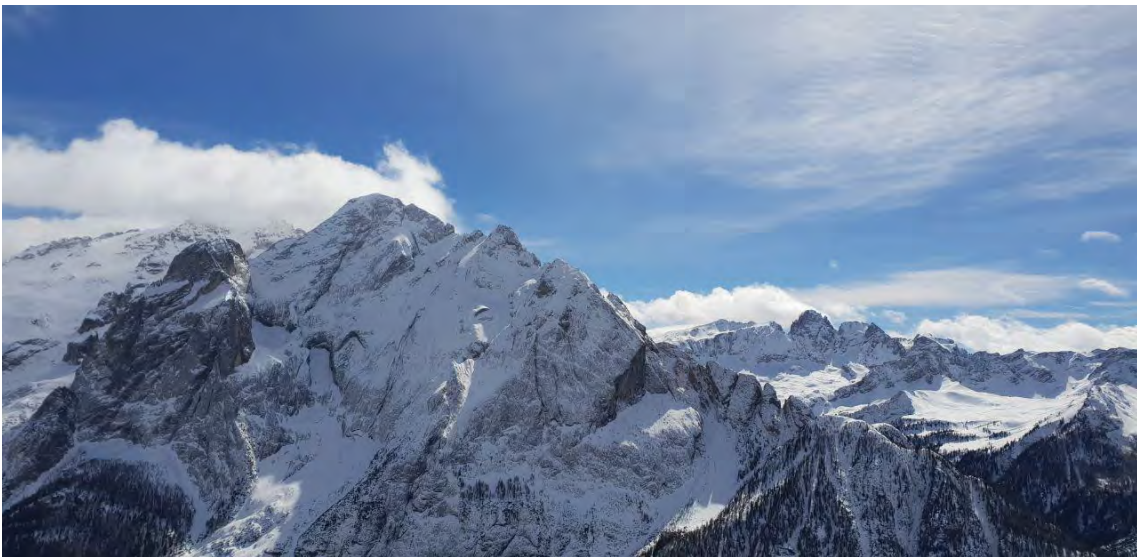


Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Master-Thesis
von
Stefanie Bittner

**Parametrisierung eines konzeptionellen
Schneeeumverteilungsansatzes bei der
Modellierung alpiner Einzugsgebiete**



Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler
Freiburg i. Br., März 2019

Professur für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Master-Thesis
von
Stefanie Bittner

Parametrisierung eines konzeptionellen Schneeumverteilungsansatzes bei der Modellierung alpiner Einzugsgebiete

Referent:	Prof. Dr. Markus Weiler
Korreferent:	Prof. Dr. Jan Seibert
Betreuende Mitarbeiterin:	Dipl. Hydrologin Irene Kohn

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler
Freiburg i. Br., März 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis des Anhangs	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Zusammenfassung	XV
1 Einleitung	1
1.1 Alpine Einzugsgebiete	1
1.2 Schneebedeckung und Schneenumverteilung in alpinen Gebieten	1
1.3 Bedeutung der räumlichen Verteilung alpiner Schneebedeckung	2
1.4 Hydrologische Modelle	4
2 Problemstellung und Zielsetzung	5
2.1 Schneetürme bei der hydrologischen Modellierung	5
2.2 Schneenumverteilungsansätze in hydrologischen Modellen	7
2.2.1 Schneenumverteilungsansatz im HBV-Light-Modell	8
2.3 Zielsetzung	8
3 Material und Methoden	11
3.1 HBV-Light-Modell	11
3.1.1 Verwendete Gütemaße	14
3.1.2 Multi-Kriterien-Kalibrierung	15
3.2 Gebietsauswahl	18
3.2.1 Datengrundlage	19
3.2.2 Schneestationsdaten	19
3.3 Variation der Schneenumverteilungsparameter	21
3.4 Analyse der simulierten Modellausgabeparameter	22
3.4.1 Auswertung der Zeitreihen	22
3.4.2 Analyse der Schneehöhen	22
3.4.3 Auswertung der flächenverteilten Daten	22
3.5 Sensitivitätsanalyse	23
3.5.1 Graphische Auswertung der Gütemaße	23
3.5.2 Monte Carlo Methode	24
3.5.3 Regionalisierte Sensitivitätsanalyse	24
4 Ergebnisse	27
4.1 Kalibrierung	27
4.2 Analyse der simulierten Modellausgabeparameter	30
4.2.1 Auswertung Zeitreihen	30
4.2.1.1 Abfluss	30
4.2.1.2 Schnee im gesamten Einzugsgebiet	35

4.2.1.3	Schnee unterhalb 2500 m	36
4.2.1.4	Schneebedeckung	38
4.2.1.5	Gletscher	38
4.2.2	Vergleich mit Stationsdaten	40
4.2.2.1	Engelberger Aa	40
4.2.2.2	Schwarze Lütschine	42
4.2.2.3	Weisse Lütschine	45
4.2.3	Analyse Schneehöhen	49
4.2.3.1	Gemittelte Schneehöhen über den Schneeumverteilungsbereich	49
4.2.3.2	Gemittelte Schneehöhen über die Restschneemenge	49
4.2.3.3	Gemittelte Schneehöhen über die Obere Höhengrenze	50
4.2.4	Auswertung der flächenverteilten Daten	52
4.3	Sensitivitätsanalyse	53
4.3.1	Graphische Auswertung der Gütemaße	53
4.3.1.1	Lindström Maß	53
4.3.1.2	SWE MANE	55
4.3.1.3	SnowCover RMSE	58
4.3.1.4	Gewichtetes Gütemaß	60
4.3.2	Monte-Carlo-Methode und Regionalisierte Sensitivitätsanalyse	63
4.3.2.1	Schwarze Lütschine	63
4.3.2.2	Weisse Lütschine	64
4.3.2.3	Engelberger Aa	64
5	Diskussion	67
5.1	Kalibrierung	67
5.2	Analyse der simulierten Modellausgabeparameter	67
5.2.1	Auswertung der Zeitreihe	67
5.2.2	Stationsdaten	71
5.2.2.1	Engelberger Aa	71
5.2.2.2	Schwarze Lütschine	71
5.2.2.3	Weisse Lütschine	72
5.2.3	Analyse der Schneehöhen	73
5.2.3.1	Gemittelte Schneehöhen über den Schneeumverteilungsbereich	73
5.2.3.2	Gemittelte Schneehöhen über die Restschneemenge	74
5.2.3.3	Gemittelte Schneehöhen über die Obere Höhengrenze	75
5.2.4	Analyse der flächenverteilten Daten	75
5.3	Sensitivitätsanalyse	76
5.3.1	Graphische Auswertung der Gütemaße	76
5.3.1.1	Lindström Maß	76
5.3.1.2	SWE MANE	77
5.3.1.3	SnowCover RMSE	78
5.3.1.4	Gewichtetes Gütemaß	79
5.3.2	Monte-Carlo-Methode und Regionalisierte Sensitivitätsanalyse	80
6	Schlussfolgerung	81
	Literaturverzeichnis	85
	Anhang	89

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der wichtigsten Schneelumverteilungsprozesse.	3
2.1	Schematische Darstellung der modellierten Schneedecke und der Bildung von Schneetürmen in den Hochlagen.	6
2.2	Durch Schneelumverteilung fast schneefreie Bergrücken und steile Flanken. . . .	6
2.3	Schema der Schneelumverteilungsroutine in HBV-Light	9
3.1	HBV Modellstruktur	12
3.2	Grafische Benutzeroberfläche der Kalibrierungsroutine der HBV-Light Software .	17
3.3	Lage der untersuchten Einzugsgebiete	18
3.4	Lage Schneemessstationen in den Einzugsgebieten	21
3.5	Auswertungsgrundlage der RSA.	25
4.1	Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Schwarze Lütschine	28
4.2	Abflusszeitreihe der Schwarzen Lütschine.	31
4.3	Abflussregime der Schwarzen Lütschine.	32
4.4	Zeitreihe des Abflusses aus der Gletscherschmelze für die Schwarze Lütschine. .	32
4.5	Gletscherabflussregime der Schwarzen Lütschine.	33
4.6	Zeitreihe des Abflusses aus der Schneeschmelze für die Schwarze Lütschine. . .	33
4.7	Schneeabflussregime der Schwarzen Lütschine.	34
4.8	Zeitreihe des Abflussanteils Regen für die Schwarze Lütschine.	34
4.9	Regenabflussregime der Schwarzen Lütschine.	35
4.10	Zeitreihe der Schneehöhen im EZG Schwarze Lütschine.	36
4.11	Langjährige Tagesmittelwerte der Schneehöhen im EZG Schwarze Lütschine. . .	37
4.12	Zeitreihe der Schneehöhen unterhalb von 2500 m im EZG Schwarze Lütschine. .	37
4.13	Langjährige Tagesmittelwerte der Schneehöhen unterhalb von 2500 m im EZG Schwarze Lütschine.	38
4.14	Zeitreihe der Schneebedeckung im EZG Schwarze Lütschine.	39
4.15	Langjährige Tagesmittelwerte der Schneebedeckung im EZG Schwarze Lütschine.	39
4.16	Gletscherentwicklung im EZG Schwarze Lütschine.	40
4.17	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Engelberg im EZG Engelberger Aa.	41
4.18	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Engelberg im EZG Engelberger Aa.	42
4.19	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Titlis im EZG Engelberger Aa.	43
4.20	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Titlis im EZG Engelberger Aa.	43
4.21	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station First im EZG Schwarze Lütschine.	44
4.22	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station First im EZG Schwarze Lütschine.	44
4.23	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Männlichen im EZG Schwarze Lütschine.	45

4.24	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Männlichen im EZG Schwarze Lütschine.	46
4.25	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Mürren im EZG Weissen Lütschine.	47
4.26	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Mürren im EZG Schwarze Weisse.	47
4.27	Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Schilthorn im EZG Weissen Lütschine.	48
4.28	Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Schilthorn im EZG Schwarze Weisse.	48
4.29	Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH.	50
4.30	Mittlere Schneehöhen am 1. April in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH im EZG Schwarze Lütschine.	51
4.31	Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und OH im EZG Schwarze Lütschine.	51
4.32	Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und RM im EZG Schwarze Lütschine.	52
4.33	Mittlere Gebietshöhe, ab der auf den unvergletscherten Flächen im EZG Schwarze Lütschine am 1. April Schnee liegt.	53
4.34	Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM.	54
4.35	Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB.	55
4.36	Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen SUB und RM.	56
4.37	Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM.	57
4.38	Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB.	58
4.39	Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB.	59
4.40	Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM.	59
4.41	Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB.	60
4.42	Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB.	61
4.43	Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM.	62
4.44	Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB.	62
4.45	Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB.	63
4.46	Streudiagramme und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lütschine.	65

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der Modellparameter (<i>HBV-Light: Help HBV-Light</i> 2018))	13
3.2	Zielfunktionen und deren Gewichtung für die Kalibrierung.	16
3.3	Parameterbereiche für die Kalibrierung.	16
3.4	Charakterisierung der untersuchten Einzugsgebiete (Stahl et al., 2016).	18
3.5	Informationen zu den Schneemessstationen.	20
4.1	Kalibrierergebnisse	29
4.2	Ergebnisse der Kalibrierung des HBV-Light-Modells für das EZG Schwarze Lüt- schine.	29
4.3	Ergebnisse der RSA für die EZG Schwarze Lütchine, Weisse Lütchine und En- gelberger Aa.	66

Abbildungsverzeichnis des Anhangs

A.1	Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Engelberger Aa. .	89
A.2	Abflusszeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	90
A.3	Abflussregime der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	91
A.4	Abfluss der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	91
A.5	Abflussregime der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	92
A.6	Abfluss der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	92
A.7	Abflussregime der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	93
A.8	Abfluss Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	93
A.9	Abflussregime Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	94
A.10	Schneezeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	94
A.11	Schneeregime der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	95
A.12	Schneezeitreihe unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	95
A.13	Schneeregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	96
A.14	Zeitreihe der Schneebedeckung unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	96
A.15	Schneebedeckungsregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	97
A.16	Gletscherentwicklung der Simulationen und dem Kalibrierwert. EZG Engelberger Aa	97
A.17	Mittlere Schneehöhen aus RM und OH. EZG Engelberger Aa	98
A.18	Mittlere Schneehöhen am 1. April aus RM und OH. EZG Engelberger Aa	98
A.19	Mittlere Schneehöhen aus SUB und OH. EZG Engelberger Aa.	99
A.20	Mittlere Schneehöhen aus SUB und RM. EZG Engelberger Aa.	99
A.21	Mittlere Gebietshöhe für Schnee am 1. April. EZG Engelberger Aa.	100
A.22	Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und RM. .	100
A.23	Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und SUB. .	101
A.24	Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen SUB und RM. .	101
A.25	Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und RM. . .	102
A.26	Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. .	102
A.27	Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. EZG Engelberger Aa.	103

A.28 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und RM.	103
A.29 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und SUB.	104
A.30 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. EZG Engelberger Aa.	104
A.31 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und RM. . .	105
A.32 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und SUB. . .	105
A.33 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen RM und SUB. . .	106
A.34 Kumulative Verteilungen für das Lindström Maß. EZG Engelberger Aa.	107
A.35 Kumulative Verteilungen für das Gütemaß SWE MANE. EZG Engelberger Aa . .	108
A.36 Kumulative Verteilungen für das Gütemaß SnowCover RMSE. EZG Engelberger Aa	109
A.37 Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Schwarze Lütschine	110
A.38 Abflusszeitreihe Jahresmittelwerte. EZG Weisse Lütschine.	111
A.39 Abflussregime der Simulationen. EZG Weisse Lütschine.	111
A.40 Abfluss der Gletscherschmelze. EZG Weisse Lütschine.	112
A.41 Abflussregime der Gletscherschmelz. EZG Weisse Lütschine.	112
A.42 Abfluss der Schneeschmelze. EZG Weisse Lütschine	113
A.43 Abflussregime der Schneeschmelze. EZG Weisse Lütschine.	113
A.44 Abfluss Regen. EZG Weisse Lütschine.	114
A.45 Abflussregime Regen. EZG Weisse Lütschine.	114
A.46 Schneezeitreihe Jahresmittelwerte. EZG Weisse Lütschine.	115
A.47 Schneeregime. EZG Weisse Lütschine.	115
A.48 Schneezeitreihe unter 2500m Jahresmittelwerte. EZG Weisse Lütschine.	116
A.49 Schneeregime unter 2500m. EZG Weisse Lütschine.	116
A.50 Jahresmittelwerte der Schneebedeckung unter 2500m. EZG Weisse Lütschine. .	117
A.51 Schneebedeckungsregime unter 2500m. EZG Weisse Lütschine.	117
A.52 Gletscherentwicklung. EZG Weisse Lütschine.	118
A.53 Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über SUB wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.	118
A.54 Mittlere Schneehöhe am 1. April aus RM und OH. EZG Weisse Lütschine.	119
A.55 Mittlere Schneehöhe aus SUB und OH. EZG Weisse Lütschine.	119
A.56 Mittlere Schneehöhen aus SUB und RM. EZG Weisse Lütschine.	120
A.57 Mittlere Gebietshöhe für die am 1. April Schnee liegt. EZG Weisse Lütschine. . .	120
A.58 Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und RM. .	121
A.59 Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und SUB. .	122
A.60 Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen SUB und RM. .	122
A.61 Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und RM. . .	123
A.62 Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. EZG Weisse Lütschine.	123
A.63 Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. EZG Weisse Lütschine	124
A.64 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und RM. EZG Weisse Lütschine.	124
A.65 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und SUB.	125
A.66 Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. EZG Weisse Lütschine.	125
A.67 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und RM. . .	126
A.68 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und SUB. . .	126
A.69 Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen RM und SUB. . .	127

A.70 Kumulative Verteilungen für das Lindström Maß. EZG Weisse Lütschine.	128
A.71 Kumulative Verteilungen für das SWE MANE. EZG Weisse Lütschine.	129
A.72 Kumulative Verteilungen für den SnowCover RMSE. EZG Weisse Lütschine. . . .	130
A.73 Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lütschine. Betrachtetes Gütemaß: SWE MANE	131
A.74 Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lütschine. Betrachtetes Gütemaß: SnowCover RMSE	132

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
a	-	Regressionskoeffizient zu Umrechnung von Schneehöhen in SWE
AAT	-	All-At-a-Time Methode bei der Sensitivitätsanalyse
b	-	Regressionskoeffizient zu Umrechnung von Schneehöhen in SWE
BAFU	-	Bundesamt für Umwelt der Schweizerischen Eidgenossenschaft (www.bafu.admin.ch)
C	-	Schneebedeckung
DWD	-	Deutscher Wetterdienst (www.dwd.de)
EZG	-	Einzugsgebiet bzw. Einzugsgebiete
HRU	-	Hydrologic reponse unit - Flächen mit gleichen physikalischen Eigenschaften, die die gleiche hydrologische Reaktion zeigen
GAP	-	Genetic Algorithm and Powell optimization - generischer Parameter-Optimierungs-Algorithmus in HBV-Light
HBV	-	Hydrologiska Byrans Vattenadvelning, konzeptionelles hydrologisches Modell
HBV-Light	-	Modellversion basierend auf HBV
HS	cm	Schneehöhe
HSY	-	Hornberger-Spear-Young
HYRAS	-	Hydrologische Rasterdaten; hydrometeorologischer Rasterdatensatz als Referenzdatensatz für Flussgebiete in Mitteleuropa
LM	-	Lindström Maß
MANE	-	Mean Absolute Normalized Error
MeteoSchweiz	-	Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie der Schweizerischen Eidgenossenschaft (www.meteoschweiz.admin.ch)
MC	-	Monte Carlo
OAT	-	One-At-a-Time Methode bei der Sensitivitätsanalyse
$offset_{reg}$	-	gebietsabhängiger Ausgleich zur Umrechnung von Schneehöhen in SWE
OH	m	Obere Höhengrenze (die angegebenen Höhen beziehen sich immer auf m ü. NN)
Q	mm	Abfluss
R_{eff}	-	Nash-Sutcliffe Efficiency
ρb	$g\,cm^{-3}$	Schneelagerungsdichte
RM	mm	Restschneemenge
RMSE	-	Root Mean Square Error
RSA	-	Regionalisierte Sensitivitätsanalyse
SA	-	Sensitivitätsanalyse
SLF	-	Schweizer Institut für Schnee- und Lawinenforschung (www.slf.ch)
SUB	m	Schneeeumverteilungsbereich
SUV	-	Schneeeumverteilung

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
SWE	mm	Snow Water Equivalent - Schneewasseräquivalent
W	mm	Gletschervolumen in Wasseräquivalent
WOF	-	Weighted Objective Function - gewichtete Zielfunktion

Zusammenfassung

Die räumliche Verteilung von Schneebedeckung und Schneehöhen in einem alpinen Einzugsgebiet hat einen großen Einfluss auf den Verlauf der Schneeschmelze und Abflussbildung. Bedingt durch ein steiles Relief und starke Winde, kommt es im Hochgebirge zu Umverteilung von Schnee von den Gipfelregionen in Mulden und Täler. Die Schneeumverteilung kann durch Gravitationskräfte ausgelöst werden, die Schneemassen abrutschen lassen und damit Lawinen auslösen. Ebenso kann auch der Wind Schnee erodieren und in geschützten Lagen verfrachten.

In der Modellierung alpiner Einzugsgebiete werden häufig konzeptionelle Modelle verwendet, die zur Simulation der Schneeakkumulation und der Schneeschmelze ein Tag-Grad-Verfahren nutzen. Oberhalb einer bestimmten Höhe, die mit einem Temperaturgrenzwert einhergeht, schmilzt die Schneedecke im Jahresverlauf nicht vollständig ab und wächst über die Jahre stetig an. Bei Langzeitmodellierungen kann das zur Bildung von sogenannten *Schneetürmen* im Modell führen, durch die Wasser aus der Wasserbilanz des Einzugsgebiets dauerhaft entfernt wird. Die Schneeumverteilung sollte daher in hydrologischen Modellen berücksichtigt werden, um die Bildung von Schneetürmen zu vermeiden und eine realistische Modellierung der Schneedecke zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Schneeumverteilungsansatz für das konzeptionelle, semi-verteilte Niederschlags-Abfluss-Modell HBV-Light getestet und die Auswirkung der Schneeumverteilungsparameter (SUV-Parameter) auf die Modellergebnisse evaluiert. Bei diesem Ansatz wird Schnee von unvergletscherten Flächen oberhalb einer festgelegten Gebietshöhe (OH) umverteilt, sobald ein definierter Grenzwert des Schneewasseräquivalents (RM) überschritten wird. Der zusätzlich fallende Schnee wird gleichmäßig auf die Gletscherflächen sowie die tiefer liegenden gletscherfreien Flächen in einem vorgegebenen Höhenband (SUB) verteilt. Die Parameter der Schneeumverteilungs-routine werden in einem vorgegebenen Parameterbereich variiert und die Modellausgaben der Schnee, Gletscher- und Abflussvariablen untersucht. Neben den modellierten Zeitreihen für diese Modellausgaben, werden die Schneehöhen und die räumliche Schneeumverteilung im Modellgebiet, die durch Variation der SUV-Parameter erzeugt werden, analysiert. Zusätzlich werden die Parameter auf ihre Sensitivität untersucht. Die Analysen identifizieren einen starken Einfluss der SUV-Parameter auf den Abfluss und die Schneehöhen. Die Auswirkungen auf die Schneebedeckung sind dagegen gering. Die Restschneemenge zeigt die stärkste Sensitivität der drei SUV-Parameter, wobei diese verglichen mit anderen Modellparametern als nur leicht sensitiv einzustufen ist. Gebietseigenschaften wie Höhenausdehnung und Vergletscherungsgrad stellen sich als maßgebliche Einflussfaktoren auf die Schneeumverteilung heraus. Für zukünftige Modellierungen sollten die Wertebereiche der SUV-Parameter an die Einzugsgebietseigenschaften angepasst werden.

Stichworte: Alpine Einzugsgebiete, Schneetürme, Schneumverteilung, HBV-Light, Niederschlags-Abfluss-Modell, Sensitivitätsanalyse

1

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Alpine Einzugsgebiete

Die Hochgebirge der Erde sind Ursprung vieler großer Flüsse, welche Wasser in die Vorländer transportieren. Einige der größten Flüsse Europas, wie beispielsweise der Rhein oder die Rhône haben ihre Quellgebiete in den Alpen. Die Wasserressourcen alpiner Gebiete dienen nicht nur der Region direkt, sondern haben auch Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit flussabwärts (Stahl, 2016; Li et al., 2018; Haberlandt, 2016).

Alpine Einzugsgebiete (EZG) können bis in die Firn- und Gletscherzone reichen und sind charakterisiert durch geringmächtige Böden, durch Flächen oberhalb der Vegetationsgrenze, starken Wind, steiles Relief und enge Täler. All dies begünstigt eine schnelle Abflussbildung mit viel Oberflächenabfluss. Natürliche Speicher, wie Hangschuttdecken oder Talfüllungen können die Abflussbildung allerdings verzögern.

Die Temperatur ist eine wichtige hydrologische Steuergröße in diesen Einzugsgebieten, da sie die Art des Niederschlags bestimmt. Der Temperaturgradient ist höhenabhängig. Liegen die Temperaturen unter einem bestimmten Temperaturgrenzwert (z.B. 0 °C), fällt der Niederschlag meist in Form von Schnee. Die Schneefallgrenze und somit die Schneeakkumulation ist also abhängig vom Höhengradienten der Temperatur. Aber auch auf die Dauer der Schneebedeckung nimmt die Temperatur Einfluss. Die Schneedecken, die sich im Winter in den Gebirgen aufgebaut haben, schmelzen im Frühling ab. Im Hochgebirge beginnt die Schneeschmelze meist erst spät im Frühjahr. Mit der Schneeschmelze wird das im Schnee gespeicherte Wasser wieder verfügbar (Stahl, 2016). Die Verteilung des Schnees im Einzugsgebiet beeinflusst allerdings den Verlauf der Schneeschmelze. Der Schnee schmilzt nach und nach in den verschiedenen Höhenzonen über einen längeren Zeitraum ab. Die Abflussbildung wird dadurch verzögert, was sich wiederum positiv auf die Wasserverfügbarkeit im Sommer auswirken kann (Stahl, 2016; Bernhardt, 2008).

1.2 Schneebedeckung und Schneelumverteilung in alpinen Gebieten

Die räumliche Verteilung von Schneebedeckung und Schneehöhen kann in alpinen Gebieten schon über kurze Distanzen stark variieren und hängt neben dem in Abschnitt 1.1 beschrie-

benen Temperaturgradienten hauptsächlich von der Landschaft und Vegetationsbedeckung ab (Vögeli et al., 2016; Lehning et al., 2008).

Durch den Einfluss der Orografie auf die Verteilung des Schneefalls und den Wind können Luv-Lee-Effekte entstehen. Schon während des Niederschlagsereignisses kann es zu präferenzzieller Ablagerung von Schnee in windgeschützten Bereichen wie Vertiefungen und auf Lee-Seiten von Graten kommen. In bewaldeten Gebieten führt die Interaktion des Schnees mit dem Baumkronendach durch Interzeption, Sublimation oder Entladung des Schnees von den Ästen der Bäume zu variabler Schneebedeckung (Clark et al., 2011; Lehning et al., 2008).

Schnee, der bereits gefallen ist, wird durch Wind und Lawinen von Bergrücken und steilen Hängen in Täler und Kare umverteilt (Kuhn, 2003; Strasser et al., 2008). Bei dieser Schneenumverteilung spielen meist verschiedene Faktoren zusammen und erzeugen ungleichmäßige Schneehöhen in einem Gebiet. Wind wird neben der Vegetation als stärkster Einflussfaktor auf die räumliche Schneeverteilung in alpinen Gebieten gesehen (Liston, 2004; Frey et al., 2015; Clark et al., 2011). Wenn wie im Hochgebirge kaum Vegetation vorhanden ist, sind Schneerosion durch Wind auf Luv-Seiten und Schneeanhäufung in geschützten Lagen (Lee-Seiten), Lawinen und Schneerutsche an steilen Hängen die vorherrschenden Prozesse (Clark et al., 2011; Bernhardt, 2008; Li et al., 2018; Lehning et al., 2008). Die Erosion durch Wind hängt von der Schneebeschaffenheit und vom Alter des Schnees ab. Frisch gefallener, trockener Schnee wird leichter erodiert und umverteilt, da er leichter ist als älterer oder feuchter Schnee (Lehning et al., 2008).

Massenbewegungen von Schnee, wie Lawinen und Schneerutsche, entstehen wenn auf steilen Hängen die kritische Schneemenge überschritten wird, die der Hang durch die Vegetation oder die Rauheit der Bodenoberfläche halten kann und der Schnee aufgrund der Gravitationskräfte abrutscht. Zur Bildung von Lawinen sind außerdem die Hangneigung und -orientierung sowie der Energieeintrag zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung relevant (Fellin, 2013). Schneeverlagerung durch Wind kann die Neuschneemengen auf einem Hang erhöhen und durch Überschreiten der kritischen Schneehöhe Lawinen auslösen. Wind ist somit einer der wesentlichen Faktoren, der die Schneebedeckung in alpinem Gelände und die damit verbundene Lawinenaktivität beeinflusst (Lehning et al., 2008; Fellin, 2013). Die wichtigsten Schneenumverteilungsprozesse sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

1.3 Bedeutung der räumlichen Verteilung alpiner Schneebedeckung

Schnee dient als temporärer winterlicher Wasserspeicher. Die in der Schneedecke als Eis oder Wasser gespeicherte Wassermenge wird als Schneewasseräquivalent (SWE) bezeichnet (Haberlandt, 2016). Erst durch die Schneeschmelze im Frühjahr wird das Wasser wieder verfügbar. Der Verlauf der Abflussbildung durch Schneeschmelze hängt dabei stark von der räumlichen Verteilung des Schnees im Einzugsgebiet ab, da sich Temperaturgradient und Sonneneinstrahlung mit Höhe und Exposition ändern (Haberlandt, 2016; Stahl, 2016; Bernhardt, 2008). Der Schmelzwasserabfluss wird durch Schneeakkumulation und Schneenumverteilung

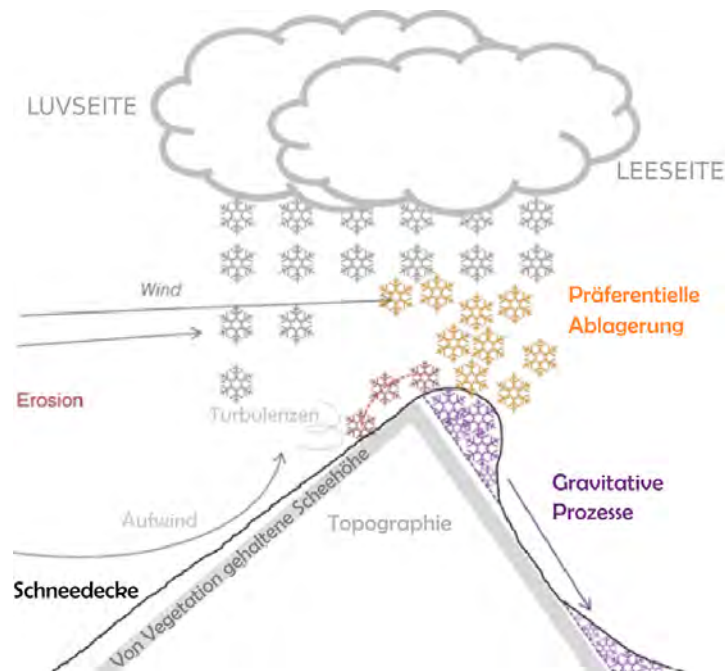


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der wichtigsten Schneenumverteilungsprozesse. Abgeändert nach Freudiger et al. (2017)

im Winter bestimmt (Warscher et al., 2013). Wenn der Schnee ungleichmäßig verteilt ist, werden Bereiche mit geringeren Schneehöhen und tiefer liegende Gebiete schneller abschmelzen, als Gebiete mit großen Schneemengen oder Schnee in höheren Lagen. Die unterschiedlichen Schmelzraten haben einen großen Einfluss auf den Schmelzwasserabfluss und dadurch auf die Wasserbilanz und Ökosysteme (Li et al., 2018; Stahl, 2016). Das Abschmelzen des temporären winterlichen Schneespeichers führt zu einer natürlichen zeitlichen Umverteilung des Wassers vom Winter in den Sommer durch Auffüllen der Grundwasserspeicher. Dies kann in niederschlagsarmen Zeiten die Wasserverfügbarkeit positiv beeinflussen. Allerdings können auch extreme Hochwasser entstehen, wenn der Zeitraum der Schneeschmelze mit Regenerereignissen zusammenfällt (Haberlandt, 2016). Durch die räumliche Umverteilung von Schnee durch Wind und Lawinen wird der Zeitpunkt der Schneeschmelze und die Menge an Schmelzwasser beeinflusst. Wird Schnee in tiefere Lagen umverteilt, nimmt dort die Schneemenge und damit das im Schnee gespeicherte Wasser zu und der Schnee wird aufgrund des Höhengradienten der Temperatur früher schmelzen (Freudiger et al., 2017). Die Schneebedeckung im Gebirge und das in der Schneedecke gespeicherte Wasser stellen damit hohe Anforderungen an Lawinenwarndienste und den Hochwasserschutz. Gleichzeitig bergen sie aber auch ein großes Nutzungspotential für Wasserversorgung und Wasserkraftnutzung sowohl in der Bergregion als auch im Vorland (Haberlandt, 2016; Vögeli et al., 2016).

Gletscher profitieren von Schneenumverteilung, da sie sich meist in Tälern und Karen befinden, in denen sich Schnee von steilen Hängen akkumuliert und der Schnee mit der Zeit in Firn und Eis umgewandelt wird. Schneenumverteilung beeinflusst somit die Massenbilanz von Gletschern (Lehning et al., 2008; Kuhn, 2003).

1.4 Hydrologische Modelle

Da nicht alles gemessen werden kann, was man über hydrologische Systeme wissen möchte, werden in der Hydrologie Modelle verwendet (Beven, 2012). Modelle sind durch Annahmen und Vereinfachungen beschränkte Abbilder der Realität. Mit ihrer Hilfe wird versucht, Prozesse und Einflussgrößen von Systemen zu verstehen und zu quantifizieren. Mit Modellen können Vorhersagen getroffen oder durch Änderung von Parametern veränderte Umweltbedingungen simuliert werden. Dabei werden physikalisch basierte (White-Box) und rein statistische (Black-Box) Modelle unterschieden. Da White-Box-Modelle, die rein auf physikalischen Grundgesetzen beruhen und in denen alle Parameter messbar sein müssen, in der Praxis kaum möglich sind, kommen meist konzeptionelle Modelle (Grey-Box-Modelle) zur Anwendung. Diese konzeptionellen Modelle nutzen vereinfachte Prozessbeschreibungen. Neben der Einteilung nach physikalischer Transparenz der Modelle werden hydrologische Modelle auch nach ihrer räumlichen Diskretisierung unterteilt. Es werden Raster- und Vektormodelle unterschieden. Bei rasterbasierten Modellen werden die Simulationen für alle Gitterzellen durchgeführt. Räumlich explizite Modelle werden im Englischen als *spatially distributed* bezeichnet. In Vektormodellen werden dagegen Flächen mit ähnlichen physikalischen Eigenschaften zusammengefasst, um Mehrfachberechnungen von gleichen Bereichen zu minimieren. Allerdings gehen dabei oft Nachbarschaftsbeziehungen verloren. Diese Flächen werden als *Hydrologic response units* (HRUs) bezeichnet. Räumlich aggregierte Modelle sind in der Wissenschaft als *lumped models* bekannt. Bei semiverteilten Modellen (engl.: *semi-distributed*) sind die HRUs im Einzugsgebiet räumlich verteilt, innerhalb dieser Einheiten allerdings zusammengefasst. (Beven, 2012; Hörmann, 2016).

2

Kapitel 2

Problemstellung und Zielsetzung

2.1 Schneetürme bei der hydrologischen Modellierung

In der Hydrologie werden häufig konzeptionelle Modelle verwendet (Frey et al., 2015). Um Schneeakkumulation und Schneeschmelze zu modellieren, verwenden diese Modelle oft ein Temperatur-Index-Verfahren, da es leicht anzuwenden ist und nur wenige Daten benötigt. Dieser Ansatz geht von einem direkten Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und der Schneeakkumulation beziehungsweise der Schneeschmelze aus (Bronstert, 2016; Haberlandt, 2016; Frey et al., 2015).

Die Lufttemperatur nimmt mit der Höhe ab. Das hat zur Folge, dass in Hochlagen von Gebirgen das ganze Jahr über Niederschlag als Schnee fallen kann. Unter einem bestimmten Temperaturgrenzwert (z.B. 0 °C) schmilzt der Schnee nicht mehr und akkumuliert sich mit zunehmendem Schneefall. In hochalpinen Gebieten, in denen auch im Sommer die Temperaturen nicht über den Grenzwert steigen, schmilzt der angesammelte Schnee daher nicht ab. So entstehen in der Modellierung sogenannte *Schneetürme* als Modellartefakte (s. Abbildung 2.1). Das Wasser, das in den Schneetürmen gespeichert ist, steht dann für die Abflussbildung nicht mehr zur Verfügung. Vor allem in der Langzeitmodellierung kann das zu falschen Ergebnissen führen, da das in den Schneetürmen „gespeicherte“ Wasser aus der langjährigen Wasserbilanz des Einzugsgebiets entfernt wird. In der Realität kommen solche Schneeanhäufungen kaum vor. Berggipfel und Felsgrate sind im Gegenteil eher schneefrei (s. Abbildung 2.2). Das liegt an der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Schneenumverteilung, die beispielsweise durch Wind und Lawinen entsteht. Um die Bildung von Schneetürmen und einer unrealistischen Schneedecke in der Modellierung zu verhindern, sollte die Umverteilung von Schnee in hydrologischen Modellen alpiner Einzugsgebiete berücksichtigt werden (Freudiger et al., 2017; Frey et al., 2015; Bernhardt & Schulz, 2010; Strasser et al., 2008).

Im Zuge des Forschungsprojektes „ASG-Rhein Projekt“ wurde das Problem von Schneetürmen in der Modellierung der alpinen, teilvergletscherten Einzugsgebiete erkannt und es stellte sich die Frage nach der Implementierung einer Schneenumverteilungsroutine, um die unrealistisch hohen Schneeakkumulationen in den Höhenlagen zu vermeiden (Stahl et al., 2016; Freudiger et al., 2017).

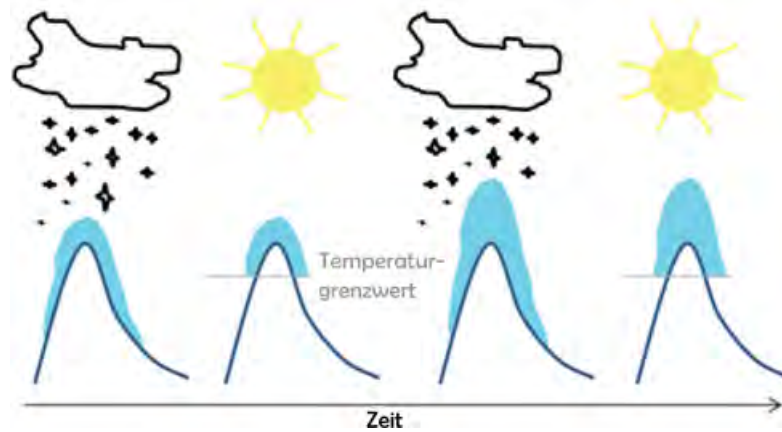


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der modellierten Schneedecke. Wenn die Schneeverteilung in hydrologischen Modellen ignoriert wird, bilden sich nach einigen Jahren Schneetürme in den Hochlagen alpiner Gebiete. Abgeändert nach Freudiger et al. (2017)

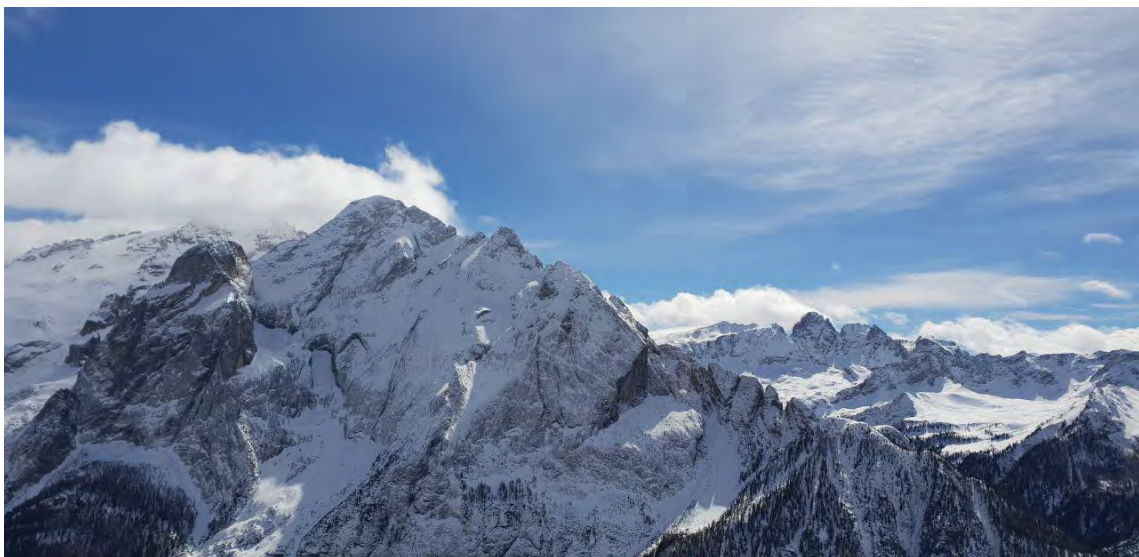


Abbildung 2.2: Durch Schneeumverteilung fast schneefreie Bergrücken und steile Flanken. In windgeschützten Bereichen, in Mulden, Karen und am Fuß steiler Hänge akkumuliert sich der Schnee (Eigene Aufnahme).

2.2 Schneenumverteilungsansätze in hydrologischen Modellen

In der hydrologischen Forschung wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um eine Schneenumverteilung in die Modellierung alpiner Einzugsgebiete einzubeziehen. Freudiger et al. (2017) teilen diese in vier physikalische Prozesse ein:

- 1) Korrektur der Niederschlagseingangsdaten, vor allem um präferenzielle Ablagerung von Schnee abzubilden (z.B. Kuhn, 2003)
- 2) Beschreibung aller windgetriebenen Prozesse basierend auf Windfelddaten
- 3) Beschreibung von gravitativen Transporten und/oder windgetriebenen Prozessen, basierend auf topografischen Informationen
- 4) Statistische Beschreibung der Variabilität des Schneewasseräquivalents, um alle Schneenumverteilungstypen zu erfassen (Freudiger et al., 2017).

Die Modellkonzepte für Schneenumverteilung in alpinen Gebieten reichen von einfachen konzeptionellen bis hin zu physikalisch basierten Modellen. Die zuletzt genannten Modelle berücksichtigen alle Energieflüsse bei der Modellierung der Schneedecke. Die räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modelle sind meist distribuiert, hoch komplex und sehr detailliert. Windgetriebene Prozesse, die durch Windfelddaten beschrieben werden, können durch solche Modelle dargestellt werden. Sie benötigen große Datenmengen und sind sehr rechenintensiv (Freudiger et al., 2017; Frey et al., 2015). Außerdem ist beispielsweise die Datenerfassung von Windfeldern in den meist abgelegenen Gebieten aufgrund der Topografie und Wetterbedingungen schwierig. Hohe Windstärken verursachen bei der Niederschlagsmessung oft große Messfehler und viele Regionen sind vor allem im Winter schwer zu erreichen. Daher gibt es in den Hochlagen nur wenige Messstationen (Stahl, 2016). Solche physikalisch basierten Modelle sind deshalb nur für kleine Einzugsgebiete und kurze Zeitspannen anwendbar (Freudiger et al., 2017; Frey et al., 2015).

In anderen Modellen kommen Ansätze zur Schneenumverteilung zur Anwendung, die auf Informationen zur Topografie basieren. Mit topografischen Informationen lassen sich gravitative Umverteilungen wie Lawinen abbilden. SnowSlide als Modellkomponente im SnowModel ist so ein topografiegetriebenes Modell, welches, sobald eine definierte Schneehöhe und ein Mindestmaß der Hangneigung überschritten wird, Schnee von höheren Lagen in tiefere verteilt (Bernhardt & Schulz, 2010). Allerdings wird auch die Schneenumverteilung durch Wind meist durch die Topografie beeinflusst. So entstehen zum Beispiel über Jahre konsistente Schneemuster (Lehning et al., 2008; Freudiger et al., 2017). Mit Informationen zur Topografie können also auch windgetriebene Schneenumverteilungsprozesse durch einfache Ansätze beschrieben werden. Diese benötigen deutlich weniger Eingangsdaten als Windfelder und sind damit auch deutlich weniger rechenintensiv (Freudiger et al., 2017). Konzeptionelle Modelle, wie beispielsweise HBV oder COSERO können so auch für Regionen, in denen wenige Messdaten verfügbar sind, sowie für größere Modellgebiete angewendet werden (Bergström, 1976; Frey et al., 2015; Freudiger et al., 2017). Frey et al. (2015) beschreiben ein Schneetransportmodell für abwärts gerichtete Schneenumverteilung für das Niederschlags-Abfluss-Modell COSERO. In diesem Modell wird Schnee von den steilsten Hängen auf die Nachbarhänge umverteilt. Dabei hängt die umverteilte Schneemenge von der Steilheit der Hänge, der Bodenbedeckung,

dem Alter und der Höhe der Schneedecke ab. Ob Schnee für die Umverteilung zur Verfügung steht, wird über einen vegetationsbasierten Grenzwert, beziehungsweise Rauheitskoeffizient, bestimmt. Wenn die Schneehöhe in einer Rasterzelle diesen Grenzwert überschreitet, wird die Schneelumverteilung in Gang gesetzt (Frey et al., 2015).

Manche konzeptionelle Modelle nutzen eine statistische Beschreibung der Schneedeckenvariabilität. Diese bezieht sich allerdings nur auf die räumliche Heterogenität der Schneedecke und nicht auf die Schneelumverteilung (Freudiger et al., 2017).

2.2.1 Schneelumverteilungsansatz im HBV-Light-Modell

Das HBV-Light-Modell ist ein konzeptionelles, semi-verteiltes Niederschlags-Abfluss-Modell. Ursprünglich berücksichtigt dieses keine Schneelumverteilung durch Wind oder Lawinen. Um allerdings die Bildung von Schneetürmen in den obersten Höhenzonen der Einzugsgebiete zu vermeiden, wurde im Zuge des ASG-Rhein Projektes eine Schneelumverteilungsroutine eingeführt (Freudiger et al., 2017; Stahl et al., 2016). Das Forschungsprojekt befasst sich mit den „Abflussanteilen aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen von dem Hintergrund des Klimawandels“ (Stahl et al., 2016). Bei diesem stark vereinfachten Ansatz für das HBV-Light-Modell wird Schnee von unvergletscherten Flächen oberhalb einer festgelegten Gebietshöhe (Obere Höhengrenze (OH); im Modell: *Upperbound*) umverteilt, wenn ein definierter Grenzwert des Schneewasseräquivalents (Restschneemenge (RM); im Modell: *Remains*) erreicht ist. Übersteigt die Schneemenge die RM, wird der überschüssige Schnee gleichmäßig auf die Gletscherflächen sowie die tiefer liegenden gletscherfreien Flächen in einem vorgegebenen Höhenband (Schneelumverteilungsbereich (SUB); im Modell: *Range*) verteilt. In Abbildung 2.3 ist schematisch dargestellt wie die Schneelumverteilung in HBV-Light funktioniert. Die Grenzwerte mussten dabei in der Modellversion des ASG-Rhein Projekts durch den Anwender festgelegt werden. Die Entstehung von Schneetürmen konnte durch diesen Ansatz im Projekt vermieden werden (Seibert, Vis et al., 2018; Freudiger et al., 2017; Stahl et al., 2016). In einer neuen Modellversion (Version 4.0.0.22 SnowRedis), die an der Universität Zürich für diese Arbeit entwickelt wurde, ist es möglich, die Schneelumverteilungsparameter zu kalibrieren.

2.3 Zielsetzung

Der in HBV-Light implementierte Schneelumverteilungsansatz ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht umfassend getestet. Es ist unklar, wie sich die Parametrisierung der Schneelumverteilung auf die Ergebnisse der Modellierung bezüglich Schnee-, Gletscher- und Abflussvariablen auswirkt. Im Zuge dieser Arbeit soll der Einfluss der Parametrisierung und der Parameterwerte der Schneelumverteilungsparameter auf die Modellergebnisse der Schnee-, Gletscher- und Abflussvariablen untersucht werden. Hierbei wird der Fokus auf die simulierte Schneeverteilung gelegt, da sich die Schneelumverteilung sehr wahrscheinlich direkter und mit einem größeren Einfluss in diesen Modellausgabewerten niederschlägt. Außerdem soll erörtert werden,

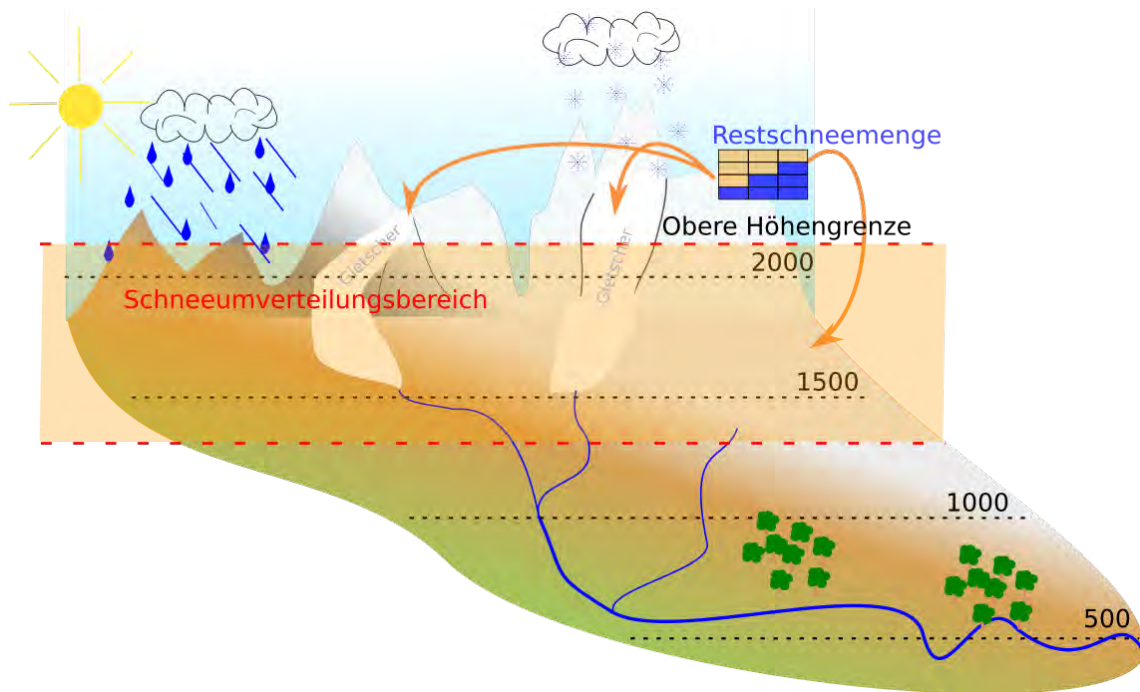


Abbildung 2.3: Schema der Schneumverteilungsroutine in HBV-Light (eigene Zeichnung).

was geeignete Parameterbereiche für die ausgewählten Gebiete sind und wie stark sich diese zwischen den Einzugsgebieten unterscheiden. Weiterhin stellt sich die Frage, was bei der Festlegung der Schneumverteilungsparameter berücksichtigt werden muss. Zusätzlich werden die Ergebnisse mit Schneebeobachtungsdaten verglichen, um zu untersuchen, wie gut das Modell die Schneeverteilung in verschiedenen Höhen abbilden kann.

3

Kapitel 3

Material und Methoden

3.1 HBV-Light-Modell

Das HBV-Modell ist ein konzeptionelles, semi-verteilttes Niederschlags-Abfluss-Modell. Das ursprüngliche HBV (*Hydrologiska Byråns Vattenavdelning*) Modell wurde in den 1970er Jahren in Schweden entwickelt (Bergström, 1976). Das Modell wird seitdem in der Hydrologie weitverbreitet eingesetzt. Zudem wurde es zu verschiedenen Versionen weiterentwickelt (Seibert, 2005; Seibert & Vis, 2012; Seibert, Vis et al., 2018). In diesem Grey-Box-Modell wird unter Einbezug von Niederschlag, Temperatur, potentieller Evapotranspiration und deren Höhengradienten mit verschiedenen Routinen der Abfluss eines Einzugsgebiets auf täglicher Basis simuliert. Das Modell ist semi-distribuiert, das zu modellierende Einzugsgebiet kann demzufolge in verschiedene Höhen- und Vegetationszonen eingeteilt werden. Schneeeakkumulation und Schneeschmelze werden über die Tag-Grad-Methode in der Schneeroutine berechnet, Grundwasserneubildung und aktuelle Verdunstung als Funktion des aktuellen Wasserspeichers in der Bodenroutine. In der Antwortfunktion (*Response Function*) wird der Abfluss als Funktion des Wasserspeichers errechnet und die Weiterleitungsroutine (*Routing-Routine*) nutzt eine triangulare Gewichtungsfunktion, um den Abfluss am Ausgang des Einzugsgebiets zu simulieren. Die Schnee- und Bodenroutinen sind räumlich semi-verteilt. Die Grundwasser- und Routing-Routinen sind dagegen ohne räumliche Gliederung (Seibert, Vis et al., 2018; van Tiel et al., 2018).

In Abbildung 3.1 ist die Struktur des HBV-Modells mit den verschiedenen Routinen und den zugehörigen Parametern dargestellt. In Tabelle 3.1 sind die in der genutzten Version von HBV-Light verwendeten Parameter erläutert.

Je nachdem, ob die Temperatur unter oder über einem Temperaturgrenzwert TT liegt, wird der Niederschlag im Modell als Schnee oder Regen berücksichtigt. Mit einem Schneefallkorrekturfaktor $SFCF$ werden systematische Fehler in der Schneefallmessung kompensiert und die Evaporation von der Schneedecke berücksichtigt, die im Modell nicht explizit simuliert wird. Die Schneeschmelze wird mit der Tag-Grad-Methode unter Einbezug des Faktors $CFMAX$ berechnet. Das dabei anfallende Schmelzwasser sowie Regenwasser werden zunächst in der Schneedecke zurückgehalten, bis ein kritischer Anteil CWH , des SWE der speichernden Schneedecke überschritten wird. Fällt die Temperatur unter TT , kann Flüssigkeit in der Schneedecke erneut gefrieren, was anhand des Parameters CFR berechnet wird.

Der Wassergehalt der Bodenbox und ihre maximale Füllmenge FC steuern die Aufteilung des Regen- und Schneeschmelzwassers in die Boden- und Grundwasserbox. Die aktuelle Verdunstung wird über die potentielle Evaporation und den aktuellen Wassergehalt der Bodenbox unter Berücksichtigung der Parameter FC und dem Schwellenwert LP berechnet. Die Grundwasserneubildung wird zur oberen Grundwasserbox addiert, während $PERC$ die maximale Perkulation von der oberen in die untere Grundwasserbox definiert. Der modellierte Abfluss aus den Grundwasserboxen wird mit einer Gewichtungsfunktion und dem Parameter $MAXBAS$ transformiert (Seibert & Vis, 2012; Seibert, 2005).

In dieser Arbeit wird die frei verfügbare Software HBV-Light verwendet, die an der Universität Zürich entwickelt wurde (Seibert, 2005; Seibert & Vis, 2012). Die genutzte Version (Version 4.0.0.22 SnowRedis) beinhaltet zusätzlich eine Gletscher- sowie eine Schneeeumverteilungs-routine. Für die Gletscherroutine sind Daten von ursprünglichen Gletscherflächen und Eisdicken in Abhängigkeit der Höhe erforderlich (Seibert, Vis et al., 2018; Stahl et al., 2016). Das Modell ist wie in Stahl et al. (2016) räumlich in Höhenzonen (je 100 m), Expositionsklassen (Nord, Süd, Ost-West) und Vegetationsklassen gegliedert, wobei letztere hier für die Unterscheidung von vergletscherten und nicht-vergletscherten Flächen genutzt werden. Über die beschriebenen Routinen wird der Einzugsgebietsabfluss auf täglicher Basis sowie die Anteile von Regen, Schnee- und Gletscherschmelzwasser am Gesamtabfluss simuliert (Stahl et al., 2016).

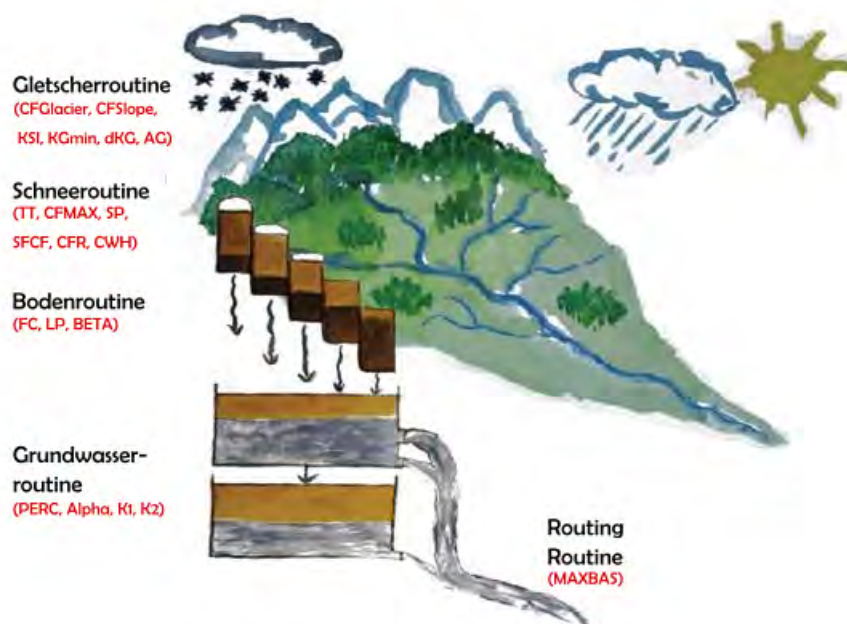


Abbildung 3.1: HBV Modellstruktur mit den Routinen und Parametern. Verändert nach Seibert & Vis, 2012.

Tabelle 3.1: Übersicht der Modellparameter (*HBV-Light: Help HBV-Light* 2018))

Parameter	Einheit	Beschreibung
<i>Schneeroutine</i>		
TT	°C	Grenztemperatur für Schneefall und -schmelze
CFMAX	$\frac{mm}{^{\circ}C \cdot Tag}$	Stärke der Schneeschmelze
SP	-	Faktor (zw. 0 - 1) zur Steuerung der saisonalen Variabilität des Tag-Grad-Faktors
SFCF	-	Korrekturfaktor für Schneefall
CFR	-	Koeffizient für gefrierendes Schmelzwasser
CWH	-	Anteil von im Schnee zurückgehaltenem Schmelzwasser
<i>Bodenfeuchteroutine</i>		
FC	mm	Maximaler Bodenfeuchtespeicher
LP	mm	Grenzwert für Bodenwasserevaporation
BETA	-	Parameter beeinflusst relativen Abflussanteil von Regen und Schneeschmelze
<i>Gletscheroutine</i>		
CFGlacier	-	Korrekturfaktor Gletscher
CFSlope	-	Korrekturfaktor Hangneigung
KSI	$\frac{1}{Tag}$	Umwandlungsfaktor von Schnee in Eis
KGmin	$\frac{1}{Tag}$	Minimaler Ausflusskoeffizient
dKG	$\frac{1}{Tag}$	Differenz zwischen maximalem und minimalem Ausflusskoeffizienten
AG	$\frac{1}{mm}$	Kalibrierparameter
<i>Antwortroutine</i>		
PERC	$\frac{mm}{Tag}$	Maximale Perkolation
Alpha	-	Nicht-linearer Koeffizient
K1	$\frac{1}{Tag}$	Regressionskoeffizient für oberen GW-Speicher
K2	$\frac{1}{Tag}$	Regressionskoeffizient für unteren GW-Speicher
<i>Weiterleitungsroutine</i>		
MAXBAS	Tage	Verteilung des Abflusses über die Zeit
<i>Schneeumverteilung</i>		
Remains	mm	Restschneemenge
Upperbound	m	Obere Höhengrenze
Range	m	Schneeumverteilungsbereich

Zur Initialisierung benötigt das Modell ein paar Jahre als Aufwärmperiode vor der Simulationsperiode, um sinnvolle Ausgangswerte für die verschiedenen Zustandsgrößen zu Beginn der Simulationsperiode zu erhalten und die Speicher zu füllen (Seibert, 2005).

Für diese Arbeit beginnt die Aufwärmperiode am 1.10.1973, der Simulationszeitraum liegt zwischen dem 1.10.1976 bis dem 31.12.2006. Die Modellausgabe enthält täglich aufgelös-

te Simulationsdaten für das gesamte EZG sowie räumlich differenziert für die einzelnen Höhenstufen, Expositionsklassen und Gletscher beziehungsweise unvergletscherten Flächen. Neben den Abflusssimulationsdaten werden auch Schnee- (Schneehöhe, schneebedeckte Fläche), Gletscher- und Bodendaten ausgegeben. Außerdem werden die Gütemaße jedes Modelldurchlaufs berechnet. Die für die Kalibrierung und Auswertung genutzten Gütemaße werden im Folgenden erläutert.

3.1.1 Verwendete Gütemaße

Es werden drei verschiedene Abflussgütemaße genutzt, um der starken Saisonalität der Abflussregime vergletschter EZG gerecht zu werden (Stahl et al., 2016). Das Lindström-Maß (*Lindström Measure*) ist eine Zielfunktion für längere Zeitreihen, welche den Volumenfehler in der Abflusssimulation berücksichtigt. Es wird aus der *Nash-Sutcliffe Efficiency* (R_{eff}), dem gemessenen Abfluss (Q_{obs}) und dem simulierten Abfluss (Q_{sim}) berechnet:

$$Lindström\ Measure = R_{eff} - 0.1 \frac{|\sum (Q_{obs} - Q_{sim})|}{\sum (Q_{obs})}. \quad (3.1)$$

Die Saisonale *Nash-Sutcliffe Efficiency* ($R_{eff\ Season}$) ermöglicht eine gute Abbildung der Maximalabflüsse während der Schnee- und Gletscherschmelzsaison in den Alpen für den Zeitraum von Juni bis September. Dieser Zeitraum kann in den Modelleinstellungen in HBV-Light gewählt werden. Dieses Gütemaß wird aus dem gemessenen Abfluss (Q_{obs}) und dem simulierten Abfluss (Q_{sim}) berechnet

$$R_{eff\ Season} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}. \quad (3.2)$$

Die *Nash-Sutcliffe Efficiency* für die logarithmierten Abflüsse ($LogR_{eff}$) kann die Niedrigwasserabflüsse im Winter besser berücksichtigen.

$$LogR_{eff} = 1 - \frac{\sum (\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum (\ln Q_{obs} - \ln \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3.3)$$

Als Gütemaß für die SWE-Verteilung wird der mittlere absolute normalisierte Fehler (*Mean Absolute Normalized Error for SWE* (SWE MANE)) verwendet. Das Schneegütemaß wird aus simulierten SWE-Werten (S_{WEsim}) sowie den SWE-Daten aus einem Schneedatenprodukt (S_{WEobs}) im Höhenbereich bis 2500 m berechnet

$$SWE\ MANE = 1 - \frac{\sum (|S_{WEobs} - S_{WEsim}|)}{\sum S_{WEobs}}. \quad (3.4)$$

Dieses Schneedatenprodukt wird in Abschnitt 3.2.1 genauer erläutert.

Die Abweichung in der Schneebedeckung geht über die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme in die Kalibrierung mit ein. Die Qualität der Modellantwort bezüglich der Schneebedeckung wird über den *SnowCover RMSE* (*Root Mean Square Error*) quantifiziert. Dieser wird aus der simulierten Schneebedeckung (C_{sim}) und den Schneebedeckungsdaten des Schneeda-

tenprodukts (C_{obs}) berechnet

$$SnowCoverRMSE = 1 - \sqrt{\frac{1}{n}(C_{sim} - C_{obs})^2}. \quad (3.5)$$

Die Gletschervolumenänderung wird basierend auf Gletscherflächendatenprodukten wie in Stahl et al. (2016) beschrieben kalibriert. *Glacier AMRE* dient als Gletschergütemaß,

$$Glacier\ AMRE = 1 - \frac{|\Delta W_{sim} - \Delta W_{obs}|}{\Delta W_{obs}} \quad (3.6)$$

wobei ΔW (mm) die Änderung des Gletschereisvolumens in Wasseräquivalent zwischen den Jahren 1973 und 2003 darstellt. ΔW_{obs} ist eine Schätzung basierend auf Beobachtungsdaten und ΔW_{sim} sind die simulierten Daten (Meyer et al., 2019). Alle genannten Zielfunktionen nehmen im Falle der optimalen Übereinstimmung simulierter und beobachteter Daten den Wert 1 an (Stahl et al., 2016; *HBV-Light: Help HBV-Light* 2018).

3.1.2 Multi-Kriterien-Kalibrierung

Die Modellkalibrierung sucht den Parametersatz, der die Beobachtungsdaten am besten beschreibt. In der verwendeten Version des HBV-Light (Version 4.0.0.22 SnowRedis) kann das Modell nun zusätzlich auf die Schneeumverteilungsparameter (OH, SUB, RM) kalibriert werden. Es wird, analog zu Stahl et al. (2016), eine Multi-Kriterien-Kalibrierung durchgeführt, die unterschiedliche Typen von Beobachtungsdaten nutzt. So werden neben Abflussdaten auch Informationen zu Schnee und Gletschern verwendet. Diese dienen neben der Kalibrierung auf die Abflusszeitreihen auch zur Kalibrierung der Schneedecke und Gletschervolumenänderung (vgl. (Stahl et al., 2016)).

Zur Kalibrierung des Modells ist in HBV-Light ein genetischer Parameter-Optimierungs-Algorithmus (*Genetic Algorithm and Powell optimization*) implementiert (GAP-Tool). Hierbei werden die Modellparameter in einem zuvor fest definierten Bereich variiert und es wird nach lokalen und globalen Optima der Zielfunktion gesucht. Die Variation der Parameter geschieht hierbei durch eine Kombination aus willkürlicher Wahl eines Parameterwertes und sinnvoller Kombination von Parametersets, die einen hohen Wert für die Zielfunktion liefern. Nach einer vorher fest definierten Anzahl an Modellläufen wird die Kalibrierung über den GAP Algorithmus gestoppt und Powells quadratische Konvergenzmethode zur Feinabstimmung der Parameter angehängt (Seibert & Vis, 2012).

Da die Modellanpassung von der Zielfunktion abhängt und in der Kalibrierung neben dem Abfluss auch Schnee und Gletscher berücksichtigt werden soll, werden verschiedene Zielfunktionen für die verschiedenen Gebietsreaktionen verwendet. Die in Abschnitt 3.1.1 genannten Zielfunktionen bilden mit unterschiedlicher Wertung ein gewichtetes Gütemaß (*Weighted Objective Function* (WOF)). Die Zielfunktionen für die Kalibrierung und deren Gewichtung sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Die Wertebereiche der Parameter für die Kalibrierung sind angelehnt an die Kalibrierbereiche, die Stahl et al. (2016) verwendet haben. Für die Schneeumverteilungsparameter werden große Wertebereiche gewählt, um einen großen Bereich evaluieren zu können. Die Parameterbereiche für die Kalibrierung sind in Tabelle 3.3 aufgeführt.

Für diese Arbeit werden für jede Kalibrierung jeweils 5000 Modellläufe und 1000 Powellläufe gemacht. Die Kalibrierung wird 20 mal durchgeführt (s. Abbildung 3.2).

Tabelle 3.2: Zielfunktionen und deren Gewichtung für die Kalibrierung.

Zielfunktion	Gewichtung
LindströmMeasure	0.2
ReffSeason	0.15
LogReff	0.15
SnowCover RMSE	0.15
SWE MANE	0.15
Glacier AMRE	0.2

Tabelle 3.3: Parameterbereiche für die Kalibrierung.

Parameter	Untere Grenze	Obere Grenze
TT	-2	3
CFMAX	1	10
SP	0	1
SFCF	0.5	1.5
CFR	0.05	0.05
CWH	0.1	0.1
CFGlacier	1	2.5
CFSlope	1.2	2.6
FC	50	550
LP	0.3	1
BETA	1	6
KSI	0.001	0.003
KGmin	0.005	0.49
dKG	0.005	0.49
AG	0	0.49
PERC	0	6
Alpha	0	0.5
K1	0.01	0.2
K2	0.0005	0.15
MAXBAS	1	7
RM	50	1500
OH	2000	3000
SUB	100	2000

3.1 HBV-Light-Modell

GAP optimization

Population Settings

Number of parameter sets: 50

Number of populations: 1

Frequency of exchange: 0

Number of PSs which exchange: 0

Reproduction Settings

Probability for optimization between sets: 0.01

Probability for mutation: 0.02

Probability for optimized value: 0

Probability for random value between the old values: 0.16

Probability for taking one of the old values: 0.82

Portion of range for small change (if random between and both values equal): 0

Value of C: 2

Model Settings

No of model runs: 5000

No of runs for local optimization (Powell): 1000

☒ Calibrate 20 times

Goodness of Fit Measure

Population_1

Obj. Function	Weight
LindstromMeasure	0.2
ReffSeason	0.15

Progress

Calibration: 0 Best fit so far: 0

Population: 0 Done so far: 0

Generation: 0 Done so far (Powell): 0

Estimated endtime:

Vegetation zone parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit	V	R
TT	-2	3	☐	☐
CFMAX	1	10	☐	☐
SP	0	1	☐	☐
SFCF	0.5	1.5	☐	☐
CFR	0.05	0.05	☐	☐
CWH	0.1	0.1	☐	☐
CFGlacier	1	2.5	☐	☐
CFSlope	1.2	2.6	☐	☐
FC	50	550	☐	☐
LP	0.3	1	☐	☐
BETA	1	6	☐	☐

Catchment parameters

Parameter	Lower Limit	Upper Limit
KSI	0.001	0.003
KGmin	0.005	0.49
dKG	0.005	0.49
AG	0	0.49
PERC	0	6
Alpha	0	0.5
K1	0.01	0.2
K2	0.0005	0.15
MAXBAS	1	7
Elev. of P	2136	2136
Elev. of T	2136	2136
Remains	50	1500
Upperbound	2000	3000
Range	100	2000

Load Settings Save Settings

Close Start calibration

Abbildung 3.2: Grafische Benutzeroberfläche der Kalibrierungsroutine der HBV-Light Software.

3.2 Gebietsauswahl

Um den Einfluss der Schneeverteilung in einem hydrologischen Modell zu quantifizieren, wird das Modell HBV-Light mit implementierter Schneeverteilungsroutine auf drei Einzugsgebiete angewendet. Es werden drei Gebiete in den Schweizer Alpen ausgewählt, die auch von Stahl et al. (2016) modelliert wurden. Ausgewählt werden die Kopfeinzugsgebiete der Schwarzen und Weissen Lütshine und der Engelberger Aa. Die alpinen EZG sind teilweise vergletschert und es sind langjährige, von Stauhaltungen unbeeinflusste Abflusszeitreihen verfügbar. Die EZG dieser Flüsse sind in Abbildung 3.3 eingezeichnet. Diese Kopfeinzugsgebiete werden flächenhaft durch den obersten Pegel im Gewässer festgelegt. Die Eigenschaften der Einzugsgebiete sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

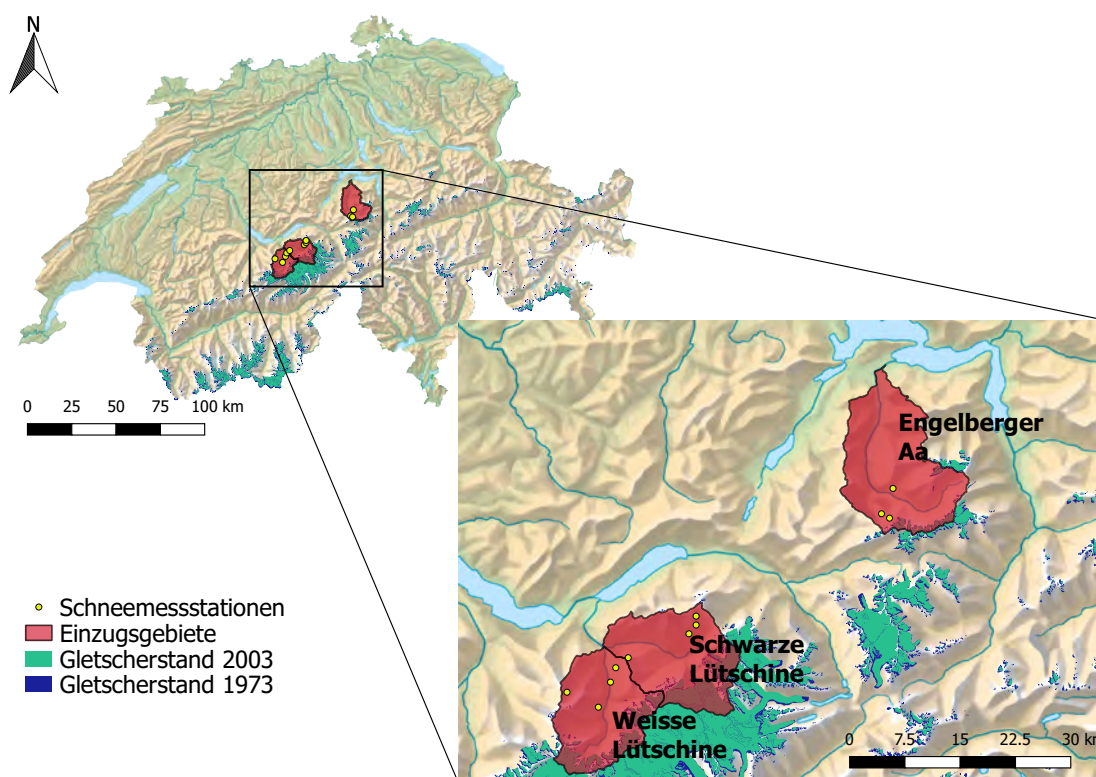


Abbildung 3.3: Lage der untersuchten Einzugsgebiete und Schneemessstationen in der Schweiz.
Datenquellen: BAFU, SLF, Müll. et al., 1976, Paul et al., 2011

Tabelle 3.4: Charakterisierung der untersuchten Einzugsgebiete (Stahl et al., 2016).

Gewässer	Pegel	Größe [km ²]	Mittl. EZG-Höhe [m]	Höhenausdehnung [m]	Gletscher 1900 [%]
Weisse Lütshine	Zweilütshinen	164.9	2149	650 - 4146	22.7
Schwarze Lütshine	Guendlischwand	179.9	2059	648 - 4086	25.1
Engelberger Aa	Buochs, Flugplatz	228	1604	443 - 3221	5.9

In den ausgewählten EZG sind jeweils mindestens drei Schneemessstationen mit Messdaten der Schneehöhen vorhanden (s. Abbildung 3.3). Die Messdaten werden von MeteoSchweiz,

dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, für diese Arbeit zur Verfügung gestellt und sollen bei der Auswertung zum Vergleich mit den simulierten Schneehöhen dienen. Die Karten werden mit Hilfe von QGIS erstellt (QGIS Development Team, 2018).

3.2.1 Datengrundlage

Für diese Arbeit wird die selbe Datengrundlage wie im ASG-Rhein Projekt verwendet (vgl. (Stahl et al., 2016)). Das Forschungsprojekt „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ lief in der ersten Phase von 2012 bis 2016 (*ASG Rhein: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels* 2018). In Zusammenarbeit der Universitäten Freiburg und Zürich und der HYDRON GmbH wurden die Veränderungen der Anteile der Abflusskomponenten aus nicht-vergletscherten Gebieten und vergletscherten Kopfeinzugsgebieten gemeinsam bestimmt. In täglicher Auflösung wurde die Periode von 1901-2006 für das gesamte Rheingebiet modelliert (Stahl et al., 2016).

Die meteorologischen Modelleingangsdaten beruhen auf einem HYRAS Meteorologie Rasterdatenprodukt des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Zudem stehen vom Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) Abflusszeitreihen für die Flüsse in den ausgewählten Einzugsgebieten im Simulationszeitraum zur Verfügung. Zur Initialisierung und Kalibrierung der Gletscherausdehnung stehen Gletscherstände von verschiedenen Zeitpunkten zur Verfügung. Die genaue Datenherkunft und -verarbeitung ist im Bericht des ASG-Rhein Projekts beschrieben (Stahl et al., 2016).

Im ASG-Rhein Projekt (Phase 1) wurden für die Schneemodellierung flächendeckende SWE-Karten des Schweizer Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) für die Periode 1972 bis 2006 verwendet, welche allerdings nur Daten für die Wintermonate (November bis Mai) beinhalteten. In dieser Arbeit wird hingegen ein neuer SWE-Datensatz des SLF verwendet, in welchem auch für den Sommer Daten zur Verfügung stehen. Es handelt sich dabei um ein Interpolationsrasterprodukt mit 1x1 km Auflösung und täglichen Schneedaten von 1998 bis 2018. Diese Daten basieren auf Messwerten von Schneestationen und einem Modell des SLF. Aus den Daten wurden von D. Freudiger (Universität Zürich) Mittelwerte der schneebedeckten Flächen der Einzugsgebiete und das mittlere SWE im Höhenbereich unter 2500 m extrahiert. Das Modell-Setup und die zugrundeliegenden Modelleingangsdaten inklusive Gletscherinitialisierung und Gletscherkalibrierdaten wurden von I. Kohn (Universität Freiburg) für diese Arbeit bereitgestellt.

3.2.2 Schneestationsdaten

In Abbildung 3.4 sind die Schneemessstationen und ihre Lage in den Einzugsgebieten dargestellt. Die Messzeitreihen der Stationen Grindelwald Bort (EZG Schwarze Lütschine) und Lauterbrunnen (EZG Weisse Lütschine) beginnen erst 2015. Damit liegen sie außerhalb des betrachteten Simulationszeitraums und werden nicht verwendet. Für jedes EZG stehen somit drei Schneestationen auf unterschiedlichen Höhen mit unterschiedlich langen Messzeitreihen im Simulationszeitraum zur Verfügung (s. Tabelle 3.5). Diese Schneebeobachtungsdaten werden nicht für die Kalibrierung oder Modellierung im Modell verwendet, sondern dienen

zum Vergleich von simulierten Daten mit Messwerten.

Tabelle 3.5: Informationen zu den Schneemessstationen. Die Morgenmessungen erfolgen um 6 Uhr UTC. Datenquelle: MeteoSchweiz.

EZG	Station	Höhe [m ü. NN]	Messzeitraum	Art der Messung
Weisse Lütschine	Mürren	1650		Morgenmessung
	Schilthorn - Turliboden	2332	Okt. 1996 - Okt. 2018	autom. Messung
	Wengen	1280	Okt. 2005 - Apr. 2006	Morgenmessung
Schwarze Lütschine	Männlichen - Itramen	2162	Jan. 1994 - Okt. 2018	autom. Messung
	Grindel	1950	Nov. 2005 - Jun. 2007	Morgenmessung
	Grindelwald / First	2111	Okt. 1998 - Okt. 2018	autom. Messung
Engelberger Aa	Titlis - Titlisboden	2149	Mai 1993 - Okt. 2018	autom. Messung
	Trübsee	1780	Okt. 2005 - Apr. 2006	Morgenmessung
	Engelberg	1055	Jan. 1970 - Apr. 1996	Morgenmessung

Die Messdaten werden in cm Schneehöhe erhoben und nach Jonas et al., 2009 in mm SWE umgerechnet. Das SWE ergibt sich aus der Schneehöhe (HS) und der Schneelagerungsdichte ρb zu

$$SWE = HS * \rho b. \quad (3.7)$$

Dabei ist die Schneelagerungsdichte von Jahreszeit, Schneehöhe, Standorthöhe und Region abhängig. Dies wird in Gleichung 3.8 zur Berechnung der Schneelagerungsdichte berücksichtigt.

$$\rho b = a * HS_{obs.} + b + offset_{reg}. \quad (3.8)$$

$HS_{obs.}$ ist die gemessene Schneehöhe in cm. Die Regressionskoeffizienten a , b und der gebietsabhängige Ausgleich $offset_{reg.}$ werden für die einzelnen Stationen anhand der Standorthöhe, Jahreszeit und Region nachgeschlagen. Über die so berechnete ρ kann das SWE im mm abgeleitet werden

$$SWE = HS_{obs.} * \rho b. \quad (3.9)$$

Für die meisten Stationen stehen auch im Sommer Messwerte zur Verfügung. Diese gehen allerdings für die weitere Betrachtung bei der Umrechnung verloren, da es für die Monate von Juni bis Oktober keine Werte für die Regressionskoeffizienten a und b gibt und somit keine SWE-Werte berechnet werden können.

Die gemessenen Schneedaten werden mit den simulierten Daten des gesamten EZG und der jeweiligen Höhenstufe sowie den simulierten Schneewerten und Schneedaten aus dem Datenprodukt des SLF verglichen. Dafür werden die Zeitreihen als Monats- und Jahresmittel dargestellt sowie Regime über langjährige Tages- und Monatsmittel berechnet.

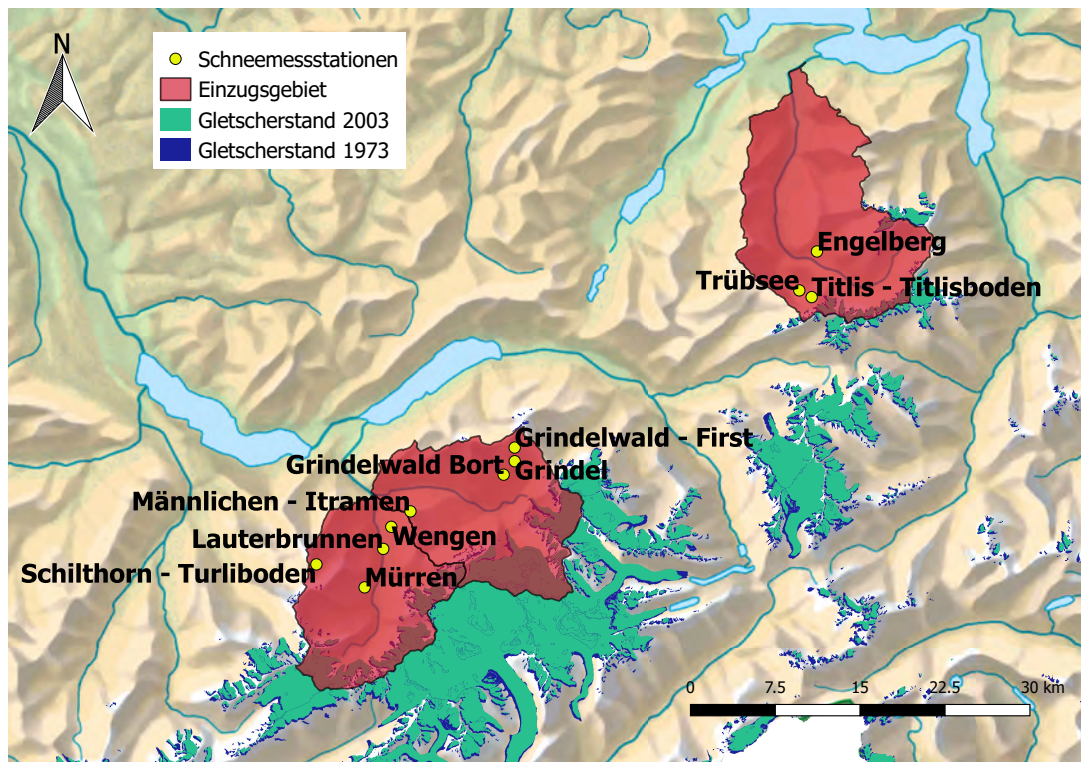


Abbildung 3.4: Lage Schneemesstationen in den Einzugsgebieten. Datenquellen: BAFU, SLF, Müller et al., 1976, Paul et al., 2011

3.3 Variation der Schneelumverteilungsparameter

Aus den 20 Kalibrierläufen wird für jedes Einzugsgebiet der beste Parametersatz über den besten Wert des gewichteten Gütemaßes (*Weighted Objective Function* (WOF)) ermittelt. Mit diesen Parametersätzen wird für jedes Einzugsgebiet ein Modelllauf simuliert und die daraus erhaltenen Ergebnisse in den folgenden Analysen als Referenz verwendet.

Ausgehend vom besten Parametersatz werden die drei Schneelumverteilungsparameter (SUV-Parameter) innerhalb der Kalibriergrenzen (s. Tabelle 3.3) in Hunderterschritten variiert und für jede sinnvolle Kombination ein Modelllauf durchgeführt. Lediglich die Kombinationen von Oberer Höhengrenze und Schneelumverteilungsbereich, die eine untere Höhengrenze außerhalb des EZG erzeugen, werden ausgelassen. Insgesamt ergeben sich daraus 2985 Parameterkombinationen für das EZG der Schwarzen Lütschine, 2986 für die Weisse Lütschine und 3150 Kombinationen für die Engelberger Aa.

Untersucht werden vier Gütemaße: das gewichtete Gütemaß, das Lindström Maß für Abfluss, SWE MANE für Schnee und SnowCover RMSE für die Schneebedeckung. Für die Parametersätze aller Schneelumverteilungsparameterkombinationen werden die genannten Gütemaße berechnet. Die Auswertung der Daten erfolgt mit RStudio (RStudio Team, 2018; R Core Team, 2018).

3.4 Analyse der simulierten Modellausgabeparameter

3.4.1 Auswertung der Zeitreihen

Das Modell gibt tägliche Werte über die Simulationsperiode von 30 Jahren aus. Für das gesamte EZG werden die verschiedenen Modellsimulationen über die 30-jährige Zeitreihe betrachtet. Es werden zur besseren Visualisierung Monats- und Jahresmittel gebildet, um das grundlegende Verhalten und langjährige Trends der Simulationen der verschiedenen Parameterkombinationen beurteilen zu können. Für die Jahresmittelwerte wird immer über ein hydrologisches Jahr (Oktober bis September) gemittelt. Um die Gletscherentwicklung abzubilden, werden für jedes Jahr der Simulationsperiode die simulierten Gletscherwerte des 30. September ausgewählt. Die Gletscherzeitreihen enthalten damit nur einen Wert pro Jahr. Die Darstellung der Simulationszeitreihen im Vergleich zu den kalibrierten Werten und den Modelleingangsdaten zeigt, wie groß die Variation der Ergebnisvariablen durch die Änderung der SUV-Parameter ist.

Um Regime über das ganze Jahr zu bilden, werden langjährige Tages- und Monatsmittel über die gesamte Simulationsperiode gebildet. Die Regime dienen zur Identifikation der Monate mit der größten Variation, die durch die Änderung der Schneeverteilungsparameter verursacht wird.

Es werden die Modellergebnisse von Abfluss, Abflussanteile von Regen, Schnee und Gletscher, Schnee, Schneebedeckung und Gletscher untersucht.

3.4.2 Analyse der Schneehöhen

Zur Analyse des Einflusses der Schneeverteilungsparameter auf die Schneeverteilung im Modell werden die mittleren simulierten Schneehöhen (in mm SWE) für jede Parameterkombination analysiert. Dafür wird für alle Kombinationen ein Mittelwert über alle Tage der Simulationszeitreihe gebildet. Zusätzlich wird über die SWE-Werte des 1. Aprils aller Jahre für jede Kombination gemittelt. Da drei Parameter (OH, SUB und RM) variiert werden, muss für die Visualisierung eine Dimension reduziert werden. Für alle Kombinationen wird daher über die jeweils dritte Dimension aggregiert. Hierfür werden verschiedene Funktionen, wie das Minimum, das Maximum oder der Mittelwert verwendet. Beispielsweise wird für eine Kombination von OH und SUB der Mittelwert der Ausgabewerte der zugehörigen RM gesucht.

3.4.3 Auswertung der flächenverteilten Daten

Um zu ermitteln, ab welcher Gebietshöhe für die unterschiedlichen Parameterkombinationen am 1. April Schnee liegt, wird eine höhenbezogene Analyse der Schneeverteilung durchgeführt. Dafür werden für alle Kombinationen die SWE-Werte am 1. April über alle Jahre der simulierten Zeitreihe extrahiert und beurteilt, ab welcher Höhenstufe jeweils Schnee liegt. Diese Auswertung wird nur für die gletscherfreien Flächen im EZG durchgeführt. Als Grenzwert „ob Schnee liegt“ werden 10 mm SWE gewählt. So wird für jede Kombination jeweils die niedrigste Höhe ausgewählt, ab der für den 1. April eines jeden Jahres mehr als 10 mm SWE Schnee liegt und anschließend über alle Jahre gemittelt.

3.5 Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen (SA) charakterisieren den Einfluss, den Änderungen der Eingangsparameter auf das Modellergebnis haben (Pianosi, Beven et al., 2016; Tang et al., 2007). Reagiert das Modellergebnis stark auf die Variation eines Parameters, handelt es sich um einen sensiblen Parameter (Song et al., 2015). SA können verschiedenen Zwecken dienen. Eine SA kann zum Ziel haben, die Eingabefaktoren nach ihrem relativen Beitrag zur Ergebnisvariabilität zu ordnen, Eingangsparameter mit vernachlässigbarem Einfluss zu identifizieren oder Abschnitte der Variationsbereiche der Eingabefaktoren abzugrenzen, die signifikante Ergebniswerte erzeugen (Pianosi, Beven et al., 2016; Ascough et al., 2005; Saltelli et al., 2000). Außerdem kann aus den Ergebnissen einer SA abgeleitet werden, auf welche Parameter bei der Kalibrierung geachtet werden muss. Eine SA kann auch helfen, Wissenslücken zu identifizieren (Tang et al., 2007). Je nachdem, ob die Eingangsparameter um einen Referenzwert oder über ihren gesamten möglichen Wertebereich variiert werden, spricht man von einer lokalen beziehungsweise globalen Sensitivitätsanalyse (Pianosi, Beven et al., 2016). Außerdem wird zwischen One-At-a-Time (OAT) Methoden und All-At-a-Time (AAT) Methoden unterschieden. Bei der relativ einfach durchzuführenden OAT wird jeweils ein einzelner Eingangsparameter variiert, während alle anderen konstant gehalten werden. Dagegen werden bei AAT alle Eingabefaktoren gleichzeitig variiert. AAT bietet die Möglichkeit, Interaktionen zwischen verschiedenen Kombinationen festzustellen (Pianosi, Beven et al., 2016). Die Sensitivität kann über vorhergesagte Variablen, wie Abflussvolumen oder Schneeschmelzraten, oder mit Hilfe von Gütemaßen bewertet werden (Beven, 2012). SA-Maße können mathematisch, statistisch oder graphisch bestimmt werden (Tang et al., 2007).

3.5.1 Graphische Auswertung der Gütemaße

Um zu analysieren, wie stark Variationen der Schneeumverteilungsparameter die Modellergebnisse beeinflussen, wird die Modellantwort in Form von Gütemaßen untersucht. Entsprechend eines Two-At-a-Time Ansatzes werden für die Sensitivitätsanalyse jeweils zwei der drei SUV-Parameter wie in Abschnitt 3.3 beschrieben variiert, während alle anderen Parameter ihren optimalen Wert beibehalten. Auf den Achsen eines Graphen werden die jeweiligen SUV-Parameter aufgetragen, wobei das Gütemaß der entsprechenden Parameterkombination farbcodiert wiedergegeben wird. So dargestellt erhält man Heatmaps, die eine Veränderung der Zielfunktion mit der Variation des Eingabeparameters darstellen und zudem mögliche Interaktionen der beiden dargestellten SUV-Parameter sichtbar machen. Farbverläufe der dargestellten Zielfunktion oder isolierte Maxima bzw. Minima geben hierbei eine Interaktion der jeweilig dargestellten Parameter bzw. einen Zusammenhang von Modelleingabeparameter und Gütemaß wieder (Beven, 2012).

Um zu testen, ob ein Trend im Farbverlauf durch den bisher fixierten dritten Schneeumverteilungsparameter kompensiert werden kann, werden alle drei SUV-Parameter variiert. Für jede Parameterkombination von zwei Schneeumverteilungsparametern wird vom zugehörigen dritten Schneeumverteilungsparameter das Maximum des Gütemaßes bestimmt und farbcodiert dargestellt. Ein teilweises oder komplettes Ausbleiben von Gütemaßtrends sowie die Verbesserung des Gütemaßes spricht dann für eine Kompensierbarkeit der Auswirkungen der beiden dargestellten Parameter durch den dritten SUV-Parameter entlang der jeweiligen Achse.

3.5.2 Monte Carlo Methode

Mit der Monte Carlo (MC) Methode kann eine große Anzahl an Simulationen basierend auf zufällig gewählten Parametersets modelliert werden (Seibert & Vis, 2012). Dafür müssen die Art des Auswahlverfahrens festgelegt und die Parameterräume gewählt werden, aus denen gezogen wird. Die Stichprobenverfahren können zufällig, geschichtet oder quasi-zufällig sein (Saltelli et al., 2000).

Die in HBV-Light genutzte Probenahme ist zufällig (Seibert & Vis, 2012). Dies hat den Vorteil, dass unvoreingenommene Schätzer erzeugt werden (Saltelli et al., 2000).

Für diese Arbeit werden 20000 Monte Carlo Simulationen durchgeführt. Die Wertebereiche, aus welchen die Parameter zufällig gezogen werden, sind die selben, welche für die Kalibrierung verwendet werden (vgl. Tabelle 3.3). Für jede Modellrealisation werden die Gütemaße berechnet. Die Ergebnisse werden als Streudiagramme dargestellt. Dafür werden die Eingangsparameter gegen das jeweilige Gütemaß der Simulation aufgetragen. Die Diagramme dienen zum Ermitteln der Identifizierbarkeit und Sensitivität der Parameter. Wenn die Punktwolke ein klar definiertes Maximum aufweist, ist der Parameter gut identifizierbar und sensitiv. Gleichmäßig verteilte Punkte deuten auf eine geringe Sensitivität hin (Pianosi, Beven et al., 2016).

3.5.3 Regionalisierte Sensitivitätsanalyse

Die regionalisierte Sensitivitätsanalyse (RSA) wird auch generalisierte SA oder Hornberger-Spear-Young Methode (HSY) genannt. Sie wurde von Spear et al. (1980) und Young (o.D.) für Umweltmodelle entwickelt und von Beven & Binley (1992) für hydrologische Modelle weiterentwickelt (Song et al., 2015).

Der graphische Ansatz basiert auf Monte Carlo Simulationen. Dabei werden zufällig Parameterkombinationen gezogen und das Modell mit jeder Kombination ausgeführt. Da die Parameterwerte aus ihrem gesamten Wertebereich gezogen werden können, handelt es sich bei dieser Methode um eine globale SA. Eine große Anzahl an Modelldurchläufen ist wichtig, um die statistische Repräsentativität der Erprobung zu gewährleisten.

Die erhaltenen Modellergebnisse werden anhand eines festgelegten Grenzwertes für das jeweils untersuchte Gütemaß in gute (*behavioral*) und schlechte (*nonbehavioral*) Modelldurchläufe eingeteilt (Beven, 2012; Song et al., 2015; Tang et al., 2007). Dabei ist zu beachten, dass der Grenzwert, welcher gute und schlechte Simulationen trennt, subjektiv vom Modellierer festgelegt wird (Pianosi & Wagener, 2016). Für die Analyse in dieser Arbeit wird als Schwellenwert das Gütemaß verwendet, über welchem die besten 10 % der Modellrealisationen liegen. Die RSA identifiziert die Unterschiede zwischen den Verteilungen der guten und schlechten Parametersets für jeden Parameter. Dazu werden die kumulativen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der schlechten und guten Simulationen miteinander verglichen. Wenn sich die Kurven deutlich unterscheiden und weit auseinander liegen sowie unterschiedliche Steigungen haben, ist der Parameter als sensitiv einzustufen, da verschieden viele gute und schlechte Modellrealisationen für den Parameter simuliert wurden (s. Abbildung 3.5 b)). Wenn kein oder nur ein kleiner Unterschied zwischen den Verteilungen besteht, die Kurven also nahe beieinander liegen, wie in Abbildung 3.5 c), wird der Parameter als unsensitiv oder wenig sensitiv eingestuft (Beven, 2012; Tang et al., 2007).

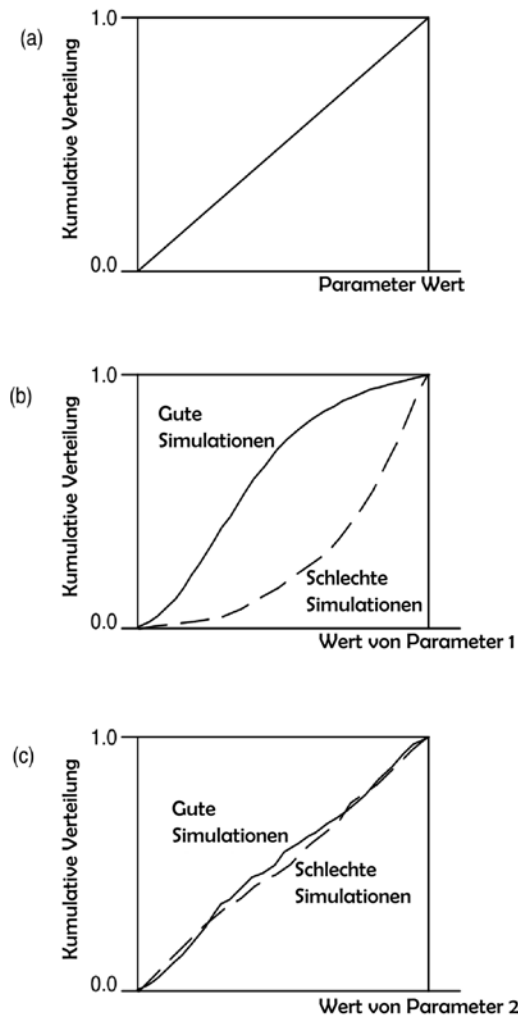


Abbildung 3.5: Auswertungsgrundlage der RSA. Kumulative Verteilungen der guten und schlechten Simulationen. a) Kumulierte Verteilung eines gleichverteilten Parameters; b) Kumulative Verteilungen eines sensiblen Parameters; c) Verteilung der guten und schlechten Simulationen für einen unsensiblen Parameter. Abgeändert nach Beven (2012).

Neben der grafischen Auswertung über die Darstellung der Verteilungsfunktionen kann die RSA auch statistisch ausgewertet werden (Tang et al., 2007). Der Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test) ist ein statistischer Test, welcher zwei kontinuierliche kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen vergleicht (Dormann, 2013) und bietet ein quantitatives Maß für die Unterschiede zwischen zwei Verteilungen. Es wird die maximale Distanz (D) zwischen der Verteilungsfunktion der guten Simulationen und der kumulativen Verteilungsfunktion der schlechten Simulationen ermittelt. Je größer der D-Wert, desto schlechter stimmen die Verteilungen miteinander überein. Je schlechter diese Übereinstimmung, desto sensibler ist der Parameter (Beven, 2012; Dormann, 2013). Der p-Wert im KS-Test gibt an, ob die beiden Verteilungen signifikant unterschiedlich sind (Dormann, 2013). Für eine sehr große Anzahl an Modelldurchläufen ist dieser Test allerdings nicht robust und kann kleine Differenzen als statis-

tisch signifikant suggerieren. Trotzdem kann der D-Wert als Index für die relative Abweichung dienen. Außerdem kann man über diese Methode herausfinden, in welchem Wertebereich eines Parameters die größten Änderungen auftreten. An der Stelle mit der größten Steigung ist der sensitivste Bereich (Beven, 2012).

4

Kapitel 4

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modellläufe mit den verschiedenen Schneeumverteilungsparameterkombinationen vorgestellt. In die Darstellungen fließen neben den Simulationen der Kombinationen die Simulationen der kalibrierten Daten (Kalibrierwerte) sowie die Modelleingangsdaten, wie gemessene Abflussdaten und die Schneedaten aus dem SLF-Produkt mit ein. Letztere werden im Folgenden auch als Referenzdaten bezeichnet. Neben den Kalibrierergebnissen werden in diesem Kapitel die zeitlichen Verläufe der Modellausgaben der Simulationen analysiert. Anschließend wird genauer auf die Schneeverteilung im Gebiet eingegangen, da davon auszugehen ist, dass die Schneeumverteilung darauf den größten Einfluss hat. Am Ende wird die Sensitivität der Schneeumverteilungsparameter untersucht. Zunächst werden nur die Ergebnisse der Schwarzen Lütschine präsentiert, sofern die anderen beiden EZG keine relevanten Unterschiede zeigen. Die Abbildungen zu den EZG der Weissen Lütschine und der Engelberger Aa sind im Anhang zu finden. Unterscheiden sich die Ergebnisse der verschiedenen Einzugsgebiete deutlich, werden auch die Ergebnisse dieser EZG vorgestellt.

4.1 Kalibrierung

Die Ergebnisse der 20 Kalibrierungen für die Schneeparameter (vgl. Tabelle 3.1) der Schwarzen Lütschine sind in In Abbildung 4.1 dargestellt. Die Parameterwerte sind in ihrem zugelassenen Wertebereich gegen die WOF aufgetragen. TT und CFMAX zeigen klare Trends und Maxima. OH und SUB können dagegen fast in ihrem gesamten Wertebereich ähnlich gute WOF-Werte erzielen. Nur für eine OH von 2000 m und einen SUB von 1700 m treten schlechte Gütemaße auf. Auffällig ist, dass für RM nur Werte größer als 500 mm gewählt werden. Die Kalibrierergebnisse für die Weisse Lütschine und die Engelberger Aa sehen ähnlich aus, wobei die Streuung der Punkte bei der Engelberger Aa weniger stark ausgeprägt ist (vgl. Abbildungen A.1 und A.37).

Anhand der WOF wird für jedes EZG der beste Parametersatz ausgewählt. In Tabelle 4.2 sind die Parameterwerte des optimalen Parametersatzes für die Schwarze Lütschine aufgeführt. Die Kalibrierung ergibt für die Obere Höhengrenze einen optimalen Wert von 2249 m, für den Schneeumverteilungsbereich einen Wert 1547 m und für die Restschneemenge 1251 mm. Für alle drei Einzugsgebiete sind in Tabelle 4.1 neben dem Wert für die WOF auch die zugehörigen Gütemaße Lindström Maß, SWE MANE und SnowCover RMSE sowie die entsprechenden

Schneelumverteilungsparameter zusammengestellt. Die aufgeführten Schneelumverteilungsparameterwerte werden gerundet, damit sie für die weitere Auswertung zu den 100er Schritten der Variationen passen.

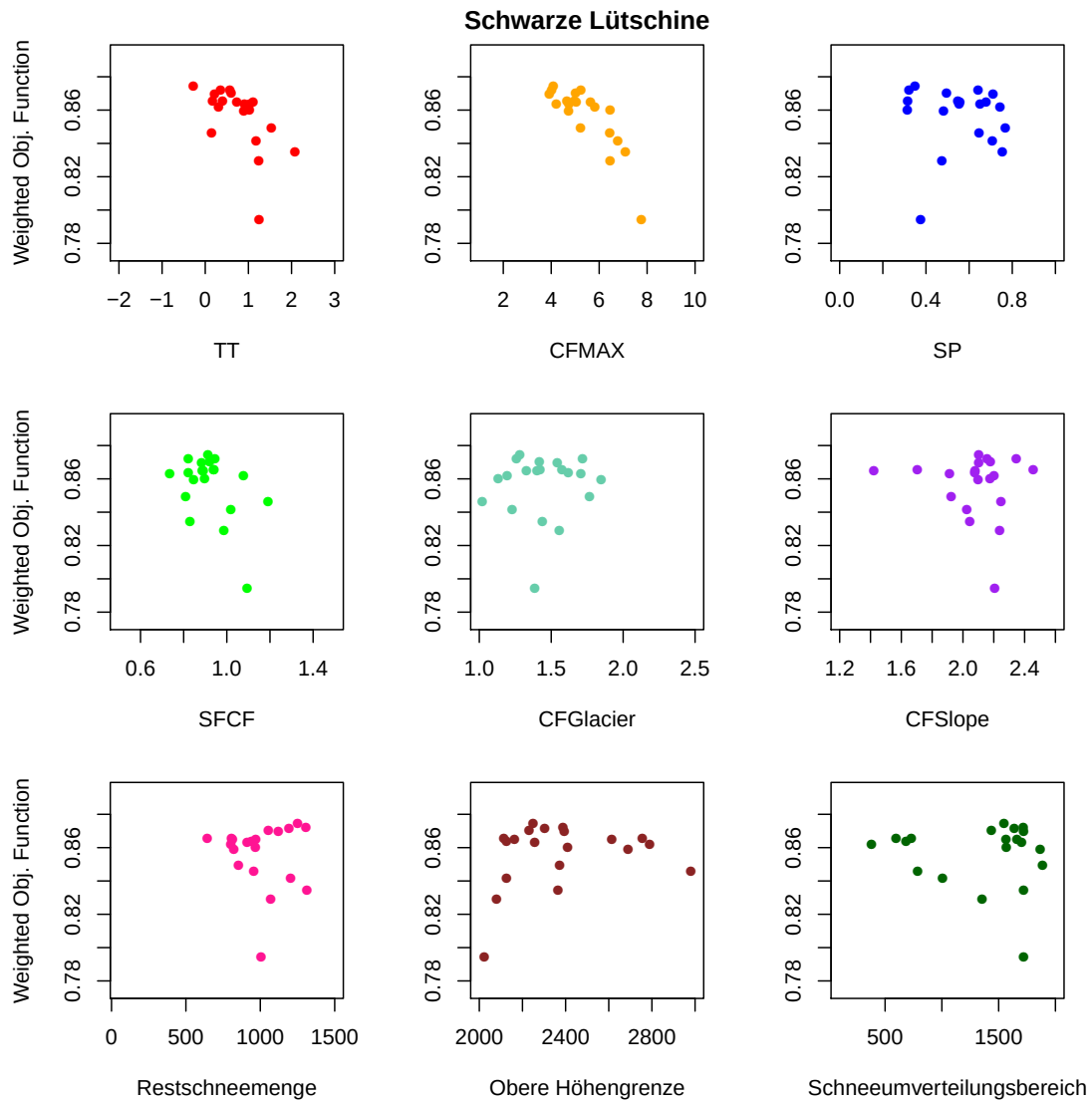


Abbildung 4.1: Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Schwarze Lütschine.

Tabelle 4.1: Kalibrierergebnisse

Einzugsgebiet	Weisse Lütschine	Schwarze Lütschine	Engelberger Aa
Gewichtete Zielfunktion (WOF)	0.892	0.874	0.880
Lindström Maß	0.906	0.897	0.869
SWE MANE	0.812	0.750	0.843
SnowCover RMSE	0.927	0.900	0.918
Obere Höhengrenze (OH) [m]	2600	2200	2200
Schneeumverteilungsbereich (SUB) [m]	1800	1500	1600
Restschneemenge (RM) [mm]	1250	1250	1350

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Kalibrierung des HBV-Light-Modells für das EZG Schwarze Lütschine. Aufgeführt sind alle Modelleingangsparameter.

Parameter	Kalibrierwert
TT	-0.274
CFMAX	4.096
SP	0.350
SFCF	0.913
CFR	0.05
CWH	0.1
CFGlacier	1.281
CFSlope	2.103
FC	539.735
LP	0.9998
BETA	2.668
KSI	0.0024
KGmin	0.490
dKG	0.386
AG	0.0009
PERC	6.0
Alpha	0.14
K1	0.128
K2	0.04
MAXBAS	2.219
RM	1251
OH	2249
SUB	1547

4.2 Analyse der simulierten Modellausgabeparameter

4.2.1 Auswertung Zeitreihen

4.2.1.1 Abfluss

Die Abflusszeitreihen aller Schneenumverteilungsparameterkombinationen sind als Jahresmittel (1976 - 2006) im Vergleich mit den Modelleingangsdaten sowie der simulierten Zeitreihe mit kalibriertem Parameterset in Abbildung 4.2 dargestellt. In den Jahren von 1976 bis 1995 unterschätzt das Modell die Abflusswerte. Danach liegen die Messwerte eher unterhalb der Kalibrierwerte und innerhalb der simulierten Zeitreihen. Insgesamt liegt der Großteil der Simulationen unterhalb der Kalibrierwerte.

Im Jahresgang (s. Abbildung 4.3) zeigt sich, dass die Variation der verschiedenen Simulationen zwischen April und August am größten ist. Die Kalibrierwerte liegen besonders im ersten Halbjahr im mittleren Bereich der Simulationsverteilung und ab Juni am oberen Ende der Verteilung. Im Zeitraum von Januar bis Mai werden die Messdaten von den Kalibrierwerten gut abgebildet und die Simulation liegt im mittleren Bereich der Simulationsverteilung (s. Abbildung 4.3). Ab Mai werden die beobachteten Abflussdaten von den Kalibrierwerten generell unterschätzt und ab Juni übersteigen die Messwerte alle simulierten Parameterkombinationen. Im September liegen die Referenzwerte wieder im Bereich der Simulationen und ab Ende des Monats liegen die Messdaten unterhalb der Kalibrierwerte.

Die Abflussanteile aus Regen, Schnee- und Gletscherschmelze werden nur modelliert. Dafür liegen keine Messwerte zum Vergleich vor. Die Variation der Simulationen für den Abfluss aus der Gletscherschmelze (s. Abbildung 4.4) ist relativ gering, nimmt allerdings ab etwa 1984 durch einzelne Modellläufe, die nach oben ausreißen, etwas zu. Die Kalibrierwerte liegen zunächst am oberen Ende der Verteilung der Simulationen. Ab 1984 liegen die Simulationen meist über dem kalibrierten Abfluss. Das Abflussregime des Gletscherschmelzwassers zeigt, dass die Gletscherschmelze vor allem im Hochsommer zum Abfluss beiträgt. Die durch die Parameterkombinationen bedingte Variation ist zu Beginn der Schmelzsaison, im Mai und Juni, am stärksten. Die maximalen Abflüsse treten Ende August auf.

Für das EZG der Engelberger Aa zeigen die Simulationen des Gletscheranteils eine deutlich größere Variation als bei der Schwarzen Lutschine. Auch zu Beginn der Zeitreihe sind durch einzelne Simulationen schon merkliche Abweichungen vom Kalibrierwert festzustellen. Zum Ende der Zeitreihe wird die Verteilung der Simulationen breiter (s. Abbildung A.4). Im Gletscherabflussregime der Engelberger Aa wird ebenfalls die größere Streuung der Modellläufe, vor allem in den Sommermonaten, deutlich (s. A.5).

Die Verteilung des Abflusses aus der Schneeschmelze (s. Abbildung 4.6) ist etwas breiter als beim Gletscheranteil. Der Großteil der simulierten Zeitreihen liegt unter dem Kalibrierwert. Das Abflussregime zeigt, dass das Schneeschmelzwasser über das gesamte Jahr zum Abfluss beiträgt, wenn auch in den Wintermonaten (Dezember bis März) nur zu einem sehr geringen Anteil. Die Variation der Simulationen ist im Sommer größer als im Winter.

Bei der Engelberger Aa ist die Verteilung der Schneeschmelzeitreihen deutlich schmäler als die der Schwarzen Lutschine (s. Abbildung A.6). Im Abflussregime für die Engelberger Aa ist der Abflusspeak deutlicher abgegrenzt. Das bedeutet, dass die höchsten Abflüsse in einem kürzeren Zeitraum auftreten (s. Abbildung A.7).

Für den Abflussanteil aus Regen ist die Verteilung der Simulationen breiter als bei den beiden anderen Anteilen. Auch hier liegen die meisten Simulationen unter dem kalibrierten Abfluss. Das Abflussregime zeigt zwischen Mai und Oktober die größte Streuung der Simulationen.

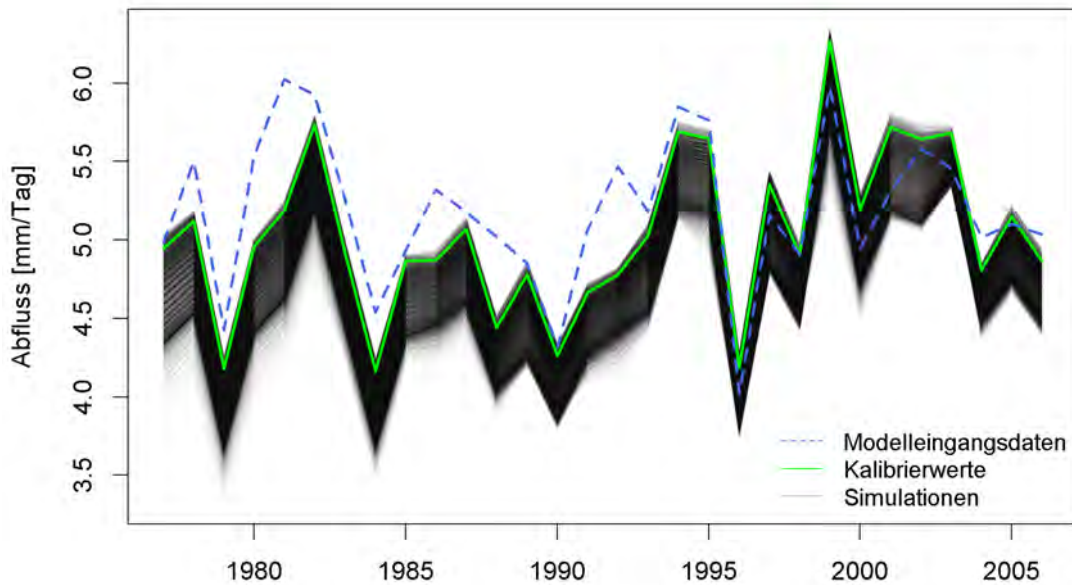


Abbildung 4.2: Abflusszeitreihe der Schwarzen Lutschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der Simulationen, gemessenen Abflüsse und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

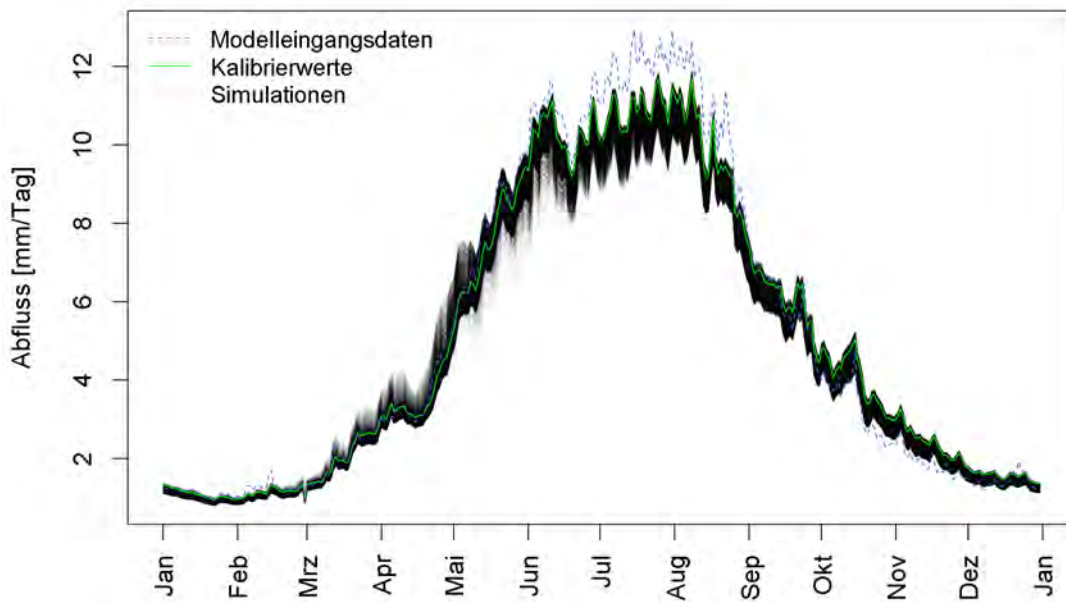


Abbildung 4.3: Abflussregime der Schwarzen Lütschine. Tägliche Mittelwerte der simulierten und gemessenen Abflüsse sowie der Kalibrierwerte.

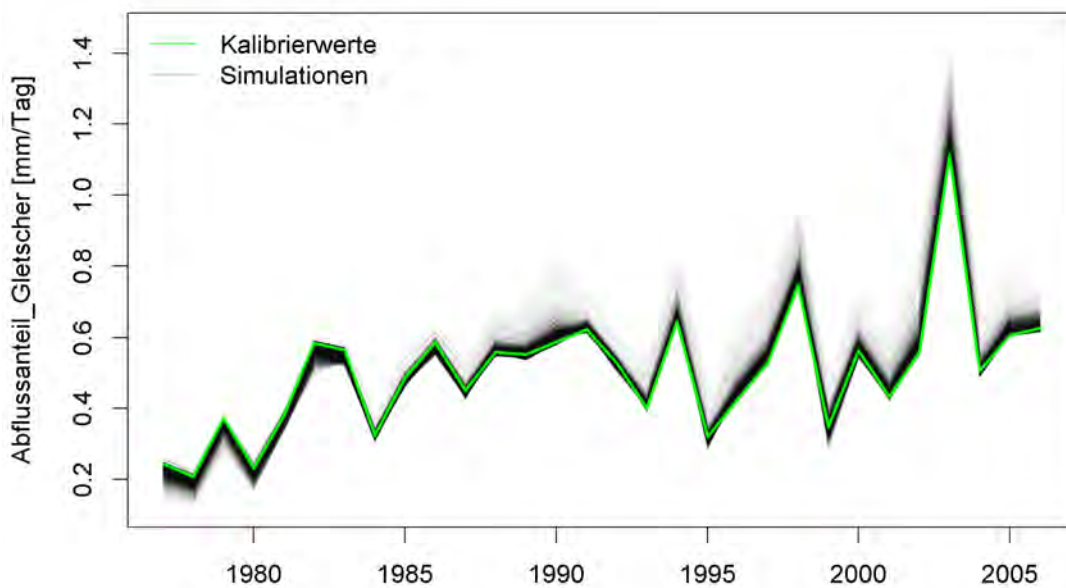


Abbildung 4.4: Zeitreihe des Abflusses aus der Gletscherschmelze für die Schwarze Lütschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der simulierten Abflüsse und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.



Abbildung 4.5: Gletscherabflussregime der Schwarzen Lutschine. Tägliche Mittelwerte der simulierten Abflüsse und der Kalibrierwerte.

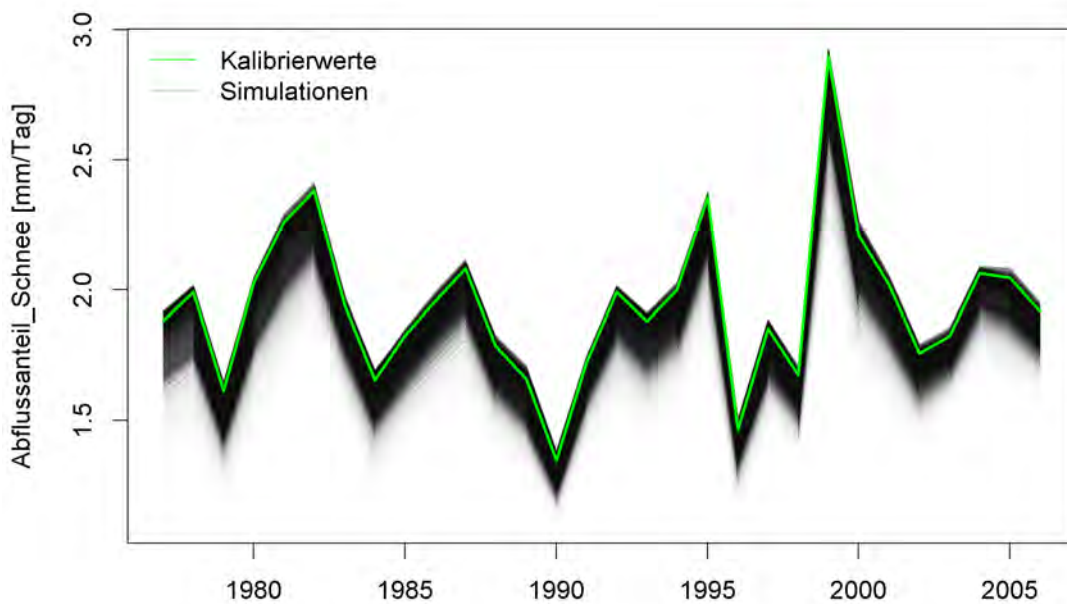


Abbildung 4.6: Zeitreihe des Abflusses aus der Schneeschmelze für die Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der simulierten Abflüsse und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

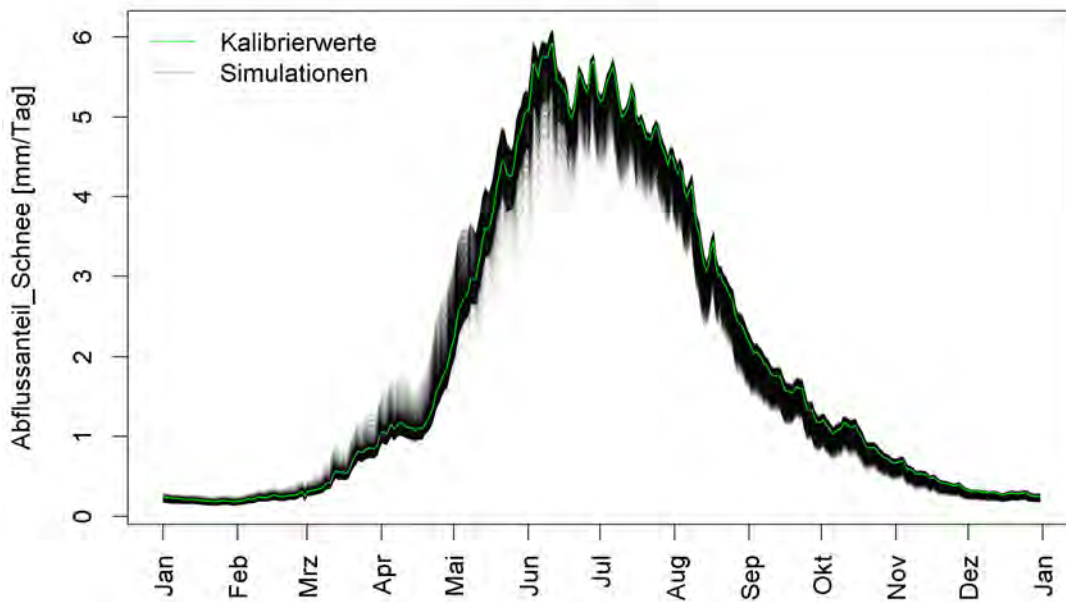


Abbildung 4.7: Schneeabflussregime der Schwarzen Lütschine. Tagesliche Mittelwerte der simulierten Abflüsse und der Kalibrierwerte.

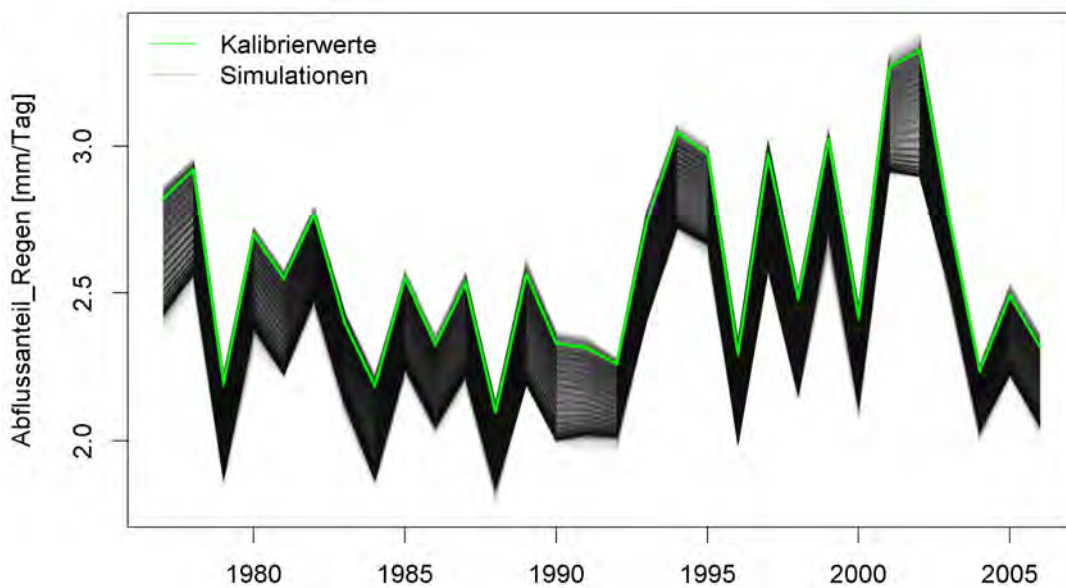


Abbildung 4.8: Zeitreihe des Abflussanteils Regen für die Schwarze Lütschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der simulierten Abflüsse und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

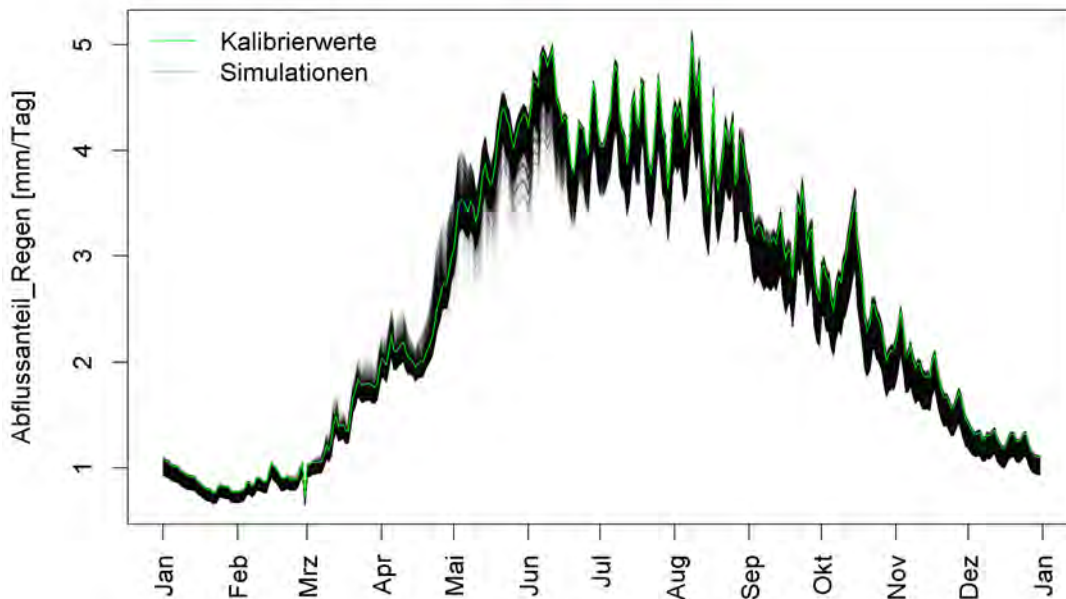


Abbildung 4.9: Regenabflussregime der Schwarzen Lutschine. Tägliche Mittelwerte der simulierten Abflüsse und der Kalibrierwerte.

4.2.1.2 Schnee im gesamten Einzugsgebiet

In Abbildung 4.10 sind die Zeitreihen der mittleren Schneehöhen als SWE im gesamten Einzugsgebiet dargestellt. Die Streuung der Zeitreihen ist groß und nimmt gegen Ende der Simulationszeit zu. Die meisten Simulationen liegen über den Kalibrier- und Modelleingangsdaten. Nahe den Kalibrierwerten weist die Simualtionsverteilung die höchste Dichte auf. Auffällig ist das Streifenmuster in der Verteilung der Simulationen. Es gibt Bereiche, in denen eine erhöhte Anzahl an Simulationen liegen, die oft nur durch einzelne Simulationen getrennt sind.

Die Streuung der Simulationen ist über das ganze Jahr gleich (s. Abbildung 4.11). Zwischen März und Juli liegen mehr Simulationen unterhalb der Kalibrier- und Modelleingangsdaten als im restlichen Jahr.

Die Simulationen passen recht gut zu den Modelleingangsdaten. Lediglich im September und den darauffolgenden Monaten ist ein deutlicher Unterschied erkennbar, was auf die Entstehung des SLF-Produkts zurückzuführen ist. Dafür werden wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben die Schneewerte am 1. September auf 0 gesetzt.

Die mittleren Schneehöhen für das gesamte EZG sind bei der Engelberger Aa geringer als bei der Schwarzen und Weissen Lutschine. Die Simulationen für das EZG Engelberger Aa zeigen ein noch ausgeprägteres Streifenmuster und zu Beginn der Zeitreihe liegen einzelne Simulationen deutlich höher (s. Abbildung A.10). Auch im Regime sind die starken Ausreißer nach oben auszumachen und das Streifenmuster deutlich ausgeprägt (s. Abbildung A.11).

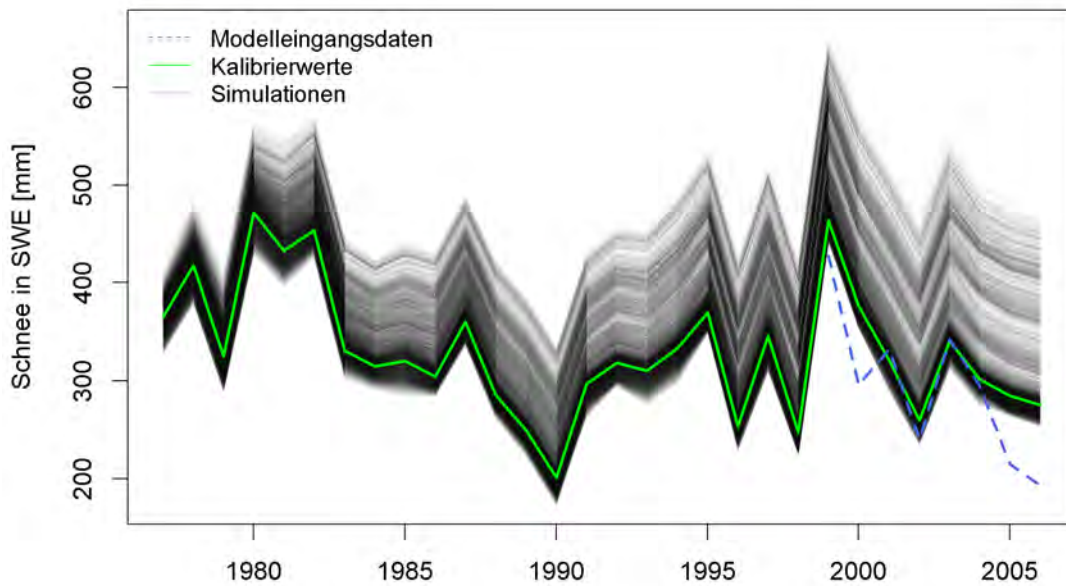


Abbildung 4.10: Zeitreihe der Schneehöhen im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

4.2.1.3 Schnee unterhalb 2500 m

In Abbildung 4.12 sind die Zeitreihen für die mittleren Schneehöhen in SWE unterhalb der Gebietshöhe von 2500 m dargestellt. Die Variation der Simulationen ist geringer als für die SWE-Werte im gesamten Einzugsgebiet. Die Simulationen streuen beidseits des Kalibrierwerts, die größte Dichte liegt allerdings nahe am Kalibrierwert. In der ersten Jahreshälfte ist die Variation deutlich größer als in der zweiten (s. Abbildung 4.13). Bis auf den Zeitraum von März bis Mitte Mai unterschätzen die Kalibrierwerte die Referenzdaten. In diesem Zeitraum liegen die Referenzdaten über den Kalibrierwerten. Generell orientieren sich die Kalibrierwerte am unteren Bereich der Simulationsverteilung.

Die Simulationsverteilung der Schneehöhen unterhalb 2500 m ist bei der Modellierung des EZG Engelberger Aa merklich breiter als bei der Schwarzen Lutschine (s. Abbildung A.12). Dies wird durch einzelne Simulationen bedingt, die nach oben versetzt sind. Die größte Dichte der Simulationen liegt, wie bei der Modellierung für das EZG Schwarze Lutschine, nahe an den Kalibrierwerten. Dies zeigt sich auch im Regime in Abbildung A.13. Hier sind vor allem die Simulationen mit großen Schneehöhen im Sommer auffällig.

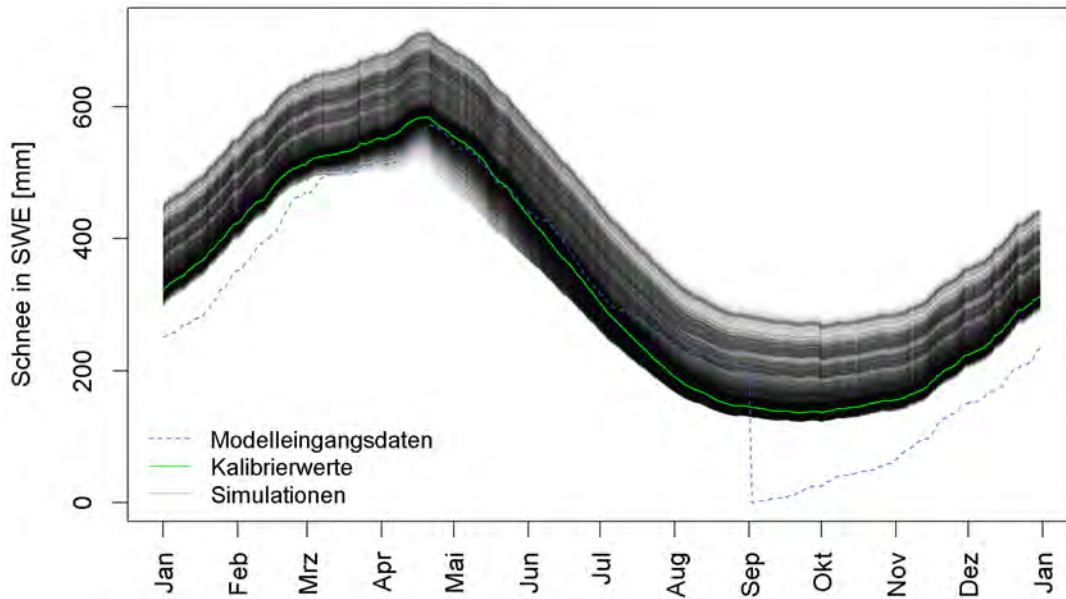


Abbildung 4.11: Langjährige Tagesmittelwerte der Schneehöhen im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte.

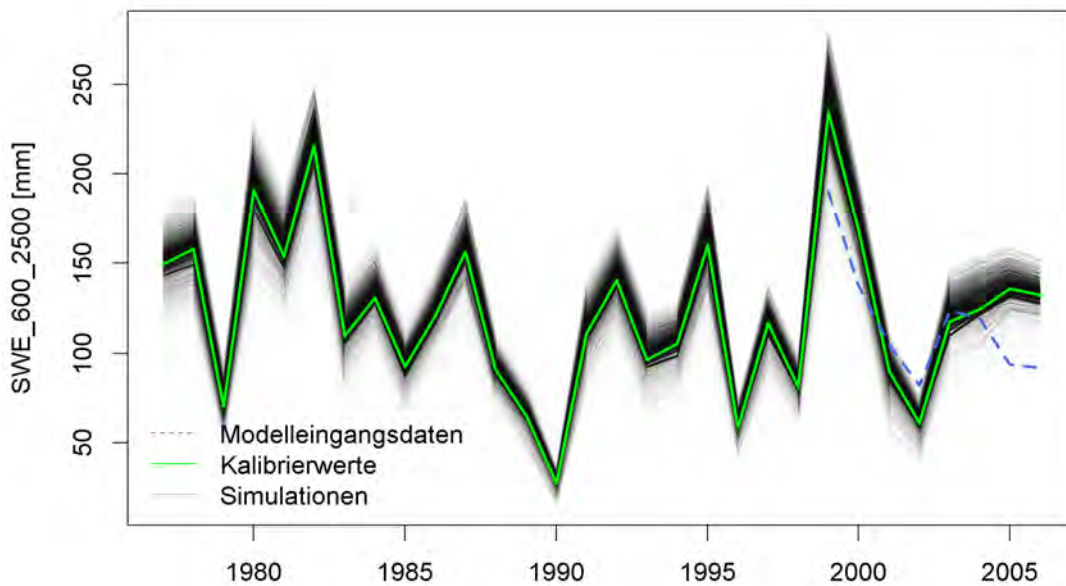


Abbildung 4.12: Zeitreihe der Schneehöhen unterhalb von 2500 m im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

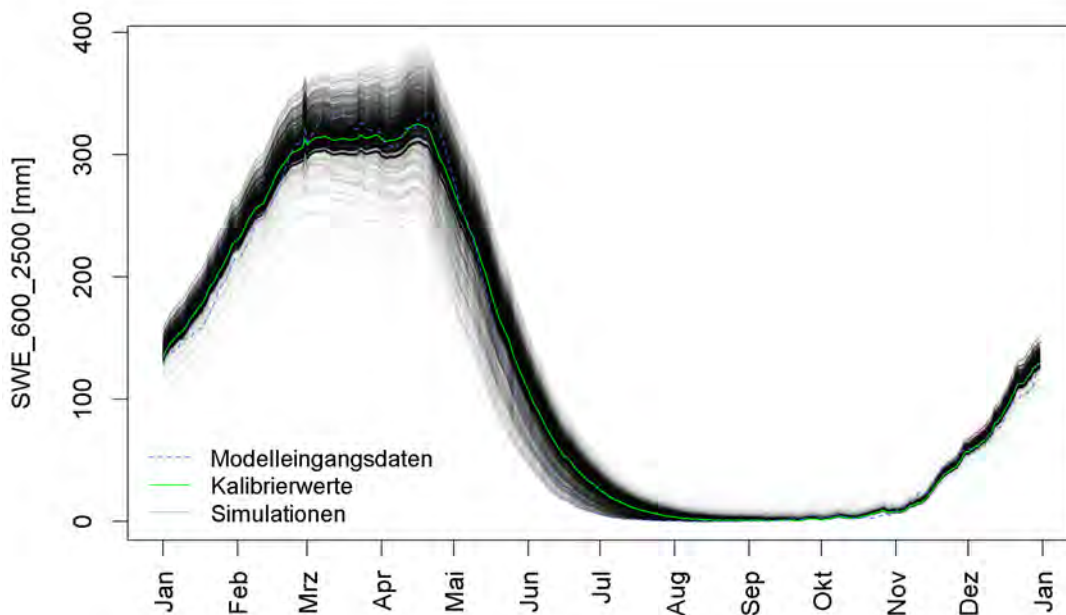


Abbildung 4.13: Langjährige Tagesmittelwerte der Schneehöhen unterhalb von 2500 m im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte.

4.2.1.4 Schneebedeckung

Die Streuung der Simulationen ist für die Schneebedeckung über alle Jahre sehr gering. Die Kalibrierwerte liegen am oberen Ende der Simulationsverteilung. Die Simulationen passen zwar von der Größenordnung zu den Referenzdaten, allerdings ist zu Beginn der Referenzdaten zeitlicher Versatz erkennbar. Im Jahresverlauf zeigt sich eine etwas größere Variation der Simulationen zwischen März und Juli als im übrigen Jahr. Die Schwankungen der Schneebedeckung auf täglicher Basis kann vom Modell nicht abgebildet werden. Besonders in den Sommermonaten wird die Schneebedeckung überschätzt.

4.2.1.5 Gletscher

Die Streuung der Simulationen der Gletscherentwicklung ist sehr groß und nimmt mit den Jahren zu. Die meisten Simulationen liegen überhalb der Kalibrierwerte. Allerdings ist zu beachten, dass es nur einen Referenzwert im Simulationszeitraum gibt, auf den kalibriert

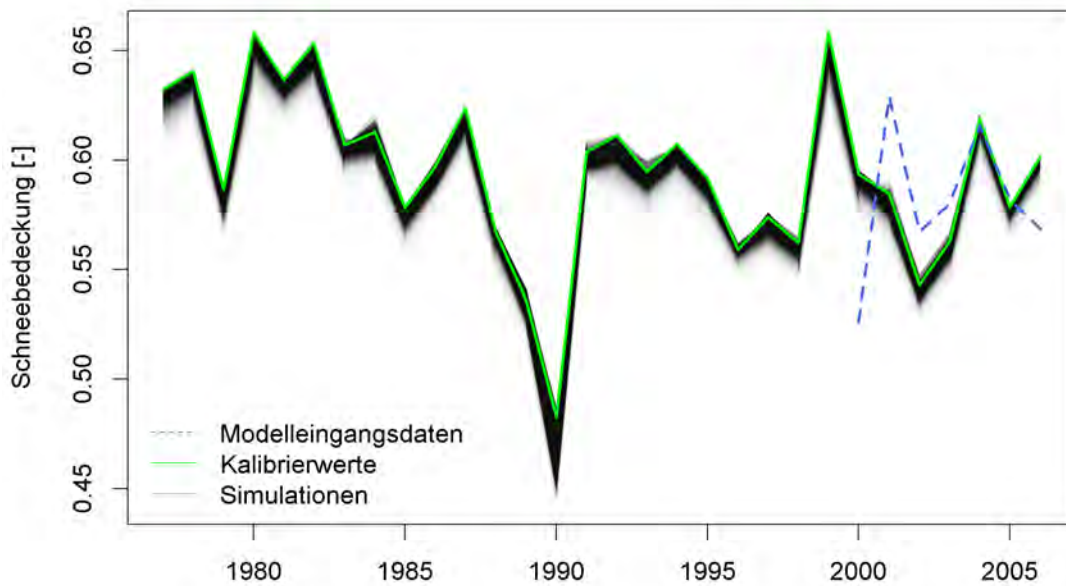


Abbildung 4.14: Zeitreihe der Schneebedeckung im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte über die gesamte Simulationsperiode.

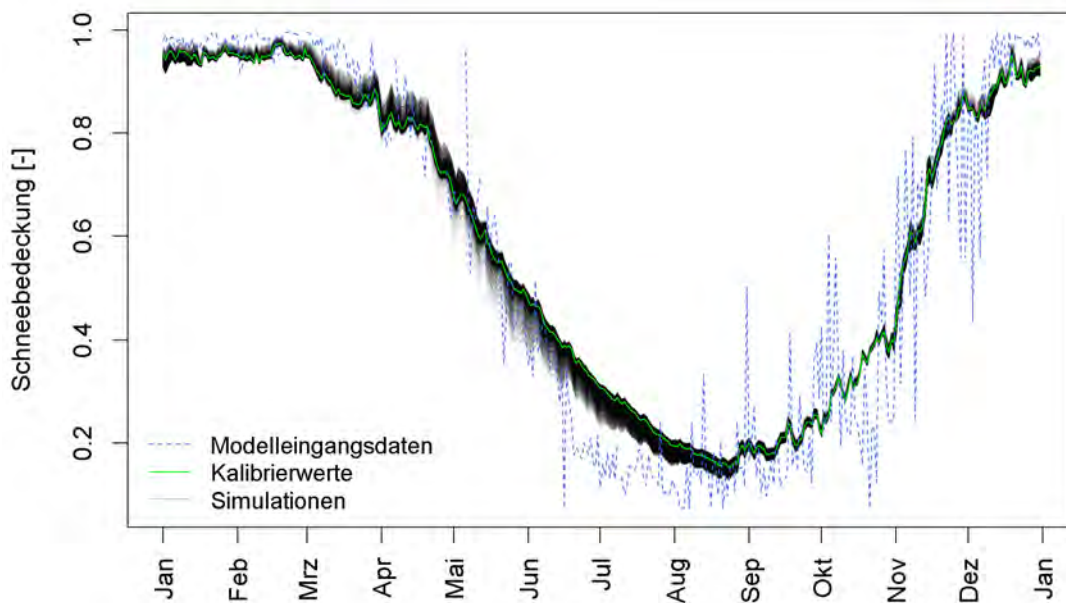


Abbildung 4.15: Langjährige Tagesmittelwerte der Schneebedeckung im EZG Schwarze Lutschine. Dargestellt sind die Simulationen, Modelleingangsdaten und Kalibrierwerte.

wird. Die Simulation der kalibrierten Parameter zeigt einen Gletscherrückgang, der auch durch einen Großteil der Simulationen abgebildet wird. Einige Simulationen können diesen Trend jedoch nicht abbilden und zeigen eher ein Wachstum, beziehungsweise nur einen sehr geringen Rückgang.

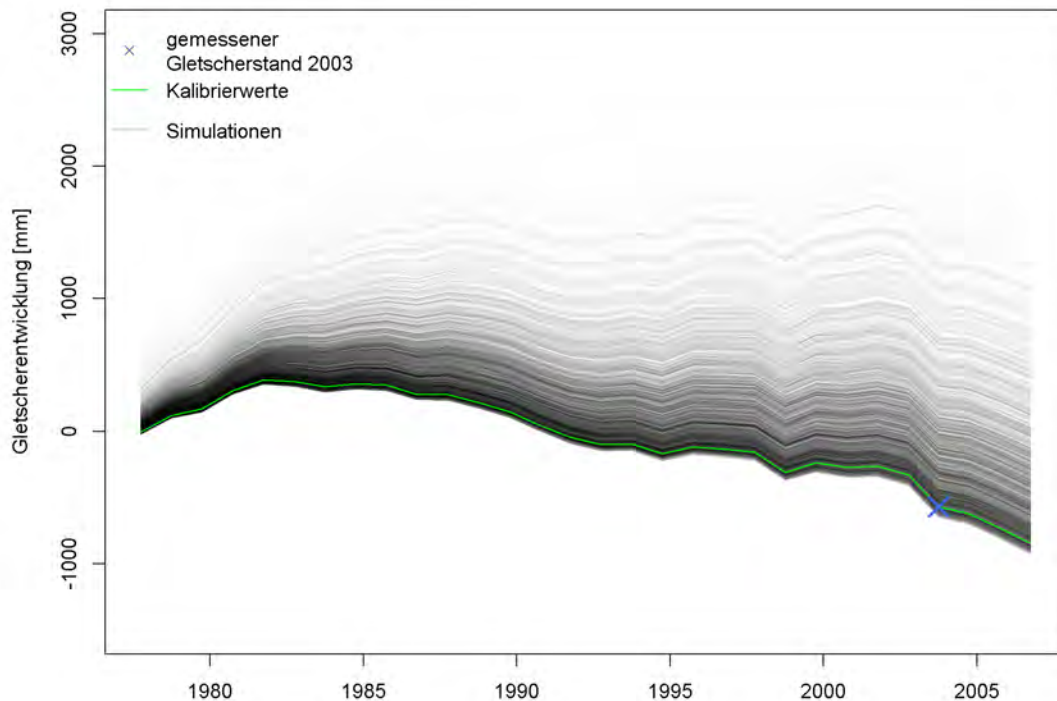


Abbildung 4.16: Gletscherentwicklung im EZG Schwarze Lütschine. Dargestellt sind die Simulationen, die Kalibrierwerte und als Referenzwert der Gletscherstand von 2003.

4.2.2 Vergleich mit Stationsdaten

In diesem Abschnitt werden explizite Messdaten mit den simulierten Werten verglichen. Die Messdaten stammen aus den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Schneemessstationen in den jeweiligen Einzugsgebieten. Es wird nicht wie zuvor nur das EZG Schwarze Lütschine dargestellt, sondern alle drei Einzugsgebiete einzeln präsentiert.

4.2.2.1 Engelberger Aa

Im Einzugsgebiet Engelberger Aa liegen die mittleren simulierten Schneehöhen im gesamten EZG und im Bereich unterhalb 2500 m relativ nah beieinander. Sie zeigen einen Versatz von etwa 50 mm SWE. Die Referenzdaten des SLF-Produkts sind erst ab 1998 verfügbar. Für den Zeitraum passen die simulierten Schneehöhen und die Referenzdaten gut zusammen.

Die simulierten Schneehöhen, die Schneedaten aus dem SLF-Produkt als Modelleingangsdaten

sowie die Messdaten der Schneemessstation Engelberg sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Die Schneehöhen werden wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert in mm SWE umgerechnet. Die Messstation liegt im EZG Engelberger Aa auf 1035 m ü. NN. Daher wird die simulierte Schneehöhe im Höhenband von 950 m bis 1050 m mit der gemessenen verglichen. Der simulierte Schnee im Höhenband passt von der Größenordnung gut zu den Messdaten der Station Engelberg. Das Modell unterschätzt die Schneehöhe teilweise etwas. Es scheint, als würde die Simulation der nordexponierten Bereiche die gemessenen Daten am besten abbilden. Im Jahresverlauf zeigt sich, dass Messdaten und Simulation gut zusammenpassen (s. Abbildung 4.18). Allerdings kann im Regime die Simulation der Ost-West exponierten Bereiche die Messdaten am besten abbilden. Die eben betrachteten Mess- und Simulationsdaten liegen unter den Modellwerten für das gesamte EZG sowie den Bereich unterhalb 2500 m.

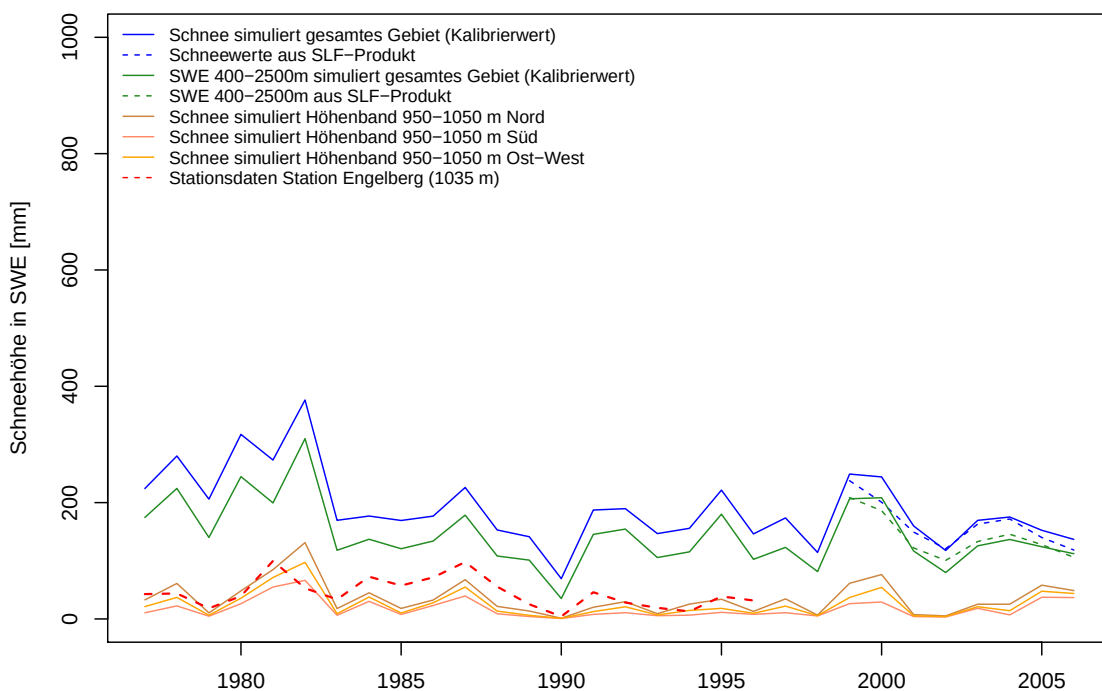


Abbildung 4.17: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Engelberg im EZG Engelberger Aa. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneewerten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

Die Schneestation Titlis liegt auf 2140 m ü. NN und wird daher mit dem Höhenband von 2050 m bis 2150 m verglichen (s. Abbildung 4.19). Die Messdaten der Schneestation liegen teilweise deutlich über den simulierten Daten. Sowohl die Simulation des SWE im Höhenband für alle Ausrichtungen als auch die Referenzwerte und Simulationen des gesamten EZG und dem Bereich unter 2500 m liegen deutlich niedriger und können die Spitzen nicht abbilden. Die Spitzenwerte sind teilweise doppelt so groß wie die höchsten Simulationswerte. Die Abweichung der Simulationen von den Messdaten wird hauptsächlich im ersten Halbjahr

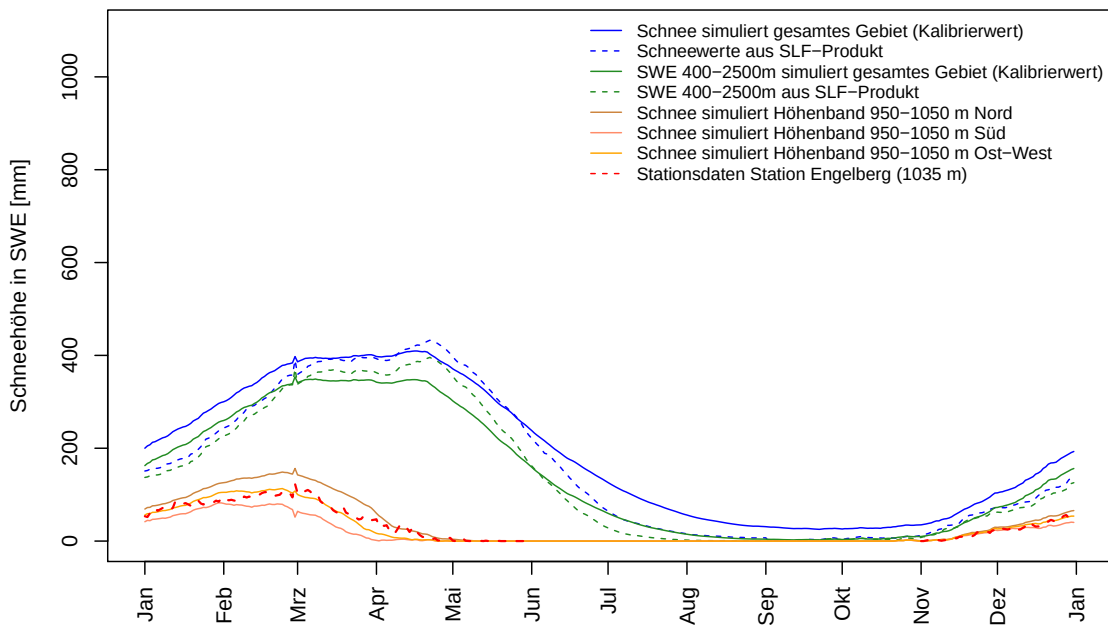


Abbildung 4.18: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Engelberg im EZG Engelberger Aa. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

verursacht. Im Zeitraum zwischen Januar und Juli liegen die Messdaten deutlich höher als die Simulationen im Höhenband (s. Abbildung 4.20). Die Simulationen der nach Norden ausgerichteten Bereiche kann die Messwerte mit einer Differenz von bis zu 300 mm SWE noch am besten wiedergeben.

Auf 1780 m ü. NN im EZG Engelberger Aa liegt die Station Trübsee. Da die Messzeitreihe für diese Station nur für einen Winter zur Verfügung steht, lässt sich daraus kein langjähriges Verhalten ablesen. Deshalb werden die Ergebnisse für diese Messstation nicht vorgestellt.

4.2.2.2 Schwarze Lütschine

Für das Einzugsgebiet Schwarze Lütschine ist der Versatz zwischen den Schneehöhen für das gesamte EZG und dem Bereich unterhalb 2500 m deutlich größer als beim EZG Engelberger Aa.

Im EZG Schwarze Lütschine liegen die Schneemessstationen First (2111 m), Grindel (1950 m) und Männlichen (2165 m). Für die Station First wird die Schneehöhe im Höhenband durch das Modell unterschätzt (s. Abbildungen 4.21 und 4.22). Das Höhenband Nord kommt den gemessenen SWE-Werte am nächsten. Im Regime fällt auf, dass die Station in den ersten drei Monaten des Jahres höhere Schneewerte misst als vom Modell simuliert werden.

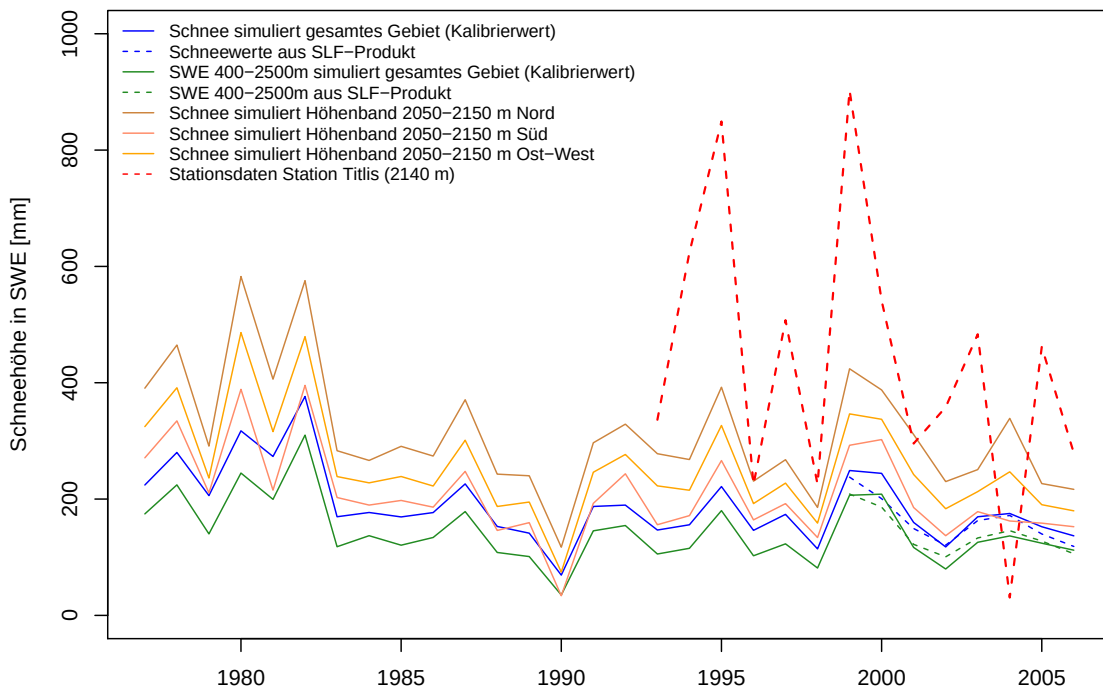


Abbildung 4.19: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Titlis im EZG Engelberger Aa. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

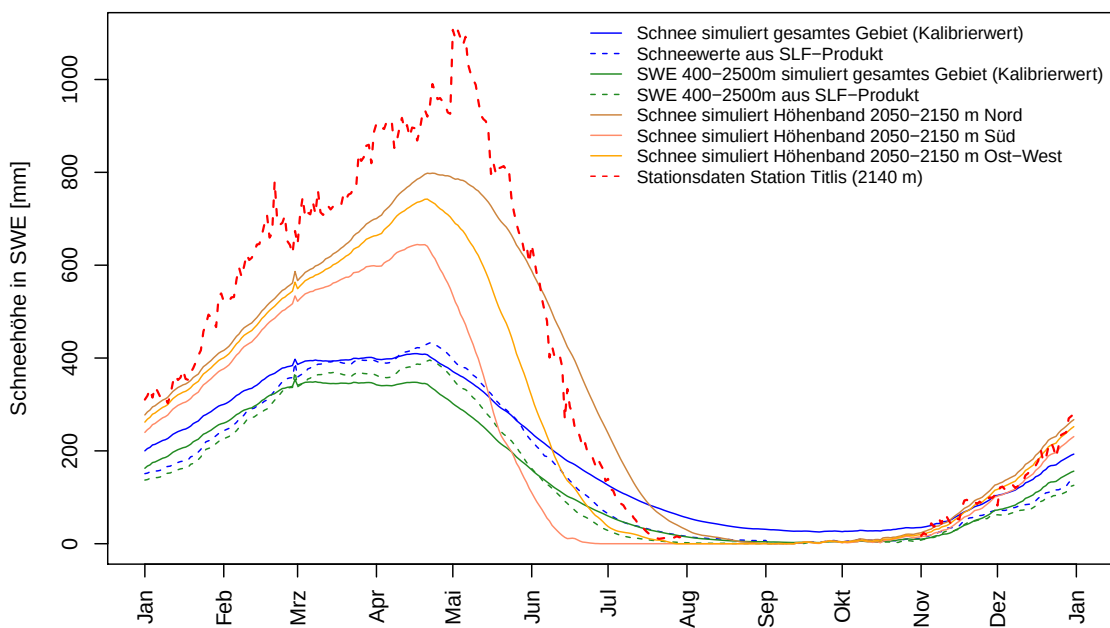


Abbildung 4.20: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Titlis im EZG Engelberger Aa. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

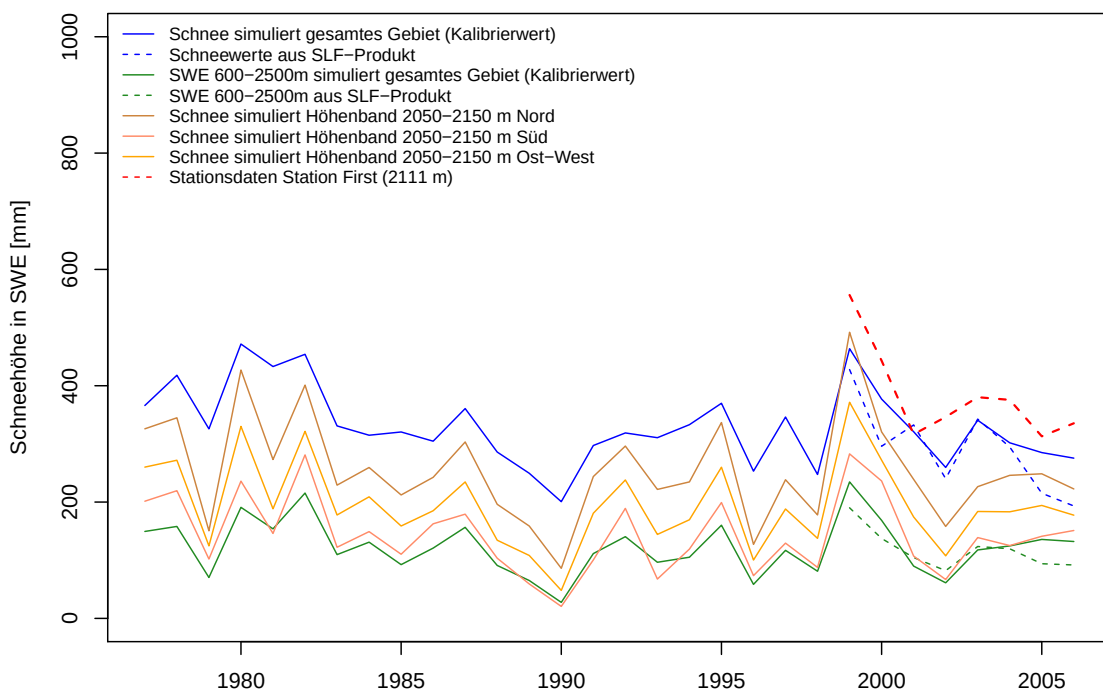


Abbildung 4.21: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station First im EZG Schwarze Lutschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

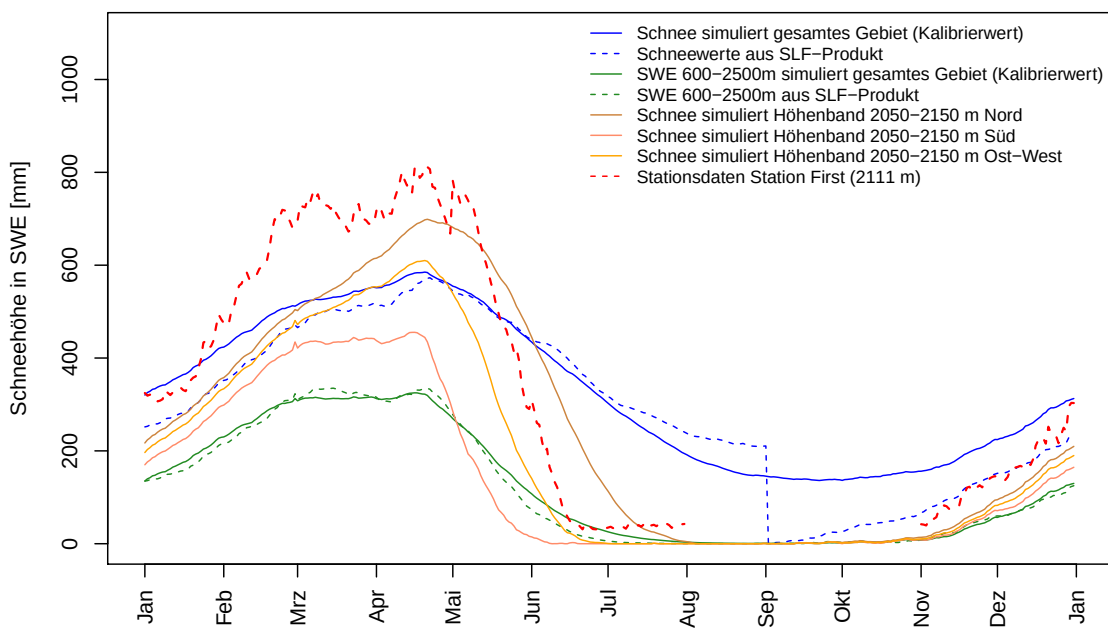


Abbildung 4.22: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station First im EZG Schwarze Lutschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

Für die Station Grindel steht nur ein kurzer Messzeitraum mit einigen Datenlücken zur Verfügung. Die Abbildungen und Ergebnisse für diese Beobachtungsstation werden daher nicht gezeigt.

Für die höchstgelegene Station in diesem EZG, Männlichen, liegen die dort gemessenen Schneehöhen zwischen den Simulationen der verschiedenen Expositionen im Höhenband und zwischen den Simulationen des gesamten EZG und unterhalb 2500 m. Etwa im Jahr 2004 zeigen die Messdaten einen gegenläufigen Trend zu den simulierten Daten (s. Abbildung 4.23). Das Regime in Abbildung 4.24 zeigt, dass das Modell die Messdaten um circa 100 mm bis 300 mm überschätzt. Zwischen Februar und Mai sind die größten Abweichungen feststellbar.

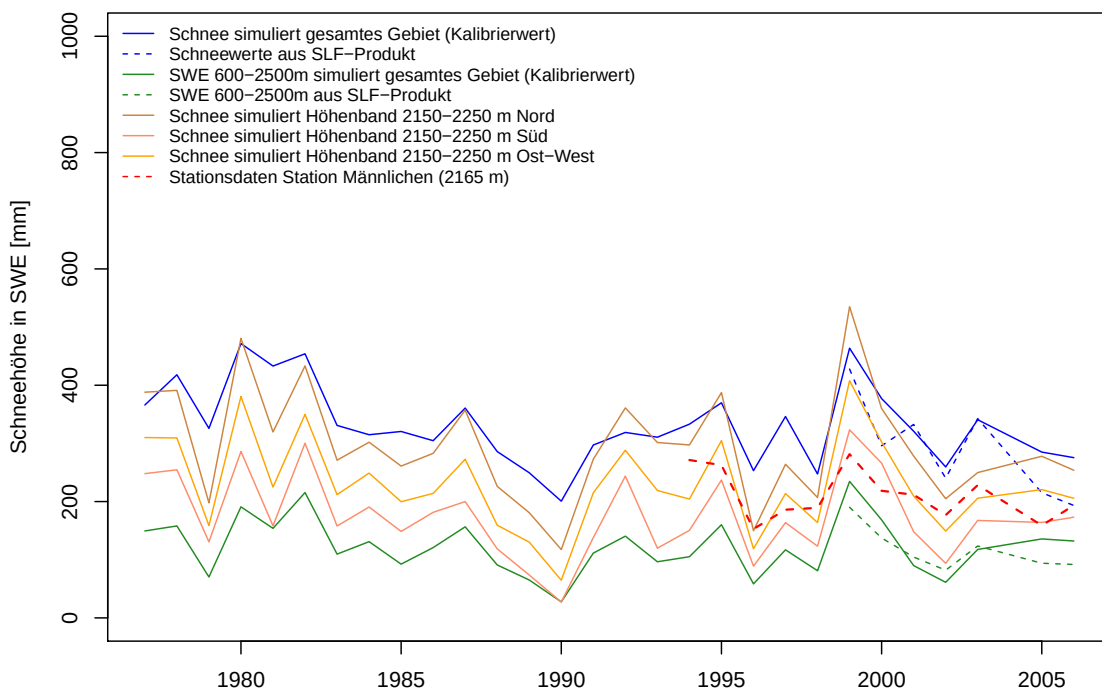


Abbildung 4.23: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Männlichen im EZG Schwarze Lütschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

4.2.2.3 Weisse Lütschine

Für das Einzugsgebiet der Weissen Lütschine ist ein ähnlicher Versatz zwischen den Schneehöhen im gesamten Gebiet und im Bereich unterhalb 2500 m wie für das EZG der Schwarzen

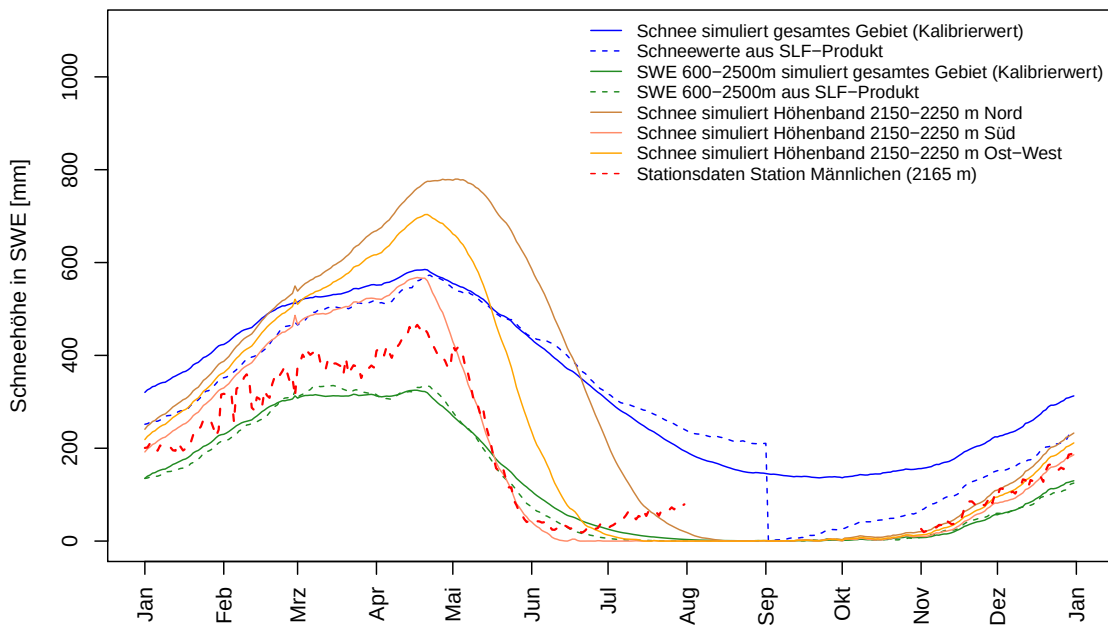


Abbildung 4.24: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Männlichen im EZG Schwarze Lutschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneeedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

Lutschine feststellbar.

Die Messstation Mürren liegt auf 1641 m im EZG Weisse Lutschine. Das Modell unterschätzt die Stationsdaten im zugehörigen Höhenband für einen Großteil der Simulationszeitreihe (s. Abbildung 4.25). Im Jahresverlauf ist die Unterschätzung weniger deutlich. Zwischen Januar und April liegen die Messwerte über den simulierten Werten, wobei die Simulation der nördlichen Expositionen die Messdaten am besten abbilden kann (s. Abbildung 4.26).

Die Schneemesstation Schilthorn liegt auf 2380 m ü. NN. Die Messdaten liegen mit bis zu 500 mm Differenz weit über den simulierten Schneehöhen (s. Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28).

Die Zeitreihe der Messwerte der Station Wengen (1280 m ü. NN) ist relativ kurz (Okt. 2005 - Apr. 2006). Da aus dem kurzen Messzeitraum keine langjährigen Trends abgeleitet werden können, wird die Zeitreihe nicht vorgestellt.

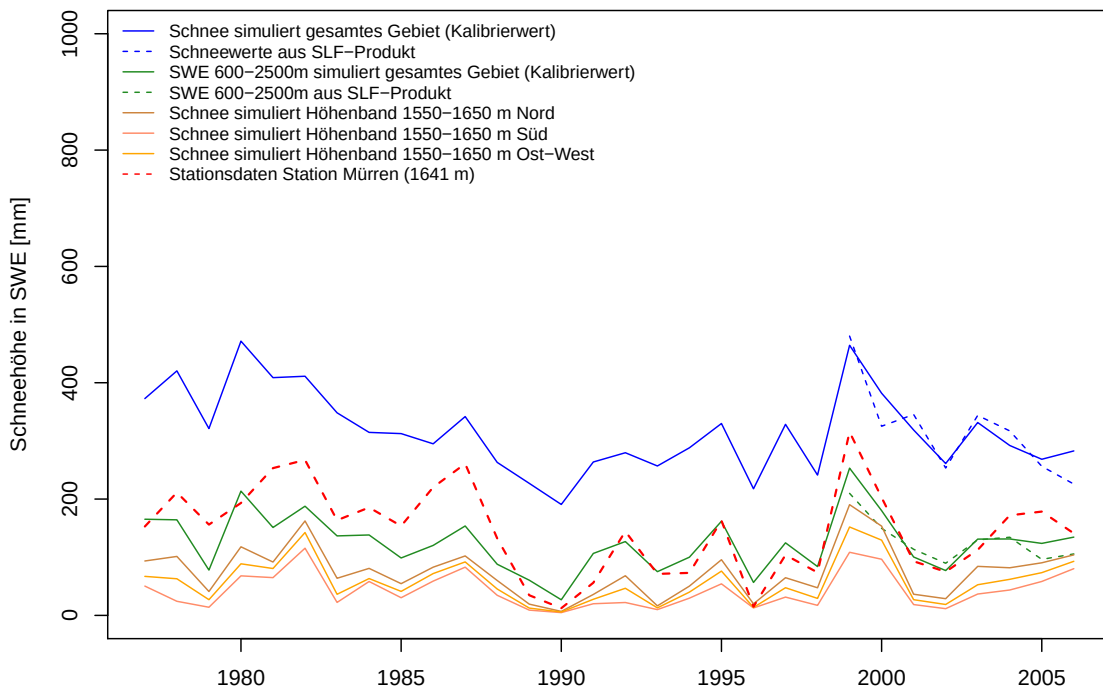


Abbildung 4.25: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Mürren im EZG Weissen Lüttschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneewerten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

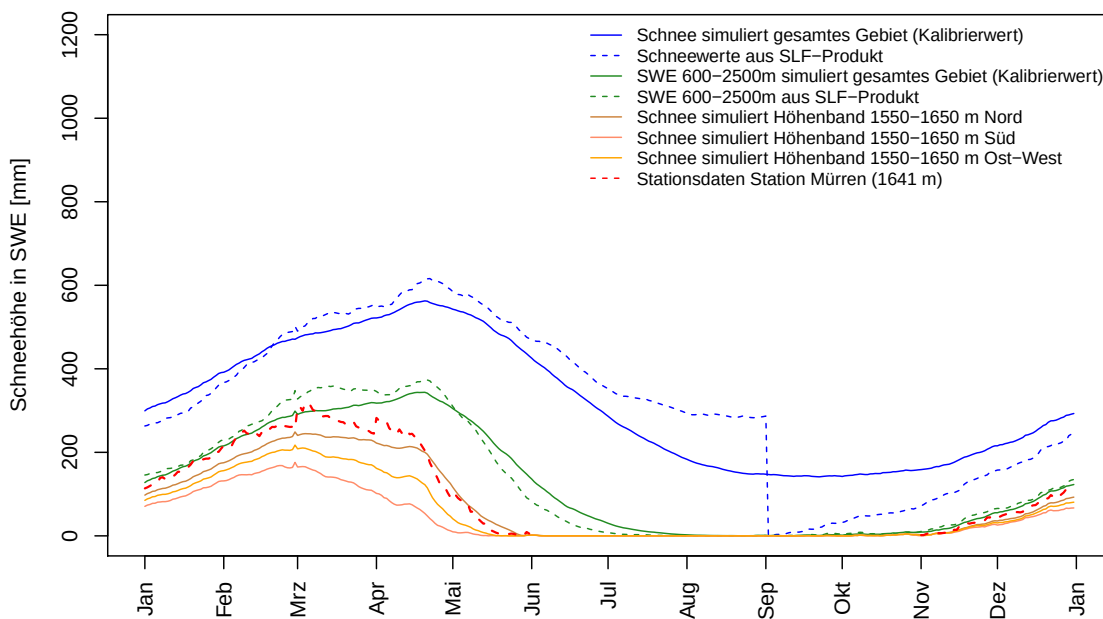


Abbildung 4.26: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Mürren im EZG Weisse Lüttschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneewerten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

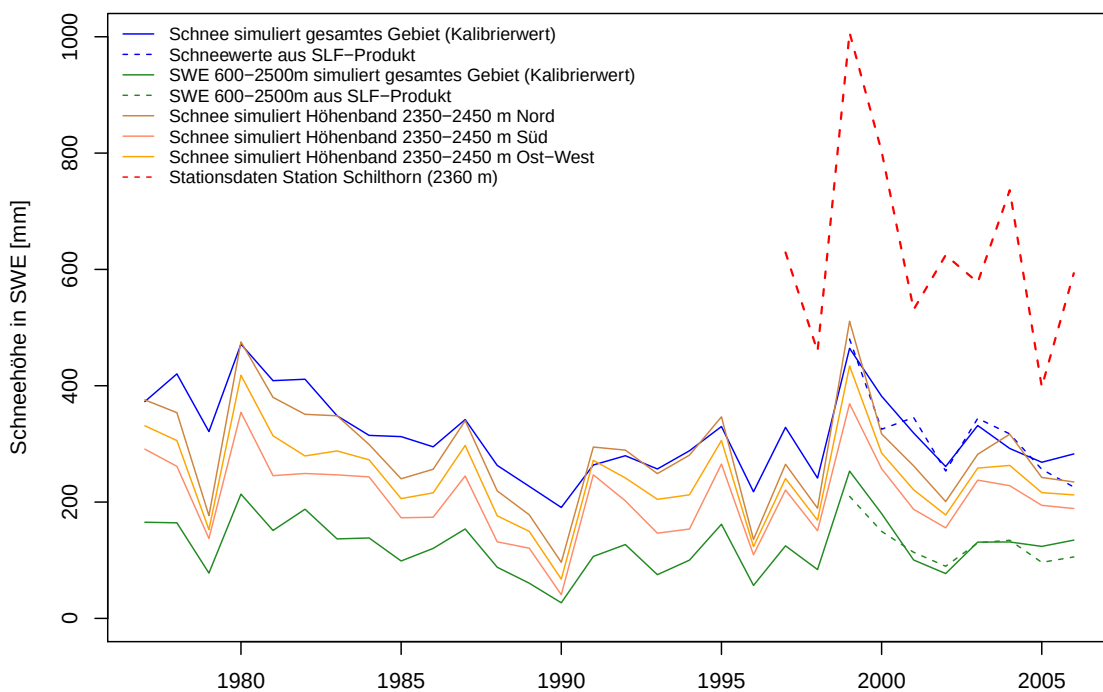


Abbildung 4.27: Vergleich der Jahresmittelwerte der Schneehöhen für die Station Schilthorn im EZG Weissen Lüttschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

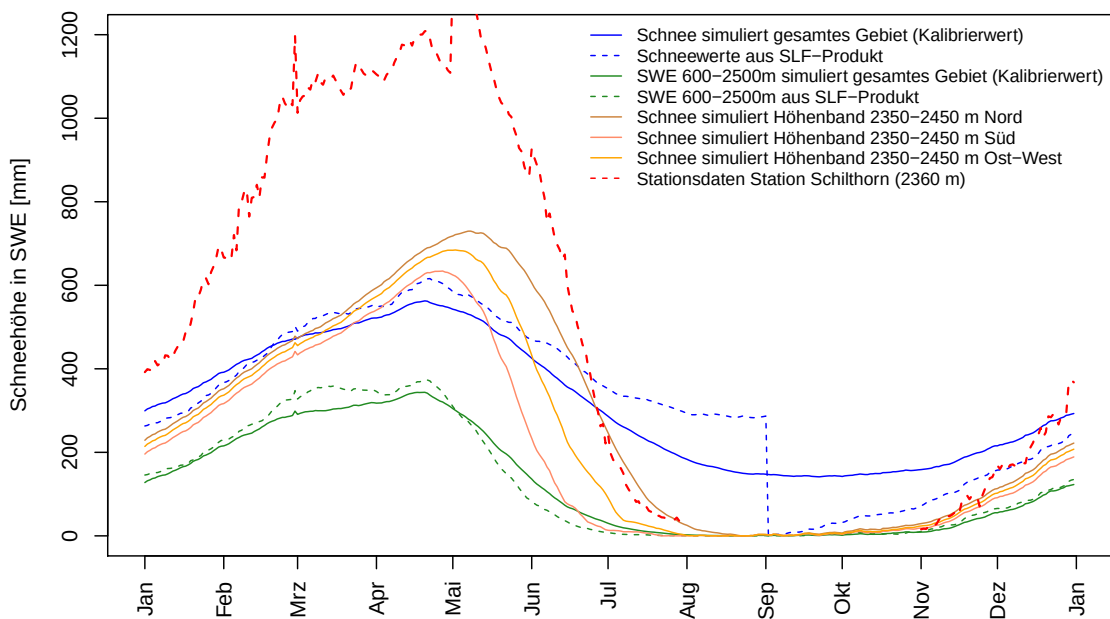


Abbildung 4.28: Tägliche Mittelwerte der Schneehöhen für die Station Schilthorn im EZG Weisse Lüttschine. Die simulierten Schneehöhen werden mit den Schneedaten des SLF-Produkts, sowie den Messwerten der Station verglichen.

4.2.3 Analyse Schneehöhen

Die Analyse der Schneehöhen erfolgt anhand des Einzugsgebietes der Schwarzen Lütschine. In folgendem Abschnitt wird untersucht, welche mittleren Schneehöhen, bezogen auf das Schneewasseräquivalent, im gesamten Einzugsgebiet durch die verschiedenen Schneeumverteilungsparameter entstehen. In den Darstellungen soll der Einfluss der aufgeführten Parameter auf das Ergebnis untersucht werden. Um zu vermeiden, dass deren Einfluss durch den dritten Parameter überdeckt werden, wird der Mittelwert der Schneehöhe entlang des dritten Parameters untersucht und nicht die Extremwerte wie das Maximum oder das Minimum. Selbiges wird für den EZG-Bereich unterhalb 2500 m durchgeführt und die Ergebnisse diskutiert.

4.2.3.1 Gemittelte Schneehöhen über den Schneeumverteilungsbereich

In Abbildung 4.29 werden die Parameterkombinationen aus Oberen Höhengrenzen (OH) und Restschneemenge (RM) gezeigt. Für jede dieser Kombinationen sind verschiedene Schneeumverteilungsbereiche (SUB) möglich. Da die dreidimensionale Darstellung allerdings unübersichtlich ist, wird über alle Schneehöhen des SUB gemittelt und diese farbcodiert dargestellt. Je höher die OH liegt, desto größer sind die mittleren Schneehöhen im gesamten EZG (s. Abbildung 4.29a). Der Einfluss der RM ist dabei sehr gering und spielt nur bei sehr kleinen oder sehr großen Werten eine Rolle. Zudem sind die Schneehöhen zunächst sehr konstant, bis man eine OH von etwa 2700 m erreicht, ab der erstmals eine erkennbare Änderung der mittleren Schneehöhe zu sehen ist. Die höchsten Schneehöhen, die durch diese SUV-Parameterkombinationen entstehen, liegen bei etwa 450 mm.

Für den Bereich unterhalb 2500 m, dargestellt in Abbildung 4.29b, entstehen die kleinsten Schneehöhen (100 mm), wenn sowohl die OH als auch die RM sehr klein sind. Das maximale SWE (140 mm) wird erreicht, wenn die OH auf 2500 m liegt und die RM einen Wert zwischen 50 mm bis 450 mm aufweist. Der Einfluss der RM ist bis zu einem Wert von etwa 750 mm erkennbar. Oberhalb dieses Wertes zeigt auch die Änderung der OH keinen Einfluss mehr.

Insgesamt fällt auf, dass die mittlere Schneehöhe für das gesamte EZG etwa dreimal höher ist als für den Bereich unterhalb 2500 m. Wenn man nur den ersten April betrachtet, sind die Schneemengen zwar etwa um 200 mm höher, das Muster in der Heatmap ist jedoch sehr ähnlich (s. Abbildung 4.30). Dies zeigt sich für alle der noch folgenden Auswertungen der Schneehöhen. Daher werden anschließend nur die Abbildungen der Jahresmittelwerte gezeigt.

Für das gesamte EZG zeigen die Simulationen des EZG Engelberger Aa ein ähnliches Verhalten (s. Abbildung A.17a). Betrachtet man allerdings den Bereich unterhalb 2500 m, fällt auf, dass bei kleinen OH mit steigender RM die Schneehöhen abnehmen und nicht zunehmen, wie beim EZG Schwarze Lütschine (Abbildung A.17b).

4.2.3.2 Gemittelte Schneehöhen über die Restschneemenge

Bei den Parameterkombinationen aus Schneeumverteilungsbereich und Oberer Höhengrenze wird über die Schneehöhen der Restschneemenge gemittelt (s. Abbildung 4.31). Der Einfluss der OH auf die Schneehöhe im gesamten EZG zeigt hier das gleiche Verhalten wie bei der Kombination OH und RM. Je höher die OH, desto größere SWE-Werte werden erreicht (s. Abbildung 4.31a). Insgesamt ist der Einfluss der OH ab einem Grenzwert von 2600 m auffälliger

als bei niedrigeren Höhengrenzen. Der Einfluss der SUB ist geringer, aber bei kleineren SUB erkennbar. Mit zunehmender Größe des SUB wird die mittlere Schneemenge geringer. Auffällig ist das maximale SWE von 470 mm bei einer OH von 3000 m und einem SUB von 400 m. Damit erzeugt diese Kombination den höchsten SWE-Wert aller Kombinationsmöglichkeiten. Wenn man nur den Bereich des EZG unter 2500 m betrachtet (s. Abbildung 4.31b), zeigt sich ein etwas anderes Muster. Hier werden die höchsten SWE-Werte von 130 mm bei einer OH von 2500 m und mittlerem SUB erreicht. Bei niedrigeren oder höheren Oberen Höhengrenzen nehmen die Schneehöhen ab. Die geringsten Schneemengen (etwa 105 mm) erhält man für eine sehr niedrige OH und einen kleinen SUB. Allerdings ist auch hier wieder der Einfluss des SUB geringer als der der OH.

Bei der Auswertung der Engelberger Aa zeigt sich für das Gebiet unterhalb 2500 m ein Maximum der Schneehöhen von 100 mm bei einer OH von 2500 m und einem SUB von 100 m. Bei einer OH von 2000 m nimmt mit größer werdendem SUB die Schneehöhe ab (s. Abbildung A.19b). Bei der Schwarzen Lütschine wird das gegenteilige Verhalten beobachtet.

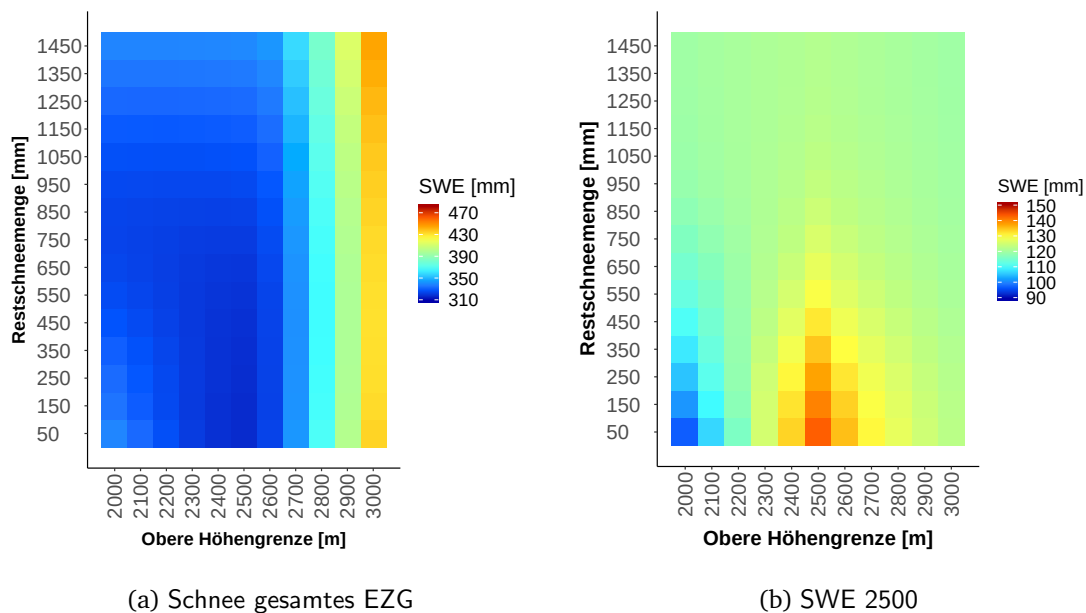


Abbildung 4.29: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über SUB wird gemittelt.

4.2.3.3 Gemittelte Schneehöhen über die Obere Höhengrenze

Die Parameterkombinationen aus Restschneemenge und Schneenumverteilungsbereich sind in Abbildung 4.32 aufgeführt. Über alle Schneehöhen der OH wird gemittelt.

Abbildung 4.32a zeigt, dass bei einem kleinen SUB und einer sehr geringen RM im Mittel

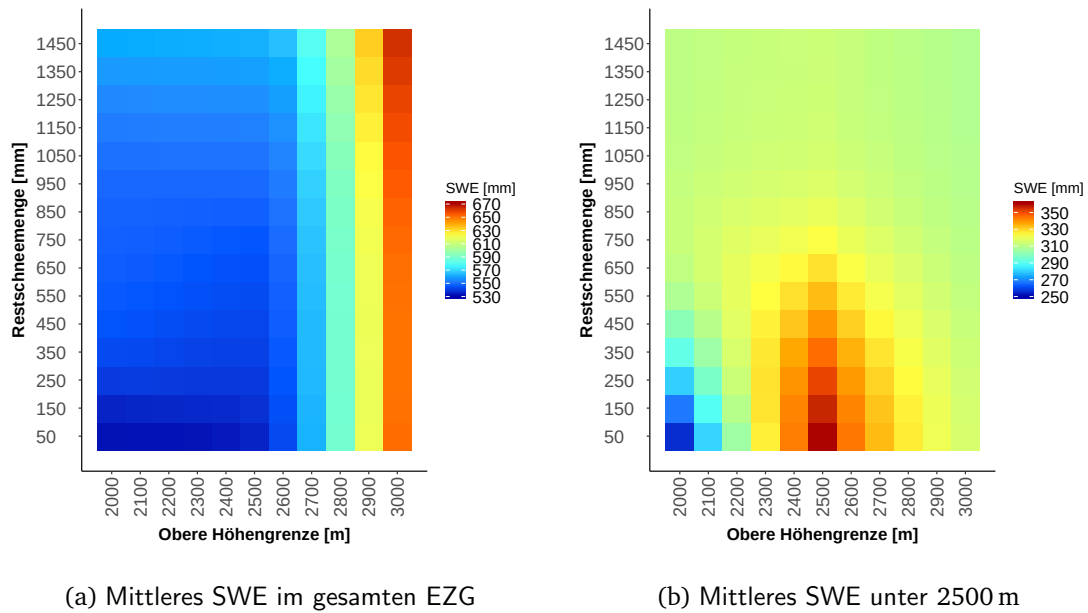


Abbildung 4.30: Mittlere Schneehöhen am 1. April in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH im EZG Schwarze Lutschine. Über die Schneehöhen des SUB wird gemittelt.

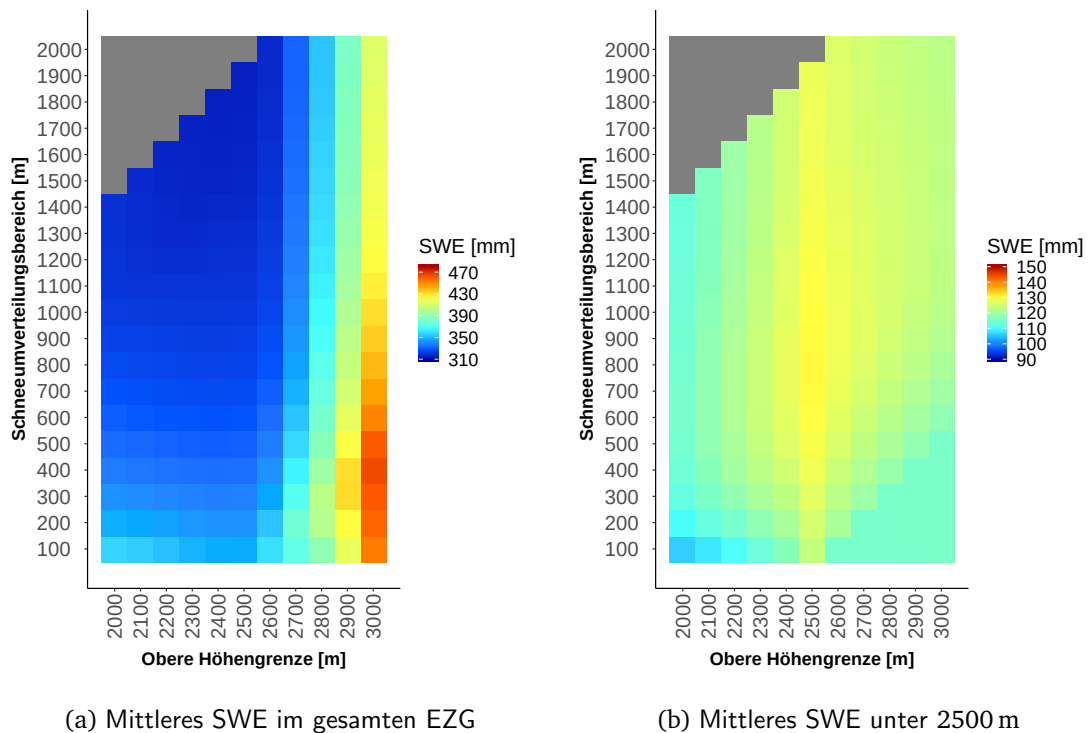


Abbildung 4.31: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und OH im EZG Schwarze Lutschine. Über die Schneehöhen der RM wird gemittelt.

die höchste Schneemenge (390 mm) im EZG erreicht wird. Mit steigendem SUB werden die Schneehöhen im EZG geringer. Bei großen SUB nimmt mit steigender RM die Schneehöhe etwas zu.

Für sehr große SUB und gleichzeitig kleine RM sind die Schneehöhen unterhalb 2500 m am größten (130 mm), was Abbildung 4.32b veranschaulicht. Dagegen werden für kleine SUB mit kleinen RM die geringsten Schneehöhen (105 mm) erreicht. Bei einer RM größer 850 mm und einem SUB größer 400 m hat eine Änderung der beiden Parameter keinen Einfluss mehr auf die Schneehöhe.

Das Verhalten der Schneehöhen unterhalb 2500 m ist für die Engelberger Aa anders. Hier werden die größten Schneemengen (230 mm) für einen SUB von 100 m und einer RM von 50 mm erzielt (s. Abbildung A.20a). Steigen die beiden Parameter, nehmen die Schneehöhen ab.

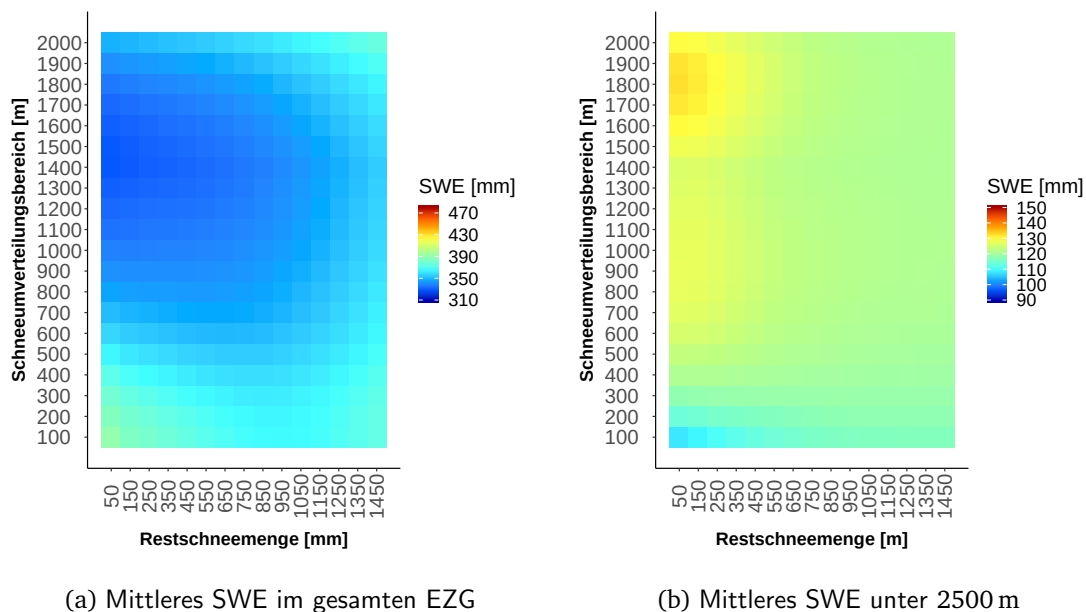


Abbildung 4.32: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und RM im EZG Schwarze Lütchine. Über die Schneehöhen der OH wird gemittelt.

4.2.4 Auswertung der flächenverteilten Daten

Zur Analyse der Schneegrenzen wird die mittlere Gebietshöhe, ab der am 1. April auf den unvergletscherten Flächen im EZG Schnee liegt, untersucht. Abbildung 4.33 veranschaulicht die Schneegrenzen für die simulierten SUV-Parameterkombinationen. Die Schneehöhen sind farblich dargestellt.

Im linken Plot (A) sind die Parameter SUB und RM gegeneinander aufgetragen. Je kleiner der Schneeumverteilungsbereich ist, desto höher liegt die Schneegrenze. Bei einem SUB von 1400 m und einer RM von 50 bis 150 mm liegt die Schneegrenze bei ungefähr 1350 m am niedrigsten. Der Einfluss der RM auf die Schneegrenze ist geringer als der des SUB. Bei mittleren bis hohen SUB steigt die Höhe, ab der Schnee liegt, wenn die RM größer wird. Ist der SUB kleiner als 400 m, zeigt die Änderung von RM keinen Effekt.

Die mittlere Abbildung (B) verdeutlicht, dass die Schneegrenze für große SUB und niedrige OH am tiefsten liegt. Bei steigender OH mit gleichzeitig steigender SUB ändert sich die Gebietshöhe, ab der Schnee liegt, kaum und befindet sich konstant beim Maximum von etwa 1450 m. Sobald die Kombination aus der OH und dem SUB den Schnee bis auf EZG-Höhen von unter 1800 m verteilt, ändert sich jedoch die Lage der Schneegrenze.

Der rechte Plot (C) zeigt, je tiefer die OH liegt und je kleiner die RM ist, desto tiefer liegt die Schneegrenze. Die Schneegrenze liegt am höchsten, wenn die OH auf 3000 m gesetzt wird. Ab diesem Wert der OH hat die RM dann keinen Einfluss mehr.

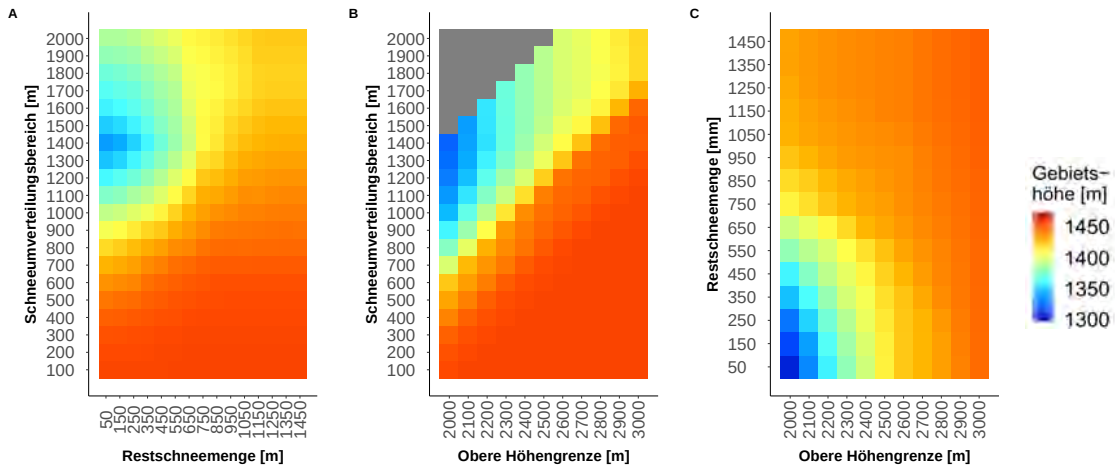


Abbildung 4.33: Mittlere Gebietshöhe, ab der auf den unvergletscherten Flächen im EZG Schwarze Lutschine am 1. April Schnee liegt. Links: Über OH gemittelt, Mitte: Über RM gemittelt, Rechts: Über SUB gemittelt

4.3 Sensitivitätsanalyse

Die Bewertung der Sensitivität der Schneeeumverteilungsparameter wird anhand vier verschiedener Gütemaße durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein Abflussgütemaß (Lindström Maß), ein Schneegütemaß (SWE MANE), das Gütemaß der Schneebedeckung (Snow-Cover RMSE) und das gewichtete Gütemaß (WOF). Manche Parameterkombinationen aus Schneeeumverteilungsbereich und Oberer Höhengrenze sind nicht möglich, da sie zu Umverteilung außerhalb des Gebiets führen würden. Diese Kombinationen sind in den Heatmaps als graue Flächen abgebildet.

4.3.1 Graphische Auswertung der Gütemaße

4.3.1.1 Lindström Maß

Das Abflussgütemaß Lindström Maß (LM) quantifiziert, wie gut die simulierten Abflusswerte zu den gemessenen Abflussdaten passen. In diesem Abschnitt wird das Abflussgütemaß der verschiedenen Kombinationen der Schneeeumverteilungsparameter untersucht.

In Abbildung 4.34 ist das Lindström Maß für die Parameterkombinationen aus Oberer Höhengrenze und Restschneemenge dargestellt. In Abbildung 4.34a ist der dritte SUV-Parameter (SUB) auf den Kalibrierwert von 1500 m festgesetzt. Da das EZG erst oberhalb 600 m beginnt, kann die OH keine geringeren Werte als 2100 m annehmen. Für niedrige OH und geringe RM ist das Lindström Maß mit 0.84 am schlechtesten (s. Abbildung 4.34a). Steigert man die Werte beider Parameter, wird der Wert des Gütemaßes besser. Variiert man zusätzlich den dritten SUV-Parameter (SUB) und wählt für jede Kombination von OH und RM nur das maximale Gütemaß, so zeigt sich in Abbildung 4.34b, dass die Werte des LM für große SUB und hohe OH geringfügig besser werden. Dies bedeutet, dass der SUB die Effekte der beiden anderen Parameter nur leicht kompensieren kann. Das Gütemaß ändert sich durch Variation der OH im jeweiligen Wertebereich um etwa 0.04, durch die Variation der RM um etwa 0.05.

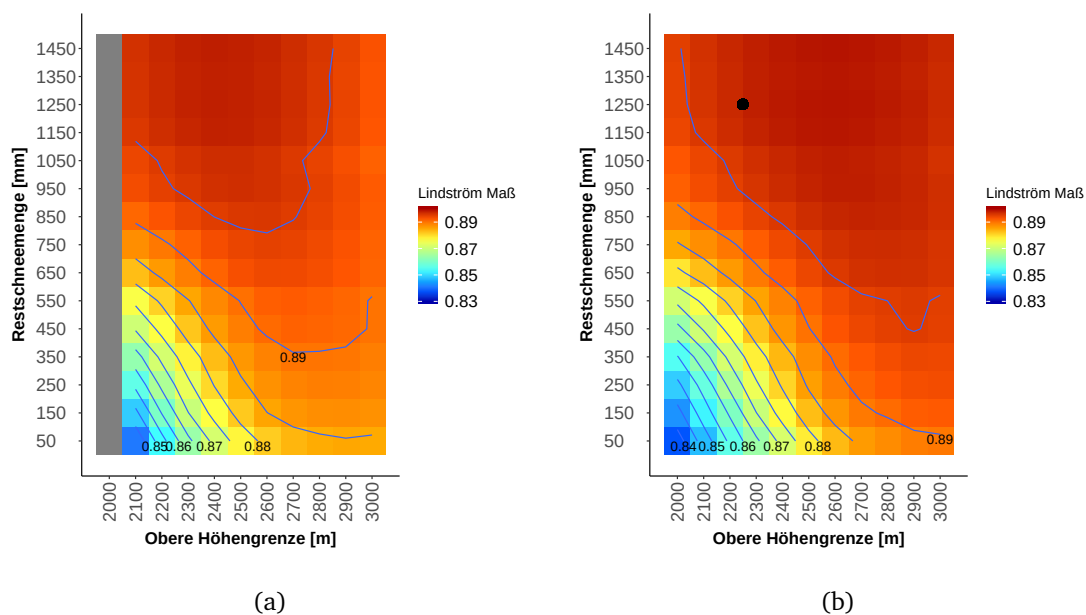


Abbildung 4.34: Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lüttschne. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1500 m fixiert. Da das EZG Schwarze Lüttschne nur bis auf 600 m reicht, sind Kombinationen mit einer OH von 2000 m nicht möglich. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

Die SUV-Parameterkombinationen von SUB und OH sind in Abbildung 4.35 dargestellt. Die Restschneemenge ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. In Abbildung 4.35a zeigt sich, dass mit größer werdendem SUB die Modellgüte steigt. Dies ist für jede OH der Fall. Zudem sinkt das Gütemaß für höhere OH. Dies ist besonders für den SUB im Bereich von 300 bis 1200 m zu sehen. Darunter und darüber ist selbiges zu beobachten, jedoch weniger stark ausgeprägt. Für geringe SUB ist das Lindström Maß bei niedrigeren OH besser. Die RM als dritter SUV-Parameter kann die Einflüsse der OH und des SUB nicht kompensieren. Dies bedeutet, die Werte des LM werden nicht besser, wenn die RM frei gewählt werden kann (s.

Abbildung 4.35b). Die Gütemaße variieren für die Änderung beider Parameter zwischen 0.865 und 0.9.

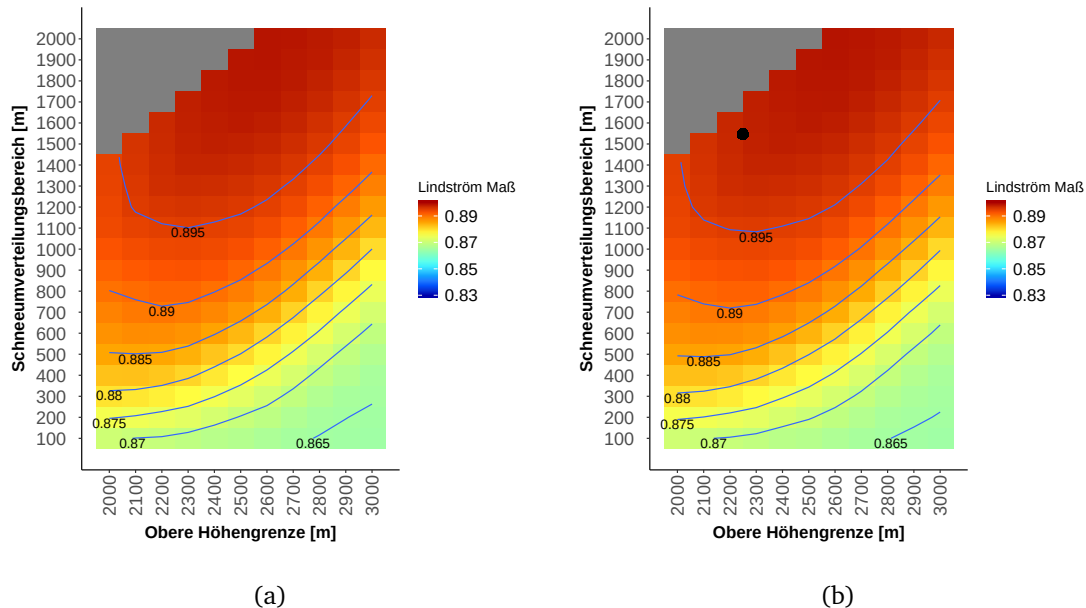


Abbildung 4.35: Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

Die dritte Kombinationsmöglichkeit ist in Abbildung 4.36 dargestellt. Für eine festgelegte OH auf 2200 m werden die höchsten Gütemaßwerte für hohe SUB und hohe RM erreicht, die geringsten für kleine SUB und RM (s. Abbildung 4.36a). Die Gütemaße variieren zwischen 0.82 und 0.9 für beide Parameter. Wird zusätzlich die OH variiert, dargestellt in Abbildung 4.36b, werden die Gütemaße deutlich besser (0.86 bis 0.9), was bedeutet, dass OH die Effekte der Parameter SUB und RM kompensieren kann. Dies zeigt sich im ganzen Bereich des SUB jedoch nur für niedrige Werte der RM von unter 750 mm.

Die Abflussgütemaße sind für die Modellierung der Engelberger Aa etwas niedriger (0.75 bis 0.87). Auch hier werden die höchsten Gütemaße für hohe SUB und große RM erzielt. Ist die OH fixiert (hier auf 2200 m), werden bei geringen RM die besten Gütemaße erreicht, wenn der SUB etwa 400 m breit ist. Bei größeren oder kleineren SUB nimmt das Gütemaß ab. OH kann so stark kompensieren, dass anschließend die Gütemaßänderung durch die verschiedenen Kombinationen nur noch 0.02 beträgt (s. Abbildung A.24).

4.3.1.2 SWE MANE

Abbildung 4.37 zeigt die Schneegütemaße SWE MANE für die Parameterkombinationen OH und RM. Ist SUB auf den Kalibrierwert fixiert, werden bei einer OH von 2500 m und geringen RM die niedrigsten SWE MANE erreicht (s. Abbildung 4.37a). Je höher die RM, desto

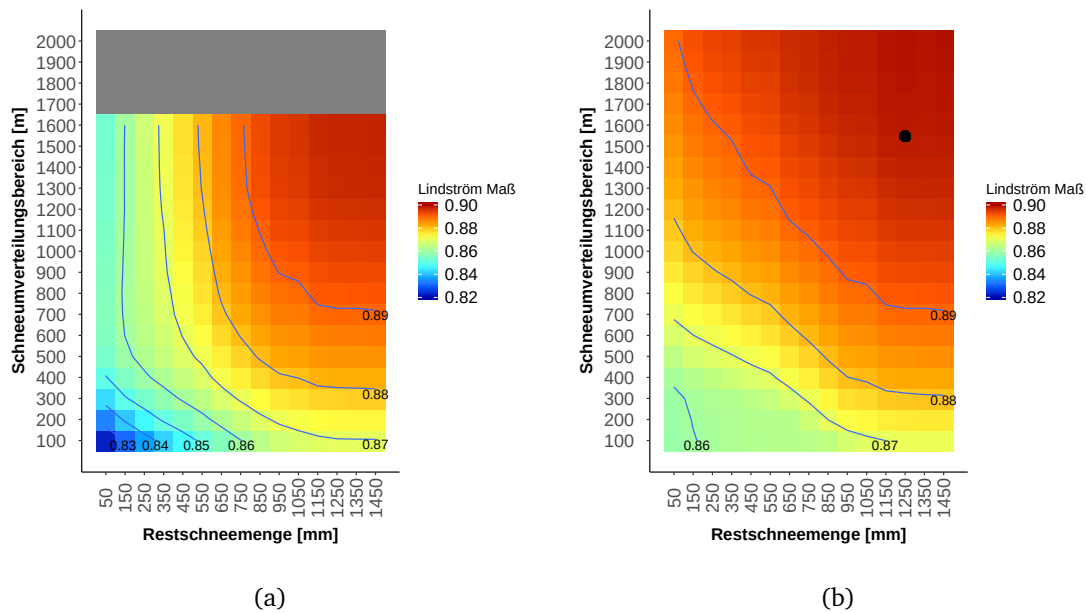


Abbildung 4.36: Ergebnisse der Abflussgütemaße (Lindström Maß) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen SUB und RM.. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

besser werden die Gütemaße. Das SWE MANE wird auch größer, wenn man OH erhöht oder senkt. Es werden Gütemaße zwischen 0.63 und 0.75 erreicht. Variiert man nun zusätzlich den Schneeeumverteilungsbereich, ändert sich das Muster (s. Abbildung 4.37b). Die Gütemaße sind deutlich höher, was auf eine hohe Kompensierbarkeit durch SUB hindeutet. Die niedrigsten Werte werden allerdings immer noch bei der gleichen Parameterkombination erreicht. Für OH größer 2500 m ist kein Trend mehr erkennbar. Die besten Gütemaße werden für eine OH von 2000 m bis 2100 m und eine RM von 750 m bis 850 m erzielt. Die Gütemaßvariation verringert sich, aber das SWE MANE ist insgesamt deutlich höher (etwa 0.73 bis 0.78).

Vergleicht man die beschriebenen Abbildungen mit denen des EZG Engelberger Aa, ist ein deutlicher Unterschied feststellbar. Ist der SUB auf den Kalibrierwert (1600 m) festgelegt, liegt das Minimum des SWE MANE bei der Kombination OH 2000 m und RM 50 mm. Bei steigenden Parameterwerten nimmt das Gütemaß zu (s. Abbildung A.25a). Wird SUB ebenfalls variiert, kann er die Einflüsse der RM und OH auf die Schneeverteilung kompensieren. Das Minimum des Gütemaßes liegt allerdings weiterhin bei geringen OH und das Maximum bei einer OH von 2500 m und mittleren RM (450 bis 650 mm) (s. Abbildung A.25b).

In Abbildung 4.38 ist das SWE MANE für die Kombinationen der SUV-Parameter OH und SUB dargestellt. Für eine RM von 1250 mm werden die besten Gütemaße für kleine SUB und niedrige und hohe OH erzielt (SWE MANE von 0.765). Auffällig ist wieder das Minimum des Gütemaßes (0.74) für eine obere Höhengrenze von 2500 m. Die Gütemaßänderung ist mit circa 0.4 relativ gering (s. Abbildung 4.38a). Die RM kann für niedrige OH und kleine SUB die schlechten Gütemaßwerte kompensieren, was eine Verbesserung des Gütemaßes auf 0.78 zur Folge hat.

Die Heatmaps der Engelberger Aa unterscheiden sich deutlich. Wenn die RM kompensiert,

werden die höchsten Gütemaße für die OH von 2500 m und mittelgroße Schneenumverteilungsbereiche erzeugt (s. Abbildung A.26). Für diese Kombinationen liegt für die Schwarze Lutschine ein Minimum des SWE MANE.

In Abbildung 4.39 wird das Schneegütemaß für die Parameterkombinationen von RM und SUB untersucht. Bleibt die OH auf 2200 m, erzeugen kleine SUB die höchsten Gütemaßwerte (0.77) bei kleinen bis mittleren RM (s. Abbildung 4.39a). Mit größer werdenden SUB nehmen die Gütemaße ab und der Einfluss der RM steigt. Für den Wertebereich des SUB variieren die Gütemaße zwischen 0.70 und 0.77. Ist der SUB größer als 500 m, sieht man keinen klaren Trend zu besseren SWE MANE-Werten, wenn die RM erhöht wird. Das Gegenteil, allerdings in geringerem Ausmaß, ist der Fall, wenn man SUB kleiner 500 m betrachtet. Hier werden mit Ausnahme von einer RM von 50 mm mit zunehmender RM die Gütemaße etwas schlechter. Für die RM liegt die größtmögliche Gütemaßänderung bei 0.5. Wird die OH ebenfalls variiert, nehmen die Gütemaße für größere SUB zu, wie in Abbildung 4.39b zu sehen ist.

Bei der Weissen Lutschine ist das Verhalten bei fixierter OH ähnlich wie bei der Schwarzen Lutschine. Allerdings ist deutlicher der Trend zu erkennen, dass mit größerer RM das SWE MANE besser wird. Bei einem SUB von 100 m ist dieser Trend allerdings nicht erkennbar, da über alle RM der beste Gütemaßwert erzielt wird (0.82) (s. Abbildung A.63a). Wenn OH kompensiert, zeigen Schwarze und Weisse Lutschine dagegen wieder ein sehr ähnliches Verhalten (s. Abbildung A.63b).

Für die Engelberger Aa werden die besten Gütemaße mit hohen Restschneemengen erreicht (s. Abbildung A.27a). Kompensiert OH, sind die besten SWE-MANE (0.85) bei mittleren SUB (600-800 m) und mittleren RM (550 m) festzustellen (s. Abbildung A.27b).

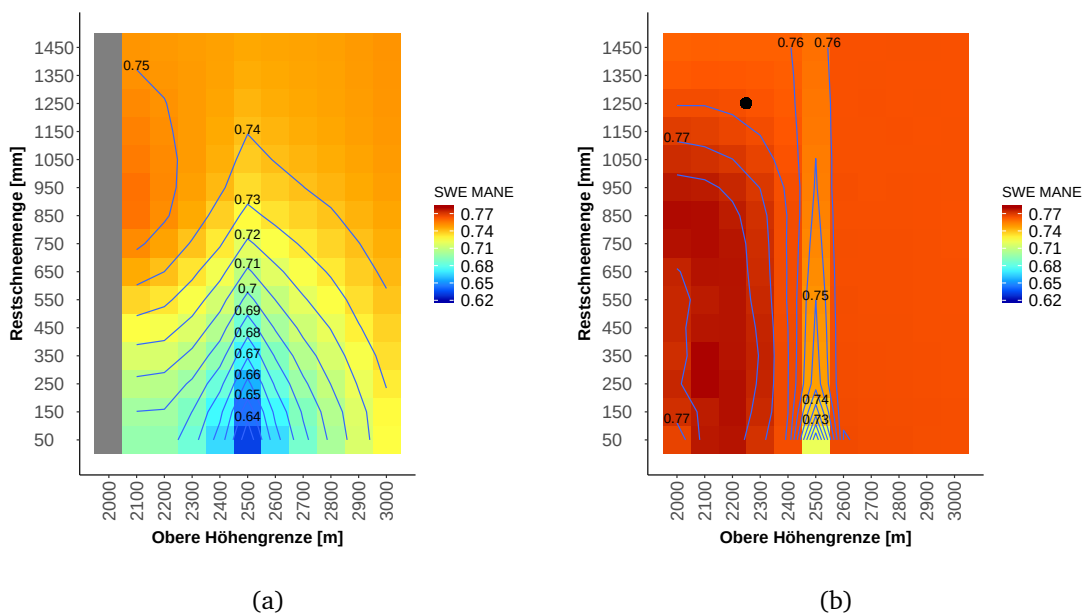


Abbildung 4.37: Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lutschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1500 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

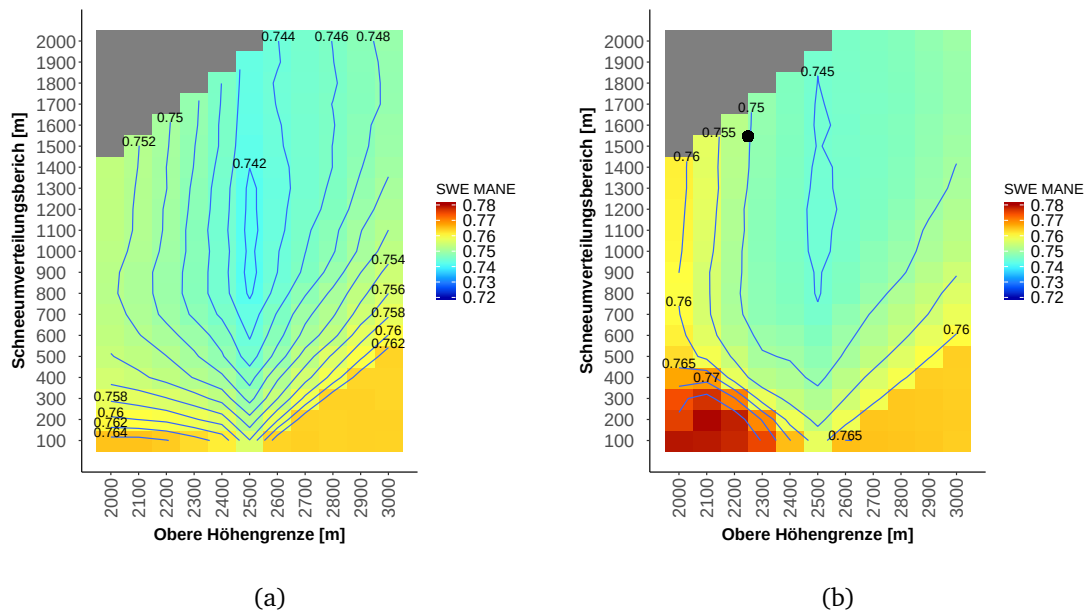


Abbildung 4.38: Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lutschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

4.3.1.3 SnowCover RMSE

Abbildung 4.40 zeigt die Schneebedeckungsgütemaße der SUV-Parameterkombinationen OH und RM. Ist der Schneenumverteilungsbereich auf dem Kalibrierwert von 1500 m festgesetzt, werden die besten SnowCover RMSE mit 0.905 für sehr kleine RM und mittlere OH erreicht (s. Abbildung 4.40a). Je größer die RM werden, desto schlechter wird das Gütemaß. Die Variation des Gütemaßes ist sehr gering (0.900-0.905). Abbildung 4.40b zeigt, dass SUB in diesem Fall wenig kompensieren kann.

Abbildung 4.41 zeigt für die Kombinationen aus Oberer Höhengrenze und Schneenumverteilungsbereich den SnowCover RMSE. Wenn die RM festgesetzt ist, zeigen sich nur sehr schwache Trends (s. Abbildung 4.41a). Die Restschneemenge kann allerdings kompensieren, was zu einem Gütemaßmaximum bei OH 2400 m und SUB 1200 m führt (s. Abbildung 4.41b). Wenn durch die Kombination aus OH und SUB der Schnee nur oberhalb von 1900 m umverteilt wird, ändert sich das Schneebedeckungsgütemaß nicht.

In Abbildung 4.42 sind die Kombinationen von RM und SUB aufgetragen. Bei festgesetzter OH auf 2200 m werden die höchsten Gütemaße (0.905) für geringe RM und mittlere bis große SUB erzielt (s. Abbildung 4.42a). Für eine RM von 50 mm und einen SUB von 100 m werden die geringsten Gütemaße von 0.890 erreicht. Wird zusätzlich die Obere Höhengrenze variiert, können die schlechten Gütemaße kompensiert werden und die Gütemaße für sehr kleine RM und Schneenumverteilungsbereiche größer 800 m werden besser (s. Abbildung 4.42b).

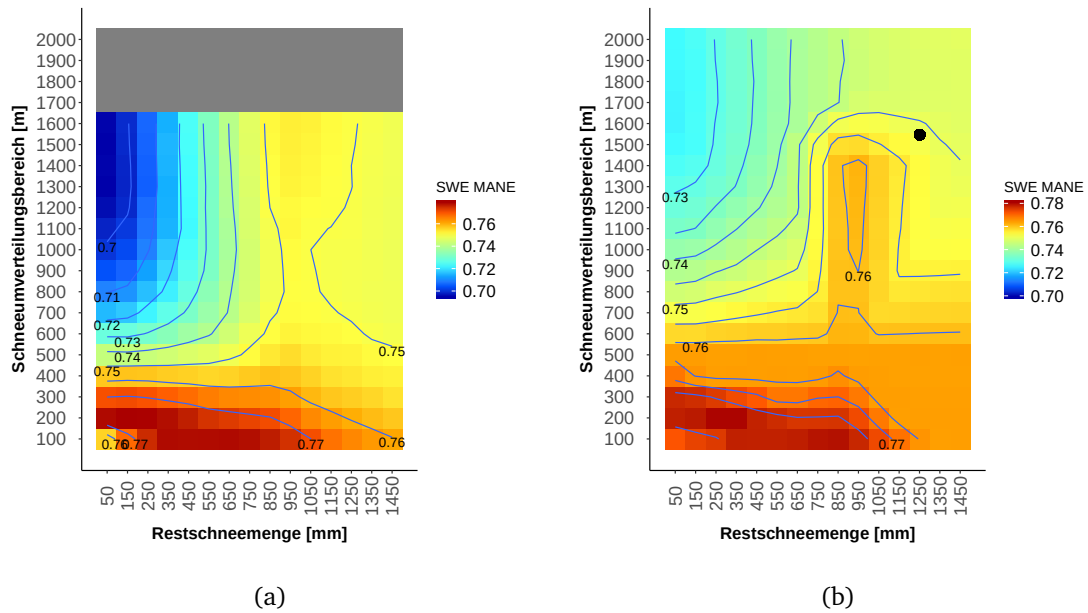


Abbildung 4.39: Ergebnisse der Schneegütemaße (SWE MANE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

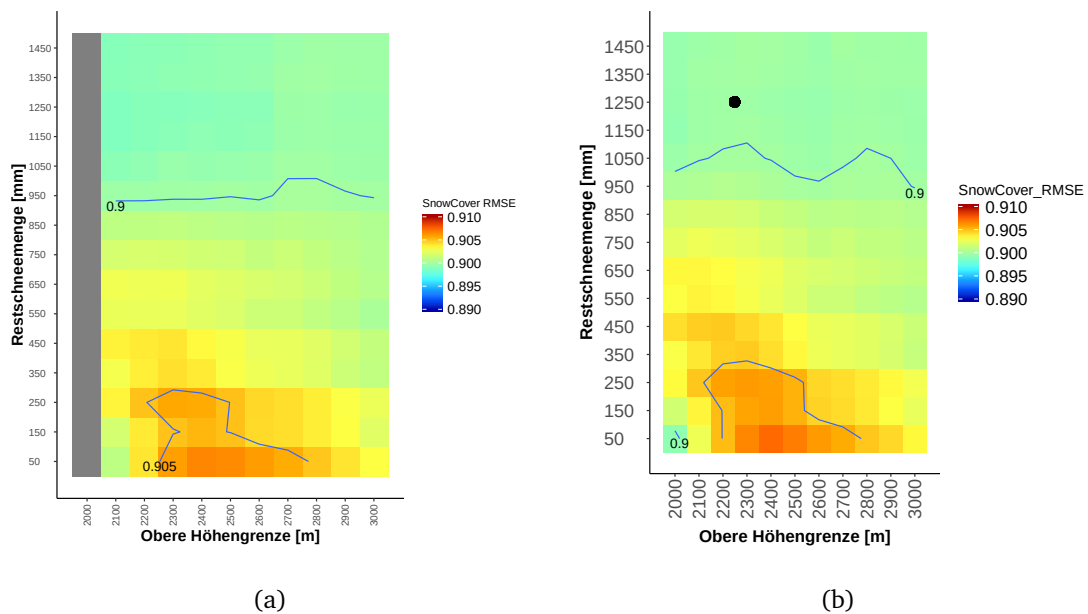


Abbildung 4.40: Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM. (a) Die SUB ist auf den Kalibrierwert von 1500 m fixiert. (b) Die SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

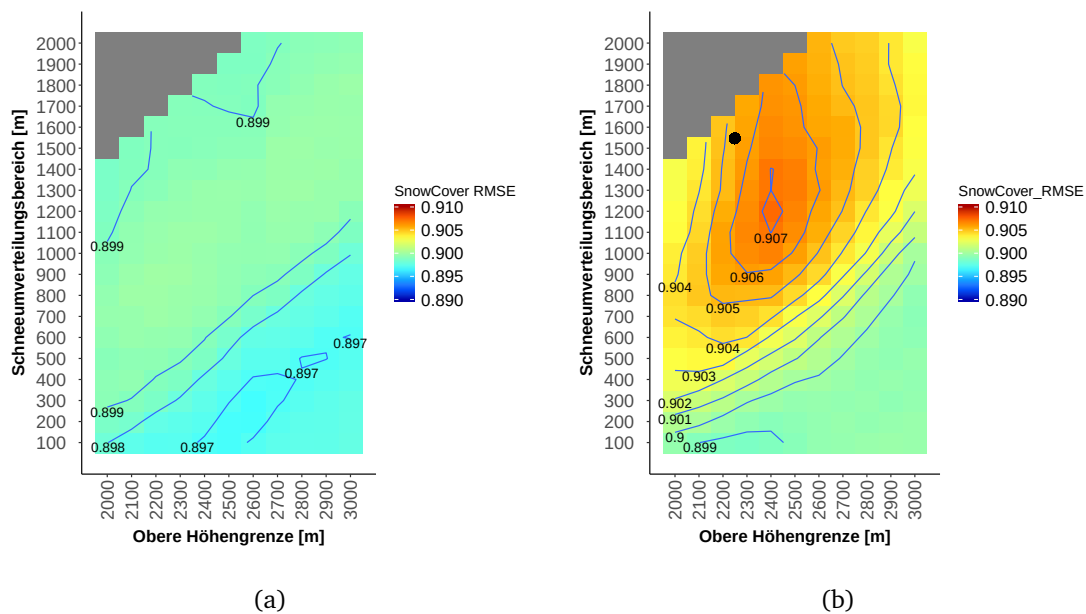


Abbildung 4.41: Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lutschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

4.3.1.4 Gewichtetes Gütemaß

In den folgenden Abbildungen sind die gewichteten Gütemaße für die verschiedenen SUV-Parameterkombinationen dargestellt. In Abbildung 4.43 sind die Parameter OH und RM gegeneinander aufgeführt. Bleibt der SUB auf 1500 m fest, erzeugen kleine RM und eine niedrige OH schlechte Gütemaße von 0.45 (s. Abbildung 4.43a). Für die maximalen Parameterwerte werden die besten Gütemaße erreicht. Dieses Muster ähnelt dem des Lindström Maßes. SUB kann nicht kompensieren, wenn dieser Parameter ebenfalls variiert wird (s. Abbildung 4.43b). Die Änderung des Gütemaßes durch die Variation der Parameter ist sehr groß (0.35 - 0.9).

Die WOF der Parameterkombinationen SUB und OH sind in Abbildung 4.44 dargestellt. Bei gleichbleibender Restschneemenge von 1250 mm werden die Gütemaße besser, je größer der SUB ist (s. Abbildung 4.44a). Der Einfluss der OH ist etwas geringer. Die Gütemaße sind besser als die der vorherigen Kombinationen. Sie variieren zwischen 0.65 und 0.87. RM kann nur sehr leicht kompensieren (s. Abbildung 4.44b). Die Heatmaps der WOF sehen denen des Lindström Maßes ähnlich, das Muster von SWE MANE dagegen unterscheidet sich deutlich.

Die Engelberger Aa zeigt für diese Parameterkombination ein etwas anderes Verhalten. Es werden für sehr hohe OH (größer 2700 m) immer bessere Gütemaße erreicht, fast unabhängig von der Größe des SUB (s. Abbildung A.32).

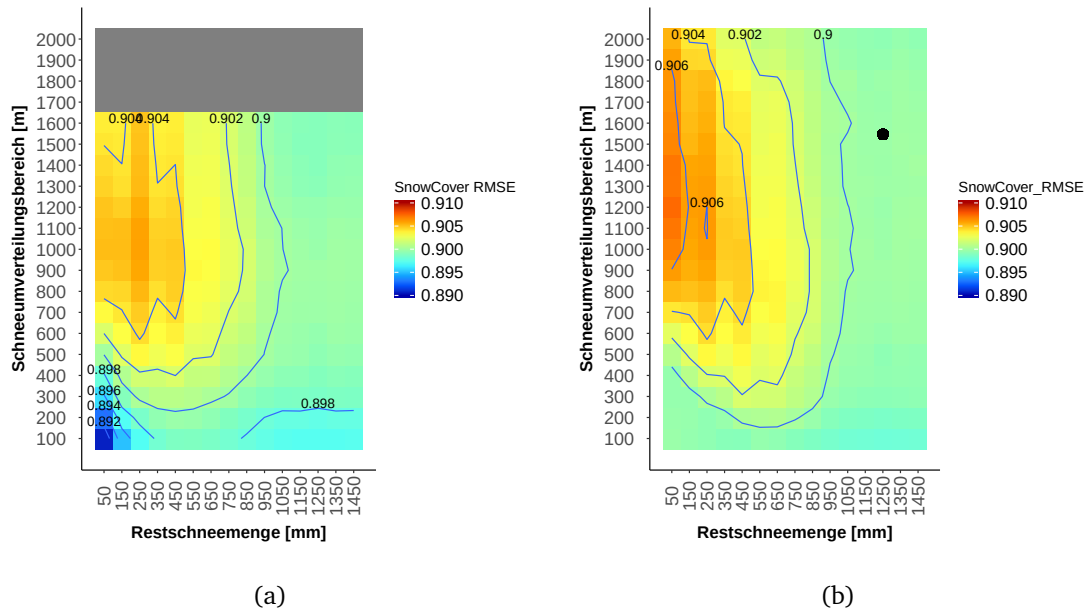


Abbildung 4.42: Ergebnisse der Schneebedeckungsgütemaße (SnowCover RMSE) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

In Abbildung 4.45 ist das gewichtete Gütemaß für die Kombinationen von RM und SUB dargestellt. Für Abbildung 4.45a ist die Obere Höhengrenze auf 2200 m festgelegt. Je größer der SUB und die RM, desto besser wird WOF. Allerdings werden für geringe RM und SUB die schlechtesten Gütemaße bisher erreicht (s. Abbildung 4.45a). Dies bedeutet, dass die Gütemaßvariation sehr groß ist (0.0 bis 0.8). Wird zusätzlich die OH variiert, werden die Gütemaße deutlich besser (0.6 bis 0.8), aber das Muster bleibt ähnlich (s. Abbildung 4.45b).

Bei der Engelberger Aa kann OH sogar noch besser kompensieren, sodass kaum mehr ein Trend erkennbar ist (s. Abbildung A.33).

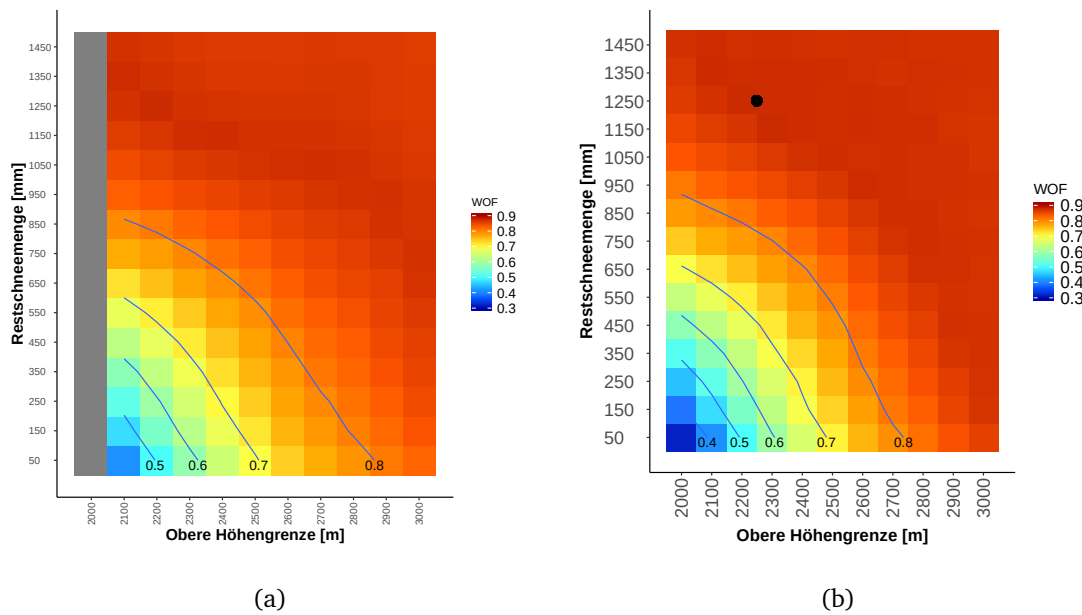


Abbildung 4.43: Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lutschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1500 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

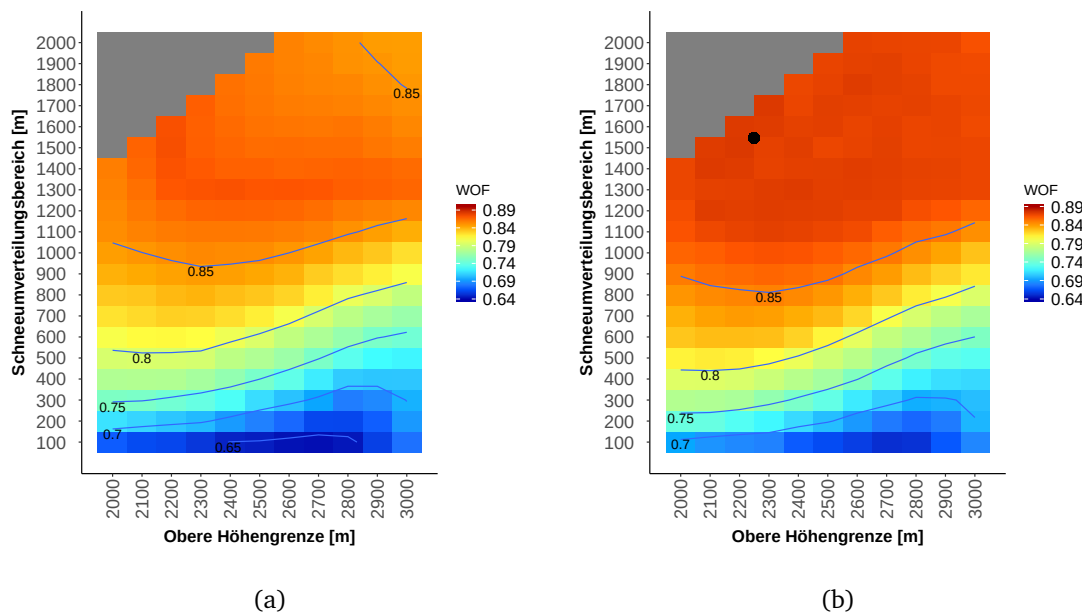


Abbildung 4.44: Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lutschine. Dargestellt Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

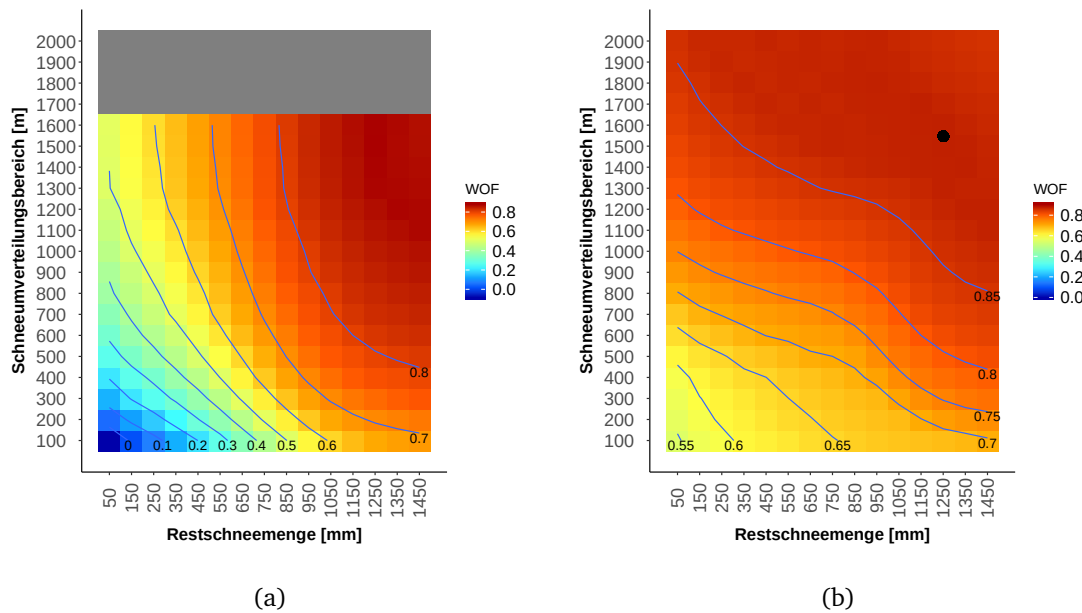


Abbildung 4.45: Ergebnisse der gewichteten Gütemaße (WOF) für die Schwarzen Lütschine. Dargestellt Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte.

4.3.2 Monte-Carlo-Methode und Regionalisierte Sensitivitätsanalyse

4.3.2.1 Schwarze Lütschine

Bei Streudiagrammen stellen die oberen Punkte die besten Modellrealisationen dar. Abbildung 4.46 zeigt die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für die Schneeeumverteilungsparameter bezogen auf das Lindström Maß. Die Streudiagramme auf der linken Seite zeigen keine eindeutigen Muster oder klar definierte Maxima. Die Punkte sind relativ gleichmäßig über den gesamten Parameterraum verteilt. Für die RSA werden die besten 10 % der Simulationen (2000) gegen die restlichen schlechteren Simulationen geplottet. Der Gütemaßschwellenwert für das Lindström Maß liegt damit bei 0.79 für die Modellierung des EZG Schwarze Lütschine. Der Vergleich der kumulierten Verteilungen auf der rechten Seite zeigt für den Parameter Restschneemenge den größten Unterschied zwischen den Kurven der guten und schlechten Simulationen. Für die Obere Höhengrenze ist der Unterschied etwas geringer und für den Schneeeumverteilungsbereich unterscheiden sich die beiden Kurven kaum. Dies zeigt auch der D-Wert aus dem KS-Test, welcher in den Abbildungen links unten aufgeführt ist. Dieser ist für die RM mit 0.093 am größten und würde damit als schwach sensitiv eingeordnet werden. Für die OH liegt der D-Wert bei 0.056, damit ist die OH etwas weniger sensitiv und für den SUB bei 0.022, was für einen unsensitiven Parameter spricht.

Wird das Schneegütemaß SWE MANE für die RSA herangezogen, sind für alle SUV-Parameter die Unterschiede zwischen guten und schlechten Simulationen gering, was sich auch in den D-Werten widerspiegelt. Der Schwellenwerte für die Unterscheidung von guten und schlechten Parametersets liegt für das EZG Schwarze Lütschine bei einem SWE MANE von 0.751. Die D-Werte aller drei Parameter liegen unter 0.03. Bezogen auf SWE MANE wären damit alle drei

Parameter nicht sensitiv. Auch in den Streudiagrammen sind keine Formen oder klar definierte Maxima erkennbar (s. Abbildung A.73).

Für das Gütemaß SnowCover RMSE zeigt lediglich der Parameter RM eine leichte Sensitivität mit einem D-Wert von 0.064 (s. Abbildung A.74). Die D-Werte der beiden anderen Parameter liegen unter 0.03.

4.3.2.2 Weisse Lutschine

Beim EZG Weisse Lutschine liegt der Schwellenwert, welcher gute und schlechte Simulationen trennt, mit einem Wert von 0.08 etwas höher als bei der Schwarzen Lutschine (0.079) (s. Abbildung A.70). Die Ergebnisse für das Lindström Maß sehen allerdings sehr ähnlich aus. Die Punktwolken zeigen kein klar definiertes Maximum und die D-Werte sind für die RM am höchsten mit einem Wert von 0.076. Dieser Wert ist etwas geringer als bei der Schwarzen Lutschine. Der D-Wert für die OH ist dagegen für beide EZG mit 0.056 bei der Schwarzen und 0.057 bei der Weissen Lutschine sehr ähnlich. Der D-Wert für den SUB fällt mit 0.036 etwas größer aus als bei der Schwarzen Lutschine.

Die Ergebnisse für SWE MANE zeigen, wie bei der Schwarzen Lutschine, kleine D-Werte (0.025-0.031) und keine ausgeprägten Formen in den Streudiagrammen (s. Abbildung A.71). Für den SnowCover RMSE liegt der Schwellenwert für die Weisse Lutschine wieder etwas höher als für die Schwarze Lutschine. Anhand der zugehörigen Punktediagramme wird die Sensitivität der Parameter als gering eingeschätzt. Nach der RSA sind die RM (0.053) und die OH (0.046) bezüglich des SnowCover RMSE schwach sensitiv (s. Abbildung A.72).

4.3.2.3 Engelberger Aa

Die Ergebnisse der RSA für die Engelberger Aa, in Bezug auf das Lindström Maß, zeigen ein ähnliches Verhalten wie bei den anderen beiden EZG (s. Abbildung A.34). Hier sind die Unterschiede der Verteilungen bei der RM und der OH größer als beim SUB. Allerdings ist diesmal der D-Wert des KS-Tests für die OH größer. Dieser liegt bei 0.082 und zeigt damit ein schwach sensitives Verhalten an. Für die RM liegt der D-Wert bei 0.049 und für den SUB wie bei der Schwarzen Lutschine bei 0.022.

Vergleicht man die Ergebnisse für SWE MANE, wird wieder deutlich, dass die D-Werte geringer sind als für das Lindström Maß (s. Abbildung A.35). Für die Engelberger Aa haben allerdings die Parameter RM und SUB etwas höhere Werte (0.032 bzw. 0.036) als OH.

Bezogen auf den SnowCover RMSE sind nach der Auswertung der RSA für die Engelberger Aa alle drei Schneenumverteilungsparameter mit einem D-Wert kleiner 0.03 nicht sensitiv (s. Abbildung A.36). Die Ergebnisse der KS-Tests der Schneenumverteilungsparameter für alle Einzugsgebiete ist in Tabelle 4.3 zusammengestellt.

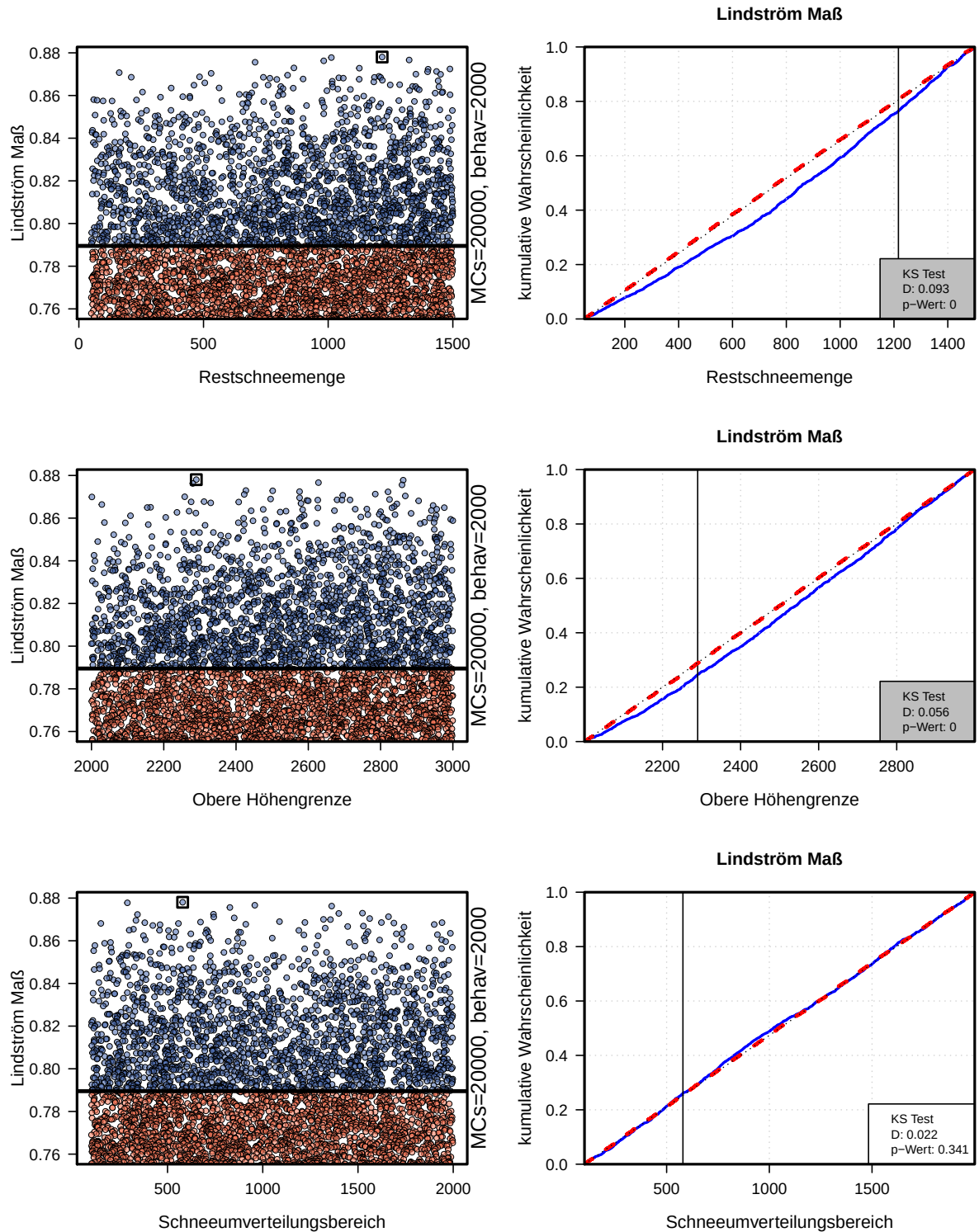


Abbildung 4.46: Streudiagramme und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lutschine. Betrachtetes Gütemaß: Lindström Maß

Tabelle 4.3: Ergebnisse der RSA für die EZG Schwarze Lutschine, Weisse Lutschine und Engelberger Aa. Aufgeführt sind die D-Werte aus den KS-Test für die Schneenumverteilungsparameter RM, OH und SUB bezüglich der Gütemaße Lindström Maß, SWE MANE und SnowCover RMSE.

	Parameter	Lindström Maß	SWE MANE	SnowCover RMSE
<i>Schwarze Lutschine</i>	RM	0.093	0.023	0.064
	OH	0.056	0.029	0.025
	SUB	0.022	0.029	0.023
<i>Weisse Lutschine</i>	RM	0.076	0.031	0.053
	OH	0.57	0.031	0.046
	SUB	0.036	0.025	0.02
<i>Engelberger Aa</i>	RM	0.049	0.032	0.024
	OH	0.082	0.026	0.02
	SUB	0.022	0.036	0.015

5

Kapitel 5

Diskussion

5.1 Kalibrierung

Die Qualität der Kalibrierung des Modells hängt von der Wahl der Einstellungen bei der GAP-Optimierung ab. Die Wahl der Modell- und Powellläufe sowie die zugelassenen Parameterbereiche können beeinflussen, ob und wie schnell die Optima gefunden werden.

Es ist zu beachten, dass der optimale Parametersatz anhand des gewichteten Gütemaßes ausgewählt wird. Das bedeutet, dass andere Parameterkombinationen zum Beispiel für das Schneegütemaß SWE MANE bessere Werte erzielen können. Eine andere Gewichtung hätte andere Ergebnisse zur Folge. In der WOF sind die Abflussgütemaße stark vertreten, was für ein Niederschlags-Abfluss-Modell wie dem HBV-Light-Modell sinnvoll ist.

Die Werte für die Restschneemenge und den Schneenumverteilungsbereich sind im kalibrierten, anhand der WOF ausgewählten, Parametersatzes mit 1250 mm und 1500 m recht hoch. Eine große RM bedeutet, dass Schnee erst umverteilt wird, wenn diese Menge überschritten ist, dass wenig Schnee umverteilt wird. Die Ergebnisse aller Kalibrierungen wählen für die RM einen Wert größer 500 m. Für die Simulationen bleibt damit in den Hochlagen eine relativ mächtige Schneedecke erhalten. Durch den großen SUB wird der umverteilte Schnee auf eine große Fläche verlagert, was die Schneehöhenänderung pro Fläche relativ gering hält. Dies deutet darauf hin, dass die Kalibrierung gute Ergebnisse liefert, wenn der Einfluss der Schneenumverteilung gering gehalten wird.

5.2 Analyse der simulierten Modellausgabeparameter

5.2.1 Auswertung der Zeitreihe

Abfluss

Die Analyse der Abflusszeitreihen hat gezeigt, dass der Abfluss durch das Modell vor allem in der ersten Hälfte der Simulationszeitreihe unterschätzt wird (s. Abbildung 4.2). Da alle Simulationen die Messwerte unterschätzen, gibt die Kalibrierung das Parameterset zurück, welches am nächsten an den Messwerten liegt. Die kalibrierte Zeitreihe wird mit den Schneenumverteilungsparametern OH 2249 m, SUB 1547 m und RM 1251 mm erzeugt. Dies bedeutet,

dass der Bereich, auf den der Schnee umverteilt wird, sehr groß ist und bis weit nach unten ins EZG reicht. Es wird allerdings erst umverteilt, wenn die Restschneemenge überschritten wird. Ist diese hoch, verbleibt viel Schnee in den in den höheren Lagen des EZG, wo weniger schmilzt. Dass die simulierten Abflüsse und die gemessenen Abflussdaten am Ende des Simulationszeitraums besser zueinander passen, könnte damit zusammenhängen, dass die Daten zur Schneekalibrierung erst ab 1998 zur Verfügung stehen und damit die Schneedecke ab diesem Zeitpunkt besser abgebildet werden kann. Wenn sich die Schneeumverteilung über die Jahre zum Beispiel durch die Klimaerwärmung verändert hat, passt die Kalibrierung für zurückliegende Jahre nicht so gut. In die gewichtete Zielfunktion (WOF) fließen neben den Abflussgütemaßen auch die Schneegütemaße mit ein. Da diese allerdings nur für den genannten Zeitraum berechnet werden können, werden die Jahre nach 1998 in der Kalibrierung stärker gewichtet. Im Abflussregime in Abbildung 4.3 zeigt sich, dass vor allem im Sommer der Abfluss durch das Modell unterschätzt wird. Der Zeitraum zwischen Juni und September fließt durch das Gütemaß $R_{eff} Season$ stärker in die Kalibrierung mit ein. Daher gibt die Parameterkombination, die in diesem Bereich am nächsten an den Messwerten liegt, das beste Gütemaß. Verschiedene SUV-Parameterkombinationen sorgen dafür, dass je nach Simulation die Schneemenge im Modell unterschiedlich verteilt ist. Je größer der Schneeumverteilungsbereich und je tiefer die Obere Höhengrenze, desto weiter nach unten wird der Schnee verteilt. Aufgrund des Höhengradienten der Temperatur schmilzt Schnee in tieferen Lagen meist früher ab als in den Hochlagen (Stahl, 2016). Je nach Parameterkombination kann sich dadurch der Abfluss durch die Schneeschmelze im Jahresverlauf verschieben. Dies zeigt sich dann auch im Abflussregime des gesamten Abflusses (s. Abbildung 4.3).

Der Abflussanteil der Gletscherschmelze ist gering. Dass der Einfluss der Schneeumverteilungsparameter auf den Abfluss aus Gletscherschmelze relativ gering ist, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Schneeumverteilung keinen direkten Effekt auf die Gletscherschmelze hat. Durch die Schneeumverteilung wird zwar Schnee auf die Gletscher im Gebiet umverteilt, ein Teil davon wird allerdings dann zu Firn und Eis umgewandelt (Stahl, 2016). Erst wenn dieses Eis schmilzt, trägt der umverteilte Schnee zum Abflussanteil der Gletscherschmelze bei. Dies bedingt einen zeitlichen Versatz des Einflusses der Schneeumverteilung auf diesen Abflussanteil. Dieser Effekt ist erst nach einigen Jahren in der Zeitreihe sichtbar. Dass die Variation durch die Parameterkombinationen für den Abflussanteil der Schneeschmelze größer ist, liegt im starken Einfluss der Schneeumverteilung auf die Schneedecke begründet. Wie in Abschnitt 2.2.1 erläutert, definiert die Schneeumverteilung, wie viel und wie weit Schnee im EZG umverteilt wird. Dadurch schmilzt je nach Kombination der SUV-Parameter mehr oder weniger Schnee, früher oder später, schneller oder langsamer ab. Daher ist die Variation der Simulationen während der Schneeschmelzperiode ab dem späten Frühjahr am größten.

Die Verteilung der Abflusszeitreihen des Regenanteils ist breiter als man erwarten würde, da davon ausgegangen wird, dass die Schneeumverteilung auf den Regen keinen Einfluss haben dürfte. Eine Erklärung für die große Variation könnte sein, dass je nach Schneebedeckung im Gebiet der Regen nicht direkt zum Abfluss beiträgt, sondern in der Schneedecke zwischen gespeichert wird und dann als Schneeschmelzwasser abfließt. Der Regenanteil bringt die größte Variation in den Gesamtabfluss.

Für die Modellierung des EZG Engelberger Aa ist die größere Streuung des Abflussanteils des

Gletschers damit zu erklären, dass die Gletscherfläche kleiner ist und die Auswirkungen der Schneenumverteilung dadurch stärker sind. Das EZG Engelberger Aa liegt niedriger als das EZG Schwarze Lutschine. Die geringere Variation des Schneeschmelzabflusses ist darauf zurückzuführen, dass der Großteil des Schnees im Sommer abschmilzt und alle Variationen im Jahresmittel sehr ähnliche Werte ergeben. Da die Schneehöhen im Gebiet nicht so hoch sind und sich der Schnee eher in tieferen Lagen verteilt, ist der Zeitraum der Schneeschmelze kürzer als bei der Schwarzen Lutschine.

Schnee

Wie bereits erläutert, wird die Schneehöhe stark von der Schneenumverteilung beeinflusst und ebenfalls von der Variation dieser Parameter. Je niedriger die Restschneemenge ist, desto mehr Schnee wird in tiefere Bereiche des EZG umverteilt und desto geringer ist die Schneehöhe oberhalb der OH. Die Größe des Schneenumverteilungsbereichs legt fest, wie stark sich die Schneehöhen unterhalb der OH verändern. Die meisten Simulationen verteilen sich gleichmäßig um die Kalibrierwerte. Die starken Ausreißer nach oben, die circa ab 1981 auftreten, liegen immer deutlich über den Kalibrierdaten. Ihre Abweichung zu den Kalibrierwerten nimmt mit fortlaufendem Simulationsfortschritt zu. Dieses Verhalten kann durch einzelne Parameterkombinationen erklärt werden. Kombinationen mit geringer RM und kleinem SUB verteilen stets sehr viel Schnee auf ein sehr schmales Höhenband. Wählt man die OH zu hoch und liegt diese damit in einer Höhe, in der auch im Sommer nicht mehr die gesamte Schneedecke abschmilzt, kann es erneut zur Bildung von Schneetürmen und damit zur langsamen Akkumulation von Schnee im simulierten EZG kommen. Es ist jedoch deutlich zu sehen, dass ein solches Verhalten nur in wenigen Fällen auftritt. Dies ist für weitere Analysen zu berücksichtigen, um diese Kombinationen in anderen Auswertungen ebenfalls identifizieren und in einer möglichen Parameterempfehlung ausschließen zu können.

Bei der Engelberger Aa ist das gleiche Verhalten zu sehen, dieses ist allerdings stärker ausgeprägt. Für verschiedene Parameterkombinationen wachsen die Schneetürme konstant an. Zum Ende des Simulationszeitraums lassen sich eindeutig sechs Gruppen identifizieren. Dies deutet darauf hin, dass die Schneehöhe maßgeblich von einem Parameter beeinflusst wird und der Effekt durch andere Parameter nicht kompensiert werden kann, da sonst eine homogenere Verteilung zu erwarten wäre.

Schnee im Bereich unter 2500 m

Die Schneehöhen unterhalb 2500 m sind insgesamt geringer als im gesamten EZG, da aufgrund des Höhengradienten von Temperatur und Niederschlag in den tieferen Lagen des EZG weniger Niederschlag als Schnee fällt, beziehungsweise dieser schneller abschmilzt, und sich somit auch nicht so mächtige Schneedecken aufbauen können (Stahl, 2016).

Die Streuung in der Zeitreihe und im Regime ist geringer als für das gesamte EZG, da die Kombinationen, die Schneetürme erzeugen, hauptsächlich auf die Höhenlagen oberhalb 2500 m Einfluss haben. Unterhalb dieser Höhengrenze schmilzt der meiste Schnee im Sommer ab (s. Abbildung 4.13), auch wenn sehr viel Schnee, zum Beispiel durch SUV-Kombinationen mit geringen RM, nach unten verteilt wird. Zu Beginn des Winters akkumuliert sich der Schnee. Erst wenn die RM überschritten wird, beginnt die Schneenumverteilung. Dies ist ab Mitte des Winters der Fall. Daher haben die Parameterkombinationen der Schneenumverteilung vor allem

während des Zeitraums der Schneeakkumulation den größten Einfluss auf die Modellergebnisse. Mit der Schneeschmelze nimmt der Effekt wieder ab.

Die Ausreißer nach oben bei der Engelberger Aa können wieder durch die Bildung von Schneetürmen erklärt werden. Da hier nur der EZG-Bereich unterhalb von 2500 m betrachtet wird, sieht man nur die Ausreißer, die bei einer OH von 2500 m Schneetürme bilden. Daraus lässt sich schließen, dass im EZG Engelberger Aa die klimatische Schneegrenze tiefer liegt als im EZG Schwarze Lutschine.

Schneebedeckung

Der Einfluss der Schneeumverteilung auf die Schneebedeckung ist relativ gering, da dieser Prozess nur bei Schneefall und hauptsächlich im Winter beziehungsweise in Zeiträumen, in denen in großen Teilen des EZG bereits Schnee liegt, stattfindet. Im Bereich oberhalb der OH, aus dem Schnee umverteilt wird, ändert sich die Schneebedeckung nicht, da eine Restschneemenge erhalten bleibt. Nur wenn der Schnee in so tiefe Bereiche der EZG verteilt wird, in denen zu diesem Zeitpunkt kein Schnee liegt, ändert sich die Schneebedeckung. Dies ist durch die Kombination von großer SUB und tiefer OH möglich. Außerdem hat man in der vorhergehenden Betrachtung des EZG-Bereichs unterhalb 2500 m gesehen, dass im Sommer dieser Bereich komplett abschmilzt. Dies bedeutet, dass man für einen Teil des Jahres immer den gleichen Wert für die Schneedeckung erhält. Im Winter kann die Variation zwar variabler sein, aber wenn mit den Sommermonaten über das gesamte Jahr gemittelt wird, ist wie zu erwarten die Streuung relativ gering. Im Zeitraum der Schneeschmelze ist die größte Variation der Simulationen sichtbar. Wie oben beschrieben, schmelzen Flächen mit kleinerer Schneemenge und geringerer Einzugsgebietsgröße früher beziehungsweise schneller ab. So erzeugen die verschiedenen Kombinationen unterschiedliche Schneeschmelzmuster und Schneebedeckungen während der Schmelzperiode.

Gletscher

Je nach Parameterkombination wird unterschiedlich viel Schnee auf die Gletscher im EZG umverteilt. Da die Schneeumverteilungsroutine den Schnee gleichmäßig auf die gletscherfreien Flächen unterhalb der OH und auf die gesamten Gletscherflächen im EZG verteilt, wird bei Parameterkombinationen mit geringen RM und kleinen SUB viel Schnee auf die Gletscher verteilt. Wird mehr Schnee auf die Gletscher verteilt, als durch die Eisschmelze abschmilzt, wächst der Gletscher. Bekommt der Gletscher weniger Schnee zur Umwandlung in Firn und Eis als abschmilzt, schrumpft der Gletscher (Stahl, 2016). Der Großteil der Simulationen zeigt einen Rückgang des Gletschervolumens ab etwa 1983. Da die Schneeumverteilung nur einen Zuwachs des Volumens bewirken kann, liegt die Ursache für den Gletscherrückgang im Abschmelzverhalten des Gletschers begründet. Nur einzelne Parameterkombinationen können das Abschmelzen des Gletschers kompensieren beziehungsweise zu einem Gletscherwachstum führen. Der Vergleich mit dem gemessenen Gletscherstand 2003 zeigen, dass diese Parameterkombinationen allerdings zu Simulationen von sehr unrealistischen Werten führen.

5.2.2 Stationsdaten

5.2.2.1 Engelberger Aa

Im Einzugsgebiet Engelberger Aa haben die mittleren Schneehöhen im gesamten EZG ähnliche Werte wie die mittleren Schneehöhen, die nur für den EZG-Bereich unterhalb 2500 m modelliert werden. Der Grund dafür ist, dass das EZG Engelberger Aa eine maximale Höhe von 3221 m erreicht und damit oberhalb von 2500 m lediglich 700 Höhenmeter zusätzlich zu den Schneehöhen für das gesamte EZG beitragen. Das Modell kann für den Zeitraum, für den Referenzschneedaten des SLF zur Verfügung stehen, die Schneehöhen gut simulieren. Dies bedeutet, dass die Kalibrierung für die Schneedaten gut funktioniert hat.

Station Engelberg

Die Schneemessdaten der Station Engelberg und die simulierten Schneehöhen im zugehörigen Höhenband passen gut zusammen. Das veranschaulicht, dass das Modell für eine Gebietshöhe von etwa 1000 m ü. NN die Schneehöhe gut abbilden kann. Da die Station tiefer liegt als die mittlere EZG-Höhe von 1600 m und die Schneehöhen meist mit der Höhe zunehmen (vgl. Stahl, 2016), sind die Schneehöhen auf Höhe der Messstation geringer als die mittleren Schneehöhen im Gebiet.

Station Titlis

Das Modell kann vor allem die stark ausgeprägten Spitzen der gemessenen Schneezeitreihe nicht abbilden. Das bedeutet entweder kann das Modell die Schneehöhen in dieser EZG-Höhe nicht gut simulieren oder die Station spiegelt nicht das Verhalten beziehungsweise die Schneemengen im Höhenband wieder. Die großen Schneehöhen lassen vermuten, dass die Messstation nordexponiert ist und aufgrund der geringeren Nettoeinstrahlung weniger abschmilzt und dadurch deutlich höhere Schneemengen zustande kommen (vgl. Stahl, 2016). Allerdings unterschätzen auch die simulierten Schneehöhen für die nach Norden ausgerichteten Flächen die gemessenen Schneehöhen deutlich. Die hohen gemessenen Schneehöhen können darauf hindeuten, dass die Station auf der Lee-Seite eines Bergs oder anderen Hindernissen steht und es im Bereich der Messstation dadurch zu präferenzierter Ablagerung kommt (vgl. Lehning et al., 2008). Dass der deutlichste Versatz zwischen gemessenen und simulierten SWE-Werten in der Schneeakkumulationszeit auftritt, stützt diese Vermutung. Eine andere Möglichkeit ist, dass der Bereich der Messstation durch Schneenumverteilung durch Wind oder Lawinen beeinflusst wird, was das Modell in diesem Fall nicht so gut abbilden kann, da der Kalibrierwert für den Schneenumverteilungsbereich sehr groß ist.

5.2.2.2 Schwarze Lütschine

Für das Einzugsgebiet Schwarze Lütschine liegen die Werte für die mittleren Schneehöhen für das gesamte Gebiet und die Fläche unterhalb 2500 m deutlich weiter auseinander als beim EZG Engelberger Aa. Da das EZG Schwarze Lütschine bis auf 4089 m reicht, liegt bei diesem Einzugsgebiet eine deutlich größere Fläche oberhalb von 2500 m, welche in die Berechnung für die mittlere Schneehöhe zusätzlich mit einfließen. Mit zunehmender Gebietshöhe werden die Schneedecken mächtiger (Stahl, 2016), was bedeutet, dass die durchschnittliche Schneehöhe

über 2500 m größer ist als für den Bereich darunter. Somit sind auch die mittleren Schneehöhen für das gesamte EZG deutlich höher.

Station First

Dass das Modell die Schneehöhen an der Messstation First im EZG Schwarze Lütschine unterschätzt, kann ähnliche Gründe haben wie für die Unterschätzung bei der Station Titlis im EZG Engelberger Aa. Beide Stationen befinden sich im selben Höhenband (2050 m bis 2150 m). Allerdings ist die Unterschätzung der Messwerte der Station First geringer, vor allem wenn man zum Vergleich die simulierten Schneehöhen der nordexponierten Flächen heranzieht. Die Messdaten erreichen früher im Jahr größere Schneehöhen als die simulierten Werte. Leider konnten die Messwerte für den Sommer nicht berechnet werden, aber die Rohdaten zeigen, dass es im Bereich der Schneestation in manchen Jahren auch im Spätsommer, hauptsächlich im September und Oktober, zu Schneeniederschlägen kommt beziehungsweise in diesen Monaten Schneehöhen von wenigen Zentimetern (5 bis 50 cm) gemessen wurden. Im Modell dagegen schmilzt der Schnee im Sommer für dieses Höhenband komplett ab, wie Abbildung 4.22 zeigt.

Station Männlichen

Auffällig ist, dass die Messstation Männlichen nur etwa 50 m höher liegt als die Station First, die Schneehöhen für Männlichen jedoch über- statt unterschätzt werden wie für Station First. Dies könnte an einer unterschiedlichen Exposition der beiden Stationen liegen. Die Nettostrahlung ist im Gebirge für verschiedene Ausrichtungen von Hängen unterschiedlich stark und beeinflusst damit die Schneeschmelze (Stahl, 2016). Obwohl das Modell die Expositionen mit schnellerer Schneeschmelze für süd-exponierte Hänge und langameren Schneeschmelze für Nordhänge berücksichtigt (Stahl et al., 2016), kann das Modell hier die Schneehöhen nicht gut simulieren. Die Messwerte der Station Männlichen können am besten durch die Simulationsdaten für südexponierte Flächen beschrieben werden. Außerdem können Windverhältnisse die Messung beeinflussen (Stahl, 2016). Zudem liegt die Station Männlichen im unteren Bereich des Höhenbandes. Der gemittelte Wert über das gesamte Höhenband kann daher größer ausfallen.

5.2.2.3 Weisse Lütschine

Die Differenz zwischen den Schneehöhen im gesamten Einzugsgebiet der Weissen Lütschine und dem Bereich unterhalb 2500 m ist ähnlich hoch wie bei der Schwarzen Lütschine. Dies lässt sich wieder durch den großen Flächenanteil oberhalb 2500 m erklären, da das EZG Weisse Lütschine als höchstes der drei Einzugsgebiete bis auf 4146 m reicht.

Station Mürren

Das Modell unterschätzt die Schneehöhen auf Höhe der Messstation etwas. Die Station liegt wieder im oberen Bereich des Höhenbandes, was die größeren Messwerte im Vergleich zu den mittleren Schneehöhen im Höhenband begründen könnte. Diese Station liegt auf 1641 m unterhalb der mittleren EZG-Höhe von 2149 m. Die Schneehöhen können durch das Modell für tiefer liegende Stationen recht gut modelliert werden.

Station Schilthorn

Die Messdaten liegen deutlich über den simulierten Schneehöhen, obwohl die Station im unteren Teil des Höhenbands liegt. Das Modell kann die tatsächlich gemessenen Schneehöhen auf dieser EZG-Höhe schlecht abbilden. Für die Schneenumverteilung wird durch die Kalibrierung eine Obere Höhengrenze von 2600 m, ein Schneenumverteilungsbereich von 1800 m und eine Restschneemenge von 1250 mm gewählt. Dies bedeutet, im Modell wird, bedingt durch die große Restschneemenge, wenig Schnee verfrachtet und dieser dann auf eine sehr große Fläche umverteilt. Dadurch ändern sich die Schneehöhen unterhalb der OH nur gering. Vermutlich wird in der Realität viel mehr Schnee auf kleinere Flächen umverteilt, wodurch im Zeitraum der Schneeakkumulation deutlich mächtigere Schneedecken entstehen.

Insgesamt lässt sich für alle EZG feststellen, dass die Schneehöhen von tiefer liegende Stationen gut simuliert werden können. Je höher die Stationen im EZG liegen, desto größer ist die Diskrepanz zwischen gemessenen und simulierten Daten. Die Über- bzw. Unterschätzung macht sich am meisten während der Schneeakkumulationszeit bemerkbar. Außerdem ist die Exposition der Schneestationen sehr relevant für eine gute Übereinstimmung der Messdaten mit den Simulationsdaten.

5.2.3 Analyse der Schneehöhen

5.2.3.1 Gemittelte Schneehöhen über den Schneenumverteilungsbereich

Dass der Einfluss der Oberen Höhengrenze auf die Schneehöhen im gesamten Gebiet deutlich größer ist als derjenige der Restschneemenge, ist in Abbildung 4.29a zu sehen. Wenn die OH sehr hoch liegt, wird der Schnee in den Höhenbändern darunter nicht mehr umverteilt und akkumuliert sich. Zudem bekommen diese noch mehr Schnee durch die Umverteilung von oberhalb 3000 m. Das EZG Schwarze Lütschine reicht bis 4000 m, deshalb wird der Schnee aus einem 1000 m breiten Höhenband umverteilt. Die Schneeschmelze wird im Modell über das Gradtagverfahren berechnet. Steigt auch im Sommer die Lufttemperatur nur selten über einen definierten Wert (hier: $-0,27^{\circ}\text{C}$), schmilzt nicht der gesamte Schnee ab. Dies kann auch schon für Gebietshöhen unterhalb 3000 m der Fall sein. Das bedeutet, dass bei zu hoch gewählter Oberen Höhengrenze sich zwar in den höchsten Lagen keine Schneetürme mehr bilden, aber dafür unterhalb der OH. Daraus ergibt sich eine erhöhte mittlere Schneehöhe für das gesamte EZG. Die Gebietshöhe, ab der dieser Effekt auftritt, markiert die sogenannte klimatische Schneegrenze und liegt hier bei etwa 2700 m. Dies deckt sich gut mit in der Literatur angegebenen Werten von 2700 m bis 3400 m für die Alpen (Stahl, 2016). Die Restschneemenge hat kaum einen Einfluss, da die Schneehöhen für das gesamte EZG gemittelt werden.

Für den EZG-Bereich unter 2500 m ändert sich das Verhalten, da die obersten Höhenzonen mit den größten Schneemengen nicht einbezogen werden (s. Abbildung 4.29b). Liegt die Obere Höhengrenze bei 2500 m und ist die Restschneemenge sehr klein, wird maximal viel Schnee von außerhalb des betrachteten Bereichs (über 2500 m) in den EZG-Bereich unter 2500 m verteilt. So kommen für diese OH die größten SWE-Werte zustande. Liegt die OH höher, wird ein

Teil des Schnees auch auf die Flächen oberhalb 2500 m verteilt und taucht somit in der Betrachtung nicht mehr auf; die SWE-Werte sind daher geringer. Bei tiefer liegenden OH wird auch Schnee aus dem betrachteten Gebiet mit umverteilt und die nichtvergletscherte Fläche, auf die umverteilt wird, nimmt ab. Da bei der Schneenumverteilung der Schnee gleichmäßig auf Gletscherflächen im gesamten Gebiet und auf unvergletscherte Flächen unterhalb der OH verteilt wird, ändert sich bei sinkender OH das Verhältnis der Flächen und es wird insgesamt mehr Schnee auf den Gletscher umverteilt. Dies führt zu geringeren Schneehöhen. Für höhere Restschneemengen verbleibt mehr Schnee zwischen der OH und 2500 m. Dieser wird nicht auf den Gletscher umverteilt und führt daher zu steigenden mittleren Schneehöhen.

Auffällig ist, dass etwa ab einer RM von 750 mm weder die OH noch die RM einen Einfluss auf die SWE-Werte haben. Sind die Werte geringer, wird zu wenig Schnee umverteilt, um einen erkennbaren Einfluss auf den EZG-Bereich unterhalb 2500 m zu haben.

Betrachtet man dieselben Auswertungen des 1. Aprils, zeigen sich deutlich höhere Schneemengen, da dieser Zeitpunkt am Höhepunkt der Schneeakkumulation liegt. Das Verhalten, das durch die verschiedenen Werte der Schneenumverteilungsparameter geprägt wird, ist zu diesem Zeitpunkt aber ebenso zu erkennen. Der 1. April scheint sich entsprechend dem Jahresmittel zu verhalten und kann daher keine weiteren Erkenntnisse liefern.

Bei der Simulation des EZG Engelberger Aa für das gesamte EZG ist das gleiche Verhalten wie bei der Schwarzen Lutschine zu sehen. Die OH, ab der sich Schnee dauerhaft akkumuliert, liegt allerdings mit 2500 m niedriger. Unterhalb 2500 m sind die abnehmenden Schneehöhen bei kleinen OH und steigender RM mit der kleineren Gletscherfläche im EZG Engelberger Aa zu begründen. Die Gletscherfläche ist in diesem EZG im Verhältnis zur unvergletscherten Fläche klein. Wenn die RM klein ist, wird viel zusätzlicher Schnee von außerhalb des betrachteten Bereiches in diesen eingebracht, weil die unvergletscherte Fläche im Gebiet deutlich größer ist als die Gletscherfläche. Bei steigender Restschneemenge wird weniger Schnee in dieses Gebiet umverteilt, daher sinken die Schneehöhen.

5.2.3.2 Gemittelte Schneehöhen über die Restschneemenge

Auch Abbildung 4.31a zeigt den großen Einfluss der OH auf die Schneehöhen im gesamten EZG. Die möglichen Ursachen dafür wurden in Abschnitt 5.2.3.1 bereits erläutert. Wird der Schneenumverteilungsbereich größer, werden die Schneehöhen im gesamten EZG etwas geringer, da der Schnee in tiefere Lagen verteilt wird, in denen dieser schneller schmilzt.

Betrachtet man den Bereich unterhalb 2500 m, sind die Schneehöhen insgesamt geringer. Die größten Schneehöhen entstehen auch in diesem Fall bei einer OH von 2500 m, da dafür der meiste Schnee von außerhalb des betrachteten Bereiches in dieses Gebiet eingetragen wird.

Bei der Engelberger Aa sind die größeren Schneehöhen für einen Schneenumverteilungsbereich von 100 m festzustellen. Es wird viel Schnee in einen kleinen Bereich verteilt, was zu den großen Schneehöhen führt, da die kleine Gletscherfläche diesen Effekt nicht umkehren kann. Das gegenteilige Verhalten bei der Schwarzen Lutschine geht auf die größere Gletscherfläche in dem EZG zurück.

5.2.3.3 Gemittelte Schneehöhen über die Obere Höhengrenze

Die größten Schneemengen für das gesamte EZG werden bei einem sehr kleinen SUB und einer geringen RM erreicht. Dies ist damit zu erklären, dass bei dieser Kombination sehr viel Schnee in einen kleinen Bereich umverteilt wird. In diesem Bereich ist die Schneedecke dann sehr mächtig und schmilzt langsamer ab. Bei sehr hohen OH kann es passieren, dass der Schnee über den Sommer nicht abschmilzt und sich Schneetürme unterhalb der OH bilden. Wird die gleiche Menge dagegen auf eine große Fläche (große SUB) verteilt, entstehen geringere Schneehöhen. Betrachtet man nur den EZG-Bereich unterhalb 2500 m, zeigt sich ein fast Gegenteiliges Muster in der Heatmap. Für kleine RM und kleine SUB werden die geringsten Schneehöhen unterhalb 2500 m erzeugt, da die Schneeanisammlungen in den Hochlagen in diesem Fall nicht mit einbezogen werden. Wird viel Schnee auf eine kleine Fläche in tiefere Lagen verteilt, schmilzt dieser über den Sommer trotz großer Schneehöhen ab. Über alle Jahre gemittelt ergibt das eher geringe Schneehöhen. Es zeigt sich, wie beim Mittel über den SUB, dass bei Restschneemengen größer 750 mm, die Änderung der beiden Parameter keinen Einfluss mehr haben.

Bei der Engelberger Aa werden die höchsten Schneehöhen für die Kombination von kleinen RM mit kleinen SUB erreicht. Dies ist wie zuvor durch die unterschiedlichen Gletscherflächen in den EZG zu erklären.

5.2.4 Analyse der flächenverteilten Daten

Bei der Analyse der flächenverteilten Daten fällt auf, dass die Schneegrenze am 1. April nie höher als circa 1460 m ü. NN liegt. Je kleiner die Restschneemenge ist, desto mehr Schnee wird umverteilt. Liegt mehr Schnee in tieferen Lagen, dauert es länger bis dieser abgeschmolzen ist. Der Schnee bleibt in tieferen Lagen also länger erhalten, was im Mittel zu niedrigeren Schneegrenzen führt. Dass bei einem SUB kleiner 400 m die RM keinen Effekt zeigt, kann daran liegen, dass in diesen Höhenbändern am 1. April auch ohne Schneenumverteilung Schnee liegt und der zusätzliche Schnee die schneebedeckte Fläche nicht verändert.

Je größer der Schneenumverteilungsbereich ist, umso weiter nach unten wird der Schnee verteilt und umso tiefer liegt die Schneegrenze. Dass die niedrigste EZG-Höhe, ab welcher Schnee liegt, für einen SUB von 1400 m erreicht wird, liegt daran, dass das EZG nur bis 600 m ü. NN reicht. Das bedeutet, dass für größere SUB die Kombinationen mit den niedrigen Oberen Höhengrenzen nicht mehr möglich sind. Mit sinkender OH steigt jedoch die umverteilte Schneemenge, was den Effekt hat, dass die Schneebedeckung in den tieferen Lagen länger erhalten bleibt. Die Parameter OH und SUB kompensieren sich gegenseitig. Wenn zum Beispiel sowohl der SUB als auch die OH um 100 m kleiner werden, bleibt die Schneegrenze auf derselben Höhe, da der Schnee bis auf die gleiche Höhe verteilt wird. Wird der Schnee nur bis auf 2000 m als untere Höhengrenze umverteilt, ändern sich die Schneegrenzen nicht. Bis zu dieser Höhe liegt vermutlich am 1. April noch flächendeckend Schnee und die Umverteilung vergrößert diese Fläche nicht.

Auch für kleinere RM liegt die Schneegrenze tiefer, da mehr Schnee von oben im EZG nach unten verteilt wird. Dies bringt größere Schneemengen in den tieferen Lagen, die langsamer schmelzen und tiefere Schneegrenzen ermöglichen.

5.3 Sensitivitätsanalyse

5.3.1 Graphische Auswertung der Gütemaße

5.3.1.1 Lindström Maß

Durch die Kombination aus niedriger Oberer Höhengrenze und kleiner Restschneemenge wird viel Schnee weit nach unten ins Einzugsgebiet verlagert. Für diese Parameterkombinationen werden schlechte Abflussgütemaße erzielt (s. Abbildung 4.34). Das bedeutet, dass für sie die simulierten Abflusswerte nicht zu den gemessenen passen. Je höher die OH liegt, desto kleiner ist die Fläche, von der Schnee umverteilt wird und folglich wird bei gleicher RM weniger Schnee in die tieferen Lagen verteilt. Selbiges geschieht, wenn die RM hoch gewählt wird. Aufgrund des Temperaturgradienten in alpinen EZG schmilzt der Schnee in höheren Lagen später (Stahl, 2016). Durch die zeitliche Verschiebung des Abflusses kann die Verschlechterung des Gütemaßes erklärt werden.

Je weiter der Schnee durch die Kombination aus kleinen OH und großen SUB nach unten verteilt wird, desto besser wird das Abflussgütemaß Lindström Maß (s. Abbildung 4.35). Da der Schnee in den tieferen Lagen schneller abschmilzt, wird das Schmelzwasser früher dem Abfluss zugeführt und der zeitliche Versatz zwischen Niederschlag und Abfluss ist geringer. Es zeigt sich hier erneut die Interaktion zwischen der OH und dem SUB. Wird für die OH ein höherer Wert gewählt, muss auch der SUB größer werden, um den Schnee bis zur selben unteren Höhe zu verteilen und ein gleich gutes Lindström Maß zu erzielen. Für größere SUB verbessert sich das Abflussgütemaß und der Abfluss wird besser vom Modell abgebildet. Bei einem großen SUB wird der Schnee gleichmäßig im Gebiet verteilt und wird so auch gleichmäßiger abschmelzen. Bei einem kleinen SUB wird der gesamte Schnee auf einen kleinen Bereich verteilt. Die Mächtigkeit der Schneedecke in diesem Bereich unterscheidet sich dadurch deutlich von den darüber und darunter liegenden Höhenbändern und hat ein ungleichmäßiges Abschmelzen zur Folge. Durch die zusätzliche Variation der RM ist keine Änderung des Lindström Maßes festzustellen. Da der Kalibrierwert für die RM schon bei 1250 m liegt und für große RM die besten Lindström Maße erreicht werden, verbessert sich dies durch die Variation nicht. Die schlechtesten Gütemaße für den Abfluss werden für die Kombinationen mit geringen RM und kleinen SUB erreicht (s. Abbildung 4.36). Für diese Kombinationen wird verhältnismäßig viel Schnee auf die Gletscherflächen und damit auch in höhere Lagen umverteilt und so Schneevolumen den gletscherfreien Flächen im Gebiet entzogen. Für den Abfluss fehlt das im Schnee gespeicherte Wasser. Auf dem Gletscher wird ein Teil des Schnees in Eis umgewandelt und schmilzt erst später als Gletschereis ab. Der andere Teil schmilzt zwar über den Sommer ab, in den höheren Lagen allerdings langsamer (vgl. Stahl, 2016). Durch beide Effekte trägt der umverteilte Schnee erst mit großem zeitlichen Versatz zum Abfluss bei. Dagegen werden für hohe RM und große SUB die besten Werte für das Lindström Maß erreicht. Für diese Kombinationen wird kaum Schnee umverteilt und dieser dazu auf eine sehr große Fläche. Das bedeutet, dass das Modell den Abfluss am besten simulieren kann, wenn der Einfluss der Schneeumverteilung möglichst gering gehalten wird. Die schlechten Lindström Maße können durch die Obere Höhengrenze kompensiert werden (s. Abbildung 4.36b). Bei der Modellierung der Engelberger Aa zeigt sich bei kleinen RM ein Maximum des Gütemaßes bei einer SUB von 400 m. Bei dieser Größe des SUB kann der

Abfluss vom Modell scheinbar gut simuliert werden. Dies ist bei der Schwarzen Lütschine nicht zu beobachten. Dieses Maximum bei einem bestimmten SUB ist der Grund, weshalb der SUB bei der Engelberger Aa so gut kompensieren kann. Der kalibrierte SUB liegt bei 1600 m. Lässt man diesen Parameter nur variieren, kann er den Wert annehmen, bei dem die Gütemaße für SUB am besten sind. Die OH kann ebenfalls gut kompensieren, indem die OH erhöht wird. Die OH kompensiert damit hauptsächlich die RM, da beide Parameter definieren, wie viel Schnee umverteilt wird. Bei kleinen RM wird viel Schnee umverteilt. Erhöht man allerdings die OH, nimmt die Fläche ab, von der Schnee umverteilt wird und damit auch die Schneemenge.

Die Gütemaßänderung durch Variation der SUV-Parameter ist für die Restschneemenge am deutlichsten erkennbar. Die RM ist mit einer Gütemaßänderung von bis zu 0.05 für die Schwarze Lütschine und sogar 0.12 für die Engelberger Aa im Bezug auf das Lindström Maß als leicht sensitiv beziehungsweise sensitiv einzuordnen. Die OH erscheint in Kombination mit der RM auch (schwach) sensitiv, der SUB ist dagegen bezüglich des Lindström Maßes als nicht sensitiv einzustufen.

5.3.1.2 SWE MANE

Für die Auswertung des Gütemaßes SWE MANE ist zu beachten, dass in dessen Berechnung nur die Schneedaten unterhalb von 2500 m berücksichtigt werden. Besonders bei den Einzugsgebieten der Schwarzen und Weissen Lütschine, die eine maximale EZG-Höhe von über 4000 m erreichen, wird damit ein großes Höhenband nicht mit einbezogen.

Die schlechtesten Werte für SWE MANE werden erreicht, wenn die Schneehöhen im betrachteten Gebiet, also unter 2500 m, am höchsten sind. Das zeigt der Vergleich mit den Schneehöhen, die ein sehr ähnliches Verhalten für die gleichen SUV-Parameterkombinationen zeigen (s. Abbildung 4.37a und Abbildung 4.29b). Die Gütemaßänderung entlang des Parameters OH von 0.64 bis 0.72 deutet auf die Sensitivität des Parameters hin. Auch der Parameter RM ist bei einer Änderung des SWE MANE von 0.1 als sensitiv im Bezug auf dieses Gütemaß einzustufen. Der SUB kompensiert stark (s. Abbildungen 4.37a und 4.37b). Der kalibrierte Parameterwert für SUB liegt bei 1500 m. Der Umverteilungsbereich ist damit recht groß. Die starke Verbesserung der Gütemaße lässt sich mit einer Änderung hin zu kleineren SUB erklären, was der Blick auf Abbildung 4.38 und Abbildung 4.39 bestätigt. Für kleine SUB wird viel Schnee auf die Gletscher umverteilt, wodurch sich die gesamte Schneehöhe im EZG-Gebiet unterhalb 2500 m reduziert und das SWE MANE besser werden lässt. Wie bereits erwähnt, hängt das SWE MANE stark von den Schneehöhen unterhalb 2500 m ab. Für geringe Schneehöhen werden die besten Gütemaße erzielt. Im Vergleich mit den Abbildungen 4.32b und 4.31b zeigt sich, dass für ganz kleine SUB die Schneemenge maximal reduziert wird und das SWE MANE dafür die besten Ergebnisse ausgibt (s. Abbildungen 4.39b und 4.38b). Ebenfalls in Abbildung 4.38b zeigt sich im Vergleich mit den Schneehöhen (s. Abbildung 4.31b), dass für die Kombinationen, die die höchsten Schneehöhen im Gebiet erzeugen, die schlechtesten Gütemaße erreicht werden. Die Kombinationen, die durch RM kompensiert werden, sind die selben, die die geringsten mittleren Schneehöhen erzeugen.

In Abbildung 4.38 fällt die dreieckige Fläche mit gleichbleibendem Gütemaß auf. Für OH größer als 2500 m gibt das Modell immer den gleichen Wert für SWE MANE, wenn kein Schnee unter 2500 m verlagert wird, da dieser damit nicht zum Schnee im EZG-Bereich unter 2500 m beiträgt. Trotzdem werden für diese Kombinationen im Bereich unter 2500 m recht hohe Gütemaße erreicht, obwohl für diesen Bereich die Schneelumverteilung damit nicht berücksichtigt wird.

Für geringe Restschneemengen können, je nach Größe des SUB, gute und schlechte Werte für SWE MANE auftreten (s. Abbildung 4.39). Die OH kompensiert nur für SUB größer 500 m (s. Abbildung 4.39b). Die hohen Werte für SWE MANE bei kleinen SUB lassen wieder auf ein Umverteilen auf den Gletscher und damit eine insgesamt niedrige Schneehöhe schließen. Für größere Schneelumverteilungsbereiche wird daher auch das Gütemaß schlechter, weil zum einen nun Schnee tatsächlich auf andere Gebiete umverteilt wird, was besonders bei kleinen Restschneemengen zu größeren Schneehöhen führt und damit ein schlechtes SWE-MANE Gütemaß ergibt.

Insgesamt weisen die Auswertungen des SWE MANE Gütemaßes im Vergleich mit den Modellergebnissen der Schneehöhen darauf hin, dass die beste Übereinstimmung mit den Referenzdaten für geringe Schneehöhen berechnet wird. Obwohl die Schneelumverteilung durch Wind und Lawinen, wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, ein realer Prozess ist, wird die Schneedecke scheinbar am besten modelliert, wenn der Einfluss der Schneelumverteilung auf den EZG-Bereich unterhalb 2500 m relativ gering gehalten wird. Vergleicht man die EZG von Schwarzer und Weisser Lutschine mit dem EZG der Engelberger Aa, fällt auf, dass die ersten das gleiche Muster zeigen, die Engelberger Aa allerdings nicht bei niedrigen, sondern für hohe Schneehöhen die besten SWE MANE-Werte aufweist. Der größte Unterschied zwischen den EZG ist die Vergletscherung. Da der umzuverteilende Schnee gleichmäßig sowohl auf die Gletscher im gesamten Gebiet als auch auf die schneefreien Flächen im Umverteilungsbereich verteilt wird, haben die Gletscherflächen einen großen Einfluss auf die Umverteilung, vor allem wenn der SUB klein ist. Für das sehr schlechte Gütemaß (-0.4) bei der Kombination SUB 100 m und RM 50 mm konnte keine plausible Erklärung gefunden werden. Vermutlich spielt auch hier das Verhältnis zwischen gletscherfreien und vergletscherten Flächen eine Rolle.

5.3.1.3 SnowCover RMSE

Für die Auswertung des Schneebedeckungsgütemaßes ist zu beachten, dass die Referenzdaten erst ab dem Jahr 2000 zur Verfügung stehen und diese immer wieder mehrtägige Unterbrechungen beinhalten. Die Werte des SnowCoverRMSE liegen mit Werten zwischen 0.89 und 0.91 schon sehr nahe an 1, was eine optimale Übereinstimmung von Referenz- und Simulationsdaten bedeuten würde. Die Schneebedeckung wird durch das Modell also schon sehr gut simuliert. Die Gütemaßänderung durch die verschiedenen getesteten Parameterkombinationen ist sehr gering, was auf eine geringe Sensitivität der SUV-Parameter bezüglich der Schneebedeckung hindeutet.

Wenn viel Schnee umverteilt wird, also die RM gering ist, wird die Schneebedeckung am besten vom Modell simuliert (s. Abbildung 4.40). RM über 850 mm zeigen keine Änderung des Gütemaßes mehr, da weniger Schnee umverteilt wird. Dies deutet darauf hin, dass die tatsächliche Schneebedeckung in den tieferen Lagen höher ist. Dies kann darin begründet sein, dass

das Modell den Schneefall beziehungsweise die Schneeschmelze nicht genau abbilden kann oder tatsächlich viel Schnee von den höheren Lagen nach unten im EZG umverteilt wird. Die Schneebedeckung in den tieferen Lagen ist ausschlaggebend für ein guten SnowCover RMSE, was sich auch durch die Abbildungen 4.41 und 4.42 zeigen lässt. Dafür spricht auch die Interaktion zwischen der Restschneemenge und der Oberen Höhengrenze. Wenn die RM größer wird, steht weniger Schnee für die Umverteilung zur Verfügung. Die OH muss daher nach unten verschoben werden, damit die Fläche, von der Schnee umverteilt wird, größer wird und somit ähnlich viel Schnee für die Umverteilung zur Verfügung steht. Wenn dagegen, bei gleichbleibend kleiner RM, die OH nach unten verschoben wird, kann es passieren, dass in einem Höhenband unter der Schmelzgrenze, aber oberhalb der OH, im Sommer so wenig Schnee liegen bleibt, dass dieser viel früher abschmilzt als darunter.

Die Restschneemenge ist wichtig für die Schneebedeckung, was sich darin zeigt, dass die RM kompensieren kann. Die Restschneemenge bestimmt die Schneemenge, die umverteilt wird und damit auch, wie lange der Schnee liegen bleibt. Die tatsächliche Schneebedeckung wird am besten simuliert, wenn die OH bei etwa 2400 m liegt und der SUB groß ist. Für diese Kombinationen werden die höchsten Gütemaße erreicht. Die Interaktion zwischen der OH und dem SUB weist auf eine untere Höhengrenze (circa 1800 m ü. NN) hin, unter die Schnee umverteilt werden muss, damit das Gütemaß besser wird. Ansonsten erhält man konstante Werte für den SnowCover RMSE. Eine ähnliche untere Höhengrenze wurde bei der Analyse der Schneegrenzen festgestellt (s. Abbildung 4.33). Insgesamt zeigen die Heatmaps in den Abbildungen 4.40b, 4.41b und 4.42b), dass die Schneebedeckung mit der Parameterkombination kleine RM, großer SUB und einer OH um 2400 m am besten abgebildet werden kann. Das deutet darauf hin, dass oberhalb einer OH von 2400 m der Schnee im Sommer nicht komplett abschmilzt.

5.3.1.4 Gewichtetes Gütemaß

Bei den Heatmaps des gewichteten Gütemaßes fällt auf, dass sie den Heatmaps des Lindström Maßes ähneln (s. z.B. Abbildungen 4.34b und 4.43b). Da drei Abflussgütemaße in das gewichtete Gütemaß einfließen, ist es naheliegend, dass das gewichtete Gütemaß dem Abflussgütemaß ähnelt. Das Lindström Maß ist mit 0.2 stärker gewichtet als die beiden anderen betrachteten Gütemaße SWE MANE (0.15) und SnowCover RMSE (0.15).

Insgesamt werden die besten Gütemaße erreicht, wenn alle Parameter ihre Maximalwerte annehmen. Auffällig ist, dass OH in Abbildung 4.44b weniger sensitiv erscheint als in Abbildung 4.43b und dass OH sehr gut kompensieren kann. Bei sinkender OH nimmt die Fläche zu, von der umverteilt wird. Somit steht eine größere Schneemenge zur Verfügung. Für eine gleichbleibende WOF muss die RM kleiner werden, um diesen Effekt auszugleichen (s. Abbildung 4.43). Für große SUB wird der meiste Schnee auf die unvergletscherten Flächen verteilt und nur wenig auf den Gletscher. Da große SUB zu hohen WOF-Werten führen (s. Abbildung 4.44), ist dies vermutlich ein realistisches Szenario. Bei diesem Effekt spielt die OH nur eine geringfügige Rolle. Die sehr schlechten Werte für das gewichtete Gütemaß bei kleinen SUB und kleinen RM (s. Abbildung 4.45) können durch das Gletschergütemaß, welches ebenfalls mit einer Gewichtung von 0.2 in die Kalibrierung mit eingeht, bedingt sein. Für diese Parameterkombinationen wird verhältnismäßig viel Schnee auf die Gletscherflächen verteilt und würde ein Wachstum des Gletschers bedeuten. Tatsächlich zeigt der Gletscher im EZG

Schwarze Lüttschine allerdings einen Rückgang, wie Abbildung 4.16 verdeutlicht.

Bei der Engelberger Aa ist das Gütemaß weniger stark von SUB abhängig. Die OH kann auch beim WOF wieder stark kompensieren, was auf die Kompensierbarkeit des Lindström Maß zurückzuführen ist.

5.3.2 Monte-Carlo-Methode und Regionalisierte Sensitivitätsanalyse

Die aus den Monte-Carlo-Simulationen erzeugten Streudiagramme können keine Sensitivität der SUV-Parameter abbilden. Dies bedeutet allerdings nicht direkt, dass die SUV-Parameter nicht sensitiv sind. Sie können durch andere Parameter kompensiert werden und dadurch schlecht identifizierbar sein. Um die Identifizierbarkeit der Parameter zu überprüfen, wurde für jede mögliche Parameterkombination der beste Gütemaßwert aus den 20000 MC-Simulationen herausgesucht und als Heatmap dargestellt. Diese zeigten allerdings keine Trends, da sich die Anzahl der Simulationen als zu gering herausstellte. Es kann daher auch keine Aussage über die Identifizierbarkeit der Parameter getroffen werden.

Die RSA im Bezug auf das Lindström Maß identifiziert den SUB als am wenigsten sensitiven der drei SUV-Parameter. Für die beiden EZG Schwarze und Weisse Lüttschine ist die RM am sensitivsten, für die Engelberger Aa OH. Diese Ergebnisse stützen die Aussagen der graphischen Auswertung der Gütemaße. Für die abweichenden Ergebnisse könnte der Höhenunterschied der Einzugsgebiete relevant sein. Bei den Lüttschinen liegt eine deutlich größere Fläche oberhalb der höchstmöglichen Oberen Höhengrenze (hier 3000 m). Durch die Schneenumverteilung hat das gesamte Gebiet oberhalb der OH keine größeren Schneemengen als die Restschneemenge zulässt. Bei der Engelberger Aa ist die Fläche oberhalb 3000 m verhältnismäßig klein, die RM hat daher einen geringeren Einfluss. Hier ist die OH entscheidender, da diese bestimmt, wie groß die Fläche oberhalb der OH ist, von der Schnee umverteilt wird.

Die RSA mit SWE MANE als Gütemaß zeigt weniger deutliche Trends. Für die Schneeumverteilung sind interessanterweise alle drei SUV-Parameter für alle drei EZG wenig sensitiv. Die Analyse der Gütemaße hat zwar teilweise auf etwas stärkere Sensitivitäten der Parameter hingedeutet, allerdings auch gezeigt, wie stark die Parameter kompensiert werden können.

Führt man die RSA mit dem Schneebedeckungsgütemaß durch, zeigt sich, dass wieder die RM am sensitivsten ist, vor allem für die Schwarze und Weisse Lüttschine. Bei der Engelberger Aa zeigt sich dies weniger deutlich. Zu dem selben Ergebnis kommt auch die Analyse der Heatmaps. Diese zeigen starke Gütemaßänderungen bei der Variation dieses Parameters und dass die RM gut kompensieren kann. Der Unterschied zwischen den Einzugsgebieten ist vermutlich wieder auf die Gletscherbedeckung der EZG zurückzuführen. Bei größerer Gletscherbedeckung wie bei den Lüttschinen bestimmt die Restschneemenge wie viel Schnee auf die Gletscher beziehungsweise die gletscherfreien Flächen verteilt wird. Macht die Gletscherfläche nur einen kleinen Flächenanteil aus ist der Effekt geringer.

6

Kapitel 6

Schlussfolgerung

Die im HBV-Light-Modell implementierte Schneelumverteilungsroutine zeigt für unterschiedliche Parametrisierungen einen deutlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse der Schnee-, Gletscher- und Abflussvariablen. Neben der Variation der Modellausgaben für unterschiedliche Parameterkombinationen lassen sich Interaktionen und Kompensationseffekte zwischen den Schneelumverteilungsparametern ausmachen.

Werden bei der Modellkalibrierung die Schneelumverteilungsparameter mit kalibriert, zeigt sich, dass der automatisierte Kalibrierungsalgorithmus hauptsächlich Schneelumverteilungsparameter wählt, die den Einfluss der Schneelumverteilung auf das Einzugsgebiet möglichst gering halten. Daraus lässt sich ableiten, dass das Modell auch ohne Schneelumverteilung sehr gute Gütemaße erreichen würde. Trotzdem ist, wie Freudiger et al. (2017) gezeigt haben, die Integration einer Schneelumverteilungsroutine in hydrologische Modelle für alpine Einzugsgebiete wichtig, da die Speicherung von Wasser in den Schneetürmen sonst durch andere Effekte im Modell kompensiert wird. Außerdem ist nur so eine realistische Modellierung der SWE-Verteilung möglich (Freudiger et al., 2017). Beim beobachteten Kalibrierverhalten scheint auch die Schneelumverteilung durch andere Parameter kompensiert zu werden. Um dies zu umgehen, kann entweder der Parameterraum für die Schneelumverteilungsparameter eingeschränkt oder aber die Kalibrierung stärker an Schneegütemaßen orientiert werden.

Die Kalibrierung für verschiedene Gebietsreaktionen funktioniert am besten, wenn unterschiedliche Typen von Beobachtungsdaten und verschiedene Zielfunktionen mit einfließen. Es ist daher sinnvoll, SWE- und Schneebedeckungsreferenzdaten für einen längeren Zeitraum als hier verwendet in die Kalibrierung zu integrieren.

Die Wertebereiche für die Umverteilungsparameter sind in dieser Arbeit groß gewählt, um in einem möglichst großen Rahmen die Schneelumverteilungsparameter zu testen. Für zukünftige Modellierungen erscheint es allerdings sinnvoll, die Kalibrierbereiche einzuschränken und an die Eigenschaften des Einzugsgebiets anzupassen. Besonders die Höhenausdehnung und Vergletscherung des Einzugsgebiets zeigen einen großen Einfluss auf die Schneelumverteilung. Da die Schneelumverteilung gleichmäßig auf die Gletscher im EZG und auf die gletscherfreien Flächen aufgeteilt wird, entstehen je nach Größe des Schneelumverteilungsbereiches unterschiedliche Verhältnisse zwischen vergletscherten und unvergletscherten Flächen. Dadurch wird bei gleichen Parametern der Schneelumverteilung, stark abhängig vom Einzugsgebiet, von

sehr viel bis sehr wenig Schnee in den Schneenumverteilungsbereich beziehungsweise auf den Gletscher umverteilt.

Die Variation der Schneenumverteilungsparameter hat neben dem direkten Einfluss auf die Schneehöhen und -verteilung ebenfalls Einfluss auf den Abfluss, was sich in variierenden Modellausgaben für den Abfluss und Abflussgütemaße zeigt. Quantifiziert durch das Lindström Maß wird der Abfluss am besten simuliert, wenn der Einfluss der Schneenumverteilung möglichst gering gehalten wird. Dies ist durch Kombinationen mit großen Restschneemengen und Schneenumverteilungsbereichen möglich. Bei großen Restschneemengen wird wenig Schnee aus den Hochlagen in die tieferen Gebiete und zusätzlich durch große Schneenumverteilungsbereiche auf eine große Fläche verteilt. Insgesamt wird der Abfluss durch den in dieser Arbeit verwendeten kalibrierten Parametersatz unterschätzt, was hauptsächlich durch die Unterschätzung in den Sommermonaten hervorgerufen wird.

Die Streuung der Simulationsergebnisse durch die Variation der Schneenumverteilungsparameter zeigt sich am stärksten bei der Schneeverteilung des gesamten EZG. Wird nur der Bereich unterhalb 2500 m untersucht, ist die Variation geringer. Für den EZG-Bereich unter 2500 m wird der größte Einfluss der Schneenumverteilung während der Schneeakkumulation beobachtet, da die Schneenumverteilung im Modell nur während des Schneeniederschlags auftreten kann.

Für die Schneebedeckung hingegen zeigt sich ein anderes Verhalten. Hier tritt die größte Variation während der Schneeschmelze und damit zeitlich verzögert zur Schneenumverteilung auf. Das Gütemaß der Schneebedeckung, SnowCover RMSE, erreicht die besten Werte, wenn viel Schnee umverteilt, beziehungsweise der Schnee auch in tiefe Lagen umverteilt wird. Hier hat sich besonders eine Höhe von circa 1800 m, unter die Schnee verteilt werden muss, als Grenzwert für gute Gütemaße gezeigt. Die höchsten Gütemaße werden für eine Obere Höhengrenze von 2400 m bei großen SUB und kleinen RM erzielt. Die hohen Gütemaße zeigen, dass bereits in der aktuellen Form der Schneenumverteilung die Schneebedeckung sehr gut modelliert wird. Das Gütemaß für die Schneehöhen (in mm SWE), SWE MANE, zeigt für EZG mit deutlich unterschiedlicher Vergletscherung sehr verschiedene Ergebnisse. Das EZG Engelberger Aa hat nur kleine Gletscherflächen und zeigt für geringe Schneehöhen schlechte Gütemaßwerte. Für das EZG Schwarze Lütschine, welches eine stärkere Vergletscherung aufweist, werden die Gütemaße für geringe Schneehöhen besser. So wird das SWE MANE etwa für kleine SUB besser, da viel Schnee auf den Gletscher verteilt wird und verhältnismäßig wenig auf den unvergletscherten Flächen zurückbleibt. Problematisch bei diesem Gütemaß ist, dass es nur für die EZG-Bereiche unterhalb 2500 m berechnet wird. Reichen Gebiete, wie beispielsweise die Schwarze und die Weisse Lütschine, deutlich höher, werden große Teile des EZG nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch nicht ohne Weiteres zu beheben, da oberhalb von 2500 m die Messnetzdichte sehr gering ist (Stahl, 2016).

Reale Beobachtungsdaten der Schneehöhen werden durch das Modell für tiefe und mittlere Lagen gut modelliert. Je höher die Messstation liegt, desto größer wird jedoch die Diskrepanz zwischen den simulierten und den gemessenen Daten.

Für die zukünftige Modellierung alpiner EZG sollte die klimatische Schneegrenze für das zu modellierende Einzugsgebiet berücksichtigt werden. Wenn die OH größer als die klimatische Schneegrenze gewählt wird, entsteht ein Höhenband, das im Sommer nicht vollständig schnee-

frei wird und auf das zusätzlich Schnee umverteilt wird. Das kann zur Bildung ungewollter Schneetürme in niedrigeren Lagen führen. Die Obere Höhengrenze sollte sich daher an der klimatischen Schneegrenze orientieren. Wie sich gezeigt hat, lässt sich diese klimatische Schneegrenze aus den Analysen ableiten, sollten keine EZG-spezifischen Daten vorliegen. Ein mögliches Vorgehen ist es die OH auf einen Wert festzulegen und die anderen SUV-Parameter zu kalibrieren. Da für sehr große Parameterwerte die Schneenumverteilung kaum einen Einfluss zeigt und bei sehr kleinen Parameterwerten unrealistische Modellausgaben entstehen, sollten die Parameterräume für die RM und den SUB für die Kalibrierung kleiner gewählt werden.

Literaturverzeichnis

- Ascough, J. C., T. Green, L. Ma & L. R. Ahjua (2005). „Key criteria and selection of sensitivity analysis methods applied to natural resource models“. In: *Proceedings of MODSIM 2005 International Congress* 01, S. 170–176.
- ASG Rhein: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels (2018). URL: <http://ihf-projektplattform.uni-freiburg.de/asgrhein> (besucht am 22.03.2019).
- Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. Norrköping.
- Bernhardt, M. & K. Schulz (2010). „SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport“. In: *Geophysical Research Letters* 37.11, S. 1–6.
- Bernhardt, M. (2008). „Using wind fields from a high resolution atmospheric model for simulating snow dynamics in mountainous terrain“. Dissertation. München: Ludwigs-Maximilians-Universität.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer*. 2nd ed. Hoboken: Wiley.
- Beven, K. & A. Binley (1992). „The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction“. In: *Hydrological Processes* 6.3, S. 279–298.
- Bronstert, A. (2016). „Abflussbildung in der Landschaft: Abflussbildung infolge von Schnee- und Eisschmelze“. In: *Hydrologie*. Hrsg. von N. Fohrer. Basics. Bern: Haupt, S. 160–163.
- Clark, M. P., J. Hendrikx, A. G. Slater, D. Kavetski, B. Anderson, N. J. Cullen, T. Kerr, E. Örn Hreinsson & R. A. Woods (2011). „Representing spatial variability of snow water equivalent in hydrologic and land-surface models: A review“. In: *Water Resources Research* 47.7, S. 1–23.
- Dormann, C. F. (2013). *Parametrische Statistik: Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fellin, W. (2013). *Einführung in Eis-, Schnee und Lawinenmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Freudiger, D., I. Kohn, J. Seibert, K. Stahl & M. Weiler (2017). „Snow redistribution for the hydrological modeling of alpine catchments“. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 4.5, S. 1–16.
- Frey, S. & H. Holzmann (2015). „A conceptual, distributed snow redistribution model“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 19.11, S. 4517–4530.
- Haberlandt, U. (2016). „Niederschlag: Schneeniederschlag“. In: *Hydrologie*. Hrsg. von N. Fohrer. Basics. Bern: Haupt, S. 65–67.
- HBV-Light: Help HBV-Light (2018).
- Hörmann, G. (2016). „Hydrologische Modelle“. In: *Hydrologie*. Hrsg. von N. Fohrer. Basics. Bern: Haupt, S. 231–238.

- Jonas, T., C. Marty & J. Magnusson (2009). „Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps“. In: *Journal of Hydrology* 378.1-2, S. 161–167.
- Kuhn, M. (2003). „Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrometeorological model“. In: *Journal of Hydrology* 282.1-4, S. 95–103.
- Lehning, M., H. Löwe, M. Ryser & N. Raderschall (2008). „Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain“. In: *Water Resources Research* 44.7, S. 123.
- Li, G., Z. S. Wang & N. Huang (2018). „A Snow Distribution Model Based on Snowfall and Snow Drifting Simulations in Mountain Area“. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 46.5, S. 1–11.
- Liston, G. E. (2004). „Representing Subgrid Snow Cover Heterogeneities in Regional and Global Models“. In: *Journal of Climate* 17.6, S. 1381–1397.
- Meyer, J., I. Kohn, K. Stahl, K. Hakala, J. Seibert & A. J. Cannon (2019). „Effects of univariate and multivariate bias correction on hydrological impact projections in alpine catchments“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 23.3, S. 1339–1354.
- Müller, F., T. Caflish & G. Müller (1976). *Firn und Eis der Schweizer Alpen: Gletscherinventar: Geographisches Institut*. Hrsg. von Vdf Hochschulverlag. Zürich.
- Paul, F., H. Frey & R. Le Bris (2011). „A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: challenges and results“. In: *Annals of Glaciology* 52.59, S. 144–152.
- Pianosi, F., K. Beven, J. Freer, J. W. Hall, J. Rougier, D. B. Stephenson & T. Wagener (2016). „Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow“. In: *Environmental Modelling & Software* 79, S. 214–232.
- Pianosi, F. & T. Wagener (2016). „Understanding the time-varying importance of different uncertainty sources in hydrological modelling using global sensitivity analysis“. In: *Hydrological Processes* 30.22, S. 3991–4003.
- QGIS Development Team (2018). *QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project*. URL: <http://qgis.osgeo.org>.
- R Core Team (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- RStudio Team (2018). *RStudio: Integrated Development for R*. Boston, MA. URL: <http://www.rstudio.com/>.
- Saltelli, A., K. Chan & E. M. Scott (2000). *Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis*. Chichester: Wiley.
- Seibert, J. & M. J. P. Vis (2012). „Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 16.9, S. 3315–3325.
- Seibert, J. (2005). *HBV light User's Manual: version 2*.
- Seibert, J., M. J. P. Vis, I. Kohn, M. Weiler & K. Stahl (2018). „Technical note: Representing glacier geometry changes in a semi-distributed hydrological model“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 22.4, S. 2211–2224.
- Song, X., J. Zhang, C. Zhan, Y. Xuan, M. Ye & C. Xu (2015). „Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications“. In: *Journal of Hydrology* 523, S. 739–757.

- Spear, R. C. & G. M. Hornberger (1980). „Eutrophication in peel inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis“. In: *Water Research* 14.1, S. 43–49.
- Stahl, K., M. Weigel, D. Freudiger, I. Kohn, J. Seibert, M. Vis, K. Gerlinger & M. Böhm (2016). *Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zufüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels: Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)*. URL: <https://www.chr-khr.org/de/veroeffentlichung>.
- Stahl, K. (2016). „Hydrologie der Hochgebirge“. In: *Hydrologie*. Hrsg. von N. Fohrer. Basics. Bern: Haupt, S. 287–298.
- Strasser, U., M. Bernhardt, M. Weber, G. E. Liston & W. Mauser (2008). „Is snow sublimation important in the alpine water balance?“ In: *The Cryosphere* 2.1, S. 53–66.
- Tang, Y., P. Reed, T. Wagener & K. van Werkhoven (2007). „Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 11.2, S. 793–817.
- van Tiel, M., A. J. Teuling, N. Wanders, M. J. P. Vis, K. Stahl & A. F. van Loon (2018). „The role of glacier changes and threshold definition in the characterisation of future streamflow droughts in glacierised catchments“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 22.1, S. 463–485.
- Vögeli, C., M. Lehning, N. Wever & M. Bavay (2016). „Scaling Precipitation Input to Spatially Distributed Hydrological Models by Measured Snow Distribution“. In: *Frontiers in Earth Science* 4, S. 1–15.
- Warscher, M., U. Strasser, G. Kraller, T. Marke, H. Franz & H. Kunstmann (2013). „Performance of complex snow cover descriptions in a distributed hydrological model system: A case study for the high Alpine terrain of the Berchtesgaden Alps“. In: *Water resources research* 49.5, S. 2619–2637.
- Young, P. C. (o.D.). „A general theory of modelling for badly defined dynamic systems“. In: *Modeling, identification and Control in Environmental Systems*. Hrsg. von G. C. Vansteenkiste. Bd. 01. Amsterdam: North Holland, S. 103–135.

A

Anhang A

Ergebnisse Engelberger Aa

Kalibrierung

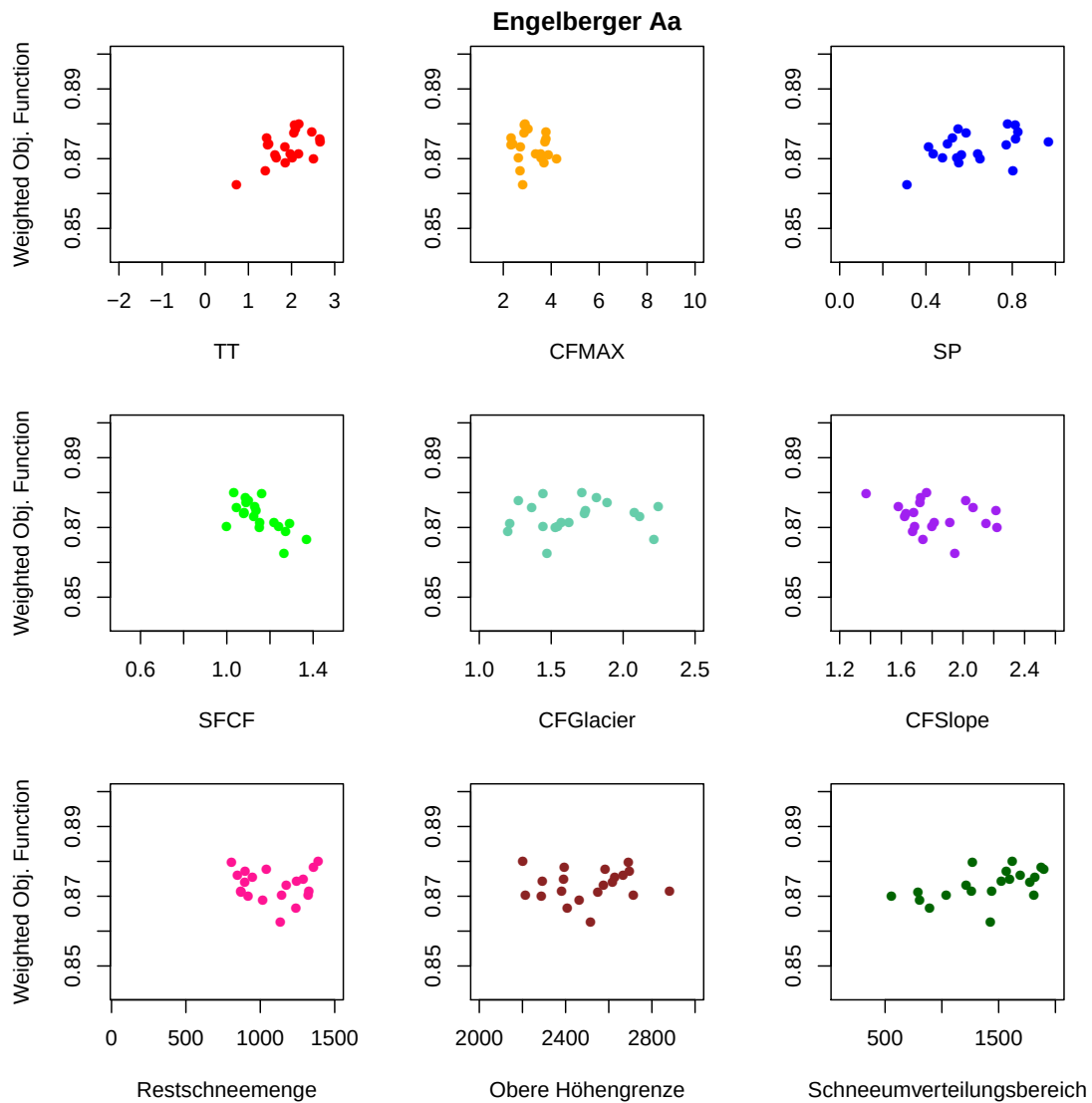


Abbildung A.1: Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Engelberger Aa.

Zeitreihen

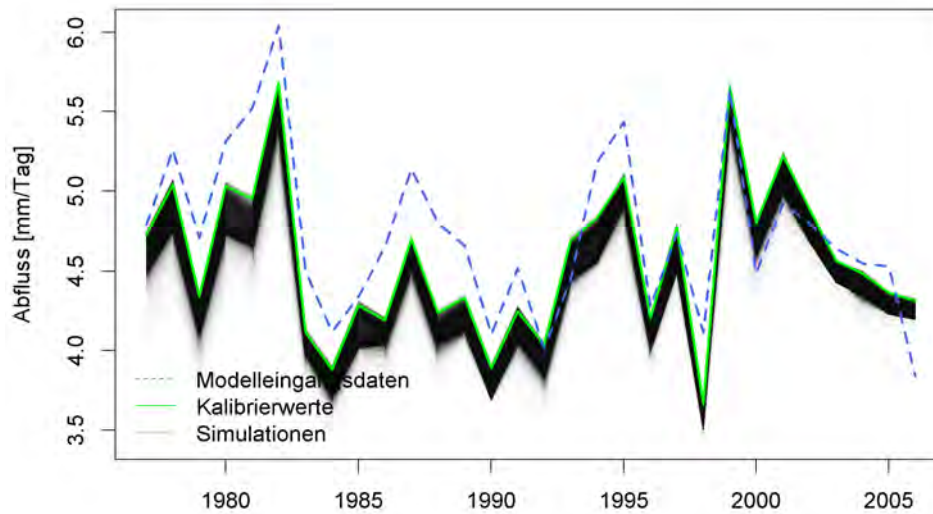


Abbildung A.2: Abflusszeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

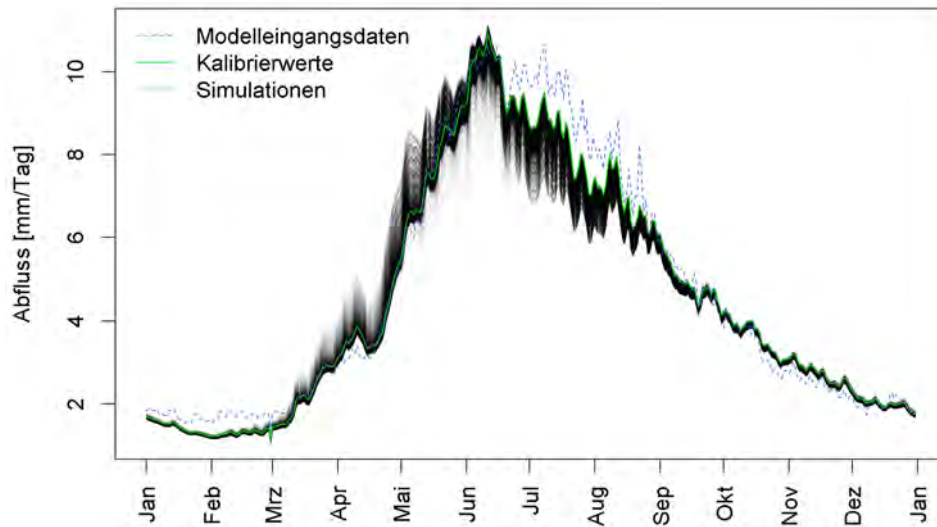


Abbildung A.3: Abflussregime der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

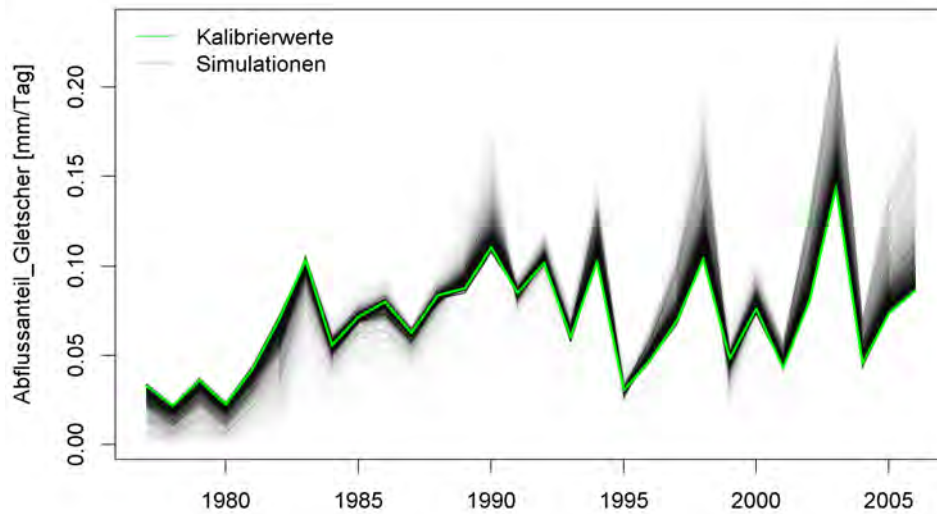


Abbildung A.4: Abfluss der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.



Abbildung A.5: Abflussregime der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

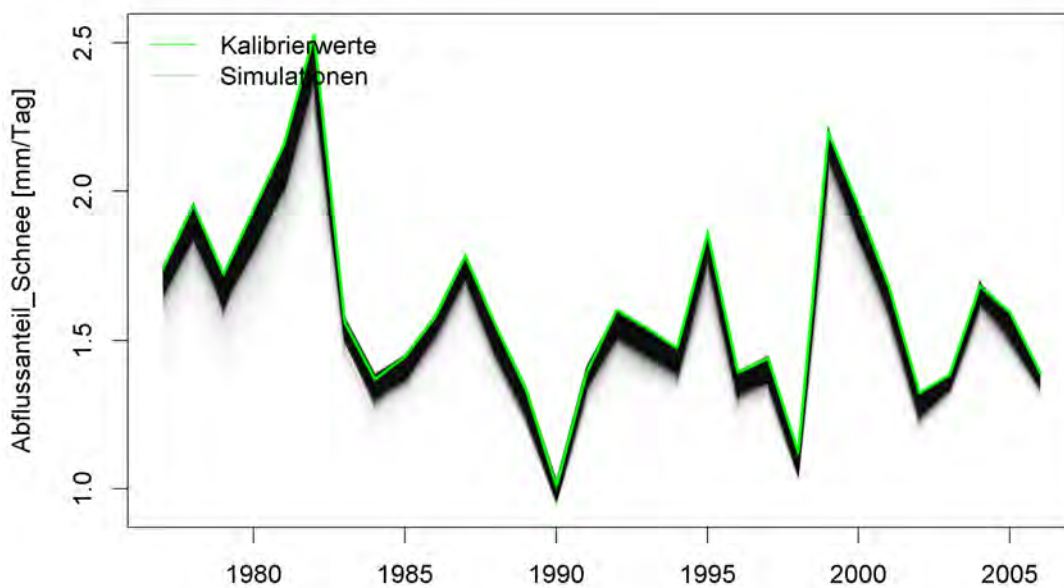


Abbildung A.6: Abfluss der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

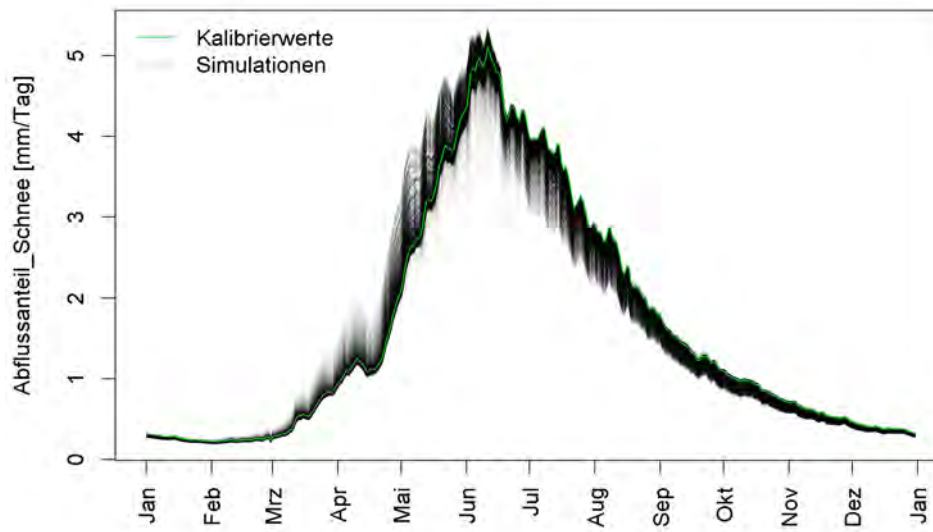


Abbildung A.7: Abflussregime der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

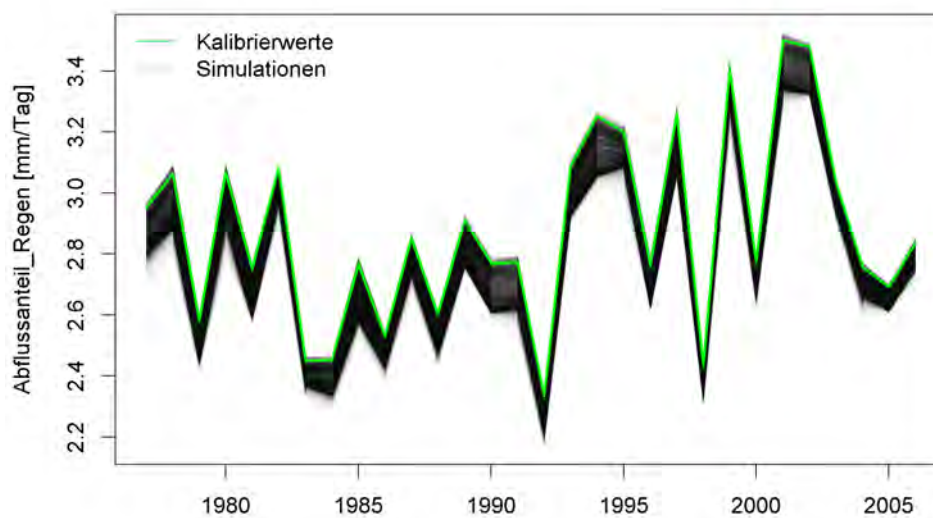


Abbildung A.8: Abfluss Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.



Abbildung A.9: Abflussregime Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

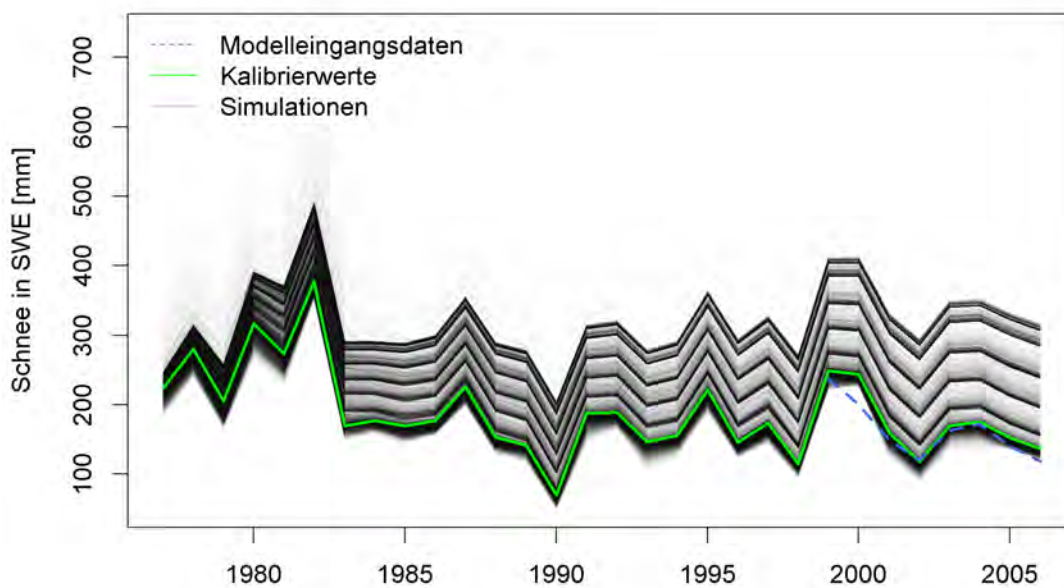


Abbildung A.10: Schneezeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

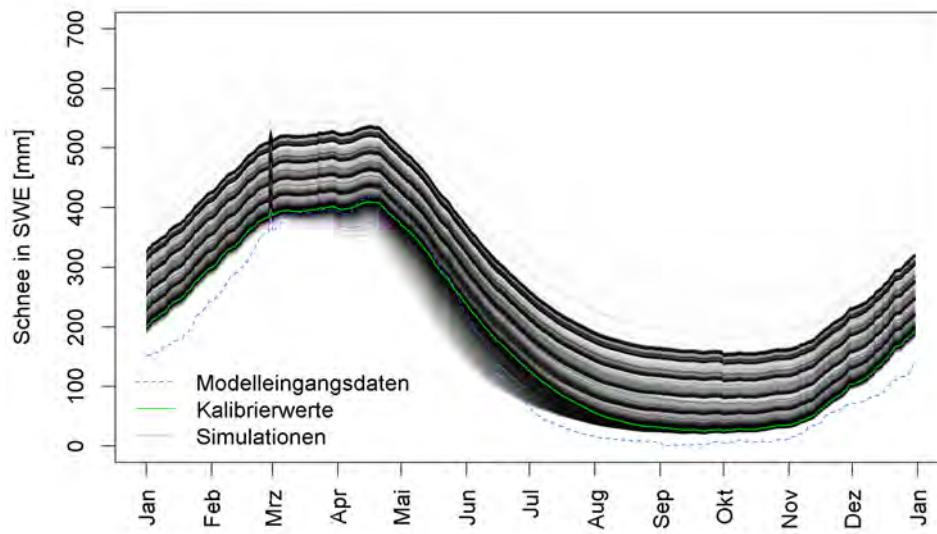


Abbildung A.11: Schneeregime der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

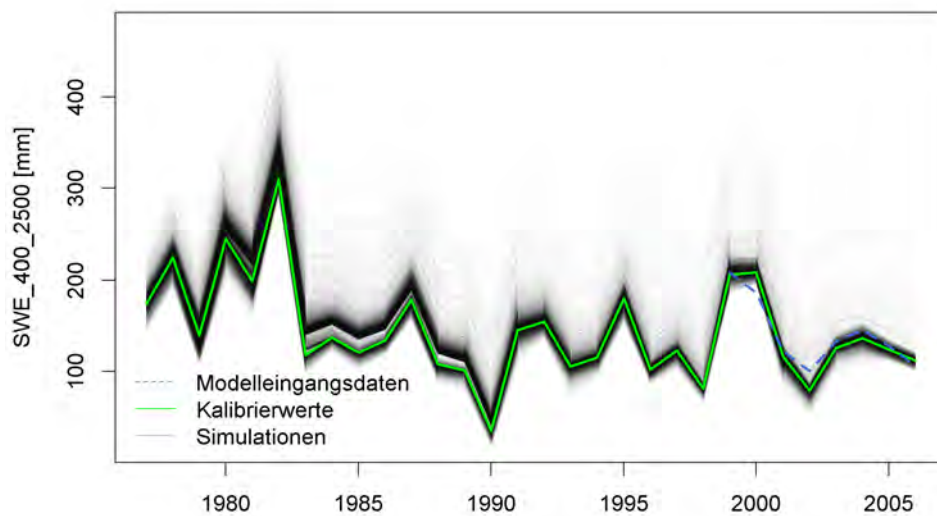


Abbildung A.12: Schneezeitreihe unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

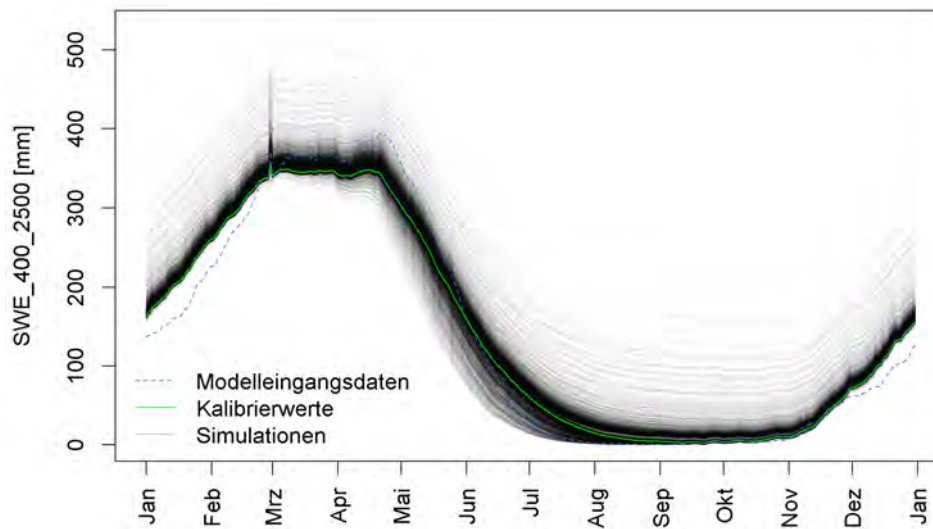


Abbildung A.13: Schneeregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

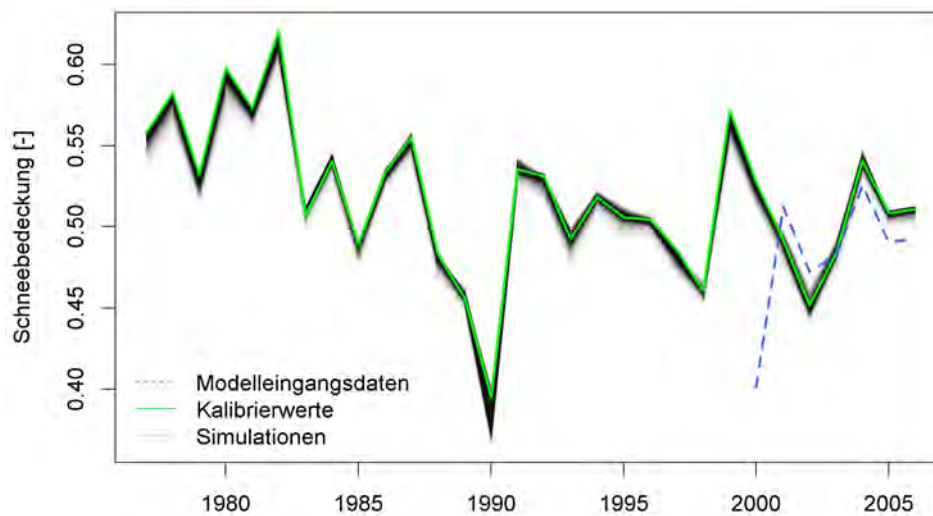


Abbildung A.14: Zeitreihe der Schneebedeckung unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

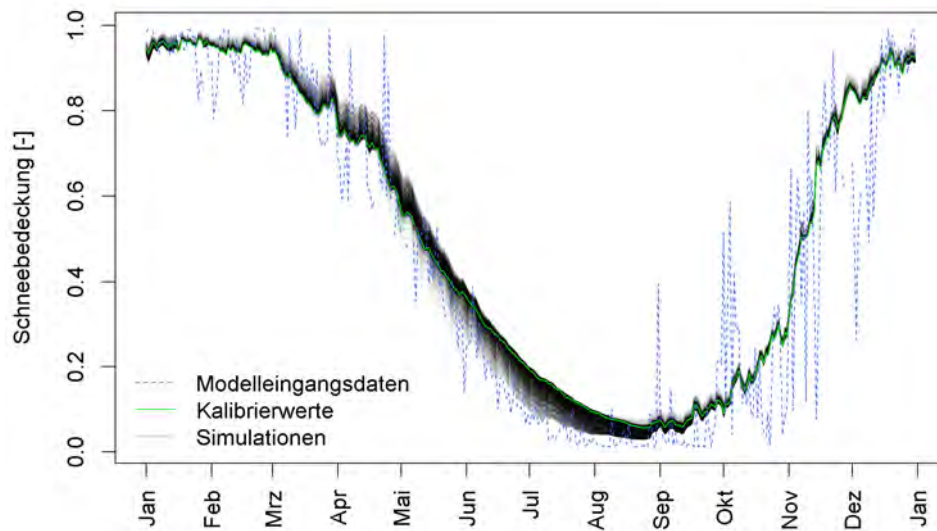


Abbildung A.15: Schneebedeckungsregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

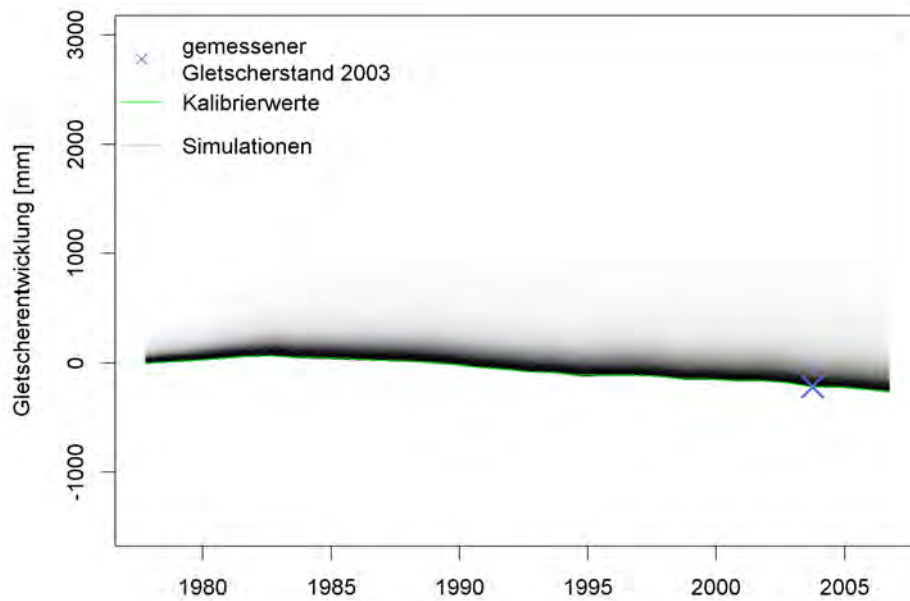
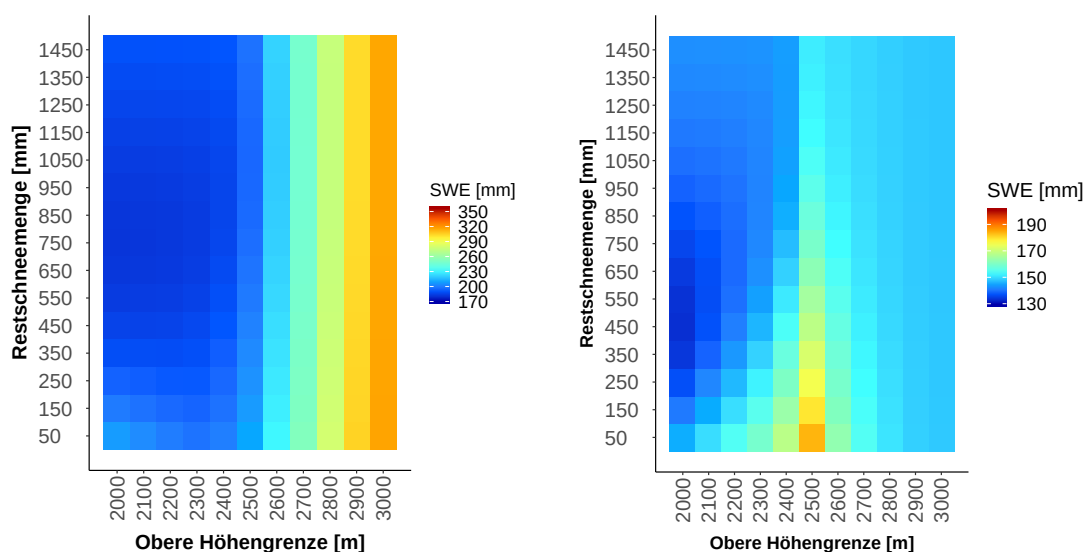


Abbildung A.16: Gletscherentwicklung der Simulationen und dem Kalibrierwert. Als Referenzwert der Gletscherstand von 2003. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

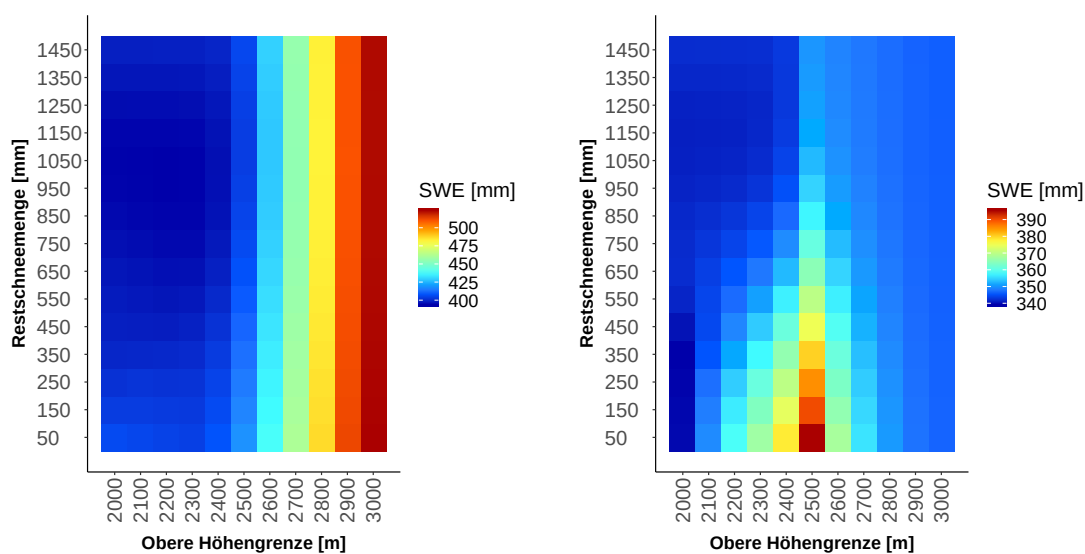
Schneehöhen



(a) Schnee gesamtes EZG

(b) SWE 2500

Abbildung A.17: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über SUB wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.



(a) Mittleres SWE im gesamten EZG

(b) Mittleres SWE unter 2500 m

Abbildung A.18: Mittlere Schneehöhen am 1. April in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über die Schneehöhen des SUB wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

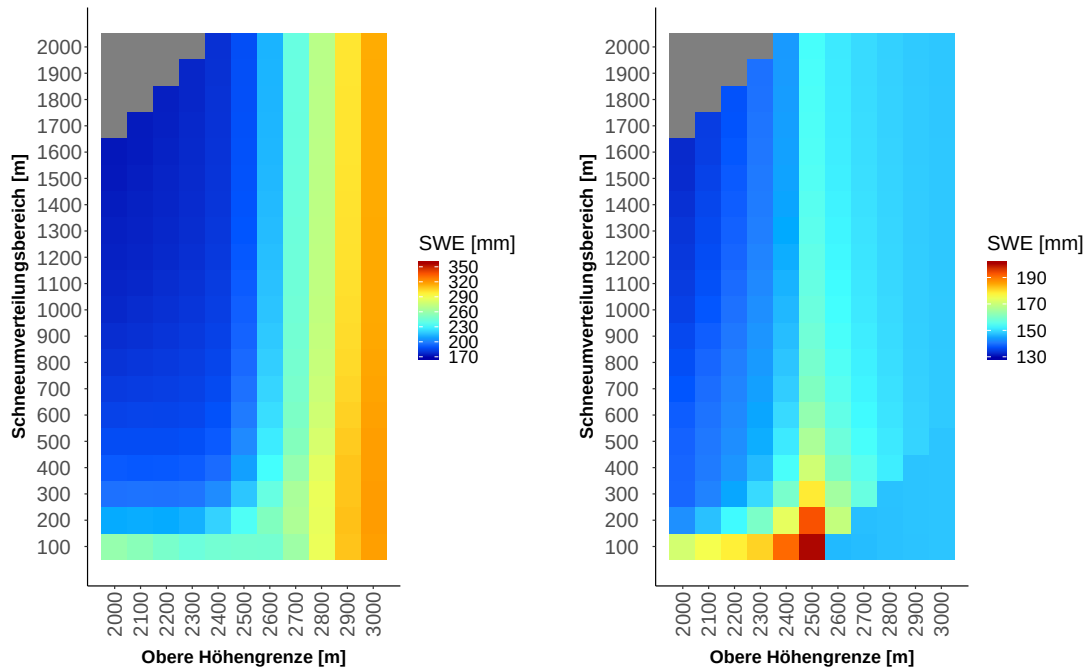


Abbildung A.19: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und OH. Über die Schneehöhen der RM wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

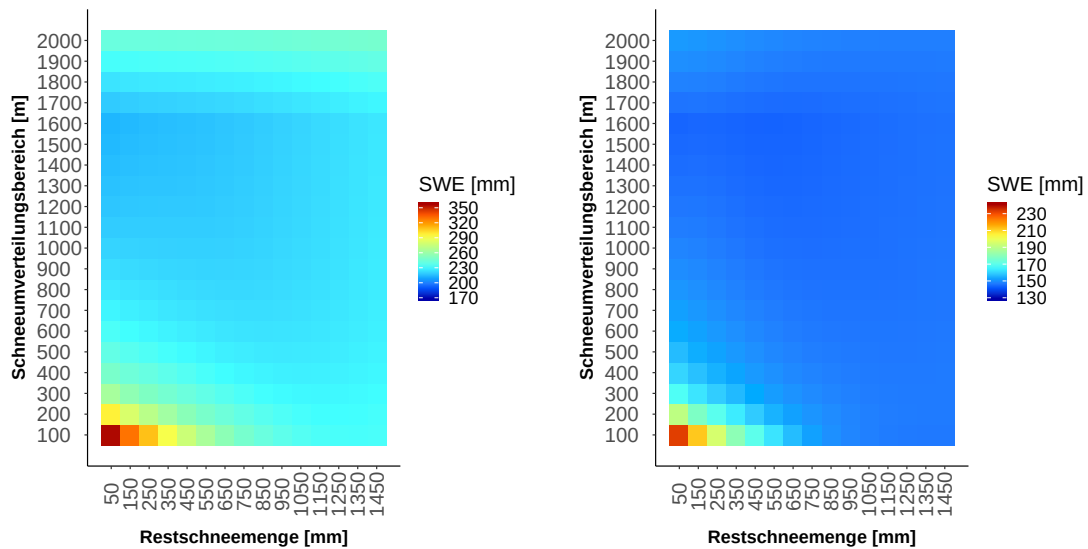


Abbildung A.20: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und RM. Über die Schneehöhen der OH wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

Schneegrenzen

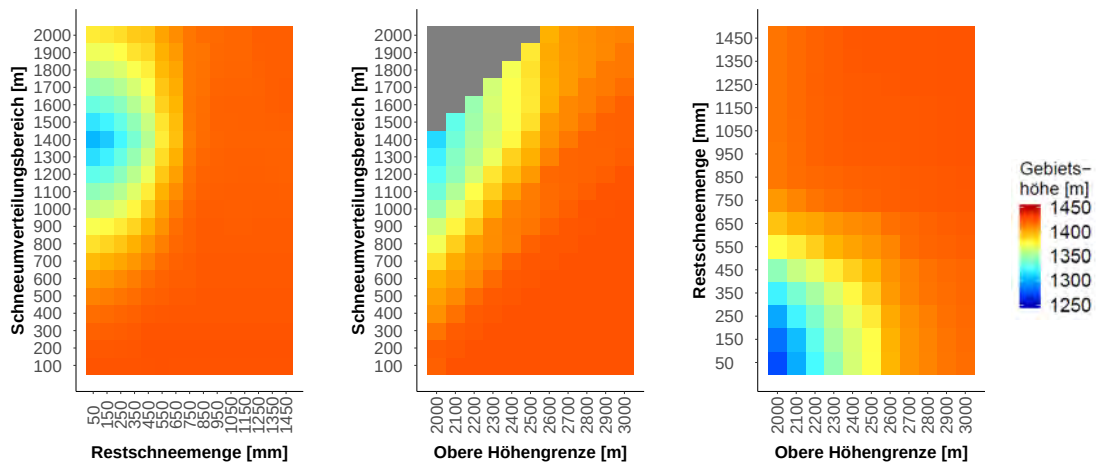


Abbildung A.21: Mittlere Gebietshöhe, ab der am 1. April Schnee liegt für die verschiedenen Parameterkombinationen. Links: Über OH gemittelt, Mitte: Über RM gemittelt, Rechts: Über SUB gemittelt. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

Graphische Auswertung der Gütemaße

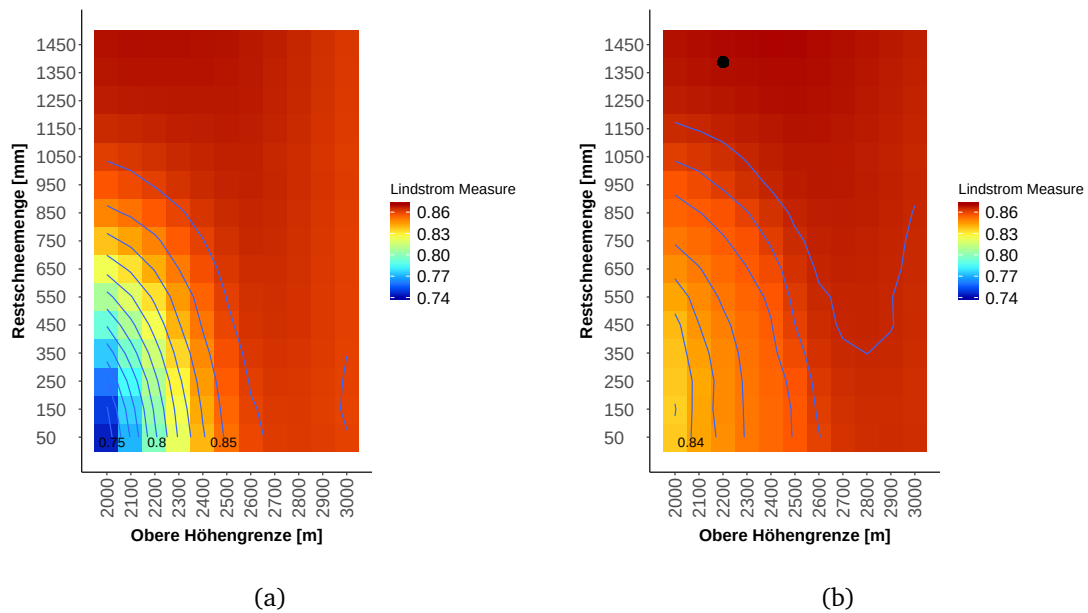


Abbildung A.22: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1600 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

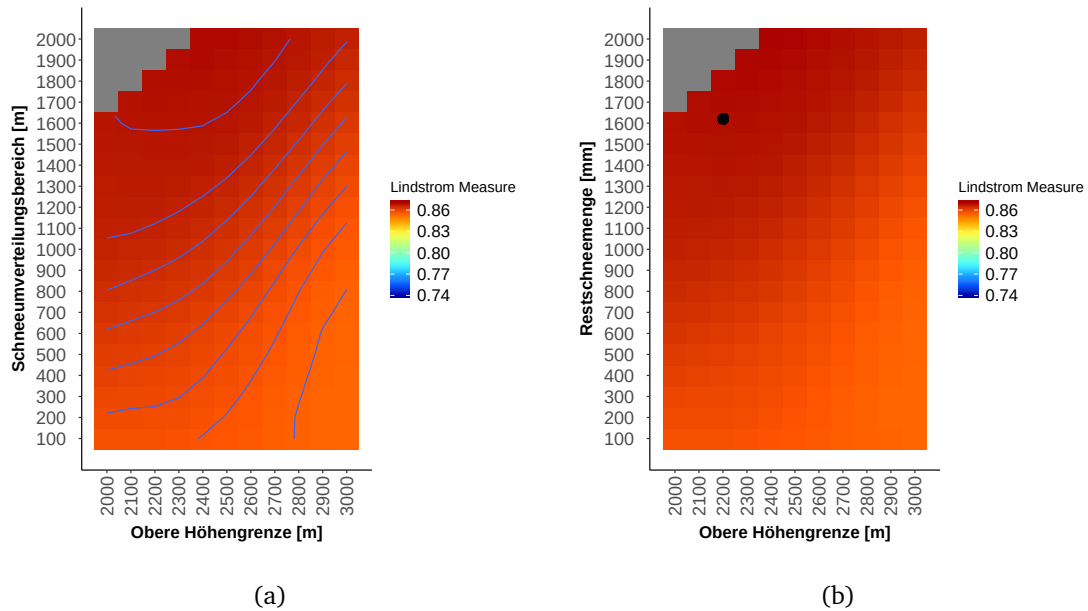


Abbildung A.23: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1350 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

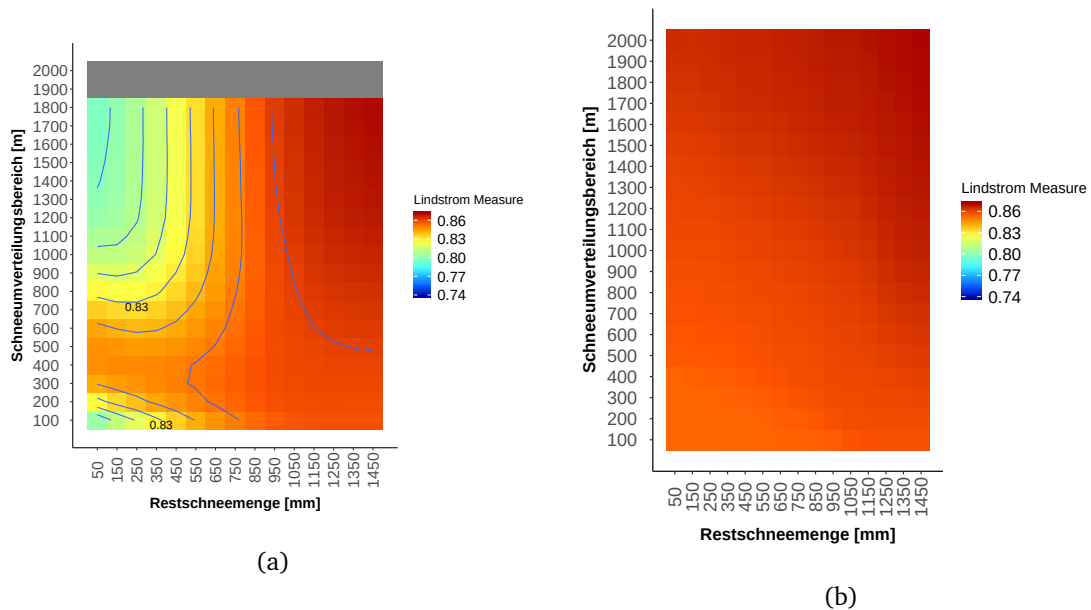


Abbildung A.24: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen SUB und RM. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

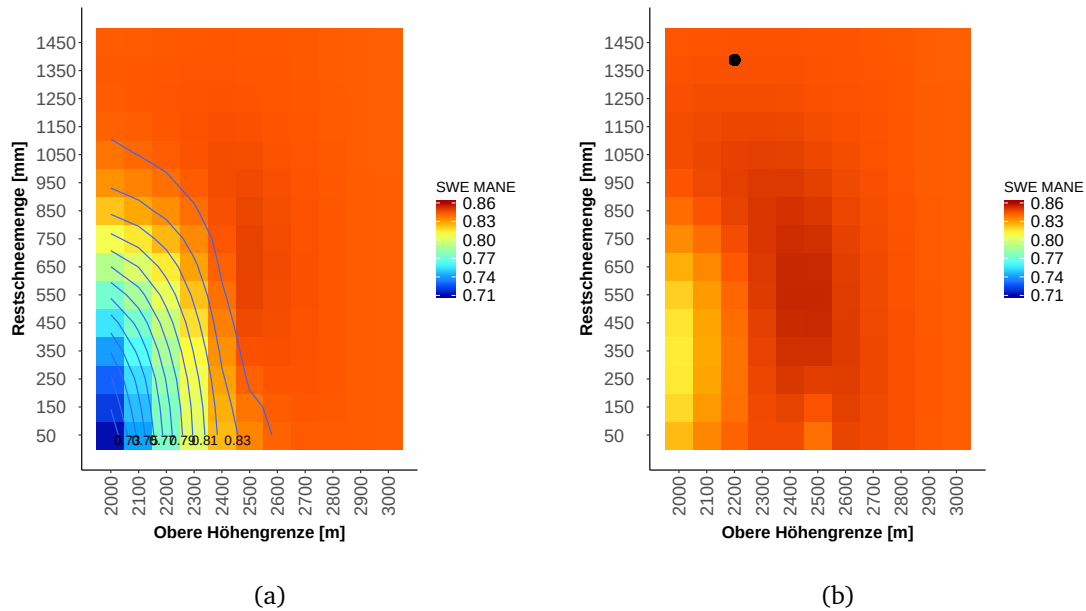


Abbildung A.25: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1600 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

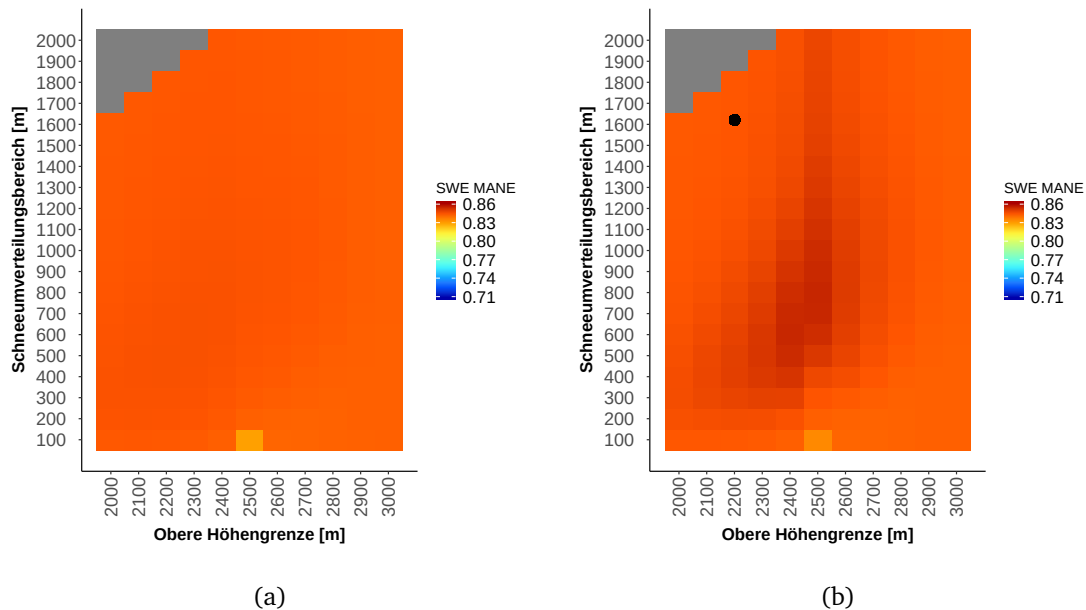


Abbildung A.26: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1350 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

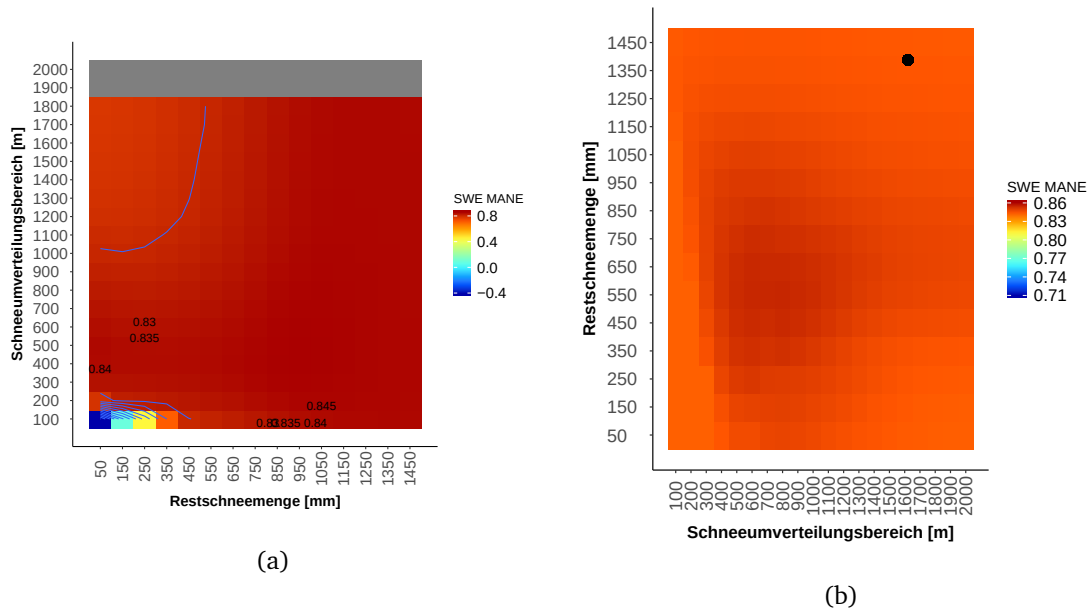


Abbildung A.27: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

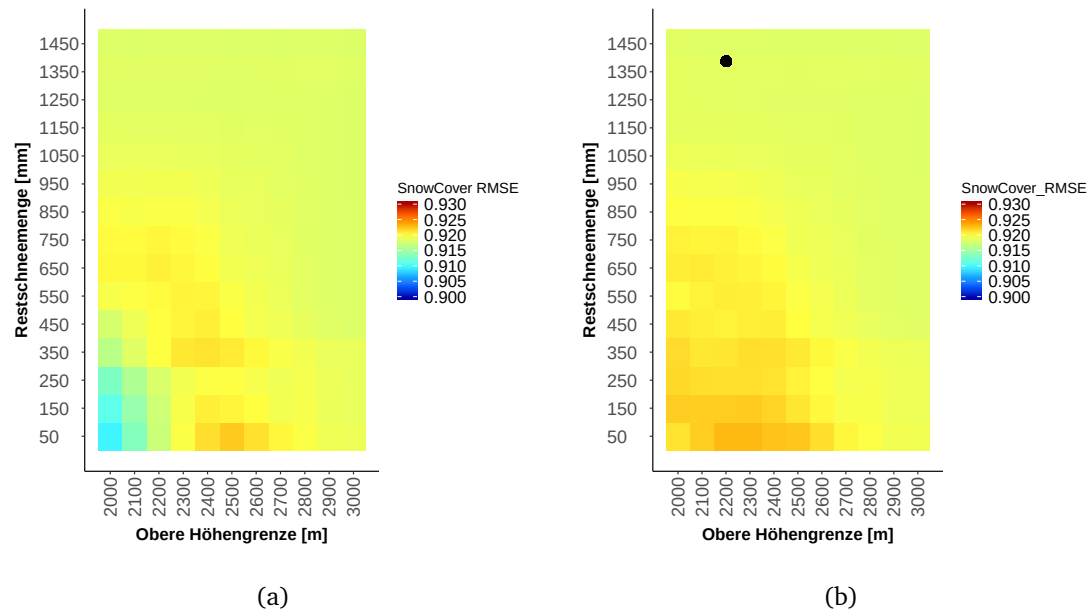


Abbildung A.28: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Die SUB ist auf den Kalibrierwert von 1600 m fixiert. (b) Die SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

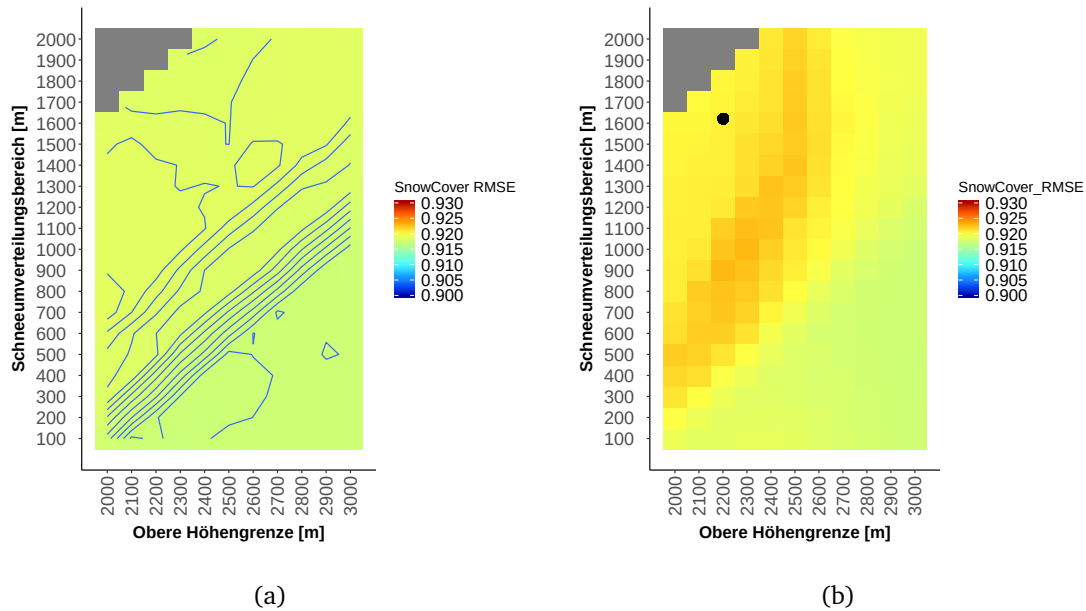


Abbildung A.29: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1350 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

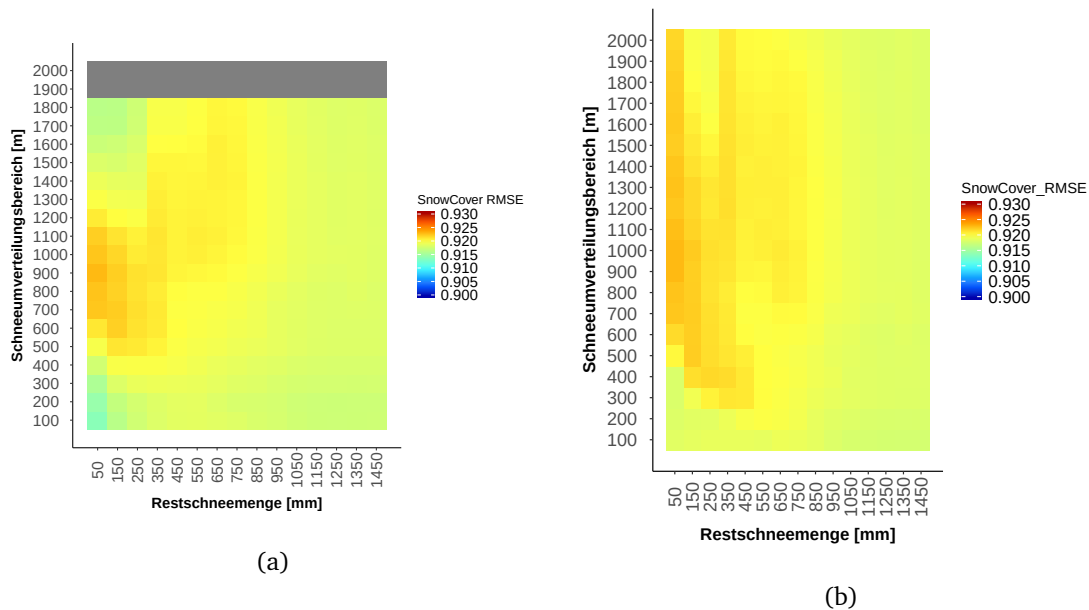


Abbildung A.30: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

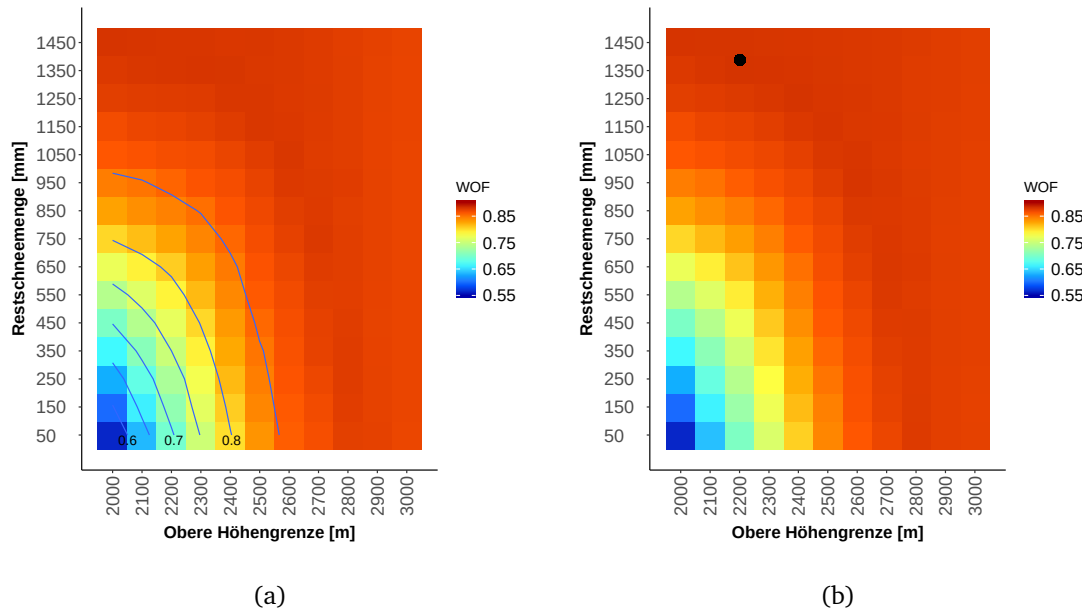


Abbildung A.31: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1600 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

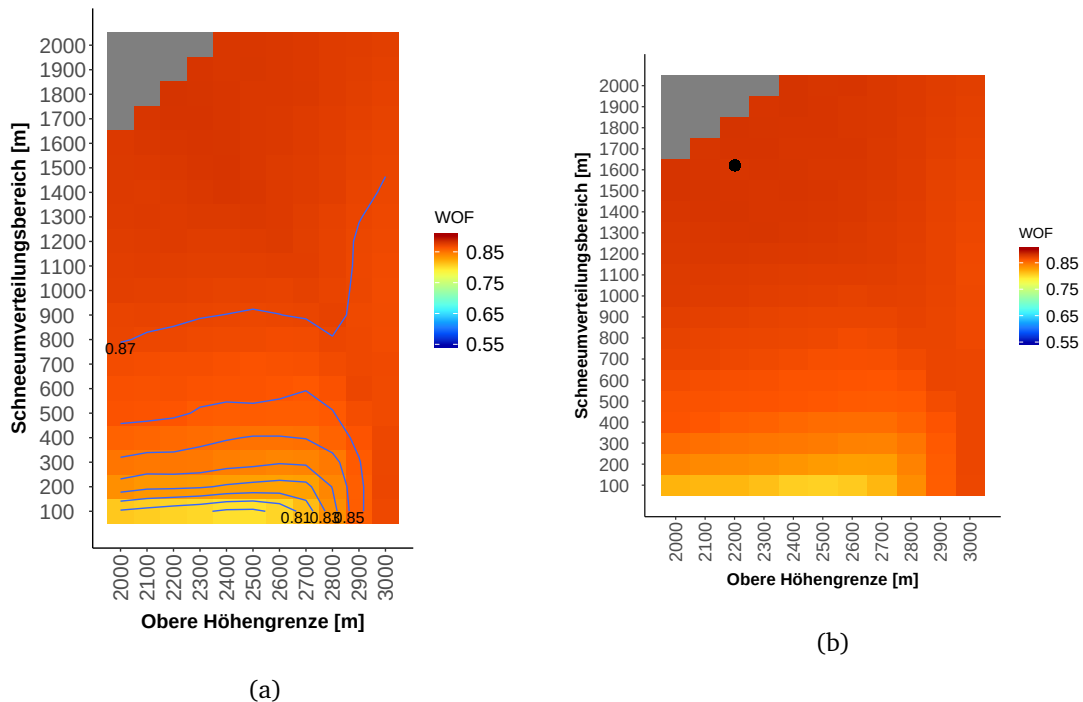


Abbildung A.32: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1350 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

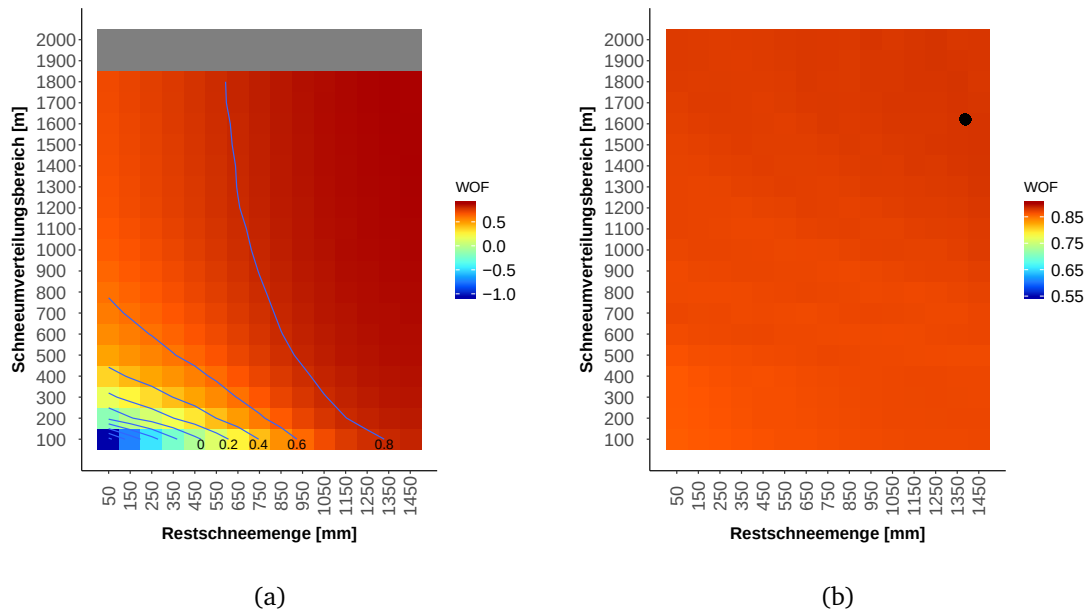


Abbildung A.33: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2200 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Engelberger Aa.

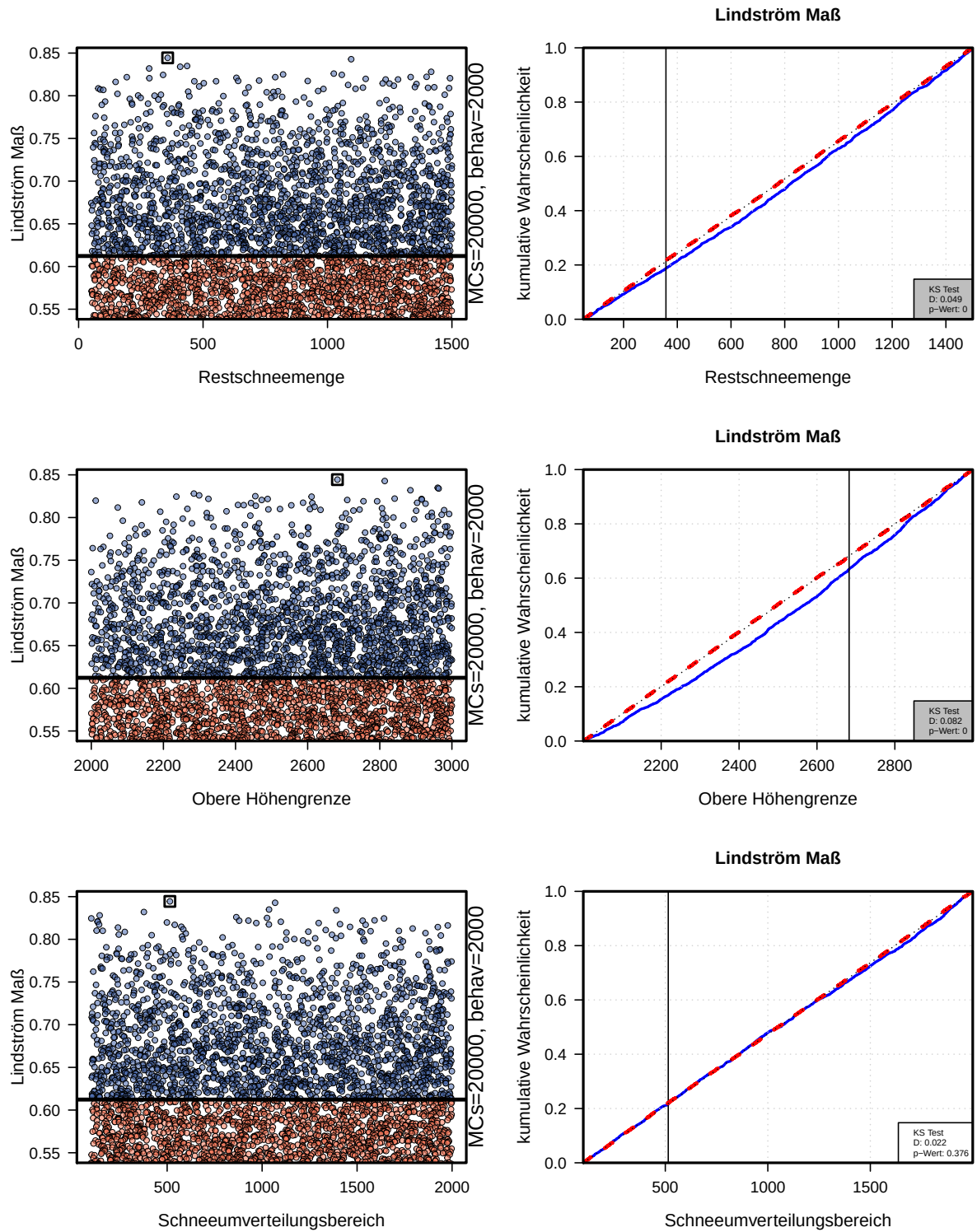


Abbildung A.34: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Engelberger Aa. Betrachtetes Gütemaß: Lindström Maß

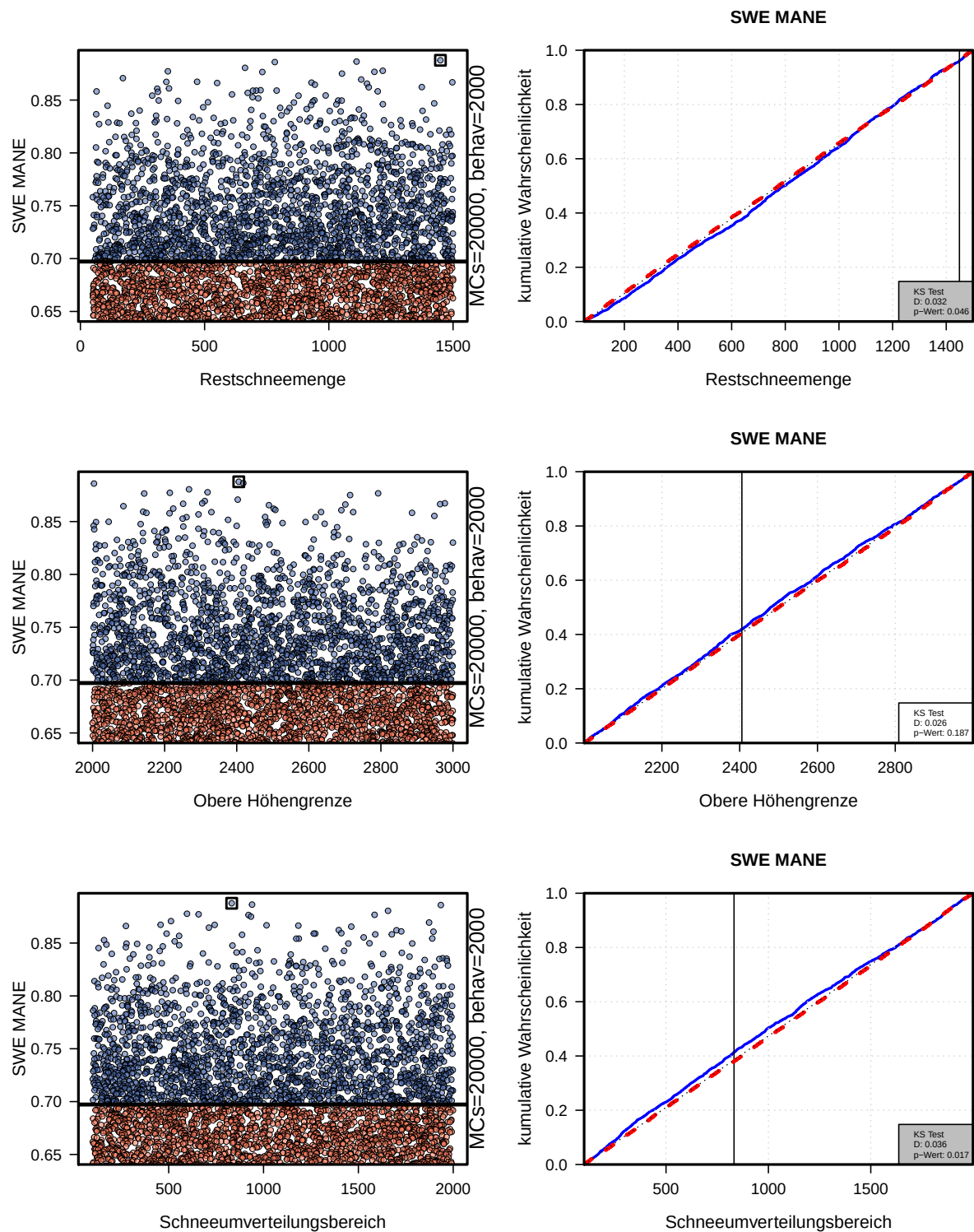


Abbildung A.35: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Engelberger Aa. Betrachtetes Gütemaß: SWE MANE

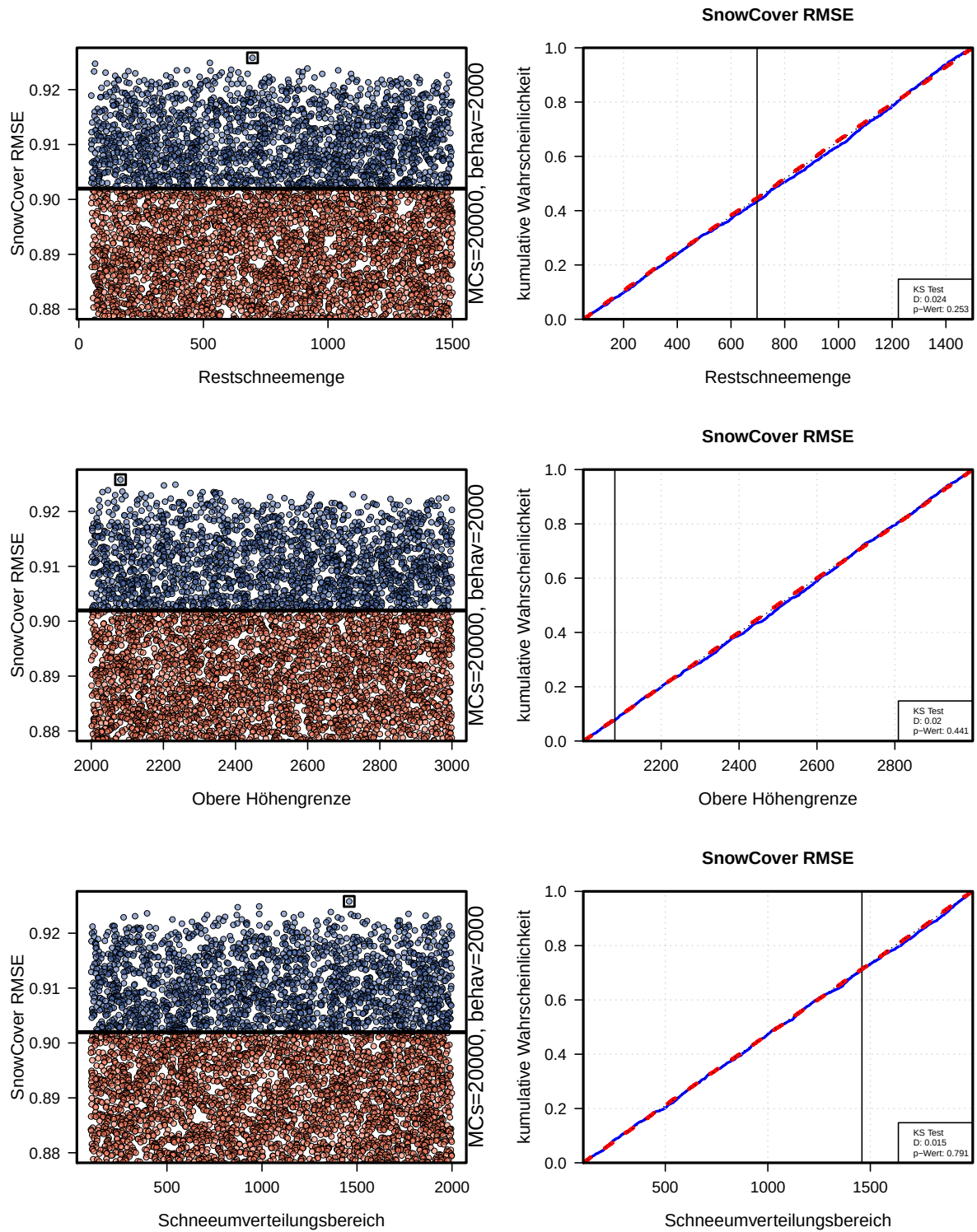


Abbildung A.36: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Engelberger Aa. Betrachtetes Gütemaß: SnowCover RMSE.

Weisse Lutschine

Kalibrierung

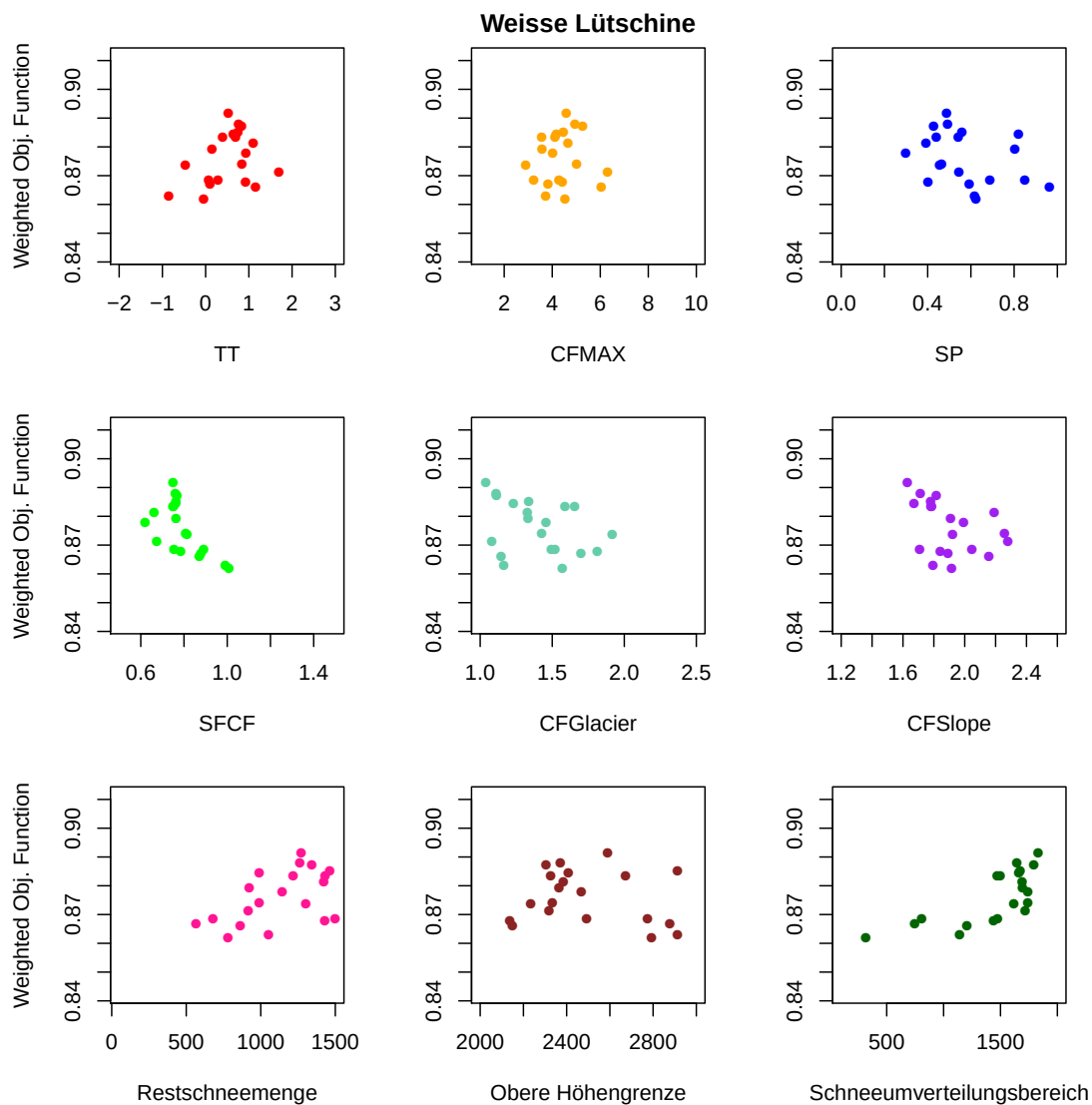


Abbildung A.37: Ergebnisse der Kalibrierung der Schneeparameter für das EZG Weisse Lutschine.

Zeitreihen

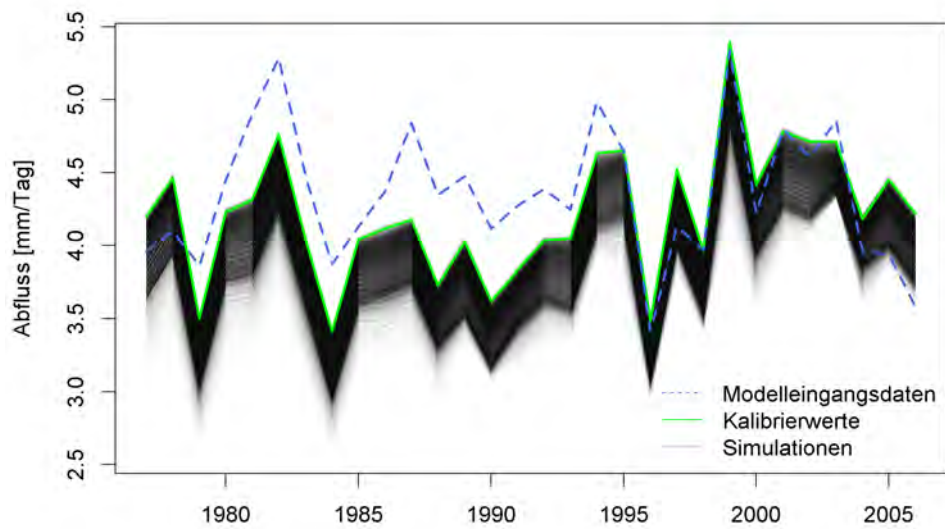


Abbildung A.38: Abflusszeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

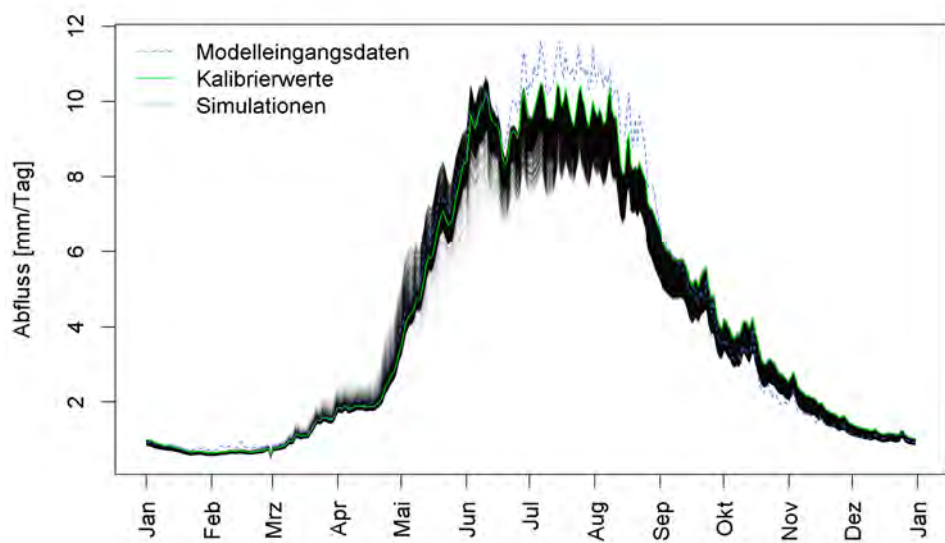


Abbildung A.39: Abflussregime der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

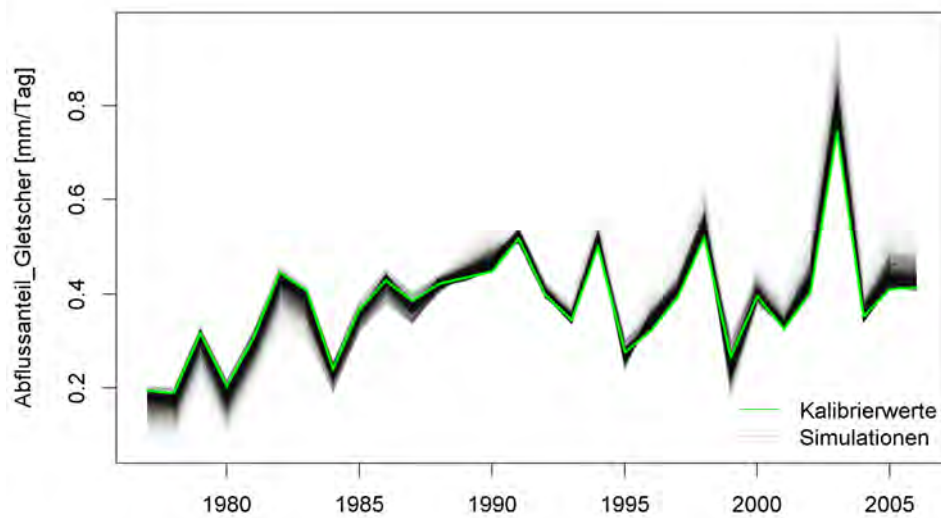


Abbildung A.40: Abfluss der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.



Abbildung A.41: Abflussregime der Gletscherschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

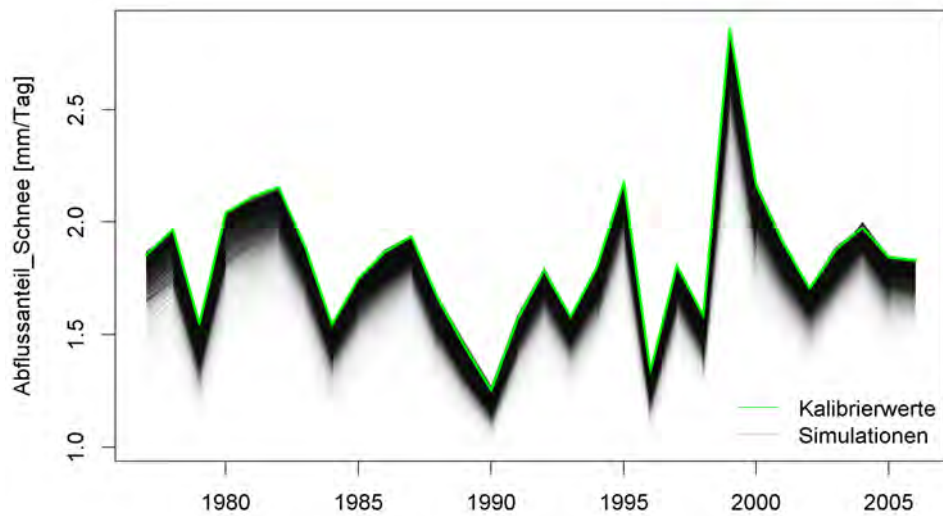


Abbildung A.42: Abfluss der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

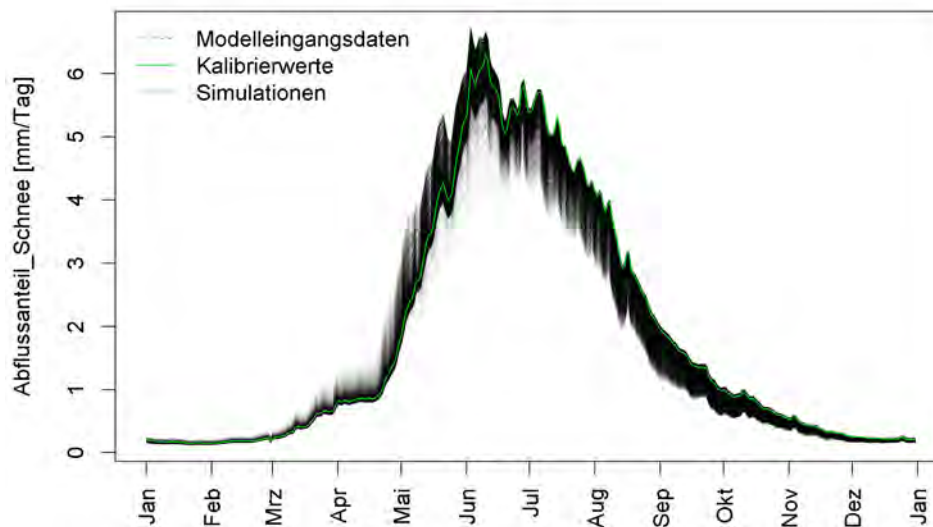


Abbildung A.43: Abflussregime der Schneeschmelze der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

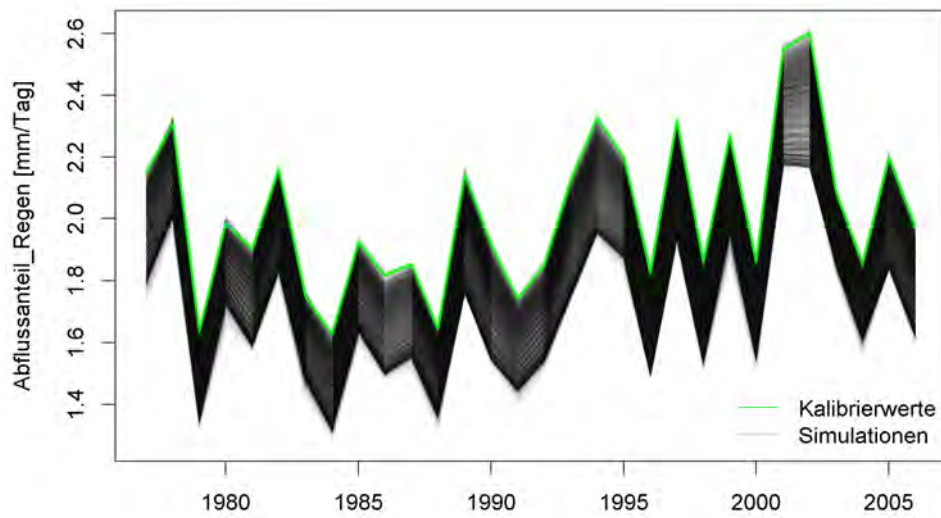


Abbildung A.44: Abfluss Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschine.

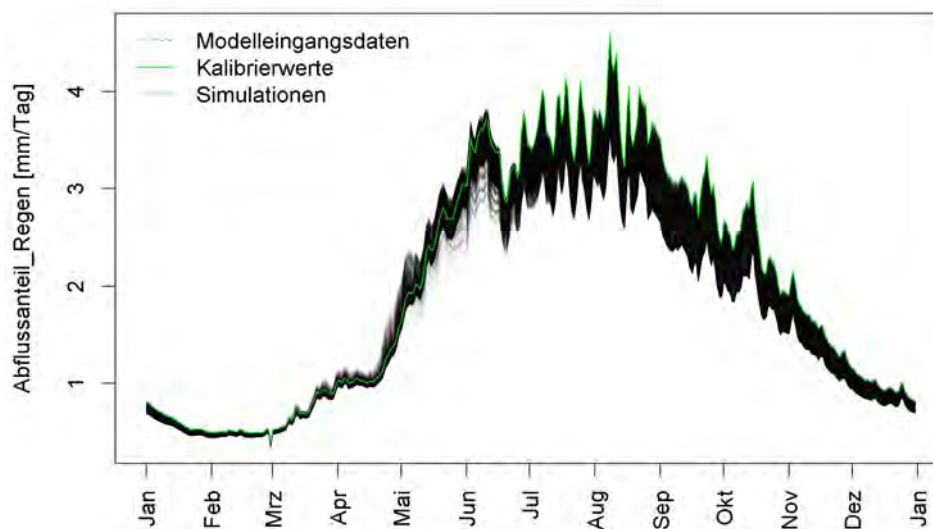


Abbildung A.45: Abflussregime Regen der Simulationen, gemessenen Abflüsse und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschine.

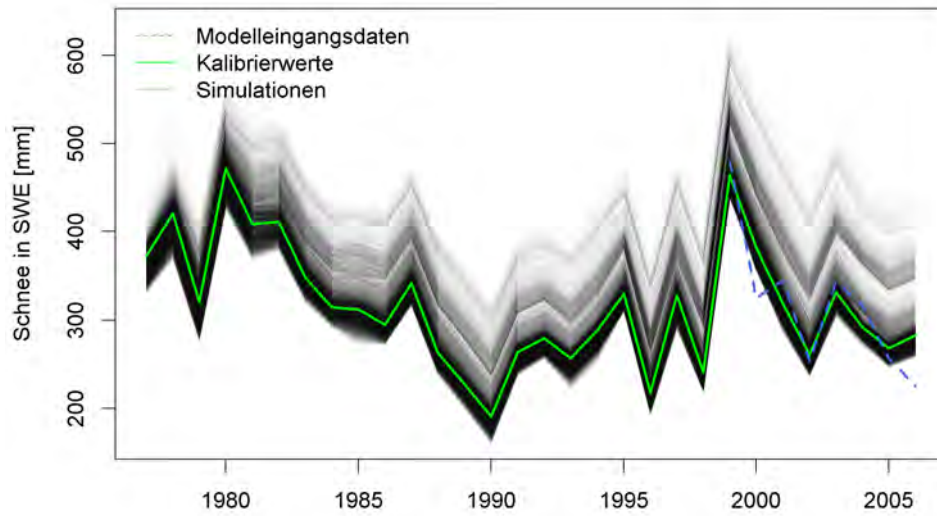


Abbildung A.46: Schneezeitreihe Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

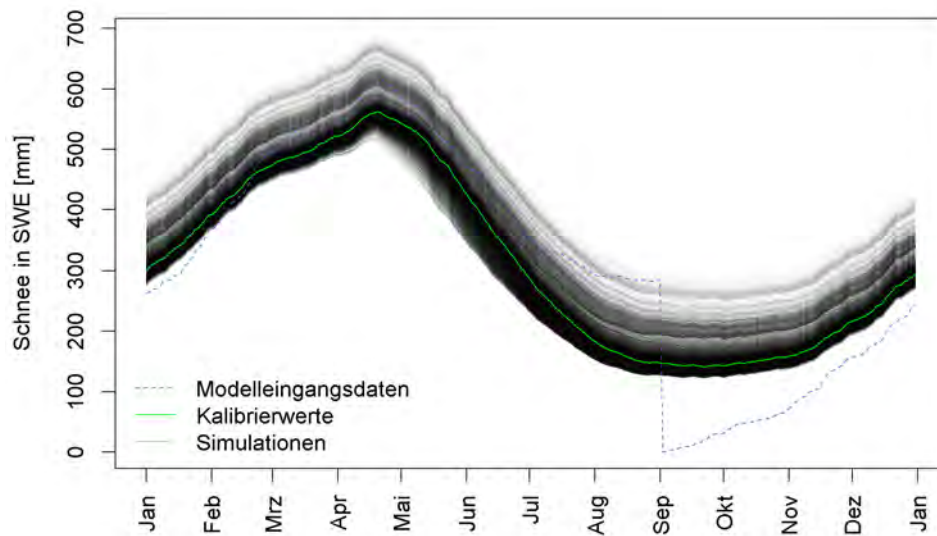


Abbildung A.47: Schneeregime der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

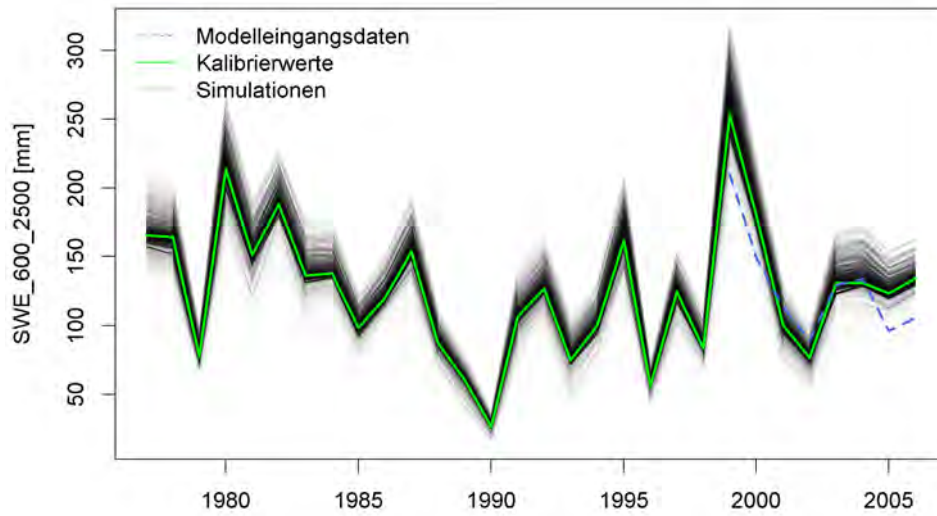


Abbildung A.48: Schneezeitreihe unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

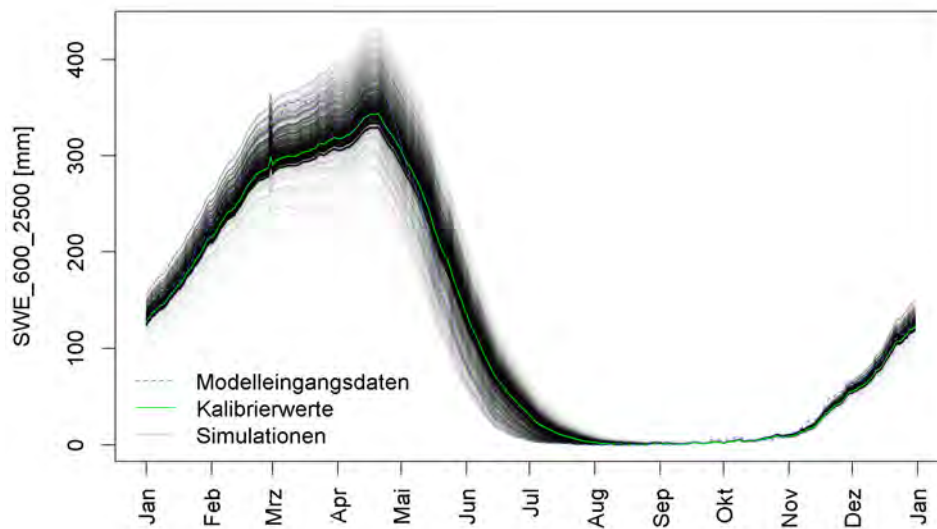


Abbildung A.49: Schneeregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

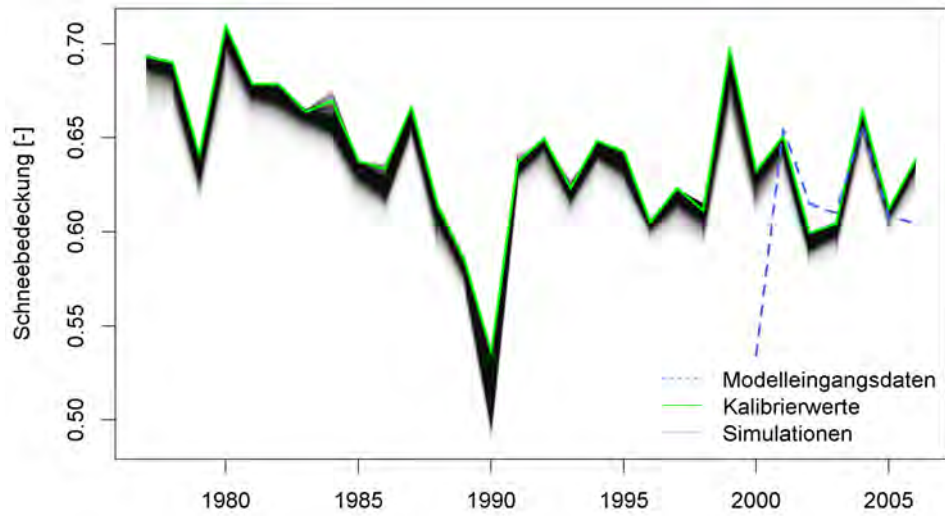


Abbildung A.50: Zeitreihe der Schneebedeckung unter 2500m Jahresmittelwerte der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

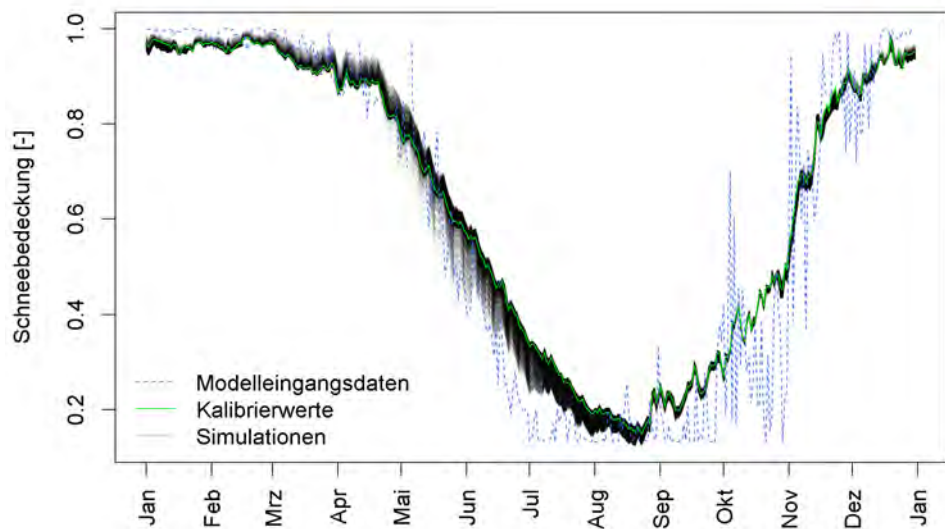


Abbildung A.51: Schneebedeckungsregime unter 2500m der Simulationen, Modelleingangsdaten und dem Kalibrierwert. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

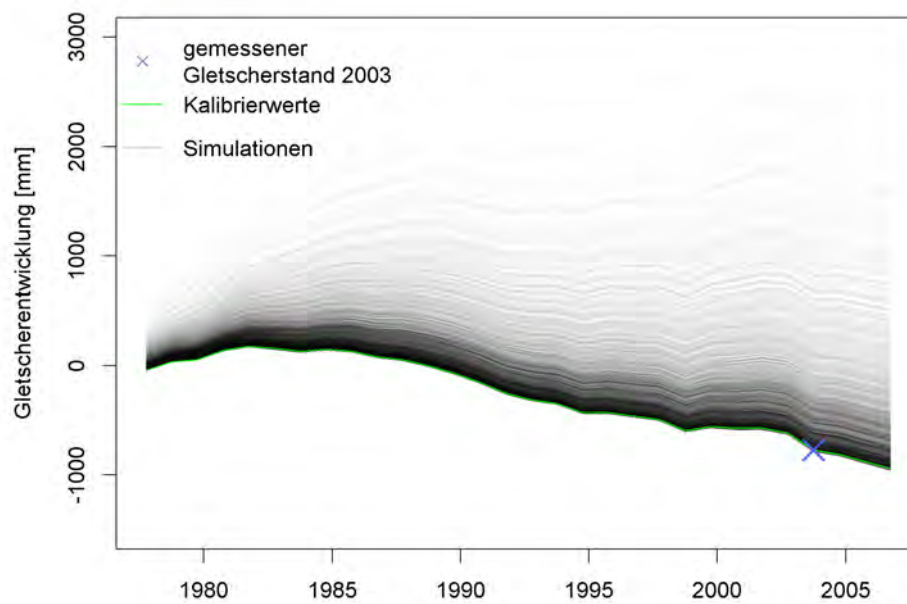
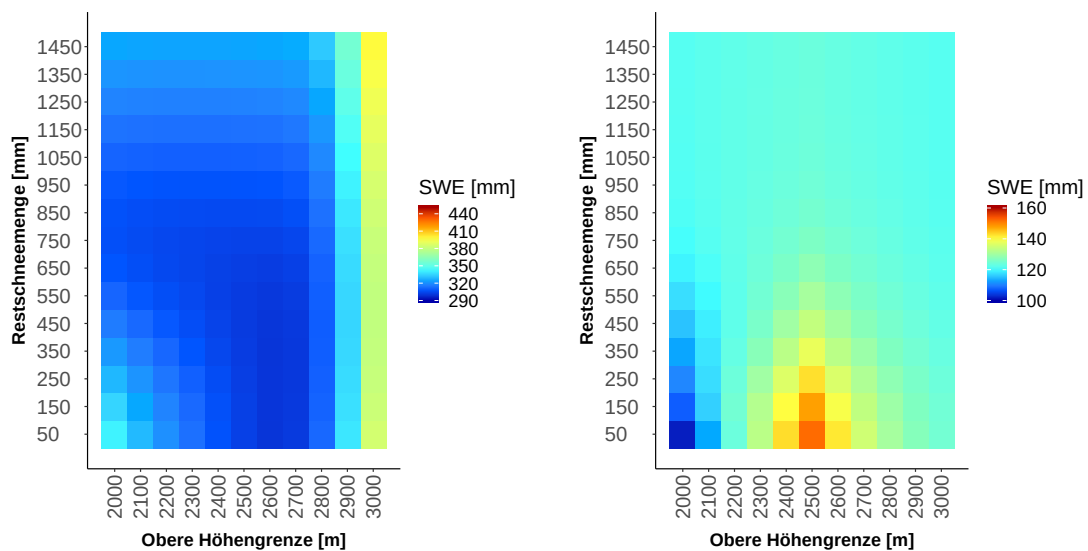


Abbildung A.52: Gletscherentwicklung der Simulationen und dem Kalibrierwert. Als Referenzwert der Gletscherstand von 2003. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

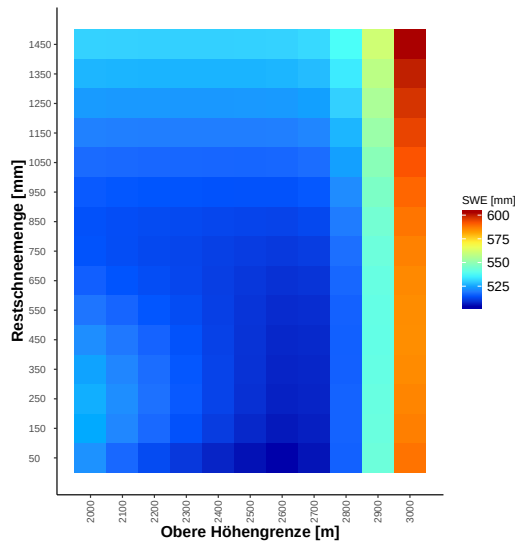
Schneehöhen



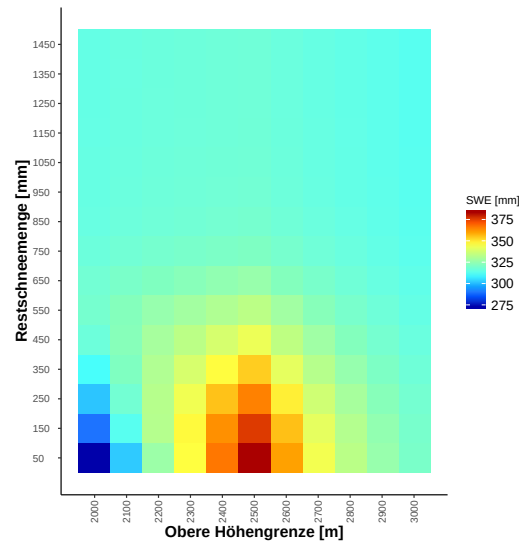
(a) Schnee gesamtes EZG.

(b) SWE 2500

Abbildung A.53: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über SUB wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

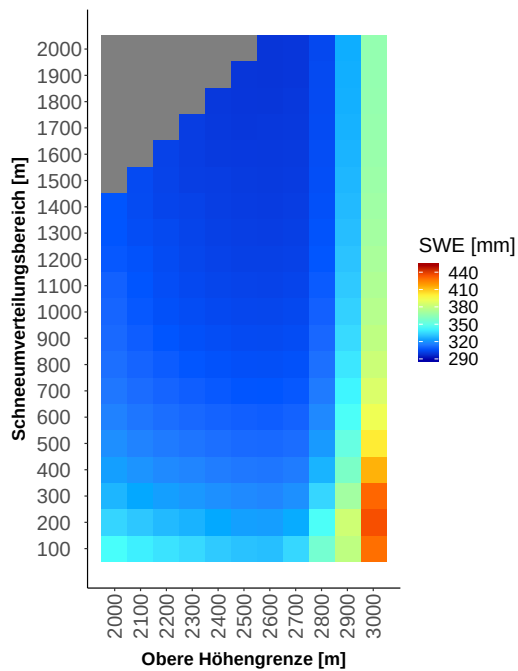


(a) Mittleres SWE im gesamten EZG

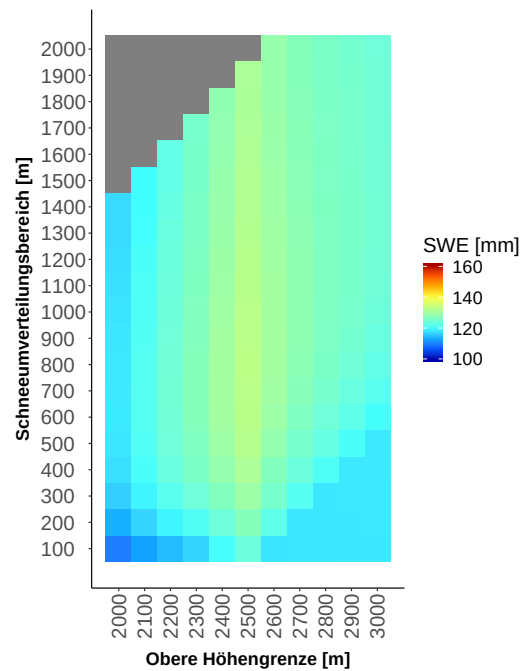


(b) Mittleres SWE unter 2500 m

Abbildung A.54: Mittlere Schneehöhen am 1. April in mm SWE für die Parameterkombinationen aus RM und OH. Über die Schneehöhen des SUB wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschine.



(a) Mittleres SWE im gesamten EZG



(b) Mittleres SWE unter 2500 m

Abbildung A.55: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und OH. Über die Schneehöhen der RM wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschine.

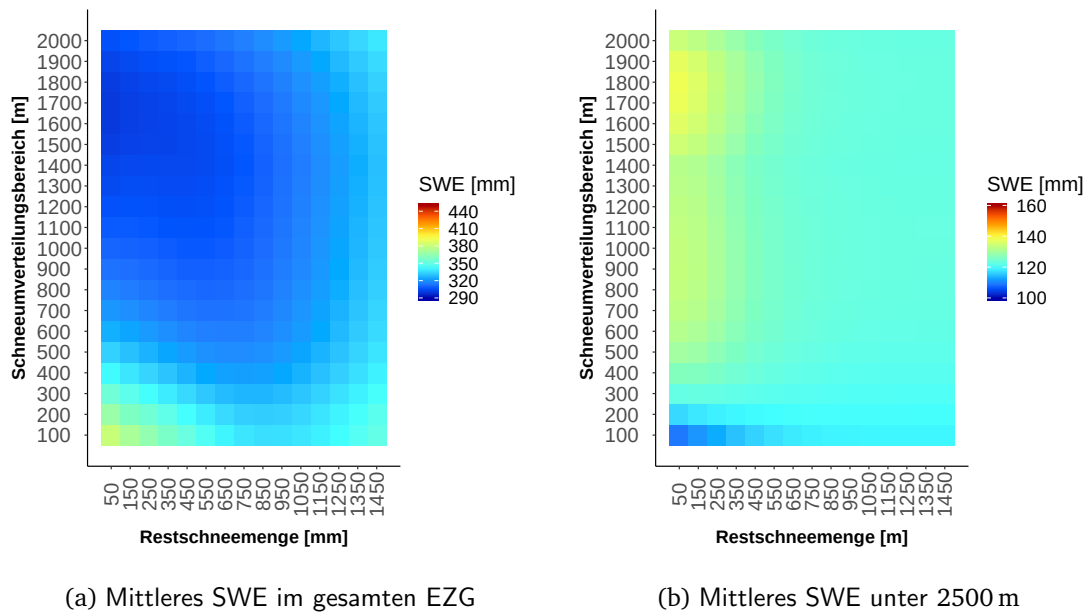


Abbildung A.56: Mittlere Schneehöhen in mm SWE für die Parameterkombinationen aus SUB und RM. Über die Schneehöhen der OH wird gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

Schneegrenzen

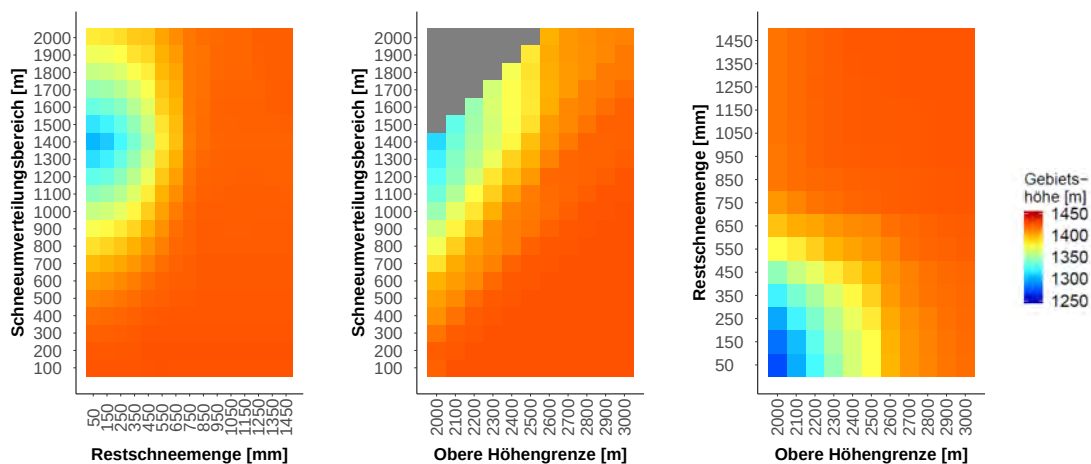


Abbildung A.57: Mittlere Gebietshöhe, ab der am 1. April im Schnee liegt für die verschiedenen Parameterkombinationen. Links: Über OH gemittelt, Mitte: Über RM gemittelt, Rechts: Über SUB gemittelt. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

Graphische Auswertung der Gütemaße

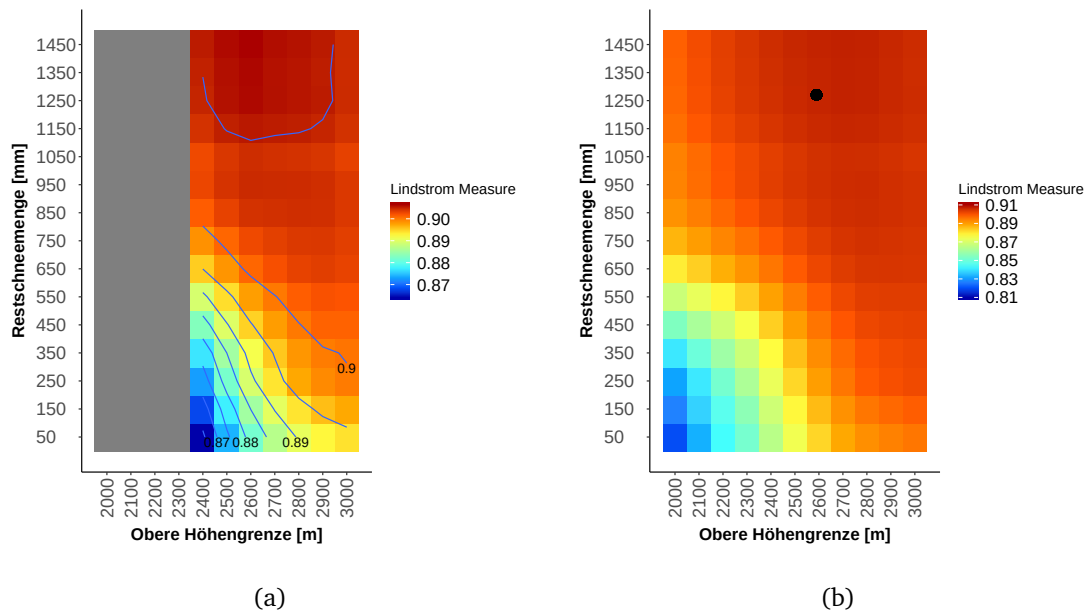


Abbildung A.58: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1800 m fixiert. Da das EZG Weisse Lutschine nur bis auf 600 m reicht, sind Kombinationen mit einer OH von 2000 m nicht möglich. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

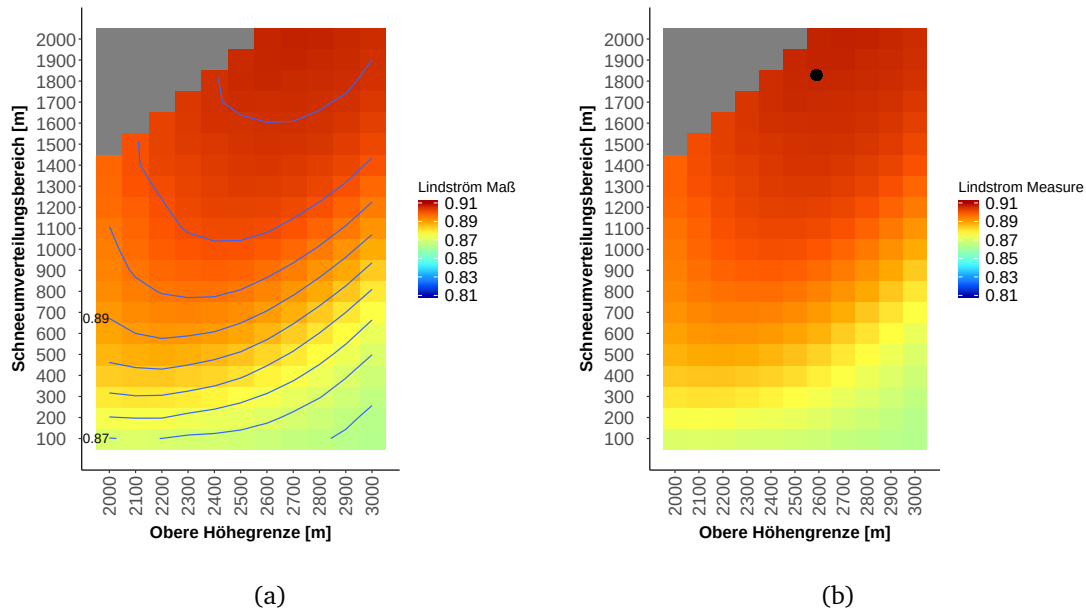


Abbildung A.59: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

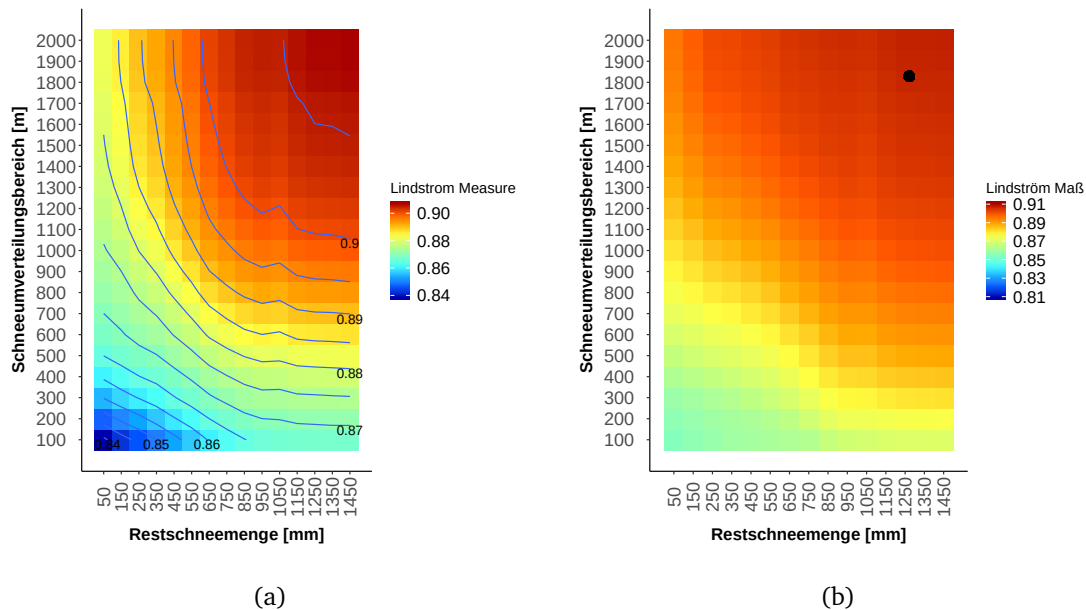


Abbildung A.60: Abflussgütemaß (Lindström Maß) für die Parameterkombinationen SUB und RM. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2600 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale Lindström Maß für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Die schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

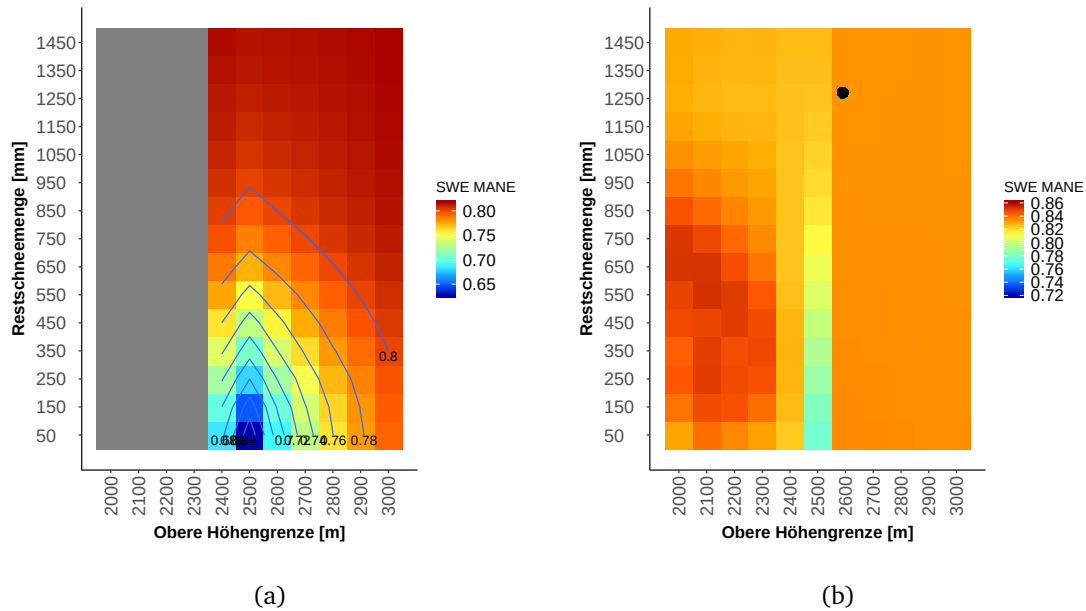


Abbildung A.61: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1800 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

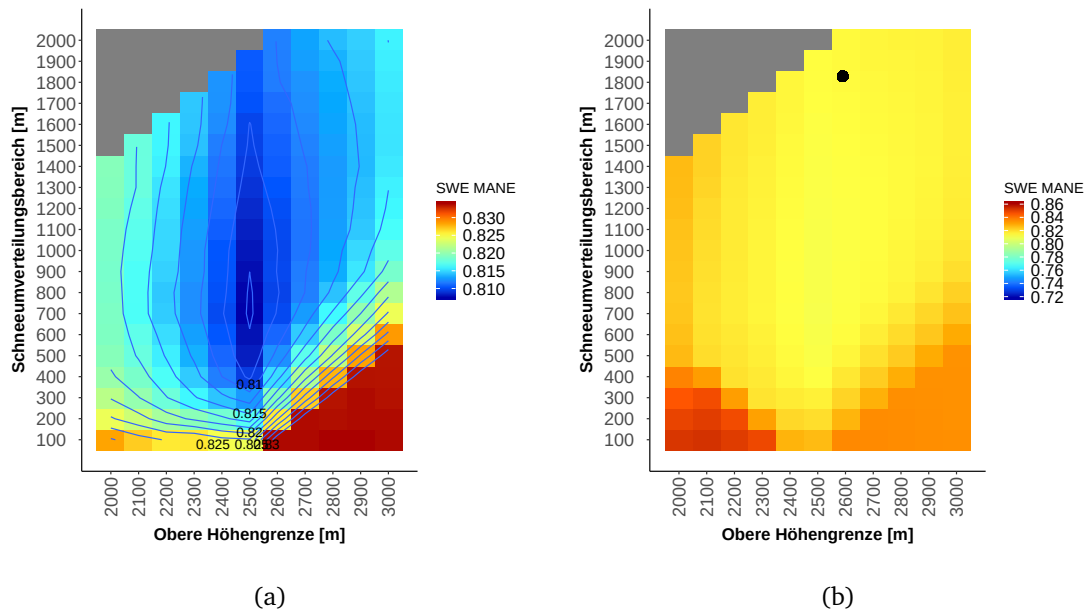


Abbildung A.62: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

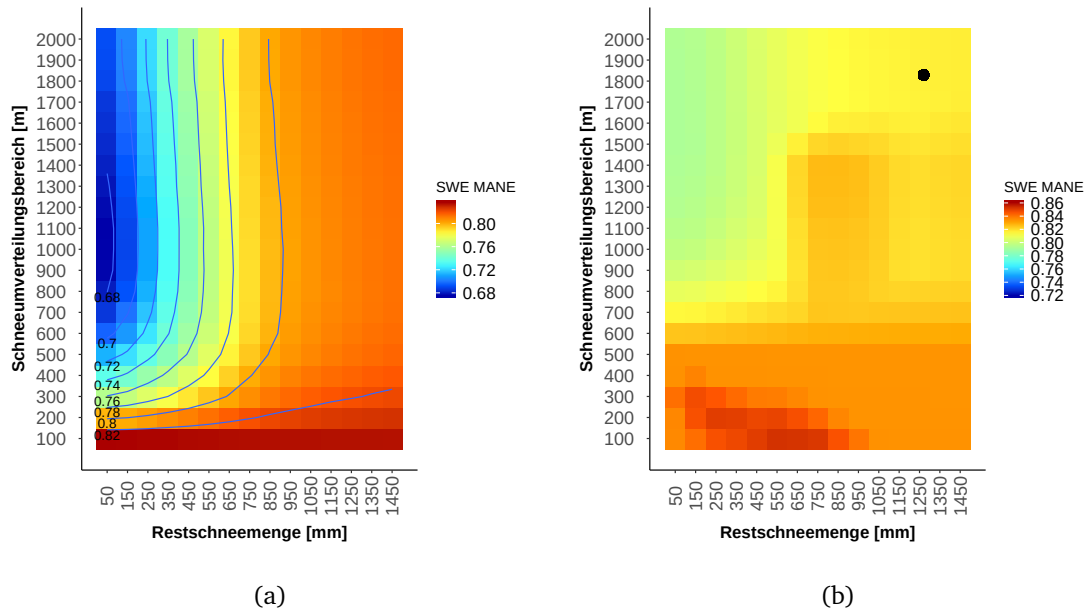


Abbildung A.63: Schneegütemaß (SWE MANE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2600 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SWE MANE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

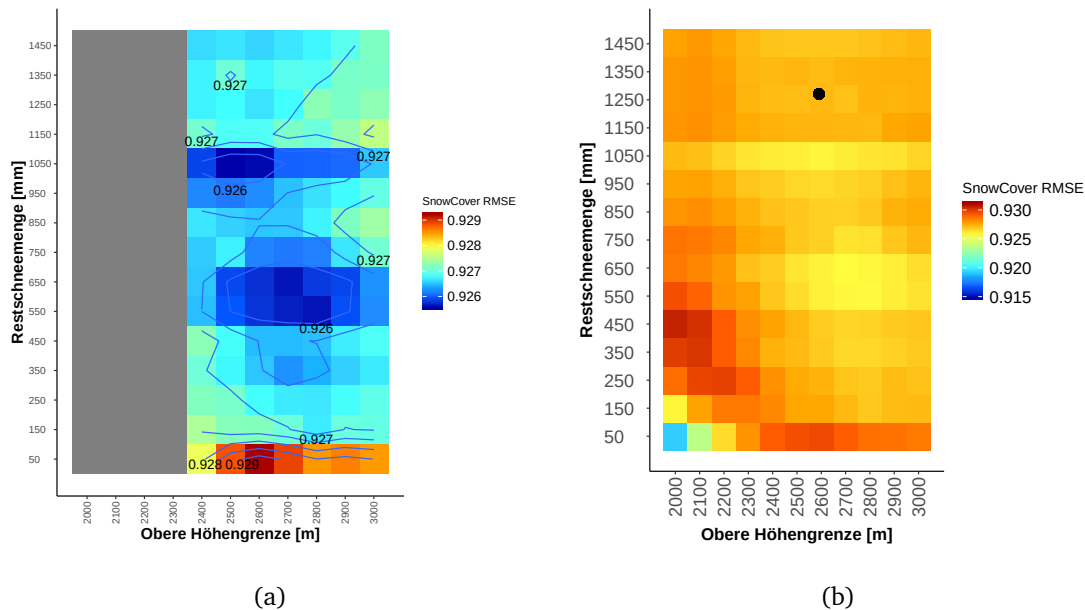


Abbildung A.64: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Die SUB ist auf den Kalibrierwert von 1800 m fixiert. (b) Die SUB wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lütschine.

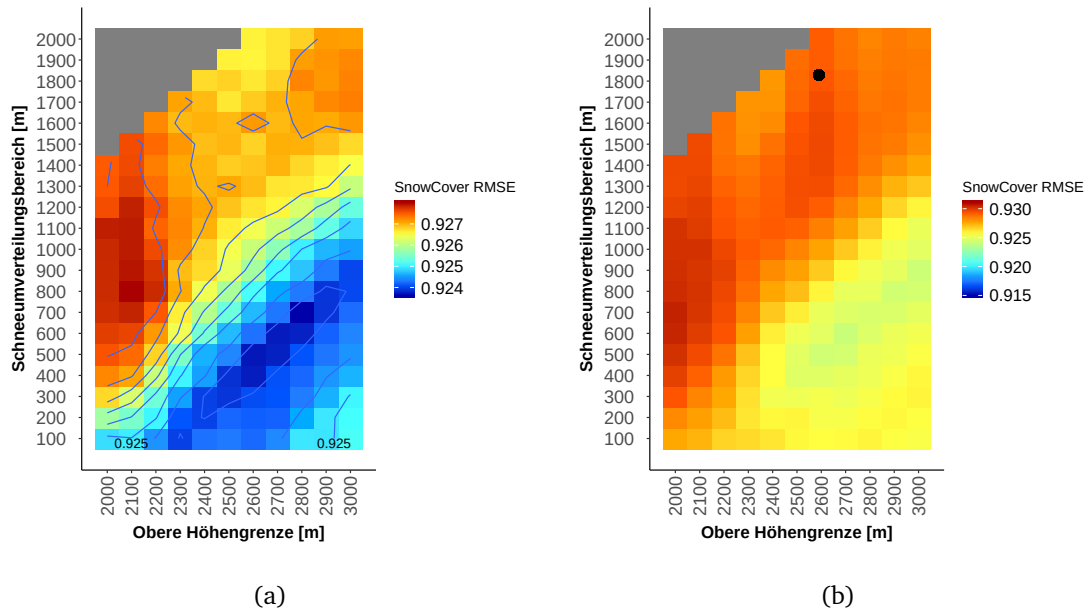


Abbildung A.65: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

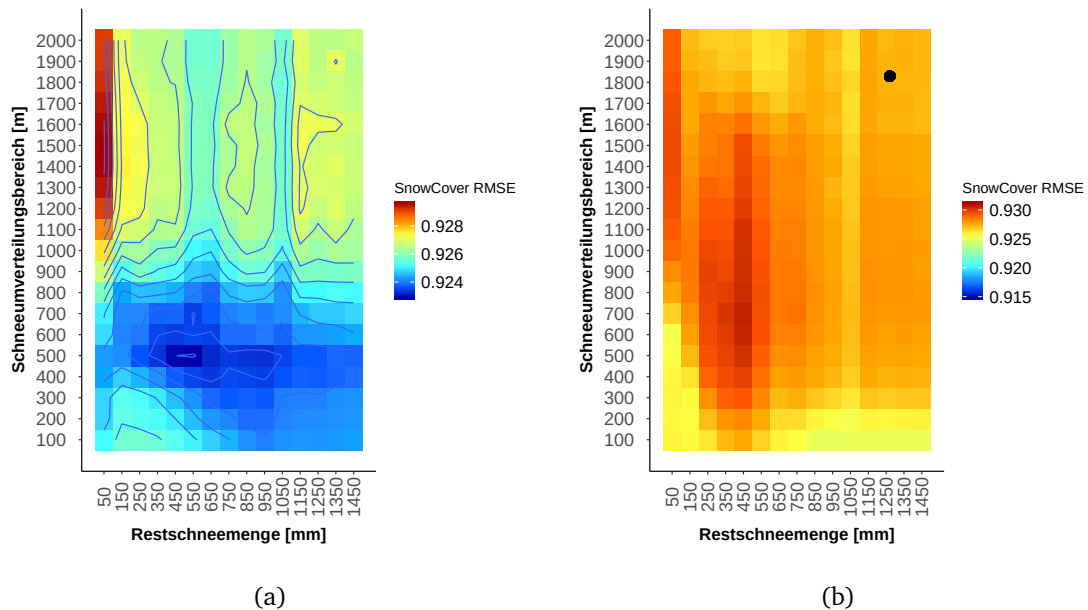


Abbildung A.66: Schneebedeckungsgütemaß (SnowCover RMSE) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2600 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale SnowCover RMSE für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

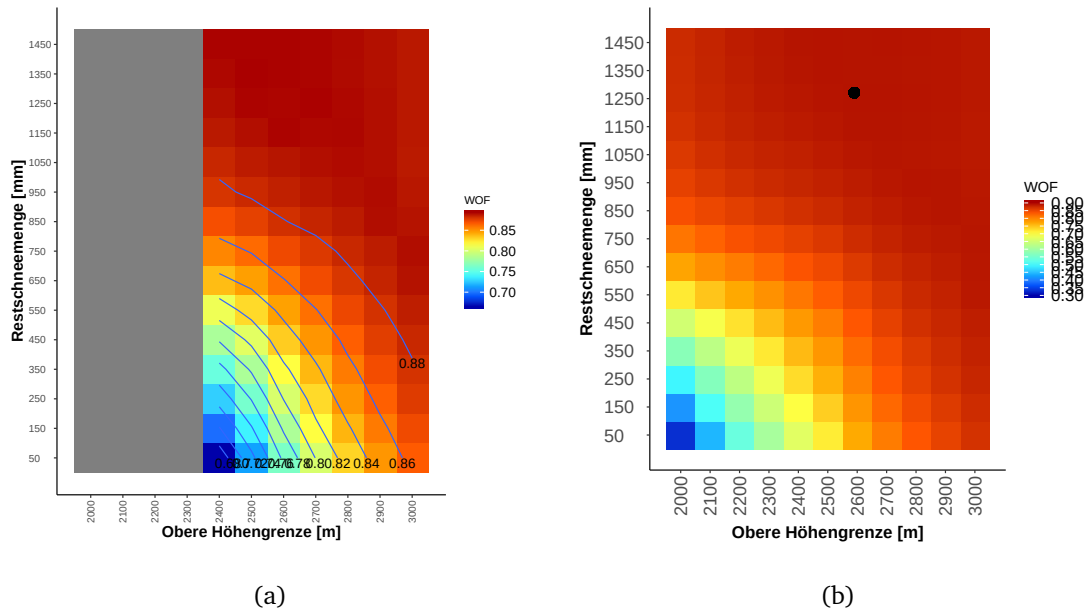


Abbildung A.67: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und RM. (a) Der SUB ist auf den Kalibrierwert von 1800 m fixiert. (b) Der SUB wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschne.

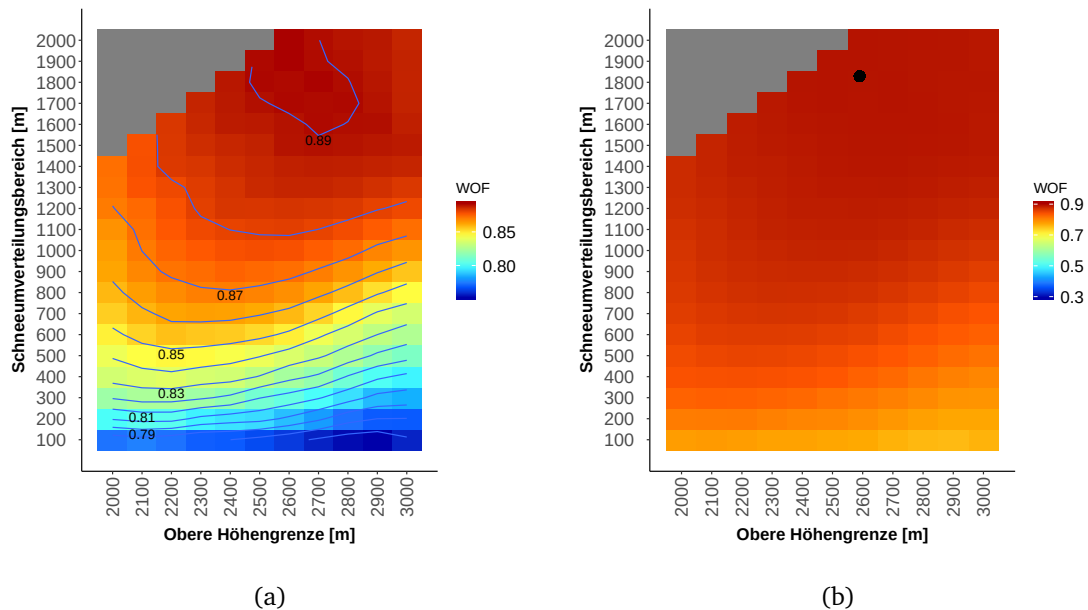
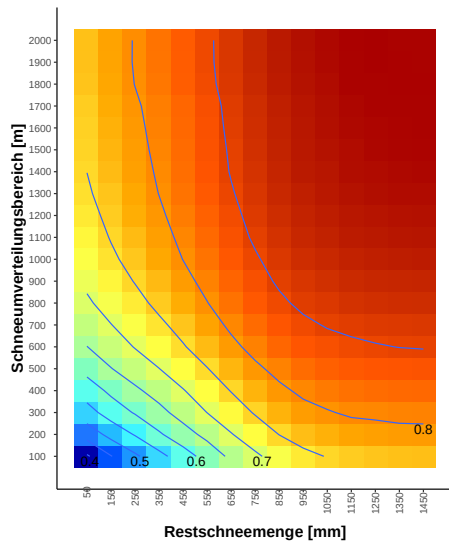
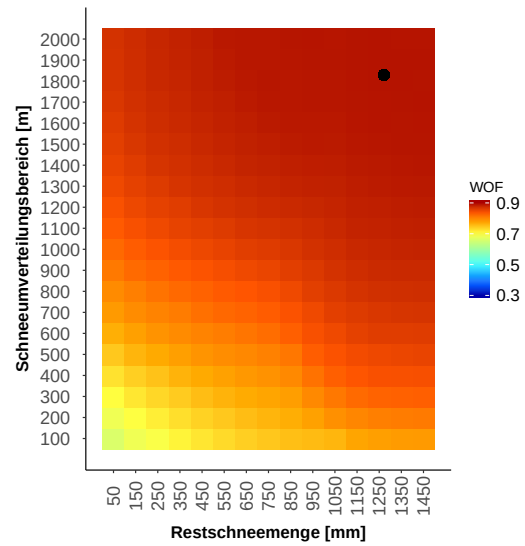


Abbildung A.68: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen OH und SUB. (a) Die RM ist auf den Kalibrierwert von 1250 mm fixiert. (b) Die RM wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lüttschne.



(a)



(b)

Abbildung A.69: Gewichtetes Gütemaß (WOF) für die Parameterkombinationen RM und SUB. (a) Die OH ist auf den Kalibrierwert von 2600 m fixiert. (b) Die OH wird ebenfalls variiert und das maximale WOF für die jeweilige Kombination farblich dargestellt. Der schwarze Punkt markiert die Kalibrierwerte. Ergebnisse für das EZG Weisse Lutschine.

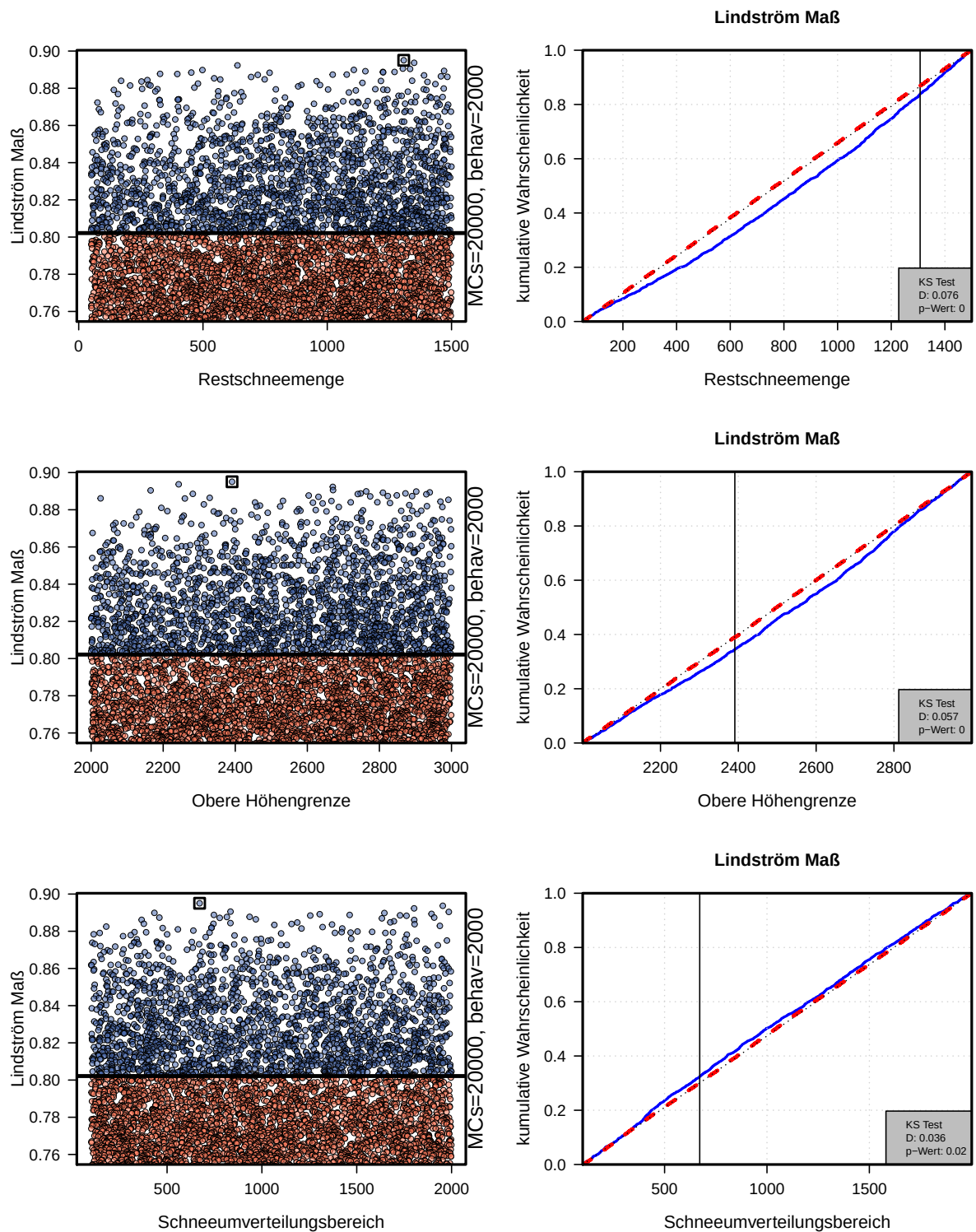


Abbildung A.70: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Weisse Lutschine. Betrachtetes Gütemaß: Lindström Maß

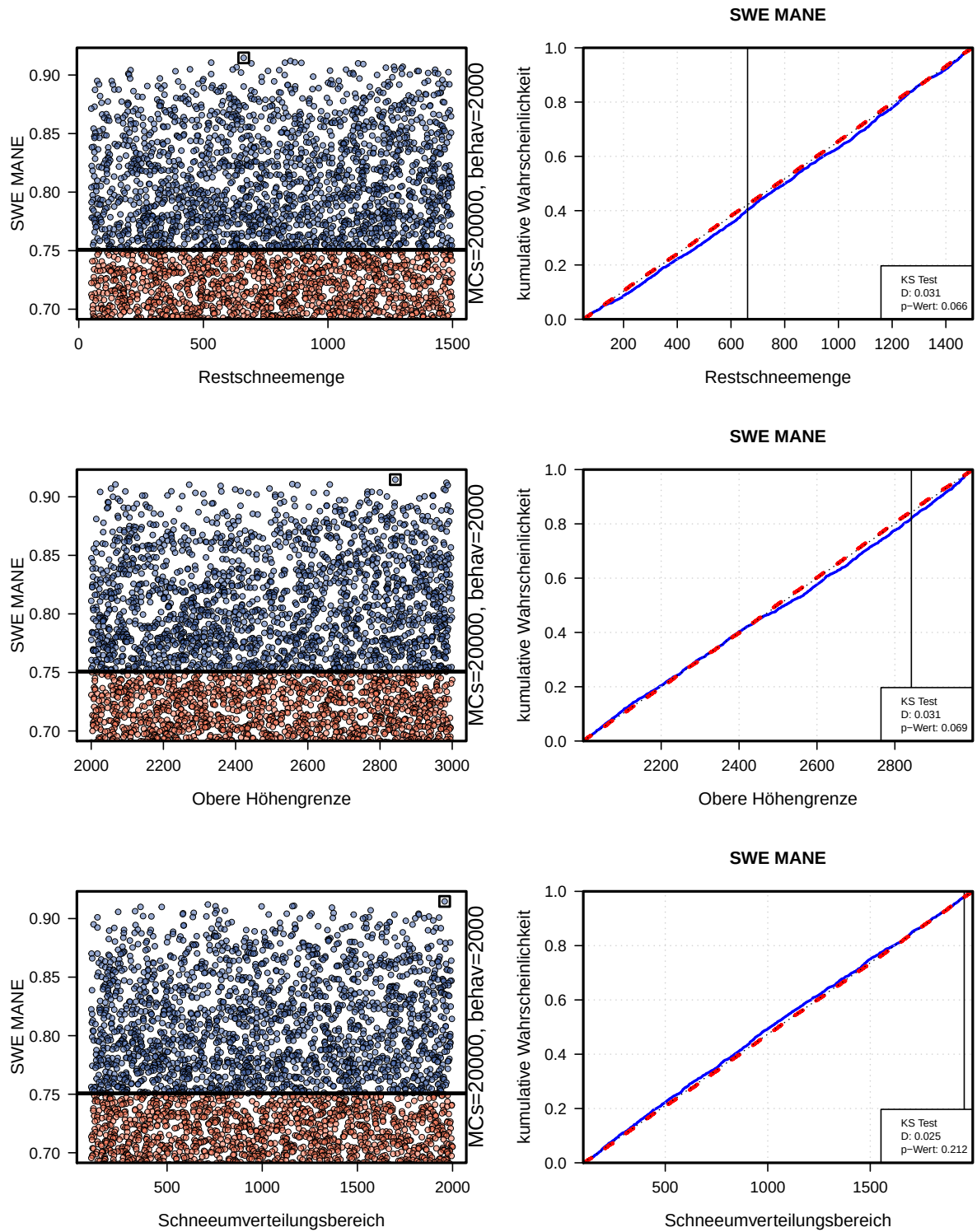


Abbildung A.71: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Weisse Lütschine. Betrachtetes Gütemaß: SWE MANE

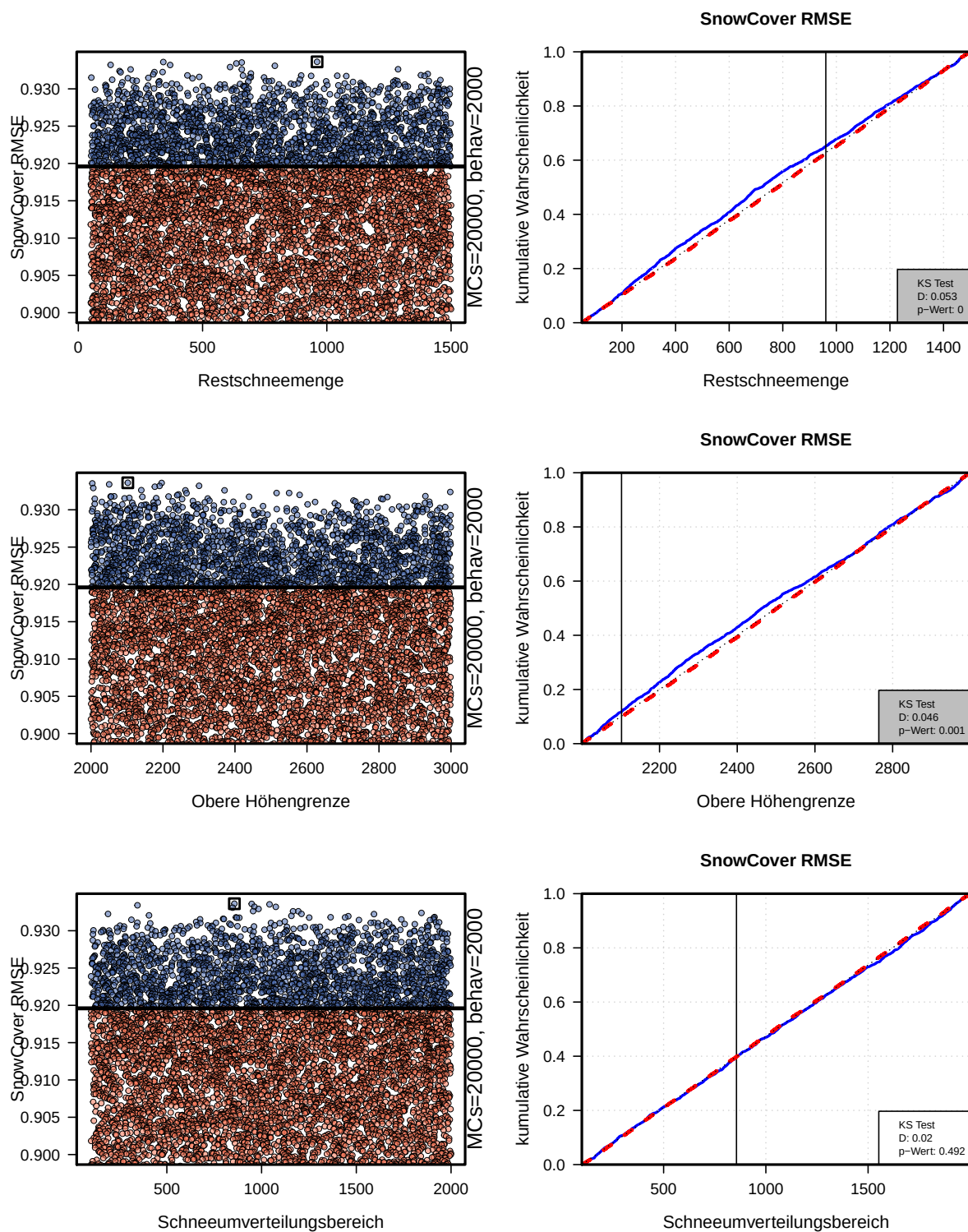


Abbildung A.72: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Weisse Lutschine. Betrachtetes Gütemaß: SnowCover RMSE

Ergebnisse Schwarze Lütschine

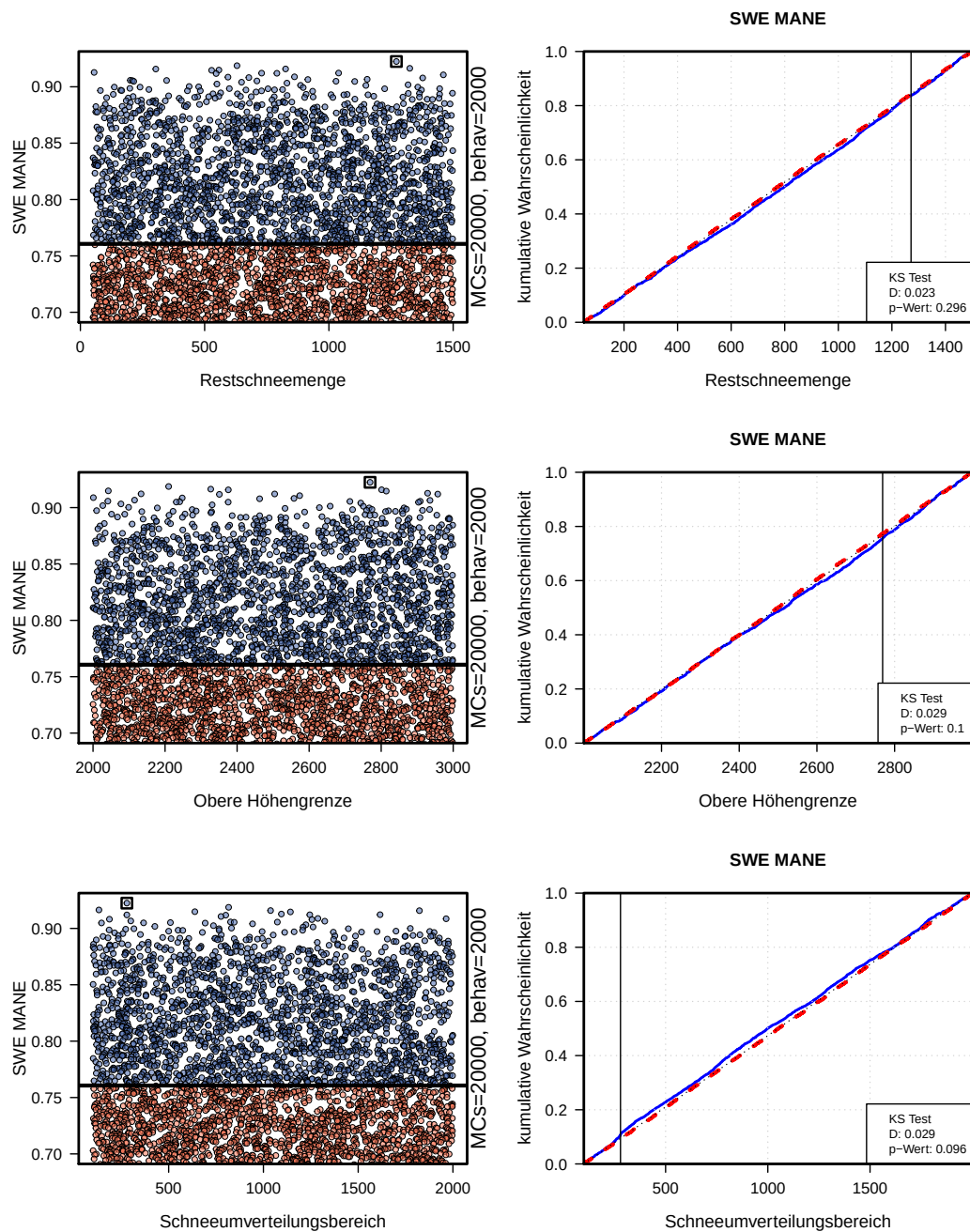


Abbildung A.73: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lütschine. Betrachtetes Gütemaß: SWE MANE

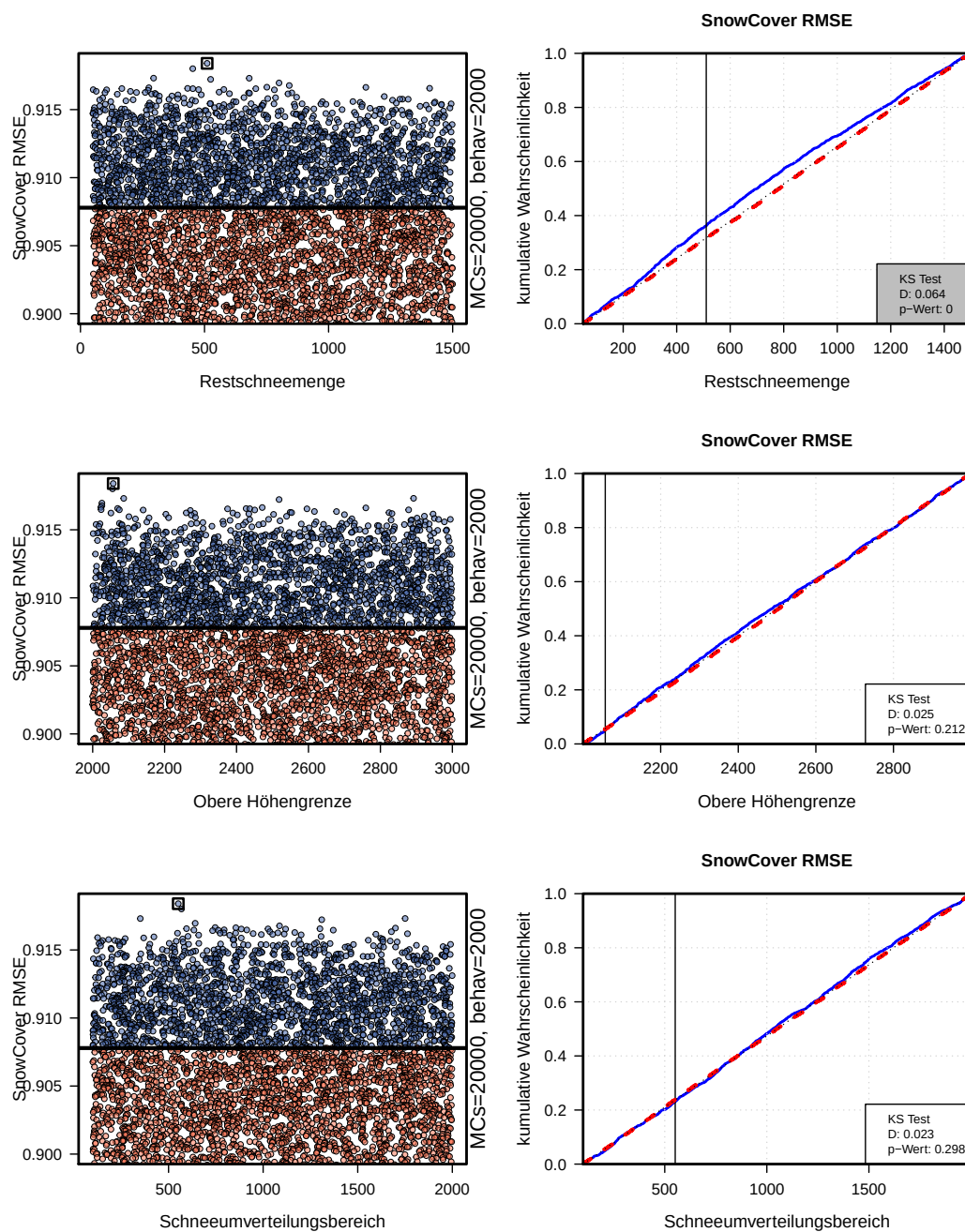


Abbildung A.74: Dotty Plots und kumulierte Verteilungen der Monte-Carlo-Simulationen für das EZG Schwarze Lutschine. Betrachtetes Gütemaß: SnowCover RMSE

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, 24.03.2019

.....

(Stefanie Bittner)