertelten Höhe des SLF-Produkts (siehe Abschnitt 2.3.2). Diese Größe wurde nach Gl. (2.3) berechnet und wird im Weiteren mit „Differenz der Höhe“ bzw. $DIF_{Höhe}$ bezeichnet.

Neben den „topografischen“ Faktoren könnten auch „meteorologische“ Faktoren eine Rolle spielen. Hierfür wurden mithilfe des Ausgabemoduls „WHM-AUSGABE MONATSWERTE“ in LARSIM Monatssummen des Niederschlags sowie Monatsmittelwerte der Temperatur und der Globalstrahlung bestimmt. Aus den Monaten der Winterperiode (November bis Juni) wurde ein Mittelwert über alle Monate und Jahre mithilfe eines Pythonskriptes bestimmt. Für jedes Element liegt so ein Mittelwert der winterlichen Niederschlagssumme, der mittleren winterlichen Temperatur und der Globalstrahlung vor.

Weitere mögliche Faktoren könnten die Eichparameter darstellen. Die Eichparameter lagen pro PKB vor. Da jedes Element in einem PKB lag, war jedem Element auch jeweils ein Wert pro Eichparameter zugeteilt. Der Eichparameter der Grenztemperatur des Schnees (T_{Grenz}) wurde für die weiteren Analysen mit betrachtet.

Letztlich wurden die in Tab. 3.2 aufgeführten Einflussfaktoren hinsichtlich ihres Zusammenhanges mit den Abweichungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} untersucht. Räumliche Darstellungen der möglichen Einflussfaktoren sind in Anhang (6.1 bis 6.6) aufgeführt.

Tab. 3.2: Einflussfaktoren mit Einheiten, die für die räumliche Korrelationsanalyse und multiple lineare Regression verwendet wurden

Einflussfaktor	Einheit
Höhe (LARSIM)	m
Differenz der Höhe	m
Hangneigung	°
Exposition	° (0 bis 360)
Niederschlag	mm
Temperatur	°C
Globalstrahlung	W/m ²
T_{Grenz}	°C

Um die Einflussfaktoren und deren Abhängigkeit weiter zu analysieren, wurden verschiedene Abweichungsmaße ermittelt. Eine Möglichkeit stellt die Bestimmung der Differenz dar, hierfür wurde im ersten Schritt die maximale Differenz (Gl. 3.6) bestimmt. Das Maß zeigte an, wo das SWE_{LARSIM} die höchsten Überschätzungen vorweist. Diese Werte sind nicht auf einen Tag festgelegt, sondern zeigen immer den maximalen Wert pro Element an.

$$DIF_{max}(j) = MAX_{i=1}^n [SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i] \quad (3.6)$$

mit

$i = 1 \dots n$	Zähler der Zeitschritte
$j = 1 \dots m$	Zähler der LARSIM-Elemente des Untersuchungsgebietes
$DIF_{max}(j)$ [mm]	Maximale Differenz zwischen dem SWE _{LARSIM} und dem SWE _{SLF} im Untersuchungszeitraum für jedes Rasterelement

Als Gegenstück wurde die minimale Differenz (Gl. 3.7) bestimmt. Hier wurden die stärksten Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} bestimmt.

$$DIF_{min}(j) = MIN_{i=1}^n [SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i] \quad (3.7)$$

mit

$DIF_{min}(j)$ [mm]	Minimale Differenz zwischen dem SWE _{LARSIM} und dem SWE _{SLF} im Untersuchungszeitraum für jedes Rasterelement
---------------------	---

Der gemittelte Betrag der Differenzen $|DIF_{mean}|$ zeigt die absoluten Abweichungen an, wobei sich Über- oder Unterschätzungen aufsummieren.

$$|DIF_{mean}|(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i| \quad (3.8)$$

mit

$ DIF_{mean} (j)$ [mm]	Mittlere Betrag der Differenz zwischen dem SWE _{LARSIM} und dem im SWE _{SLF} Untersuchungszeitraum für jedes Rasterelement
------------------------	--

Zudem wurde der Mittelwert der Differenzen (Gl. 3.9) bestimmt. Dieser ist ein Maß dafür, wo das SWE_{LARSIM} im Mittel überschätzt (positive Differenz) bzw. im Mittel unterschätzt (negative Differenz) wurde. Diese Maß zeigt somit Tendenzen zur systematischen Über- oder Unterschätzung auf. Sofern DIF_{mean} nahezu den selben (positiven oder negativen) Wert annimmt wie $|DIF_{mean}|$, ist beinahe die gesamte Fehleinschätzung auf systematische Fehler zurückzuführen. Ist $|DIF_{mean}|$ hingegen viel größer als DIF_{mean} , so handelt es sich um einen überwiegend zufälligen Fehler.

$$DIF_{mean}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i] \quad (3.9)$$

mit

$DIF_{mean}(j)$ [mm]	Mittlere Differenz zwischen dem SWE _{LARSIM} und dem SWE _{SLF} im Untersuchungszeitraum für jedes Rasterelement
----------------------	---

Neben den Differenzen wurden weitere Fehlermaße ermittelt, die Auskunft über die Abweichungen des SWE_{LARSIM} vom SWE_{SLF} aufzeigen. Da bei einer Modellvalidierung auch Bereiche wichtig waren, in denen nur geringe Schneemengen vorhanden waren, wurden einige Fehler normiert (relativer Fehler). Kommt es bei LARSIM zu Schneefall, der bei dem SLF-Produkt nicht vorhanden war, kann dies große Auswirkungen in Bereichen haben die normaler Weise nicht vom Schnee beeinflusst waren. Deshalb war es wichtig neben der Betrachtung der absoluten Fehler, die hier als Differenzen beschrieben wurden, auch relative Fehler zu analysieren.

Bei der Normierung wurde nicht wie üblich mit den beobachteten Daten normiert, sondern über die Vergleichs- und Modelldaten (50 % SWE_{LARSIM} und 50 % SWE_{SLF}). Dies war nötig, da sonst alle Werte bei denen das SLF-Produkt keinen Schnee zeigte ($SWE = 0$) wegfallen würden. So wurden nur Zeitschritte der Elemente ignoriert, bei denen weder bei LARSIM noch bei dem SLF-Produkt Schnee lag. Da es bei der Auswertung um die Untersuchung der Abweichungen des SWE geht, erschien dieses als fachlich korrekte Herangehensweise.

Als ein Fehlermaß diente der normierte mittlere absolute Fehler (MAE_{norm}) aus Gl. (3.10). Dieser relative Fehler betont die Bereiche, bei denen die absoluten Differenzen gering waren, aber bei allgemein geringen SWE eine Abweichung auftrat. MAE_{norm} würde beispielsweise hoch sein, wenn in LARSIM Schnee simuliert wurde, bei dem SLF-Produkt aber kein Schnee vorhanden war.

Normierter mittlere absoluter Fehler

$$MAE_{norm}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j|}{0.5 \cdot SWE_{LARSIM}(i)_j + 0.5 \cdot SWE_{SLF}(i)_j} \quad (3.10)$$

Ein weiteres normiertes Fehlermaß ist der mittlere normierte Fehler (ME_{norm}), der in Gl. (3.11) aufgeführt ist. Er ist ähnlich dem MAE_{norm} , wurde aber bestimmt ohne den Betrag der Differenz zu bilden. Das heißt, er zeigt den systematischen Fehler an, also ob es immer zu Überschätzung oder Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} kommt.

Normierter mittlerer Fehler

$$ME_{norm}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j}{0.5 \cdot SWE_{LARSIM}(i)_j + 0.5 \cdot SWE_{SLF}(i)_j} \quad (3.11)$$

Als weitere räumliche Auswertung wurden die zuvor beschriebenen Differenzen und Fehlermaße als Karten visualisiert, wodurch ein räumlicher Eindruck der Abweichungen vermittelt werden kann.

Korrelationsanalyse (räumlich)

Bei der Korrelationsanalyse zwischen den Fehlermaßen/Differenzen und den möglichen Einflussfaktoren aus Tab. 3.2 wurde Korrelationsmatrix mit den Korrelationskoeffizienten nach Pearson und Kendall aufgestellt. Mit der Python-Modul „DataFrame.corr“ aus dem Paket „Pandas“ wurde der Standard Korrelationskoeffizient Pearson's r (Gl. 3.12) und der Korrelationskoeffizient Kendall's τ (Gl. 3.14) bestimmt.

Pearson's r berechnet den lineare Zusammenhang zwischen zwei Variablen (Helsel und Hirsch,

2002) wie folgt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Daten als zweidimensionale Normalverteilung vorliegen.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (3.12)$$

mit

- \bar{x} Mittelwert von x
- \bar{y} Mittelwert von y
- s_x Standardabweichung von x
- s_y Standardabweichung von y

Kendall's τ basiert auf Rängen und nicht wie Pearson's r auf den Werten selbst. So ist es möglich, alle monotonen Zusammenhänge unabhängig davon ob sie linear sind oder nicht zu ermitteln. Außerdem ist es robust gegenüber Ausreißern (Helsel und Hirsch, 2002).

Nach Helsel und Hirsch (2002) wird Kendall's τ wie folgt beschrieben. Die Teststatistik S misst die monotone Abhängigkeit von y zu x . S wird berechnet durch die Subtraktion der Anzahl der „diskordanten Paare“ M (die Anzahl von (x,y) Paaren bei denen y bei einer Zunahme von x , abnimmt) von der Anzahl der konkordanten Paare P (Anzahl der (x,y) Paare bei denen y mit zunehmenden x , zunimmt).

$$S = P - M \quad (3.13)$$

Der Korrelationskoeffizient Kendall's τ ist dann definiert als (Helsel und Hirsch, 2002) als:

$$\tau = \frac{S}{n(n-a)/2} \quad (3.14)$$

Bei dem Vergleich von Kendall und Pearson wird Kendall's τ bei linearen Zusammenhängen generell niedrigere Werte berechnen, dies sollte bei der Auswertung beachtet werden (Helsel und Hirsch, 2002).

Die Korrelationsmatrix diene einerseits dazu, einen Überblick über die Zusammenhänge der einzelnen Faktoren mit den jeweiligen Fehlermaßen zu bekommen. Zum anderen zeigte sie auch auf, wie die potentiellen Einflussfaktoren und Fehlermaße untereinander statistisch korrelieren.

Einfache lineare Regression (räumlich)

Neben der Korrelationsanalyse, wurden zur weiteren Auswertung und Visualisierung alle Einflussfaktoren einzeln gegen die Differenzen bzw. Fehlermaße geplottet. Hierdurch wurde deutlich, ob und wenn ja welcher Zusammenhang zwischen den potentiellen Einflussfaktoren und den Fehlermaßen bestand. Neben diesen Plots wurde zusätzlich eine einfache lineare Regression nach Gl. (3.15) berechnet und in der jeweiligen Abbildung dargestellt. Gesucht wurde jeweils der Prädiktor, der erklärt wie sich der Einflussfaktor zu dem Fehlermaß bzw. der Differenz verhält. Dies geschah mit dem Python-Modul „stats.linregress“ aus dem Paket „Scipy“. Es bestimmte mithilfe der Methode „Kleinsten Fehlerquadrate“ eine Lösung für die Regressionsgerade und gab u.a. das Bestimmtheitsmaß R^2 an.

Einfache lineare Regression

$$f(x) = a \cdot x + b \quad (3.15)$$

mit

$f(x)$	Berechnete Werte für Fehlermaß bzw. Differenz
x	Einflussfaktor (Prädiktor)
a	Steigung der Regressionsgeraden
b	y-Achsenabschnitt

Nach der Auswertung der einzelnen Plots der linearen Regression wurden zusätzlich die Residuen betrachtet. Ziel der Residuenplots war es, zu sehen, ob der durch den ersten Einflussfaktor noch nicht erklärte Varianzanteil durch einen anderen erklärt werden kann. Gegen die Residuen des Einflussfaktors, der den höchsten Zusammenhang zeigte wurden anschließend die anderen Einflussfaktoren geplottet und ein möglicher Trend analysiert. Die Betrachtung der Residuen wurde jedoch nur qualitativ zur Unterstützung der nachfolgend beschriebenen multiplen linearen Regression angewandt, weshalb die Residuenplots in der vorliegenden Arbeit nicht dargestellt wurden.

Multiple lineare Regression

Nach den vorherigen Auswertungen und der Bestimmung der Korrelationsmatrix wurde eine multiple lineare Regression schrittweise durchgeführt. Hierzu wurde das Python-Modul „linalg.lstsq“ des Pakets „Numpy“ verwendet. Auch hier wurde die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Zu Beginn wurden die Ergebnisse der einfachen linearen Regression genutzt, um den ersten Einflussfaktor (Prädiktor) des multiplen linearen Regressionsmodells zu bestimmen. Der Einflussfaktor wurde für die weiteren Schritte festgelegt und anschließend berechnet, wie viel Einfluss die übrigen potentiellen Prädiktoren auf das Bestimmtheitsmaß, R^2 (Gl. 3.17) und Standardfehler ($RMSE$) haben. So wurde Schritt für Schritt vorgegangen, bis keine maßgeblichen Verbesserung (3. Nachkommastelle) mehr verzeichnet werden konnte. Als Ergebnis der multiplen linearen Regression wurden die Prädiktoren der Gl. (3.16) sowie die Einflussfaktoren gesucht.

Multiples lineares Regressionsmodell

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 \dots + \beta_n \cdot x_n \quad (3.16)$$

mit

$f(x)$	Berechneter Wert für Fehlermaß bzw. Differenz
x_n	n Einflussfaktoren (Prädiktor)
β_n	n Achsenabschnitt bzw. Steigung der Regressionsgeraden

Bestimmtheitsmaß

$$R^2 = r^2 \quad (3.17)$$

mit r als Korrelationskoeffizient (Gl. 3.12)

Standardfehler

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x)_i)^2} \quad (3.18)$$

mit y als tatsächlicher Wert des Fehlermaßes bzw. Differenz

3.5 Zeitliche Auswertung

Neben der räumlichen Auswertung war auch der zeitliche Aspekt nicht zu vernachlässigen. Da Schnee ein „Gedächtnis“ hat, war es dabei wichtig, nicht nur einzelne Zeitpunkte zu betrachten. Im Folgenden wurden zum einen die zeitlichen Verläufe einzelner Elemente analysiert, zum anderen der zeitliche Verlauf des räumlichen Mittels weiter untersucht. Bei letzterem wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Neben der Korrelation zu Differenzen und Fehlermaßen wurden diese zu Gradienten der Differenzen bestimmt. Gradienten geben Auskunft über die Veränderung der Differenzen des SWE von einem Zeitschritt zum nächsten.

3.5.1 Auswertung einzelner Elemente

Bei der zeitlichen Auswertung erfolgte der „erste Überblick“ nicht über Stichtage wie bei der räumlichen Auswertung, sondern über die Betrachtung einzelner ausgewählter Elemente. Die Auswahl der Elemente erfolgte über zwei Transekte. Ziel war es, mit wenigen Elementen das gesamte Gebiet beispielhaft abzudecken, besonders im Hinblick auf die Topografie. Ausgewählt wurden Elemente aus dem Flachland, besonders hoch gelegene Elemente aus den Bergen, aber auch Elemente aus Tälern und Übergangsbereichen. In Tab. 3.3 sind die ausgewählten Elemente sowie verschiedene Metadaten aufgeführt. Dabei wurde die mittlere Höhe in LARSIM mit Gl. (2.2), das Gefälle nach Gl. (1.2) und der Schwellenwert der maximalen Schneeakkumulation nach Gl. (1.3) bestimmt. Die Lage der Elemente ist Abb.3.1 zu sehen. Der Nord-Süd-Transekt durchläuft das höchste Element des Untersuchungsgebietes mit einer mittleren Höhe von 3661 m. Da an diesem Element aber immer Schnee liegt, wurde es aus den oben genannten Gründen (Abschnitt 3.2) von der Auswertung ausgeschlossen.

Tab. 3.3: Metadaten aus LARSIM der Elemente die für die Auswertung genutzt wurden

Element	Rechtswert [km]	Hochwert [km]	HOT [m]	HUT [m]	Mittlere Höhe [n]	Gefälle [‰]	Schwellenwert [mm]	T_{Grenz} [°C]
25168	652.5	250.5	387	357	372	60	2236	1
19854	563.5	196.5	491	429	460	124	2231	1
15188	618.5	196.5	973	825	899	296	2207	1
28735	652.5	203.5	1238	830	1034	816	1823	-0.4
28472	652.5	196.5	1732	1276	1504	912	1662	-0.4
4255	760.5	196.5	743	538	640.5	410	2175	1
1684	737.5	196.5	3096	2526	2811	1140	1248	-0.3
12587	652.5	167.5	2600	1614	2107	1972	762	-2.5

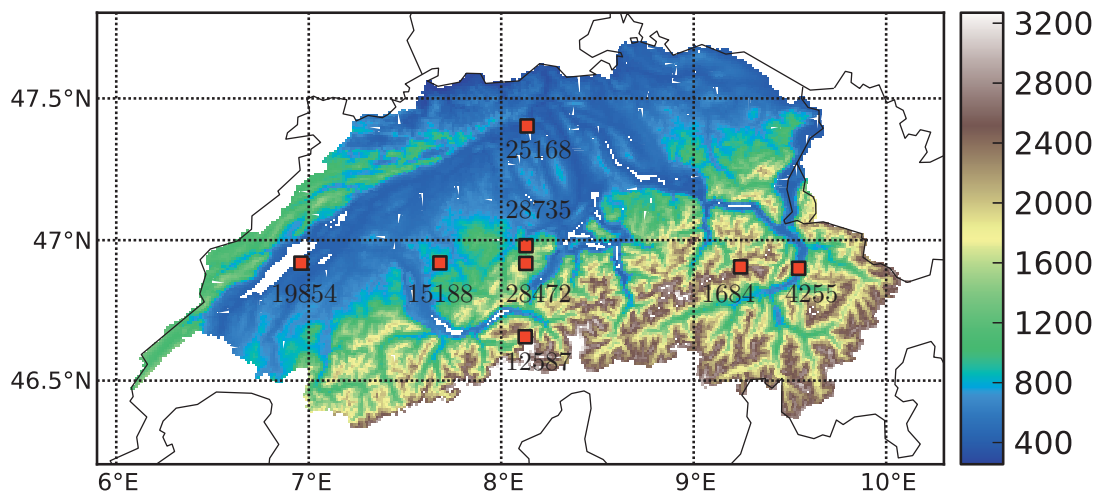


Abb. 3.1: Ausgewählte Elemente entlang eines Nord-Süd sowie eines Ost-West Transektes, unterlegt mit den mittleren Höhen aus LARSIM (weiße Bereiche in niedrigen Lagen zeigen Wasserflächen, die nicht mit analysiert wurden).

Das gesamte Untersuchungsgebiet deckte LARSIM-Höhen zwischen 255 m und 3661 m ab, die mittlere Höhe liegt bei 1141 m. Eine Analyse der Elemente erfolgt mit Höhen zwischen 372 m (Element 25168) und 2811 m (Element 6184). Der aus dem Gefälle abgeleitete Schwellenwert der maximalen Schneeakkumulation, der wichtig bei der LARSIM Option „Schneemassentransport“ war, liegt bei den analysierten Elementen zwischen 762 mm und 2236 mm. Mit einem Schwellenwert von 2236 mm lag das Element 25168 nahe dem maximal möglichen Schwellenwert von 2240. Das Element 12587 zeigte einen extrem niedrigen Schwellenwert von 762 mm (maximale Untergrenze des Schwellenwerts 760 mm).

In dem WHM Schweiz lag T_{Grenz} zwischen $+2^{\circ}\text{C}$ und -2.5°C (Abb. 6.7 im Anhang). Im größten Teil des Untersuchungsgebietes lag sie jedoch bei $+1^{\circ}\text{C}$. Das Element 12587 hatte eine T_{Grenz} von -2.5°C und zeigte damit eine eher ungewöhnlich niedrige T_{Grenz} . Die Elemente 28735 und 28472 mit einer T_{Grenz} von -0.4°C und das Element 1684 mit T_{Grenz} von -0.3°C lagen auch eher in kleinräumig verbreitete T_{Grenz} -Bereichen.

Für den ersten Überblick wurden für die in Tab. 3.3 aufgeführten Elemente Scatterplots erstellt. Neben den Scatterplots wurden auch die Ganglinien der zuvor beschriebenen Elemente betrachtet. Um den Verlauf der Ganglinien besser interpretieren zu können, wurden zusätzlich der Temperaturverlauf sowie T_{Grenz} (Tab. 3.3) und der tägliche Niederschlag mit dargestellt. Der Temperaturverlauf und die Niederschläge der einzelnen Elemente wurden als LARSIM-Ausgabe mit dem Modul „GMD: KLIMA FUER ELEMENT“ und „GMD: NIED TEILGEBIET“ bestimmt.

3.5.2 Korrelationsanalyse (zeitlich)

Wie schon bei der räumlichen Auswertung, wurde auch bei der zeitlichen Auswertung eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Dabei wurden zunächst mögliche zeitliche Einflussfaktoren bestimmt. Es waren wieder die „meteorologischen“ Parameter Niederschlag, Temperatur und

Globalstrahlung zu nennen, die aber nun als Zeitreihe benötigt wurden. Dazu wurden die meteorologischen Parameter mit dem Modul „PKB-MITTELWERTE“ in LARSIM berechnet (das gesamte WHM-Gebiet war ein PKB). Die Ausgabe war eine Zeitreihe möglicher meteorologischer Einflussfaktoren, gemittelt über die gesamte Fläche des WHM Schweiz. Eine Unterteilung auf die eigentliche Untersuchungsfläche war modelltechnisch nicht möglich, da es sich um eine gemittelte Ausgabe in LARSIM handelte. Um die Abweichungen um die 0°C besser auswerten zu können, wurde aus der Zeitreihe der Temperatur für jeden Tag der Betrag der Temperatur (Betrag_Temp) bestimmt.

Neben den meteorologischen Einflussfaktoren wurde auch ein zeitlicher Faktor bestimmt. Um die zeitliche Abhängigkeit abzubilden, wurde der Tag ab dem 01.11. eines jeden Winters bestimmt. Dabei war es nötig, um eine eindeutige Vergleichbarkeit der einzelnen Jahre zu gewährleisten, den 29. Februar der Jahre 2000 und 2004 bei der gesamten zeitliche Auswertung zu ignorieren. Die Auswertung erfolgte somit über acht gleich lange Winterperioden von je 227 Tagen. Die möglichen zeitlichen Einflussfaktoren sind in Tab. 3.4 noch einmal zusammengefasst.

Tab. 3.4: Einflussfaktoren mit Einheiten, die für die zeitliche Korrelationsanalysen verwendet wurden

Einflussfaktor	Einheit
Niederschlag	mm
Temperatur	°C
Betrag_Temp	°C
Globalstrahlung	W/m ²
Tag_ab_0111	Tag

Auswertung der zeitlichen Differenzen und Fehlermaße

Die Korrelationsanalyse wurde wie bei der räumlichen Auswertung unter Abschnitt 3.4.2 beschrieben durchgeführt. Zu Beginn wurden Differenzen und Fehlermaße bestimmt. Die Differenzengleichungen wurden bei zeitlichen Auswertung synonym zu der räumlichen Auswertung (Abschnitt 3.4.2) definiert als:

Maximale Differenz

$$DIF_{max}(i) = MAX_{j=1}^m [SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j] \quad (3.19)$$

mit

$i = 1 \dots n$	Zähler der Zeitschritte
$j = 1 \dots m$	Zähler der LARSIM-Elemente des Untersuchungsgebietes
$DIF_{max}(i)$ [mm]	Maximale Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines Elementes (nicht Ortsgebunden) im Untersuchungszeitraum

Minimale Differenz (zeitlich)

$$DIF_{min}(i) = MIN_{j=1}^m [SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j] \quad (3.20)$$

mit

$DIF_{min}(i)$ [mm] Minimale Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines Elementes (nicht ortsgebunden) im Untersuchungszeitraum

Mittlerer Betrag der Differenz (zeitlich)

$$|DIF_{mean}|(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j| \quad (3.21)$$

mit

$|DIF_{mean}|(i)$ [mm] Mittlere Betrag der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines jeden Elementes im Untersuchungszeitraum

Mittlere Differenz (zeitlich)

$$DIF_{mean}(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [SWE_{LARSIM}(i)_j - SWE_{SLF}(i)_j] \quad (3.22)$$

mit

$DIF_{mean}(i)$ [mm] Mittlere Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines jeden Elementes im Untersuchungszeitraum

Die relativen Fehlermaße wurden bei der zeitlichen Auswertung synonym zu der räumlichen Auswertung (Abschnitt 3.4.2) definiert als:

Normierter mittlerer absoluter Fehler (zeitlich)

$$MAE_{norm}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i|}{0.5 \cdot SWE_{LARSIM}(j)_i + 0.5 \cdot SWE_{SLF}(j)_i} \quad (3.23)$$

Normierter mittlerer Fehler (zeitlich)

$$ME_{norm}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{SWE_{LARSIM}(j)_i - SWE_{SLF}(j)_i}{0.5 \cdot SWE_{LARSIM}(j)_i + 0.5 \cdot SWE_{SLF}(j)_i} \quad (3.24)$$

Wie schon bei der räumlichen Auswertung wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Dabei wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson (Gl. 3.12) und Kennall's τ nach Gl. (3.14) zwischen den Differenzen/Fehlermaßen und der möglichen Einflussfaktoren (Tab. 3.4) bestimmt und ausgewertet. Zudem wurde die lineare Regression von möglichen Einflussfaktoren und Differenzen/Fehlermaßen bestimmt und in einem Plot visualisiert. Eine multiple lineare Regression wurde nicht bestimmt, dass keine eindeutigen Zusammenhänge bei den Analysen vorlagen.

Auswertung der zeitlichen Gradienten-Differenzen

Neben der Auswertung von Differenzen und Fehlermaßen wurden Gradienten, gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet für die Auswertung herangezogen. Unter dem Gradienten der Differenz ($DIF_G(i)$) ist die Differenz der Differenz von einem Zeitschritt zum nächsten zu verstehen:

$$DIF_G(i) = DIF_{i+1} - DIF_i \quad (3.25)$$

Da aufgrund der hohen und sprunghaft ansteigenden Differenzen, vermutlich aufgrund des LARSIM-Moduls „Schneemassentransport“ (Abschnitt 1.5.2), einige Gradienten unnatürlich hoch lagen, wurde ein Schwellenwert auf 200 mm gesetzt. Eine Veränderung des SWE von einem Tag auf den anderen von mehr als 200 mm kann durch Schneefall und Abschmelzen nicht zustande kommen. Das heißt für die Auswertung wurden nur Gradienten genutzt, die kleiner als 200 mm waren.

Für die Auswertungen wurden aus den Gradienten der Differenzen wiederum die maximalen, minimalen und mittleren Gradienten bestimmt (siehe Gl. 3.26 bis 3.28). Der maximale Gradient der Differenzen zeigte dabei die größten positiven Veränderung, der Minimale die größten negativen Veränderungen an. Der mittlere Gradient der Differenzen zeigte das mittlere Verhalten von einem Zeitschritt zum nächsten.

Durch die Gradienten der Differenzen konnten Zeiträume identifiziert werden, in denen Fehleinschätzungen entstehen. Positive Werte signalisieren Tage an denen LARSIM eine Tendenz zur Überschätzung zeigt. Dies kann dadurch bedingt sein, dass LARSIM mehr SWE aufbaut als SLF oder LARSIM weniger SWE abbaut als SLF. Negative Gradienten weisen umgekehrt auf Tage hin, an denen LARSIM den Schneedeckenaufbau unterschätzt bzw. den Schneedeckenabbau überschätzt.

Maximaler Gradient der Differenzen

$$DIF_{Gmax}(i) = MAX_{j=1}^m DIF_G(i)_j \quad (3.26)$$

mit

$DIF_{Gmax}(i)$ [mm] Maximaler Gradient der Differenzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines Elementes (nicht ortsgebunden) im Untersuchungszeitraum

Minimaler Gradient der Differenzen

$$DIF_{Gmin}(i) = MIN_{j=1}^m DIF_G(i)_j \quad (3.27)$$

mit

$DIF_{Gmin}(i)$ [mm] Minimaler Gradient der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines Elementes (nicht ortsgebunden) im Untersuchungszeitraum

Mittlerer Gradient der Differenzen

$$DIF_{Gmean}(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m DIF_G(i)_j \quad (3.28)$$

mit

$DIF_{Gmean}(i)$ [mm] Mittlere Gradient der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} eines jeden Elements im Untersuchungszeitraum

Zwischen den Einflussfaktoren in Tab. 3.4 und dem Gradienten der Differenzen (maximalen, minimalen und mittleren) wurde wieder eine Korrelationsmatrix nach Pearson Gl. (3.12) und Kendall Gl. (3.14) aufgestellt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Modellvalidierung anhand von Pegeldata

Die Modellvalidierung wird anhand von drei Pegeln im Folgenden verdeutlicht. In Abb. 4.1 ist die simulierte und die gemessene Abflussganglinie des Pegels Bern, Schönau (Koordinaten: 600710/198000, Höhe: 502 m) an der Aare des Jahres 2004 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Verlauf des Abflusses der Aare relativ gut wiedergegeben werden kann.

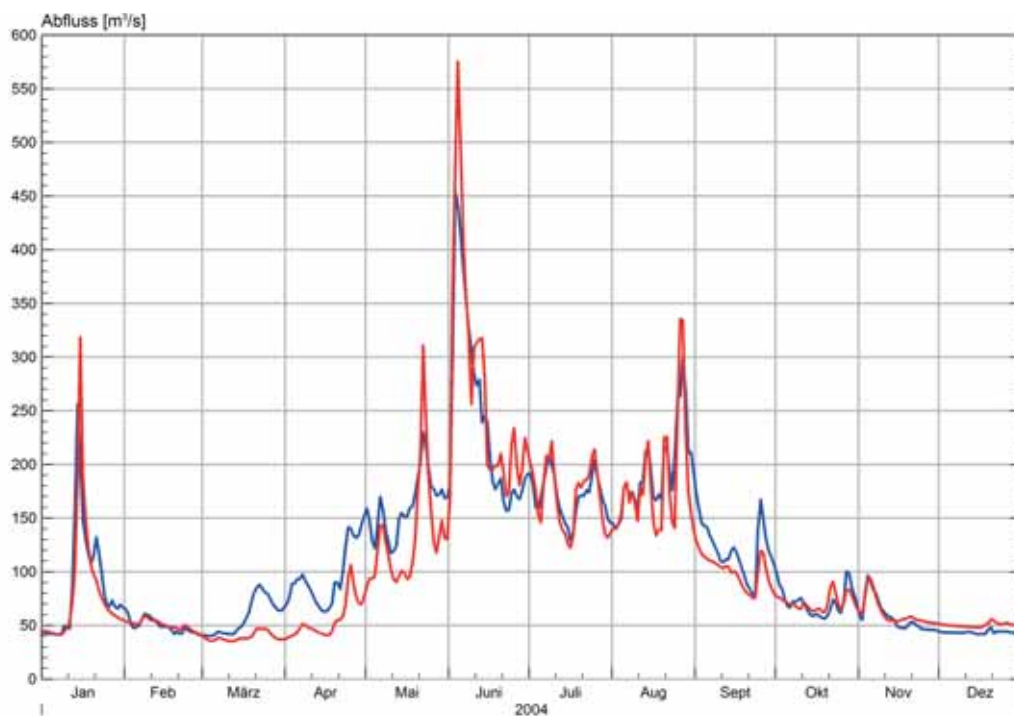


Abb. 4.1: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Bern, Schönau an der Aare für das Jahr 2004.

In Abb. 4.2 ist die simulierte und die gemessene Abflussganglinie des Pegels Diepoldsau (Koordinaten: 766280/250360, Höhe: 410 m) am Rhein das Jahrs 2002 dargestellt. Auch hier kann der Verlauf der Abflussganglinie relativ gut wiedergegeben werden. Die Schwankungen der gemessenen Ganglinie im Wochenrhythmus sind dabei auf den Betrieb von Wasserkraftanlagen zurückzuführen, die im Modell nicht exakt abgebildet sind.

Abbildung 4.3 zeigt die modellierte und gemessenen Abflussganglinie am Pegel Basel, Rheinhalle (Koordinaten: 613400/267650, Höhe: 246 m) am Rhein.

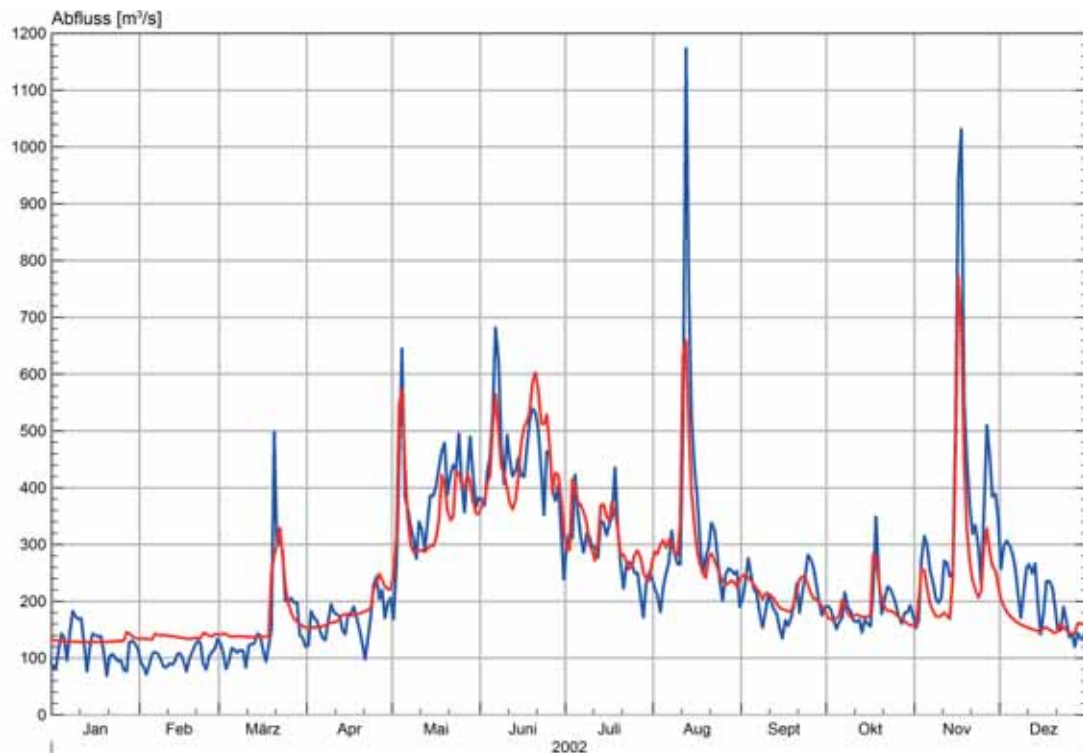


Abb. 4.2: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Dipoldsau am Rhein für das Jahr 2002.

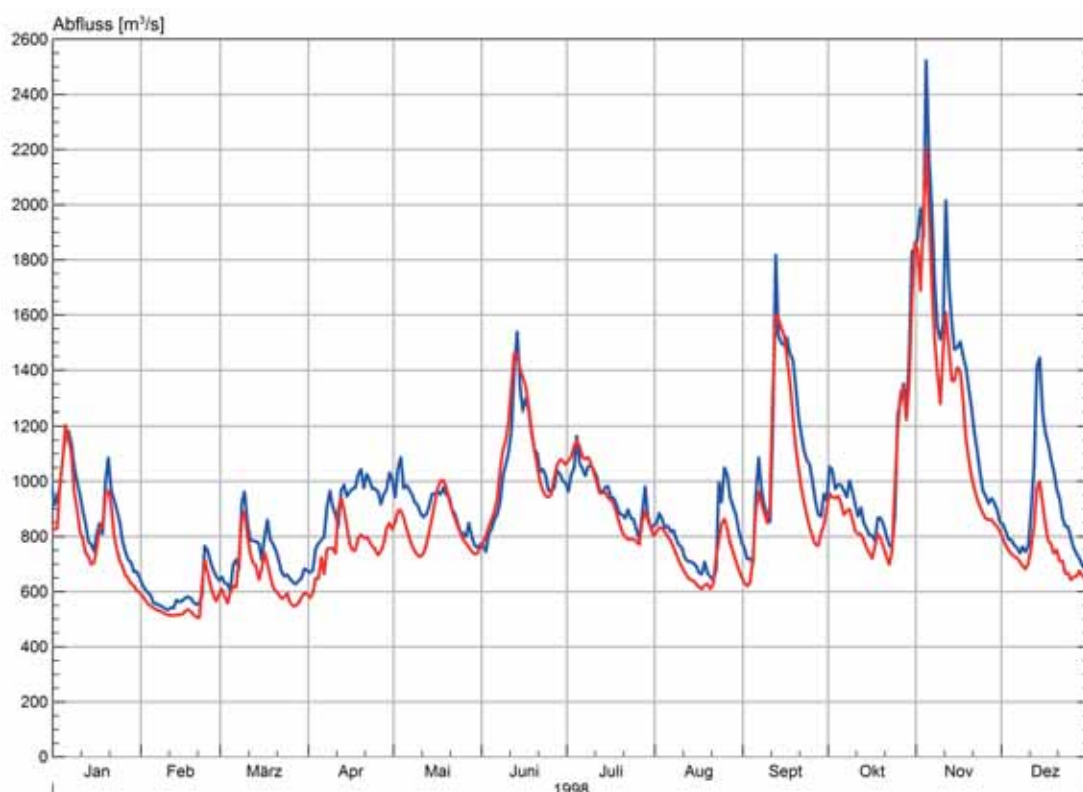


Abb. 4.3: Simulierte (rot) und gemessene (blau) Abflussganglinie des Pegels Basel, Rheinhalle am Rhein für das Jahr 1998.

Am Pegel Basel sind die Abflüsse des WHM Bodensee und des WHM Hochrhein mit dem WHM Schweiz vereinigt. Es zeigt sich auch hier, dass der modellierte Abfluss gut mit den gemessenen Abfluss übereinstimmen.

Für die Nutzung des WHM Schweiz für die Betrachtung des Schneegebietes sind die simulierten Abflüsse ausreichend. Die gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen verdeutlicht, dass das Modell mit den verwendeten Antriebsdaten zur Analyse der flächenhaften Schneebedeckung genutzt werden kann. In dieser Arbeit wurde der Vergleich von Abflüssen als Methode des Vergleichs nicht genutzt. Aus der Analyse von Abflüssen könnten aber noch zusätzliche Erkenntnisse bei dem Vergleich der SWE gesammelt werden.

4.2 Überblicksauswertungen zum SWE-Vergleich

Beim ersten Vergleich des SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF} geht es in erster Linie darum, einen Überblick über die Daten zu bekommen. In Tab. 4.1 sind die nach Gl. (3.2) bestimmten, gemittelt über die Fläche des Untersuchungsgebietes mittleren monatlichen SWE, dargestellt. Beim Vergleich der beiden LARSIM-Läufe zeigen sich relativ geringe Unterschiede zwischen den Varianten mit der realen Landnutzung und 100 % Wiese. Die Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} mit Landnutzung „Wiese“ und dem SWE_{SLF} zeigt, dass die gemittelten SWE_{LARSIM} die SWE_{SLF} überschätzen. Diese Überschätzung ist in allen Monaten zu erkennen und wächst im Laufe der Winterperiode weiter an. Die größeren Differenzen in der Schmelzphase (ab April) deuten auf ein im Mittel zu spätes Abschmelzen in LARSIM hin.

Tab. 4.1: Mittelwerte des SWE in mm gemittelt über den Untersuchungszeitraum (1998-2006) und das gesamte Untersuchungsgebiet

	SWE_{LARSIM}	$SWE_{LARSIM-Wiese}$	SWE_{SLF}	$SWE_{LARSIM-Wiese} - SWE_{SLF}$
Nov	27.6	27.8	13.0	14.8
Dez	51.9	53.2	37.0	16.3
Jan	81.0	83.4	70.4	13.0
Feb	127.7	131.4	119.2	12.2
Mrz	156.2	161.2	139.3	21.9
Apr	161.1	165.9	112.7	53.2
Mai	119.7	120.0	63.7	56.3
Jun	70.5	69.4	19.3	50.1

Neben den über alle acht Jahre gemittelten monatlichen SWE wurden auch nach Gl. (3.1) einfache Monatsmittel bestimmt, welche in Abb. 4.4 dargestellt sind. Die Abbildung zeigt die Monatsmittel der SWE von LARSIM mit der originalen Landnutzung und der veränderten („Wiese“) sowie die des SLF-Produktes für den gesamten Untersuchungszeitraum (Winter 1998 bis 2006). Bei dieser Darstellung zeigt sich wieder, dass die Schneeschmelze in LARSIM tendenziell später als im SLF-Produkt eintritt. Dieser Trend ist in allen Jahren des Untersuchungszeitraumes erkennbar. Von 1998 bis 2001 überschätzt LARSIM die SLF-Daten sehr viel stärker als in den späteren Jahren. Wie schon bei den mittleren monatlichen SWE (Tab. 4.1) zeigt sich, dass LARSIM schon im November höhere SWE als das SLF-Produkt berechnet. Abbildung 4.4 verdeutlicht auch, dass die Unterschiede zwischen den beiden LARSIM-Läufen im Vergleich zu den Unterschieden zwischen LARSIM und SLF nicht groß sind.

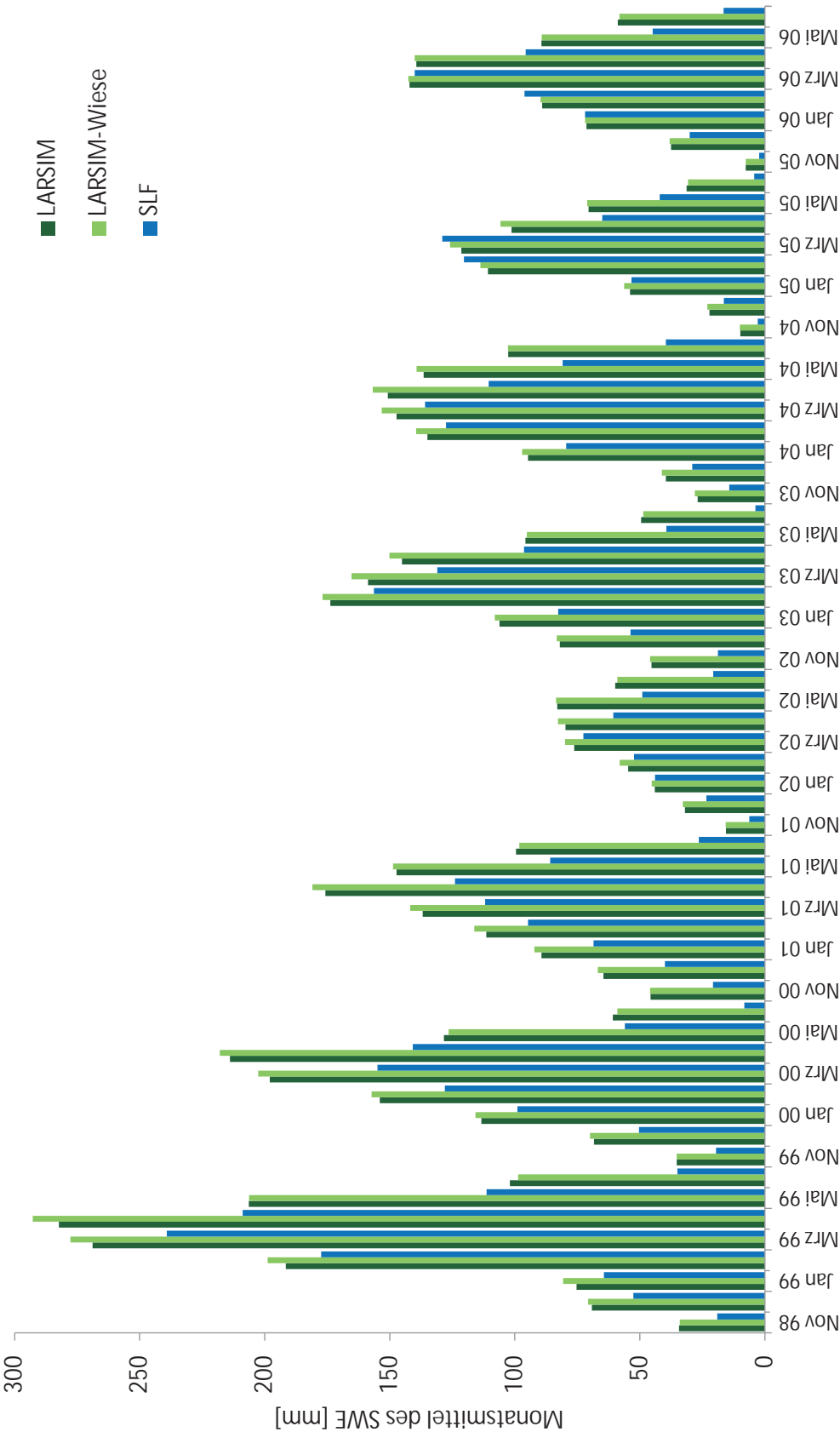


Abb. 4.4: Monatsmittelwerte in mm des SWE von LARSIM (reale Landnutzung), LARSIM-Wiese (Landnutzung nur Wiese) und dem SLF-Produkt.

Neben den monatlichen Mitteln wurden Mittel (Gl. 3.4) und Maxima (Gl. 3.3) der einzelnen Winterperioden bestimmt, die in Tab. 4.2 aufgeführt sind. Auch hier wurden wieder die zwei LARSIM-Läufe mit verschiedener Landnutzung sowie das SLF-Produkt betrachtet. Bei dem Vergleich der beiden LARSIM-Läufe zeigt sich, dass es kaum eine Veränderung der Maxima gibt. Die Maxima liegen bei beiden Läufen deutlich über 2000 mm. Die Ähnlichkeit dieser Werte lässt sich auf einen maximalen Schwellenwert des SWE für den „Schneemassentransport“ in LARSIM zurückführen.

Bei dem Vergleich der Mittelwerte der beiden LARSIM-Läufe zeigen sich wieder geringe Unterschiede. Im Mittel ist interessanterweise nur eine leichte Erhöhung des SWE mit der Landnutzung „Wiese“ erkennbar.

Bei der Betrachtung der Maxima in Tab. 4.2 fallen die sehr hohen und konstanten SWE_{LARSIM} auf. Diese Muster wurde schon bei dem Vergleich der beiden LARSIM-Läufe deutlich. Bei den Maxima handelt es sich um ortsunabhängige Maxima. Das heißt, diese Werte müssen in den unterschiedlichen Modellen bzw. Jahr nicht im selben Element liegen. In jedem Winter kann demnach ein anderes Element zu diesen Maxima führen. Da die extremen Maxima nicht physikalisch begründbar sind und bei den Daten des SWE_{SLF} nicht vorkommen, wurden einige dieser Elemente in die weiteren Auswertungen nicht mit einbezogen (siehe Abschnitt 3.2).

Bei dem Vergleich der Mittelwerte ist zu beachten, dass es sich um Werte handelt, die sowohl über die Fläche als auch über die gesamte Winterperiode gemittelt wurden. Wie schon bei den beiden ersten Auswertungen (Tab. 4.1 und Abb. 4.4) zeigt sich, dass das SWE_{LARSIM} im Mittel das SWE_{SLF} überschätzt. Die unterschiedlichen Schneemengen der einzelnen Winterperioden, die auch in Abb. 4.4 erkennbar waren, werden hier deutlich. Die jeweiligen Abweichungen scheinen sich an die unterschiedlichen Winterperioden anzupassen. Die absolute Überschätzung durch $LARSIM_{Wiese}$ schwankt zwischen 14.6 mm im Winter 2001/2002 und 42.8 mm im Winter 1998/1999. Relativ gesehen treten die geringsten Überschätzungen in den beiden letzten Wintern 2004/2005 mit 21 % und 2005/2006 mit 25 % auf, während der höchste relative Wert im Winter 2000/2001 mit 50 % vorliegt.

Tab. 4.2: Maxima und Mittelwerte in mm der einzelnen Winterperioden (01.11.-15.06.) gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet mit dem SWE aus LARSIM mit realer Landnutzung, SWE_{Wiese} als SWE mit Landnutzung „Wiese“ und dem SWE_{SLF}

Winter	Maximum LARSIM	Maximum $LARSIM_{Wiese}$	Maximum SLF	Mittelwert LARSIM	Mittelwert $LARSIM_{Wiese}$	Mittelwert SLF
1998/1999	2233	2215	1347	156.9	161	118.2
1999/2000	2233	2233	974	125.5	127.2	86.9
2000/2001	2233	2233	1006	109.4	112.2	74.4
2001/2002	2233	2233	667	55.4	57.1	42.5
2002/2003	2233	2233	843	110.3	112.6	76.7
2003/2004	2205	2205	943	104.1	107.4	79.5
2004/2005	2205	2205	697	67.0	69.1	57.0
2005/2006	2233	2233	767	80.8	81.1	65.1

Diskussion des Vergleiches der zwei LARSIM-Läufe mit verschiedener Landnutzung

Die geringen Unterschiede zwischen dem SWE mit realer Landnutzung und der Landnutzung „Wiese“ waren nicht unbedingt zu erwarten. Im Endeffekt lässt es sich jedoch erklären, weil spürbarere Unterschiede nur dann auftreten würden, wenn der Effekt von 100 % Wald mit dem von 100 % Wiese verglichen werden würde. Bei dem Vergleich der beiden LARSIM-Läufe muss jedoch bedacht werden, dass es besonders viel Schnee in hohen Lagen oberhalb der Baumgrenze gibt. Bei Vergleich des SWE der beiden LARSIM-Läufe spielen die Waldflächen daher keine so große Rolle. Abschließend lässt sich zu dem Vergleich der beiden LARSIM-Läufe sagen, dass die Diskrepanzen relativ gering sind. Die Ergebnisse des LARSIM-Laufs mit der Landnutzung „Wiese“ lassen sich demnach qualitativ auch auf den Lauf mit der realen Landnutzung übertragen. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit sollte jedoch bei LARSIM die Landnutzung „Wiese“ verwendet werden.

Diskussion des ersten Vergleichs des SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF}

Bei dem Vergleich des SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF} zeigt sich im Mittel eine Tendenz zur Überschätzung durch LARSIM. Eine Diskrepanz zeigt sich über die gesamte Winterperiode hinweg und in fast allen Jahren (Abb. 4.4). Am stärksten treten die Überschätzungen durch LARSIM gegen Ende der Winterperiode auf. LARSIM baut im Mittel eine höhere und länger andauernde Schneedecke auf und es kommt zum verspäten Abschmelzen.

Ein Teil der Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} lassen sich auf die unterschiedlichen Anfangsbedingungen zurückführen. Schnee hat ein „Gedächtnis“ das heißt, wenn bereits am 1. November mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen gestartet wird, setzen sich diese Diskrepanzen den ganzen Winter über fort, solange es nicht zu einem vollständigen Abschmelzen in LARSIM und im SLF-Produkt kommt. Abbildung 4.4 verdeutlicht jedoch, dass das Problem der Anfangsbedingung von eher geringerer Bedeutung ist.

Im Weiteren scheinen die sehr hohen SWE in einzelnen Elementen des LARSIM-Modells einen Einfluss auf die Überschätzung zu haben. Diese Maxima lassen sich mit dem in LARSIM implementierten „Schneemassentransport“ (siehe Abschnitt 1.5.2) erklären. Bei den hohen Maxima des SWE_{LARSIM} handelt es sich um die Obergrenze für den „Schneemassentransport“ in dem WHM Schweiz. Bei einem Gefälle von 0% liegt der Schwellenwert mit den Einstellungen des WHM Schweiz bei 2244 mm. Bei einem in LARSIM bestimmten Gefälle von 10 % ergibt sich der Schwellenwert von 2233 mm SWE. In den höheren Lagen findet eine starke Anreicherung der Schneedecke statt. Durch den in LARSIM implementierten „Schneemassentransport“ kommt es zu einer Verlagerung des akkumulierten Schnees (siehe Abschnitt 1.5.2). Unter anderem könnte dies zu einer starken Schneedeckenakkumulation in einzelnen Tal-Elementen führen und die hohen SWE dort erklären.

4.3 Räumliche Auswertung

4.3.1 Auswertung von Stichtagen

Kartendarstellungen für bestimmte Stichtage ermöglichen einen ersten Überblick für die räumliche Auswertung. Dazu sind in den Abbildungen 4.5, 4.6 und 4.7 jeweils vier Karten für den Akkumulationszeitraum (Stichtag 15. Dezember 2002), den SWE-Höchststand (Stichtag 7. April 2003) beziehungsweise die Schneeschmelze (Stichtag 1. Juni 2003) dargestellt. Die Winterperiode 2002/2003 zeigt einen charakteristischen Zeitraum, sodass sich die meisten Ergebnisse auf die anderen Winterperioden des Untersuchungszeitraumes übertragen lassen. Analoge Karten der anderen Winterperioden sind im Anhang (Abb. 6.8 bis Abb 6.28) aufgeführt.

Die linke obere Karte zeigt immer das SWE_{LARSIM} die rechte obere das SWE_{SLF} . Hierbei ist zu beachten, dass die Obergrenze der Farbskala mit 1500 mm nicht der realen Obergrenze entspricht. Das maximale SWE_{LARSIM} liegt bei 2233 mm, das maximale SWE_{SLF} bei 1347 mm. Die Anpassung der Farbskala war notwendig, um auch bei dem SWE_{SLF} einen Farbverlauf zu erkennen. Bei der Darstellung der Differenzen in der linken unteren Karte wurde die Farbskala von +500 bis -500 gesetzt, auch dies entspricht nicht den realen Differenzen. Die größte Überschätzung von SWE_{LARSIM} liegt bei 2215 mm und die größte Unterschätzung bei -774 mm. Die Karte mit der Schneebedeckung unten rechts zeigt an, ob sich die räumliche Verteilung der Schneebedeckung ähnelt. Es wird unterschieden, ob nur bei LARSIM (rot) oder nur dem SLF-Produkt (blau) Schnee liegt, oder aber bei beiden Schnee (gelb) bzw. kein Schnee (türkis). Bei der Interpretation ist zu beachten, dass es sich besonders bei dieser Darstellung um eine Momentaufnahme handelt, die zu jedem anderen Zeitpunkt ein merklich anderes Bild zeigen könnte.

Abbildung 4.5 für den 15. Dezember 2002 visualisiert die Verhältnisse bei der Akkumulationsphase. Die Karte des SWE_{LARSIM} zeigt in den Zentralalpen bereits deutliche Bereiche mit SWE über 600 mm. Bei dem SLF-Produkt ist das SWE noch nicht über 500 mm angewachsen. Bei der Betrachtung der Differenzen zeigen sich folgerichtig deutliche Überschätzungen (dunkelrot) in den Zentralalpen. Eine Unterschätzung des SWE_{LARSIM} kann bei dem einfachen Vergleich der beiden oberen Karten nicht festgestellt werden, diese wird erst bei der Differenzenkarte deutlich. Die Unterschätzungen kommen verstärkt in den südöstlichen Talbereichen vor und sind wesentlich weniger stark ausgeprägt als die Überschätzungen. Die Bereiche der Quellflüsse des Vorder- und Hinterrheins in Graubünden zeigen eine deutliche Unterschätzung des SWE_{LARSIM} .

Die Karte der Schneebedeckung zeigt an, dass bereits ein relativ großer Teil des Untersuchungsgebietes mit Schnee bedeckt ist. Neben den Bereichen, bei denen die Schneebedeckung aus LARSIM mit dem des SLF-Produkts übereinstimmen (türkis und gelb), sind größere rote Bereiche erkennbar. Diese zeigen an, dass in einigen Bereichen nur Schnee bei LARSIM vorhanden ist. Da viele dieser Bereiche in der Differenzenkarte nicht erkennbar sind, scheint es sich hier um relativ kleine Schneemengen zu handeln. Der Schwellenwert von 5 mm SWE ist zwar überschritten, aber dennoch kommt es nicht zu einem hohen SWE. Insbesondere im Übergangsbereich zwischen den Tälern des Vorder- und Hinterrheins sowie an den Talflanken einiger höher gelegenen Regionen treten Elemente auf, in denen nur im SLF-Produkt Schnee liegt. Hierbei handelt es sich jedoch nur um relativ kleine Flächen.

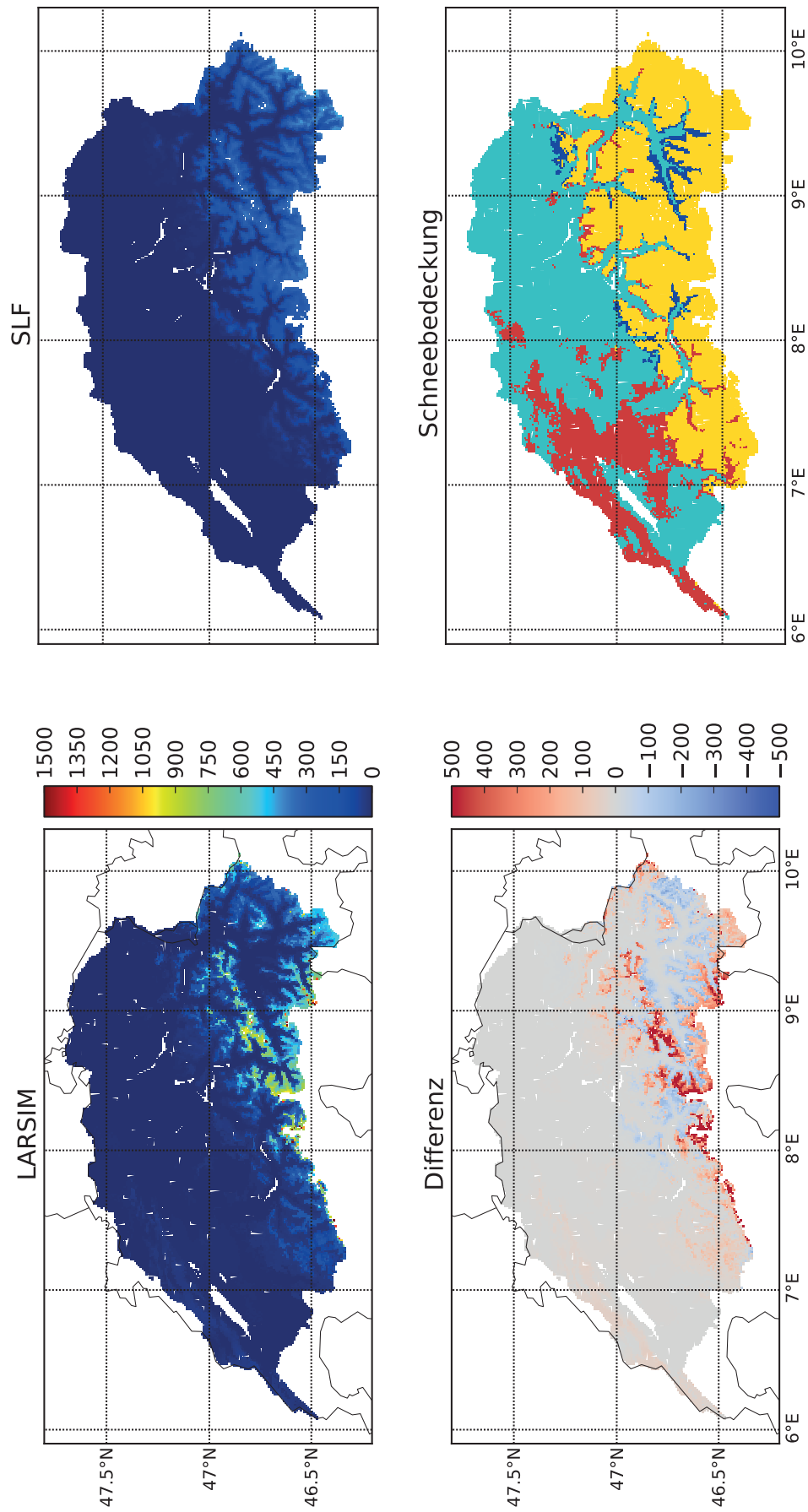


Abb. 4.5: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2002

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF} [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

Die Karten zeigen zusammen deutlich, dass es bereits zu Beginn der Akkumulationsphase zu großflächigen Unterschieden in der Schneebedeckung zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} kommt. Dieses Phänomen tritt auch in den meisten anderen Jahren des Untersuchungszeitraumes auf (siehe Anhang). Ausnahmen stellen die Jahre 2001 und 2004 dar, bei denen am 15. Dezember im Vergleich zu den anderen Jahren relativ wenig SWE vorhanden ist und es eher zu einer Unterschätzung von SWE_{LARSIM} kommt.

Die Karten mit den Höchstständen des SWE am 7. April 2003 sind in Abb. 4.6 dargestellt. Bei Betrachtung der Karte des SWE_{LARSIM} sind Elemente mit sehr hohen SWE von deutlich über 1000 mm im Bereich des Alpenhauptkamms gut erkennbar. Das SWE_{LARSIM} zeigt diese Bereiche auch, aber mit sehr viel geringeren Werten bis höchstens 900 mm. Die starken Abweichungen der beiden SWE werden in der Differenzkarte besonders deutlich. Der Alpenhauptkamm ist stark dunkelrot gefärbt, das heißt, es liegt eine starke Überschätzung des SWE_{LARSIM} vor. Weiterhin sind auch blaue Bereiche gut erkennbar, die eine Unterschätzung von SWE_{LARSIM} anzeigen. Diese sind in Graubünden mit den Quellflüssen, Vorder- und Hinterrhein, in Teilen des Alpenvorlandes (im Bereich von 8° Ost und 46.7° Nord) und besonders in Tälern und deren Talflanken. Diese Bereiche zeigen sich auch in den anderen Jahren des Untersuchungszeitraumes (siehe Anhang), wobei der Höchststand auch im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (Bereich von 9° - 10° Ost und 47.2° Nord) in vielen Jahren unterschätzt wird. Diese Bereiche sind bei den Karten von 2003 nur sehr schwach zu erkennen.

Bei Betrachtung der Schneebedeckungskarte zeigt sich ein relativ homogenes Bild. Die Bereiche in denen nur LARSIM am 15. Dezember 2003 Schnee simuliert hat, weisen nun meist keine Schneebedeckung mehr auf. Eine Ausnahme stellt der westliche Teil des Untersuchungsgebietes der Schweizer Jura dar. Hier kommt es weiterhin zu einer Schneedecke in LARSIM, nicht aber bei dem SLF-Produkt. Dieses Phänomen zeigt sich auch in den meisten anderen Jahren (siehe Anhang). Blaue Bereiche, bei denen nur das SLF-Produkt Schnee aufweist, sind kaum noch zu erkennen. An den Schneerandlagen zeigen sich rote Bereiche, was heißt, dass die Schneedeckenausdehnung in LARSIM am 7. April 2003 etwas größer ist als die des SLF-Produkts. Dies ist am 7. April 2005 und 2006 auch der Fall (siehe Anhang). Hingegen zeigt das SLF-Produkt besonders am 7. April 2004 sowie in den Jahren 1999 und 2000, eine ausgedehntere Schneedecke als LARSIM an.

Die Abb. 4.7 des 1. Juni 2003 zeigt beispielhaft die fortgeschrittene Schmelzphase. Bei der Betrachtung des SWE_{LARSIM} wird deutlich, dass in den Hochlagen noch viel SWE vorhanden ist. In mehreren Elementen liegt noch mehr als 1000 mm SWE. Diese hohen SWE sind bei der Betrachtung der Karte des SWE_{SLF} nicht zu erkennen. Am Alpenhauptkamm zeigen sich hier zwar noch Bereiche mit Schnee, aber diese liegen unter 500 mm SWE. Bei der Betrachtung der Differenzkarte wird das Phänomen der starken Überschätzung des SWE_{LARSIM} , besonders deutlich. Es zeigen sich fast nur noch dunkelrote Bereiche, die eine starke Überschätzung von LARSIM anzeigen. Die anderen Jahre des Untersuchungszeitraumes zeigen auch die starke Überschätzung am Alpenhauptkamm (siehe Anhang). Zusätzlich sind in vielen Jahren in Graubünden und im Alpenvorland Bereiche mit einer leichten Unterschätzung des SWE_{LARSIM} deutlich zu erkennen.

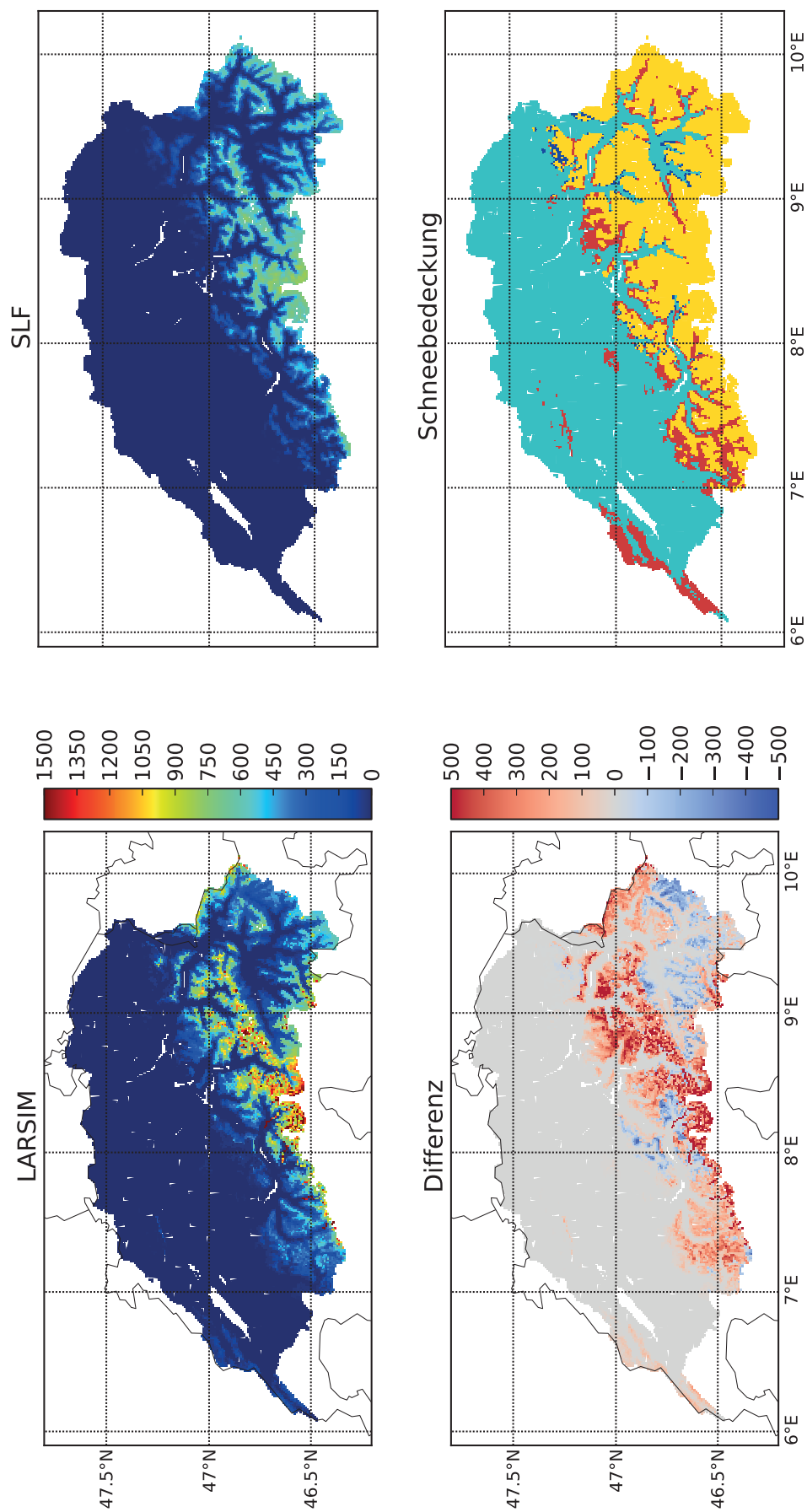


Abb. 4.6: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2003

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF} [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (blau), nur SLF-Produkt Schnee (rot), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

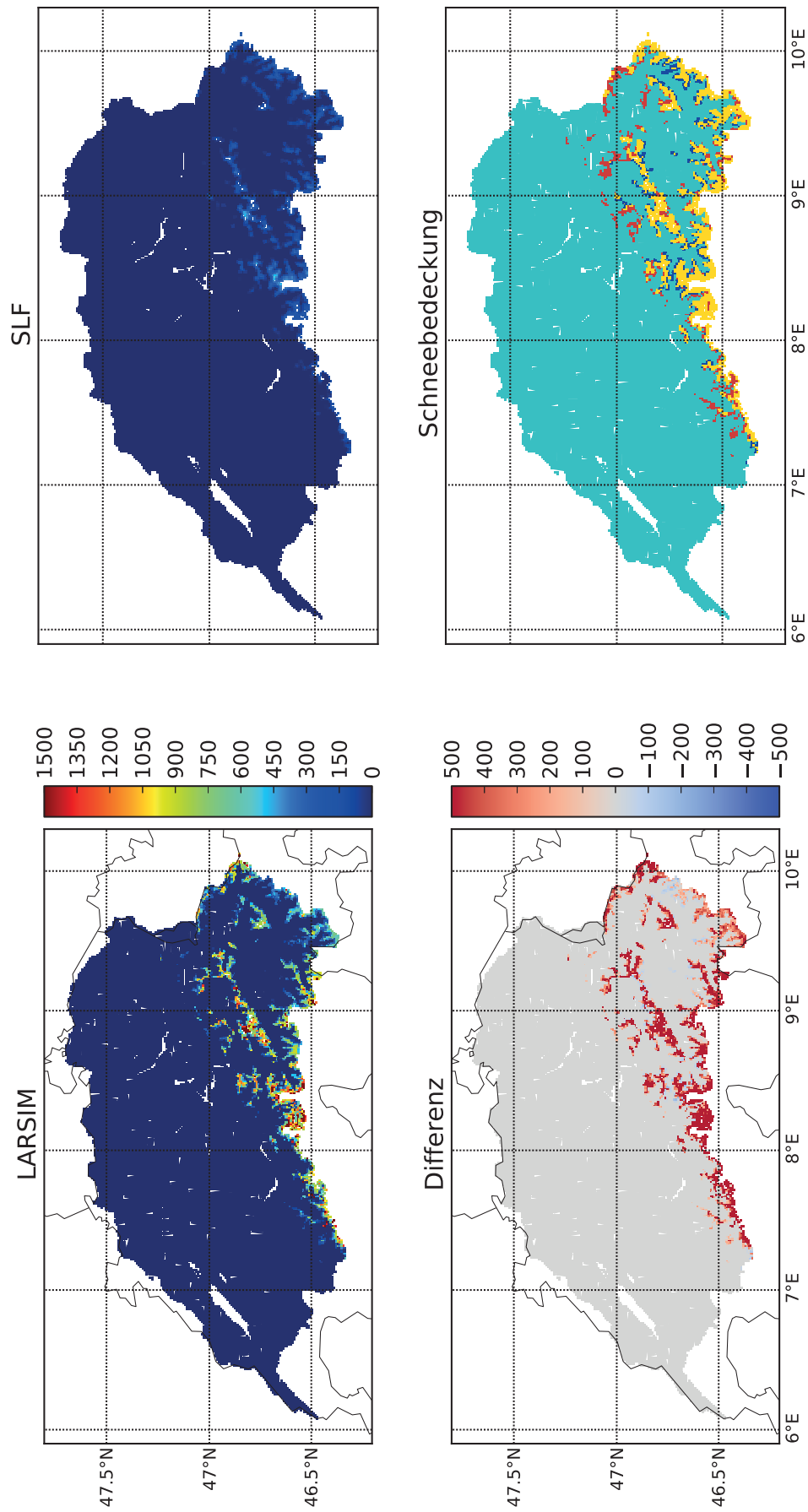


Abb. 4.7: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2003

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

Bei der Karte der Schneebedeckung zeigt sich dann aber, dass in den meisten Bereichen, bei denen es zu einer starken Überschätzung des SWE_{LARSIM} kommt, auch bei dem SLF-Produkt Schnee vorhanden ist. Einige Elemente zeigen dennoch nur eine Schneebedeckung bei LARSIM. Auffällig ist auch, dass es auch einzelne blaue Elemente gibt, bei denen nur das SLF-Produkt Schnee zeigt. An den Schneerändern der anderen Jahre des Untersuchungszeitraumes (siehe Anhang) zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Es sind kleine Bereiche vorhanden, in denen nur LARSIM oder nur das SLF-Produkt Schnee aufweist. Am 1. Juni 2002 zeigt das SLF-Produkt eine großflächigere Schneedecke und am 1. Juni 2006 überwiegt die in LARSIM. Da es sich bei allen Jahren und Tagen um eine Momentaufnahme handelt, können nicht unbedingt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der Schneedecke gezogen werden. Es zeigt sich nur, dass es keine eindeutige Tendenz für eine Über- oder Unterschätzung der Schneedeckenausdehnung gegen Ende der Schmelzphase gibt, bzw. im Mittel die Schneedeckenausdehnung sehr ähnlich ist.

Bei der Betrachtung des „Films der Differenzen“ (CD im Anhang) zeigt sich der zeitliche Verlauf der Differenzen sehr deutlich. Die zuvor beschriebenen Phänomene zeigen sich auch hier. Dennoch wird deutlich, dass es sich immer um Momentaufnahmen handelt. Niederschlagsereignisse sind in dem „Film“ mit deutlichen Diskrepanzen zu erkennen. Die Bereiche, die eher zu einer Überschätzung bzw. Unterschätzung neigen, werden sichtbar. In Abb. 4.8 ist eine Karte aus dem „Film“ dargestellt. Sie verdeutlicht die typische Tendenz, wonach es am Alpenhauptkamm häufig zu merklichen Überschätzungen kommt, während in Graubünden und im Alpenvorland häufig (leichte) Unterschätzungen vorliegen. Bei der Betrachtung des „Filmes“ wurde auch deutlich, dass die Überschätzungen im Laufe der Winterperiode im Bereich des Alpenhauptkammes immer stärker werden. Dies ist wahrscheinlich auch darauf zurückzuführen, dass diese Elemente in LARSIM später abschmelzen als im SLF-Produkt.

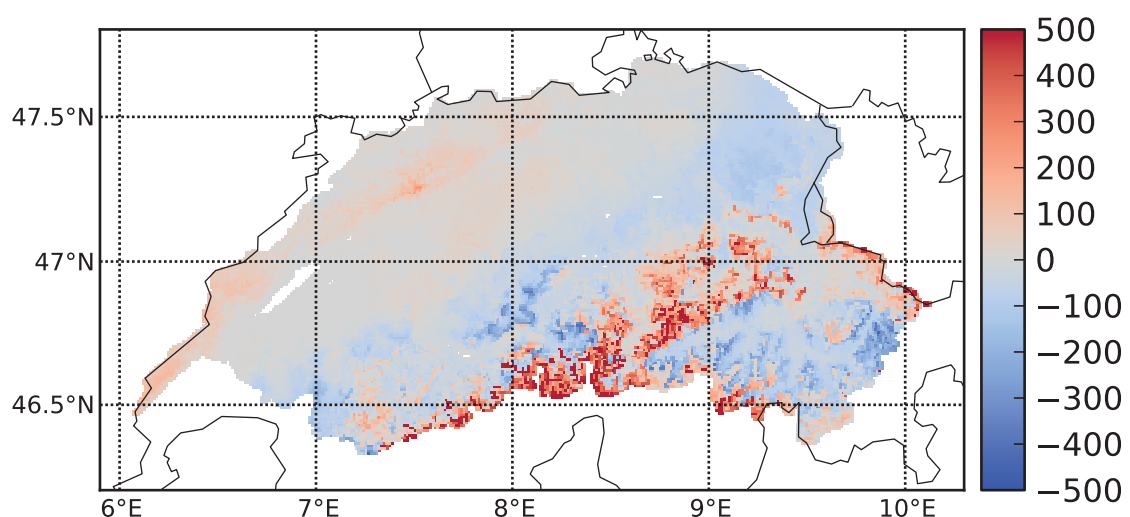


Abb. 4.8: Differenzkarte vom 24. Februar 2003 aus dem „Film der Differenzen“.

In Abb. 4.9 bis Abb. 4.11 sind Boxplots der SWE-Differenzen für den 15. Dezember, den 7. April und den 1. Juni für alle acht Winterperioden des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Abgebildet sind immer der Median, das 25/75-Perzentil (Box), das 10/90-Perzentil (kleine Box) und das 5/95-Perzentil (Strich). Um eine gute Lesbarkeit zu ermöglichen wurden die Ausreißer und Maxima bzw. Minima nicht mit dargestellt. Bei der Betrachtung der Differenzen zeigen die positiven Werte eine Überschätzung des SWE_{LARSIM} und die negativen eine Unterschätzung. Neben grundlegenden Tendenzen verdeutlichten die Box-Plots auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Wintern. So fallen beispielsweise die schneearmen Winter 2002/2003 und 2004/2005, durch häufige Nullwerte (kein Schnee in beiden Modellen) und geringe Spannweiten auf. Die Akkumulationsphase am 15. Dezember in Abb. 4.9 zeigt die Tendenz, dass mehr positive Differenzen vorhanden sind, also eine Überschätzung von LARSIM überwiegt. Es liegt keine symmetrische Verteilung vor. Vielmehr liegt der Median meist über Null und die Verteilung weist eine Schiefe auf der Seite positiver Werte (Überschätzung) auf. Das heißt Überschätzungen treten im Allgemeinen häufiger auf und sind tendenziell höher.

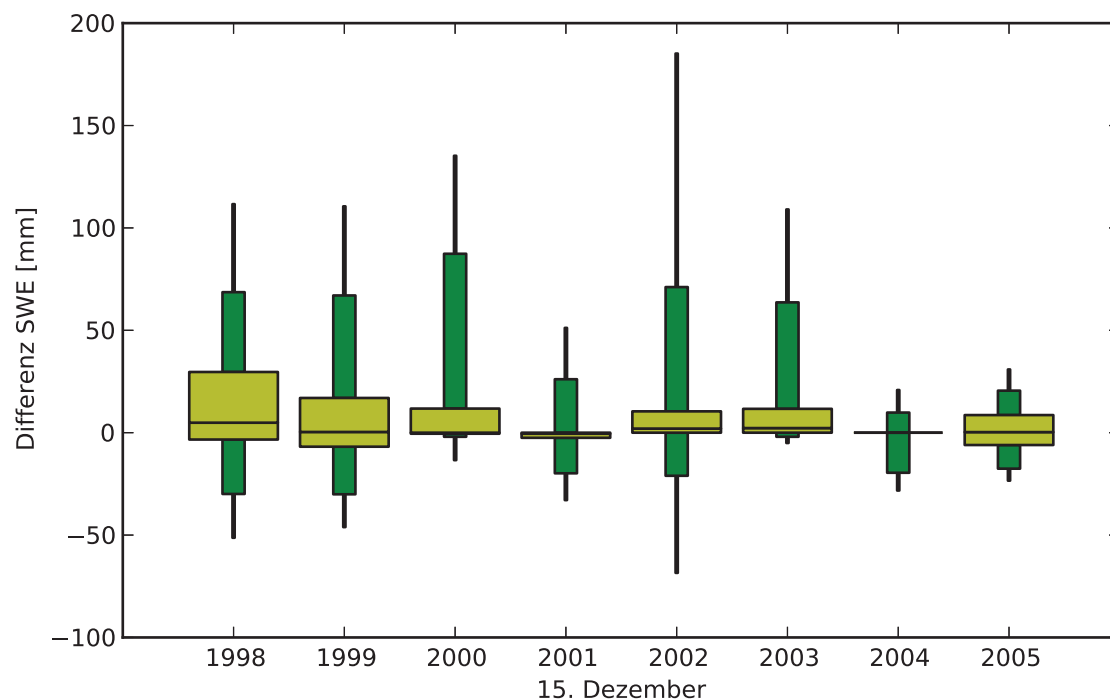


Abb. 4.9: Boxplot für den Schneedeckenaufbau vom 15. Dezember.

In Abb. 4.10 mit dem Boxplots des 7. April, ist die Schiefe hin zu positiven Differenzen noch stärker ausgeprägt als in Abb. 4.9. In Abb. 4.11 mit den Boxplots der Schneeschmelze am 1. Juni 2003, zeigt sich dieser Trend dann nochmals verstärkt. Hier liegen die meisten Werte bei Null, da kaum noch Schnee vorhanden ist. Wenn jedoch Fehleinschätzungen auftreten, handelt es sich fast ausschließlich um Überschätzungen. Hier sind fast alle Perzentile nur noch im positiven Differenzbereich erkennbar. Insgesamt lässt sich von den Abb. 4.9 bis Abb. 4.11 ableiten, dass die Differenzen mit einer Überschätzung des SWE_{LARSIM} im Laufe der Winterperiode, besonders bei der Schmelzperiode zunehmen.

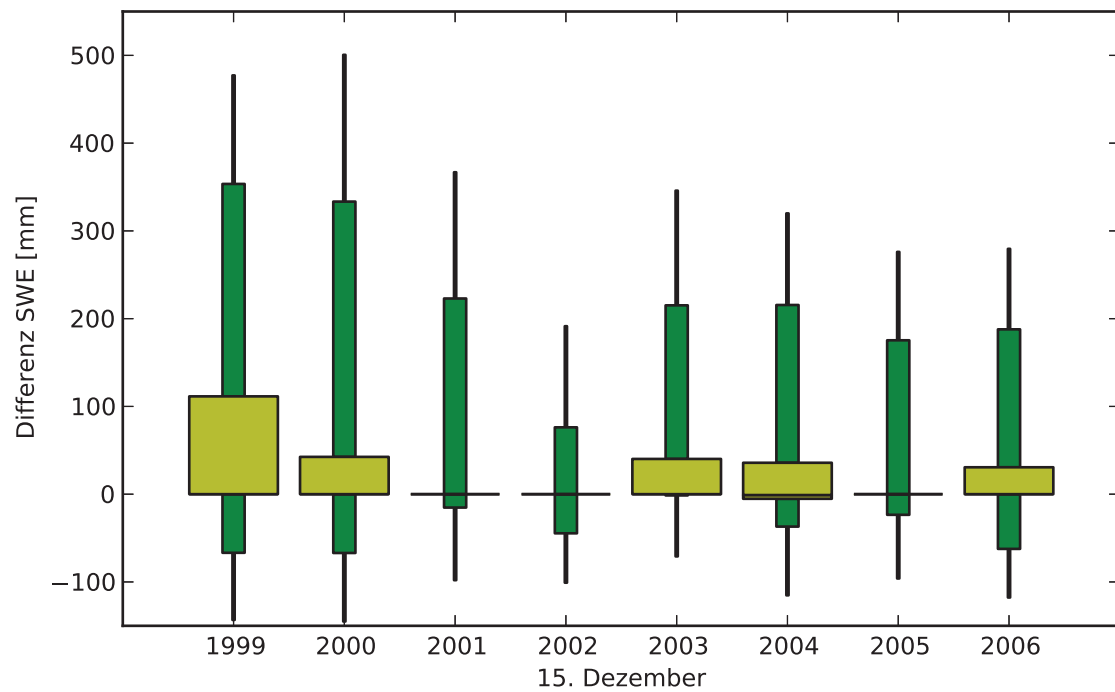


Abb. 4.10: Boxplot für die maximale Schneebedeckung am 7. April.

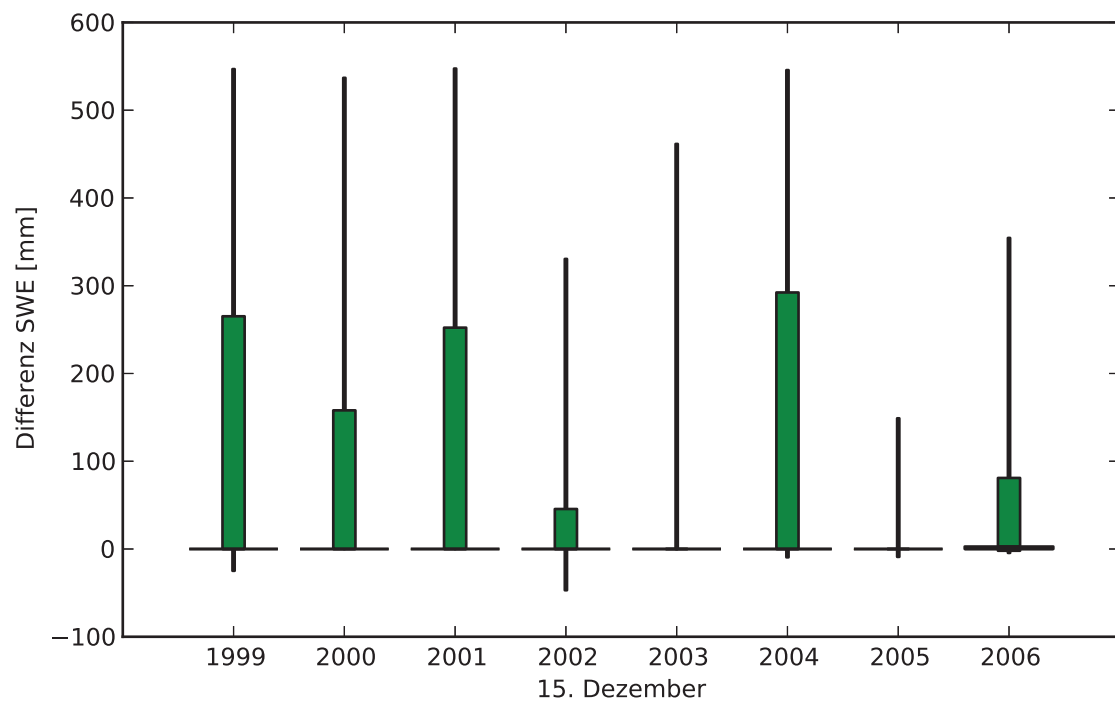


Abb. 4.11: Boxplot für die Scheeschmelze am 1. Juni.

4.3.2 Auswertung der Differenzen und Fehlermaße für die Korrelationsanalyse

Als weitere erste räumliche Auswertung werden im Folgenden die Differenzen und Fehlermaße, die für die weiteren Analysen genutzt wurden, räumlich dargestellt. In Abb. 4.12 bis Abb. 4.15 sind die Differenzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} dargestellt. Abbildung 4.12 zeigt die nach Gl. (3.6) bestimmten maximalen Differenzen des Untersuchungsgebietes. Das heißt, für jedes Element ist der höchste Wert der gesamten Zeitreihe dargestellt, sie entsprechen demnach nicht alle dem selben Tag. Besonders auffällig sind die roten Bänder entlang der Aare und der Reuss. Die Differenzen sind mit über 1700 mm SWE sehr hoch. Im Mittelland kommt es außer entlang der roten Bänder zu eher geringen maximalen Überschätzungen des SWE_{LARSIM} . Die größte maximale Differenz (= maximale Überschätzung) liegt auch im Bereich des Alpenhauptkammes vor.

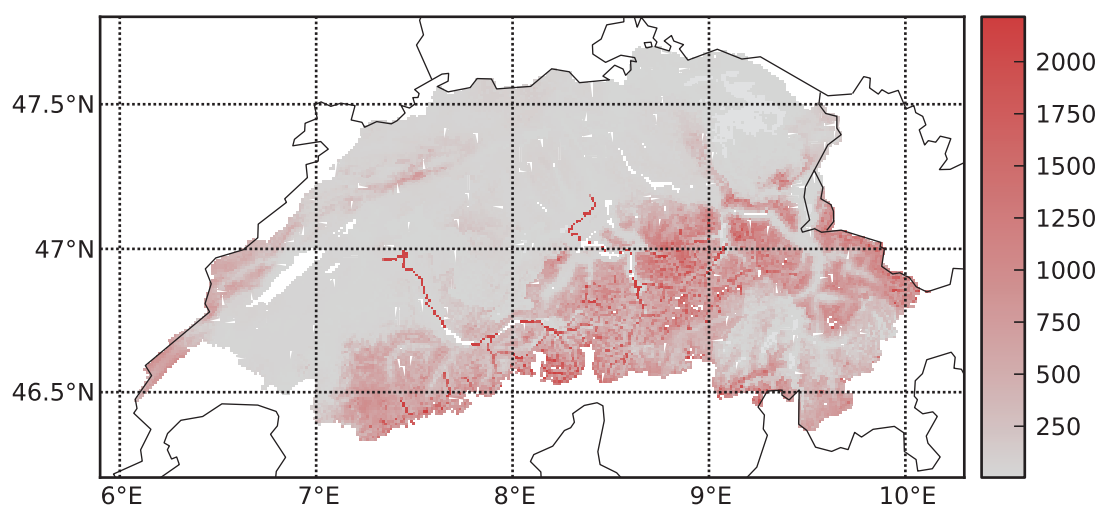


Abb. 4.12: Räumliche Darstellung der maximalen Differenz (DIF_{max}) [mm] des Untersuchungsgebietes.

Abbildung 4.13 zeigt die nach Gl. (3.7) bestimmten minimalen Differenzen, das heißt die größten Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} . Auch hierbei handelt es sich bei jedem Element um die negativsten Differenz, die innerhalb des Untersuchungszeitraumes auftritt. Im Bereich des Mittellands zeigen sich so gut wie keine Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} . Die Bereiche mit den stärksten Unterschätzungen liegen im Alpenvorland, in Graubünden und in den Tallagen der höheren Gebiete. Diese Bereiche waren auch bei der Auswertung der Differenzenkarten besonders in Abb. 4.8 sichtbar. Es ist jedoch auffällig, dass die starke Unterschätzung im nord-östlichen Teil des Untersuchungsgebietes bei der Differenzenkarte weniger ausgeprägt sichtbar ist.

In Abb. 4.14 sind die nach Gl. (3.8) bestimmten mittleren Abweichungen dargestellt. Die Farbskala wurde zur besseren Visualisierung angepasst, mit einem Maximum von 500 mm SWE (Maximum von $|DIF_{mean}|$ 1023 mm). Die Abweichungen stellen die Beträge der Abweichungen und nicht die Über- bzw. Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} dar. In dem Bereich des Alpenhauptkammes sind deutliche Diskrepanzen zu erkennen. Weitere, aber nicht so ausgeprägte Abweichungen zeigen sich im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes, in Graubünden und im Westen im Bereich des Schweizer Jura.

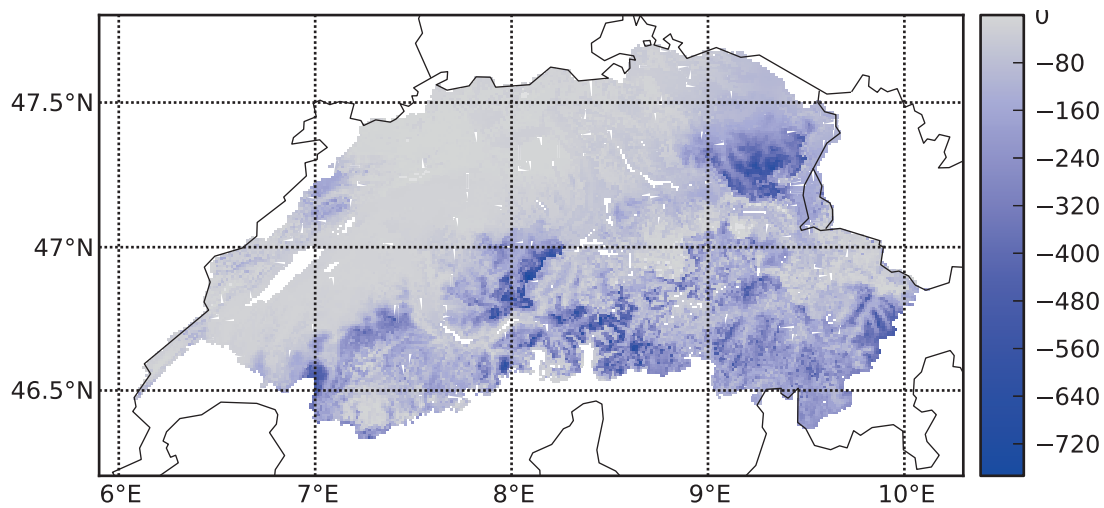


Abb. 4.13: Räumliche Darstellung der minimalen Differenz (DIF_{min}) [mm] des Untersuchungsgebietes.

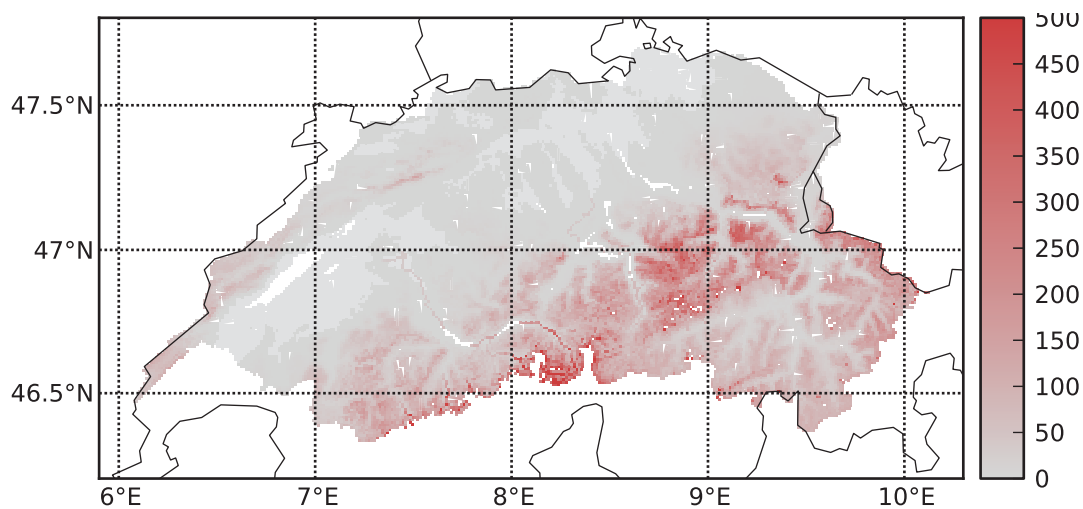


Abb. 4.14: Räumliche Darstellung des Betrags der mittleren Differenz ($|DIF_{mean}|$) [mm] des Untersuchungsgebietes.

Die nach Gl. (3.9) bestimmten mittleren Differenzen sind in Abb. 4.15 dargestellt. Die Farbskala wurde zur besseren Visualisierung und um die Bereiche der starken Über- und Unterschätzung besser zu verdeutlichen von -500 mm bis +500 mm angepasst (DIF_{mean} reales Maximum: 1022 mm Minimum: -215 mm). Jedes Element zeigt hier den Mittelwert über die acht Jahre des Untersuchungszeitraumes. Die höchste mittlere Überschätzung liegt bei 1022 mm und die stärkste Unterschätzung bei -215 mm. Bei dem Vergleich der mittleren Abweichung in Abb. 4.15 zeigt sich, dass der Bereich des Alpenhauptkamms wieder die größten mittleren Überschätzungen des SWE_{LARSIM} darstellt. Die Werte sind in Abb. 4.15 etwa gleich hoch wie in Abb. 4.14. Folglich handelt es sich in diesem Bereich um eine systematische Überschätzung des SWE_{LARSIM} . Im nordöstlichen Teil von Graubünden (südöstlicher Teil des Untersuchungsgebietes) zeigt sich eine Überschätzung des SWE_{LARSIM} . Nur wenige km weiter südlich kommt es bereits zu einer Unterschätzung. Im Alpenvorland liegen weitere Bereiche mit Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} . Im Bereich des Schweizer Juras (westlicher Teil des Untersuchungsgebietes) kommt es zu einer Überschätzung. Die zeitlich gemittelten Differenzen zeigen somit ein ähnliches räumliches

Muster wie die Auswertung für Stichtage.

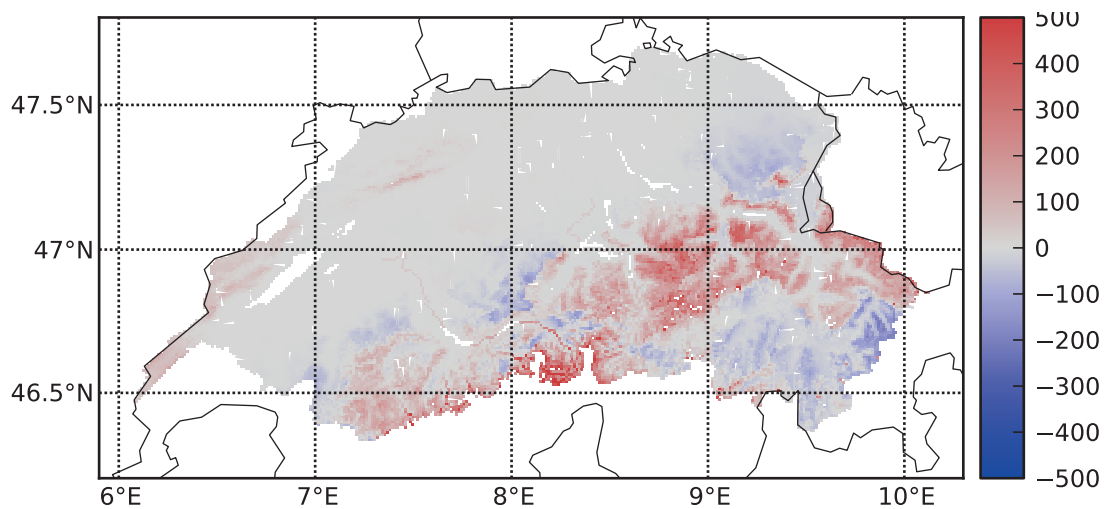


Abb. 4.15: Räumliche Darstellung der mittleren Differenz (DIF_{mean}) [mm] des Untersuchungsgebietes.

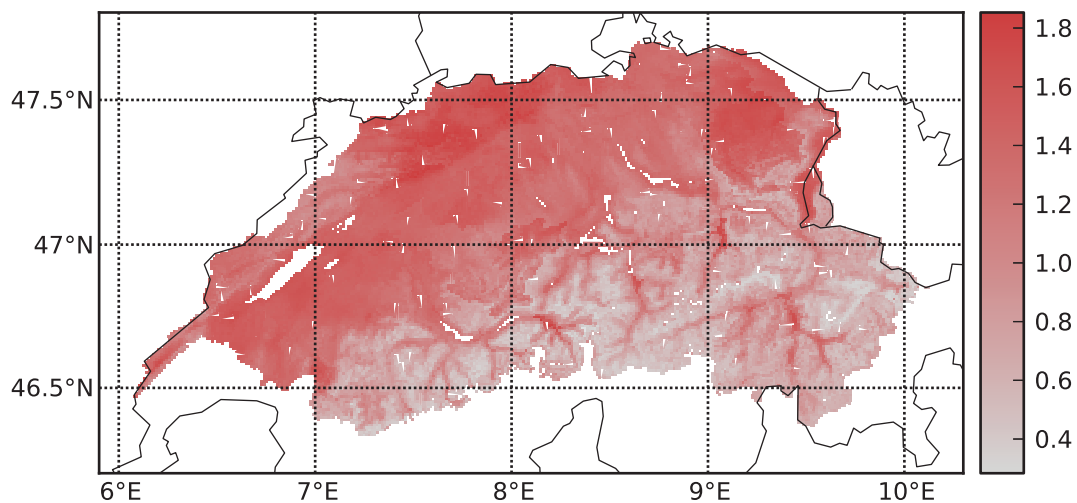


Abb. 4.16: Räumliche Darstellung des relativen Fehlers MAE_{norm} [mm] des Untersuchungsgebietes.

In Abb. 4.16 und 4.17 sind jeweils die berechneten relativen Fehlermaße MAE_{norm} nach Gl. (3.10) und ME_{norm} nach Gl. (3.11) räumlich dargestellt. In Abb. 4.16, ist der relative Fehler der Beträge abgebildet, es treten besonders große Fehler im Mittelland auf. Die tieferen Tallagen zeigen erhöhte Fehler. Besonders geringe relative Fehler zeigen sich in den höheren Lagen des Untersuchungsgebietes. Auffällig ist der hohe Fehler im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes.

In Abb. 4.17 werden die systematischen (Vorzeichen behafteten) relativen Abweichungen des ME_{norm} aufgezeigt. Es wird demnach visualisiert, in welche Richtung die Abweichungen des MAE_{norm} gehen. Dabei zeigen sich besonders hohe relative Überschätzungen in tiefer gelegenen Bereichen im Mittelland. Aber auch im Schweizer Jura und den Hochlagen des Alpenhauptkamms sind Überschätzungen deutlich erkennbar. Sehr starke Unterschätzungen sind im nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes sowie im Alpenvorland zu erkennen. Zudem zeigt sich im südlichen Graubünden eine Unterschätzung des SWE_{LARSIM} . Diese Bereiche decken sich mit

den Abweichungen der Differenzen allerdings mit dem Unterschied, dass die Stärke der Abweichungen anders gewichtet ist. In den Bereichen mit großen Schneemengen sind die relativen Abweichungen tendenziell geringer.

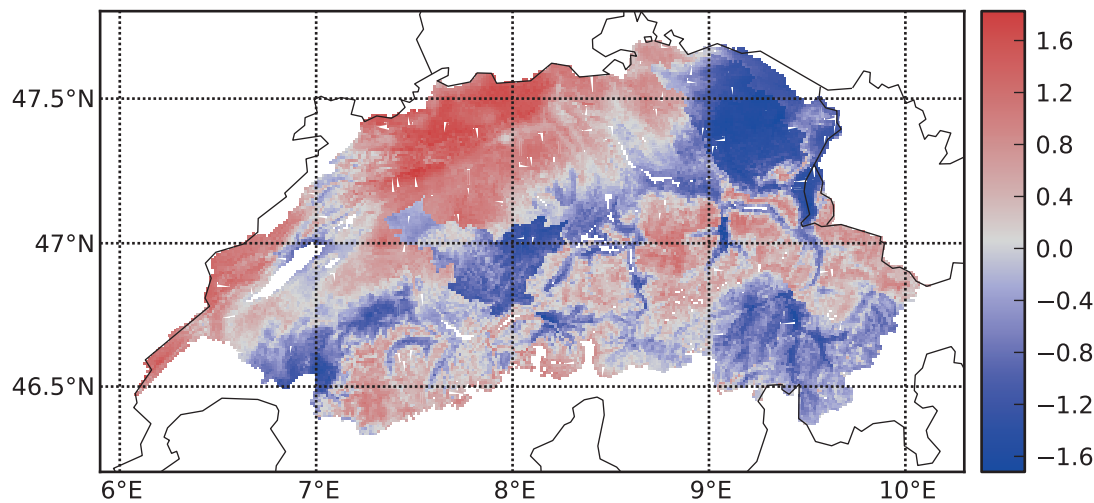


Abb. 4.17: Räumliche Darstellung des relativen Fehlers ME_{norm} [mm] des Untersuchungsgebietes.

Diskussion der räumlich dargestellten Differenzen und Fehlermaße

Aus den räumlichen Darstellungen der Differenzen (Abb. 4.12 bis Abb. 4.15) wird der Alpenhauptkamm als Überschätzungsbereich deutlich. Die Unterschätzungen sind deutlich geringer und befinden sich überwiegend im Alpenvorland und in Graubünden. Bei DIF_{max} sind extrem hohe Schneeakkumulationen nicht allein durch starken Schneefall und Schmelzen erklärbar. Hier zeigt sich offensichtlich das Phänomen des LARSIM-Moduls „Schneemassentransport“, das im Abschnitt 1.5.2 beschrieben wurde. Die großen Schneemengen sind in den hohen Lagen entstanden. Da hier aber oft ein stärkeres Gefälle herrscht, können nicht die ganzen Schneemassen in dem Element gehalten werden. Bei Überschreiten eines Schwellenwertes wird der zusätzliche Schnee an das nächste flussabwärts liegende Element weiter gegeben. Diese Weitergabe ist deshalb entlang der Flussläufe gut erkennbar (Überschätzungen entlang der Aare und Reuss). Die weißen Bereiche, welche die roten Bänder unterbrechen, zeigen Elemente, die nicht mit in die Auswertung eingeflossen sind. Entlang der Flüsse handelt es sich um Elemente, die in LARSIM als 100 % Wasserflächen ausgewiesen sind.

Bei den DIF_{min} waren die geringen Unterschätzungen des Mittellandes aufgrund der geringen Schneefälle in diesem Bereich zu erwarten. Einige der Unterschätzungen scheinen an einem Zeitpunkt besonders stark aufzutreten und im Mittel weniger stark ausgeprägt zu sein. Ein solcher Bereich liegt im Nordosten des Untersuchungsgebietes. Dieser Bereich zeigt sich besonders bei der Betrachtung der Fehlermaße (Abb. 4.15 und Abb. 4.17).

Bei den relativen Fehlern treten außerordentlich große Fehler im Mittelland auf, was aufgrund der geringen Schneemengen in diesem Gebiet zu erwarten war. In dem Bereich scheint es hauptsächlich eine Überschätzung des SWE_{LARSIM} zu geben. In den Tallagen, wo auch meist weniger Schnee vorhanden ist, kommt es hingegen zu einer Unterschätzung. Bei dem Vergleich der relativen Fehlermaße und Differenzen zeigt sich ein ähnliches räumliches Muster, wobei durch

die zusätzliche Betrachtung der relativen Fehler ein noch detailliertes Bild der Diskrepanzen abgebildet werden kann.

4.3.3 Korrelationsanalyse und lineare Regression (räumlich)

Bei der Betrachtung der Korrelationsmatrix (Tab. 4.3) ist zu beachten, dass im rechten oberen „Dreieck“ die Korrelation nach Pearson r (Gl. 3.12) und im unteren linken Bereich Kendall's τ (Gl. 3.14) dargestellt ist. Die beiden Korrelationen zeigen ähnliche Tendenzen, wobei wie erwartet die Korrelationen bei Kendall's τ geringer ausfallen als bei Pearson (siehe Abschnitt 3.4.2). Im Weiteren wird deshalb hauptsächlich auf den Korrelationskoeffizienten von Pearson eingegangen. Aus der Korrelationsmatrix lassen sich zwei Aspekte ableiten. Zum einen die Korrelation der Einflussfaktoren mit den Fehlermaßen, zum anderen die Korrelation der Einflussfaktoren untereinander.

Korrelation zwischen den Einflussfaktoren und den Differenzen sowie Fehlermaßen

Die Korrelationen zwischen Einflussfaktoren und Fehlermaßen in Tab. 4.3 zeigt, dass einige Einflussfaktoren eine besonders hohe, andere dagegen keine Korrelation mit den Fehlermaßen aufweisen. Sehr geringe Korrelationen liegen z.B. für die Exposition und der Differenz der Höhe vor. Die Abweichungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} können durch diese Faktoren demnach nicht erklärt werden. Die Exposition scheint bei einem 1x1 km Raster keine Auswirkungen auf die Unterschiede zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem des SWE_{SLF} zu haben. Es ist zu beachten, dass bei LARSIM und bei dem SLF-Produkt das SWE für eine ebene Fläche für jedes Rasterelement berechnet wird. Das heißt, dass bei beiden Berechnungen die Exposition nicht mit einbezogen wird. Die sehr geringe Korrelation der Differenz der Höhe zeigt, dass die Anpassung der Höhen und damit auch das Raster (Abschnitt 2.3.1) zu keiner maßgeblichen Beeinflussung der Ergebnisse führt.

Die größten Korrelationen zeigen sich für die Höhe und die Temperatur. Die beiden Einflussfaktoren können also potentiell einen Teil der Abweichungen erklären. Der stärkste statistische Zusammenhang zeigt sich bei dem Fehlermaß MAE_{norm} und den Differenzen $|DIF_{mean}|$ und DIF_{max} . Die stärkste Korrelation tritt mit $r = -0.85$ zwischen dem Fehlermaß MAE_{norm} und der Höhe auf. Das heißt, durch die Höhe können ca. 72% der Varianz des Fehlermaßes erklärt werden. Mit zunehmender Höhe verringert sich der relative Fehler. Bei geringen Höhen treten die höchsten relativen Fehler auf. Das heißt, dass bei dem relativen Fehler, in dem Abweichungen nach oben und unten gleichermaßen eingehen, die großen Höhen geringere relative Abweichungen aufweisen. Der relative Fehler ist in dem Bereich „Schnee-kein Schnee“ besonders groß. Dies wurde auch bei der räumlichen Betrachtung des Fehlers in Abb. 4.16 deutlich. Bei Betrachtung des Scatterplots (Abb. 4.18 a)) wird der negative lineare Zusammenhang deutlich. In besonders hohen Lagen über 3000 m scheint der Fehler jedoch wieder leicht anzusteigen. Da hier voraussichtlich sehr große Schneemengen vorhanden sind, müssen die Diskrepanzen dementsprechend auch besonders groß sein.

Tab. 4.3: Korrelationsmatrix zwischen möglichen Einflussfaktoren und Differenzen sowie Fehlermaßen der räumlichen Auswertung. Oberer rechter Bereich Korrelationskoeffizient r nach Pearson und unterer linker Bereich Kendall's τ (Werte größer bzw. kleiner ± 0.5 sind fett gedruckt, „< 0.1“ entspricht > -0.1 und $< +0.1$)

	Höhe	Dif. Höhe	Expo.	Hangn.	T_{Grenz}	Nied	Temp	Glob	DIF_{max}	DIF_{min}	DIF_{mean}	$ DIF_{mean} $	ME_{norm}	MAE_{norm}
Höhe		0.21	< 0.1	0.77	-0.38	0.41	-1.00	0.85	0.63	-0.50	0.41	0.74	< 0.1	-0.85
$DIF_{Höhe}$	0.11		< 0.1	0.25	< 0.1	0.13	-0.21	0.13	0.15	< 0.1	0.18	0.18	< 0.1	-0.15
Expo.	< 0.1	< 0.1		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Hangn.	0.62	0.14	< 0.1		-0.31	0.46	-0.76	0.58	0.50	-0.39	0.33	0.55	< 0.1	-0.72
T_{Grenz}	-0.28	< 0.1	< 0.1	-0.24		-0.29	0.39	-0.31	-0.15	0.44	< 0.1	-0.30	0.34	0.22
Nied	0.32	< 0.1	< 0.1	0.31	< 0.1		-0.40	0.15	0.54	-0.22	0.59	0.61	0.13	-0.40
Temp	-0.95	-0.11	< 0.1	-0.62	0.28	-0.33		-0.85	-0.63	0.49	-0.40	-0.73	< 0.1	0.84
Glob	0.59	< 0.1	< 0.1	0.39	-0.19	< 0.1	-0.58		0.47	-0.45	0.25	0.56	< 0.1	-0.71
DIF_{max}	0.54	0.13	< 0.1	0.48	< 0.1	0.40	-0.55	0.37		< 0.1	0.74	0.79	0.26	-0.56
DIF_{min}	-0.39	< 0.1	< 0.1	-0.29	0.36	-0.14	0.38	-0.30	< 0.1		0.27	-0.22	0.57	0.42
DIF_{mean}	0.19	0.10	< 0.1	0.20	0.21	0.35	-0.20	0.12	0.50	0.31		0.83	0.41	-0.30
$ DIF_{mean} $	0.72	0.11	0.02	0.56	-0.23	0.45	-0.72	0.45	0.63	-0.40	0.24		0.16	-0.54
ME_{norm}	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.33	0.10	< 0.1	< 0.1	0.26	0.51	0.53	0.53		< 0.1
MAE_{norm}	-0.63	< 0.1	< 0.1	-0.49	0.16	-0.27	0.62	-0.46	-0.49	0.41	-0.14	-0.52	< 0.1	

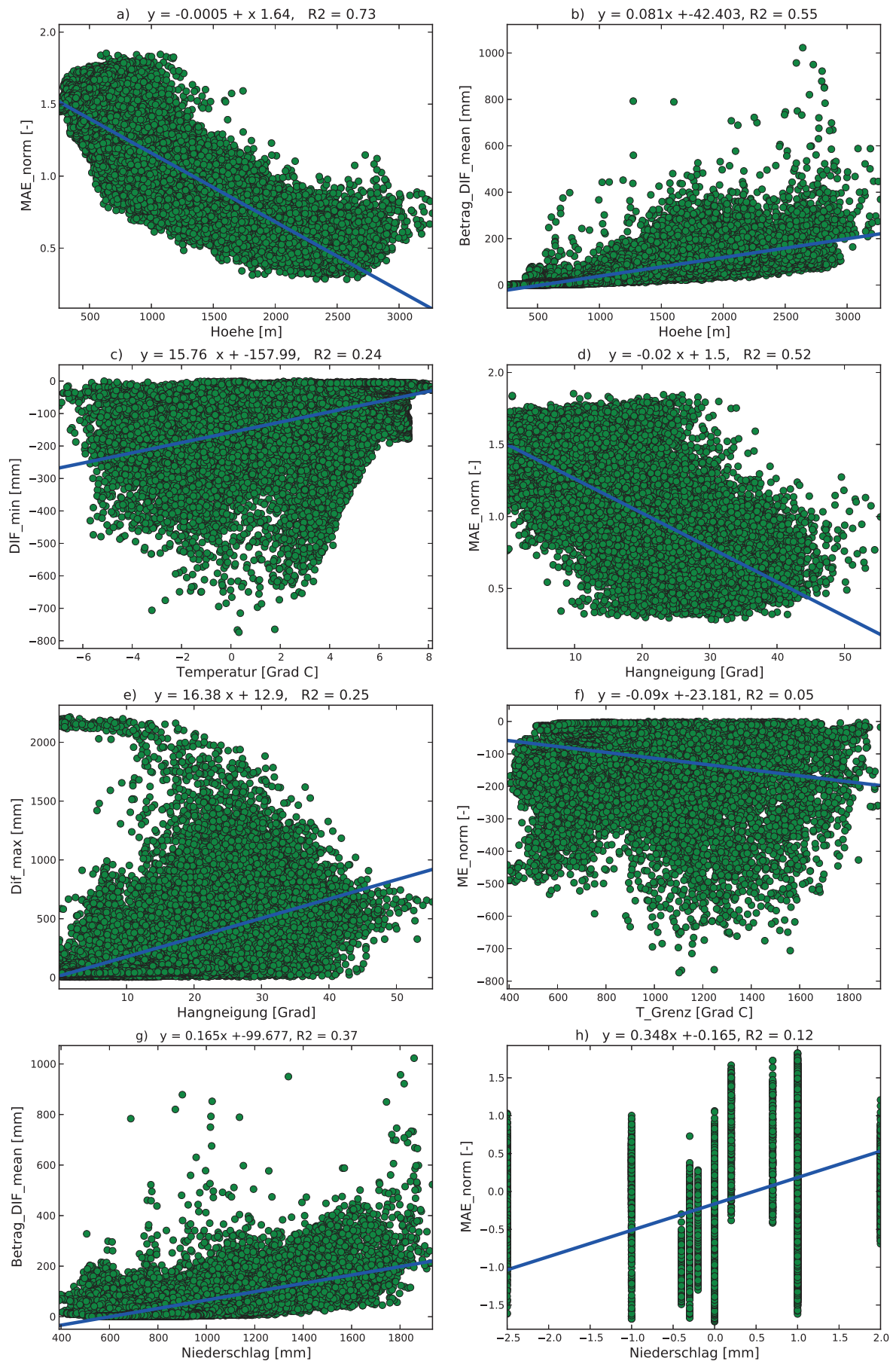


Abb. 4.18: Einflussfaktoren gegen Differenzen und Fehlermaße mit eingezeichneter linearer Regression, sowie Angabe der Regressionsgleichung und daraus resultierendem R^2 .

Wird jedoch der relative Fehler ME_{norm} verwendet, bei dem nicht der Betrag gebildet wird, ist keine Höhenabhängigkeit mehr erkennbar und es tritt keine Korrelation auf. Das heißt, es scheint keine Abhängigkeit der systematischen Fehler der Über- oder Unterschätzung durch LARSIM von der Höhe zu geben.

Neben den relativen Fehlern zeigt auch der $|DIF_{mean}|$ eine hohe positive Korrelation mit der Höhe. Die Diskrepanz, die durch die Beträge der Differenzen ausgedrückt werden, wird zu knapp 40 % durch die Höhe erklärt. In Abb. 4.18 b) zeigt sich ein weniger stark ausgeprägter linearer Zusammenhang als bei dem relativen Fehler MAE_{norm} . Es wird deutlich, dass es besonders in den höheren Lagen zu einer größeren Streuung und zu verstärkten Ausreißern kommt. In den niedrigen Lagen gibt es nur geringe Schneefällen, sodass die Abweichungen verhältnismäßig gering sind. Im Vergleich zu der Fehlerabnahme mit der Höhe kommt es hier zu einer Zunahme der Differenzen mit der Höhe. Dies war zu erwarten, da LARSIM in höheren Lagen zum Teil sehr große SWE modelliert. Die maximalen SWE_{SLF} liegen bei etwa 1 300 mm und das SWE_{LARSIM} bei über 2 000 mm.

Wie bei $|DIF_{mean}|$ und DIF_{max} kommt es auch bei DIF_{mean} mit Zunahme der Höhe zu größeren Differenzen. Das heißt, mit steigender Höhe überschätzt LARSIM das SLF-Produkt stärker. Dies zeigt sich in umgekehrter Weise auch bei DIF_{min} . Bei zunehmender Höhe steigt die Unterschätzung des SWE_{LARSIM} . Die absolute Abweichungen zwischen LARSIM zu dem SLF-Produkt scheinen sich mit zunehmender Höhe zu verstärken.

Die Temperatur zeigt einen ähnlichen Trend, aber in umgekehrter Weise. Bei einer Zunahme der Temperatur sinkt die Differenz. Temperaturen zeigen im negativen Bereich eine sehr viel größer Streuung. Bei der Unterschätzung von LARSIM (DIF_{min}) liegt die größte Streuung in dem Bereich der Grenztemperatur aus LARSIM $\pm 2^\circ\text{C}$. Dies wird in Abb. 4.18 c) besonders deutlich. Zudem zeigt sich, dass die Abhängigkeit nicht linear ist.

Mittlere Korrelationen treten bei der Hangneigung, der Globalstrahlung, dem Niederschlag und T_{Grenz} auf. Die Hangneigung und die Globalstrahlung zeigen ein sehr ähnliches Bild der Korrelationen. Bei einer Zunahme der Hangneigung sinkt das Fehlermaß MAE_{norm} , das heißt, je steiler die Hänge werden, desto geringer der relative Fehler. Dieser bedingt lineare Zusammenhang ist in Abb. 4.18 d) gut erkennbar. Wird dagegen in Abb. 4.18 e) die Hangneigung gegen die maximale Differenz dargestellt, zeigt sich kein linearer Zusammenhang. In dem Bereich zwischen 0° und 30° treten die höchsten Differenzen auf. Zudem kommt es zu ungewöhnlich starken Differenzen bei sehr geringen Hangneigungen. Dieser Bereich ist wahrscheinlich durch das Modul „Schneemassentransport“ aus LARSIM (siehe Abschnitt 1.5.2) bedingt. Da dadurch das Modul große Schneemengen in flache Gebiete weiter transportiert werden.

Der Niederschlag zeigt die größten Korrelationen mit $|DIF_{mean}|$, DIF_{mean} und DIF_{max} . Es zeigt sich eine positive Korrelation, bei der sich mit höheren Niederschlägen Differenzen vergrößern. Dies war zu erwarten, da ein hoher simulierter Niederschlag in LARSIM zu einem starken Schneedeckenaufbau führt. Je höher der Niederschlag ist, desto mehr Schnee kann aufgebaut werden, sodass hier auch große absolute Differenzen entstehen könne. Bei DIF_{min} zeigt sich, dass aufgrund der negativen Korrelation bei größeren Niederschlägen die minimale Differenz stärker negativ wird. Das heißt, mit zunehmender Niederschlagsmenge nehmen die maximalen Unterschätzungen tendenziell ab. In Abb. 4.18 f) wird deutlich, dass kein linearer Zusammen-

hang zwischen vorliegt, und kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Wird hingegen in Abb. 4.18 h) der Niederschlag gegen den Betrag der Differenz geplottet, zeigt sich ein linearer Trend. Dennoch zeigen sich auch hier Ausreißer, die bei geringen Niederschlägen zu hohen $|DIF_{mean}|$ führen. Vermutlich handelt es sich hier um tiefere Lagen mit geringem Niederschlag, die vom Schneemassentransport betroffen sind.

Bei der Betrachtung des Fehlermaßes ME_{norm} ist auffällig, dass nur T_{Grenz} eine nennenswerte Korrelation anzeigt. Da T_{Grenz} jeweils nur einen Wert pro PKB aufweist, ist die Auswertung über die Korrelation und Scatterplots nicht unbedingt aussagekräftig (Abb. ?? h)). Trotzdem soll sie unabhängig von dem Korrelationsergebnis bei den weiteren Analyse mit betrachtet werden.

Korrelation der Einflussfaktoren untereinander

Bei der Betrachtung der Einflussfaktoren untereinander ist besonders auffällig, dass die Höhe eine sehr starke Korrelation mit der Temperatur zeigt. Bei Pearson liegt die Korrelation zwischen Höhe und Temperatur bei -1.00 . Da hier eine starke Abhängigkeit vorliegt, sollte bei weiteren Analysen nur die Höhe oder die Temperatur verwendet werden. Die Höhe ist zu bevorzugen, da sie keinen zeitlichen Verlauf darstellt, der möglicherweise andere Fehler bergen könnte. Neben der Höhe und der Temperatur zeigen auch die Hangneigung und die Globalstrahlung eine hohe Korrelation mit diesen und untereinander. Bei steigender Höhe nimmt die Globalstrahlung und die Hangneigung zu. Da diese Faktoren eine Korrelation untereinander aufzeigen, ist nicht klar zu trennen in wie weit die Korrelation von der Höhe beeinflusst ist. Dieses sollte bei den weiteren Auswertungen beachtet werden, führt aber nicht zu dem Ausschluss der Faktoren für weitere Analysen. Die Exposition zeigt keine Korrelation mit anderen Einflussfaktoren auf. Das heißt, die Exposition ist statistisch nicht durch andere Einflussfaktoren bedingt.

4.3.4 Multiple lineare Regression (räumlich)

Aufgrund der verschiedenen Fehlermaße wurden zwei verschiedene multiple lineare Regressionsmodelle aufgestellt. Zum einen wurde ein Modell mit dem Fehlermaß MAE_{norm} , zum anderen mit der Differenz $|DIF_{mean}|$ erstellt, welche die höchsten Korrelationen mit den Einflussfaktoren aufweisen.

Multiple lineare Regression mit dem relativen Fehlermaß MAE_{norm}

Als zu erklärendes Fehlermaß wurde MAE_{norm} für die multiple lineare Regression ausgewählt, da es die stärksten Korrelationen mit den Einflussfaktoren aufweist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 nach Gl. (3.17) der linearen Regression für das relative Fehlermaß MAE_{norm} ist in Tab. 4.4 in der ersten Spalte unter „1. Prädiktor“ aufgeführt. Der $RMSE$ nach Gl. (3.18) ist in der selben Weise in Tab. 4.5 dargestellt. Die weiteren Spalten zeigen das schrittweise Vorgehen der multiplen linearen Regression. Im ersten Schritt wurde der Prädiktor Höhe aufgrund des höchsten R^2 sowie dem niedrigsten $RMSE$ gewählt. Der Prädiktor Höhe kann bereits 72 % der Varianz des relativen Fehlers MAE_{norm} erklären. Bei dem nächsten Schritt der multiplen linearen Regression zeigt sich, dass die Hinzunahme der Temperatur keine große Verbesserung in der Anpassung des multiple lineare Regressionsmodell ermöglicht. Obwohl das R^2 der Temperatur bei dem ersten

Schritt fast so hoch war wie das der Höhe. Es wird die starke Abhängigkeit von Temperatur und Höhe deutlich. Als zweiter Prädiktor wurde aufgrund der stärksten Erhöhung des R^2 , T_{Grenz} gewählt. Die Grenztemperatur scheint einen Einfluss auf den relativen Fehler zu haben, auch wenn dieser mithilfe der Korrelation nicht zum Ausdruck gebracht werden konnte. Als weiterer Prädiktor wurde die Hangneigung hinzugenommen. Dieser führte zu einer weiteren Verbesserung des linearen Regressionsmodells. Ein vierter Prädiktor wurde nicht gewählt, da keine starke Verbesserung der Anpassung erfolgt. Es hat sich gezeigt, dass die Prädiktoren Höhe, T_{Grenz} und Hangneigung den größten Einfluss auf den relativen Fehler MAE_{norm} haben und 75 % dessen Varianz erklären können.

Tab. 4.4: Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers MAE_{norm} mit Angabe des R^2

R^2	1. Prädiktor	2. Prädiktor	3. Prädiktor	4. Prädiktor
Höhe	0.726			
T_{Grenz}	0.05	0.738		
Hangneigung	0.525	0.738	0.751	
Temperatur	0.713	0.736	0.744	0.755
Niederschlag	0.158	0.729	0.743	0.753
Exposition	0.001	0.727	0.738	0.751
Globalstrahlung	0.507	0.727	0.739	0.751

Tab. 4.5: Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers MAE_{norm} mit Angabe des $RMSE$

$RMSE$	1. Prädiktor	2. Prädiktor	3. Prädiktor	4. Prädiktor
Höhe	0.195			
T_{Grenz}	0.363	0.191		
Hangneigung	0.257	0.191	0.186	
Temperatur	0.199	0.192	0.188	0.184
Niederschlag	0.342	0.194	0.189	0.185
Exposition	0.372	0.195	0.191	0.186
Globalstrahlung	0.261	0.195	0.19	0.186

Als Ergebnis der Auswertung des relativen Fehlers MAE_{norm} ergibt sich folgende multiple lineare Regressionsgleichung:

$$MAE_{norm} = 1.69 - 5.02 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Höhe} - 6.04 \cdot 10^{-2} \cdot T_{Grenz} + 8.59 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Hangneigung} \quad (4.1)$$

Mit zunehmender Höhe und zunehmender T_{Grenz} nimmt der Fehlermaß also ab. Wohingegen die relativen Fehler mit der Hangneigung zu nehmen.

In Abb. 4.19 ist ein Scatterplot mit den Ergebnissen des multiplen linearen Regressionsmodells gegen das Fehlermaß MAE_{norm} dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Großteil der Varianz des Fehlers erklärt wird, aber durchaus Abweichungen zu der 1:1-Geraden vorliegen. Es sind aber keine extremen Ausreißer erkennbar.

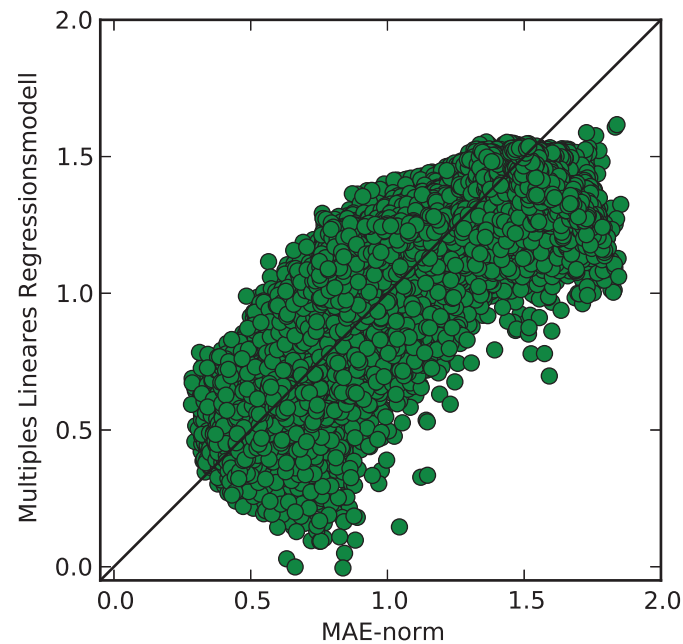


Abb. 4.19: Multiple linearen Regression gegen den relativen Fehler MAE_{norm} mit 1:1-Geraden.

Multiple lineare Regression mit dem mittleren Betrag der Differenz

Neben dem multiplen linearen Regressionsmodell mit dem relativen Fehler, wurde auch ein Modell für die Differenzen entwickelt. Bei der Korrelationsanalyse zeigt der mittlere Betrag der Differenzen die höchsten Korrelationen mit den Fehlermaßen, sodass dieser für die Aufstellung des multiplen linearen Regressionsmodells genutzt wird. In Tab. 4.6 und Tab. 4.7 ist das schrittweise Vorgehen bei der Erstellung des Regressionsmodells aufgeführt. Auch bei $|DIF_{mean}|$ ergibt sich das höchste R^2 und der niedrigste Wert des $RMSE$ bei der einfachen linearen Regression mit der Höhe. Diese kann bereits über 50 % der Varianz von $|DIF_{mean}|$ erklären. Als zweiter Prädiktor wurde der Niederschlag gewählt. Dadurch kam es zu einer starken Verbesserung der Modellanpassung und 66 % der Varianz von $|DIF_{mean}|$ können mit den beiden Prädiktoren erklärt werden. Als dritter Prädiktor wurde die Hangneigung hinzugenommen, die zu einer leichten Erhöhung von R^2 führte. Ein vierter Prädiktor wurde aufgrund der sehr geringen Verbesserung der Modellanpassung nicht gewählt. Die Prädiktoren Höhe, Niederschlag und Hangneigung zeigen den größten Einfluss auf $|DIF_{mean}|$ und können 67 % der Varianz erklären.

Tab. 4.6: Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers $|DIF_{mean}|$ mit Angabe des R^2

R^2	1. Prädiktor	2. Prädiktor	3. Prädiktor	4. Prädiktor
Höhe	0.546			
Niederschlag	0.372	0.659		
Hangneigung	0.303	0.547	0.672	
T_{Grenz}	0.088	0.546	0.661	0.673
Exposition	0.001	0.546	0.66	0.672
Globalstrahlung	0.311	0.564	0.659	0.672
Temperatur	0.539	0.548	0.659	0.672

Tab. 4.7: Schritte der multiplen linearen Regression des relativen Fehlers $|DIF_{mean}|$ mit Angabe des $RMSE$

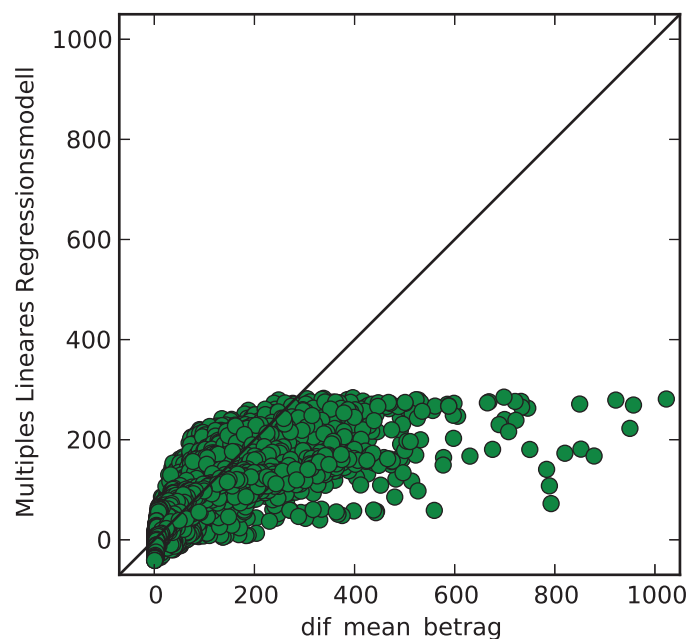
$RMSE$	1. Prädiktor	2. Prädiktor	3. Prädiktor	4. Prädiktor
Höhe	48.9			
Niederschlag	57.5	42.3		
Hangneigung	60.5	48.8	41.5	
T_{Grenz}	69.2	48.8	42.2	41.4
Exposition	72.5	48.8	42.3	41.5
Globalstrahlung	60.2	47.9	42.3	41.5
Temperatur	49.2	48.7	42.3	41.5

Im Folgenden wird die multiple lineare Regressionsgleichung mit dem $|DIF_{mean}|$ nach Gl. (3.16) aufgeführt:

$$|DIF_{mean}| = -117 + 0.08 \cdot \text{Höhe} + 0.1 \cdot \text{Niederschlag} - 1.2 \cdot \text{Hangneigung} \quad (4.2)$$

Der Betrag der Differenz nimmt also mit der Höhe und steigendem Niederschlag zu, während die Differenz mit zunehmender Hangneigung geringer wird.

Abbildung 4.20 zeigt das Ergebnis der multiplen linearen Regression gegen den mittleren Betrag der Differenz. Das Regessionsmodell kann 67 % der Varianz von $|DIF_{mean}|$ erklären. Die in Abb. 4.20 deutlich sichtbaren Ausreißer können durch das Regessionsmodell nicht erklärt werden. Diese sind wahrscheinlich durch den in LARSIM implementierten „Schneemasssentransport“ (siehe Abschnitt 1.5.2) begründet. Daher ist auch zeigt sich kein Zusammenhang mit Niederschlag und Höhe. Dieses Phänomen ist nicht durch die Gebietseigenschaften erklärbar.

Abb. 4.20: Multiple lineare Regression gegen den Betrag der Differenz ($|DIF_{mean}|$) mit 1:1-Geraden.

Bei dem Vergleich der beiden Regressionsmodelle zeigt sich, dass die Höhe ein sehr wichtiger Einflussfaktor für den Vergleich des SWE_{LARSIM} und des SWE_{SLF} ist. Beim relativen Fehler MAE_{norm} zeigt sich ein negativer Zusammenhang, das heißt mit zunehmender Höhe wird der relative Fehler geringer. Mit einem R^2 von 0.7 zeigt die Höhe einen sehr viel stärkeren Einfluss auf MAE_{norm} als die Höhe zu $|DIF_{mean}|$ mit einem R^2 von 0.5. Zudem liegt ein positiver Zusammenhang zwischen $|DIF_{mean}|$ und der Höhe vor. Als zweiten Prädiktor dient bei $|DIF_{mean}|$ der Niederschlag und bei MAE_{norm} die T_{Grenz} als Prädiktor. Dies ist interessant, da die Kombination der beiden dazu führt, ob es einen Schnee-Input im Modell gibt oder nicht. Der $|DIF_{mean}|$ als absoluter Wert reagiert besonders sensitiv auf die Input-Mengen. Der relative Fehler MAE_{norm} zeigt hingegen große Fehler in Bereichen mit wenig Schneefall. Hier scheint die T_{Grenz} eine sehr viel wichtigere Größe zu sein. Dies ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, dass es in niedrigen Lagen verstärkt zu Niederschlägen um die 0°C kommt und somit T_{Grenz} sehr entscheidend ist. Als dritten Prädiktor kommt bei beiden Regressionsmodellen die Hangneigung hinzu. Es wird somit deutlich, dass auch diese einen Einfluss auf den Vergleich des SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} hat.

4.4 Zeitliche Auswertung

4.4.1 Auswertung einzelner Elemente

In Abb. 4.21 sind die Scatterplots verschiedener Rasterelemente, die in Tab. 3.3 beschrieben und in Abb. 3.1 räumlich dargestellt sind, aufgeführt. In allen ist das SWE_{LARSIM} über SWE_{SLF} eines bestimmten Elementes über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1998 bis 2006 (nur Winterzeitraum 01.11. bis 15.06.) aufgetragen. Zu beachten ist, dass die Achsen in den einzelnen Grafiken unterschiedlich skaliert sind. Wenn das SWE_{LARSIM} sehr gut mit dem SWE_{SLF} zusammen passt, liegen alle Punkte sehr nahe an der 1:1-Geraden. Bei Überschätzungen liegen die Punkte oberhalb der 1:1-Geraden und bei der Unterschätzung unterhalb.

Die Elemente 25168 und 19854 liegen in relativ niedrigen und flachen Gebieten des Mittellandes. Die Punkte entlang der Achsen zeigen, dass zum Teil nur bei LARSIM oder bei dem SLF-Produkt Schnee vorliegt. Die SWE-Mengen sind insgesamt gering. Auch wenn diese Elemente räumlich relativ weit von einander entfernt liegen (siehe Abb. 3.1), zeigen sie ein sehr ähnliches Verhalten.

Das Element 15188 liegt geografisch noch im Mittelland, es liegt jedoch deutlich höher als die Elemente 25168 und 19854. Im Scatterplot ist dabei ein ganz anderes Bild zu erkennen. Das SWE_{LARSIM} weist meist höhere Werte als das SWE_{SLF} auf, zudem zeigt sich ein leichter Hystereseeffekt. Unter dem aufsteigenden Ast der Hystereseurve ist der Bereich zu verstehen, bei dem LARSIM in der Akkumulationsphase mehr Schnee aufbaut, als das SLF-Produkt. Von Beginn an liegt eine Überschätzung in LARSIM vor. Kurz vor dem Scheitelpunkt der Hystereseurve nimmt das SWE_{SLF} im Gegensatz zum SWE_{LARSIM} nicht weiter zu. An dem Scheitelpunkt beginnt die Schmelzphase sowohl bei dem SWE_{SLF} als auch bei dem SWE_{LARSIM} .

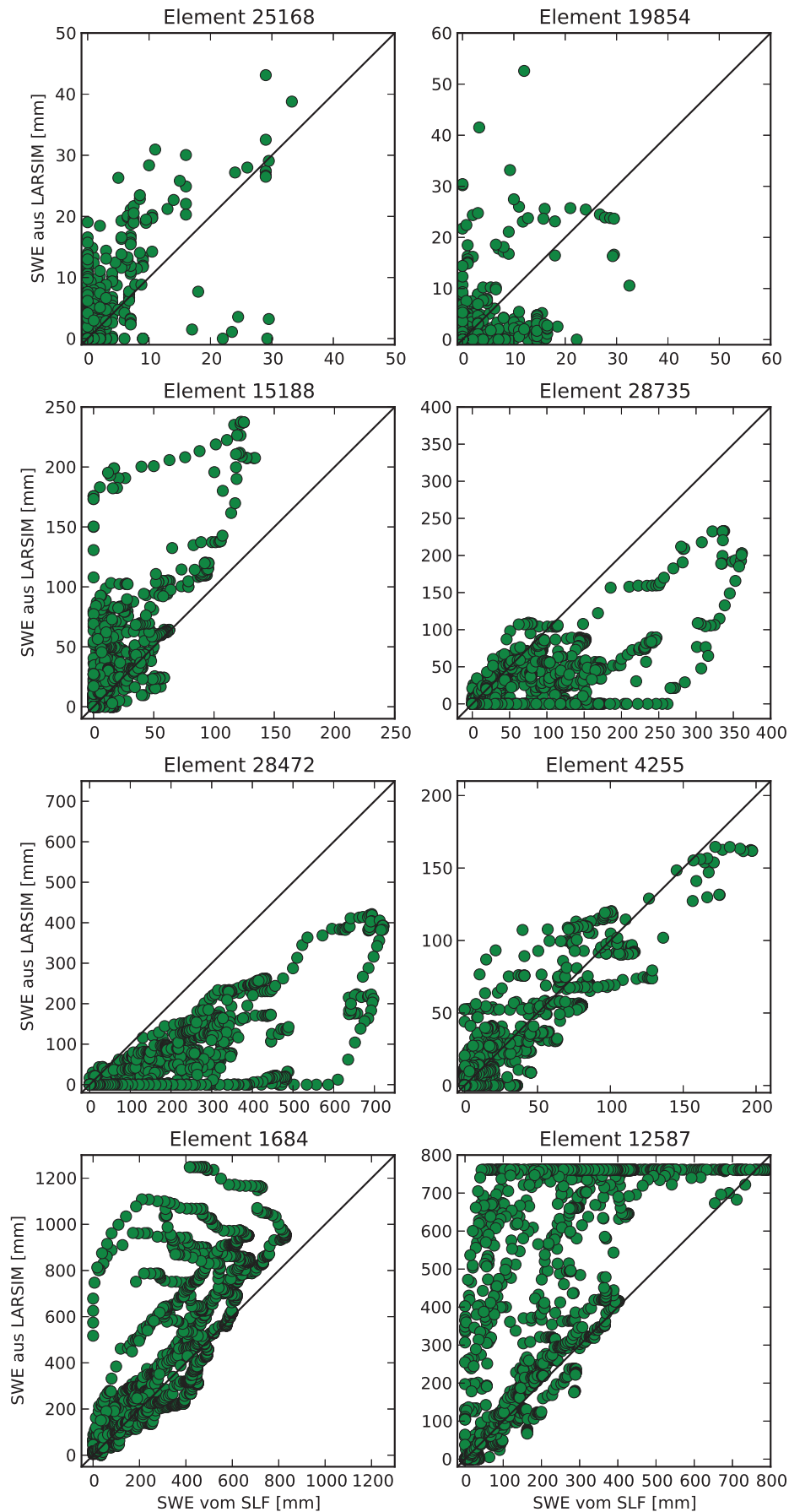


Abb. 4.21: Scatterplots des SWE_{LARSIM} über das SWE_{SLF} mit eingezeichneter 1:1-Geraden ausgewählter Elemente. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Achsen der einzelnen Elemente.

Durch die viel größere Schneedecke in LARSIM als bei dem SLF-Produkt, kommt es während der Schmelzphase weiter zu starken Überschätzungen. Wenn bei dem SLF-Produkt bereits kein Schnee mehr liegt, ist bei LARSIM noch ein SWE von etwa 170 mm vorhanden. Neben diesem Effekt ist auffällig, dass es viele Tage gibt, an denen nur in LARSIM Schnee vorhanden ist. Das SWE_{SLF} liegt an vielen Tagen bei Null, wohingegen bei LARSIM mit bis etwa 80 mm SWE relativ viel SWE vorhanden ist (ohne Beachtung des abschmelzenden Astes der Hysteresekurve).

Bei der Betrachtung der Scatterplots der Elemente 28735 und 28472 zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Sie liegen zwar geografisch relativ nah beieinander, unterscheiden sich aber in der Höhe. Das Element 28472 liegt 500 m über dem Element 28735. Bei beiden wird das SWE_{SLF} von LARSIM eher unterschätzt und ein Hystereseeffekt ist gut erkennbar. Bei der visuellen Analyse der Hysteresekurven wird jedoch nicht deutlich, in welche Richtung die Hysterese erfolgt. Es ist nicht auszumachen, ob LARSIM zu spät Schnee aufbaut oder ob dieser bereits früher abgeschmolzen ist. Deutlich ist aber die starke Unterschätzung durch LARSIM zu fast allen Zeitpunkten.

Das Element 4255 liegt im Tal des Alpenrheins. Im Scatterplot zeigt sich, dass das SWE_{LARSIM} gut mit denen des SWE_{SLF} zusammenpasst, sie liegen nahe der 1:1-Geraden. Im Scatterplot des Elementes 1684, welches in einer Höhe von über 2800 m liegt, ist der Hystereseffekt sehr ausgeprägt. Es scheint, als wären die einzelnen Akkumulations- und Schmelzphasen sichtbar. Auch lässt sich vermuten, dass bei der höchsten Hysteresekurve mit einem SWE_{LARSIM} von mehr als 1200 mm am Ende der untersuchten Winterperiode (15. Juni) bei LARSIM noch keine Schneeschmelze begonnen hat. Das SLF-Produkt hat hingegen viel früher mit der Schmelzperiode begonnen. Deutlich zeigt sich, dass es in dem Element (1684) hauptsächlich zu Überschätzung beim SWE_{LARSIM} kommt. Die Überschätzungen zeigen sich besonders deutlich bei dem rückläufigen Ast der Hysteresekurve, vermutlich bei der Schneeschmelze.

Das Element 12587 liegt in dem Bereich der höchsten Elemente (3661 m) des Untersuchungsgebietes, hat selbst jedoch nur eine mittlere Höhe von 2107 m. Es zeigt sich, dass bei geringeren SWE das SWE_{LARSIM} relativ gut mit denen des SWE_{SLF} zusammen passt. LARSIM simuliert jedoch oft sehr viel größere SWE, die dann nicht mehr mit dem SLF-Produkt übereinstimmen. Aufgrund der hohen SWE kommt es auch bei der Schmelze weiterhin verstärkt zu starken Überschätzungen in LARSIM.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich ein sehr unterschiedliches Bild an den einzelnen acht zufällig ausgewählten Elementen zeigt. Durchgehend gute Übereinstimmungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} zeigen sich nur an dem Element 4255. Bei einigen Elementen (15188, 1684, 12587) liegt eine starke Überschätzung des SWE_{LARSIM} vor. Eine Unterschätzung zeigt sich bei den an zwei Stellen (28735, 28472). Bei den Elementen in tieferen Lagen (25168, 19854) zeigen sich dann starke Unterschiede, wenn LARSIM schon Schnee simuliert im SLF-Produkt jedoch noch kein Schnee liegt oder umgekehrt (Punkte entlang der Achsen). Da es sich bei den Scatterplots um einzelne punktuelle Auswertungen handelt, können die Ergebnisse nicht unbedingt auf weitere Elemente übertragen werden. Dies wird bei dem Element 4255 in Tallage deutlich. Es zeigt eine gute Anpassung des SWE_{LARSIM} an das SWE_{SLF} . Bei der räumlichen Auswertung (Abschnitt 4.3) hat sich jedoch herausgestellt, dass es in Tallagen verstärkt zu Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} kommt.

Bei der Auswertung der Scatterplots ist auch wieder der Effekt der LARSIM-Option „Schneemassentransport“ (siehe Abschnitt 1.5.2) sichtbar (Element 12587). Bei dem in LARSIM implementierten „Schneemassentransport“ kann in einem Element nur Schnee bis zu einem gefälleabhängigen Schwellenwert aufgebaut werden. Wird dieser Schwellenwert überschritten, wird der „überschüssige“ Schnee an das nächste „flussabwärts“ liegende Element weitergegeben. So kommt es in einigen Elementen zu einer unnatürlichen starken Anreicherung von Schnee aus höher gelegenen Elementen. Bei dem Element 12587 kommt es zu einer starken unnatürlichen SWE-Zunahme, sodass der Schwellenwert von 771 mm schnell erreicht ist. Sobald mehr Schnee in dem Element aufgebaut werden soll, wird der „überschüssige“ Schnee an das nächste Element weiter gegeben. Dieses Phänomen führt zu der in Abb. 4.21 des Elements 12587 deutlich erkennbaren untypischen „Deckelung“ des SWE. Dieses unnatürliche Phänomen liegt bei dem aus Schneehöhen berechneten SWE_{SLF} nicht vor, sodass diese Elemente nicht für den Vergleich der beiden SWE herangezogen werden sollten.

Auswertung von SWE-Ganglinien einzelner Elemente

Neben den Scatterplots, die den Hang zur Über- und Unterschätzung darstellen, wurden die SWE-Ganglinien der einzelnen Elemente betrachtet. Bei diesen Darstellungen sind verschiedene Phänomene deutlich geworden, die im Folgenden erläutert werden.

Abbildung 4.22 zeigt den Verlauf des SWE des Elements 4255 über den Winter 1998/1999. Es ist eine gute Anpassung des SWE_{LARSIM} an das SWE_{SLF} deutlich sichtbar. Nur im Februar und März 1999 ist eine leichte Überschätzung des SWE_{LARSIM} erkennbar. Aus dem Scatterplot des Elementes der Abb. 4.21 wurde bereits deutlich, dass das SWE_{LARSIM} relativ gut mit dem SWE_{SLF} zusammen passt. Die Anpassung konnte demnach mit Hilfe der Ganglinie bestätigt werden. Aber auch das Element 15188 zeigt in Abb. 4.23 eine gute Anpassung des SWE_{LARSIM} an das SWE_{SLF} . Besonders der Verlauf ab Januar 2003 kann von LARSIM gut nachgebildet werden. Diese gute Abbildung des SWE in LARSIM ist jedoch nicht in allen Winterperioden zu erkennen. Abbildung 4.25 zeigt auch das Element 15188, es sind jedoch deutliche Über- und Unterschätzungen des SWE erkennbar. Dass nicht alle Winterperioden das SWE gut nachbilden, wird auch in den Scatterplots des Elementes (Abb. 4.21) deutlich.

Neben den gut angepassten Elementen gibt es allerdings auch Elemente, in denen starke Abweichungen vorliegen, deren Ursachen nachfolgend erläutert werden. Abbildung 4.24 zeigt das Element 12587, das in der Winterperiode 2004/2005 einen sehr hohen Aufbau des SWE vorweist. Bis Mitte Februar 2005 bildet das SWE_{LARSIM} das SWE_{SLF} gut nach.

Im Februar 2005 kommt es dann zu einer Zunahme von etwa 450 mm SWE. Der in dieser Zeit gefallene Niederschlag beträgt ca. 110 mm. Die anderen über 300 mm SWE müssen vom „Schneemassentransport“ in LARSIM stammen (siehe auch Abschnitt 1.5.2). In das Element 12587 entwässern direkt drei Elemente, die alle um mindestens 500 m höher liegen. Das heißt, auch in diesen Elementen fällt relativ viel Niederschlag als Schnee, welcher bei der Überschreitung des Schwellenwertes in das nächste Element abgeben wird. Nach der starken SWE-Zunahme wird auch hier der Schwellenwert von 771 mm erreicht und es kommt zu einer Weitergabe des Schnees ins tieferliegende Element. Dies ist die Erklärung für den geraden Verlauf des SWE bis zum Mai 2005. Aufgrund des Schwellenwertes kann kein weiterer Schnee aufgebaut werden.

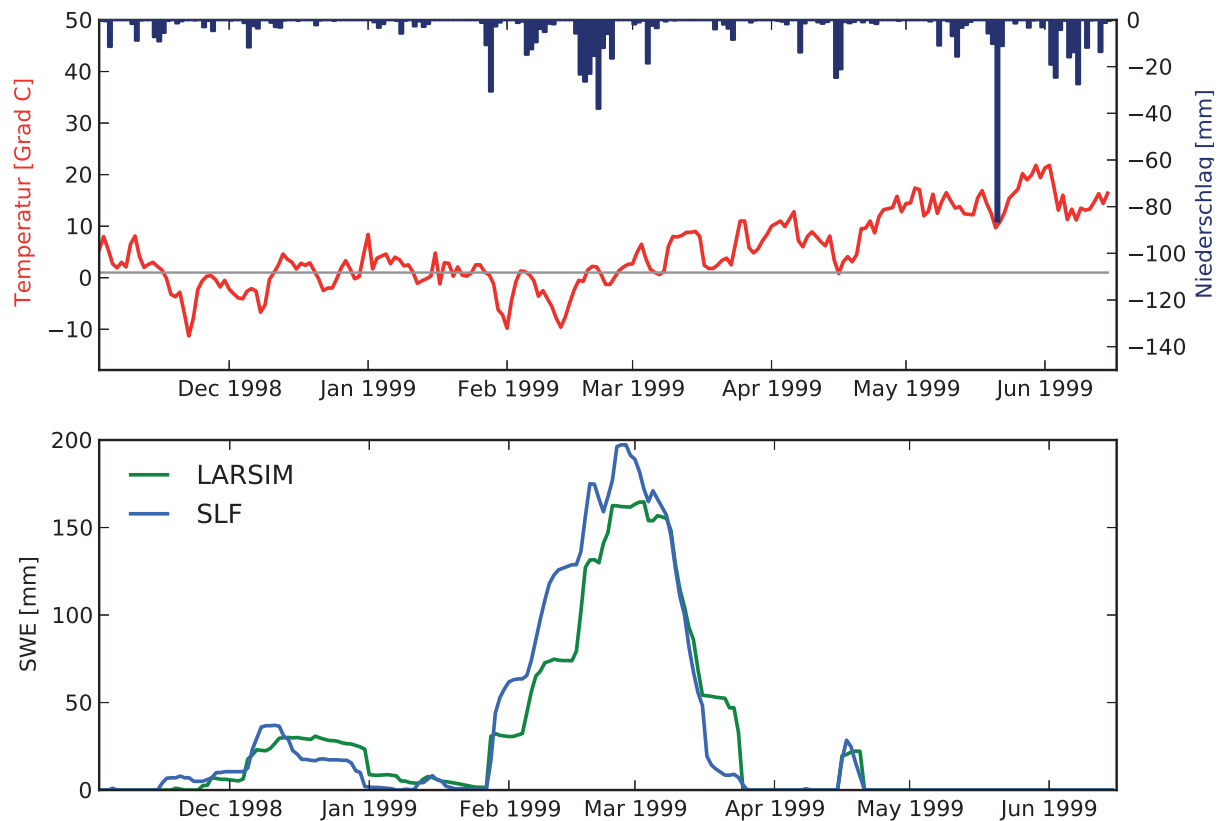


Abb. 4.22: SWE-Ganglinien des Elementes 4255 über die Winterperiode 1998/1999 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

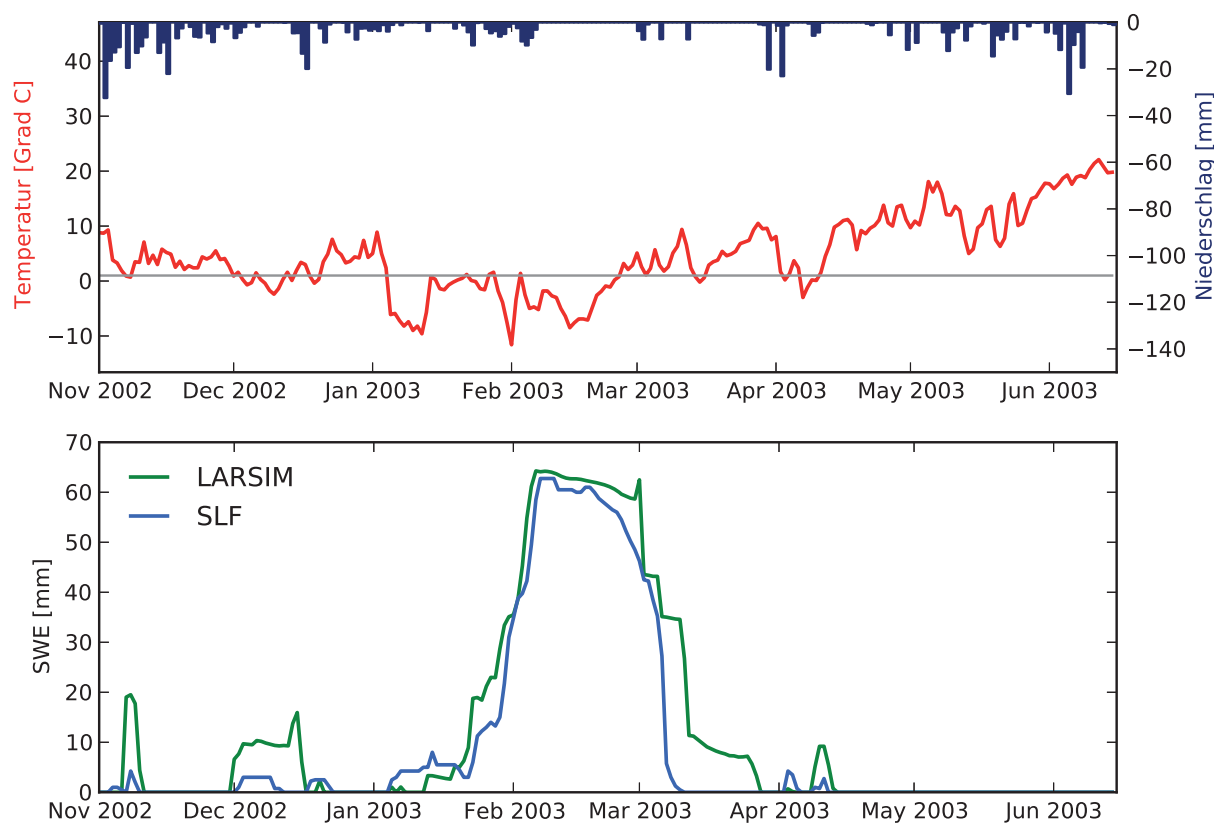


Abb. 4.23: SWE-Ganglinien des Elementes 15188 über die Winterperiode 2002/2003 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

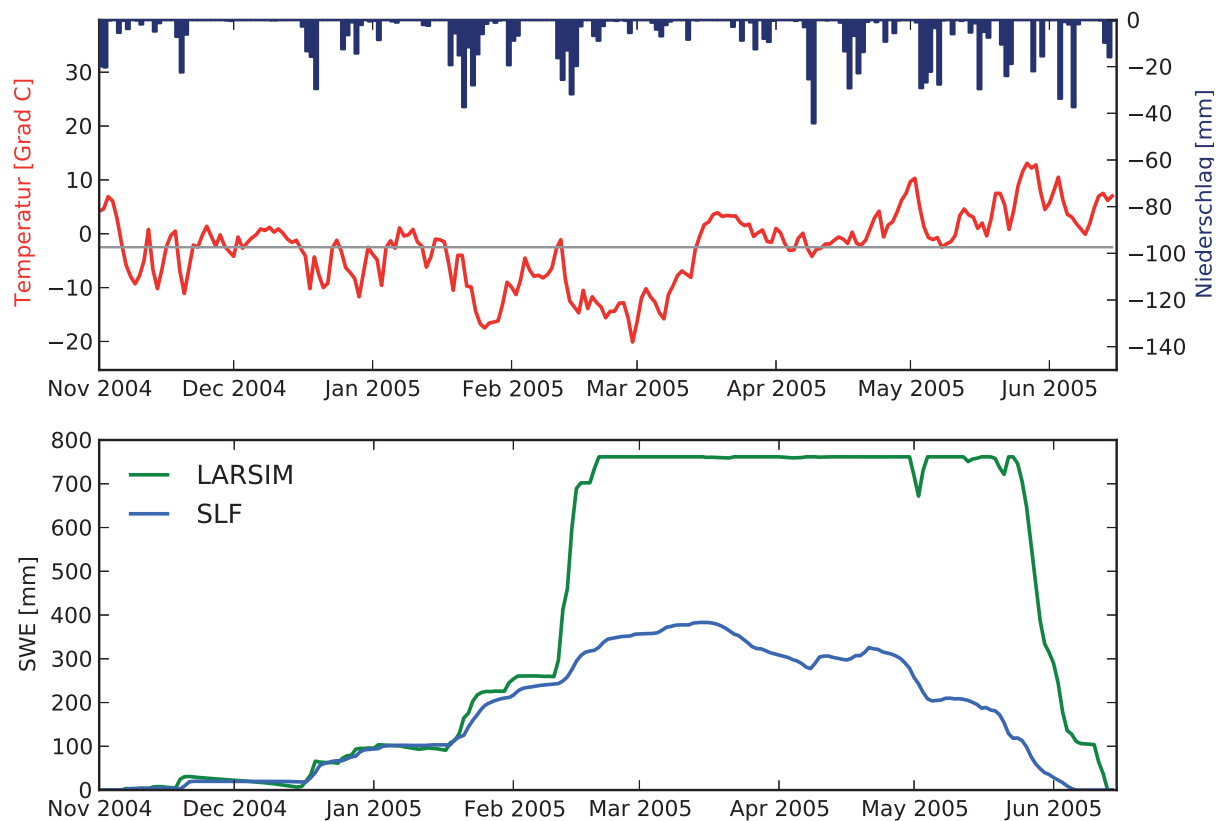


Abb. 4.24: SWE-Ganglinien des Elementes 12587 über die Winterperiode 2004/2005 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

Dieser Effekt des Massentransportes ist bei dem SLF-Produkt so nicht vorzufinden. Deshalb ist dies eine nicht zu vernachlässigende Fehlerquelle bei dem Vergleich von SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} .

Abbildung 4.25 zeigt bei dem Element 15188 im Winter 2005/2006 eine deutliche Über- und Unterschätzung des SWE_{SLF} durch LARSIM. In den Bereichen der Überschätzung (Ende Nov. 2005, sowie Jan. und April 2006) baut sich zwar auch SWE bei dem SLF-Produkt auf, jedoch deutlich weniger als bei dem SWE_{LARSIM} . Da es eine Zunahme bei beiden gibt, ist davon auszugehen, dass bei LARSIM mehr Niederschlag modelliert wird als bei den SLF-Produkt nachgewiesen werden kann. Der Niederschlag scheint demnach nicht immer korrekt nachgebildet zu werden. Dies könnte an den HYRAS-Eingangsdaten liegen (siehe Abschnitt 2.1.1), die anscheinend nicht immer mit dem SLF-Produkt zusammenpassen.

Anfang Januar und Anfang März 2006 zeigt sich jeweils ein starker Abfall der SWE-Kurve. Dieses plötzliche Abschmelzen ist auf die Temperaturzunahme über die Grenztemperatur zurückzuführen. In LARSIM fällt deswegen der Niederschlag als Regen und trägt zum Abschmelzen bei. Bei dem SLF-Produkt kommt es hingegen durch Schneefall zu einer Zunahme der Schneedecke. Würde die Grenztemperatur in LARSIM nur geringfügig höher liegen, würde der Niederschlag als Schnee fallen und es käme zu einer SWE-Zunahme. Dieses plötzliche Abfallen der Kurve ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es neben der Temperaturzunahme auch zu Niederschlägen in der Form von Regen kommt. Diese bringen zusätzliche Energie mit sich und es kommt zum „Herauslaufen“ des Wassers und zum Abschmelzen der Schneedecke. Die Schneedecke kann

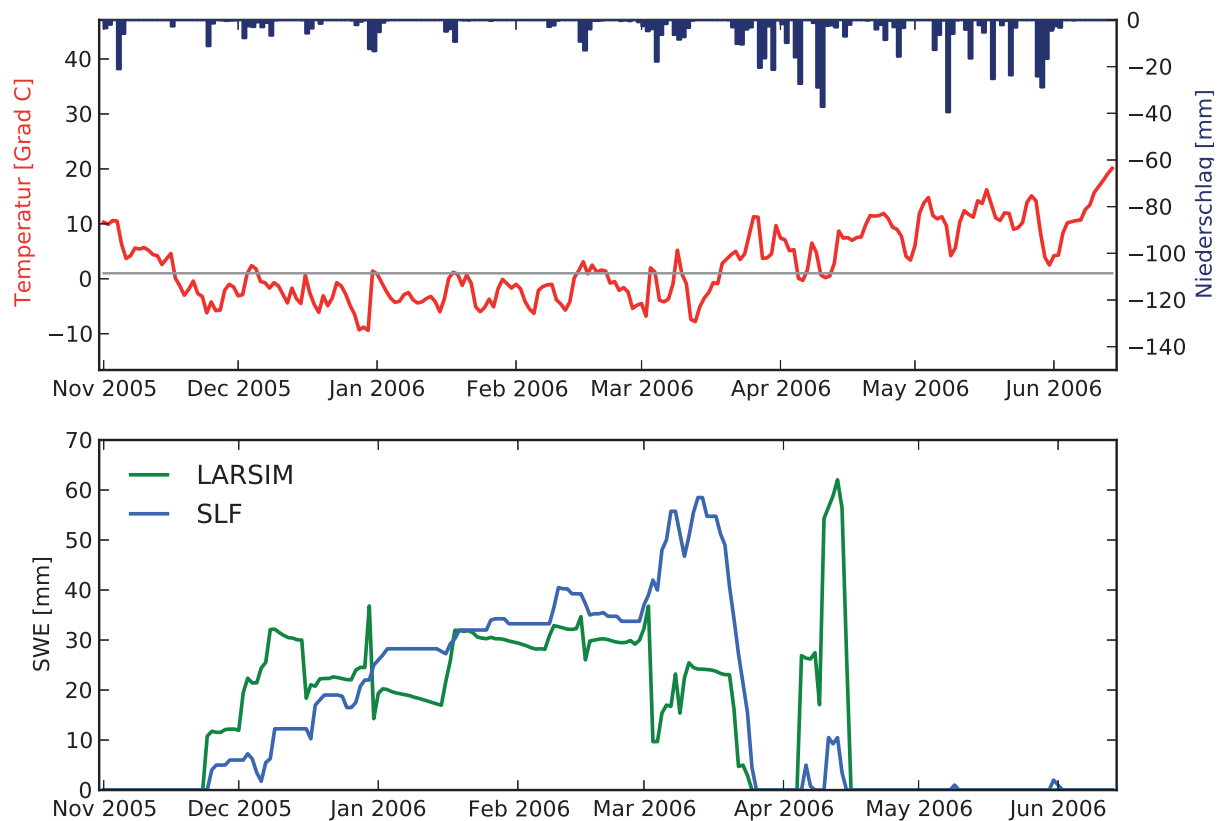


Abb. 4.25: SWE-Ganglinien des Elementes 15188 über die Winterperiode 2005/2006 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

flüssigen Niederschlag bis zu einem Schwellenwert halten. Wird dieser Schwellenwert jedoch überschritten, kommt es zu einem rapiden Abschmelzen. Im April 2006 zeigt sich eine sehr deutliche Überschätzung des SWE_{LARSIM} . Da die Temperatur genau an den zwei Niederschlagsereignissen unter die Grenztemperatur fällt, kommt es überhaupt zu einem Schneedeckenaufbau. Hier würde jedoch eine geringfügig veränderte Grenztemperatur zu einem völlig anderen Ergebnis führen. Es zeigt sich demnach, dass die starre Grenztemperatur in LARSIM eine sehr wichtige Einflussgröße darstellt.

Das Element 1684 ist in Abb. 4.26 über die Winterperiode 2001/2002 dargestellt. Es zeigt bis März 2002 einen sehr ähnlichen Verlauf von SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} . Das starke Niederschlagsereignis von 80 mm an nur einem Tag im März 2002 ist bei dem SWE_{SLF} nicht erkennbar. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Abweichung der SWE auch hier wieder durch den unterschiedlichen Niederschlagsinput bewirkt wird. Anfang Mai 2002 zeigt sich ein sehr ähnliches Bild mit einer Überschätzung des SWE_{LARSIM} . Dies ist wahrscheinlich auch auf die höheren Niederschläge zurückzuführen. Ab Mitte Mai fängt das SWE_{SLF} an zu schmelzen, LARSIM baut jedoch weiterhin SWE auf. Aufgrund der mächtigen Schneedecke, kann auch Niederschlag in Form von Regen in der Schneedecke zurückgehalten werden und es kommt zu einer Zunahme des SWE. So kommt es im Juni 2002 trotz Temperaturen oberhalb der Grenztemperatur und damit verbundenen Niederschlägen in Form von Regen zu einer Zunahme des SWE. Bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes am 15. Juni 2002 ist in LARSIM keine Schmelze erkennbar.

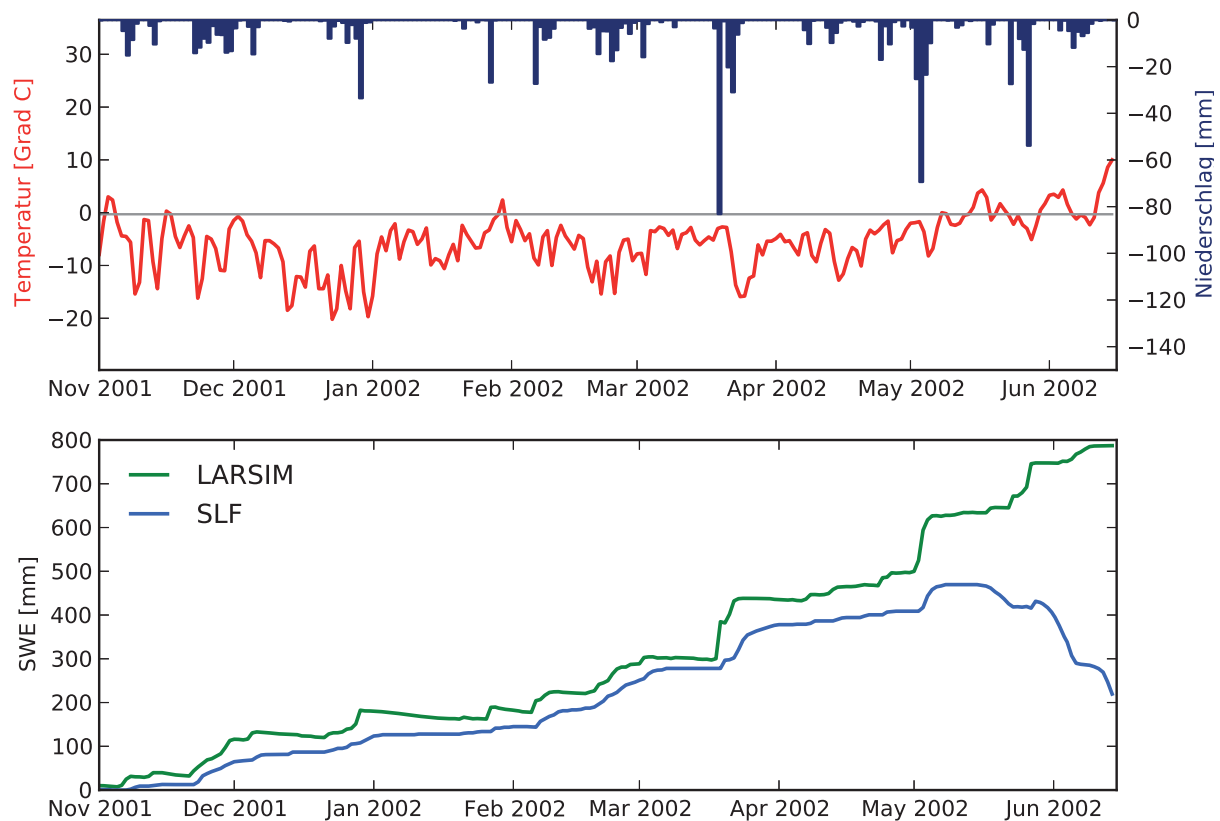


Abb. 4.26: SWE-Ganglinien des Elementes 1684 über die Winterperiode 2001/2002 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

In Abb. 4.27 ist in der Winterperiode 1999/2000 bei dem Element 28472 eine deutliche Unterschätzung des SWE_{LARSIM} zu erkennen. Dies zeigt sich bereits in dem Scatterplot des Elementes in Abb. 4.21. Zu Zeiten, in denen die Grenztemperatur knapp überschritten wird, fällt in LARSIM der Niederschlag als Regen und es kommt zum Abschmelzen des Schnees (12./13. November 1999, 7. bis 9. Dezember 1999, und 5 bis 8 Februar 2000). Bei dem SLF-Produkt zeigt sich von November 1999 bis Mitte März 2000 eine kontinuierliche Zunahme des SWE. Aber selbst wenn diese kontinuierliche Zunahme bei dem SWE_{LARSIM} vorhanden wäre, würde voraussichtlich dennoch eine Differenz vorhanden sein. Es zeigt sich, dass die Niederschläge geringer ausfallen als dies bei dem SLF-Produkt der Fall zu sein scheint. Es scheint auch hier Diskrepanzen in dem Niederschlagsinput zu geben. Diesmal kommt es zu einer Unterschätzung der HYRAS-Niederschlagsdaten im Vergleich zum SLF-Produkt.

Zusammenfassend lassen sich bei den analysierten SWE-Ganglinien einzelner Elementen die stärksten Einflüsse bei dem Niederschlagsinput, der Grenztemperatur und dem Schneemassentransport erkennen.

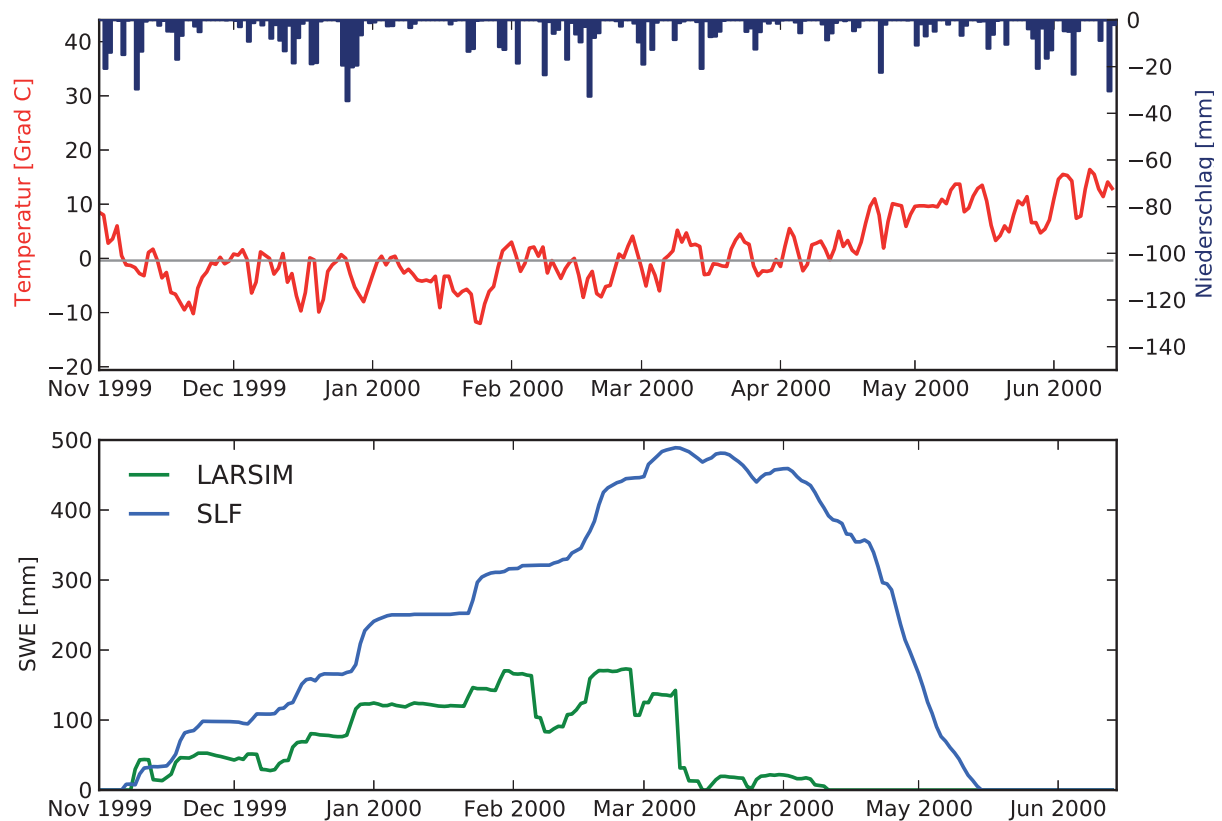


Abb. 4.27: SWE-Ganglinien des Elementes 28472 über die Winterperiode 1999/2000 mit täglichem Niederschlag und Temperaturverlauf, sowie der eingezeichneten Grenztemperatur.

4.4.2 Korrelationsanalyse (zeitlich)

Bei der Korrelationsanalyse der zeitlichen Auswertung wurden zwei Korrelationsmatrizen aufgestellt. Zum einen wurde eine Korrelationsmatrix mit den in Tab. 3.4 aufgeführten möglichen Einflussfaktoren und den Differenzen (Gl. 3.19 bis Gl. 3.22) sowie Fehlermaßen (Gl. 3.23 und Gl. 3.24) aufgestellt. Zum anderen wurde eine Korrelationsmatrix mit dem Gradienten der Differenzen und den möglichen Einflussfaktoren erstellt. Die Korrelationsanalyse ist in drei Bereiche unterteilt. Erstens wird die Korrelation der Einflussfaktoren untereinander analysiert, zweitens die Korrelation zwischen den Einflussfaktoren und den Differenzen sowie den Fehlermaßen. Drittens wird die Korrelation zwischen den Gradienten der Differenzen und den Einflussfaktoren untersucht. Bei den Korrelationsmatrizen in Tab. 4.8 und in Tab. 4.9 wird im oberen rechten „Dreieck“ der Korrelationskoeffizient nach Pearson (Gl. 3.12) und im unteren linken Bereich Kendall's τ (Gl. 3.14) dargestellt. Die Korrelationen von Pearson und Kendall zeigen die gleichen Tendenzen, da Pearson meist stärkere Korrelationen aufweist (siehe Abschnitt 3.4.2), wird im Folgenden hauptsächlich auf den Korrelationskoeffizienten nach Pearson eingegangen.

Tab. 4.8: Korrelationsmatrix zwischen möglichen Einflussfaktoren und Differenzen sowie Fehlermaßen der zeitlichen Auswertung. Oberer rechter Bereich Korrelationskoeffizient r nach Pearson und unterer linker Bereich Kendall's τ (Werte größer bzw. kleiner ± 0.5 sind fett gedruckt, „ < 0.1 “ entspricht > -0.1 und $< +0.1$)

	Nied	Temp	Glob	Tag_ab_0111	Betrags_Temp	Dif_{max}	Dif_{min}	Dif_{mean}	$ DIF_{mean} $	MAE_{norm}	ME_{norm}
Nied											
Temp	< 0.1		0.11	< 0.1	< 0.1	0.11	< 0.1	0.18	0.10	< 0.1	< 0.1
Glob	-0.21	0.39	0.65	0.63	0.64	0.44	-0.37	0.58	0.29	0.47	0.38
Tag_ab_0111	< 0.1	0.43	0.59	0.78	0.65	0.48	-0.54	0.53	0.48	0.20	0.30
Betrags_Temp	< 0.1	0.43	0.38		0.61	0.61	-0.75	0.65	0.68	0.10	0.30
Dif_{max}	< 0.1	0.33	0.35	0.39	0.22	0.33	-0.29	0.40	0.24	0.28	0.31
Dif_{min}	< 0.1	-0.26	-0.43	0.45	0.22	-0.54	-0.67	0.66	0.64	< 0.1	0.14
Dif_{mean}	0.15	0.42	0.31	-0.59	-0.20	0.59	-0.49	-0.70	-0.91	0.28	< 0.1
$ DIF_{mean} $	< 0.1	0.21	0.40	0.44	0.23	0.52	-0.76	0.52	0.76	0.12	0.39
MAE_{norm}	< 0.1	0.28	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.15	0.12	-0.19	-0.31	0.14
ME_{norm}	< 0.1	0.24	0.18	0.24	0.16	0.15	-0.11	0.31	0.14	0.13	0.25

Korrelation der Einflussfaktoren untereinander

Bei der Betrachtung der Korrelation der Einflussfaktoren untereinander in Tab. 4.8 bzw. in Tab. 4.9 zeigt sich die höchste Korrelation zwischen der Globalstrahlung und dem Einflussfaktor „Tag_ab_0111“ mit 0.78. Dies war zu erwarten, da die Globalstrahlung einen starken Jahresgang aufweist. Auch die Temperatur und der Betrag der Temperatur zeigen einen starken Jahresgang, der sich hier mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.63 bzw. 0.61 darstellt. Dass keine stärkeren Korrelationen zwischen dem „Tag_ab_0111“ und der Temperatur auftreten, könnte darauf zurück zu führen sein, dass die minimalen Temperaturen mitten in der Winterperiode (Januar/Februar) liegen und so kein linearer Zusammenhang möglich ist. Zudem ist zu beachten, dass es sich um mittlere Temperaturen des gesamten Untersuchungsgebietes handelt. Der über das gesamte Untersuchungsgebiet gemittelte Niederschlag zeigt keine Korrelation mit der zeitlichen Komponente („Tag_ab_0111“). Der Niederschlag weist die geringsten Korrelationen mit anderen Einflussfaktoren auf. Die Temperatur und der Betrag der Temperatur zeigen beide sehr hohe Korrelationen zu den Einflussfaktoren Globalstrahlung, Temperatur bzw. Betrag der Temperatur und dem schon erwähnten „Tag_ab_0111“ auf. Alle diese Faktoren zeigen einen starken Jahresgang, sodass eine starke Korrelation untereinander zu erwarten war.

Korrelation zwischen den Einflussfaktoren und den Differenzen sowie Fehlermaßen

Die Korrelation zwischen den Einflussfaktoren und den Differenzen sowie Fehlermaßen ist in Tab. 4.8 dargestellt. Der Niederschlag zeigt keine Korrelation mit den Differenzen oder Fehlermaßen. Das heißt, Abweichungen zwischen dem zeitlichen Verlauf des SWE_{LARSIM} und des SWE_{SLF} lassen sich durch den aktuellen Niederschlag nicht erklären. Die höchsten Korrelationen zeigen sich zwischen den Differenzen und dem Einflussfaktor „Tag_ab_0111“. Bei der Betrachtung der Scatterplots in Abb. 4.28 a) und b) zeigt sich jedoch, dass kein linearer Zusammenhang vorhanden ist. Die Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf von DIF_{mean} und $|DIF_{mean}|$, bei denen ein starker Jahresgang erkennbar ist. Bei DIF_{mean} ist der Bereich bis Februar (ca. Tag 100) weniger geradlinig als bei $|DIF_{mean}|$. Zu Beginn der Winterperiode zeigt sich bei beiden ein linearer Zusammenhang. Mitte März (ca. Tag 140) scheint die Schmelzphase zu beginnen und die mittlere Abweichung steigt stark an. Am Ende der Schmelzphase Anfang Mai (ca. Tag 190) beginnt die Differenz wieder zu sinken. Daraus lässt sich schließen, dass das SWE_{LARSIM} bei der Akkumulationsphase eine relativ konstante Abweichung aufweist, der zeitliche Verlauf demnach gut wiedergegeben werden kann. Bei Einsetzen der Schmelze kommt es zu steigenden Diskrepanzen. Diese könnten auf das schon zuvor ermittelte zu späte Abschmelzen des SWE_{LARSIM} zurückzuführen sein. Wenn der Schmelzprozess später beginnt, werden die Abweichungen immer stärker. Bei der Schmelzphase scheint es einen zeitlichen Schwellenwert zu geben, nachdem die mittleren Differenzen wieder geringer werden. Dies könnte damit zu erklären sein, dass mehr Elemente in LARSIM vollständig abgeschmolzen sind.

Zwischen dem Einflussfaktor „Tag_ab_0111“ und den Fehlermaßen zeigen sich keine Korrelationen. Bei der Betrachtung der Abb. 4.28 c) zeigt sich jedoch, dass es einen starken Zusammenhang gibt, dieser aber nicht linear ist. Innerhalb der ersten Tage der Winterperiode liegen bereits große relative Fehler vor. Diese sind darauf zurückzuführen, dass in LARSIM bereits einige Elementen Schnee aufgebaut haben, im SLF-Produkt aber noch nicht. Diese Fehler sinken nach den ersten

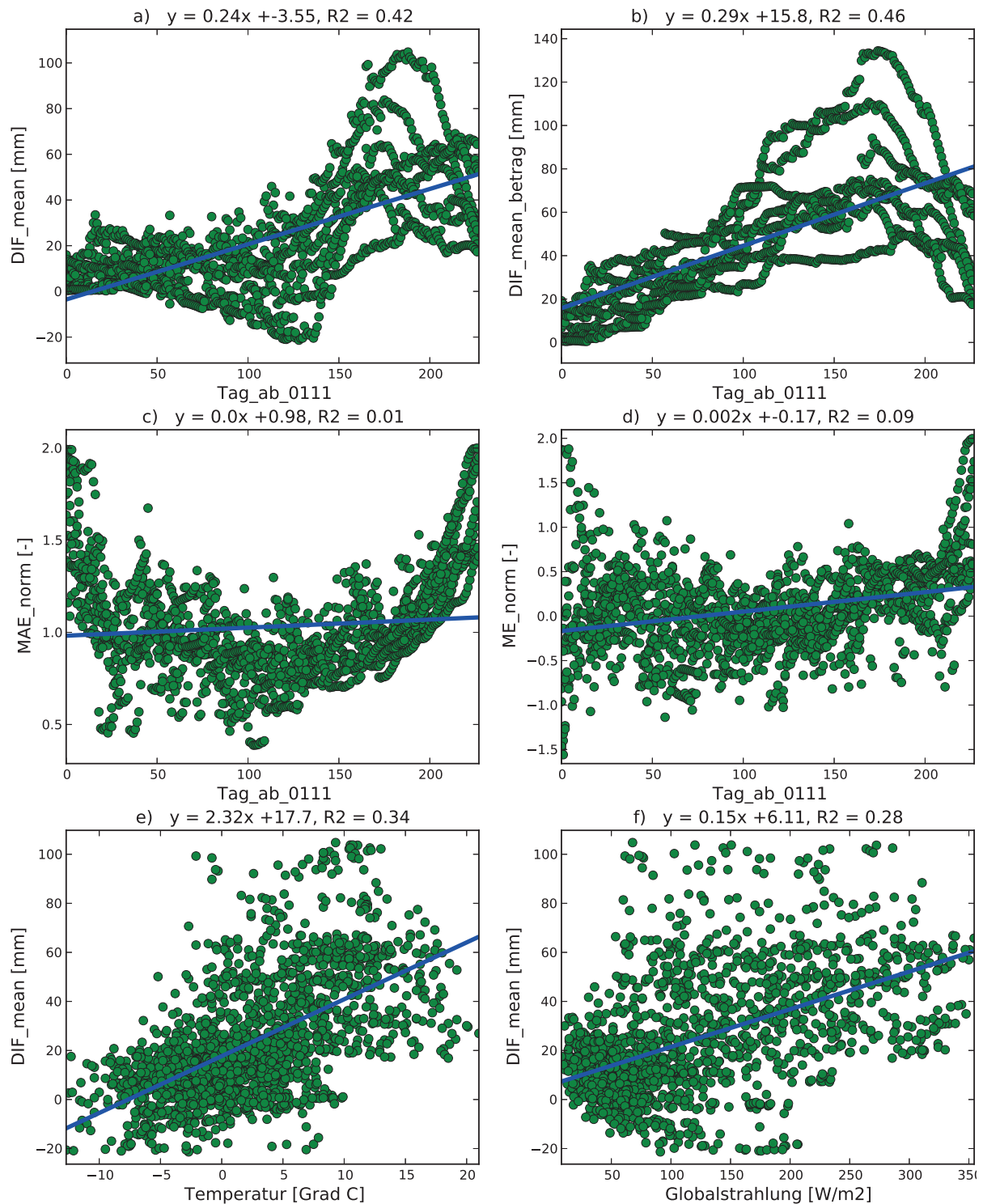


Abb. 4.28: Scatterplots mit jeweils verschiedener Fehlermaße bzw. Differenzen über mögliche Einflussfaktoren mit dargestellter und aufgeführter linearer Regressionsgeraden sowie der Angabe des R^2 .

Tagen stark ab. Im Laufe der Akkumulationsphase ist dann ein fast linearer Zusammenhang erkennbar. Mit Einsetzen der Schmelzphase im Frühling beginnt der Fehler wieder stark anzusteigen. Die größten relativen Fehler sind zu Beginn und am Ende der Winterperiode erkennbar. Hier unterscheiden sich das SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} im relativen Sinne stark von einander. Bei der Hinzunahme der Abb. 4.28 d) zeigt sich, dass die Anfangsbedingungen zu Beginn der Winterperiode eine Abweichung nach oben und unten darstellen. Zu einigen Zeitpunkten hat LARSIM bereits mit dem Schneedeckenaufbau begonnen, zu anderen Zeitpunkten das SLF-Produkt. Im Laufe der Winterperiode zeigen sich deutliche Abweichungen nach oben und unten. Am Ende der Winterperiode im Juni nehmen die Überschätzungen des SWE_{LARSIM} stark zu und es sind nur noch positive Fehler erkennbar. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Schnee im SLF-Produkt bereits zum größten Teil abgeschmolzen ist, in LARSIM aber noch welcher vorhanden ist.

Die Temperatur zeigt hohe Korrelationen mit den Fehlermaßen und den Differenzen. Werden nur die drei Fehlermaße betrachtet, zeigt die Temperatur bei allen die höchsten Korrelationen im Vergleich zu den anderen Einflussfaktoren. Das heißt, die Temperatur erklärt einen Teil der Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} . In Abb. 4.28 e) wird der lineare Zusammenhang deutlich. Dennoch streuen die Werte besonders im Bereich der positiven Temperaturen. Bei dem Betrag der Temperatur liegen die Korrelationen deutlich unter denen der normal dargestellten Temperatur. Die Korrelationskoeffizienten liegen deutlich unter 0.5 und weisen so keine starke Korrelationen auf. Die Globalstrahlung zeigt Korrelationen mit den drei Differenzen auf, zu den Fehlermaßen sind die Korrelationen hingegen deutlich geringer. Bei der Betrachtung der Abb. 4.28 f) zeigt sich eine Häufung der niedrigen Differenzen und geringer Globalstrahlung. Ab einer mittleren Globalstrahlung von 100 W/m^2 fangen die mittleren Differenzen stark an zu streuen. Ein leichter Trend ist erkennbar.

Bei dieser Korrelationsanalyse zeigten sich zwar statistische Zusammenhänge, die Fehlermaße lassen sich jedoch offenbar nicht ausschließlich durch die aktuellen meteorologischen Bedingungen erklären. Vielmehr spielt das „Gedächtnis“ der Schneedecke eine entscheidende Rolle für die aktuell vorhandenen Fehleinschätzungen. Sowohl die absoluten Differenzen als auch die relativen Fehler bauen sich über längere Zeiträume auf.

Korrelation der Einflussfaktoren mit den Gradienten der Differenzen

Da bei dem zeitlichen Verlauf des SWE die Veränderung von einem Zeitschritt zum nächsten sehr wichtig ist, wurde der Gradient der Differenzen nach Gl. (3.25) bestimmt. Diese zeigen die Zeitschritte auf, an denen Differenzen entstehen. Mit den Gradienten der Differenzen wurde erneut eine Korrelationsanalyse durchgeführt.

Bei der Korrelationsmatrix in Tab. 4.9 zeigt sich die höchste Korrelation zwischen dem Niederschlag und dem DIF_{Gmax} . Dieser lineare Zusammenhang wird dabei auch in Abb. 4.29 d) deutlich. Zu DIF_{Gmean} zeigt der Niederschlag auch eine leicht erhöhte Korrelation. Das heißt, dass die Diskrepanzen bei der Veränderung von einem Zeitschritt zum nächsten stark vom Niederschlag beeinflusst sind und mit zunehmenden Niederschlag tendenziell eine stärkere Überschätzung durch LARSIM auftritt. Dies war zu erwarten, da besonders große Veränderungen in der Schneedecke bei Niederschlagsereignissen auftreten. Bei der Betrachtung von DIF_{Gmin} tritt

die höchste (negative) Korrelation mit der Temperatur auf. Ein Teil der Unterschätzungen durch LARSIM also folglich mit der Temperatur erklärt werden. Bei der Betrachtung der Abb. 4.29 a) zeigt sich, dass bei negativen Temperaturen (bis -5°C) nur sehr geringe DIF_{Gmin} -Werte auftreten. Steigt die Temperatur an, nimmt DIF_{Gmin} zu. Im Bereich zwischen 0°C und 10°C treten die größten minimalen Gradienten der Differenzen auf. In dem Bereich zwischen 10°C und 20°C liegt DIF_{Gmin} im Mittel bei -100. Das heißt, die größten negativen Veränderungen treten im Bereich der Plusgrade auf. Bei positiven Temperaturen kommt es zur Schneeschmelze, das heißt hier scheint LARSIM die Schmelze zu überschätzen.

Tab. 4.9: Korrelationsmatrix zwischen den möglichen Einflussfaktoren und den Gradienten der Differenzen. Oberer rechter Bereich Korrelationskoeffizient r nach Pearson und unterer linker Bereich Kendall's τ (Werte größer bzw. kleiner ± 0.5 sind fett gedruckt, „ < 0.1 “ entspricht > -0.1 und $< +0.1$)

	Nied	Temp	Glob	Tag_ab_0111	Betr_Temp	DIF_{Gmin}	DIF_{Gmax}	DIF_{Gmean}
Nied		0.11	-0.25	< 0.1	< 0.1	-0.21	0.81	0.51
Temp	< 0.1		0.65	0.63	0.63	-0.57	0.27	< 0.1
Glob	-0.21	0.39		0.78	0.64	-0.29	< 0.1	-0.14
Tag_ab_0111	< 0.1	0.43	0.59		0.60	-0.37	0.30	< 0.1
Betrag_Temp	< 0.1	0.43	0.38	0.39		-0.28	0.11	-0.20
DIF_{Gmin}	-0.12	-0.48	-0.23	-0.31	-0.18		-0.29	< 0.1
DIF_{Gmax}	0.56	0.32	0.06	0.30	0.14	-0.29		0.49
DIF_{Gmean}	0.21	< 0.1	< 0.1	< 0.1	-0.14	< 0.1	0.30	

Zwischen dem DIF_{Gmean} und der Temperatur liegt keine Korrelation vor. In Abb. 4.29 b) liegt DIF_{Gmean} im Bereich der negativen Temperaturen. Zwischen -5°C und $+5^{\circ}\text{C}$ treten die größten positiven Gradienten auf. Es zeigt sich, dass die Diskrepanzen der Veränderung deutlich in dem Bereich um die 0°C liegen. Dies war zu erwarten, da in diesem Temperaturbereich entschieden wird ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt. Der Betrag der Temperatur zeigt im Vergleich zu der Temperatur meist geringere Korrelationen zu den Gradienten, außer zu DIF_{Gmean} . DIF_{Gmean} zeigt eine etwas höhere Korrelation mit dem Betrag der Temperatur als zu der Temperatur selbst. Die Korrelationen sind jedoch beide sehr gering. Der DIF_{Gmin} zeigt eine leichte Korrelation mit dem Einflussfaktor „Tag_ab_0111“ und der Globalstrahlung. Die Korrelation fällt aber deutlich geringer aus als die zu der Temperatur. Der „Tag_ab_0111“ und die Temperatur zeigen eine leichte Korrelation mit DIF_{Gmax} . Diese liegt aber deutlich unter der Korrelation mit der Temperatur. Der „Tag_ab_0111“ zeigt gar keine Korrelation mit DIF_{Gmean} . Dies wird in Abb. 4.29 c) deutlich. Die Veränderungen zeigen keine zeitliche Abhängigkeit. Zu allen Zeiten der Winterperiode treten Abweichungen nach oben und nach unten auf. Die zeitliche Komponente kann demnach die Diskrepanzen in den Veränderungen nicht erklären. Da die Einflussfaktoren Temperatur, Betrag der Temperatur, Globalstrahlung und „Tag_ab_0111“ untereinander korrelieren, ist eine Interpretation der einzelnen Korrelationen besonders bei nur leichten Korrelationen schwierig.

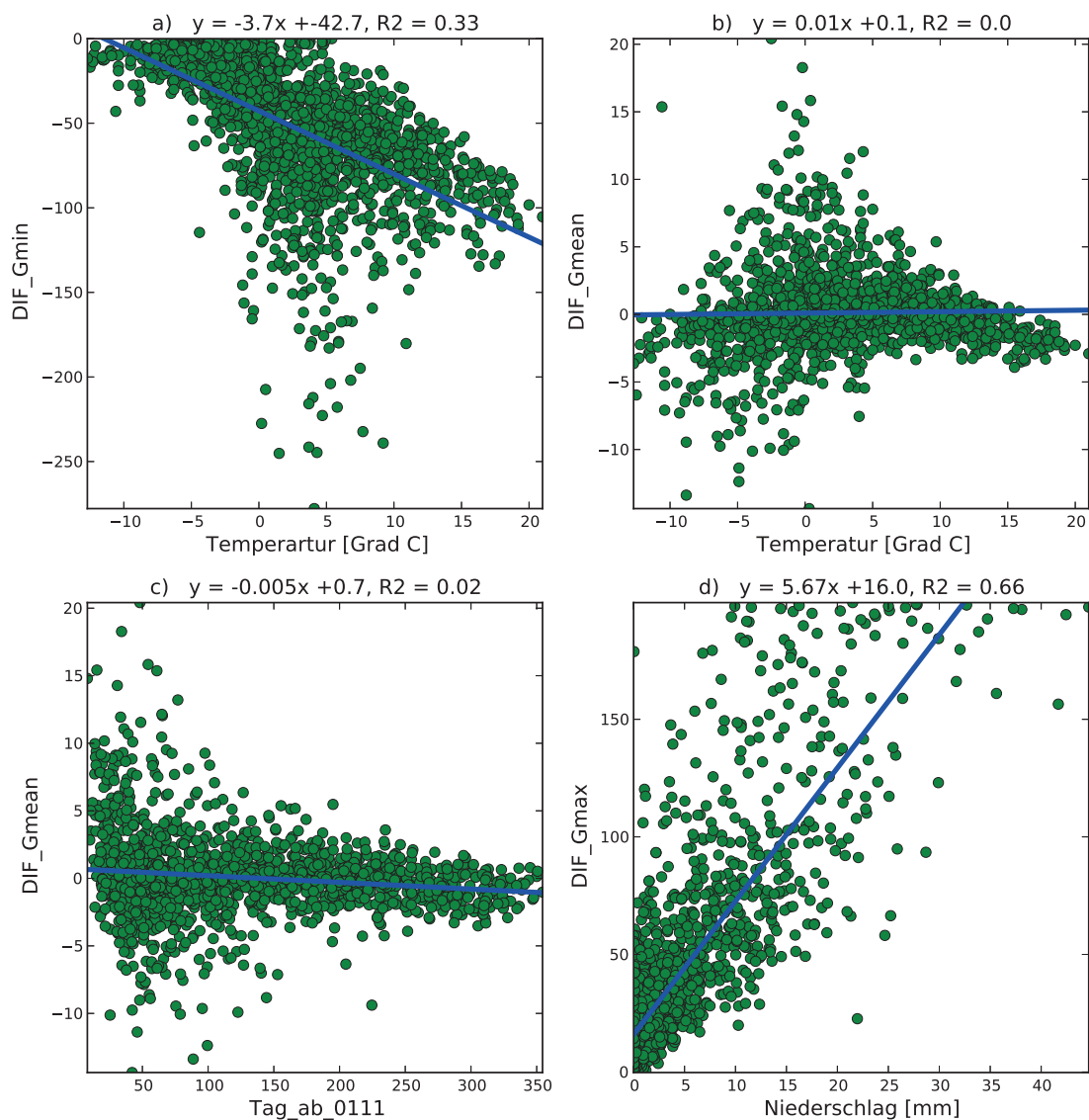


Abb. 4.29: Scatterplots der Gradienten der Differenzen mit linearer Regressionsgeraden sowie .

Zusammenfassend lässt sich aus der Analyse der Gradienten der Differenzen schließen, dass Diskrepanzen besonders bei hohen Niederschlägen und bei Temperaturen um 0°C entstehen. Es ist zu vermuten, dass dies insbesondere dann der Fall ist, wenn beides zugleich auftritt.

4.5 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Ergebnisse lässt sich insgesamt sagen, dass SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} relativ gut zusammenpassen. Besonders wenn bedacht wird, dass es sich bei LARSIM um ein WHM handelt, das ausschließlich an den Pegeln geeicht wurde. Die Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} , deren räumliche und zeitliche Verteilung sowie mögliche Ursachen werden im Folgenden zusammenfassend erläutert. Die Interpretation der Ergebnisse kann in drei Bereiche unterteilt werden. Zum einen in den Bereich räumliche Auswertung, also wo treten Unterschiede zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} auf. Zum anderen in den Bereich der zeitlichen Auswertung, also wann kommt es zu Diskrepanzen. Zusammenfassend lässt sich dann die Warum-Frage klären, nämlich aus welchen Gründen Unterschiede zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} zustande kommen.

Wo treten Diskrepanzen auf

Bei den vorherigen Analysen hat sich gezeigt, dass Abweichungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} überall auftreten können (siehe u.a. Abb. 4.14 oder Abb. 4.16). Dennoch zeigen sich Bereiche, in denen es verstärkt zu Überschätzungen oder Unterschätzungen des SWE_{LARSIM} kommt. Besonders starke absolute Überschätzungen zeigen sich im Bereich des Alpenhauptkamms. Dies wird bei den Differenzkarten (u.a. Abb. 4.6) und der Darstellung der mittleren Differenzen (Abb. 4.15) besonders deutlich. Bei der punktuellen Betrachtung befinden sich die Elemente 1684 und 12587 im Bereich des Alpenhauptkamms. Bei beiden Elementen zeigt sich in dem Scatterplots (Abb. 4.21) eine deutliche Überschätzung des SWE_{SLF} durch LARSIM. Bei einer detaillierten zeitlichen Betrachtung der beiden Elemente können jedoch vereinzelt auch Unterschätzungen auftreten. Bei der räumlichen Auswertung ist deshalb zu beachten, dass es sich entweder um Momentaufnahmen oder Mittelwerte handelt. Keine der Aussagen ist demnach auf den gesamten Zeitraum zu übertragen. Tendenziell kommt es bei LARSIM im Mittel zu einer Überschätzung des SWE_{SLF} (Tab. 4.1 und Tab. 4.2 sowie Abb. 4.4 und Abb. 4.9 bis 4.11).

Neben den Überschätzungen kommt es bei LARSIM auch zu Unterschätzungen des SWE_{SLF} . Die Bereiche der Unterschätzung sind jedoch nicht so stark ausgeprägt, bzw. die Unterschätzungen sind nicht so groß wie die Überschätzungen. Bereiche, bei denen es verstärkt zu Unterschätzungen kommt, sind z.B. gut ersichtlich in Abb. 4.6, Abb. 4.12 und Abb. 4.15. Von den Gebieten der Unterschätzung sind zum einen der südöstliche Bereich des Untersuchungsgebietes, Graubünden, zu nennen. Zum anderen zeigen einige Bereiche des Alpenvorlands und einige Täler bzw. die Talflanken im Mittel Unterschätzungen auf. Die Elemente 28735 und 28472 liegen im Alpenvorland und zeigen deutliche Unterschätzungen (Abb. 4.21).

Im Übergangsbereich zwischen Schnee bedeckten und Schnee freien Gebieten zeigen sich wie erwartet verstärkt Diskrepanzen. Diese zeitlich variablen Diskrepanzen sind in Abb. 4.5, Abb. 4.6 und Abb. 4.7 ersichtlich. Da es sich in den Randlagen meist um Bereiche handelt, bei denen nur sehr wenig Schnee liegt, sind die Abweichungen in den Differenzkarten nicht erkennbar. Bei der Betrachtung der Schneebedeckungskarten werden diese Diskrepanzen, an den Schneerandlagen aber deutlich.

Die Höhe scheint einen starken Einfluss auf die Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und

dem SWE_{SLF} zu haben. Dies wird durch die Korrelationsanalysen und die beiden Regressionsmodelle deutlich. Die beiden Regressionsmodelle zeigen, dass die Höhe den wichtigste Einflussfaktor bei dem Vergleich SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF} darstellt. Bei dem relativen Fehler wird eine negative Abhängigkeit deutlich, das heißt der relative Fehler wird mit steigender Höhe geringer. Bei dem Betrag der Differenzen wird hingegen deutlich, dass die Differenzen mit zunehmender Höhe steigen. In hohen Lagen kommt es also verstärkt zu großen Unterschieden zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} . Neben der Höhe zeigten sich bei dem Betrag der Differenz der Niederschlag als zweitwichtigste Einflussgröße, bei dem relativen Fehler war dies die Grenztemperatur. Als dritter Prädiktor stellt sich bei beiden Regressionsmodellen die Hangeignung heraus. Die Faktoren Höhe, Niederschlag, Grenztemperatur in LARSIM sowie Hangneigung spielen bei dem Vergleich der SWE demnach eine wichtige Rolle spielen.

Eine Schwierigkeit bei der Auswertung liegt zu dem bei der starken Akkumulation von Schnee aufgrund des in LARSIM implementierten „Schneemassentransportes“. Da einige Elemente direkt von dieser starken Schneeanreicherung betroffen sind (z.B. Abb. 4.12 oder Abb. 4.24), ist eine Auswertung hier schwierig. Die „flussabwärts“ gerichtete Weitergabe des „überschüssigen“ Schnees wird in Abb. 4.12 anhand der Fließwege der Flüsse mit sehr hohen SWE deutlich.

Wann treten Diskrepanzen auf

Bei der Analyse der zeitlichen Diskrepanzen zwischen SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} zeigt sich, dass zu jeder Zeit Abweichungen entstehen können (u.a. Abb. 4.28 a)-d)) Die Abweichungen sind nicht an eine spezielle Zeitperiode gebunden. Dies zeigt sich deutlich bei der Auswertung des Einflussfaktors „Tag_ab_0111“. Dennoch ist eine Tendenz zum zu späten Abschmelzen in LARSIM erkennbar, dies zeigt sich bereits bei den ersten Ergebnissen (Tab. 4.1 und Abb. 4.4). Bei einigen punktuellen Auswertungen hat sich diese Tendenz bestätigt (Abb. 4.26).

Zudem wurde deutlich, dass es durch Niederschlagsereignisse verstärkt zu Diskrepanzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} kommt (Abb. 4.25 und Abb. 4.26). Hierbei kann es sowohl zu einer Überschätzung wie auch zu Unterschätzung des Niederschlagsinput kommen. Besonders kritisch sind die Niederschlagsereignisse bei Temperaturen um die 0°C . In diesem Bereich entscheidet sich, ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt (u.a. Abb. 4.25, Abb. 4.26 und 4.27). Die Auswertung der Gradienten der Differenzen zeigt auch, dass die Veränderung des SWE von einem Zeitschritt zum nächsten stark vom Niederschlag beeinflusst ist.

Auch bei der zeitlichen Auswertung zeigt sich der Effekt des „Schneemassentransports“ (siehe Abschnitt 1.5.2) deutlich. Abbildung 4.24 zeigt, dass aufgrund dieser Schneeweitergabe unnatürlich starke Schneeanreicherung auftreten und sehr große Diskrepanzen entstehen können. Dieser Effekt lässt sich bei dem SLF-Produkt natürlich nicht feststellen.

Warum treten Diskrepanzen auf

Dass die Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} an verschiedenen Orten und zusätzlich zu verschiedenen Zeiten auftreten, ist auf eine Vielzahl von Gründen zurückzuführen. Da die Abweichungen zum Teil sehr kleinräumig und zeitlich eingeschränkt sind, können bei der Auswertung so großer Datenmengen wie in dieser Arbeit nicht alle Erklärungsmöglichkeiten

aufgedeckt werden. Einige Gründe, die in großen Bereichen für die Diskrepanzen verantwortlich sind, werden im Folgenden erläutert.

Die Tendenz zur Überschätzung der Schneedecke in LARSIM ist auch für das beobachtete späte Abschmelzen mit verantwortlich. In den Bereichen in denen LARSIM zu einer starken Überschätzung neigt, liegen oft sehr große Schneedecken. Diese können auch bei positiven Temperaturen noch eine gewisse Menge flüssigen Niederschlags aufnehmen, ohne direkt abzuschmelzen. Wird die Mächtigkeit der Schneedecke überschätzt, kann auch mehr flüssiges Wasser aufgenommen werden, bevor es zum Abschmelzen der Schneedecke kommt. Das Abschmelzen wird zu spät simuliert.

Da in LARSIM keine geschichtet Schneedecke modelliert wird, verteilt sich der Energieinput (positive Temperaturen, Strahlung und flüssiger Niederschlag) zudem auf die gesamte Schneedecke. Um aber die gesamte Schneedecke zum Schmelzen zu bringen, wird mehr Energie benötigt als für einzelne Schichten. Möglicherweise ist durch die Modellierung mit Tageswerten auch der Energieinput geringer als bei dem SLF-Produkt. LARSIM wird z.B. Tagesmitteltemperaturen angetrieben. Möglicherweise würde ein Tagesgang der Temperatur und Strahlung z.B. in der Mittagszeit zu Schmelzereignissen führen die bei Tageswertbetrachtungen nicht mit berücksichtigt werden.

Bei den Auswertungen hat sich gezeigt, dass der Niederschlag eine häufige Ursache für die Diskrepanzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} ist. Der Niederschlagsinput der HYRAS-Daten scheint nicht mit dem SLF-Produkt zusammenzupassen. Das heißt, ein großes Fehlerpotential scheint schon bei den Eingangsdaten zu liegen. Da der Niederschlag in der Hydrologie die wichtigste Eingangsgröße darstellt, machen sich auch kleine Fehler stark bemerkbar. Neben der Niederschlagsmenge ist auch die Niederschlagsform (Regen oder Schnee) von zentraler Bedeutung. Ob in LARSIM der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt, wird über Grenztemperatur gesteuert. Dieser ist in LARSIM jedoch ein starrer Wert, der nicht zeitlich oder räumlich (Höhenabhängig) variabel ist. Somit kommt es auf Grund der Grenztemperatur zu Diskrepanzen in beide Richtungen, also zu Über- als auch Unterschätzung durch LARSIM. Die beiden Regressionmodelle zeigten neben der Höhe den Niederschlag und die Grenztemperatur als wichtige Einflussfaktoren. In niedrigen Lagen scheint die Grenztemperatur (relativer Fehler) entscheidender zu sein, als die Niederschlagsmenge. Dies könnte darauf zurück zu führen sein, dass in den Gebieten mit hohem relativen Fehler auch weniger Schnee (mengenmäßig) fällt und der gefallene Niederschlag öfter bei Temperaturen im Bereich der Grenztemperatur fällt. In höheren Lagen fällt, aufgrund der niedrigeren Temperaturen mehr Niederschlag als Schnee und die Grenztemperatur ist weniger entscheidend als die Niederschlagsmenge. Zudem treten in hohen Lagen verstärkt große Überschätzungen auf (z.B. Überschätzungen Alpenhauptkamm), die zum Teil auch auf großen Niederschlagsinput zurück geführt werden können.

Eine weitere wichtige Ursache für die Abweichungen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} ist der in LARSIM implementierte „Schneemassentransport“ (siehe Abschnitt 1.5.2). Dieser führt zu unnatürlich starken Anreicherungen des SWE in bestimmten Elementen. Dabei wird Schnee nur bis zu einem gefälleabhängigen Schwellenwert aufgebaut. Wird dieser Wert überschritten kommt es zu einer „flussabwärts“ gerichteten Umverlagerung des Schnees, der über den Schwellenwert fällt. Bei dem anfänglichen Vergleich der maximalen SWE in Tab. 4.2 wird deutlich,

wie stark diese Unterschiede sein können. Die maximalen SWE_{LARSIM} erscheinen sehr hoch und sind in der Natur als nicht realistisch einzustufen. Die starken Diskrepanzen in diesen Elementen sind völlig vom „Schneemassentransport“ überlagert und zeigen keine Abhängigkeiten zu anderen möglichen Einflussfaktoren. Es lässt sich demnach schließen, dass die Elemente, die direkt vom „Schneemassentransport“ betroffen sind, sich nicht für eine Validierung eignen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen, flächenhafte SWE (LARSIM und SLF) zu vergleichen und die LARSIM-Schneesimulation im Anschluss kritisch zu bewerten. Aufgrund der komplexen und zeitaufwändigen Datenbeschaffungssituation, der nötigen Umformatierung großer Datensätze und deren Plausibilisierung, war der Umfang der Methodenentwicklung einerseits begrenzt durch die Datenverfügbarkeit und andererseits durch den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit. Eine Vielzahl von weiteren Analysemethoden waren angedacht, konnten jedoch nicht alle getestet werden. Die in dieser Arbeit aufgeführten Methoden waren auch durch die Zeit der Bearbeitung und die verfügbaren Daten begrenzt. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Methoden geeignet sind um die flächenhaften Ergebnisse der SWE_{LARSIM} mit dem SWE_{SLF} zu vergleichen und die LARSIM-Schneesimulation kritisch zu bewerten.

Bei der Analyse der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass räumlich und zeitlich Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} auftreten können. Dennoch gibt es Bereiche, wie zum Beispiel den Alpenhauptkamm, die eine Tendenz zur starken Überschätzung aufweisen. Hingegen wird das SWE in Graubünden und dem Alpenvorland durch LARSIM tendenziell unterschätzt. Im Mittel überschätzt LARSIM das SWE_{SLF} , zudem zeigt sich eine Tendenz des zu späten Abschmelzens. Die Über- bzw. Unterschätzungen lassen sich auf die Höhe, den Niederschlag, die Grenztemperatur sowie den „Schneemassentransport“ aus LARSIM und die verschiedenen Anfangsbedingungen bei LARSIM und dem SLF-Produkt zurückführen. Bei der Analyse des Niederschlags zeigt sich, dass der HYRAS-Niederschlag nicht mit dem SLF-Produkt übereinstimmt. Weitere Parameter bzw. Module aus LARSIM, die Diskrepanzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF} hervorrufen, sind zum einen die Grenztemperatur und zum anderen die Option „Schneemassentransport“. Die Grenztemperatur ist in LARSIM dafür verantwortlich, ob im Modell der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt. Sie wird in LARSIM auf einen konstanten Wert gesetzt und nicht dynamisch angepasst. Der in LARSIM implementierte „Schneemassentransport“ eine Option darzustellen, die nicht dem natürlichen Akkumulationsverhalten des Schnees entspricht. Es hat sich somit herausgestellt, dass diese Elemente nicht mit dem SWE_{SLF} verglichen werden können. Weiterhin hat sich die Höhe als wichtiger Einflussfaktor für die relativen Abweichungen und die absoluten Differenzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} herausgestellt. Sie stellt demnach einen Schlüsselparameter bei dem Vergleich der SWE dar.

Nachdem in dieser Arbeit Gebiete identifiziert werden konnten, die eine Tendenz zur Über- bzw. Unterschätzung aufweisen, sollten in Zukunft weitere Analysen in diesen speziellen Bereichen stattfinden. Dazu könnten die Gebiete der Über- und Unterschätzung getrennt und jeweils in Gruppen mit weniger Elementen analysiert werden. So lassen sich die Einflüsse besser getrennt voneinander betrachtet werden. Vorteilhaft bei dieser Methode ist, dass sich besonders stark ausgeprägte Diskrepanzen nicht auf alle weiteren Untersuchungen durchpausen, sodass z.B. die

Bereiche der Unterschätzungen einfacher ausgewertet werden können. In den Gebieten der Über- bzw. Unterschätzungen wäre es u.a. interessant, Scatterplots (wie Abb. 4.21) einzelner Elemente speziell aus diesen Bereichen auszuwerten. Zudem könnten mit Hilfe einer Clusteranalyse Gruppen eingeteilt und so repräsentative Elemente für die verschiedenen Bereiche identifiziert werden. Anhand dieser Elemente könnte auch der zeitliche Verlauf des SWE in Hinblick auf den zeitlichen Verlauf der Temperatur und des Niederschlags ausgewertet werden. Es wäre wichtig zu wissen, ob die in dieser Arbeit entlang der Transekte zufällig ausgewählten Elemente Rückschlüsse auf bestimmte Gebiete bzw. Höhenlagen ermöglichen.

Da sich im Laufe dieser Arbeit die Höhe als ein sehr wichtiger Aspekt bei den Diskrepanzen des SWE herausgestellt hat, wäre eine weitere Analyse dieser Einflussgröße wünschenswert. Das Untersuchungsgebiet könnte dafür anhand der Höhe in Gruppen eingeteilt werden (z.B. 0-500 m, 500-1000 m usw.). So wäre die Auswertung mit weniger Elementen möglich, zudem würde sich zeigen, in welchen Höhenlagen die Diskrepanzen besonders deutlich hervortreten. Zudem könnten Höhenzonen identifiziert werden, die überwiegend eine Über- bzw. Unterschätzung aufweisen. Anhand der Kartendarstellungen zeigte sich eine verstärkte Überschätzung in den hohen Lagen, aber eine detailliertere Auswertung der Höhenlagen z.B. über 2500 m konnte aufgrund der Zeitknappheit nicht erfolgen.

Die starre Grenztemperatur in LARSIM hat großes Potential, Diskrepanzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} zu verursachen. Es scheint, dass ein einzelner Wert für den gesamten Zeitraum und ein großes Gebiet nicht ausreichend ist. Die Verwendung einer zeitlich dynamischen und räumlich differenzierteren Grenztemperatur in LARSIM könnte die Schneesimulation verbessern. Marks et al. (2013) beschreiben ausführlich, dass es eine starke zeitliche und räumliche Komponente bei der Bestimmung der Niederschlagsform (Regen oder Schnee) gibt. Zudem weisen sie darauf hin, dass es für die hydrologische Modellierung von zentraler Bedeutung ist, wo im EZG Niederschlag in welcher Form fällt. Zusätzlich besteht weiterhin das Problem, dass nicht die bodennahe Lufttemperatur entscheidend ist, in welcher Form der Niederschlag fällt, sondern die Bedingungen in den höheren Luftschichten. Wenn die Grenztemperatur aufgrund der Datenlage weiterhin über die bodennahe Lufttemperatur bestimmt werden muss, sollte dennoch eine räumlich und zeitlich dynamische Anpassung erfolgen.

Die besonders großen Diskrepanzen zwischen SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF} scheinen auch durch den in LARSIM implementierten „Schneemassentransport“ verursacht zu werden. Um diese Diskrepanzen genauer untersuchen zu können und eine detaillierte Einschätzung des Phänomens zu ermöglichen, wäre eine Auswertung eines weiteren LARSIM-Laufs ohne dieses Modul notwendig. Zudem könnte diese Auswertung Aufschluss darüber geben, inwiefern das Modul Schneemassentransport in LARSIM gegebenenfalls verändert werden müsste. Bei der Auswertung ist dann jedoch zu beachten, dass es Elemente geben wird, an denen es zu einem kontinuierlichen Schneedeckenaufbau kommt. Diese Elemente sollten bei der Auswertung ausgeschlossen werden, da sie nicht physikalisch begründbar sind und somit auch nicht mit dem Datenprodukt des SLFs übereinstimmen können.

Einige Diskrepanzen schienen sich auch durch unterschiedliche Anfangsbedingungen zu Beginn der Winterperiode zu ergeben. Deshalb wäre bei der zeitlichen Auswertung eine genauere Betrachtung der Anfangsbedingungen interessant. Nicht alle Elemente wiesen bei dem SWE_{LARSIM}

und dem SWE_{SLF} zu Beginn der Winterperioden die gleichen Bedingungen (Schnee/kein Schnee), geschweige denn die gleichen SWE auf. Die erste kleine Anpassung diese Problems bestand in dieser Arbeit darin, die Elemente die nie komplett abschmelzen von der Analyse auszuschließen. Eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen besteht darin, dass die SWE_{SLF} des 1. Novembers als Anfangsbedingungen für LARSIM assimiliert werden. Das entsprechenden Werkzeug ist in LARSIM bereits implementiert (Haag et al., 2012).

Da in dieser Arbeit nur mit einer Schneeeoption in LARSIM gearbeitet wurde, wäre ein Vergleich weiter LARSIM-Läufe mit verschiedenen Schneeeoptionen oder auch Anpassung einzelner Parameter sehr interessant. Möglicherweise führen andere Schneeeoption zu einer sehr viel bessere Anpassung des SWE_{LARSIM} an das SWE_{SLF} .

Der Niederschlagsinput hat sich als ein wichtiger Einflussfaktor der absoluten Differenzen herausgestellt. Es hat sich gezeigt, dass der Niederschlags-Input durch die HYRAS-Daten nicht mit dem SLF-Produkt übereinstimmt. Um diese Diskrepanz besser analysieren zu können, sollte hier der Abfluss als ein weitere unabhängige Kontrollgröße hinzugezogen werden. Über die Auswertung des Abflusses an verschiedenen Pegeln würde sich zeigen, wie sich der Niederschlagsinput über die simulierte Abflussganglinie zu dem gemessenen Abfluss verhält. Ob also die Wasserbilanz am Pegel bei Vernachlässigung der Verdunstung übereinstimmt. So würde sich zeigen, wie gut der aus Messstationen interpolierte Niederschlag der HYRAS-Daten mit der einfacher zu messenen Abfluss übereinstimmt. Um zusehen, wie sich das SLF-Produkt dazu verhält, könnte z.B. eine Nachführung der Schneedecke am Tag mit dem SWE-Höchststand erfolgen mit einer anschließenden Validierung der Abflüsse. So könnte festgestellt werden, in wie weit Diskrepanzen von LARSIM auf die HYRAS-Niederschlagsdaten zurückzuführen sind, aber auch wie gut oder schlecht LARSIM mit dem vorgegebenen SWE des SLFs funktioniert.

Neben der weiterführenden Auswertungen von Diskrepanzen wäre eine weitere Methode zum Vergleich von flächigen Daten die Aggregation gewesen. Mit Hilfe des Aggregierens würde sich die Anzahl der zu vergleichenden Elemente verringern und einzelne Extremwerte, die z.B. durch den eben beschriebenen „Schneemassentransport“ bedingt sind, würden nicht so stark ins Gewicht fallen. Bei solch einer Auswertung wäre auch die Analyse der Auswirkungen der verschieden Aggregationsschritte von $3 \times 3 \text{ km}^2$, $5 \times 5 \text{ km}^2$ und $7 \times 7 \text{ km}^2$ usw. interessant. Es würde sich zeigen, wie viel Einfluss die einzelnen „Extrem-Elemente“ auf den Vergleich bei $1 \times 1 \text{ km}^2$ haben. Zusätzlich wäre der Vorteil, dass die Anpassung des SLF-Rasters an das LARSIM-Raster (Abschnitt 2.3.1) nicht weiter ins Gewicht fallen würde.

Zu dem Datenprodukt des SLFs lässt sich sagen, dass seit Herbst 2013 ein neuer, homogenisierter SWE-Kartensatz ab dem Jahr 1971 zur Verfügung steht. Beim Homogenisierungsverfahren wurden räumliche Muster aus einem Kartensatz, welcher auf 344 Stationen basiert und unter Beachtung von Topographie und Landnutzung erstellt wurde, übernommen. Dieses Datenprodukt stellt demnach eine deutliche Verbesserung zu den in dieser Arbeit genutzten SWE-Karten, die auf 170 Stationen basieren und keine Landnutzungen unterscheiden, dar. Ein erneuter Vergleich der SWE (SWE_{LARSIM} und SWE_{SLF}) unter Verwendung der neuen Karten mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Methoden wäre sehr interessant.

6 Literaturverzeichnis

- Anderton, S. P., White, S. M., und Alvera, B. (2004). Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment. *Hydrological Processes*, 18(3):435–453.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., und Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066):303–309.
- Belz, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., und Mendel, H. G. (2007). *Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends*. Internationale Kommission für Hydrologie des Rheingebietes.
- Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the swiss alps. *Journal of Hydrology*, 412?413:291–296.
- Bertle, F. (1966). Effect of snow compaction on runoff from rain on snow. Technical Report EM-35, Department of Interior, Bureau of Reclamation, Washington DC.
- Bremicker, et.al., und ... (2013). Neue Version der LARSIM Dokumentation, in Vorbereitung. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, In Bearbeitung.
- Bremicker, M. (2000). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, 11.
- Carrera, M. L., Bélair, S., Fortin, V., Bilodeau, B., Charpentier, D., und Isabelle, D. (2010). Evaluation of snowpack simulations over the canadian rockies with an experimental hydrometeorological modeling system. *Journal of Hydrometeorology*, 11(5):1123–1140.
- Dutra, E., Balsamo, G., Viterbo, P., Miranda, P. M. A., Beljaars, A., Christoph, S., und Elder, K. (2010). An improved snow scheme for the ECMWF land surface model: Description and offline validation. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4):899–916.
- Dutra, E., Kotlarski, S., Viterbo, P., Balsamo, G., Miranda, P., Christoph, S., Bissolli, P., und Jonas, T. (2011). Snow cover sensitivity to horizontal resolution, parameterizations, and atmospheric forcing in a land surface model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 116(D21).
- DVWK, M. (1996). Ermittlung der Verdunstung von Land-und Wasserflächen. *Kommissionsvertrieb Wirtschafts-und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn*, 283.
- Haag, I. und Bremicker, M. (2013). Mölichkeiten und Grenzen der Schneesimulation mit dem Hochwasservorhersagemodell LARSIM. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, (im Druck).

- Haag, I., Henn, N., Sieber, A., und Bremicker, M. (2012). Besondere Maßnahmen zur Berücksichtigung des Schneeeinflusses bei der Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. *Forum für Ökologie und Wasserbewirtschaftung*, (Heft : 31.12):147–152.
- Helsel, D. R. und Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*, volume 323. US Geological survey Reston, VA.
- Hülser, F., Jonas, T., Wunderle, S., und Albrecht, S. (2012). Validation of a modified snow cover retrieval algorithm from historical 1-km AVHRR data over the european alps. *Remote Sensing of Environment*, 121:497–515.
- Hosaka, M., Nohara, D., und Kitoh, A. (2005). Changes in snow cover and snow water equivalent due to global warming simulated by a 20km-mesh global atmospheric model. *Sola*, 1:93–96.
- HYRAS-Zwischenbericht (2010). Zwischenbericht zum Projekt HYRAS Erstellung hydrologisch relevanter Raster- und Gitterpunktsdatensätze für Bundesgebiet und internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe auf der Basis qualitätsbewerteter meteorologischer Beobachtungsdaten? Heiko Steiner. Technical report, DWD.
- Jonas, T., Marty, C., und Magnusson, J. (2009). Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the swiss alps. *Journal of Hydrology*, 378(1?2):161–167.
- Knauf, D. (1980). Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. *Schriftenreihe des DVWK*, (46).
- LARSIM-Online-Hilfe (2013). <http://larsim.sourceforge.net/>.
- Ludwig, K. und Bremicker, M. (2006). *The water balance model LARSIM: design, content and applications*. Institut für Hydrologie der Universität Freiberg i. Br.
- LUWG, L. und LFU, D. (2012). Klimawandel im Süddeutschlands: Ausmaß-Folgen-Strategien. *Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Deutscher Wetterdienst*, Stuttgart.
- Marks, D., Winstral, A., Reba, M., Pomeroy, J., und Kumar, M. (2013). An evaluation of methods for determining during-storm precipitation phase and the rain/snow transition elevation at the surface in a mountain basin. *Advances in Water Resources*. im Druck.
- Parajka, J. und Blöchl, G. (2006). Validation of MODIS snow cover images over austria. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions Discussions*, 3(4):1569–1601.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., und Gratzki, A. (2013). A central european precipitation climatology - part i: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3):235–256.
- Sevruk, B. (1982). Method of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. Technical Report 21, World Meteorological Organization, Geneva.

- SFB81 (1980). Quantitative Abflussmodelle in einem voralpinen Flusssystem. Schluss Bericht des Teilprojekts B2 im Sonderforschungsbereich 81 der Technischen Universität München. Technical report.
- Steger, C., Kotlarski, S., Jonas, T., und Christoph, S. (2012). Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics*.
- Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T., und Lea, J. (2010). Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes. *Journal of Hydrometeorology*, 11(6):1380–1394.
- Tarboton, D. G. und Luce, C. H. (1996). Utah energy balance snow accumulation and melt model (UEB), computer model technical description and users guide.

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model
SWE_{LARSIM}	LARSIM simulierten Schneewasseräquivalent
SWE_{SLF}	Schneewasseräquivalent des SLF-Produktes
WHM	Wasserhaushaltsmodelle
SLF	Schweizer Schnee- und Lawinen Forschungsinstitut
SWE	Schneewasseräquivalent
EZG	Einzugsgebiet
DWD	Deutscher Wetter Dienst
BAFU	Bundesamt für Umwelt der Schweiz
PKB	Pegelkontrollbereich
DHM	Digitales Höhen Modell
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
Meteo Schweiz	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie der Schweiz
IDAweb	Datenportal der MeteoSchweiz für Lehre und Forschung
WebVerdis	„Web-based Weather Request and Distribution System“
Tab.	Tabelle
Abb.	Abbildung
Gl.	Gleichung
Nied	Niederschlag in mm
Temp	Temperatur in °C
Glob	Globalstrahlung in W/m ²

Parameterverzeichnis

DIF_{max}	[mm]	Maximale Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
DIF_{min}	[mm]	Minimale Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
$ DIF_{mean} $	[mm]	Mittlere Betrag der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
DIF_{mean}	[mm]	Mittlere Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
DIF_{Gmax}	[mm]	Maximaler Gradient der Differenzen zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
DIF_{Gmin}	[mm]	Minimaler Gradient der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
DIF_{Gmean}	[mm]	Mittlere Gradient der Differenz zwischen dem SWE_{LARSIM} und dem SWE_{SLF}
$DIF_{Höhe}$	[m]	Differenz der mittleren Höhen der Rasterelemente
Gef	[‰]	Mittleres Gefälle im Teilgebiet (= Rasterelement in LARSIM)
$Höhe_{LARSIM}$	[m]	Mittlere Höhe des Teilgebiets (= Rasterelement in LARSIM)
$Höhe_{SLF(bi\acute{g}ie)}$	[m]	Neu zusammengesetzte Höhen des SLF-Produkts
HOT	[m]	Mittlere obere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet
HUT	[m]	Mittlere untere Höhe der Zuflüsse im Teilgebiet
$MGef$	[‰]	Gefälle, bei dem der Schwellenwert gleich MSW ist
MSW	[mm]	Mittlerer Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation bei mittlerem Gefälle ($MGef$)
$SpwPr$	[‰]	Prozentuale Spannweite des Schwellenwertes bezogen auf MSW
$SW_{transport}$	[mm]	Elementspezifischer (gefälleabhängiger) Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation
TAL	[km]	Mittlere Fließlänge der Zuflüsse im Teilgebiet
T_{Grenz}	[°C]	Grenztemperatur in LARSIM
$f(x)$		Berechnete Werte für Fehlermaß bzw. Differenz
$i = 1 \dots n$		Zähler der Zeitschritte
$j = 1 \dots m$		Zähler der LARSIM-Elemente im Untersuchungsgebiet
s_x		Standardabweichung von x
s_y		Standardabweichung von y
x		Einflussfaktor (Prädiktor)
\bar{x}		Mittelwert von x
\bar{y}		Mittelwert von y
β_n	n	Achsenabschnitt bzw. Steigung der Regressionsgeraden
γ	[-]	Steigung der Beziehung bei $MGef$

Ehrenwörtliche Erklärung:

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe Dritter verfasst sowie keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Angaben, die inhaltlich oder wörtlich aus fremden Werken stammen, wurden kenntlich gemacht. Diese Arbeit lag in gleicher oder ähnlicher Weise noch keiner Prüfungsbehörde, Fachhoch- oder Hochschule vor und wurde ebenfalls bisher noch nicht veröffentlicht.

Karlsruhe, 12. November 2013

Räumliche Darstellung möglicher Einflussfaktoren

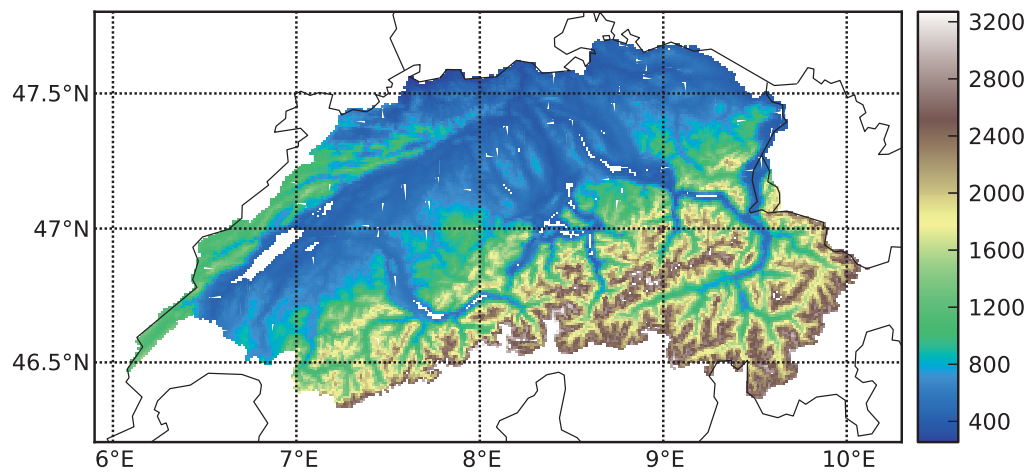


Abb. 6.1: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Höhe [m] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

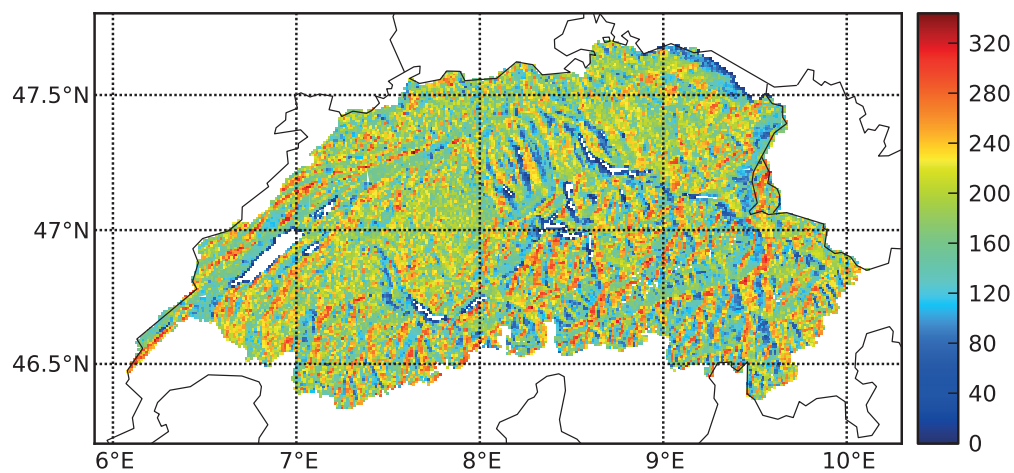


Abb. 6.2: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Exposition [°] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

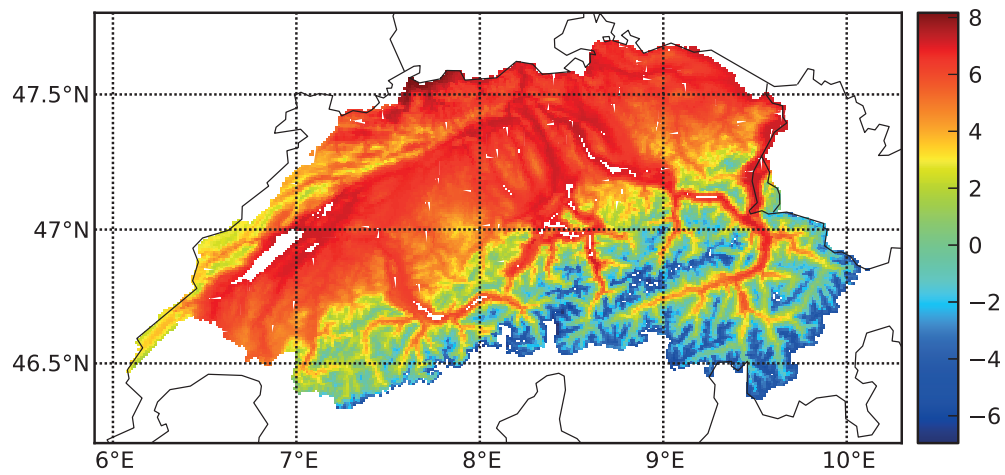


Abb. 6.5: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Temperatur [°C] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

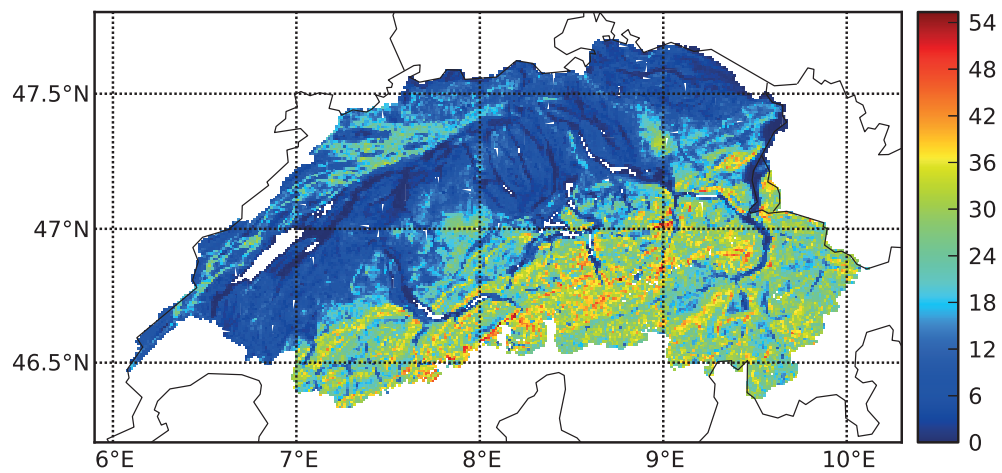


Abb. 6.3: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Hangneigung [°] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

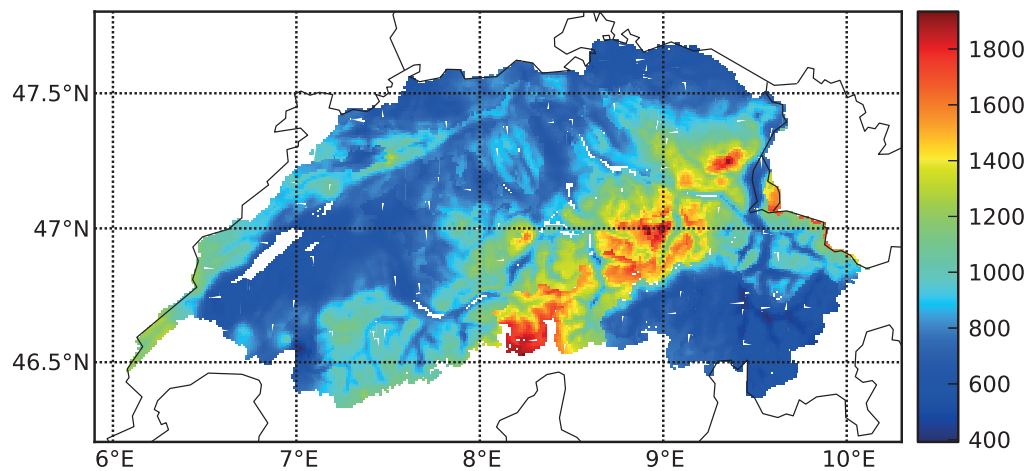


Abb. 6.4: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Niederschlag [mm] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

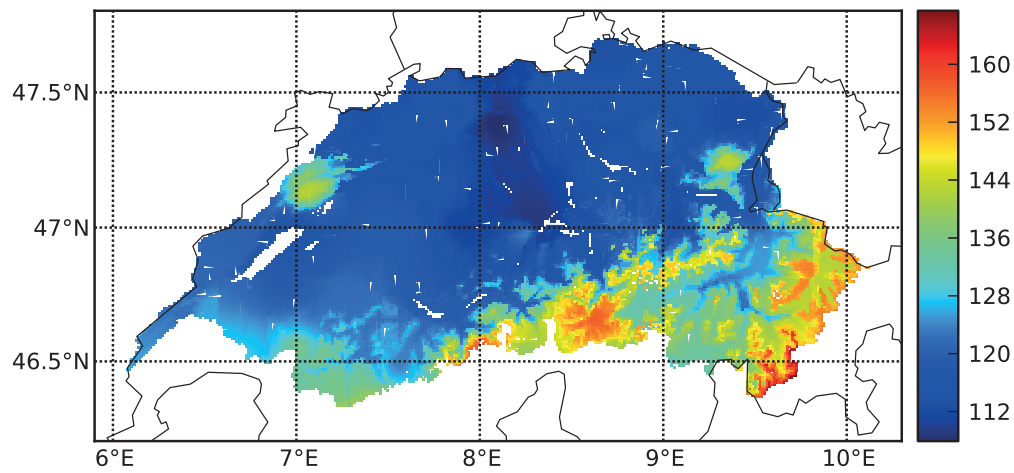


Abb. 6.6: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor Globalstrahlung [W/m^2] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

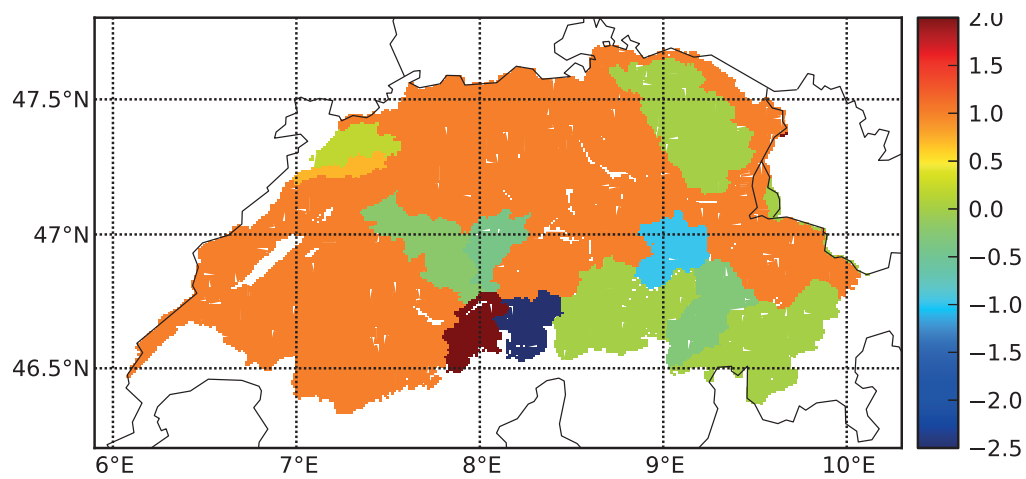


Abb. 6.7: Räumliche Darstellung des Einflussfaktor T_{Grenz} [$^{\circ}\text{C}$] für das gesamte Untersuchungsgebiet.

Darstellung weiter Karten für die Auswertung von Stichtagen

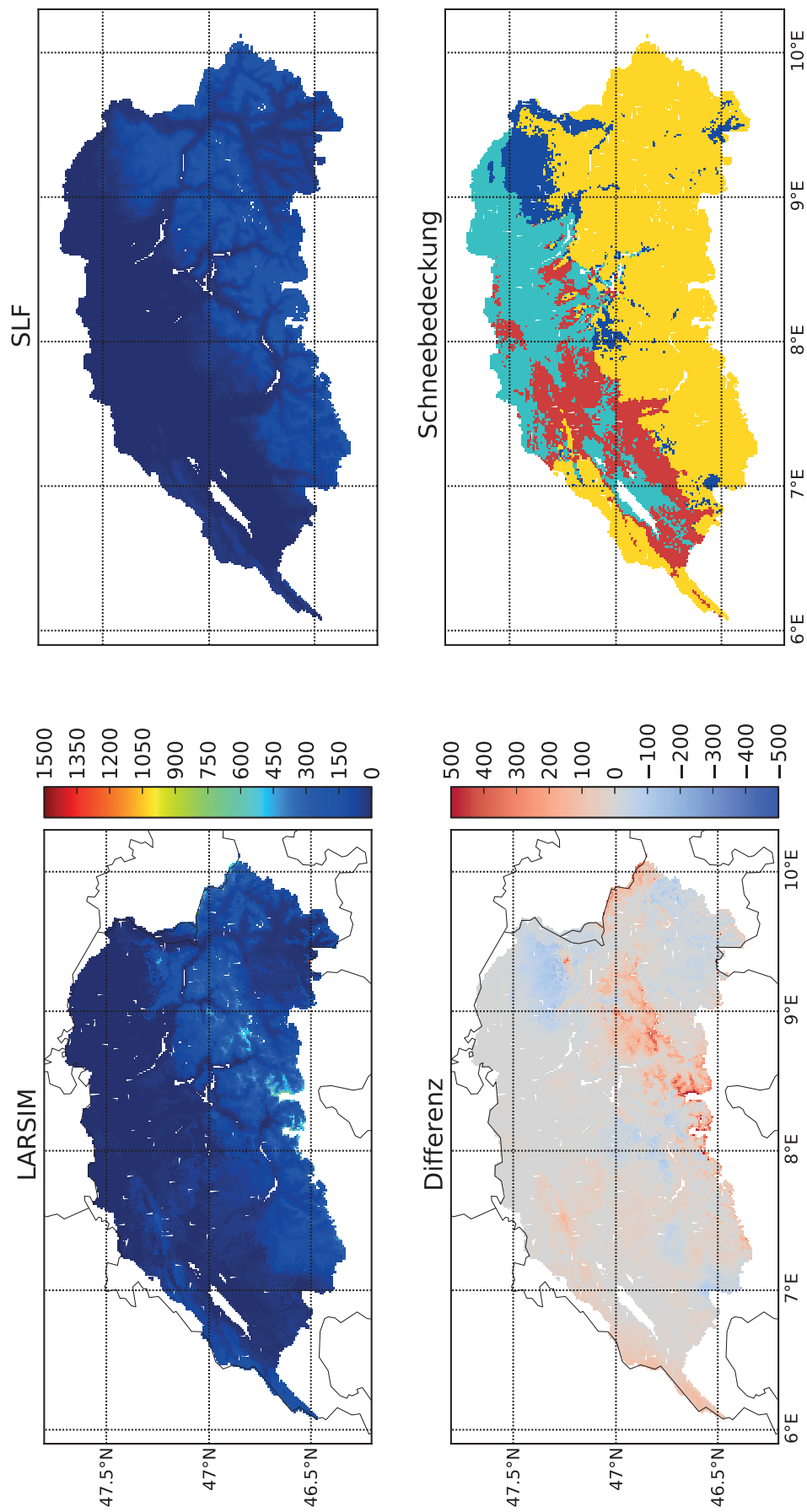


Abb. 6.8: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 1998

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

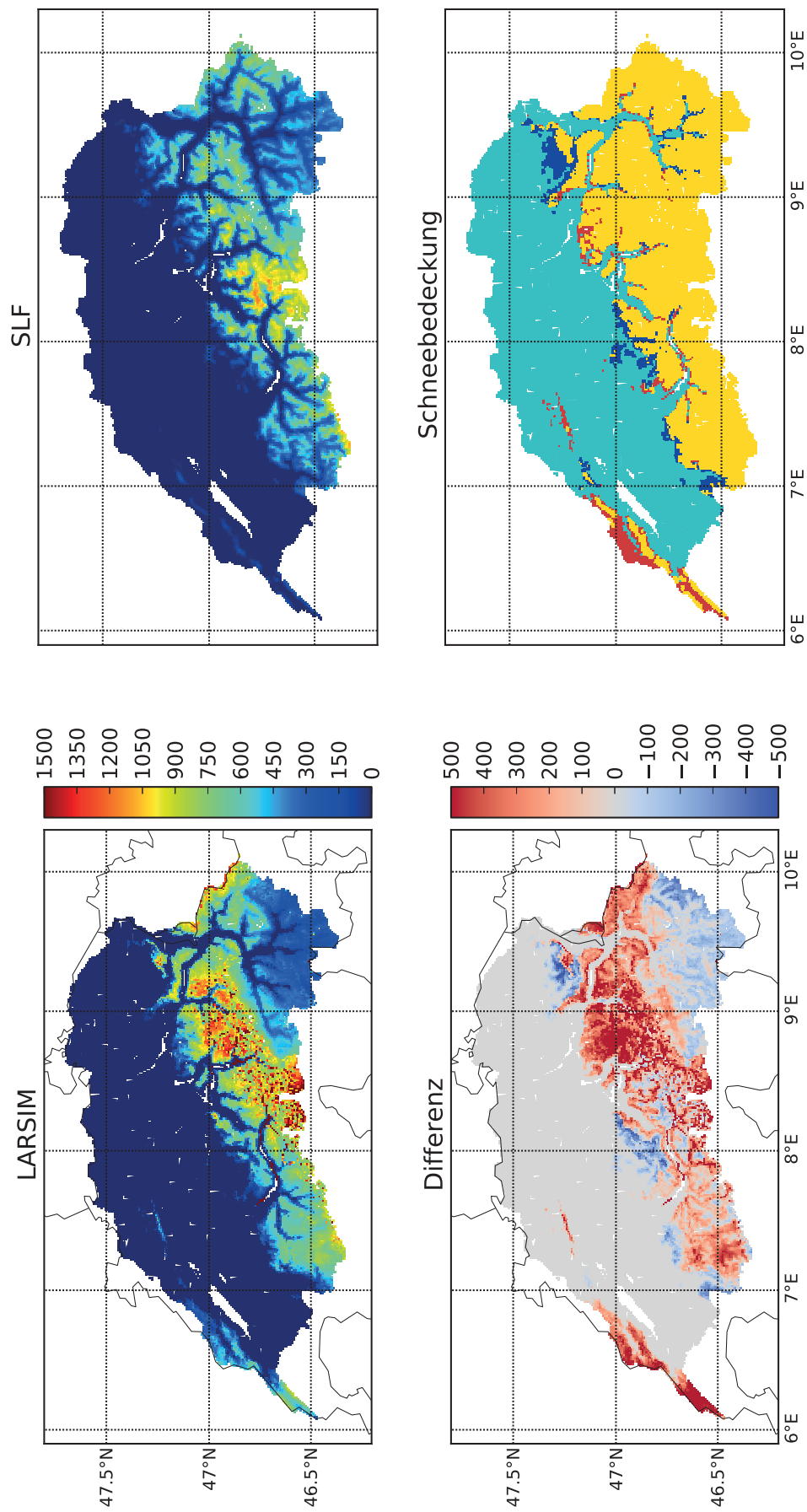


Abb. 6.9: Karten der maximalen SWE vom 07. April 1999

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: SWE_{LARSIM} – SWE_{SLF} [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

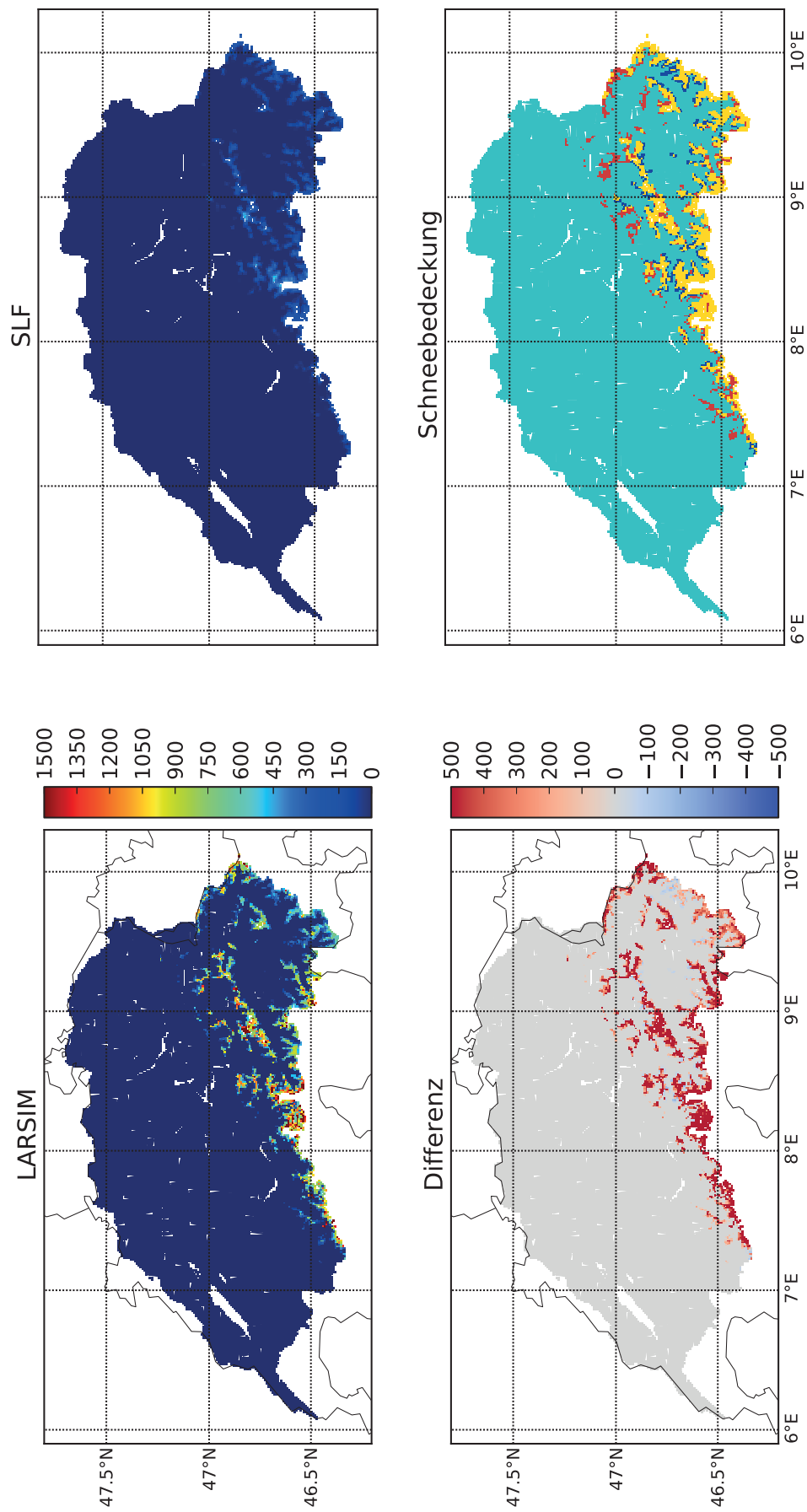


Abb. 6.10: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 1999

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

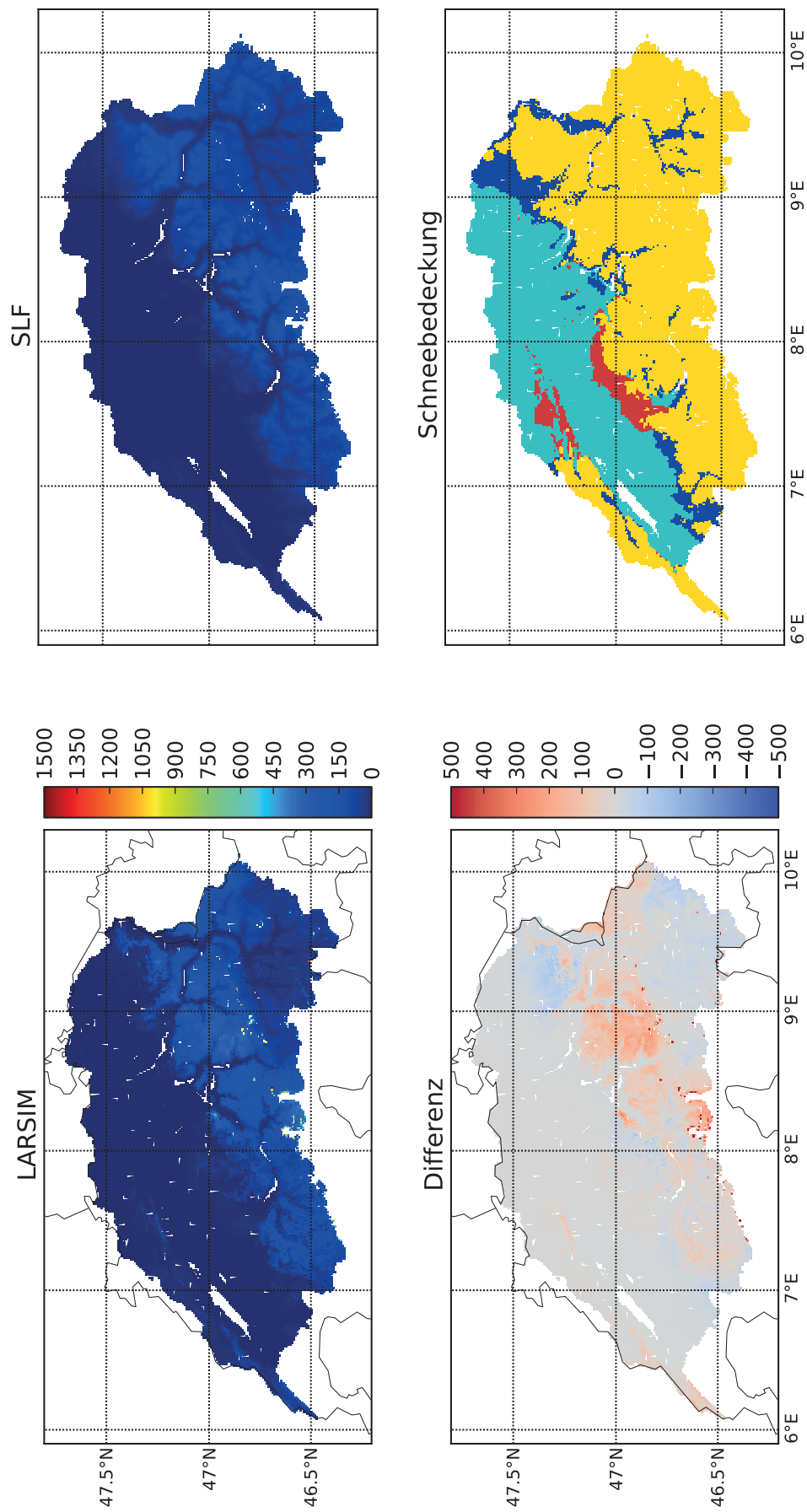


Abb. 6.11: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 1999

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

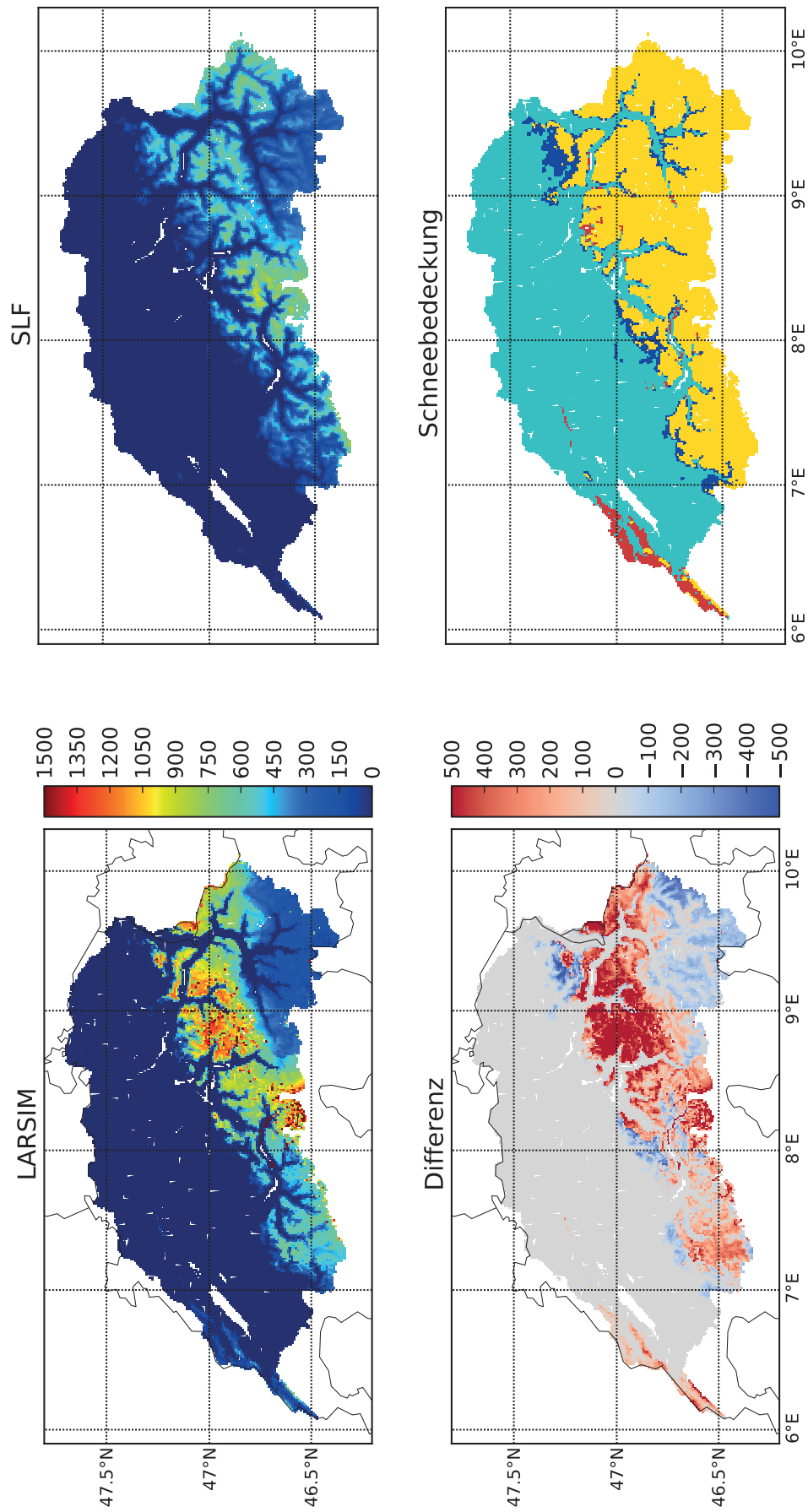


Abb. 6.12: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2000

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

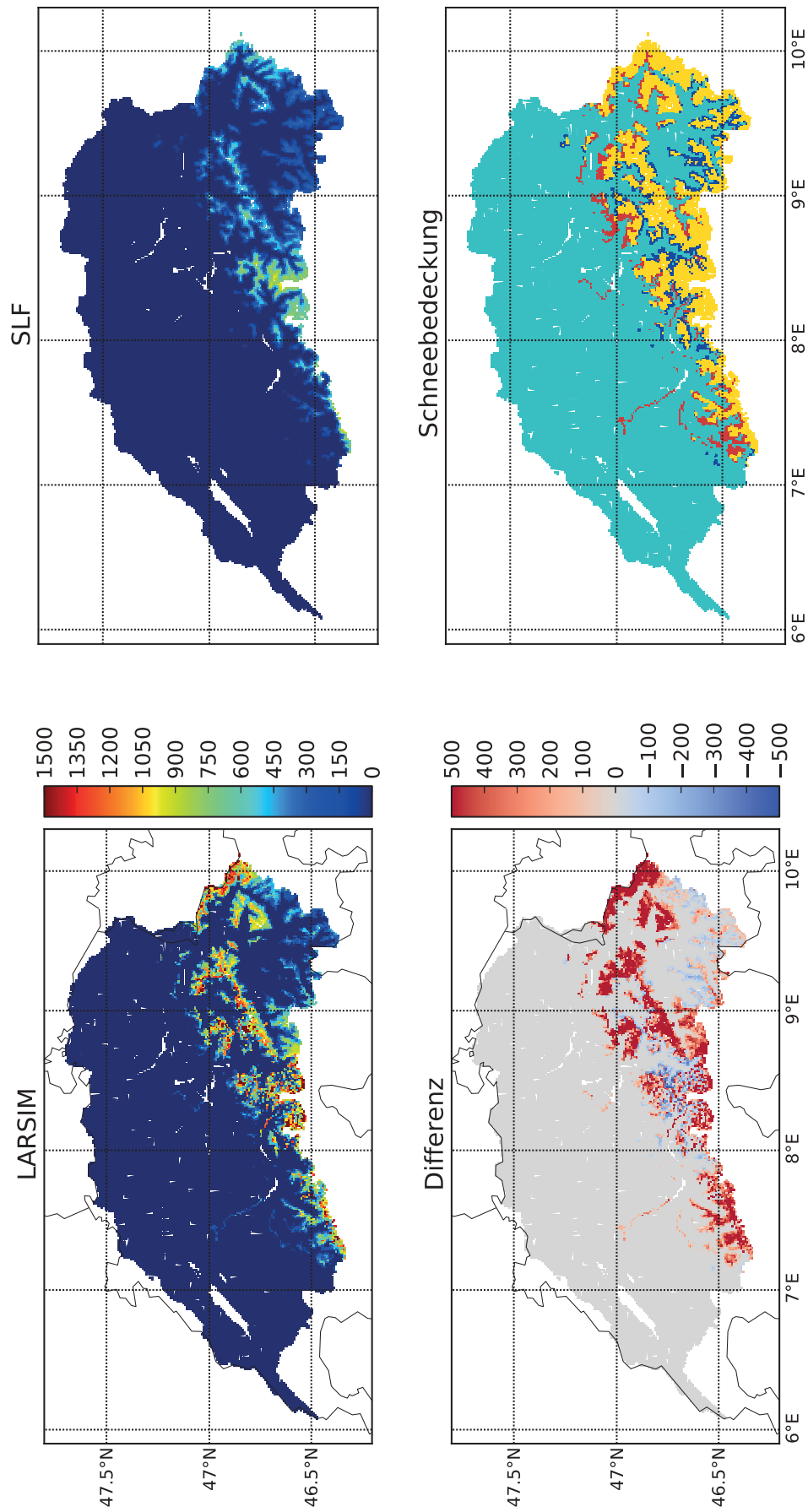


Abb. 6.13: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2000

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

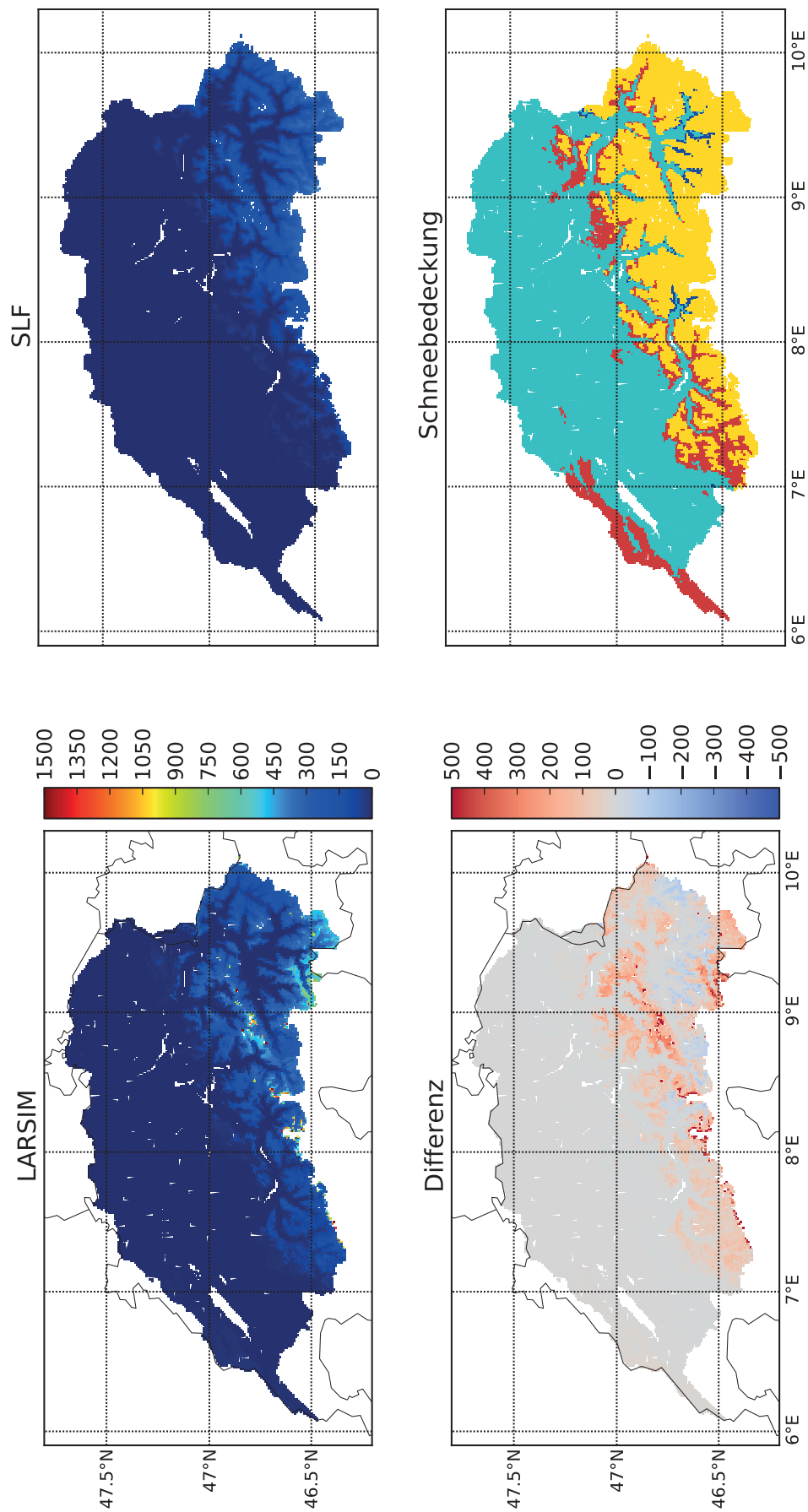


Abb. 6.14: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2000

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

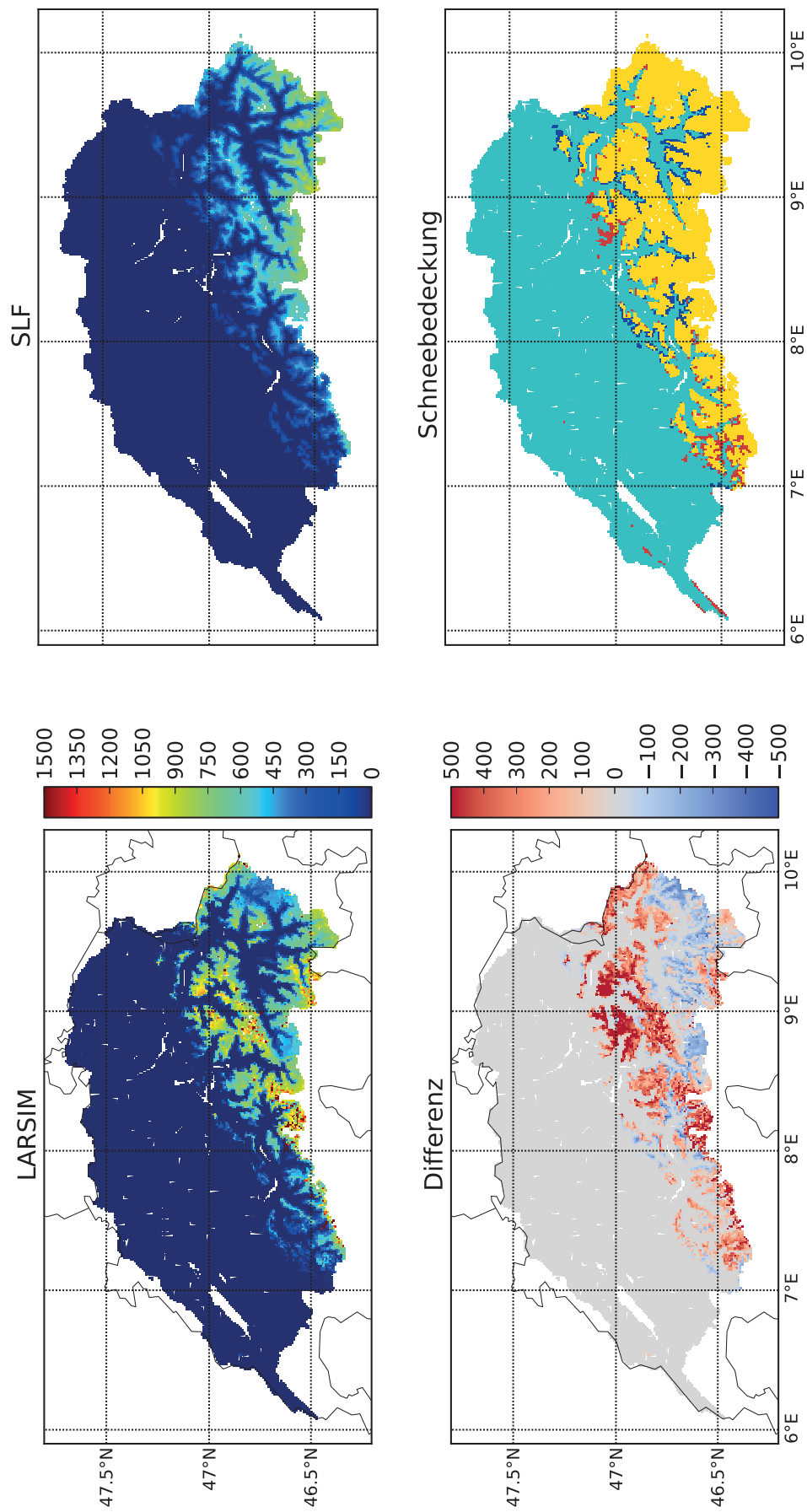


Abb. 6.15: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2001

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

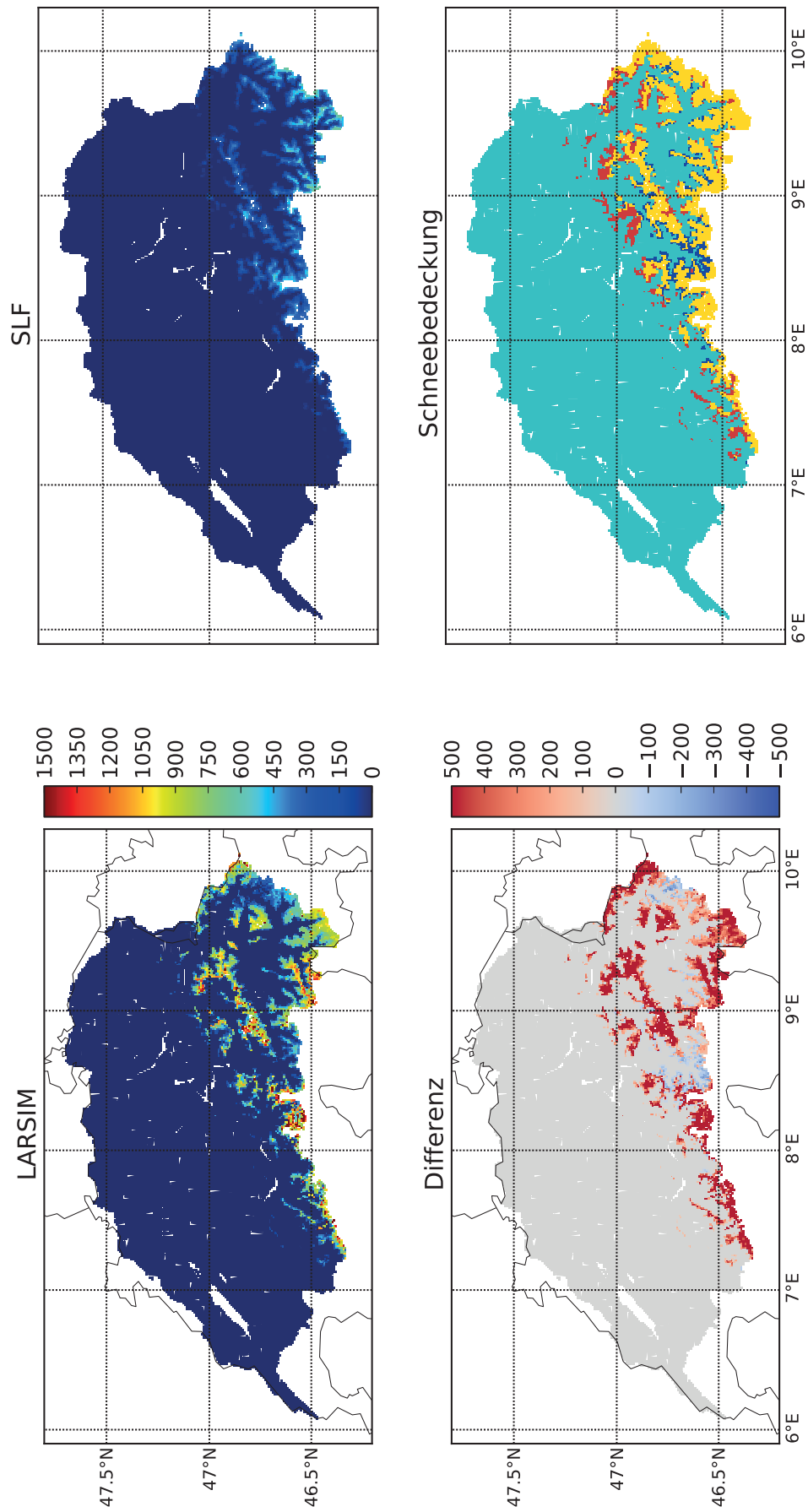


Abb. 6.16: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2001

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

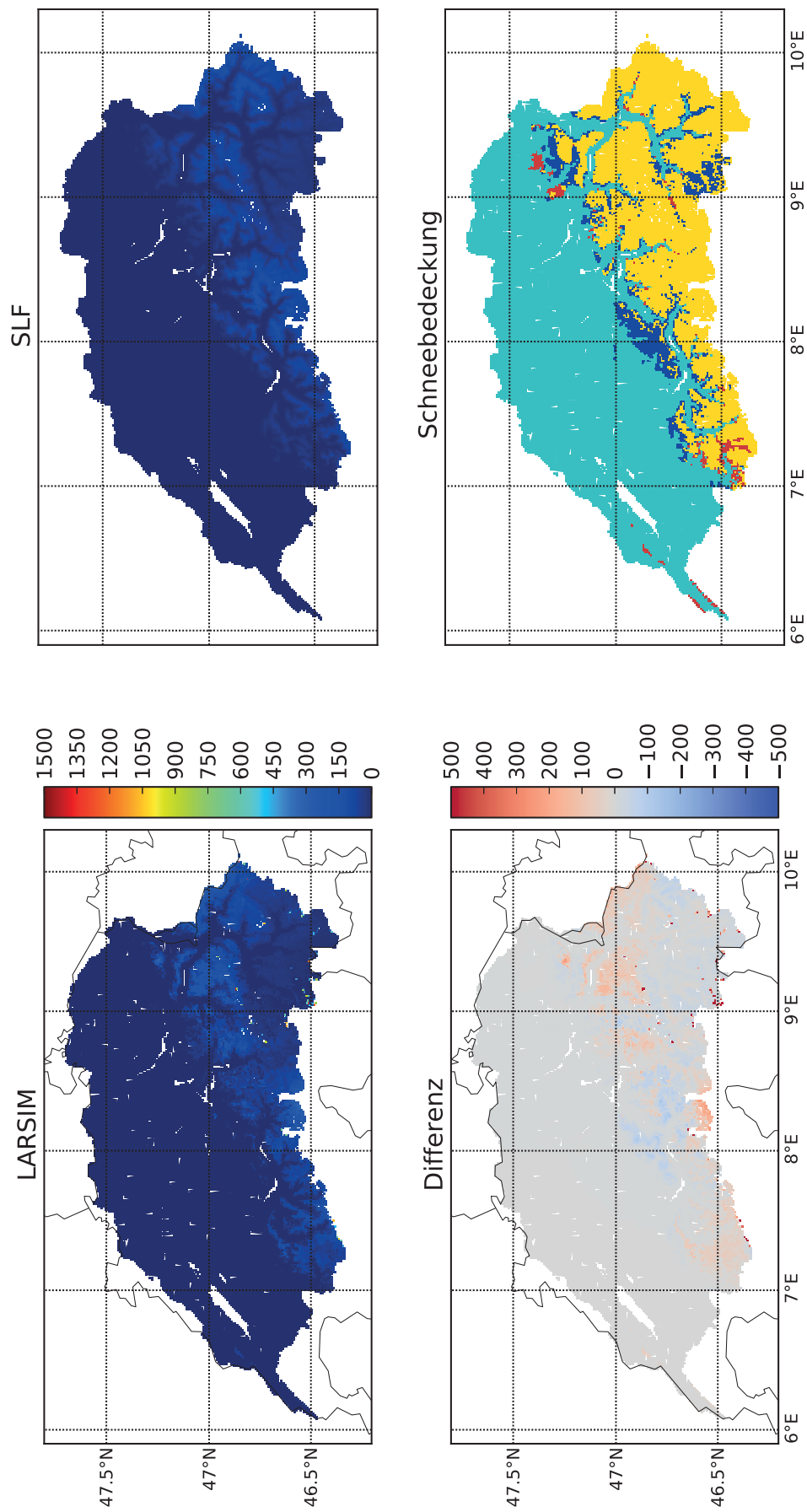


Abb. 6.17: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2001

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

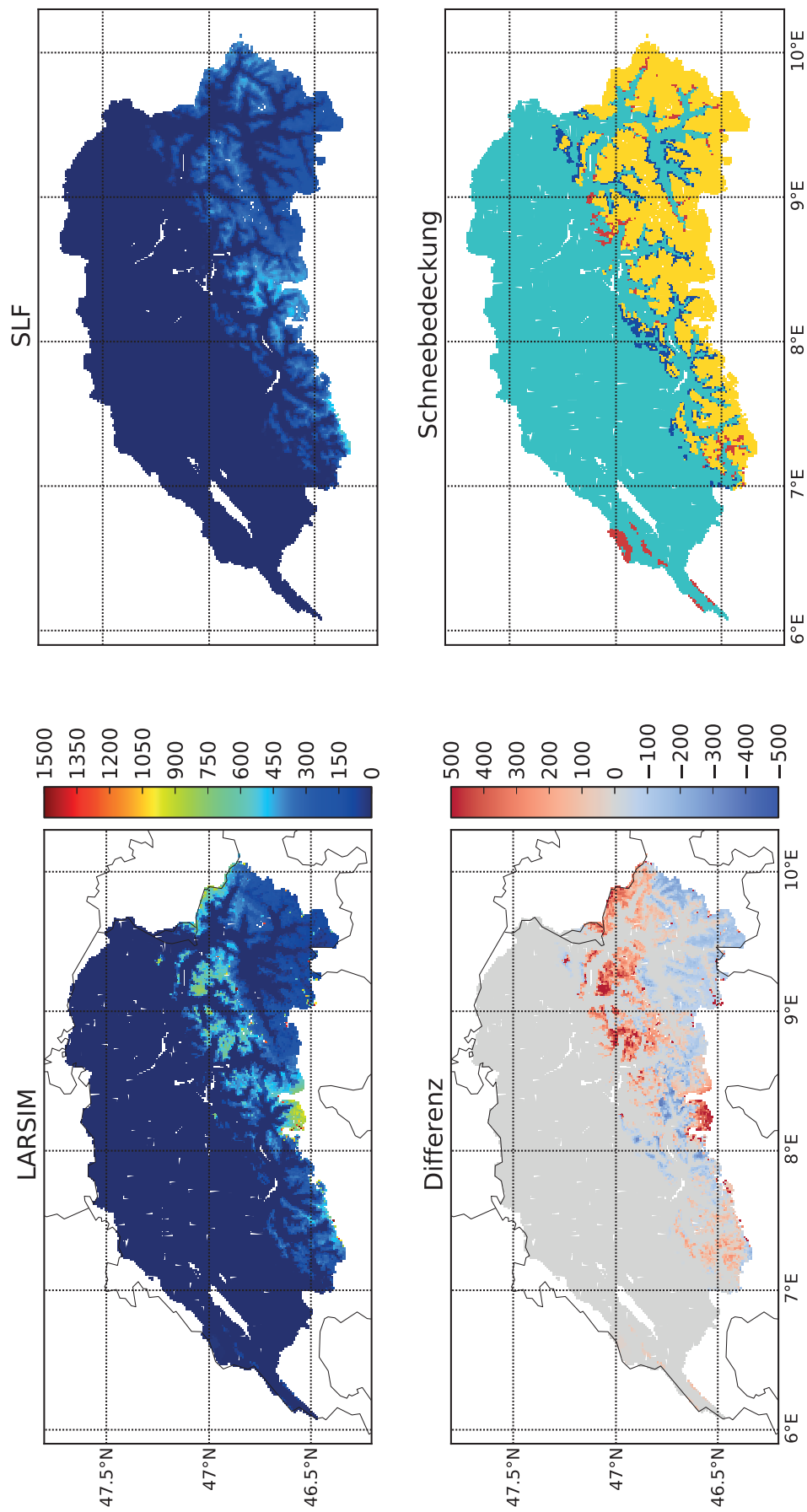


Abb. 6.18: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2002

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

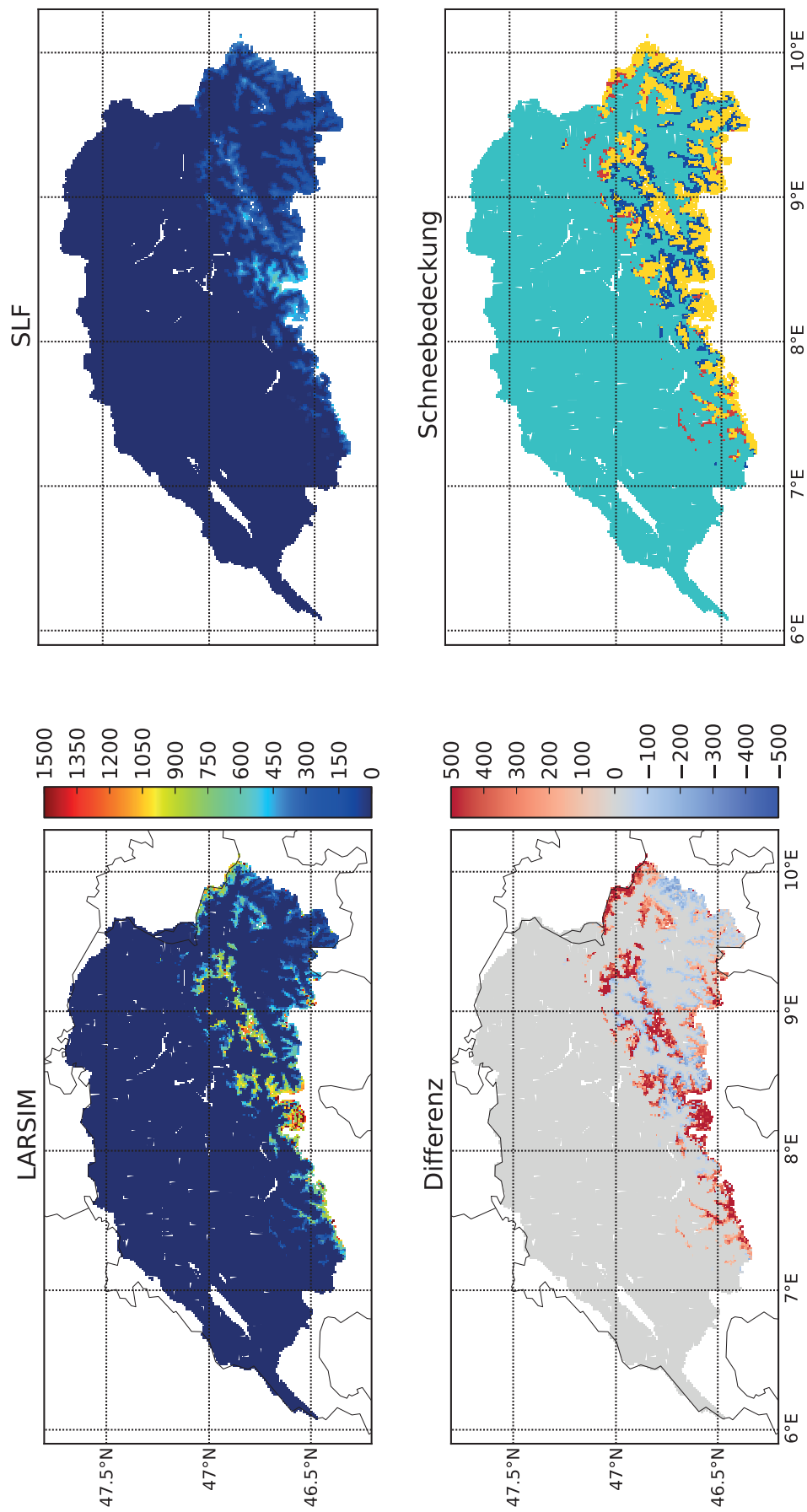


Abb. 6.19: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2002

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

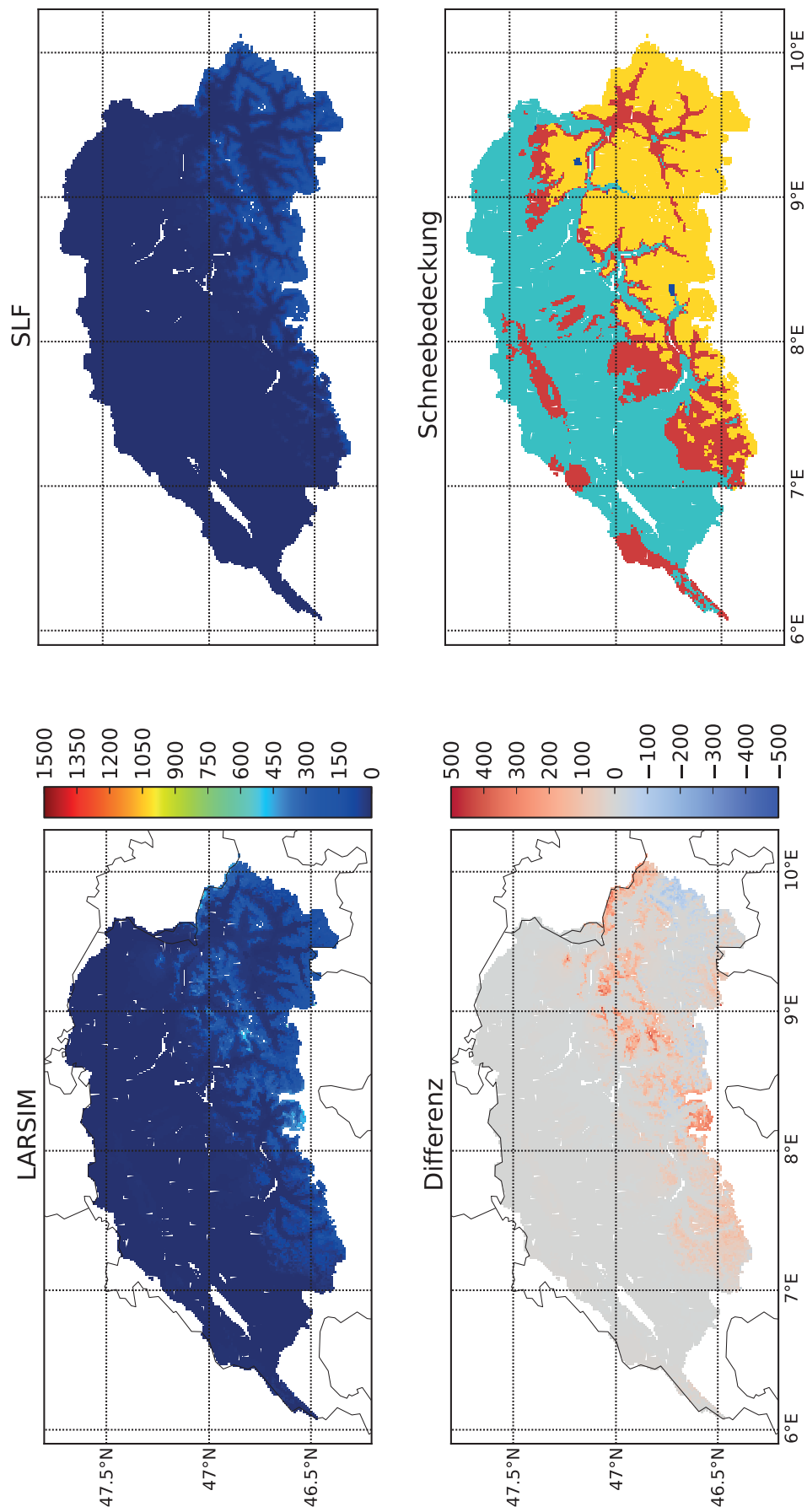


Abb. 6.20: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2003

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

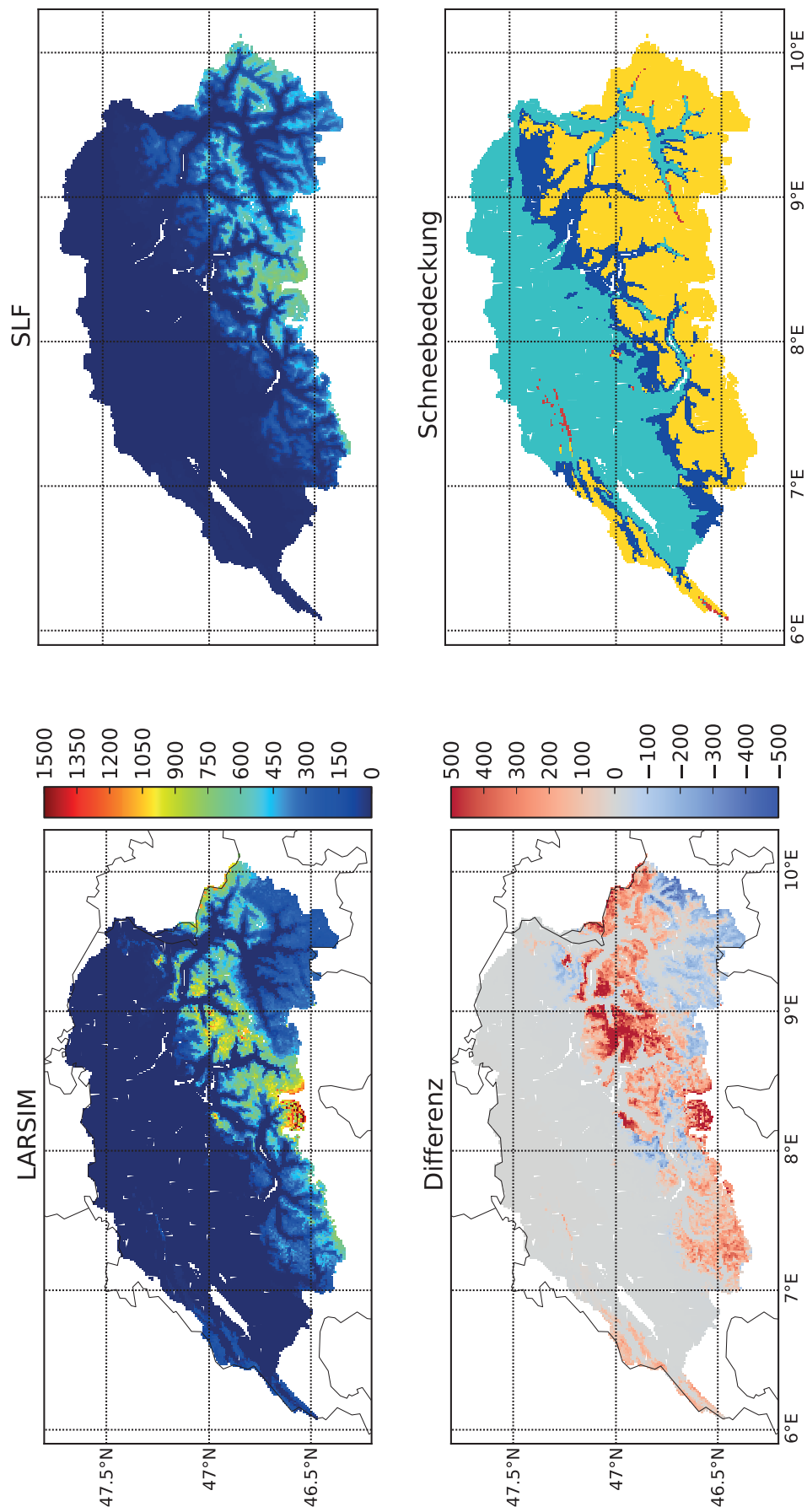


Abb. 6.21: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2004

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF} [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

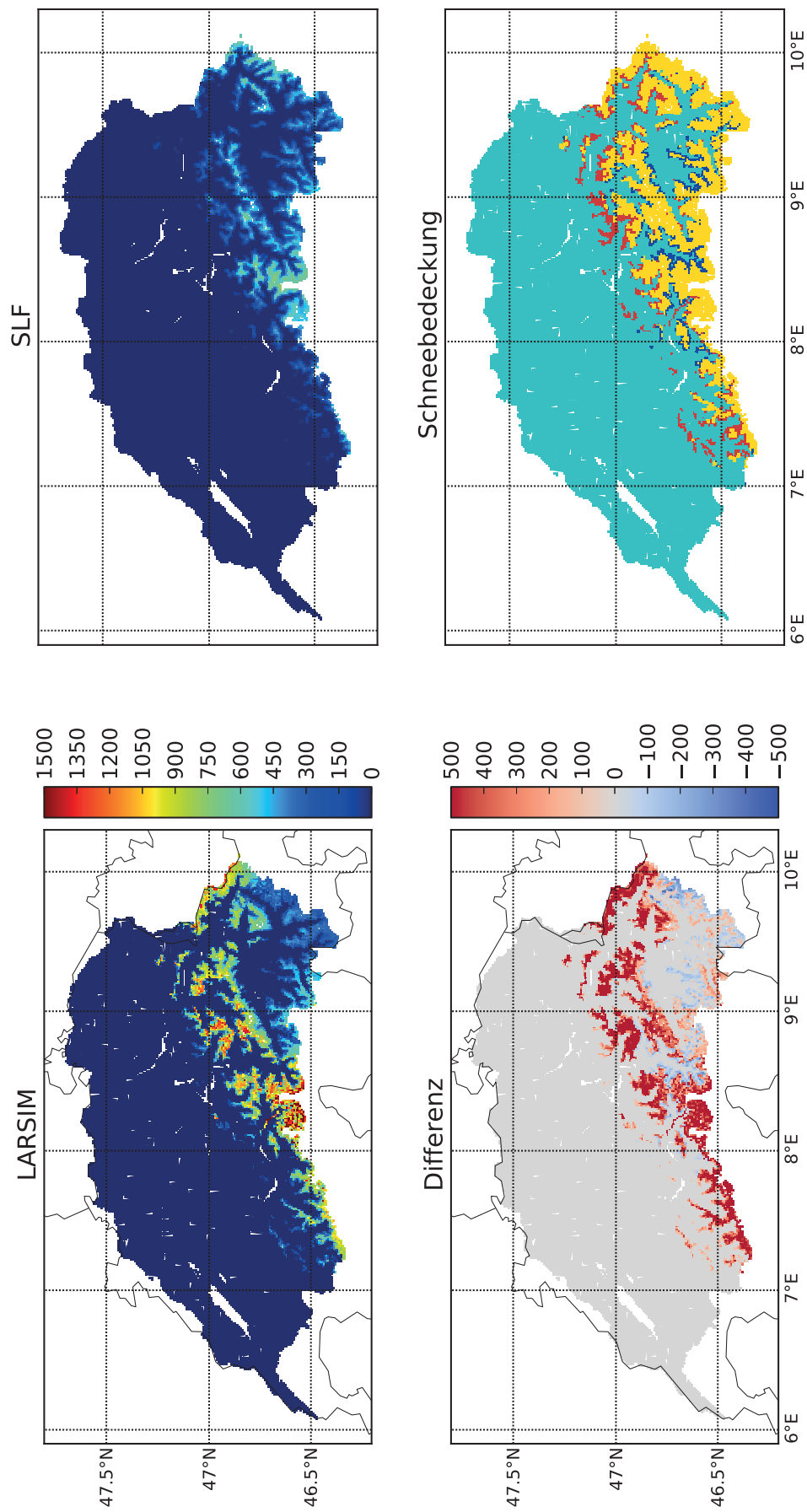


Abb. 6.22: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2004

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

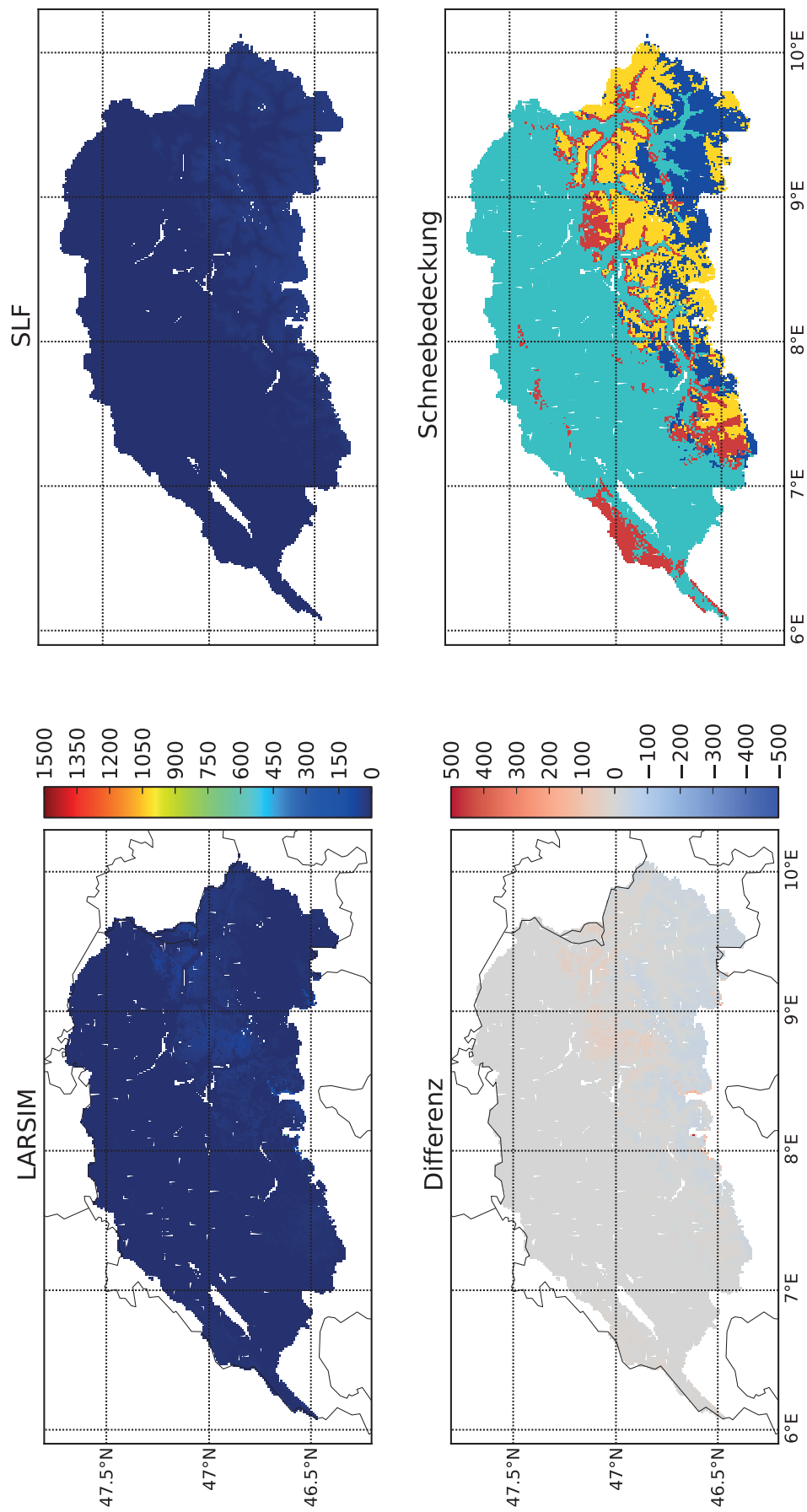


Abb. 6.23: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2004

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

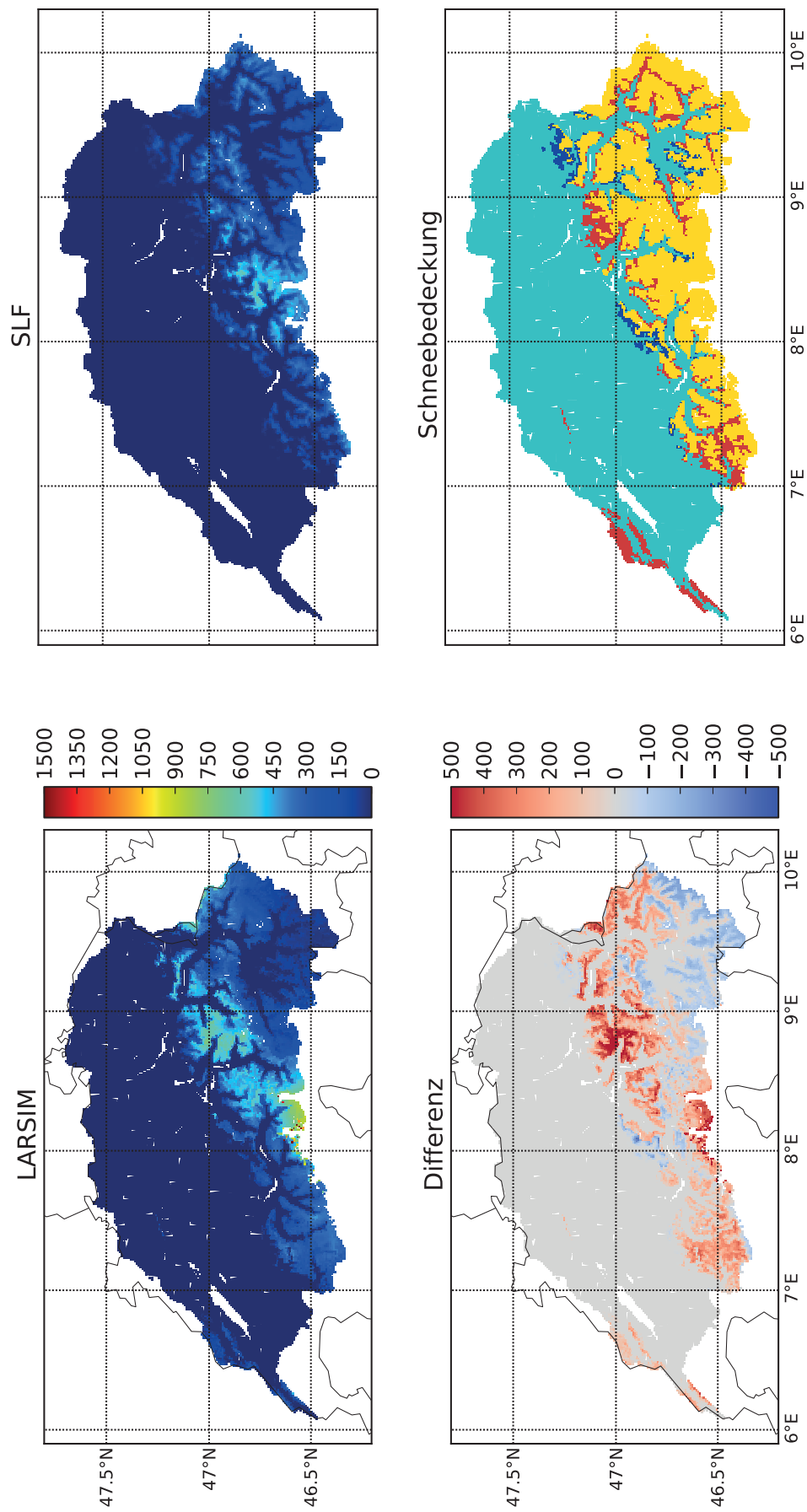


Abb. 6.24: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2005

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

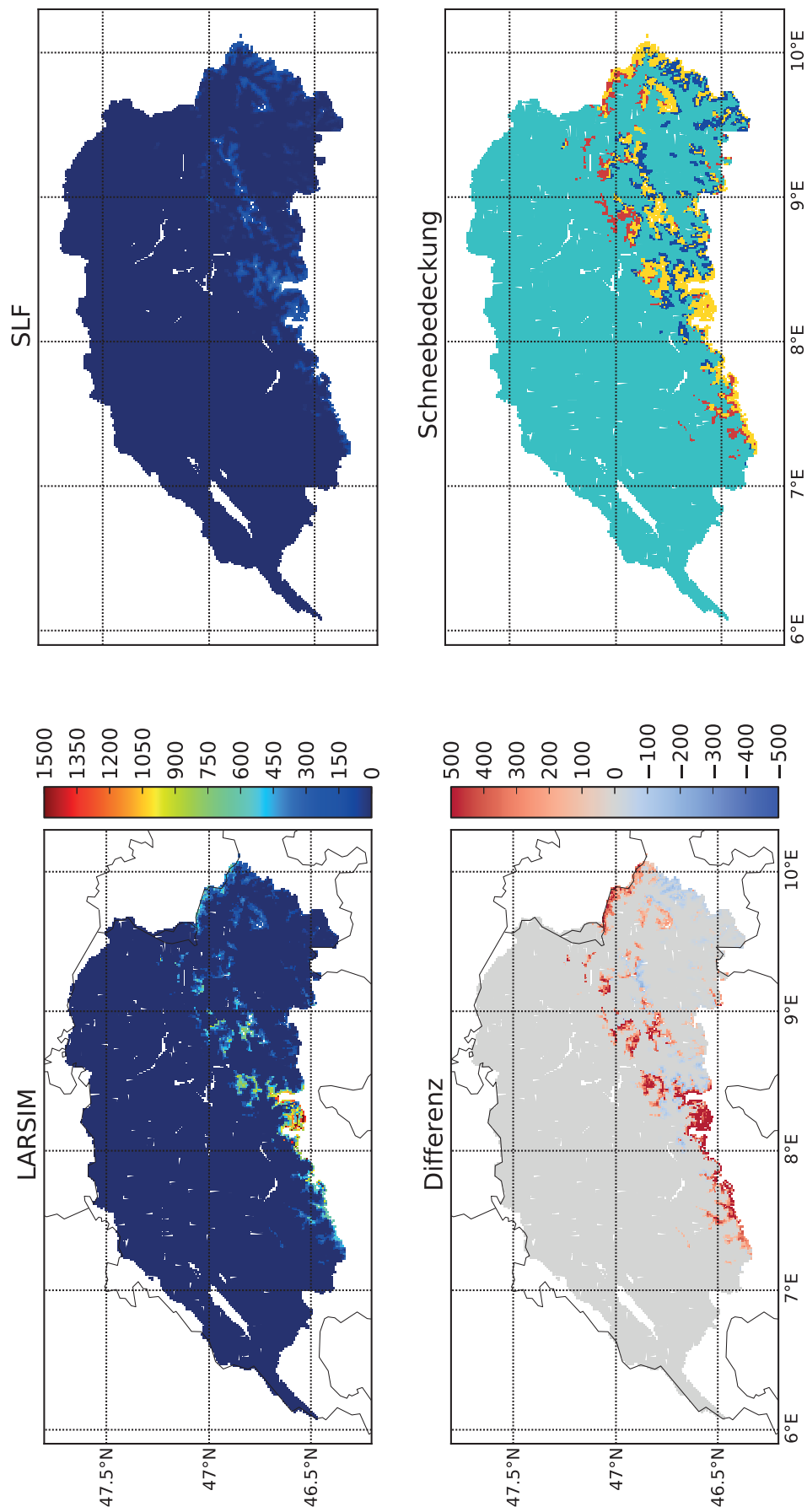


Abb. 6.25: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2005

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

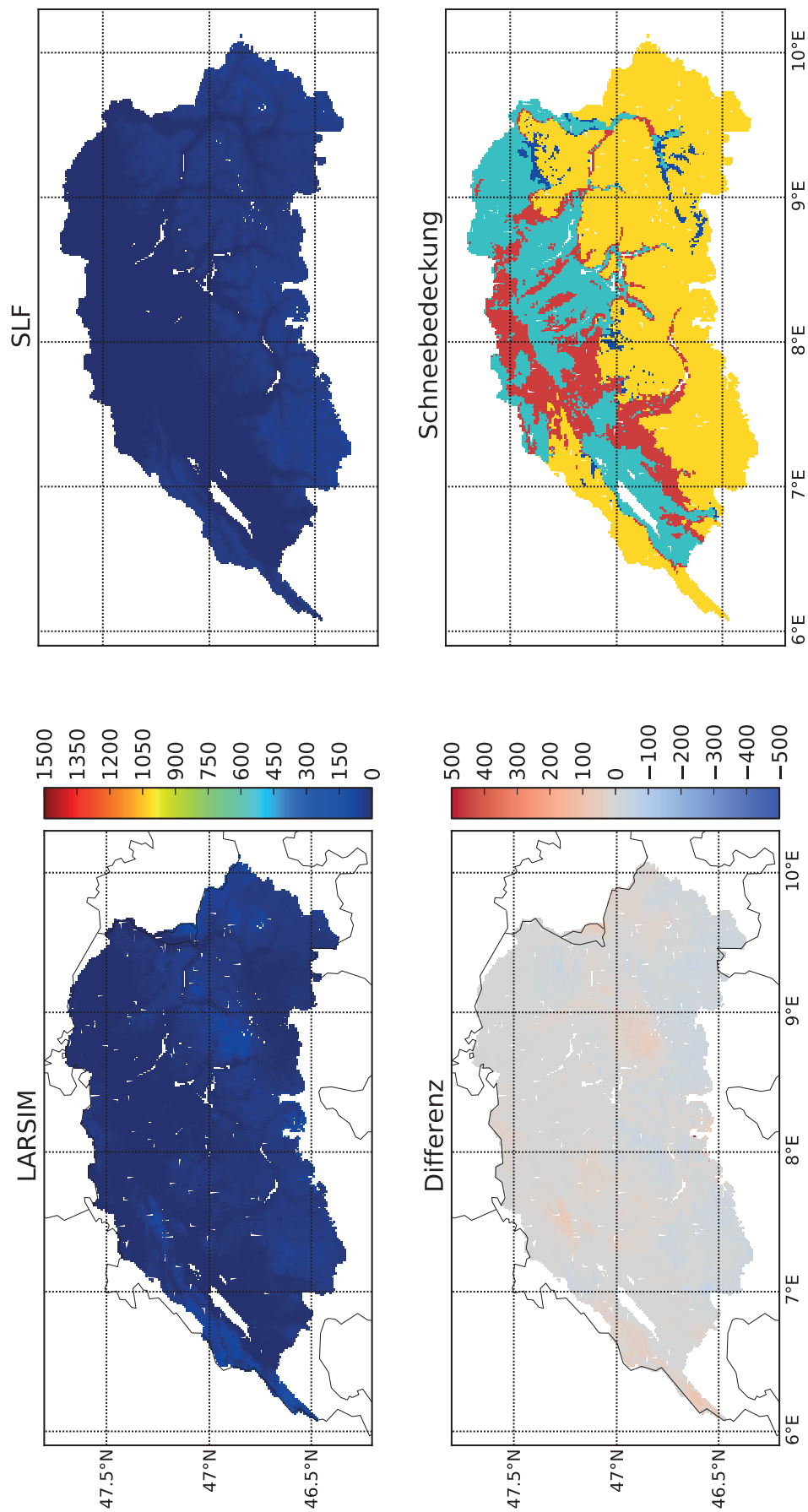


Abb. 6.26: Karten der Akkumulationsphase vom 15. Dezember 2005

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

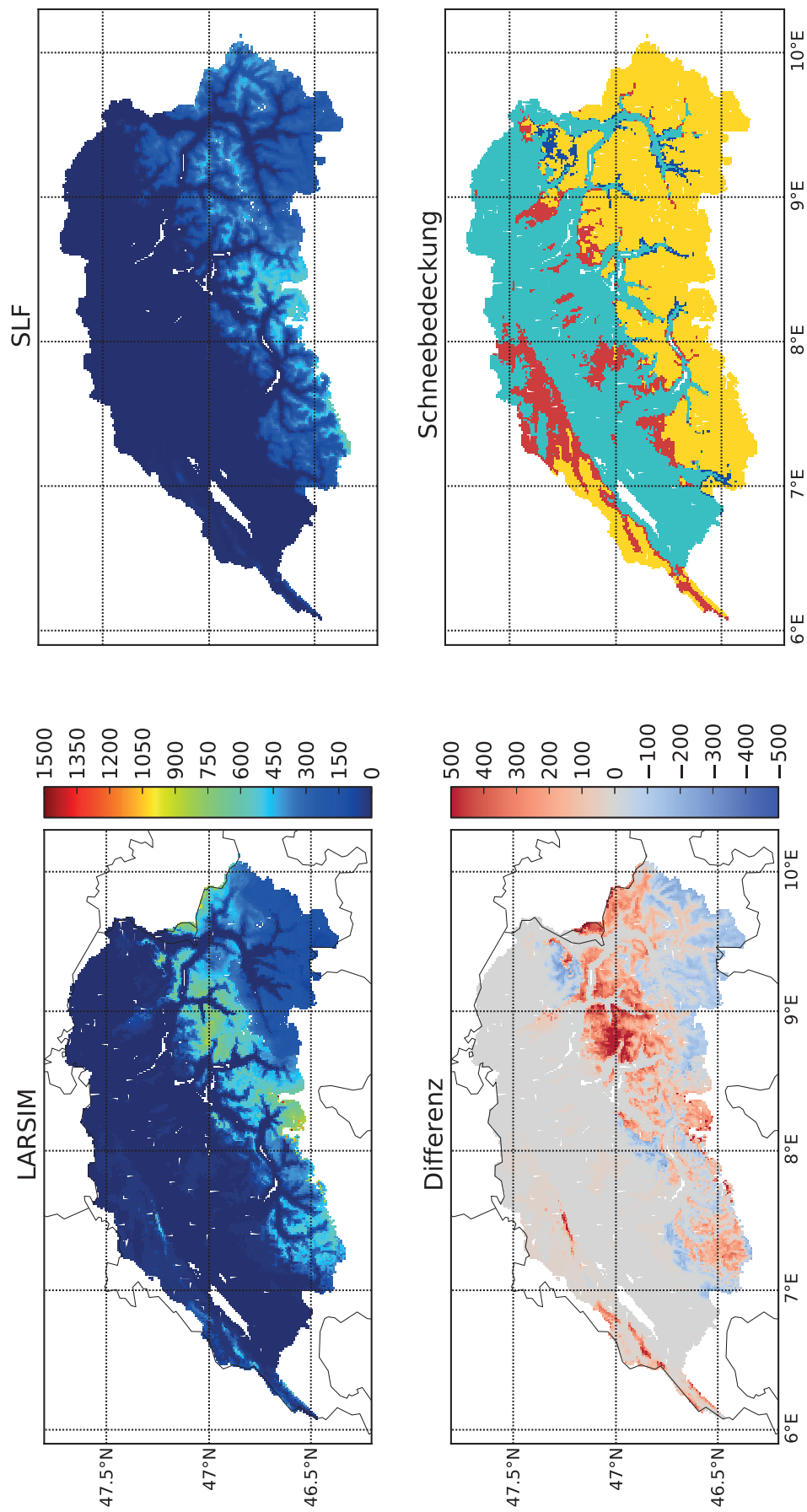


Abb. 6.27: Karten der maximalen SWE vom 07. April 2006

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).

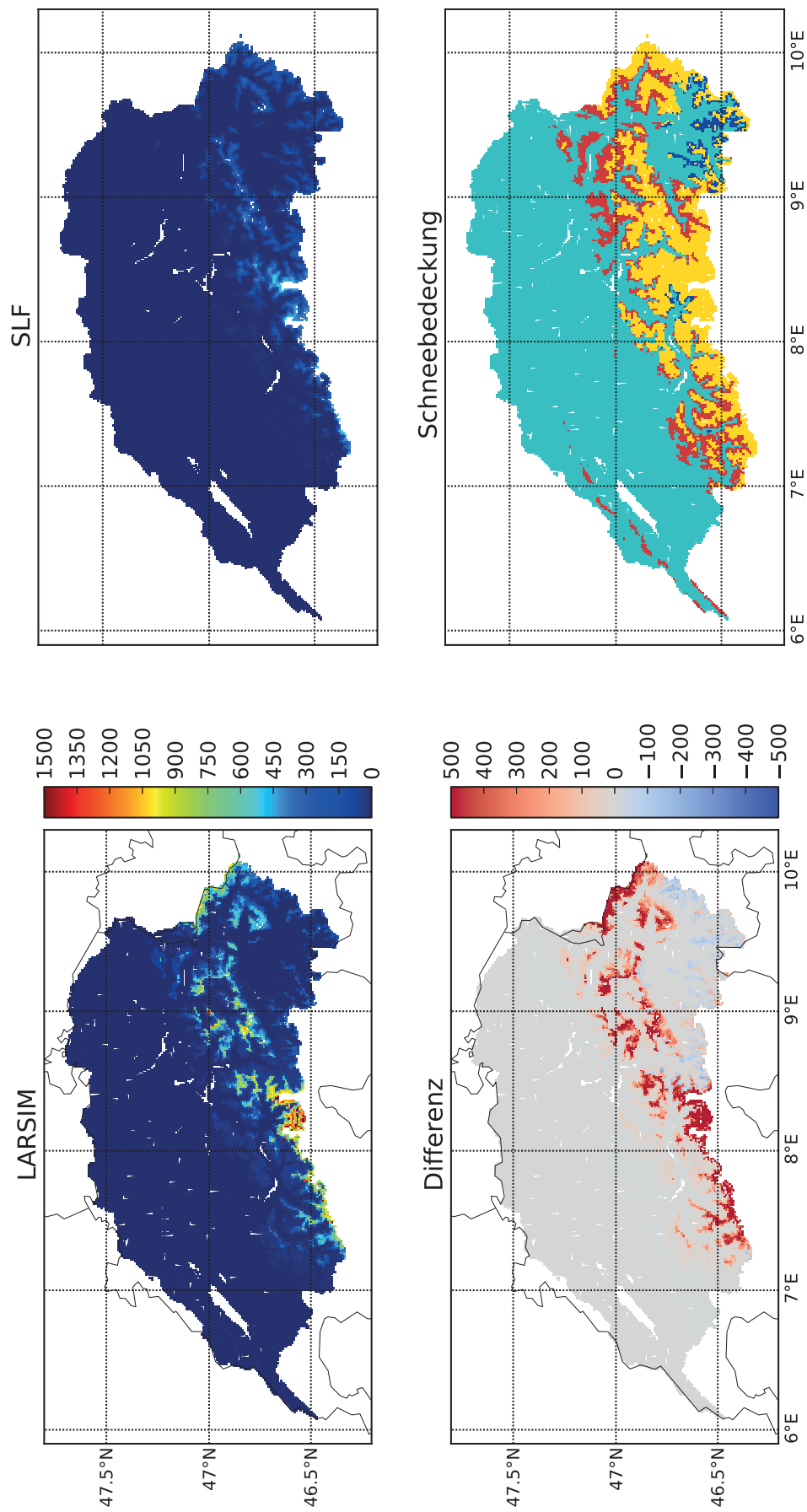


Abb. 6.28: Karten der Schneeschmelzphase vom 01. Juni 2006

Links oben: SWE_{LARSIM} [mm], rechts oben: SWE_{SLF} [mm], links unten: $SWE_{LARSIM} - SWE_{SLF}$ [mm], rechts unten: Vergleich der Schneebedeckung mit nur LARSIM Schnee (rot), nur SLF-Produkt Schnee (blau), beide Schnee (gelb) und beide kein Schnee (türkis).