

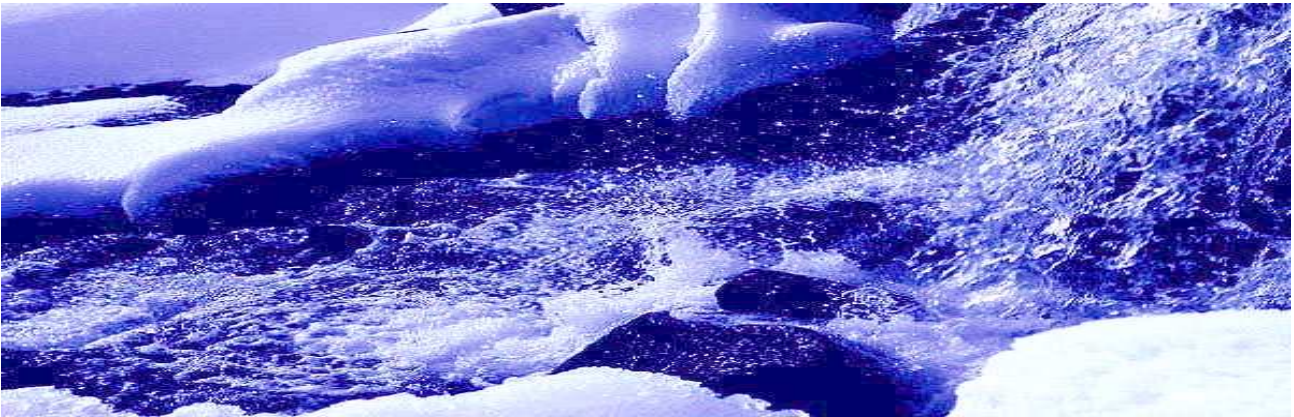
OPERATIONELLE SCHNEEMODELLIERUNG

MIT DEM HYDROLOGISCHEN MODELL

PREVAH

Validierung und Assimilation von hochauflösenden Schneehöhen- bzw. Schneemuster-Karten für eine verbesserte Echtzeit Abflussvorhersage

Annina Morger



Betreuung

Dr. Massimiliano Zappa

Dr. Tobias Jonas

Fakultätsvertreter

Prof. Dr. Robert Weibel

Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich, Juni 2007

ausgeführt an der
Eidgenössischen Forschungsanstalt
für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf

VORWORT

Die Freude an der Natur und die Faszination für ihre Prozesse haben mich dazu bewegt, im Herbst 2002 das Geographiestudium zu beginnen, welches nun mit dieser Arbeit abgeschlossen werden soll. Während des gesamten Studiums habe ich mich mit grossem Interesse mit der physischen Geographie, geographischen Informationssystemen und Fernerkundung auseinander gesetzt. Folglich achtete ich bei der Wahl der Diplomarbeit auf eine mögliche Kombination dieser drei Fachrichtungen.

In diesem Zusammenhang geht ein grosses Dankeschön an Dr. Massimiliano Zappa. Er gab mir die Möglichkeit meine Wünsche in einer Diplomarbeit unterzubringen. Stets hatte er ein offenes Ohr für meine Fragen und gab mir nützliche Tipps für das Gelingen dieser Arbeit.

Für die intensive Betreuung für die Berechnung der regionalen Schneehöhenkarten am Schnee und Lawinenforschungsinstitut (SLF) in Davos möchte ich mich bei Dr. Tobias Jonas bedanken. Er bot mir die Möglichkeit, Einblick in ein weiteres Forschungsinstitut zu erhalten und drei schöne Herbstwochen in Davos zu verbringen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Bürokolleginnen und beim gesamten Team der Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Wildbäche. Durch ihre freundliche Aufnahme habe ich mich sofort wohl gefühlt. Spaziergänge im WSL-Garten, Schneemess-touren im hüfthohen Neuschnee oder zahlreiche Kaffeepausen und Apéros sorgten stets für Abwechslung und Erholung und gaben mir neuen Schwung und Ideen für diese Diplomarbeit.

Ein weiteres Dankeschön geht an Prof. Dr. Robert Weibel, welcher bereit war, die Betreuung der extern durchgeführten Diplomarbeit von Seiten des Geographischen Institutes der Universität Zürich zu übernehmen.

Schliesslich geht ein herzlicher Dank an meine Eltern, welche mich bei meinem Studium unterstützt haben, an alle meine StudienkollegInnen und Freunde und insbesondere an meinen Freund Dominik, welcher mir bei stilistischen und technischen Fragen mit Rat und Tat zur Seite stand.

ZUSAMMENFASSUNG

Frühlingshochwasser wie im Mai 1999 sind ein Beispiel dafür, dass das gleichzeitige Auftreten von Niederschlag und Schneeschmelze zu enormen Schäden führen kann. Aus diesem Grunde sind repräsentative Echtzeit-Informationen über die Schneehöhe, das Schneewasseräquivalent und das Schneemuster, wie sie mit dem hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modell PREVAH (Precipitation Runoff Evapotranspiration Hydrotope Model) (Gurtz und Zappa, 2004) erlangt werden können, von grosser Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit soll eine Validierung des mit PREVAH simulierten Schneewasseräquivalents, des Schneemusters und des resultierenden Abflusses für die Winter 2005/06 und 2006/07 in den Einzugsgebieten Linthtal, Engadin und Alptal in der Schweiz erfolgen. Als Vergleiche dienen eine operationell hergestellte Schneehöhenkarte der Schweiz, eine aus NOAA/AVHRR Satellitendaten abgeleitete Schneemuster-Karte, eine regionale Schneehöhenkarte, sowie gemessene Schneewasseräquivalent- und Abflussdaten. Die räumliche Auflösung der Modellierung ist dabei 200 m für das Linth- und Alptal respektive 250 m für das Engadin. Als weiteres wird versucht, das Modell mit einem simplen Assimilierungsalgorithmus zu verbessern, indem die im System vorhandene Schneemenge umverteilt wird.

Die Auswertung erfolgt in drei Schritten. Als erstes wird die Güte des simulierten Schneewasseräquivalents mit Punktbeobachtungen verglichen. Weiter erfolgt mit einer kategoriellen Statistik die räumliche Auswertung des simulierten Schneemusters, und schliesslich wird mit der Nash-Sutcliffe-Effizienz die Güte des simulierten Abflusses ermittelt. Die Auswertungen erfolgen jeweils ohne und mit Update, um feststellen zu können, ob und wie gut die Verbesserung erfolgt.

Die Resultate zeigen, dass PREVAH relativ gut in der Lage ist, repräsentative Vorhersagen zu machen. Das Schneemuster weist eine Übereinstimmung mit der Realität von meist mehr als 80% auf. Während der Schneeschmelzphase nimmt die Übereinstimmung jedoch grösstenteils massiv ab. Die Simulation des Schneewasseräquivalents wird durch das Modell zu tief berechnet. Meist werden nur gerade 20% – 60% der Beobachtung erreicht. Der simulierte Abfluss bewegt sich um eine Nash-Sutcliffe-Effizienz von 60 – 80%. Diese Ergebnisse können mit dem hier implementierten Assimilierungsalgorithmus leider nicht wie gewünscht verbessert werden. Ein wesentlicher Grund dafür ist die Schneemenge, welche durch PREVAH zu gering simuliert wird.

Um dieses Problem zu lösen gibt es verschiedene Ansätze, welche schliesslich in dieser Diplomarbeit vorgeschlagen werden. Einerseits könnte versucht werden, das Modell nicht nur in Bezug auf den Abfluss, sondern auch auf das Schneemuster zu kalibrieren. Engeset et al. (2003) ist dies gelungen, ohne dass ein Qualitätsverlust in der Güte des Abflusses entstanden ist. Eine weitere Möglichkeit ist die unmittelbare Korrektur der Niederschlagsdaten, da die Leistung der automatischen Niederschlagsmesser im Winter limitiert ist. Würden hochaufgelöste Schneewasseräquivalentdaten zur Verfügung stehen, wäre der einfachste Weg für eine verbesserte Schneemodellierung, das simulierte Schneewasseräquivalent durch das beobachtete zu ersetzen. Dies könnte mit passiver Mikrowellenfernerkundung erreicht werden. Als Letztes besteht noch die Möglichkeit der Anwendung des Kalman Filters. Diese Methode ähnelt der in dieser Arbeit angewendeten, ist jedoch um einiges komplexer.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	I
Zusammenfassung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Kontext der Diplomarbeit.....	1
1.2 Modellierungskonzeption.....	2
1.3 Stand der Forschung in der Schneemodellierung.....	3
1.3.1 Schneehydrologische Modellierung.....	4
1.3.2 Aufdatierung von (Schnee)hydrologischen Modellen.....	6
1.4 Zielsetzung.....	7
2 Das hydrologische Modell PREVAH.....	9
2.1 Die Diskretisierung des Raumes	10
2.2 Das Schneemodell.....	12
2.2.1 Schneeakkumulation.....	12
2.2.2 Schneeschmelze.....	13
2.2.3 Speicherung und Wiedergefrieren von flüssigem Wasser in der Schneedecke.....	13
2.3 Das Gletschermodell.....	14
2.3.1 Gletscher – oder Eisschmelze.....	14
2.4 Das Evapotranspirationsmodell.....	15
2.5 Das Interzeptionsmodell.....	15
2.6 Bodenfeuchte und Abflussbildung	16
2.7 Die Niederschlagskorrektur.....	18
3 Datengrundlage	19
3.1 Die Schneedaten.....	19
3.1.1 Datenaufbereitung für die Regionale Schneehöhenkarte.....	20
3.2 Eingangsdaten von PREVAH und Abflussdaten.....	21
4 Modellvalidierung.....	23
4.1 Qualitätsbeurteilung von hydrologischen Modellen.....	23
4.1.1 Das Bestimmtheitsmass R^2 (Coefficient of Determination).....	24
4.1.2 Das Bestimmtheitsmass E nach Nash-Sutcliffe.....	24
4.2 Analyse der kategoriellen Daten.....	25
4.2.1 Die Accuracy (ACC).....	26
4.2.2 Die Probability of Detection (POD).....	26
4.2.3 Das False Alarm Ratio (FAR).....	26
4.2.4 Der BIAS.....	26
4.2.5 Der Critical Success Index (CSI).....	27
4.2.6 Der Heidke Skill Score (HSS).....	27
5 Methoden zur Aufdatierung von PREVAH.....	29
5.1 Aufdatierungsalgorithmus.....	29
5.2 Aufdatierungsprodukte.....	29
5.2.1 NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte.....	29
5.2.2 Die operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz.....	32
5.2.3 Regionale Schneehöhenkarten.....	35
5.2.4 Kreuzvalidierung der drei Schneemuster-Karten	37
6 Untersuchungsgebiete.....	41
6.1 Linthtal (Kt. Glarus).....	41
6.2 Engadin (Kt. Graubünden).....	42
6.3 Alptal (Kt. Schwyz).....	43
6.4 Witterungsbedingungen der Winter 2005/06 und 2006/07.....	43

7 Auswertung der Ergebnisse.....	45
7.1 Analyse der Schneehöhen an ausgewählten Standorten.....	47
7.1.1 Allgemeine Situation.....	47
7.2 Auswertung der Resultate nach der Aufdatierung.....	52
7.3 Analyse des Schneemusters.....	60
7.3.1 Allgemeine Situation.....	60
7.3.2 Situation der Schneedeckenverteilung nach der Aufdatierung.....	66
7.4 Analyse des Abflusses.....	73
7.4.1 Winter 2005/06.....	73
7.4.1.1 Allgemeine Situation.....	73
7.4.1.2 Auswertung der Resultate nach den Updates.....	73
7.4.2 Winter 2006/07.....	75
7.4.2.1 Allgemeine Situation.....	75
7.4.2.2 Auswertung der Resultate nach den Updates.....	75
7.5 Sensitivitätsanalyse für das Alptal.....	76
7.6 Geänderte Parameter für das Engadin.....	79
8 Diskussion und Ausblick.....	83
8.1 Diskussion der Ergebnisse.....	83
8.2 Schlussbetrachtung und Ausblick.....	86
9 Literaturverzeichnis.....	91
Anhang A.....	95
Anhang B.....	97
Anhang C.....	103

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Einteilung von hydrologischen Modellen nach Dyck und Peschke (1995).	2
Abbildung 2: Zusammenstellung der wichtigsten Wasserhaushalts- und Schneemodelle	5
Abbildung 3: Beschreibung der Bestandteile von PREVAH. Modifiziert nach Zappa (2002)	9
Abbildung 4: Räumliche Eigenschaften, die zur Generierung der HRUs benötigt werden. Modifiziert nach Zappa (2002)	11
Abbildung 5: Darstellung des Abflusssystems von PREVAH. Leicht modifiziert nach Gurtz & Zappa (2004). Gezeichnet von D. Viviroli	16
Abbildung 6: Automatische IMIS-Messstation. Quelle: SLF Davos	20
Abbildung 7: Schneemesstrecke im Alptal. Quelle: A.Morger	20
Abbildung 8: Schneemuster, berechnet durch den NOAA/AVHRR Satelliten für die ganze Schweiz (oben), sowie die Teilgebiete Linthtal (unten links), Engadin (unten Mitte) und Alptal (unten rechts) am 21. April 2006. Quelle: Geographisches Institut, Universität Bern, 2006.	30
Abbildung 9: Schneemesstellennetzwerk der Schweiz (links) und irreguläres Punktnetzwerk entlang der Hauptflüsse als "virtuelles" Schneestationen-Netzwerk (rechts). Quelle: modifiziert nach Foppa et al., 2007	33
Abbildung 10: Operationelle Schneehöhenkarte des SLF vom 4. Mai 2006.	34
Abbildung 11: Prinzip der 3-stufigen Regression (rote Linie)	35
Abbildung 12: Regionale Schneehöhenkarte für das Linthtal, berechnet durch die DIDW Methode	36
Abbildung 13: Kreuzvalidierung zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und der operationellen Schneehöhenkarte am Beispiel des Linthtals am 19. April 2007	38
Abbildung 14: Klimatische Regionen der Schweiz. Quelle: Perl 2002	41
Abbildung 15: Die drei Untersuchungsgebiete Alptal, Linthtal und Engadin. Kartengrundlage: digitale Übersichtskarte der Schweiz, Bundesamt für Landestopographie (BfL)	42
Abbildung 16: Darstellung der zur Validierung hinzugezogenen Stationen für die drei Einzugsgebiete.	48
Abbildung 17: Überblick über die Schneewasseräquivalentverhältnisse von September 2005 bis Ende April 2007.	49
Abbildung 18: Beobachtetes (dunkel blau) und simuliertes (hell blau) Schneewasseräquivalent, sowie die entsprechenden Korrelationskoeffizienten für die Akkumulations- resp. Ablationsphase für das Einzugsgebiet Linthtal.	50
Abbildung 19: Beobachtetes (dunkel blau) und simuliertes (hell blau) SWE, sowie die entsprechenden Korrelationskoeffizienten für die Akkumulations- resp. Ablationsphase für das Einzugsgebiet Engadin.	51
Abbildung 20: Beobachtetes (gepunktet) und simuliertes (hellblau) Schneewasseräquivalent im Winter 2005/6 für das Einzugsgebiet Alptal	52

Abbildung 21: Vergleich der drei Aufdatierungsserien für je ein Aufdatierungsprodukt und je eine Station pro Gebiet.	53
Abbildung 22: Darstellung der Höhe des Schneewasseräquivalents der aufdatierten Simulation für je eine Beobachterstation für die Untersuchungsgebiete Linthtal und Engadin im Winter 2006/07. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz.	54
Abbildung 23: Beobachtung (dunkelblau) und Simulation (hellgrün: aufdatiert; hellblau: nicht aufdatiert) für je eine Station pro Untersuchungsgebiet (ELM2, Linthtal; KES2, Engadin; Erlenhöhe, Alptal) in den beiden Wintern 2005/06 und 2006/07. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte.	55
Abbildung 24: Darstellung der Höhe des Schneewasseräquivalents der aufdatierten Simulation für je eine Beobachterstation für die Untersuchungsgebiete Linthtal und Engadin. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR	56
Abbildung 25: Beobachtung (dunkelblau) und Simulation (hellgrün: aufdatiert; hellblau: nicht aufdatiert) für je eine Station pro Untersuchungsgebiet (ELM2, Linthtal; KES2, Engadin; Erlenhöhe, Alptal) in den beiden Wintern 2005/06 und 2006/07. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR	57
Abbildung 26: Beobachtetes (dunkelblau), simuliertes (hellblau) und aufdatiertes (hellgrün) SWE für die Stationen KES2 im Engadin und ELM2 im Linthtal im Winter 2005/06. Aufdatierungsprodukt: regionale Schneehöhenkarte	58
Abbildung 27: Darstellung des mittleren (beachtete Periode: Januar bis Ende April) simulierten Schneewasseräquivalents in Prozent des mittleren beobachteten Schneewasseräquivalents für die Gebiete Linthtal und Engadin (Aufdatierungsserie 3).	59
Abbildung 28: Vergleich des beobachteten (operationelle Schneehöhenkarte) und simulierten Schneemusters für die 3 Einzugsgebiete Alptal, Linthtal und Engadin am 21. April 2006.	61
Abbildung 29: Vergleich des Schneemusters zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz	62
Abbildung 30: Kategorielle Statistik zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und PREVAH für beide Winter im Einzugsgebiet der Linth.	64
Abbildung 31: Vergleich des Schneemusters zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und PREVAH am 19. Januar 2006 für alle drei Untersuchungsgebiete	65
Abbildung 32: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte für das Linthtal. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.	66
Abbildung 33: Vergleich zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte nach dem Update mit der operationellen Schneehöhenkarte. Legende der x-Achse und Vergleichsgrafik ohne Update sind in Abbildung 29 zu finden.	67
Abbildung 34: Schneemuster am 11. Juni 2006 und 20. April 2007 für das Einzugsgebiet der Linth. Räumliche Darstellung der kategoriellen Statistik.	68
Abbildung 35: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der regionalen und operationellen Schneehöhenkarte für das Engadin im Winter 2005/06. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.	69
Abbildung 36: Kategorielle Statistik zwischen PREVAH und der regionalen Schneehöhenkarte für das Engadin am 4. Mai und 11. Juni 2006 vor und nach dem Update	70

Abbildung 37: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der operationellen Schneehöhenkarte für das Alptal. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.	71
Abbildung 38: Kategorielle Statistik für das Alptal am 2. April 2006.	72
Abbildung 39: Darstellung des Abflusses für a) Linthtal und b) Alptal. Hellblau: Beobachtung; orange: PREVAH ohne Update; hellgrün: PREVAH nach Update mit operationeller Schneehöhenkarte der Schweiz	74
Abbildung 40: Darstellung des Abflusses im Linthtal von Januar bis April 2007. hellblau: Beobachtung; hellgrün: Simulation ohne Update; orange: Simulation mit Update. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR	76
Abbildung 41: Darstellung der verwendeten Parameterwerte für den Schneekorrekturefaktor SNOKOR	77
Abbildung 42: Einfluss des veränderten Parameters SNOKOR auf das Schneemuster und somit auf die ACC	77
Abbildung 43: Darstellung des aufdatierten modellierten SWE und des beobachteten SWE nach der Sensitivitätsanalyse. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz.	78
Abbildung 44: Durchschnittlich simuliertes SWE für das Engadin in % des beobachteten SWE mit und ohne Kalibrierung. Kein Update.	79
Abbildung 45: Durchschnittlich simuliertes SWE für das Engadin in % des beobachteten SWE mit und ohne Kalibrierung. Update mit operationeller Schneehöhenkarte der Schweiz.	80
Abbildung 46: Vergleich des Schneemusters im Engadin zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz mit und ohne Kalibrierung.	81
Abbildung 47a: Zusammenstellung der Kategoriellen Statistik für den Winter 2005/06 (Serie 3). Linthtal und Engadin.	101
Abbildung 47b: Zusammenstellung der Kategoriellen Statistik für den Winter 2005/06 (Serie 3). Alptal.	102

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: 2x2 Kontingenztabelle. SIM.NEIN und SIM.JA sind die simulierten Ergebnisse der entsprechenden Beobachtungen BEOB.NEIN und BEOB.JA. n00 sind die sogenannten "Nein-Nein-Treffer" (Zero), n01 die "verpassten Treffer" (missing), n10 die "falschen Alarme" (false alarm) und n11 die "Ja-Ja-Treffer" (hit).	25
Tabelle 2: Übersicht über die NOAA/AVHRR Datensätze, die zur Aufdatierung und/oder für die Verifikation verwendet wurden.	31
Tabelle 3: Kreuzvalidierung zwischen den drei Schneemuster-Produkten. Dargestellt ist jeweils die ACC.	39
Tabelle 4: Übersicht über die Validierungs- und Aufdatierungsarten für die Einzugsgebiete. OP = Operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz; NOAA/AVHRR = Satellit; REG = Regionale Schneehöhenkarte.	46
Tabelle 5: Schwellenwerte für den Übergang von schneebedeckt zu aper für die vier Schneemuster-Karten	61
Tabelle 6: Darstellung des Nash-Sutcliffe Koeffizienten nach den durchgeführten Aufdatierungsserien für das Alptal und Linthtal für den Winter 2005/06. Abkürzungen: OP=operationelle Schneehöhenkarte, AVHRR=Satellitenbild, REG=regionale Schneehöhenkarte	73
Tabelle 7: Zusammenstellung der Gütekoeffizienten für den Winter 2006/07	75
Tabelle 8: Parameterwerte für die Berechnung der Schneeschmelze für das Engadin.	79
Tabelle 9: Verwendete Schneemessstationen für die Berechnung der regionalen Schneehöhenkarten	95
Tabelle 10: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Engadin. Vergleich erfolgt an den IMIS Stationen.	97
Tabelle 11: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Engadin. Vergleich erfolgt an den Beobachter Stationen	98
Tabelle 12: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Linthtal. Vergleich erfolgt an den IMIS Stationen.	99
Tabelle 13: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Linthtal. Vergleich erfolgt an den Beobachter Stationen.	99
Tabelle 14: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Alptal	100
Tabelle 15: Zusammenstellung der Aufdatierungstage für die verschiedenen Aufdatierungsserien für den Winter 2005/06 und 2006/07	103
Tabelle 16: Daten der Aufdatierungstage für die Grafiken der Kategoriellen Statistik in Kapitel 7.3.2	104

1 EINLEITUNG

1.1 KONTEXT DER DIPLOMARBEIT

Das Abflussregime eines hydrologischen alpinen Einzugsgebietes wird stark durch Niederschlag, sowie Gletscher- und Schneeschmelze geprägt. Ein gleichzeitiges Auftreten von Niederschlag und Schneeschmelze kann zu Frühlingshochwassern führen, welche massive Schäden anrichten, wie dies beispielsweise im Mai 1999 der Fall war (Hegg et al., 2000). Aus diesem Grunde sind repräsentative Echtzeit-Informationen über die Schneehöhe, das Schneewasseräquivalent und das Schneemuster für diverse Anwendungen, wie etwa Lawinenwarnung, Hochwasservohersagen und die Wasserkrafterzeugung von enormer Bedeutung. Rund 60% der gesamten Stromerzeugung in der Schweiz stammen aus Wasserkraft, welche hauptsächlich auf Schneeschmelzwasser basiert (Burkhardt, 1991).

Alpine und voralpine Einzugsgebiete werden durch eine stark variable Morphologie, verschiedene Boden- und Vegetationstypen und durch zeitliche und räumliche Variationen der Klimaelemente charakterisiert (Gurtz et al., 1999). Der Anspruch an hydrologische Modelle ist folglich, diese Heterogenität in verschiedenen räumlichen Auflösungen möglichst präzise darzustellen. Die Übereinstimmung von hydrologischen Simulationen und beobachteten Ereignissen ist daher abhängig vom Modell. Ein Instrument zur Abflussprognose in heterogenen alpinen Gebieten ist das an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) entwickelte Niederschlags-Abflussmodell PREVAH (Precipitation Runoff Evapotranspiration Hydrotope Model) (Gurtz & Zappa, 2004). Es berechnet die wichtigsten Prozesse des Transports, der Speicherung und der Zustandsänderung des Wassers in einem hydrologischen Einzugsgebiet (Perl, 2002).

PREVAH wird seit Juli 2005 im Kanton Glarus operationell angewendet und dient dem Kanton zur Unterstützung der Hochwasserwarnung. Aus diesem Grunde ist es von besonderem Interesse, das Modell weiter zu verbessern und gleich in diesem Gebiet zu testen. Ein weiteres Testgebiet, das Engadin, ist Teil eines internationalen Projektes (AWARE), welches die Verwendung von satellitengestützten Schneemuster-Karten als Datenquelle für schneehydrologische Modelle zum Ziel hat. Als drittes Testgebiet bietet sich das Alptal im Kanton Schwyz an, das seit langer Zeit Forschungsgebiet der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) ist. Zudem ist der anthropogene Einfluss in diesem Gebiet gering.

1.2 MODELLIERUNGSKONZEPTION

Ein Modell ist eine vereinfachte Darstellung der Realität und es sind nur jene Teile des natürlichen Systems integriert, welche für die Lösung eines Problems nötig sind. Die Struktur eines Modells wird folglich stark durch das Forschungsziel beeinflusst (Gurtz & Zappa, 2004).

Hydrologische Modelle können in Bezug auf ihre räumliche Differenzierung in verschiedene Kategorien eingeteilt werden (Abbildung 1). Dabei wird zwischen deterministischen und stochastischen Modellen unterschieden. Deterministische Modelle können weiter gemäss ihrer Annäherung an die Diskretisierung des Raumes in White-, Grey- und Black-Box Modelle eingeteilt werden. Das hydrologische Modell PREVAH wird zu den Grey-Box Modellen gezählt. Noch genauer teilt man es den gegliederten Modellen (distributed models) zu, da eine Diskretisierung des Raumes erfolgt (Dyck und Peschke, 1995). Beven (2003) definiert gegliederte Modelle als Modelle, welche Werte von räumlich und zeitlich variierenden Zustandsvariablen vorhersagen.

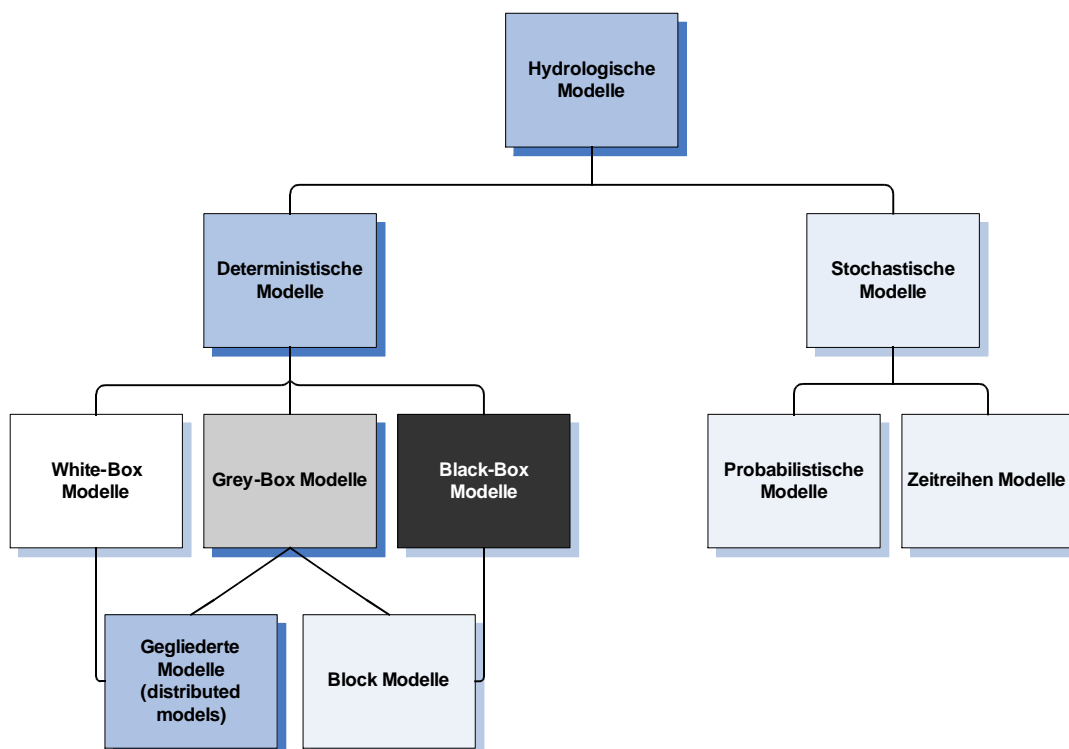


Abbildung 1: Einteilung von hydrologischen Modellen nach Dyck und Peschke (1995).

Viele bestehende Modelle arbeiten im kleinsskaligen Bereich (1 cm² bis 1 ha), können also nur auf kleine Einzugsgebiete angewendet werden. Beispiele hierfür sind die Mo-

delle TOPMODEL (Beven, 1995) und SHE (Système Hydrologique Européen) (Abbott, 1986). Ein weiteres Modell, welches auf grösseren Skalen (Mesoskalen, 1 km² – 100 km²) anwendbar ist, ist das PRMS/MMS Modell (Leavesley & Stannard, 1995). Grossräumigere Anforderungen und Fragestellungen führten zur Entwicklung von Modellen, welche in der Lage sind, den Wasserhaushalt von grossen Einzugsgebieten zu simulieren. Beispiele von solchen makroskaligen Modellen (10⁶ km² – 10⁸ km²) sind das LARSIM (Bremicker, 1999), das HBV (Bergström, 1995) und PREVAH (Gurtz & Zappa, 2004). Die Modellkonzepte dieser Modelle unterscheiden sich teilweise beträchtlich und reichen von eher einfachen (semi)-distributiven Ansätzen (z.B. HBV, PREVAH) bis hin zu detaillierten, prozessorientierten Ansätzen (z.B. LARSIM).

1.3 STAND DER FORSCHUNG IN DER SCHNEEMODELLIERUNG

Eine der wertvollsten Ressourcen für Mensch und Tier ist Süsswasser. Weltweit spielen die Berge für das Angebot und die Erneuerung von Süsswasser eine einzigartige Rolle und sind oftmals die wichtigste Frischwasserquelle. Auf der anderen Seite können schwere Regenfälle und Schneeschmelze Naturkatastrophen auslösen und die Entwicklung der Bevölkerung in den Bergen und im Flachland erschweren. In diesem Zusammenhang ist es von enormer Bedeutung, die Forschung in die Richtung der Entstehung, Speicherung und Freisetzung von Wasserressourcen zu lenken. In den Bergen wird der Zu- und Abfluss von Wasser hauptsächlich durch die Schneedecke, welche einen Zwischenspeicher bildet, bestimmt (Lehning et al., 2006). Aus diesen Gründen ist es nötig, Schneemodelle in hydrologische Abflussmodelle zu integrieren, um eine bessere Abflussmodellierung in alpinen Gebieten zu erreichen. Durch die Module zur Berechnung der Gletscher- und Eisschmelze sind das HBV – Modell von Bergström (1992), sowie PREVAH für die hydrologische Modellierung von Einzugsgebieten mit Gletscher- und Schneevorkommen besonders geeignet.

Die Modellierung der Hydrologie in voralpinen und alpinen Einzugsgebieten folgt am Institut für Atmosphäre und Klima (IAC) an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich einer langen Tradition (Gurtz et al., 2003). Insbesondere die räumliche Analyse und Modellierung des durch die Schneeschmelze verursachten Abflusses spielt eine grosse Rolle. Am IAC entstand vor mehr als 15 Jahren ein Modell, welches räumlich differenzierte Simulationen von hydrologischen Prozessen ermöglicht. Es ist dies PREVAH (Gurtz & Zappa, 2004), welches in zahlreichen Diplomarbeiten und Dissertationen an der ETH und am WSL angewendet und weiterentwickelt wurde. Mittlerweile kommt PREVAH auch in der Praxis zur Anwendung und dient zur Unterstützung der

Hochwasserwarnung. In China beispielsweise sollen mit PREVAH Zuflussvorhersagen zum Drei-Schluchten-Stausee aus dem direkt angrenzenden Einzugsgebiet verbessert und somit die Gefahr von Überschwemmungen besser eingeschätzt werden.

1.3.1 SCHNEEHYDROLOGISCHE MODELLIERUNG

In den letzten paar Jahrzehnten wuchs die räumlich differenzierte hydrologische Modellierung von Schneeschmelze zu einem renommierten Werkzeug in der hydrologischen Forschung. Die wachsende Popularität von differenzierten Schneeschmelzmodellen ist vor allem auf die zunehmende Leistung der Computer, sowie auf die Verfügbarkeit von digitalen Gelände- und Satellitendaten zurückzuführen (Anderton et al., 2004).

Ein häufig diskutiertes Thema in Kreisen der Schneehydrologen und Glaziologen ist die Frage nach der geeignetsten Methode zur Modellierung von Schneeschmelzprozessen. Dabei stehen die Temperaturindex- und Energiebilanz basierenden Methoden zur Diskussion (Zappa, 2002). Weitere Fragen stellen sich bei der Wahl der Modelltypen, wie konzeptionelle (z.B. Braun et al., 1994) oder physikalisch basierte (z.B. Beven, 1989) Modelle, der Modellstruktur (z.B. Klok et al., 2001, Zappa et al., 2003), sowie der Auflösung (Blöschl, 2001) des Modells.

Zappa (2002) diskutiert in seiner Arbeit den Unterschied zwischen konzeptionellen und physikalisch basierten Schneeschmelzmodellen.

Physikalisch basierte Modelle, wie Energiebilanz-Schnee-Modelle, haben den Vorteil, dass durch das vorgängige Festlegen der Parameter die Notwendigkeit der Kalibrierung auf ein Minimum von freien Parametern reduziert wird. Dies ermöglicht es, die Erfahrungen eines Einzugsgebietes ohne weitere Kalibrierung auf ein anderes Einzugsgebiet zu übertragen. Der Nachteil dabei ist allerdings, dass eine erhöhte Anzahl an Variablen gemessen werden muss. Ein Beispiel für ein Energiebilanz-Schneemodell ist das ESCIMO (**E**nergy-**B**alance **S**now **C**over **G**IS-**I**ntegrated **M**odel) Schneemodell von Strasser & Mauser (2001). Dieses berechnet die Energiebilanz, das Schneewasseräquivalent und die Schmelzrate einer Schneedecke. ESCIMO ist in PREVAH integriert und kann zur Berechnung der Schneeschmelze hinzugezogen werden. Ein weiteres Energiebilanz-Schneemodell ist ISNOBAL, welches von Marks et al. (1999) entwickelt wurde.

Konzeptionelle Modelle, wie Temperaturindex-Schnee-Modelle, ermöglichen die Anwendung des Modells mit weniger gemessenen Inputvariablen. Durch das Einstellen der Parameter können die Eigenschaften des untersuchten Einzugsgebiets erlangt werden.

Dies erhöht die Modellleistung innerhalb eines Einzugsgebiets, schmälert jedoch die Möglichkeit die Resultate auf andere Regionen zu übertragen.

Die Messung und räumliche Interpolation der Lufttemperatur in hoher Auflösung ist einfacher zu realisieren als detaillierte Beobachtungen der Energiebilanz. Daher werden Temperaturindex-Methoden (z.B. Hock, 1998) für räumlich differenzierte hydrologische Simulationen bevorzugt. Ohmura (2001) gibt eine physikalisch basierte Antwort auf die Frage, warum Temperatur basierte Methoden so effektiv sind. Temperatur basierte Methoden zeigen eine so gute Leistung, weil die Lufttemperatur eine repräsentative diagnostische Variable für die drei Hauptenergiequellen ist, von denen die Schnee- und Eisschmelze bestimmt wird. Gemeint sind damit die einfallende langwellige Strahlung, die absorbierte globale Strahlung, sowie der fühlbare Wärmefluss.

Weitere zur Schneemodellierung bestehende Modelle sind das Snowmelt-Runoff-Modell (SRM) von Martinec et al. (1998) und SNOWPACK (Lehning et al., 1999). Die Erweiterung von SNOWPACK für eine räumlich differenzierte Anwendung bildet das Modell Alpine3D (Lehning et al., 2006), welches zusätzlich mit einem Vegetations- und Abflussmodell gekoppelt ist.

Eine Zusammenstellung der gängigsten Wasserhaushalts- und Schneemodellen zeigt Abbildung 2. Eine Liste weiterer Schneemodelle, wobei der Schwerpunkt auf punktuellen physikalischen Schneemodellen beruht, ist in den Beiträgen zu den SnowMIP-Projekten I und II (z.B. Essery & Yang, 2000) zu finden. Für die Wasserhaushaltsmodelle bietet Singh (1995) einen guten Überblick.

WASSERHAUSHALTSMODELLE	SCHNEEMODELLE
TOPMODEL (Beven, 1995)	SNOWPACK (Lehning et al., 1999)
HBV (Bergström, 1995)	Alpine3D (Lehning et al., 2006)
PRMS/MMS (Leavesley & Stannard, 1995)	ESCIMO (Strasser & Mauser, 2001)
LARSIM (Bremicker, 1999)	SRM (Martinec et al., 1998)
PREVAH (Gurtz & Zappa, 2004)	ISNOBAL (Marks et al., 1999)
SHE (Abbott et al., 1986)	

Abbildung 2: Zusammenstellung der wichtigsten Wasserhaushalts- und Schneemodelle

1.3.2 AUFDATIERUNG VON (SCHNEE)HYDROLOGISCHEN MODELLEN

Modelle sind nicht perfekt. Um bessere Vorhersagen machen zu können, ist es daher nötig, die Resultate der Modelle aufzudatieren. Bereits wurden viele konzeptionelle Niederschlags-Abfluss Modelle entwickelt, die Übereinstimmung mit der Realität ist aber oft tief (Wöhling et al., 2006).

Satellitengestützte Schneemuster-Informationen finden in zahlreichen schneehydrologischen Modellen Anwendung. Zum einen dienen sie zur Validierung und Kalibrierung von schneehydrologischen Modellen (z.B. Blöschl et al., 2002; Foppa et al., eingereicht Nov. 2006, Garen et al., 2005; Alfnes et al., 2004). Zum anderen werden sie zur Aufdatierung solcher Modelle verwendet (z.B. Udnaes, 2005; Pulliainen, 2006; Andreadis & Lettenmaier, 2006).

Udnaes (2005) beispielsweise vergleicht in seiner Arbeit die simulierte Schneedecke mit jener des Satellitenbildes. Beträgt der Unterschied 15% oder 10% an drei von zehn aufeinander folgenden Tagen, wird das Modell aufdatiert. Dabei wird beispielsweise eine prozentuale Änderung des Winterniederschlages vorgenommen oder die Temperatur vor und während der Schmelzsaison modifiziert.

Im Ansatz von Barrett (gemäss Clark et al., 2006) wird das Schneewasseräquivalent auf Grund von Satelliteninformationen umverteilt. Das Update erfolgt in zwei Schritten: In Zellen, wo das Modell Schnee simuliert, der Satellit aber nicht, wird das SWE entweder aus dem Einzugsgebiet entfernt oder in Gebiete umverteilt, wo der Satellit und das Modell Schnee anzeigen. Dies ist generell in höheren Lagen der Fall. Simuliert das Modell keinen Schnee, der Satellit jedoch schon, wird eine dünne Schneeschicht auf die Gridzelle gesetzt.

Die Idee der Umverteilung von Barrett (gemäss Clark et al., 2006) wird in dieser Diplomarbeit ebenfalls eine zentrale Rolle spielen. Mit einem ähnlichen Ansatz soll versucht werden, das hydrologische Modell PREVAH aufzudatieren, um eine verbesserte Simulation des Schneemusters, des Schneewasseräquivalents und des Abflusses zu erreichen.

1.4 ZIELSETZUNG

In der vorliegenden Diplomarbeit wird mit dem hydrologischen Modell PREVAH das Schneemuster und das Schneewasseräquivalent (SWE) der letzten beiden Winter 2005/06 und 2006/07 für die drei Einzugsgebiete Linthtal, Engadin und Alptal berechnet. Im Zentrum der Arbeit steht die Assimilation von aktuell beobachteten Schneedaten, um die Güte der hydrologischen Vorhersage zu verbessern.

Die Ziele der Arbeit können wie folgt umschrieben werden:

- Wie gut stimmt die Simulation des Schneemusters für die drei Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichen Schneehöhenkarten und NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten überein?
- Wie gut stimmen die Simulation des Schneewasseräquivalents und des Abflusses mit Beobachtungen überein?
- Kann die Güte der Berechnungen durch die Assimilation von Schneehöhen- bzw. NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten für die drei Untersuchungsgebiete verbessert werden?
- Welches Produkt eignet sich am besten für eine operationelle Aufdatierung des Modells?

Die Simulationen erfolgen dabei mit einer Auflösung von 200 m im Linthtal und Alptal und 250 m im Engadin.

2 DAS HYDROLOGISCHE MODELL PREVAH

PREVAH ist ein konzeptionelles, flächendifferenziertes Modell zur Bestimmung des Wasserhaushaltes hydrologischer Einzugsgebiete. Für eine flächendifferenzierte Ermittlung der hydrologischen Prozesse beinhaltet PREVAH sechs wesentliche Teilmodelle:

- ein Schneemodell
- ein Gletschermodell
- ein Interzeptionsmodell
- ein Modell zur Feuchteausschöpfung durch Evapotranspiration
- ein Bodenspeicher- und Abflussbildungsmodell
- ein Grundwasser- und Abflusskonzentrationsmodell

Abbildung 3 zeigt eine schematische Darstellung der Inhalte von PREVAH. Das Modell geht von Stundenwerten der meteorologischen Eingangsvariablen aus und modelliert wiederum stündliche oder tägliche Ausgabewerte.

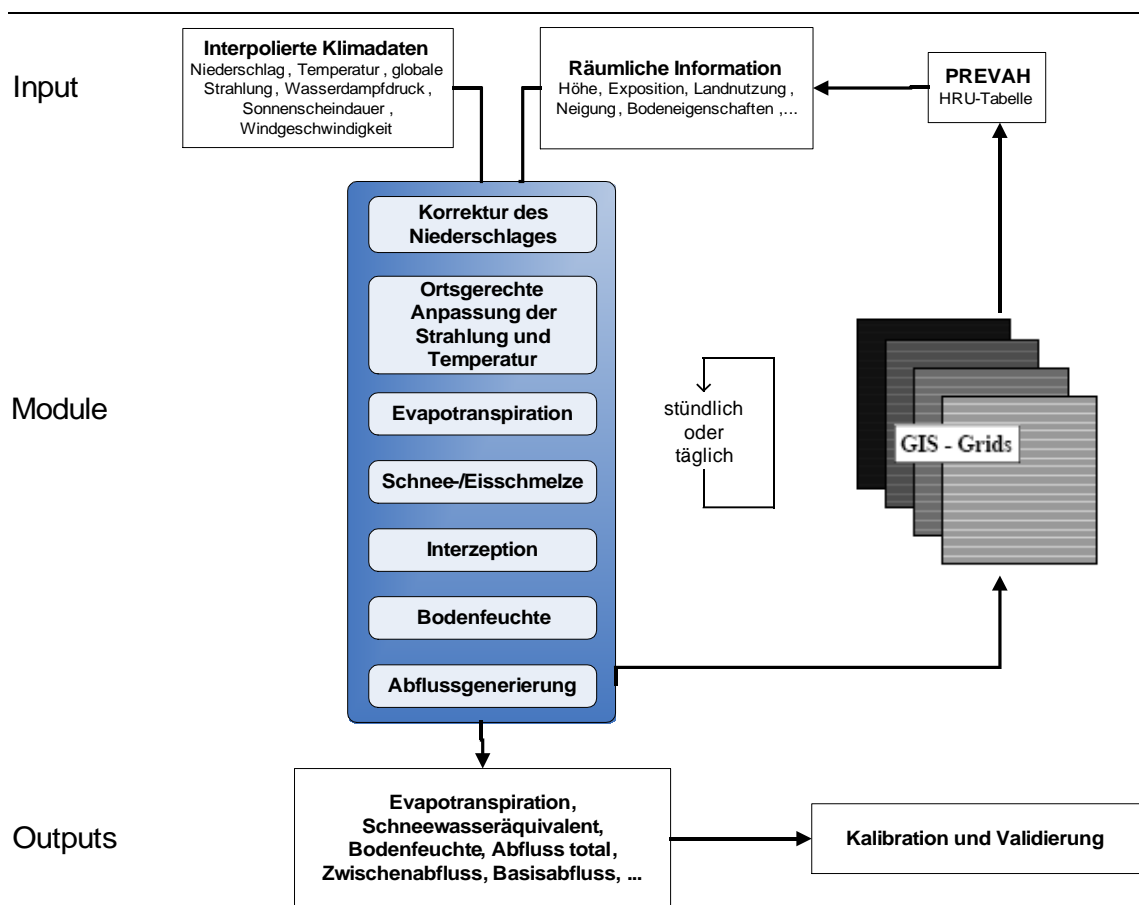


Abbildung 3: Beschreibung der Bestandteile von PREVAH. Modifiziert nach Zappa (2002)

Ab Kapitel 2.2 werden die einzelnen Teilmodelle genauer beschrieben. Dabei wird ein Schwerpunkt auf diejenigen Modelle gesetzt, die für die Schneemodellierung von Bedeutung sind. Eine kurze Erklärung der restlichen Module erfolgt zur Vollständigkeit und zum Verständnis des Modells. Für eine detaillierte Beschreibung wird auf die PREVAH Dokumentation von Gurtz & Zappa (2004, Kapitel 3), sowie Zappa (2002, S. 13 – 20) verwiesen.

2.1 DIE DISKRETISIERUNG DES RAUMES

Für eine räumliche Gliederung müssen Hydrotope definiert werden. Unter einem Hydrotop (engl.: hydrological response unit (HRU)) wird die Zusammenfassung von hydrologisch ähnlich reagierenden Oberflächeneinheiten verstanden (Beven, 2003).

Durch die Bildung von Hydrotopen ist es möglich, das Einzugsgebiet mit einer internen dynamischen räumlichen Auflösung aufzuteilen. Ein Teileinzugsgebiet, das in Bezug auf Eigenschaften der Landoberfläche, Topographie und Bodenstrukturen eine höhere räumliche Variabilität aufweist, wird in kleinere HRUs aufgeteilt, die schliesslich eine kleinere räumliche Variabilität der oben genannten Eigenschaften aufweisen (Zappa, 2002). Für die Erstellung solcher Hydrotope braucht es verschiedene Informationsebenen (Gurtz et al., 1999):

- *Flusssystem:*

Auf Grund des Flusssystems kann das Einzugsgebiet in Teileinzugsgebiete unterteilt werden. Die Flächen dieser Teileinzugsgebiete und der Flussbettnetzwerke können von der Topologie und der Position der Messstationen abgeleitet werden.

- *Topographie:*

Die Topographie wird durch die Höhe, Neigung und Exposition charakterisiert. Diese Faktoren kontrollieren in Kombination mit der Oberflächenalbedo die Höhe der verfügbaren Energie für die Evapotranspiration.

- *Die meteorologische Teileinheit:*

Die typischen Klassierungsgruppen dieser Teileinheiten sind Höhenzonen von 100 m und die Teileinzugsgebiete in Bezug auf das Flusssystem.

- **Landnutzung:**
Wichtig für die Kontrolle der Evapotranspiration, sowie für Prozesse, welche in der Abflussbildung eine Rolle spielen, ist die Landnutzung. Im Falle von vergletscherten Gebieten wird eine weitere Klasse verlangt. Dafür muss die Anordnung der Rasterelemente in Hinsicht der Gleichgewichtslinie der Gletscher bestimmt werden (Badoux, 1999).
- **Bodeneigenschaften und Geologie:**
Die Bodeneigenschaften und Geologie enthalten die Feldkapazität, die Bodentiefe, die hydrologische Leitfähigkeit, sowie die Charakteristiken der Grundwasserspeicherung und -erneuerung. Diese Eigenschaften sind wichtig für die Berechnung der Wasserbilanz.

Aus diesen Ebenen können nun die Kriterien für die Klassierung in HRUs generiert werden. Dafür werden alle Rasterzellen mit derselben meteorologischen Teileinheit, der gleichen Exposition, sowie den selben Landnutzungs- und Bodeneigenschaften in eine HRU zusammengefasst. Jeder HRU wird eine ID zugeteilt, die durch einen Code, zusammengestellt durch die unterschiedlichen Eigenschaften, bestimmt wird (Abbildung 4).

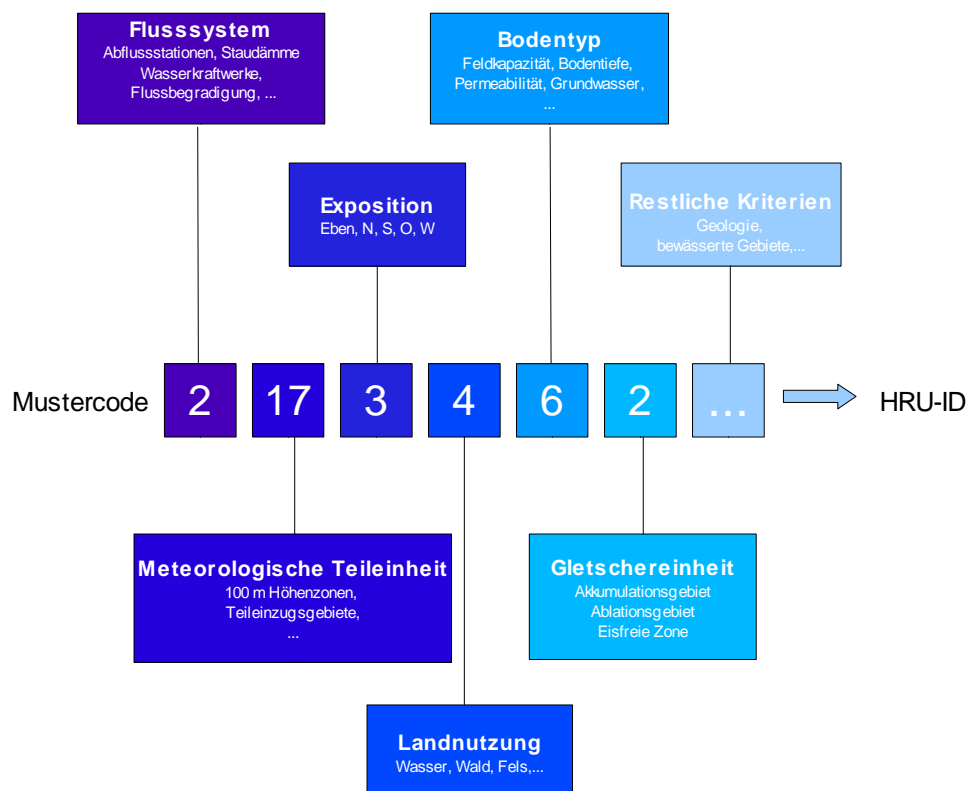


Abbildung 4: Räumliche Eigenschaften, die zur Generierung der HRUs benötigt werden. Modifiziert nach Zappa (2002)

Jede HRU ist durch ein Set von Parametern und relevanten Anfangswerten gegeben. Zudem wird jede separat modelliert. Die Parametrisierung basiert auf Informationen, die abgeleitet werden von

- einem digitalen Geländemodell (Höhe, Exposition, Neigung)
- einer Bodenkarte (für die Pflanzen verfügbare Feldkapazität, Bodentiefe, Leitfähigkeit)
- digitalen Landnutzungskarten

Für diese Diplomarbeit wurden das digitale Geländemodell RIMINI des Bundesamtes für Landestopographie (BfLT, 1991), die digitale Bodeneignungskarte des Bundesamtes für Raumplanung (BfR, 1980), sowie die Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik (BfS, 1992/1997) und der CORINE Land Cover Datensatz (BfS) verwendet.

2.2 DAS SCHNEEMODELL

2.2.1 SCHNEEAKKUMULATION

Der Prozess der Schneeakkumulation und -verteilung ist um einiges komplexer als nur eine Regensituation. Eine grosse Anzahl von meteorologischen und topographischen Interaktionen spielen im Winter während der Schneeakkumulationsperiode eine grosse Rolle. Von grosser Bedeutung sind die Temperatur und die Höhe, welche bestimmen, ob Niederschlag als Regen oder Schnee fällt (Gurtz & Zappa, 2004).

Für die Modellierung der Schneeakkumulation muss folglich zwischen Regen und Schneefall unterschieden werden. Die Art des Niederschlags wird über einen Schwellenwert der Lufttemperatur T_{GR} bestimmt. Ist die interpolierte Lufttemperatur T_a [°C] auf 2 Metern über Boden kleiner als ein kalibrierter Temperaturschwellenwert T_{GR} [°C], ist der Aggregatzustand des Niederschlages fest. Andernfalls ist er flüssig. Dazwischen gibt es einen Übergangsbereich ($= 2 \cdot T_{trans}$), in welchem Schnee und Regen gemischt vorkommen. Schliesslich entsteht die Gleichung für den Schneeanteil p_{Snow} im Niederschlag:

$$P_{Snow} = \frac{T_{GR} + T_{Trans} - T_a}{2 \cdot T_{Trans}} \quad (1)$$

P_{snow} wird für die Niederschlagskorrektur (Gleichung 8 und 9) benötigt (Zappa, 2002).

2.2.2 SCHNEESCHMELZE

Die Berechnung der Schneeschmelze erfolgt nach dem Temperatur-Strahlungs-Index Verfahren, wie es von Hock (1998) vorgeschlagen wird. Mit diesem Verfahren fließt die maximal mögliche direkte kurzwellige Strahlung in die Berechnung mit hinein. Dadurch können die topographischen Faktoren wie Neigung, Exposition und Abschattung berücksichtigt werden. Die maximal mögliche kurzwellige Strahlung ist einem täglichen Zyklus unterworfen, wie er bei der Schmelzrate von Schnee und dem Abflussverhalten während der Schneeschmelze zu beobachten ist. Folgende Formel zeigt die Berechnung der Schneeschmelze in PREVAH:

$$M = \begin{cases} (TMF_{EMA} + RMF_{EMA} \cdot I_0) \cdot (T_a - T_0) & T_a > T_0 \\ 0 & T_a < T_0 \end{cases} \quad (2)$$

M	Schmelzrate bei positiven Temperaturen in mm·h ⁻¹
TMF _{EMA}	Schmelzfaktor, entspricht dem Grad-Tag-Faktor in mm·d ⁻¹ ·°C ⁻¹
RMF _{EMA}	Strahlungskoeffizient für Schnee in mm·d ⁻¹ ·°C ⁻¹ ·(W ⁻¹ m ²)
I ₀	maximal mögliche direkte kurzwellige Strahlung an der Schnee- oder Eisoberfläche in Wm ⁻²
T ₀	Temperaturschwellenwert für den Schmelzbeginn in °C
T _a	Momentane Lufttemperatur in °C

Der Schmelzfaktor und der Strahlungskoeffizient sind empirische Koeffizienten und werden bei der Modellierung als Parameter behandelt.

2.2.3 SPEICHERUNG UND WIEDERGEFRIEREN VON FLÜSSIGEM WASSER IN DER SCHNEEDECKE

Die Schneedecke kann durch die Kapillarkräfte flüssiges Wasser entgegen der Schwerkraft speichern. Dieser Effekt tritt auf, wenn Regen auf Schnee fällt und infiltriert, oder wenn Schneeschmelzprozesse in der Schneedecke ablaufen. Bis zu einem maximalen Wert der Speicherfähigkeit wird das Wasser in der Schneedecke zurückgehalten. Die maximale Speicherfähigkeit für flüssiges Wasser lässt sich mit folgender Formel umschreiben:

$$SLIQMAX = CWH \cdot SO \quad (3)$$

SLIQMAX	grösster Betrag flüssigen Wassers in der betrachteten Schneedecke, welcher gegen die Schwerkraft zurückgehalten wird in mm
---------	--

CHW	Wasserrückhaltevermögen [-] (als Dezimale, z.B. 0.1)
SO	Schneedecke [mm Wasseräquivalent]

Schneesmelze tritt bei positiver Strahlungsbilanz und positiven Wärmeflüssen auf. Sind diese Faktoren jedoch negativ, kann flüssiges Wasser in der Schneedecke erneut gefrieren. Die Intensität dieses Prozesses wird mit dem so genannten Wiedergefrierungskoeffizienten CMELT (Gleichung 4) bestimmt. Dabei nimmt das Schneewasseräquivalent solange auf Kosten des zurückgehaltenen flüssigen Wassers zu, bis in der Schneedecke keines mehr vorhanden ist.

$$CMELT = \frac{T_a - T_0}{i} \cdot CRMF \cdot CRFR \quad (4)$$

CMELT	Schmelzbetrag bei „Strahlungswetter“ in mm·h ⁻¹
CRMF	Grad-Tag-Faktor eines bestimmten Tages in mm·d ⁻¹ °C ⁻¹
CRFR	Wiedergefrierungskoeffizient [-] (als Dezimale, z.B. 0.1)
T _a	stündlich gemessene und auf die entsprechende Höhenzone interpolierte Lufttemperatur in °C
T ₀	Schwellenwerttemperatur für Schmelzbeginn in °C
i	Anzahl Berechnungszeitintervalle während eines Tages

2.3 DAS GLETSCHERMODELL

2.3.1 GLETSCHER – ODER EISSCHMELZE

Das Gletschermodell in PREVAH wurde von Badoux (1999) entwickelt. Das Modell wird aufgerufen, sobald sich Gletscherflächen im Untersuchungsgebiet befinden. Die Schmelze wird aus Gletscherhydrotopen bestimmt. Dabei wird zwischen zwei Hydrotoparten, dem Akkumulationsgebiet und dem Ablationsgebiet unterschieden. Im Ablationsgebiet erfolgt eine Unterscheidung zwischen schneebedecktem oder aperem Gletschereis. Weist der Schneespeicher einen Wert von mehr als 0.1 mm auf, ist Schnee vorhanden. Das Hydrotop wird in diesem Fall als schneebedecktes Gletschereis behandelt. Für das schneebedeckte Gletschereis im Ablationsgebiet und den Gletscherfirm im Akkumulationsgebiet wird das Schneemodell von PREVAH aufgerufen. Handelt es sich um aperes Gletschereis, wird das Gletschermodell gestartet.

Mit der Ausnahme einer kleinen Anpassung des Schmelz- und Strahlungsfaktors erfolgt die Berechnung der Eisschmelze nach dem selben Temperatur-Index-Verfahren wie bei der Schneeschmelze nach Hock (1998):

$$M = \begin{cases} (TMF_{ice} + RMF_{ice} \cdot I_0) \cdot (T_a - T_0) & T_a > T_0 \\ 0 & T_a < T_0 \end{cases} \quad (5)$$

M	Schmelzrate bei positiven Temperaturen in mm·h ⁻¹
TMF _{ice}	Schmelzfaktor, entspricht dem Grad-Tag-Faktor in mm·d ⁻¹ ·°C ⁻¹
RMF _{ice}	Strahlungskoeffizient für Eis in mm·d ⁻¹ ·°C ⁻¹ ·(W ⁻¹ m ²)
I ₀	maximal mögliche direkte kurzwellige Strahlung an der Schnee- oder Eisoberfläche in Wm ⁻²
T ₀	Temperaturschwellenwert für den Schmelzbeginn in °C
T _a	Momentane Lufttemperatur in °C

2.4 DAS EVAPOTRANSPIRATIONSMODELL

Die Evapotranspiration ist eine Kombination aus Evaporation und Transpiration (Dyck & Peschke, 1995). Man unterscheidet zwischen realer und potentieller Evapotranspiration. Dabei ist die potentielle Evapotranspiration die maximale Verdunstungshöhe über einer Oberfläche, die unter gegebenen Klimabedingungen gegeben ist. Voraussetzung dabei ist, dass genügend Wasser zur Verfügung steht. Ist das Wasserangebot eines Bodens begrenzt, wird von realer Evapotranspiration gesprochen (Beven, 2000).

Zur Berechnung der Evapotranspiration gibt es mehrere Möglichkeiten. Die gängigsten Verfahren sind dabei die Gleichungen nach Turc (z.B. DVWK, 1996), Wendling (Wendling, 1975), Penman (Penman, 1963) oder Penman-Monteith (Monteith, 1975). Für diese Arbeit wurde die Evapotranspiration nach dem Penman-Monteith-Verfahren berechnet.

2.5 DAS INTERZEPTIONSMODELL

Fällt der Niederschlag auf vegetationsbedeckte Oberflächen, erreicht nur ein gewisser Prozentsatz direkt den Boden. Ein Teil des Niederschlages wird von der Vegetation aufgefangen und gelangt als Tropfen oder Stammabfluss (Bestandesniederschlag) auf den Boden. Ein weiterer Teil gelangt erst gar nicht auf den Boden, da er auf den Blättern verdunstet. Dieser Vorgang wird Interzeption genannt. Die Interzeption stellt wie die Schneedecke und die Gletscher einen Speicher dar, der das Wasser kurzfristig zurück

hält. Dabei definiert der Vegetationsbedeckungsgrad VBG den Anteil des Niederschlages, der bis zum Erreichen der Maximalfüllung des Speichers zurückgehalten wird. Tritt mehr Niederschlag auf als der Speicher tragen kann, gelangt dieser direkt in den Bodenspeicher bzw. in das Bodenspeichermodul.

2.6 BODENFEUCHTE UND ABFLUSSBILDUNG

Die Eigenschaften und der Feuchtezustand des Bodens bestimmen sowohl die reale Evapotranspiration als auch die Abflussbildung. So werden die Bodenfeuchte und Abflussbildung im Wesentlichen von folgenden drei Speichern beeinflusst:

- Bodenfeuchtespeicher SSM
- oberer Abflussspeicher SUZ
- Grundwasserspeicher SG

Die Speicher, sowie die Kaskade der Abflussbildung in PREVAH sind in Abbildung 5 dargestellt.

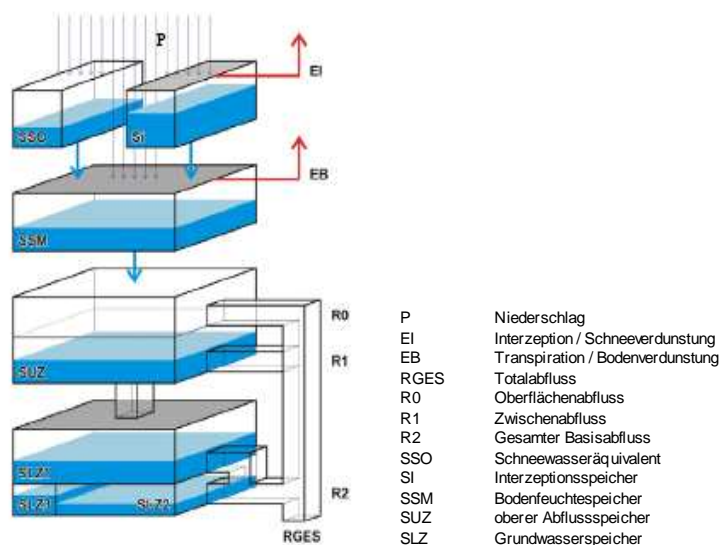


Abbildung 5: Darstellung des Abflusssystems von PREVAH. Leicht modifiziert nach Gurtz & Zappa (2004). Gezeichnet von D. Viviroli

Der Bestandesniederschlag (Interzeptionsmodell) und das Schmelzwasser der Schneedecke aus dem Schneemodell dienen als Eingang ins Bodenfeuchtemodell. Über einen nicht linearen Zusammenhang zwischen dem Bestandesniederschlag und dem Füllungs-zustand des Bodenspeichers wird der Zufluss DSUZ in den oberen Abflussspeicher berechnet. Ebenfalls in Abhängigkeit des Füllungs-zustandes wird die reale Bodenverdunstung

tung beschrieben. Die Abflussprozesse in PREVAH werden durch eine modifizierte Version des HBV-Modells (Bergström, 1992) nachgebildet. Der Zufluss DSUZ zum oberen Abflussspeicher wird bestimmt durch:

$$DSUZ = P_b \cdot \left(\frac{SSM}{SFC} \right)^{BETA} \quad (6)$$

DSUZ	Zufluss in den oberen Abflussspeicher in mm
P_b	Bestandesniederschlag in mm
SSM	Bodenfeuchtespeicherinhalt in mm
S_{NFC}	maximale Speicherkapazität des Bodenfeuchtespeichers in mm
BETA	empirischer Koeffizient

Je grösser der Parameter BETA ist, desto kleiner ist der Anteil des Bestandesniederschlages, der dem oberen Abflussspeicher zugeführt wird.

Der Zufluss in den oberen Abflussspeicher ist entscheidend für die Abflussbildung. Dabei erfolgt ein Teil des Abflusses aus dem oberen Abflussspeicher als Landesoberflächenabfluss R_0 . Dieser tritt vor allem bei Starkniederschlägen in voralpinen und bei Schnee- und Gletscherschmelze in hochalpinen Gebieten auf, wenn der Speicherinhalt SUZ einen Grenzwert LUZ (in mm) überschreitet. Ist $SUZ < LUZ$, dann entsteht kein Landesoberflächenabfluss. Der andere aus dem oberen Abflussspeicher fliessende Abfluss ist der leicht verzögerte Zwischenabfluss R_1 . Der Zwischenabfluss ist in alpinen Gebieten die wichtigste Abflusskomponente und sehr sensibel gegenüber den Bodeneigenschaften. Ein weiterer durch den Versickerungskoeffizienten CPREC bestimmter Anteil des im oberen Abflussspeicher gespeicherten Abflusses wird dem unteren Abflussspeicher SLZ zugeführt, solange im SUZ Feuchte vorhanden ist. Daraus erfolgt die dritte Abflusskomponente, der Basisabfluss R_2 , welcher die am stärksten verzögerte und beständigste Abflusskomponente ist. Der Basisabfluss entsteht durch eine Kombination von zwei linearen Grundwasserspeichern mit einer schnellen und verzögerten Komponente und wird entsprechend dem Modell SLOWCOMP (Schwarze et al., 1997) ermittelt (Gurtz & Zappa, 2004).

Schliesslich wird im Abflusskonzentrationsmodell für jede Abflusskomponente (R_0 , R_1 und R_2) einzeln eine Abflusskonzentration berechnet. Da alle Speicher für sich als Einzelspeicher betrachtet werden, ergeben sich einfache Speicher-Abfluss-Beziehungen.

Am Einzugsgebietsauslass werden alle für die einzelnen Hydrotope ermittelten Abflusskomponenten zum Gesamtabfluss R_{ges} aufsummiert:

$$R_{ges} = R_0 + R_1 + R_2 \quad (7)$$

2.7 DIE NIEDERSCHLAGSKORREKTUR

Das Modellieren von Niederschlag und Abfluss hängt stark von der Aufzeichnungsqualität der Messstationen ab. Die Niederschlagsmesser sind sehr empfindlich auf Fehler. Diese Fehlerempfindlichkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab. So kommt es beispielsweise stark darauf an, wie die Messstationen in Bezug auf Windbedingungen und Niederschlagsintensität konstruiert sind (Beven, 2003). Weiter können Fehler durch das Verdunsten des gesammelten Niederschlages entstehen. Der grösste Fehler wird jedoch durch den Wind verursacht (Sonderegger, 2004).

PREVAH bietet die Möglichkeit den Niederschlag durch das Einstellen von zwei Parametern anzupassen (Zappa, 2002):

$$P_{RainC} = P(1 - p_{Snow}) \cdot PKOR \quad (8)$$

$$P_{SnowC} = P \cdot p_{Snow} \cdot PSNOKOR \quad (9)$$

P	assimilierter Niederschlag,
P_{rain}	angepasster Regen
P_{snow}	angepasster Schneefall
p_{Snow}	Schneefraktion (Gleichung 1)
$PKOR$	einzugsgebietspezifischer Parameter für Regen
$PSNOKOR$	einzugsgebietspezifischer Parameter für Schnee

Durch die beiden Parameter $PKOR$ und $PSNOKOR$ können die Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Abflussraten minimiert und die Fehler der Mess-, Assimilierungs-, Interpolation-, und Niederschlagsdaten korrigiert werden.

3 DATENGRUNDLAGE

3.1 DIE SCHNEEDATEN

Für das Berechnen von Schneehöhenkarten mittels Interpolation bedarf es möglichst vieler Schneemessstationen. Für die Validierung des mit PREVAH berechneten SWE werden ebenfalls Beobachtungen der Messstationen benötigt. In der Schweiz stehen gleich mehrere Messnetze zur Verfügung, die durch Beobachter-Messungen ergänzt werden. Drei dieser Messnetze werden durch das Bundesamt für Meteorologie und Klima (MeteoSchweiz, 2005 - 2007) betrieben. Es sind dies die automatischen Messnetze ANETZ und ENET, sowie das konventionelle Messnetz KKS. Alle diese Messnetze beinhalten auch Schneehöhenmessungen.

ANETZ ist das umfassendste Messnetz der MeteoSchweiz. Die ersten Stationen wurden in den späten 1970er Jahren in Betrieb genommen und decken alle Regionen und Höhenlagen der Schweiz ab. Die kleinste zeitliche Auflösung ist 10 Minuten.

Länger in Betrieb als das ANETZ ist das konventionelle Messnetz KKS. Dieses besteht seit 1863 und repräsentiert den klassischen Stationstyp mit 3 Beobachtungen pro Tag (6:00 UTC, 12:00 UTC, 18:00 UTC). Sämtliche wichtige meteorologische und klimatologische Parameter werden gemessen, wobei die herkömmlichen Messinstrumente durch BeobachterInnen abgelesen werden.

Als Erweiterung des ANETZ dient das automatische Ergänzungsnetz ENET. Es ergänzt das ANETZ mit 11 zusätzlichen Gebirgsstationen. An diesen Stationen werden hauptsächlich Windmessungen vorgenommen. Ein spezieller Stationstyp, der spezifische Schneeparameter erfasst, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF) entwickelt. Die Daten werden ebenfalls im 10-Minuten-Rhythmus gemessen.

Das vierte Messnetz ist das seit 1996 bestehende IMIS-Netz. IMIS steht für Interkantonaies Mess- und Informationssystem. Für die Lawinenwarnung wurden in Zusammenarbeit mit Bund, Kantonen und Gemeinden unter der Leitung des SLF in den Schweizer Alpen über 70 automatische Messstationen gebaut. Diese befinden sich in Höhen zwischen 1600 und 3250 m.ü.M. Der gesamte Energiebedarf der Station wird mit Solarstrom gedeckt und die halbstündliche Übertragung der Daten ins Tal erfolgt via Funk.



Abbildung 6: Automatische IMIS-Messstation. Quelle: SLF Davos

Abbildung 6 zeigt eine solche Messstation. Eine IMIS-Station setzt sich aus einer Windstation und einer Schneestation zusammen. Die Schneestationen stehen an einem möglichst geschützten, flachen Standort, mit einer ungestörten, für das Gebiet repräsentativen Schneedecke. Hier werden verschiedene Schneeparameter gemessen und berechnet, von denen einer das SWE ist (Lehning et al., 1999). Die Lage der IMIS und ENET Stationen sind in Abbildung 9 dargestellt. Des Weiteren sind Beobachterstationen abgebildet, die ebenfalls zur Validierung hinzugezogen wurden.

IMIS-Stationen gibt es in den Einzugsgebieten Linthtal und Inntal, nicht aber im Alptal.

Dank der Forschungstätigkeit der WSL-Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Wildbäche im Alptal stehen auch für dieses Gebiet SWE Messungen zur Verfügung. Das SWE wird jeden Montag auf der Erlenhöhe und mittwochs alle 14 Tage an ausgewählten Standorten im Tal gemessen. Diese Messungen erfolgen per Hand, indem entlang einer Messstrecke von 20 bis 60 m in einem Abstand von einem Meter die Schneehöhe gemessen wird (Abbildung 7). An fünf Punkten auf dieser Messstrecke wird zusätzlich die Dichte des Schnees bestimmt. Die Dichte multipliziert mit der Schneehöhe ergibt schliesslich ein Schneewasseräquivalent. Mittelt man dieses über alle fünf Einzelmessungen, ergibt sich ein Schneewasseräquivalent pro Messstrecke.



Abbildung 7: Schneemessstrecke im Alptal. Quelle: A.Morger

3.1.1 DATENAUFBEREITUNG FÜR DIE REGIONALE SCHNEEHÖHENKARTE

Für die Berechnung der regionalen Schneehöhenkarten für den Winter 2005/06 wurden die Daten von September 2005 bis Ende Juli 2006 vom Server der MeteoSchweiz und des SLF heruntergeladen.

Um die Daten in dieser Arbeit weiter verwenden zu können, mussten sie zuerst folgendermassen aufbereitet werden:

- die halbstündlichen Schneehöhenwerte der IMIS-Stationen mit einem Medianmakro filtern, damit schliesslich Tageswerte vorhanden sind. Derselbe Filter erzeugt ein Quality-TAG, das angibt, ob der Sensor zeitliche Ausfälle hatte oder nicht.
- zweites Makro laufen lassen, welches fehlende Tage einfügt und den dazugehörigen fehlenden Wert mit -999 ersetzt.
- Für ANETZ und ENET Stationen Tageswerte herunterladen. Für die KKS Stationen wird die Messung um 12:00 UTC genommen.
- Zweiter Punkt ebenfalls für ANETZ, ENET und KKS durchführen.
- Pro Einzugsgebiet ein Excel-File erstellen, indem die Schneehöhen aller Stationen nach folgendem Schema zusammengestellt werden und als .txt abspeichern.

Datum	Schneehöhe Station x	QualityTAG Station x	Schneehöhe Station y	QualityTAG Station y
im Zahlenformat	in cm	-

- eben erstelltes File mit dem Programm DataView.m im Matlab öffnen und fehlerhafte und fehlende Daten korrigieren.
- Schneehöhenkurven im Matlab kalibrieren, indem die Sommerwerte, welche auf Grund von Graswachstum oder Fehlmessungen hoch sind, auf Null gesetzt werden.
- kalibrierte Daten in ein spezielles Datenformat bringen, damit sie von *DATAWIZARD* erkannt werden. Für genauere Erläuterungen siehe PREVAH-Dokumentation (Gurtz & Zappa, 2004).

3.2 EINGANGSDATEN VON PREVAH UND ABFLUSSDATEN

Die meteorologischen Eingangsdaten von PREVAH stammen wie die Schneedaten aus den Messnetzen der MeteoSchweiz (MeteoSchweiz, 2005 - 2007) . Die wichtigsten Messgrössen dieser Stationen sind beispielsweise der Niederschlag [mm], die Lufttemperatur [°C], die Globalstrahlung [Wm^{-2}], der Partialdruck des Wasserdampfes (Dampfdruck) [hPa], die Windgeschwindigkeit [m/s] und die Sonnenscheindauer [-] als Stundenwerte.

Auf die Herkunft der räumlichen Eingangsvariablen wurde bereits in Kapitel 2.1 hingewiesen. Diese wurden vom Bundesamt für Statistik (BfS, 1992/1997), vom Bundesamt für Raumplanung (BfR, 1980) und vom Bundesamt für Landestopographie (BfLT, 1991) zur Verfügung gestellt.

Die Abflussdaten, welche zur Validierung des Modells dienten wurden durch das BAFU (2005) zur Verfügung gestellt.

4 MODELLVALIDIERUNG

Validierung heisst „Überprüfung“. Daher validiert man ein Modell, wenn man überprüfen will, wie gut ein Modell mit der Realität übereinstimmt (Rykiel, 1996). Die Validierung des Modells sagt jedoch nichts darüber aus, ob das Modell das bestmögliche ist. Es wird zwischen drei Validierungsmethoden unterschieden:

- die operationelle Validierung: Hier werden die Modellergebnisse mit bereits vorhandenen (z.B. gemessenen) Daten verglichen
- die konzeptionelle Validierung: Bei dieser Art von Validierung stellt man sich die Frage, ob die Theorien über das Modell korrekt sind.
- die Datenvalidierung: Bei Modellierungen werden Standards gefordert. Die Datenvalidierung prüft, ob das Modell den geforderten Standard erzielt.

In dieser Diplomarbeit wird die operationelle Validierung angewendet, indem die Simulationsergebnisse (nicht aufdatiert und aufdatiert) mit gemessenen Daten verglichen werden.

4.1 QUALITÄTSBEURTEILUNG VON HYDROLOGISCHEN MODELLEN

Für die Qualitätsbeurteilung von hydrologischen Modellen werden subjektive und/oder objektive Schätzungen der Annäherung des Modells an Beobachtungen verlangt (Krause et al., 2005).

Gemäss Krause et al. (2005) geschieht eine grundsätzliche Qualitätsbeurteilung durch visuelle Betrachtung des simulierten und beobachteten Hydrographen. Mit dieser Annäherung können subjektive Beurteilungen des Modellverhaltens gemacht werden, welche generell in Beziehung zur Systematik (Über-/Unterschätzung) und Dynamik (Timing, aufsteigende/absteigende Äste) des Modells stehen.

Objektive Beurteilungen verlangen jedoch den Gebrauch von mathematischen Massen, die den Unterschied zwischen Modell und Realität quantitativ erfassen. Solche mathematische Masse werden auch Gütekriterien genannt. Gütekriterien werden definiert als mathematische Zusammenhänge, die messen, wie gut eine Modellsimulation zur beobachteten Realität passt (Beven, 2001). Die meisten Gütekriterien bestehen aus der Summierung der Differenzen zwischen den simulierten und beobachteten Variablen zu jedem Zeitschritt. Diese werden zusätzlich normalisiert durch das Mass der Variabilität

der Beobachtungen. Krause et al. (2005) beschreibt und vergleicht mehrere solche Gütekriterien für die Beurteilung von hydrologischen Modellen und zeigt ihre Vor- und Nachteile auf. Die folgenden beschriebenen Gütekriterien wurden für die Auswertungen dieser Diplomarbeit angewendet.

4.1.1 DAS BESTIMMTHEITSMASS R^2 (COEFFICIENT OF DETERMINATION)

Das Bestimmtheitsmass R^2 (Bahrenberg et al., 1999) ist definiert als das Quadrat des Korrelationskoeffizienten r gemäss Bravais-Pearson. Berechnet wird es nach folgender Formel:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=0}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (10)$$

- \bar{O} Mittelwert der Beobachtungen O_i
- \bar{P} Mittelwert der simulierten Werte P_i

Der Wertebereich von R^2 liegt zwischen 0 und 1 und beschreibt, wie viel der beobachteten Streuung durch die Simulation erklärt wird. 0 bedeutet absolut kein Zusammenhang, 1 hingegen bedeutet, dass die gesamte Streuung der Simulation jener der Beobachtung entspricht. Die Tatsache, dass nur die Streuung gemessen wird, ist einer der Nachteile von R^2 , wenn es als einziges Gütekriterium angewendet wird. Ein Modell, welches systematisch zu hohe oder zu tiefe Werte simuliert, wird trotzdem einen guten R^2 haben, obwohl falsche Werte simuliert wurden. Wird nur R^2 für eine Modellvalidierung gebraucht, ist es ratsam die Parameter a und b der Regressionsgleichung $Y = a + bX$, auf welcher R^2 beruht, zu bestimmen. Für eine gute Übereinstimmung sollte a nahe bei 0 sein. Dies bedeutet, dass ein beobachteter Abfluss von Null auch in der Simulation als Null resultiert. b dagegen sollte nahe bei 1 sein. Ist zum Beispiel $a = 0$ und $b = 0.7$, besagt dies, dass die Simulation im Allgemeinen die Werte 30% zu tief berechnet.

4.1.2 DAS BESTIMMTHEITSMASS E NACH NASH-SUTCLIFFE

Die Effizienz E , die von Nash und Sutcliffe (1970) vorgeschlagen wird, ist definiert als Eins minus die Summe der absoluten quadrierten Differenzen zwischen simulierten und beobachteten Werten. Dies wird wiederum normalisiert durch die Varianz der beobachteten Werte während der Beobachtungsperiode. In einer Formel ausgedrückt bedeutet dies folgendes:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

- \bar{O} Mittelwert der Beobachtungen O_i
 \bar{P} Mittelwert der simulierten Werte P_i

Der Wertebereich von E liegt zwischen 1 (absolute Übereinstimmung) und $-\infty$. Eine Effizienz, die kleiner als Null ist, besagt, dass der Durchschnittswert der beobachteten Werte eine bessere Voraussage machen würde als das Modell.

Der grösste Nachteil von E ist die Berechnung der Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Werten als Quadrate. Dabei werden grössere Werte stark überbewertet, wonach kleine Werte unterbewertet oder sogar vernachlässigt werden (Legates & McCabe, 1999). Zudem ist E ähnlich wie R^2 nicht sehr sensibel gegenüber systematisch zu hoch bzw. zu tief berechneten Werten. Dies besonders während Perioden mit wenig Abfluss.

4.2 ANALYSE DER KATEGORIELLEN DATEN

Durch die kategorielle Statistik kann die Präsenz der Schneebedeckung innerhalb eines Pixels in einem Untersuchungsgebiet quantifiziert werden. Dafür wird eine 2x2 Verifikationsmethode wie sie in Tabelle 1 dargestellt ist, angewendet.

Tabelle 1: 2x2 Kontingenztafel. SIM.NEIN und SIM.JA sind die simulierten Ergebnisse der entsprechenden Beobachtungen BEOB.NEIN und BEOB.JA. n_{00} sind die sogenannten "Nein-Nein-Treffer" (Zero), n_{01} die "verpassten Treffer" (missing), n_{10} die "falschen Alarme" (false alarm) und n_{11} die "Ja-Ja-Treffer" (hit).

	SIM. NEIN	SIM. JA	Σ
BEOB. NEIN	n_{00}	n_{10}	n_{x0}
BEOB. JA	n_{01}	n_{11}	n_{x1}
Σ	n_{0x}	n_{1x}	n_{xx}

Schliesslich können verschiedene Scores, wie sie Zappa (2007, in Druck) beschrieben hat, abgeleitet werden. Diese werden im Folgenden beschrieben.

4.2.1 DIE ACCURACY (ACC)

Die ACC ist die Anzahl der durch das Modell richtigen Voraussagen von schneebedeckten und aperen Pixeln geteilt durch die Gesamtzahl der Voraussagen. Der Wertebereich geht von 0 bis 1, wobei 1 die perfekte Übereinstimmung bedeutet. Die ACC ist stark beeinflusst durch die grösste Kategorie. So können zum Beispiel in einer Kontingenztabelle die schneefreien Events gegenüber den schneebedeckten stark überzählig sein, was vor allem in tief gelegenen Regionen zu irreführenden Interpretationen, was die Fähigkeit eines Modells anbelangt, führen kann.

$$ACC = \frac{(n_{11} + n_{00})}{n_{xx}} \quad (12)$$

4.2.2 DIE PROBABILITY OF DETECTION (POD)

Die POD sagt aus, wie gross der Anteil der richtig simulierten Vorhersagen im Verhältnis zur Gesamtzahl der simulierten Vorhersagen ist.

$$POD_1 = \frac{n_{11}}{n_{x1}} \quad POD_0 = \frac{n_{00}}{n_{x0}} \quad (13)$$

Der Wertebereich geht von 0 bis 1, wobei 1 wiederum das beste Ergebnis ist.

4.2.3 DAS FALSE ALARM RATIO (FAR)

Die FAR misst den Anteil der simulierten Ereignisse, die in Wirklichkeit keine Ereignisse waren, also nicht beobachtet wurden.

$$FAR = \frac{n_{10}}{n_{1x}} \quad (14)$$

Die FAR ist nur sensibel gegenüber falschen Vorhersagen (false alarms) und nicht gegenüber fehlenden Vorhersagen (miss). Der Wertebereich geht von 0 bis 1. Dabei ist 0 der perfekte Wert.

4.2.4 DER BIAS

Der BIAS misst die relative Fläche (oder Häufigkeit) von simulierten und beobachteten Ereignissen ohne Rücksicht auf die Vorhersagegenauigkeit.

$$BIAS = \frac{n_{1x}}{n_{x1}} \quad (15)$$

Der Wertebereich reicht von 0 bis ∞ , wobei 1 am besten ist. Ein BIAS von 1 bedeutet keine Verzerrung, was heisst, dass die Häufigkeit der simulierten Ereignisse derjenigen

der Beobachtungen entspricht. Es heisst jedoch nicht, dass die simulierten und beobachteten Ereignisse räumlich und zeitlich am selben Ort vorkommen. Dies schmälert die Brauchbarkeit des BIAS. Ist der BIAS grösser als 1, bedeutet dies eine Überschätzung der Ereignisse, Werte unter 1 deuten auf eine Unterschätzung der Ereignisse hin.

4.2.5 DER CRITICAL SUCCESS INDEX (CSI)

Der CSI ist die Anzahl an korrekten Ereignisvorhersagen geteilt durch die Anzahl an simulierter und/oder beobachteter Fälle.

$$CSI = \frac{n_{11}}{(n_{xx} - n_{00})} \quad (16)$$

Der Wertebereich geht von 0 bis 1. Eins ist dabei der beste Wert. Der Vorteil des CSI ist, dass er nicht von den n_{00} -Ereignissen dominiert wird, wie dies bei der ACC der Fall ist. Ein Wert von 1 bedeutet, dass alle Ereignisse perfekt vorausgesagt wurden und den beobachteten Ereignissen entsprechen. Da er gegenüber den 'false alarms' und den 'misses' sensibel ist, entsteht ein massgebenderer Eindruck der wahren Übereinstimmung. Dies in Situationen, wo wenige Ereignisse involviert sind und in Situationen, wo die Häufigkeit von Ereignissen und Nicht-Ereignissen etwa die selbe ist.

4.2.6 DER HEIDKE SKILL SCORE (HSS)

„Skill Scores“ messen im Allgemeinen die Verbesserung einer Vorhersage gegenüber einiger Referenzvorhersagen, wie z.B. der Zufallswahrscheinlichkeit, der Persistenz oder der Klimatologie. Somit ziehen sie die erwarteten Charakteristika der untersuchten Objektwerte im Probeset in Betracht. Einer dieser Scores ist der Heidke Skill Score.

$$HSS = \frac{2 \cdot (n_{11} \cdot n_{00} - n_{01} \cdot n_{10})}{(n_{x1} \cdot n_{0x} + n_{1x} \cdot n_{x0})} \quad (17)$$

Der Heidke Skill Score misst die korrekten Vorhersagen, indem er die zufällig korrekten Vorhersagen eliminiert. Der Wertebereich reicht von $-\infty$ bis 1. 1 ist wiederum der beste Wert.

5 METHODEN ZUR AUFDATIERUNG VON PREVAH

5.1 AUFDATIERUNGSLGORITHMUS

Für die Aufdatierung von operationellen hydrologischen Modellen sind einfache Assimilierungsvorgänge gefragt. Daher wurde ein simpler Algorithmus implementiert, welcher den simulierten Durchschnitt des Schneewasseräquivalents eines spezifischen Einzugsgebiets auf jedes einzelne Pixel innerhalb des Tals umverteilt. Dies geschieht gemäss der räumlichen Variabilität, die durch die Schneemuster-Karten bestimmt wird:

$$SWE_{HRU(x,y)}^{new} = MAP_{x,y} \cdot \frac{\bar{M}odel}{\bar{M}ap} \quad (18)$$

$SWE_{HRU(x,y)}^{new}$	modifiziertes, aufdatiertes Schneewasseräquivalent im Pixel x,y
$MAP_{x,y}$	Schneehöhe bzw. Schneeanteil am Punkt x,y in der Schneehöhen- bzw. satellitengestützten Schneemuster-Karte
$\bar{M}odel$	durchschnittliches SWE der Simulation
$\bar{M}ap$	durchschnittlicher Schneewert der Schneehöhen- bzw. satellitengestützten Schneemuster-Karte

Die Werte der MAP Variablen entstehen entweder durch Schneehöhen der operationellen Schneehöhenkarten des SLF oder der regionalen Schneehöhenkarten, oder durch den Schneebedeckungsanteil der NOAA/AVHRR Satellitenkarten (siehe folgendes Kapitel).

5.2 AUFDATIERUNGSPRODUKTE

5.2.1 NOAA/AVHRR SCHNEEMUSTER-KARTE

Durch das Aufkommen der zivilen Satelliten ist es möglich geworden, die Schneebedeckung in grossräumigen Skalen von regional bis kontinental zu schätzen. Bis ungefähr 1960 wurde die Schneebedeckung in Gebirgsregionen hauptsächlich durch visuelle Beobachtungen oder mittels Handmessungen in räumlich und zeitlich kleinen Skalen bestimmt (Foppa et al., eingereicht Nov. 2006).

Die zirkumpolar kreisenden Satelliten der U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) liefern täglich Bilder des AVHRR (Advanced High Resolution Radiometer) Scanner mit einer räumlichen Auflösung im Nadir von 1.1 km. Die 5 Spek-

tralbänder des AVHRR Scanners messen sowohl reflektierte Sonnenstrahlung als auch von der Erdoberfläche und Atmosphäre emittierte thermale Energie (Foppa et al., 2007).

Die Gruppe für Fernerkundung des geographischen Institutes der Universität Bern bekommt und archiviert NOAA/AVHRR Daten, welche das gesamte Gebiet der Europäischen Alpen abdecken. Täglich werden Schneemuster-Karten, wie sie in Abbildung 8 dargestellt sind, in fast Echtzeit erstellt und gehen bis ins Jahr 1980 zurück (Foppa et al., 2007).

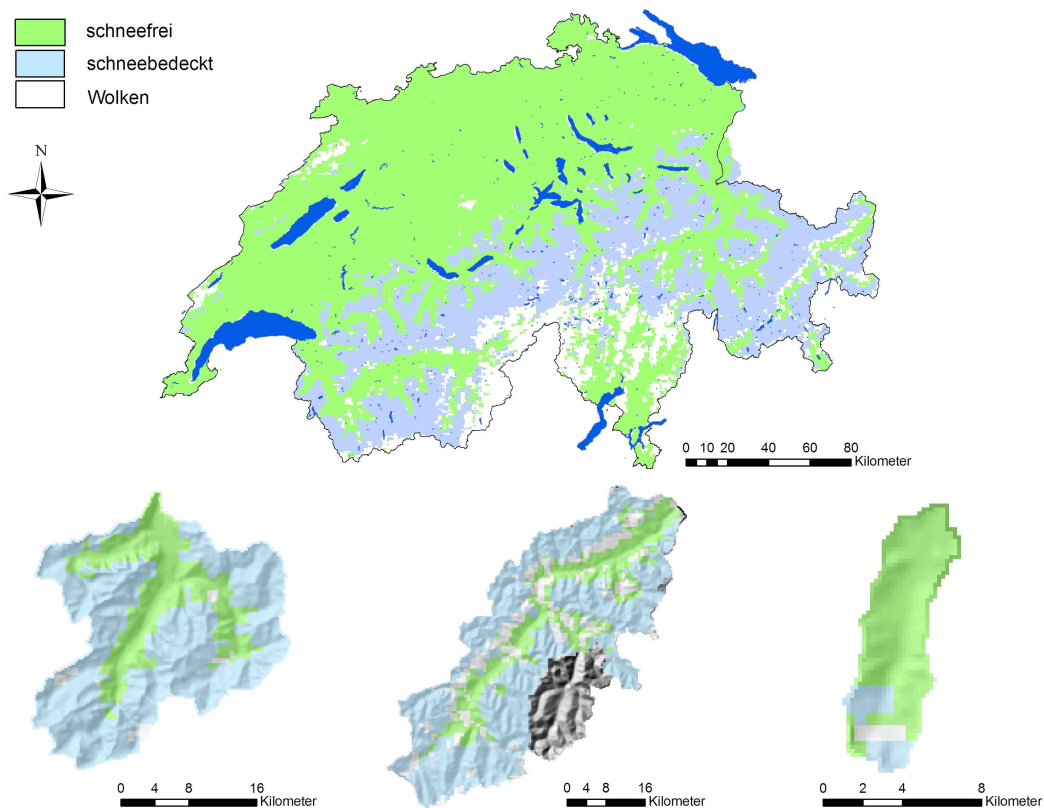


Abbildung 8: Schneemuster, berechnet durch den NOAA/AVHRR Satelliten für die ganze Schweiz (oben), sowie die Teilgebiete Linthtal (unten links), Engadin (unten Mitte) und Alptal (unten rechts) am 21. April 2006. Quelle: Geographisches Institut, Universität Bern, 2006.

Die mittlere räumliche Auflösung von 1.1 km und komplexe Topographie der Alpen hat zur Folge, dass jedes Pixel potentiell eine Mischung aus Schnee, Wolken, Wald, Fels, etc. aufweist. Um dieses Problem zu lösen, wurde nach einer Methode gesucht, die die Schneinformationen in einer sub-pixel Auflösung berechnet (Foppa et al., 2004). Für eine Schneemusteranalyse mit AVHRR Daten erwies sich der weit genutzte Linear Spectral Mixture Algorithmus (Adams et al., 1986) als der geeignetste. Dieser Algorithmus berücksichtigt potentiell gemischte Pixel, die verschiedene Landbedeckungstypen

beinhalten und berechnet den Anteil des Schnees in jedem Pixel (Foppa et al. 2007). Da praktisch in jedem Pixel ein gewisser Anteil an Schnee vorhanden ist, muss ein Schwellenwert definiert werden, um zwischen aperen und schneebedeckten Pixel unterscheiden zu können. Foppa et al. 2007 schlagen einen Schwellenwert von 15% – 17% vor. In dieser Arbeit wird ein Wert von 20% verwendet. Dies bedeutet, dass Pixel, die einen Schneebedeckungsanteil von unter 20% haben als schneefrei gelten. Diejenigen, die darüber liegen werden als schneebedeckt klassiert.

Tabelle 2: Übersicht über die NOAA/AVHRR Datensätze, die zur Aufdatierung und/oder für die Verifikation verwendet wurden.

Winter 2005/06

Tag	Zenit des Satelliten (°)		Bewölkung [%]			schneebedeckt [%]			schneefrei [%]		
	Zentralschweiz	Ostschweiz	Linthtal	Alptal	Inntal	Linthtal	Alptal	Inntal	Linthtal	Alptal	Inntal
19. Nov. 2005	27.5	20.6	13	0	13	53	36	87	34	64	0
1. Dez. 2005	-7.2	-15	3	0	0	65	81	75	33	19	25
19. Jan. 2006	25.1	17.9	2	0	3	86	88	84	12	12	13
31. Jan. 2006	25.1	36.2	4	0	1	95	68	76	1	32	23
14. Feb. 2006	20	21.6	10	0	1	78	99	74	11	1	25
15. Mrz. 2006	-28.2	-34.5	7	0	0	86	97	93	7	3	7
17. Mrz. 2006	33	26.7	1	0	0	88	100	97	10	0	3
2. Apr. 2006	-11.7	-19.3	9	18	0	67	37	100	24	45	0
7. Apr. 2006	9.4	1.3	1	6	1	78	94	90	21	0	8
21. Apr. 2006	36.2	30.2	5	4	15	63	17	64	32	79	21
3. Mai. 2006	4.4	28.3	2	3	2	56	8	70	43	89	28
4. Mai. 2006	34.6	-15.6	12	0	3	42	2	57	46	98	40

Winter 2006/07

Tag	Zenit des Satelliten (°)		Bewölkung [%]			schneebedeckt [%]			schneefrei [%]		
	Zentralschweiz	Ostschweiz	Linthtal	Alptal	Inntal	Linthtal	Alptal	Inntal	Linthtal	Alptal	Inntal
10. Nov. 2006	n.b.	n.b.	11	2	5	29	0	29	60	98	66
14. Dez. 2006	n.b.	n.b.	0	0	1	58	80	82	42	20	17
15. Jan. 2007	n.b.	n.b.	1	0	2	49	1	78	50	99	20
29. Jan. 2007	n.b.	n.b.	0.2	0	1	82.8	98	89	17	2	10
18. Feb. 2007	n.b.	n.b.	0.7	0	3	57.3	14	82	42	86	15
4. Mrz. 2007	n.b.	n.b.	0.1	0	1	73.9	17	88	26	83	11
15. Mrz. 2007	n.b.	n.b.	0	4	2	70	4	80	30	92	18
6. Apr. 2007	n.b.	n.b.	0	0	2	66	12	73	34	88	25
11. Apr. 2007	n.b.	n.b.	0.2	0	2	58.8	1	71	41	99	27
20. Apr. 2007	n.b.	n.b.	0.7	0	2	52.3	0	53	47	100	45

In der vorliegenden Arbeit wurden die Durchgänge des Satelliten NOAA-17 (Tabelle 2), jeweils Vormittags, verwendet. Dies auf Grund der im Winter herrschenden Beleuchtungsverhältnisse.

Für die Aufdatierung wurden nicht mehr als 25% Bewölkung in den jeweiligen Untersuchungsgebieten zugelassen. Weiter erfolgte, wenn möglich, eine Überprüfung des Satellitenbildes auf die Aufnahmegeometrie. Am geeignetsten ist die Aufnahme, wenn sie im Nadir, also senkrecht aufgenommen wurde. Das heisst, sie ist in diesem Fall frei von Verzerrungen. Als Schwellenwerte wurden hierfür -40° und $+40^\circ$ definiert. Ein „Minus“ steht für backward scattering (Sonne steht vis-à-vis des Satelliten) und ein „Plus“ für forward scattering (Sonne steht hinter dem Satelliten). Die Aufnahmegeometrie wurde für 2 Standorte bestimmt. Ersterer ist die Innerschweiz (8d30'50E/47d00'00N) für das Alptal und Linthtal, und der zweite die Ostschweiz (9d50'00E/46d44'00N) für das Engadin.

5.2.2 DIE OPERATIONELLE SCHNEEHÖHENKARTE DER SCHWEIZ

Das Aufzeichnen von Schneehöhen folgt in der Schweiz einer langen Tradition. Dadurch wurde eine Basis für die Lawinenwarnung und die Modellierung von Schneeschmelzabflüssen geschaffen. Das SLF in Davos veröffentlicht täglich Informationen über die Schnee- und Lawinensituation in den Schweizer Alpen. Regelmässig werden am SLF Schneehöhenkarten für die Schweiz mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km berechnet. Abgeleitet werden diese Schneehöhen aus Messungen verschiedener Schneemessstationen, welche räumlich interpoliert werden. Die Interpolation erfolgt nach einer Methode, wonach die Schneehöhe in Abhängigkeit der Höhe über Meer berechnet wird. (Foppa et al., 2005).

Die Schneehöhe wird insgesamt an 250 konventionellen Beobachtungsstationen und automatischen Schnee- und Meteo-Stationen gemessen, wovon etwa 5% pro Tag auf Grund von Sensordefekten oder Transmissionsverlust nicht in Betrieb sind. Diese liegen hauptsächlich in den alpinen Regionen. Im frühen Winter und Frühling vermindert sich die Zahl der Stationen auf 50%, da die Schneebeobachtungsperiode in tieferen Gebieten kürzer ist (Foppa et al, 2007).

Der Interpolationsalgorithmus enthält zwei Teilschritte. Als erstes wird ein landesweiter Basiswert G bestimmt, welcher den Zusammenhang zwischen der Schneehöhe und der topographischen Höhe mittels einer Potenzfunktion beschreibt. Dies ist eine Annäherung, welche ca. 50 – 70% der totalen Varianz der höhenabhängigen Schneehöhe erklärt. Daher wird dieser Basiswert in einem zweiten Schritt mit einem Kompensationsfaktor A angeglichen, indem dieser zum Basiswert nach folgender Formel addiert wird:

$$HS_j = G(h_j) + A_j \quad (19)$$

HS Snow height [cm]

G Basiswert [cm]

A Kompensationsfaktor [cm]

h Snow height of the grid cell [m. ü. M.]

j to be calculated grid cell x,y

Die Berechnung des Kompensationsfaktors erfolgt nach dem folgenden Prinzip:

$$A_j = \sum_{i=1}^3 \frac{HS_i - G_i}{3} \quad (20)$$

Der Kompensationsfaktor A_j ist der Durchschnitt der Differenz zwischen der gemessenen Schneehöhe und dem Basiswert für die drei dem Rasterpunkt nächst gelegenen Stationen. Da die durchschnittliche Schneehöhe hauptsächlich eine Funktion der topographischen Höhe ist, wird zusätzlich eine Gewichtung vorgenommen, um dieser Situation gerecht zu werden. Für eine genauere Erklärung siehe Foppa et al. (2007).

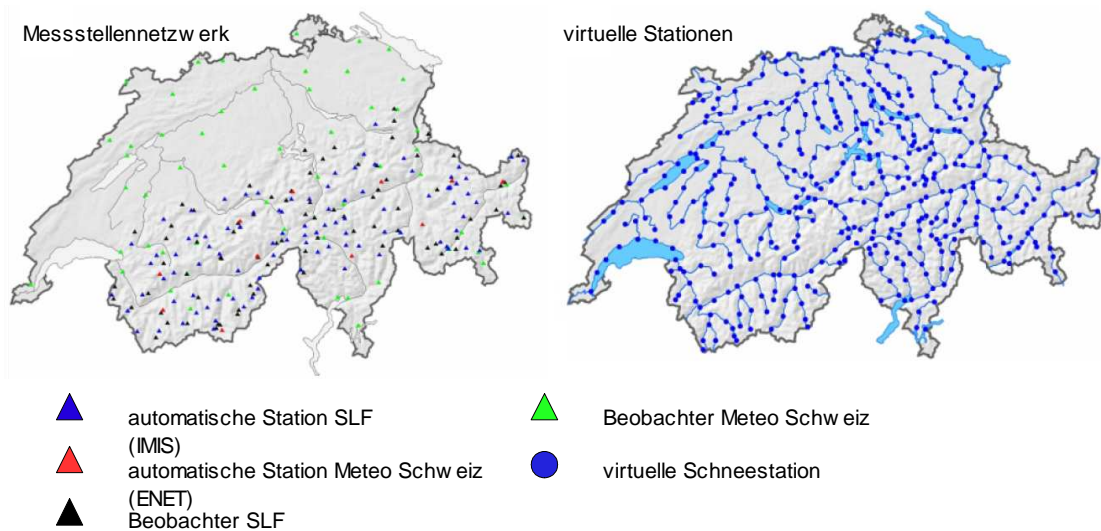


Abbildung 9: Schneemessstellennetzwerk der Schweiz (links) und irreguläres Punktnetzwerk entlang der Hauptflüsse als "virtuelles" Schneestationen-Netzwerk (rechts). Quelle: modifiziert nach Foppa et al., 2007

Wie bereits erwähnt, nimmt die Dichte der zur Verfügung stehenden Messstationen im Frühling stark ab. Dies erschwert eine zuverlässige Interpolation der Schneehöhen ungemein und führt zu Überschätzungen der Schneehöhe in Gebieten ohne Stationen. Aus diesem Grunde wurde am SLF eine Methode entwickelt, um aus den oben beschriebe-

nen NOAA AVHRR Schneemuster-Karten zusätzliche „virtuelle“ Stationen zu gewinnen. Dies hat eine Verdichtung der Stationen zur Folge und führt somit zu einer verbesserten räumlichen Interpolation im Frühling. Entlang der Hauptflüsse wird ein Netzwerk von „virtuellen“ Stationen angelegt (Abbildung 9) (Foppa et al., 2007).

Die NOAA/AVHRR Satellitenbilder geben wichtige Informationen über die Ausdehnung der Schneedecke. Auf Grund guter Beleuchtungsverhältnisse auf der Nordhemisphäre sind die Satellitenbilder im Frühling verglichen mit dem Hochwinter besser. Diese gegensätzlichen Trends der beiden Produkte werden nun ausgenützt, um das Resultat der Interpolation, insbesondere an der Grenze Schnee – nicht Schnee, zu verbessern. Mit Hilfe des NOAA/AVHRR Satellitenbildes werden diejenigen virtuellen Stationen ausgesucht, welche auf Grund des Satellitenbildes aper sind und als schneefreie Stationen in die Interpolation miteinbezogen. Alle anderen virtuellen Stationen werden nicht berücksichtigt. Auf diese Weise kann die Überschätzung des Schnees in stationslosen Gebieten verringert werden (Stoffel et al. 2006). Abbildung 10 zeigt das Endprodukt einer solchen operationellen Schneehöhenkarte vom 4. Mai 2006 für die gesamte Schweiz.

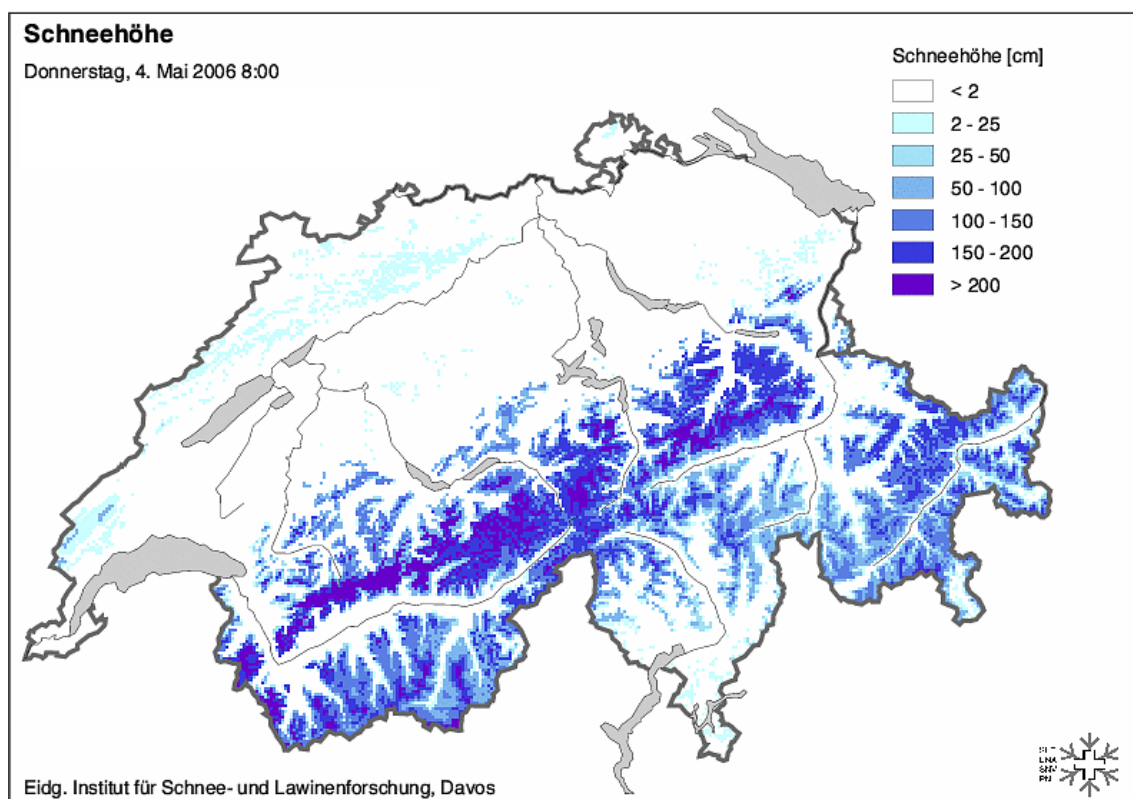


Abbildung 10: Operationelle Schneehöhenkarte des SLF vom 4. Mai 2006.

5.2.3 REGIONALE SCHNEEHÖHENKARTEN

Für die Assimilierung und räumliche Interpolation der meteorologischen Daten beinhaltet PREVAH mehrere Tools. Zwei dieser Tools wurden für die Berechnung der Regionalen Schneehöhenkarten angewendet. Es sind dies *DATAWIZARD* und *WINMET*. *DATAWIZARD* erlaubt die Assimilation von hydrometeorologischen Grössen. Das Tool erzeugt eine einfache Datenbank und führt eine Qualitätskontrolle durch. *WINMET* steuert die Interpolation der meteorologischen Grössen. Dabei stehen verschiedene Interpolationsmethoden zur Verfügung. Das Tool ist für die Verarbeitung der Daten aus der *DATAWIZARD* Datenbank konzipiert (Gurtz & Zappa, 2004).

Regionale Karten wurden für die beiden Gebiete Engadin und Linthtal erstellt. Auf Grund zu weniger Schneemesstationen innerhalb und im näheren Umkreis des Gebietes konnten für das Alptal keine Schneehöhenkarten erstellt werden. Als Messstationen dienten automatische, konventionelle und Beobachterstationen folgender Messnetze: IMIS, ENET, ANETZ, KKS (siehe Kapitel 3.1) und Beobachter. Eine detaillierte Liste der verwendeten Stationen ist im Anhang zu finden.

Bevor die Schneehöhendaten durch *DATAWIZARD* in eine Datenbank gebracht werden können, müssen sie bereinigt werden. Eine Möglichkeit die Daten zu sichten und allfällige Fehler zu korrigieren bietet sich mit einem für *MATLAB* geschriebenen Programm. Ausreisser wurden korrigiert und fehlende Daten ersetzt, wenn sie sich plausibel in den Verlauf der Schneehöhen einfügen liessen. Zudem wurde die gesamte Kurve kalibriert.

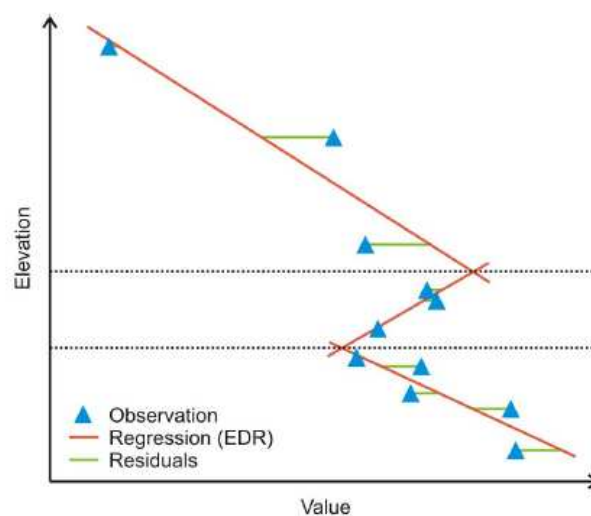


Abbildung 11: Prinzip der 3-stufigen Regression (rote Linie)

Für die Interpolation wurde die *Detrended Inverse Distance Weighting (DTIDW)* Methode gewählt.

Die *DTIDW* ist eine Mischung aus der Methode der *höhenabhängigen Regression (Elevation Dependent Regression, EDR)* und der *Inverse Distance Weighting* Methode. Ersterer benützt zur Schätzung der Interpolation die Höhenabhängigkeit einer Variable. Dazu werden höhenabhängige Gradienten für maximal drei Variablenbereiche benötigt (Abbildung 11). Die Variablenbereiche müssen selber bestimmt werden.

Die *EDR* Methode ist eine ungenaue Interpolationsmethode. Dies bedeutet, dass der interpolierte Wert, der für den Ort eines beobachteten Wertes berechnet wurde, diesem nicht entsprechen muss. Die Differenz zwischen dem beobachteten und dem interpolierten Wert wird Residuum genannt. Für die Anwendung dieser Methode müssen die Höhen der verwendeten Stationen bekannt sein (Schulla, 1997).

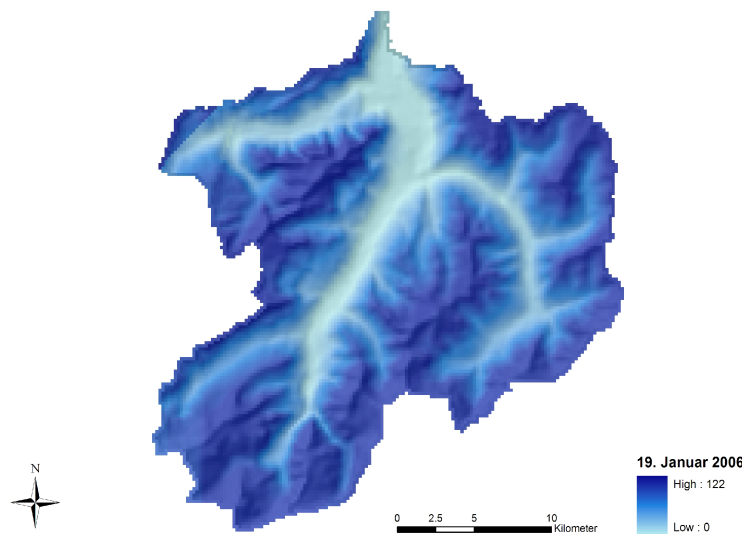


Abbildung 12: Regionale Schneehöhenkarte für das Linthtal, berechnet durch die DIDW Methode

Die *Inverse Distance Weighting* Methode kombiniert das Nachbarschaftsprinzip, das durch die Thiessenpolygone eingeführt wurde, mit der graduellen Änderung einer Trendoberfläche. Da bei der Interpolation nur die Nachbarschaft in Betracht gezogen wird, hat die IDW den Charakter eines lokalen Interpolators. Die Parameterwerte an unbeobachteten Stellen werden durch einen Distanz gewichteten Durchschnitt der beobachteten Datenpunkte berechnet. Messpunkte, die näher beim zu berechnenden Punkt

liegen, werden stärker gewichtet als solche, die weiter weg sind und haben somit einen grösseren Einfluss auf den Durchschnitt der gemessenen Werte. Diese Technik funktioniert gut für Daten, die unregelmässig im Raum verteilt sind. Um sie jedoch anwenden zu können, müssen die Koordinaten der Messstationen vorhanden sein (Schulla, 1997).

Die Residuen der höhenabhängigen Regression können nun mit der IDW Methode (IDW^{RES}) interpoliert werden. Als Resultat erhält man eine Residuenkarte. Werden nun die Karte, die durch die höhenabhängige Regression entstanden ist, und die Residuenkarte addiert, kann die Verzerrung, die durch die EDR an den beobachteten Punkten entstanden ist, ausgewiesen und korrigiert werden:

$$DTIDW_{(x,y)} = EDR_{(x,y)} + IDW_{(x,y)}^{RES} \quad (21)$$

Dieser Vorgang wird schliesslich *Detrended Inverse Distance Weighting* genannt. Die Idee dieser Methode ist es, die Datenvariabilität in horizontale (räumlich) und vertikale (Höhe) Komponenten aufzuteilen (Garen & Marks, 2001). Folglich müssen für diese Methode Koordinaten und die entsprechende Höhe der Stationen bekannt sein. Abbildung 12 zeigt durch diese Methode berechnete Schneehöhen für das Linthtal am 19. Januar 2006.

5.2.4 KREUZVALIDIERUNG DER DREI SCHNEEMUSTER-KARTEN

Die drei oben beschriebenen Schneemuster-Karten (operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz, regionale Schneehöhenkarte, NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte) sind durch eine Interpolation entstanden bzw. aus Satellitendaten abgeleitet worden, und entsprechen somit nicht zu 100% der Realität. Dies bedeutet, dass allfällige Diskrepanzen zwischen dem Modell und den Schneemuster-Karten nicht unbedingt die Ursache der falschen Modellierung sein müssen, sondern auf die Ungenauigkeit der Schneemuster-Karte zurückgeführt werden können.

Um die Unterschiede zwischen den Schneemuster-Karten abschätzen zu können, wurde eine Kreuzvalidierung zwischen diesen drei Karten vorgenommen. Dafür wurden für jeden Winter jeweils zwei Tage während der Schneeschmelze gewählt. Tabelle 3 zeigt, dass die ACC zwischen diesen drei Karten keineswegs nahe bei 100% liegt. Zwischen der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz und der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte besteht eine ACC zwischen 75% und 92% für das Engadin und Linthtal. Im Alptal liegt sie teilweise tiefer. Der Grund für die schlechten Resultate im Alptal ist auf die kleine Einzugsgebietsgrösse und gleichzeitig kleine Auflösung der Schneemuster-

Karten von 1x1km zurückzuführen. Weitere Gründe sind die Anzahl verfügbarer Me-
teo-Stationen in diesem Gebiet. Die ACC der beiden anderen Kombinationen liegt eben-
falls in diesem Bereich, sinkt am 4. Mai 2006 jedoch auf unter 70%. Allgemein gilt: je
weniger Schnee vorhanden ist, desto grösser ist der Unterschied zwischen den verschie-
denen Schneemusterkarten. So hat beispielsweise der schneeärmere Winter 2006/07
eine tiefere ACC als der schneereiche Winter davor. Ebenfalls sind jeweils die ACC-
Werte im Mai 2006 bzw. April 2007 tiefer als im Monat davor.

Linthtal
19. April 2007

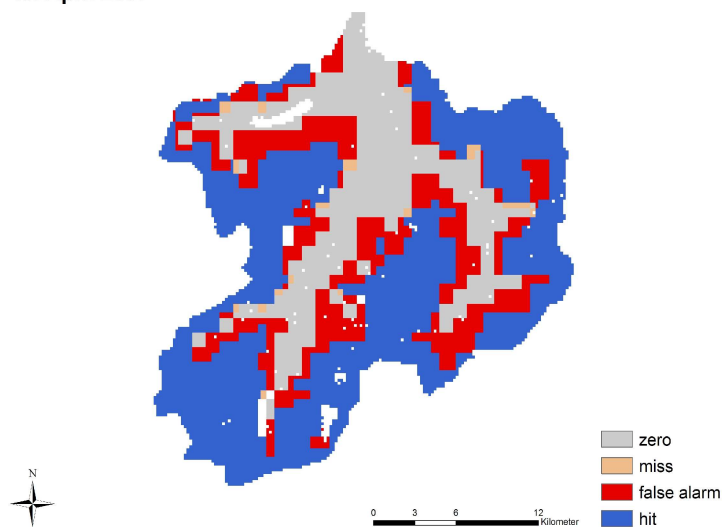


Abbildung 13: Kreuzvalidierung zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und der operationellen Schneehö-
henkarte am Beispiel des Linthtals am 19. April 2007

Wie Abbildung 13 am Beispiel des Linthtals am 19. April 2007 zeigt, konzentrieren
sich die Unstimmigkeiten hauptsächlich auf den Übergangsbereich von aperem zu
schneebedecktem Gebiet.

Tabelle 3: Kreuzvalidierung zwischen den drei Schneemuster-Produkten. Dargestellt ist jeweils die ACC.

Engadin				
	7. Apr. 2006	4. Mai. 2006	15. Mrz. 2007	19. Apr. 2007
operationell/AVHRR	92.21	83.58	85.52	74.89
operationell/regional	95.65	93.47	-	-
AVHRR/regional	92.88	83.24	-	-

Glarus				
	7. Apr. 2006	4. Mai. 2006	15. Mrz. 2007	19. Apr. 2007
operationell/AVHRR	89.19	81.31	76.8	77.2
operationell/regional	91.29	62.93	-	-
AVHRR/regional	88.73	69.98	-	-

Alpal				
	7. Apr. 2006	4. Mai. 2006	15. Mrz. 2007	19. Apr. 2007
operationell/AVHRR	27.42	95.21	68.89	80.66

6 UNTERSUCHUNGSGBIETE

Die starke topographische Gliederung in der Schweiz bringt unterschiedliche klimatische Eigenschaften einher, welche für die Berechnung hydrologischer Prozesse von Bedeutung sind (Perl, 2002). Eine Einteilung der Schweiz in klimatisch ähnliche Regionen (Abbildung 14) ist daher sinnvoll. Rohmann und Menzel (1999) haben die Schweiz in neun Regionen unterteilt:

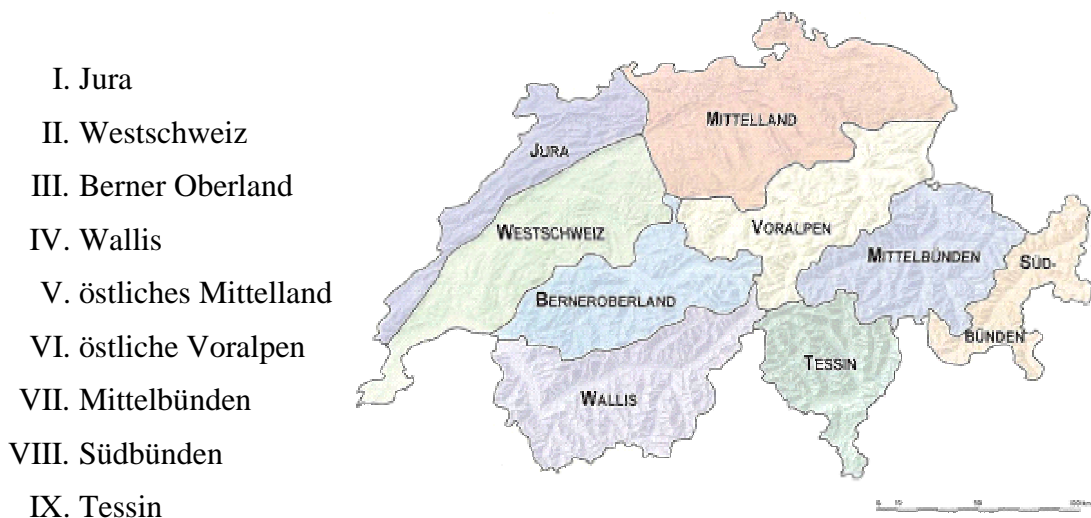


Abbildung 14: Klimatische Regionen der Schweiz. Quelle: Perl 2002

Die Modellierungen des Schneewasseräquivalents und des Schneemusters mit PREVAH werden für drei Gebiete in der Schweiz durchgeführt. Zum einen ist dies das Linthtal im Glarnerland, zum andern das Engadin, sowie das Alptal bei Einsiedeln (Abbildung 15). Folglich sind in dieser Diplomarbeit die klimatischen Regionen V bis VIII von Bedeutung.

6.1 LINTHTAL (KT. GLARUS)

Das Einzugsgebiet der Linth befindet sich in der Zentralschweiz, also in der Region der östlichen Voralpen. Es hat eine Fläche von 600 km². Die Hauptflussrichtung erstreckt sich von Südwesten nach Nordosten. Dabei wird das Abflussregime bis zur Messstelle von Mollis stark durch Wasserkraftwerke beeinflusst. Im Frühling und Sommer wird daher in zwei Stauseen Wasser gespeichert um Strom zu produzieren. Daher kann im Hydrographen des Abflusses ein ausgeprägter täglicher und wöchentlicher Zyklus beobachtet werden. Das Tal erstreckt sich in der Höhe von 435 m.ü.M. bis 3610 m.ü.M. 20% des Gebietes sind mit Wald bedeckt. Fels und vegetationsloser Boden machen 34% aus.

Ein Drittel des Einzugsgebietes ist Weideland. Zu hinterst im Tal befinden sich einige Gletscher, die ca. 4% des Gebietes ausmachen.

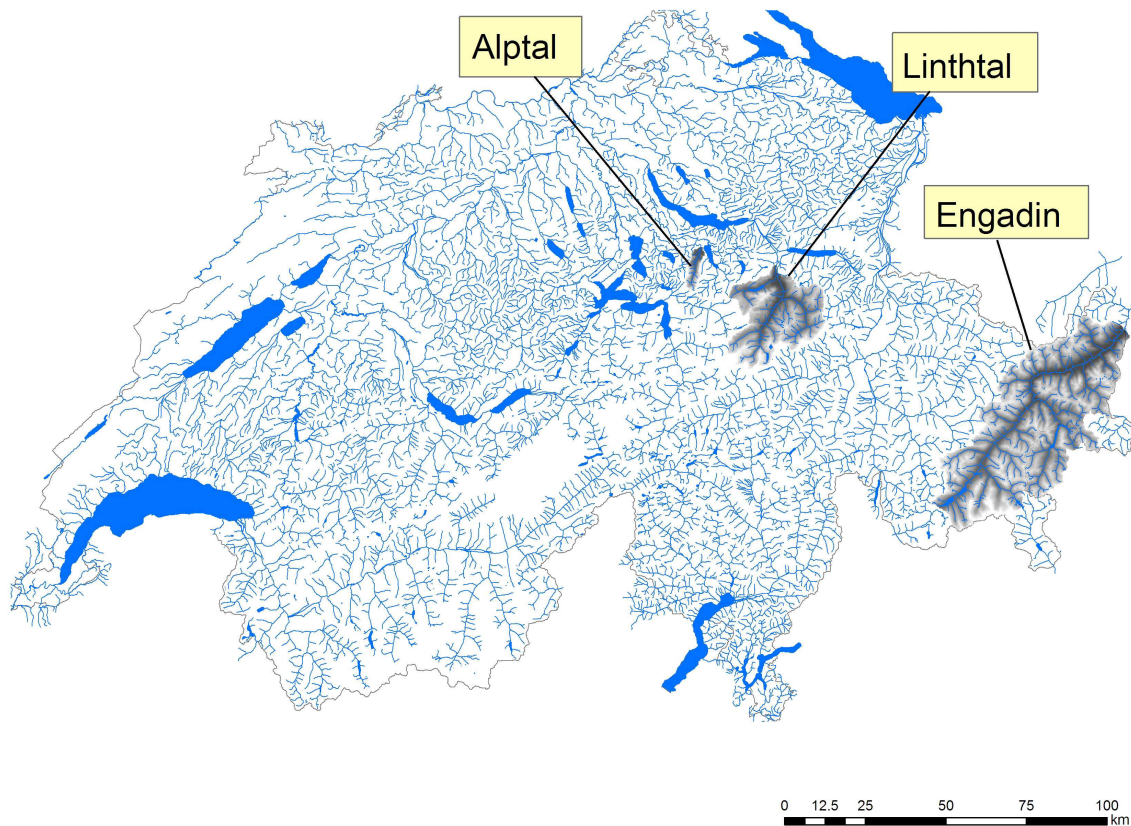


Abbildung 15: Die drei Untersuchungsgebiete Alptal, Linthtal und Engadin. Kartengrundlage: digitale Übersichtskarte der Schweiz, Bundesamt für Landestopographie (BfL)

6.2 ENGADIN (KT. GRAUBÜNDEN)

Das Engadin ist im Osten der Schweiz gelegen und gehört zu den Regionen Süd- und Mittelbünden. Mit einer Einzugsgebietsfläche von 1945 km² ist das Engadin das grösste Untersuchungsgebiet. Der Hauptabfluss folgt einer Linie von Südwesten nach Nordosten. Die Spannweite der Höhe reicht von 1045 m.ü.M. bis 3868 m.ü.M.. Wie das Linthtal ist auch das Einzugsgebiet des Inn stark durch Stauseen und Umleitungen der Abflüsse beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass Vergleiche von beobachteten und simulierten Abflüssen des gesamten Gebietes nicht gemacht werden können, da der beobachtete Abfluss beim tiefsten Punkt in Martinsbruck nicht dem natürlichen Abfluss entspricht. 14% der Fläche sind bewaldet. Fast die Hälfte (47%) ist vegetationsloser Boden und Fels. Das Weideland nimmt 24% der Fläche ein und 5% des Gebietes sind vergletschert.

Das hydrologische Einzugsgebiet des Inns befindet sich nicht ausschliesslich auf Schweizer Boden. Ein kleines in Italien gelegenes Teileinzugsgebiet (Spöl) gehört ebenfalls dazu. Aus diesem Grunde wurde zur Ermittlung der Landnutzung für die Generierung der HRUs der CORINE Land Cover Datensatz benötigt, da die Arealstatistik der Schweiz dieses Gebiet nicht abdeckt.

6.3 ALPTAL (KT. SCHWYZ)

Das Alptal erstreckt sich von Einsiedeln gegen Südwesten hin bis zu den Mythen und gehört zur Region der östlichen Voralpen und dem östlichen Mittelland. Mit einer Fläche von 46.6 km² ist es das kleinste Untersuchungsgebiet. Mehr als die Hälfte der Fläche (51%) sind bewaldet, der Rest besteht hauptsächlich aus Weideland. In der Höhe erstreckt es sich von 867 m.ü.M. bis 1798 m.ü.M.

6.4 WITTERUNGSBEDINGUNGEN DER WINTER 2005/06 UND 2006/07

Nach einem überdurchschnittlich warmen und trockenen Herbst, gab es am 17. November 2005 einen scharfen Witterungswechsel zu Winterwetter. Kalte Polarluft wurde in die Schweiz geführt und sorgte für eisige Temperaturen. Wegen der niedrigen Feuchtigkeit fiel jedoch nur sehr wenig Schnee. Betroffen war vor allem das östliche Mittelland. Am 26. November 2005 brachte jedoch ein neues Tief Schnee in die ganze Schweiz. Weitere Schneefälle folgten am 2. Dezember 2005, wobei die Schneefallgrenze auf 1300 m. ü. M. lag, und vom 6. bis 9. Dezember 2005, wo es wieder bis in die Niederungen schneite. Danach folgte eine kalte Periode bis am 16. Dezember 2005, wo eine Nordstaulage vor allem den Gebieten des Alpennordhanges viel Schnee brachte. Um Weihnachten herum war es ziemlich kalt. In der Nacht zum Silvester schneite es wieder im Norden, gefolgt von Tauwetter an Silvester. Der Januar und Februar 2006, dominiert von stabilen Hochdrucklagen, zeigten sich kalt im Norden und allgemein sehr niederschlagsarm. Ein kleines Zwischentief Mitte Januar brachte zunächst bis in die Niederungen, anschliessend oberhalb von 600 – 800 Metern Neuschnee. Im Februar war vom 15. - 17. in den Bergen reichlich Schnee zu verzeichnen. Die Südschweiz erlebte vom 26. - 28. Januar und vom 18. - 20. Februar starke Schneefälle. Die nördlichen Landesteile wurden vom 4. - 5. März von rekordverdächtigen Schneefällen von bis zu 60 cm Neuschnee in den tiefen Lagen heimgesucht. Im letzten Monatsdrittel stiegen die Temperaturen allmählich an. Der April zeigte sich einmal mehr launenhaft. Anfangs mild, kam es am 5. und 10. April ähnlich wie im März zu Rekordschneefällen. Aufgrund der schon mildereren Jahreszeit fiel diesmal im Flachland nur ein Teil des Niederschlages als

Schnee. Vom 14. - 27. April stiegen die Temperaturen über den langjährigen Durchschnitt. Der Monat Mai war geprägt durch unbeständiges Wetter mit meist milden Nächten. Kälterückschläge und Schnee bis unter 1000 m.ü.M. gab es nur am 9. Mai und am Monatsende. Im Süden war der Mai viel trockener, wärmer und sonniger als im langjährigen Mittel. In den ersten Junitagen fiel nochmals Schnee bis unter 1000 m.ü.M. Gegen Monatsmitte kam der Sprung in den Hochsommer (MeteoSchweiz, 2006).

Der Winter 2006/07 war insgesamt überdurchschnittlich warm und seit mehr als 500 Jahren der wärmste Winter überhaupt. In den meisten Gebieten war er 3-4 Grad milder als normal. Entsprechend den milden Temperaturen gab es wenig Schnee. Dies vor allem in den Niederungen.

Der wärmste Monat war eindeutig der Januar, welcher wesentlich sonniger als normal war. Die erste winterliche Schneedecke im Flachland bildete sich erst Ende Januar. Davor war nur in den höheren Lagen Schneefall zu verzeichnen. Der Februar war ebenfalls viel zu warm. Bedeutende Schneefälle waren keine zu verzeichnen. Der nächste Winter einbruch erfolgte am 19. März, welcher Schnee bis in die Niederungen brachte. Dieser schwand jedoch im überaus warmen und trockenen April schnell dahin.

Die winterlichen Niederschlagsmengen wichen insgesamt nur wenig von den Normalwerten für den Winter ab (Luterbacher et al., 2007).

7 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

Für die beiden Winter 2005/06 und 2006/07 wurde versucht, die mit dem räumlich differenzierten Modell PREVAH durchgeführte operationelle Simulation des Ausape- rungsmusters und der damit verbundenen Abflussmengen, sowie des Schneewasseräqui- valents (SWE) mittels drei verschiedenen Schneehöhen- bzw. Schneemuster-Produkten aufzudatieren und somit zu verbessern. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung über die zur Validierung und Aufdatierung verwendeten Schneekarten, sowie über die Validie- rungs- und Aufdatierungsvorgehen. Die Validierung des SWE vor und nach dem Upda- te erfolgte punktuell an ausgewählten Meteo-Stationen. Mit einer kategorialen Statistik (vgl. Kapitel 4.2) wurde die räumliche Veränderung der Schneedecke untersucht. Die Validierung des Abflusses diente zur Überprüfung des Gebietsintegrals. Alle Auswer- tungen wurden vor und nach dem Update gemacht.

Die Updates für den Winter 2005/06 wurden in drei Serien (Tabelle 16 im Anhang) durchgeführt. Serie 1 erstreckt sich von März 2006 bis Mai 2006 für die NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten bzw. bis Juni für die beiden Schneehöhenkarten. Serie 2 erfolgt ab Januar 2006 und Serie 3 ab November 2005. In Serie 2 und 3 wurde jeweils 1 mal monatlich ein Update gemacht. Bei Serie 1 wurde je nach Verfügbarkeit und Qualität der Schneeprodukte 2 – 3 mal aufdatiert. Mit diesen drei Aufdatierungs- serien wurde untersucht, wann und wie oft ein Update erfolgen sollte. Serie 3 berücksich- tigt den gesamten Winter, beinhaltet also Schneedeckenaufbau und -abbau. Mit Serie 2 wurde der Hochwinter zusätzlich zur Schneeschmelzphase im Frühling mitberücksich- tigt, um allfällige Fehler, die im Modell während der Aufbauphase entstanden sind, zu korrigieren. Der Unterschied zwischen Serie 2 und 3 betrifft die Frage, ob es reicht, erst im Winter mit Updates zu beginnen, oder ob schon während der Aufbauphase der Schneedecke gestartet werden muss. Mit Serie 1 wurde untersucht, ob sogar alleiniges Updates im Frühling reichen würde, um den Abfluss zu verbessern.

Auf Grund der Resultate im Winter 2005/06 und des Zeitpunktes der Auswertungen, wurde für den Winter 2006/07 nur eine Aufdatierungsserie und zwar von November bis Ende April durchgeführt. Ebenfalls wurden keine Aufdatierungsversuche und Verglei- che mit den regionalen Schneehöhenkarten gemacht. Der Grund dafür ist hauptsächlich die schlechte Qualität dieser Karten, da für eine korrekte Interpolation zu wenige Statio- nen zur Verfügung stehen.

Tabelle 4: Übersicht über die Validierungs- und Aufdatierungsarten für die Einzugsgebiete. OP = Operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz; NOAA/AVHRR = Satellit; REG = Regionale Schneehöhenkarte.

Linthtal			
<i>Winter 2005/06</i>		<i>Winter 2006/07</i>	
Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR - REG	Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR
Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik) - Gebietsintegral (Abfluss)	Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik) - Gebietsintegral (Abfluss)
Aufdatierungsserien:	-1 -2 -3	Aufdatierungsserien:	-3

Engadin			
<i>Winter 2005/06</i>		<i>Winter 2006/07</i>	
Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR - REG	Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR
Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik)	Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik)
Aufdatierungsserien:	-1 -2 -3	Aufdatierungsserien:	-3

Alptal			
<i>Winter 2005/06</i>		<i>Winter 2006/07</i>	
Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR	Vergleichs- und Aufdatierungsschneekarten:	- OP - NOAA/AVHRR
Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik) - Gebietsintegral (Abfluss)	Validierungsart:	- Punkt - Fläche (Kategorielle Statistik) - Gebietsintegral (Abfluss)
Aufdatierungsserien:	-1 -2 -3	Aufdatierungsserien:	-3

7.1 ANALYSE DER SCHNEEHÖHEN AN AUSGEWÄHLTEN STANDORTEN

Ein möglicher Weg die Modellresultate zu beurteilen, ist der Vergleich von beobachteten Schneewasseräquivalentwerten mit simulierten Werten für diejenigen Zellen, in welchen sich eine Meteo-Station befindet. Dabei muss jedoch folgendes Problem, wie es Garen & Marks (2005) beschreiben, im Hinterkopf behalten werden: Aus zwei Gründen ist ein strikter Vergleich dieser Art nicht möglich. Erstens sind die beobachteten Daten Punktmessungen, welche sich auf ein sehr kleines Gebiet beschränken. Die simulierten Werte hingegen repräsentieren einen Mittelwert der gesamten Gridzelle bzw. HRU. Das zweite Problem ist, dass die Beobachtung auf einem möglichst flachen Messfeld gemacht wird, die Gridzelle bzw. HRU jedoch im Normalfall eine gewisse Neigung und Exposition hat. Folglich ist die Sonneneinstrahlung für die Beobachtung und die Simulation nicht dieselbe. Trotz dieser Einschränkungen ist diese Methode jedoch aussagekräftig und kann angewendet werden.

7.1.1 ALLGEMEINE SITUATION

Für die punktuellen Vergleiche des simulierten mit dem beobachteten SWE wurden im Linthtal und Engadin die SWE-Werte der automatischen IMIS-Stationen verwendet. Die SWE-Daten der IMIS-Stationen entstehen durch eine Berechnung aus den kontinuierlich gemessenen Schneehöhen. Mit dem Modell SNOWPACK (Lehning et al., 1999) werden Dichten für jede einzelne Schneesicht in einer Schneedecke bestimmt, um schliesslich mit der gemessenen Schneehöhe das SWE berechnen zu können. Dieses Modell ist sehr gut verifiziert und liefert sehr zuverlässig Daten. Für den Winter 2006/07 wurden zudem Beobachterstationen, an welchen nur an bestimmten Tagen das SWE gemessen wird, hinzugezogen. Im Einzugsgebiet der Alp stehen keine automatischen Schneemessstationen oder offizielle Beobachterstationen des SLF zur Verfügung. Jedoch werden im Alptal durch die Eidgenössische Forschungsanstalt Wald, Schnee und Landschaft (WSL) jeden Winter alle 2 bis 4 Wochen, auf der Erlenhöhe sogar jede Woche, an verschiedenen Standorten Schneewasseräquivalentmessungen gemacht. Drei dieser Standorte wurden für die punktuelle Validierung ausgesucht. Abbildung 16 zeigt die Lage der verwendeten Stationen in allen drei Gebieten.

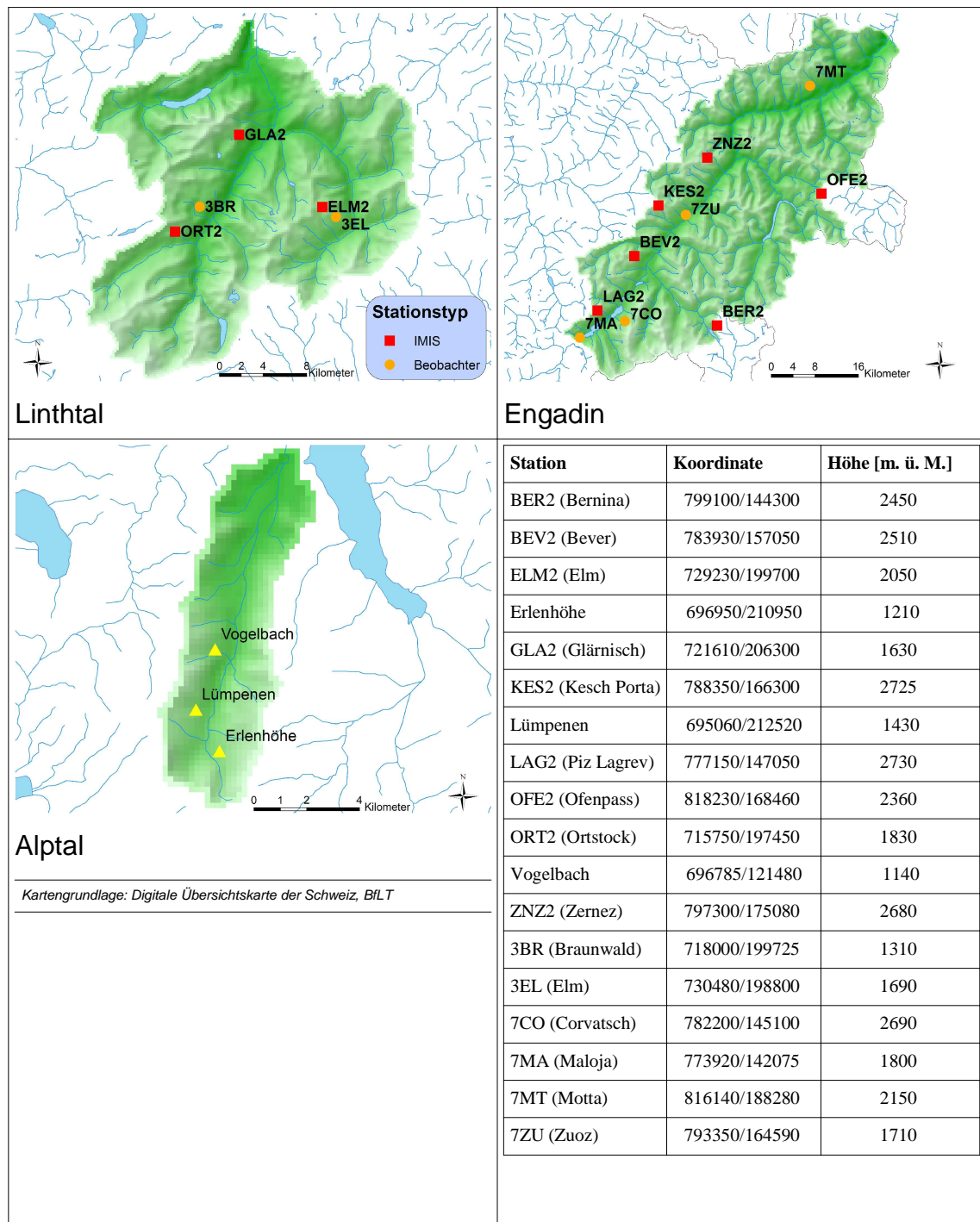


Abbildung 16: Darstellung der zur Validierung hinzugezogenen Stationen für die drei Einzugsgebiete.

Abbildung 17 zeigt einen Überblick über das beobachtete und simulierte SWE für je eine Station pro Untersuchungsgebiet für beide untersuchten Winter. Grundsätzlich zeigt sich folgendes Bild: Zum einen war der Winter 2006/07 wesentlich schneeärmer als der Winter 2005/06. Und zum anderen wird das SWE für beide Winter eindeutig zu tief simuliert. Dies betrifft vor allem das Linthtal und Engadin.

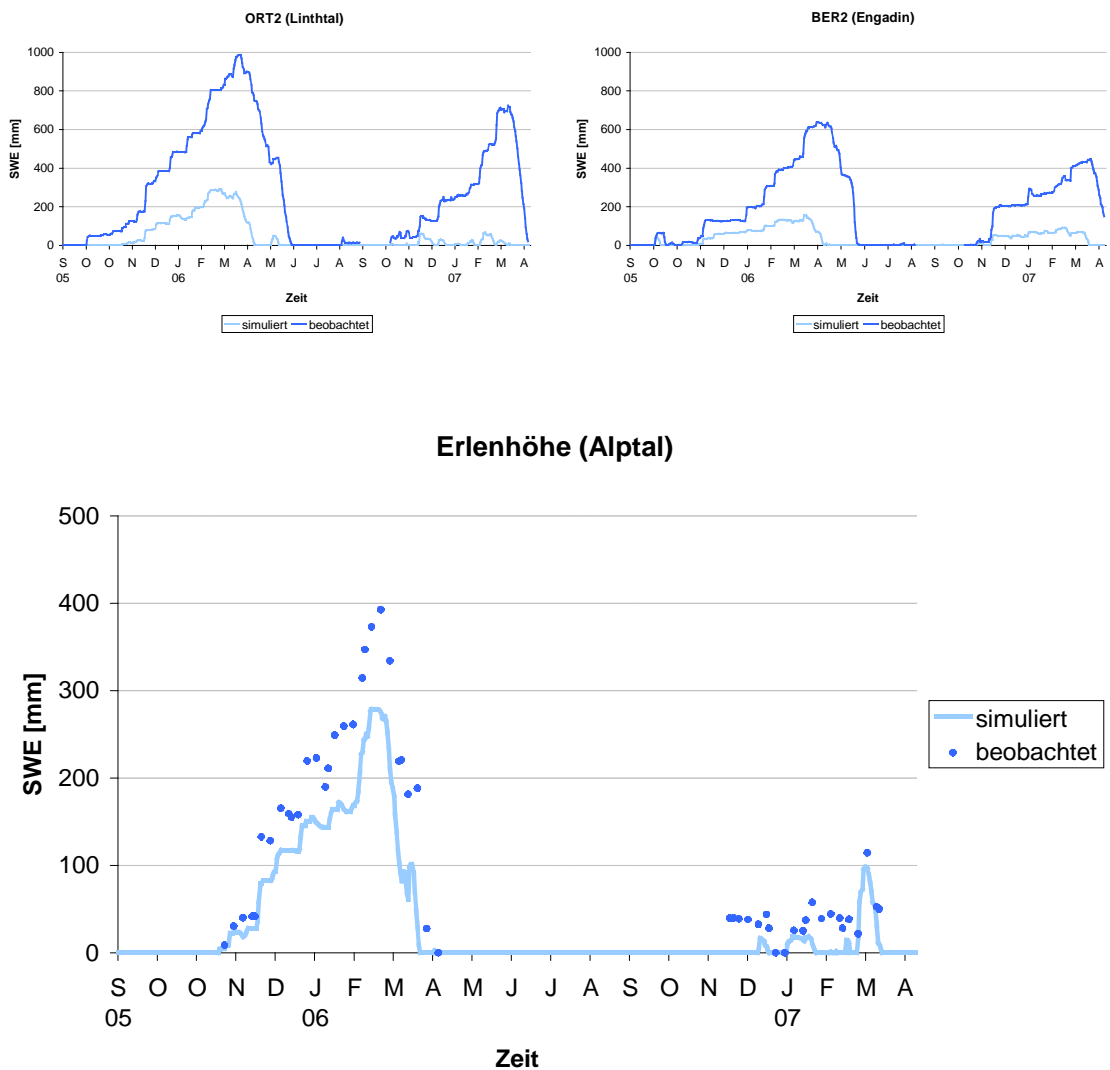
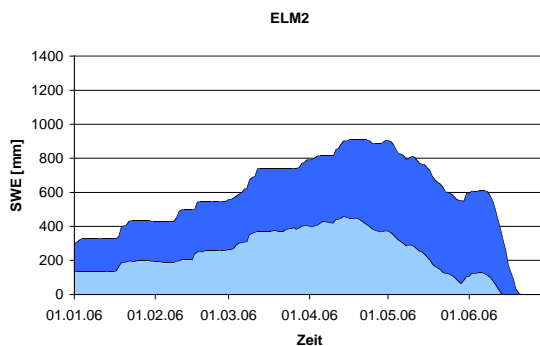


Abbildung 17: Überblick über die Schneewasseräquivalentverhältnisse von September 2005 bis Ende April 2007.

Eine genauere Analyse zeigen die Abbildungen 18 bis 20 und lassen vor allem im Engadin und Linthtal auf folgende Aussagen schliessen: Das zu tief simulierte SWE beträgt je nach Station, Einzugsgebiet und Winter nur etwa 15% - 60% des beobachteten SWE. Eine geteilte Betrachtung zwischen Akkumulationsphase (= ab 1. Januar bis Zeitpunkt, wo das modellierte SWE ihr Maximum erreicht) und Ablationsphase (=ab Ende Akkumulation) zeigt, dass abgesehen von den zu tiefen Werten, die Korrelation in der Akkumulationsphase zwischen Beobachtung und Simulation im Normalfall über 0.8 liegt. Eine Ausnahme bildet beispielsweise die Simulation bei der Station GLA2 (Abbildung 18) im Winter 2006/07. An dieser Stelle wurde praktisch kein Schnee akkumuliert, was zu einem sehr tiefen R^2 von 0.1356 führt. Weitaus problematischer ist jedoch die Simu-

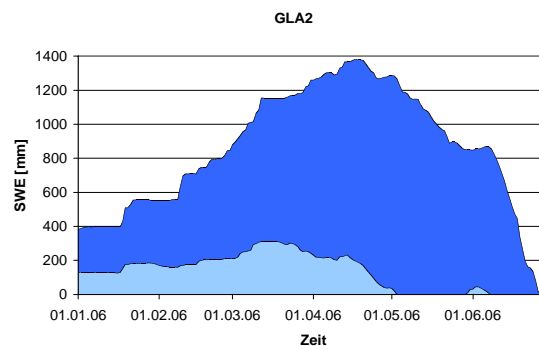
lation während der Ablationsphase. Durchaus gibt es Stationen für die eine Korrelation von mehr als 0.75 zu verzeichnen ist.

Winter 2005/06



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9892$$

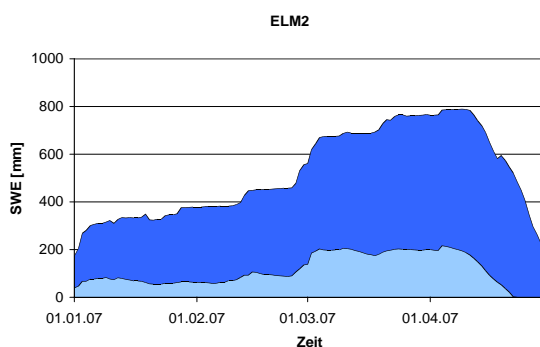
$$R^2_{\text{abl}} = 0.7881$$



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9292$$

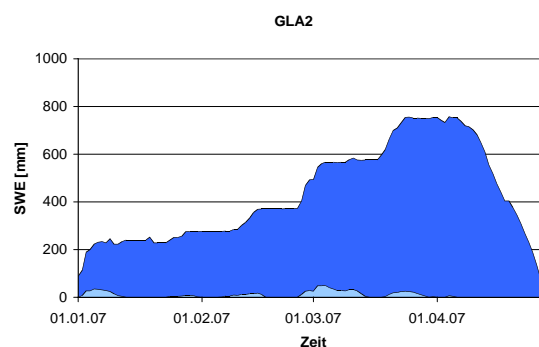
$$R^2_{\text{abl}} = 0.1277 \text{ --> Korrelation negativ!}$$

Winter 2006/07



$$R^2_{\text{akk}} = 0.8228$$

$$R^2_{\text{abl}} = 0.7603$$



$$R^2_{\text{akk}} = 0.1356$$

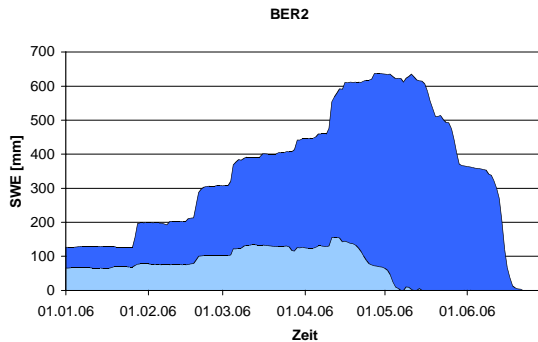
$$R^2_{\text{abl}} = 0.1571 \text{ --> Korrelation negativ!}$$

Abbildung 18: Beobachtetes (dunkel blau) und simuliertes (hell blau) Schneewasseräquivalent, sowie die entsprechenden Korrelationskoeffizienten für die Akkumulations- resp. Ablationsphase für das Einzugsgebiet Linntal.

Allerdings gibt es ebenso viele Stationen, wo die Korrelation während der Ablationsphase unter einem R^2 von 0.5 liegt. Weiter kommt hinzu, dass die Korrelation oftmals negativ ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Simulation meist zu einem früheren Zeitpunkt mit der Ablation beginnt als beobachtet wird. Die Betrachtung des simulierten und beobachteten SWE für die drei Stationen im Alptal (Abbildung 20) im Winter 2005/06 zeigt, dass die Modellierung des SWE in diesem Gebiet ziemlich gut mit der Realität übereinstimmt. Für die Stationen Erlenhöhe und Lümpenen ist die Simulation

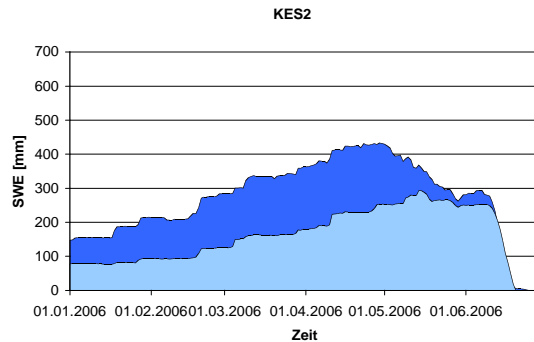
etwas zu tief, im Vergleich zum Linthtal und Innthal jedoch nahe an der Realität. Im Winter 2006/07 ist die Übereinstimmung mit der Beobachtung schlechter.

Winter 2005/06



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9622$$

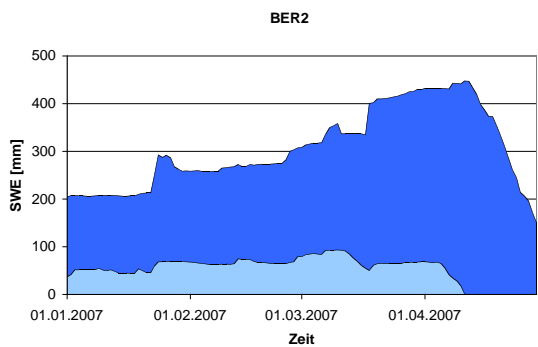
$$R^2_{\text{abl}} = 0.4848 \text{ --> Korrelation negativ!}$$



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9694$$

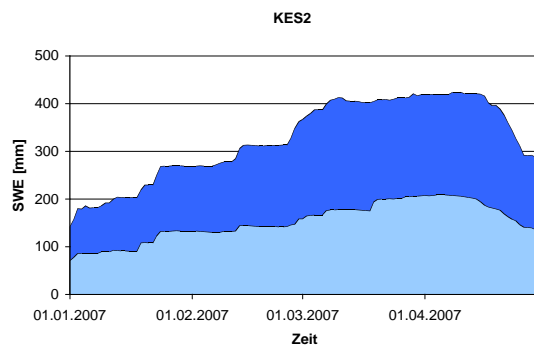
$$R^2_{\text{abl}} = 0.8868$$

Winter 2006/07



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9069$$

$$R^2_{\text{abl}} = 0.3021 \text{ --> Korrelation negativ!}$$



$$R^2_{\text{akk}} = 0.9581$$

$$R^2_{\text{abl}} = 0.9464$$

Abbildung 19: Beobachtetes (dunkel blau) und simuliertes (hell blau) SWE, sowie die entsprechenden Korrelationskoeffizienten für die Akkumulations- resp. Ablationsphase für das Einzugsgebiet Engadin.

Vor allem der Beginn der Schneedeckenaufbauphase von PREVAH wird um einiges später simuliert als beobachtet wird. Auf der Erlenhöhe stimmt der Verlauf des simulierten SWE von Januar bis März 2007 ebenfalls nicht mit den Beobachtungen überein. Am Vogelbach wird das SWE für beide Winter sehr gut simuliert. Lümphenen liegt dazwischen.

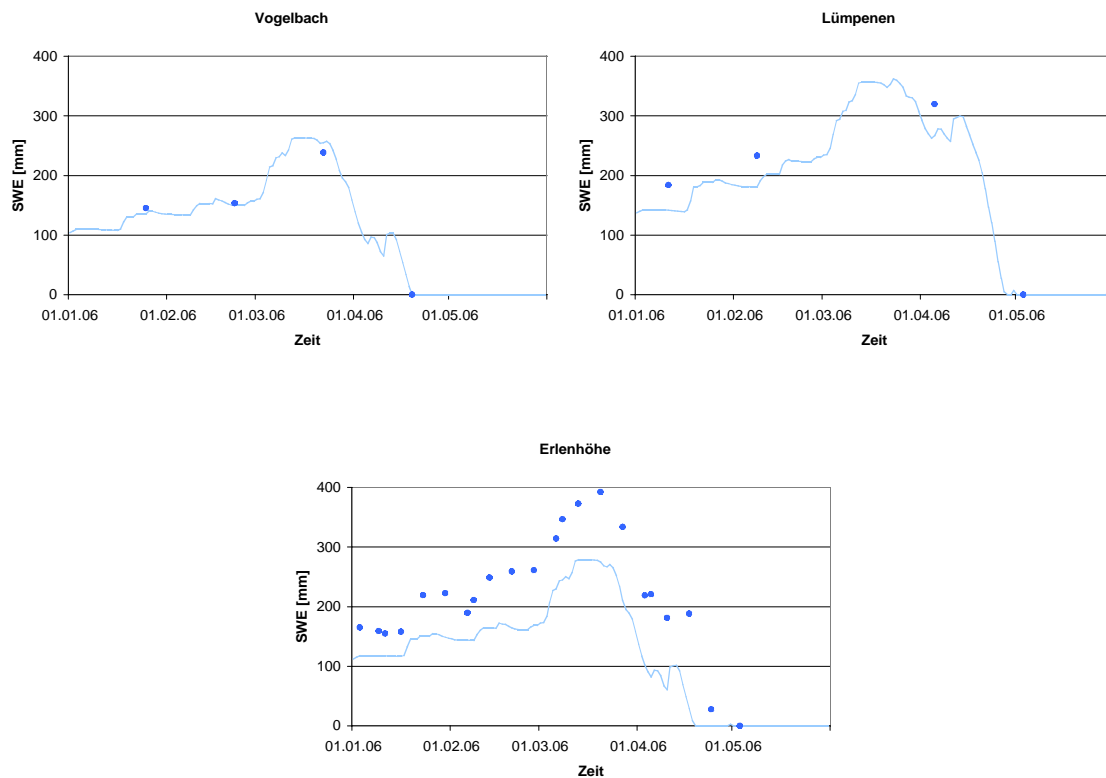
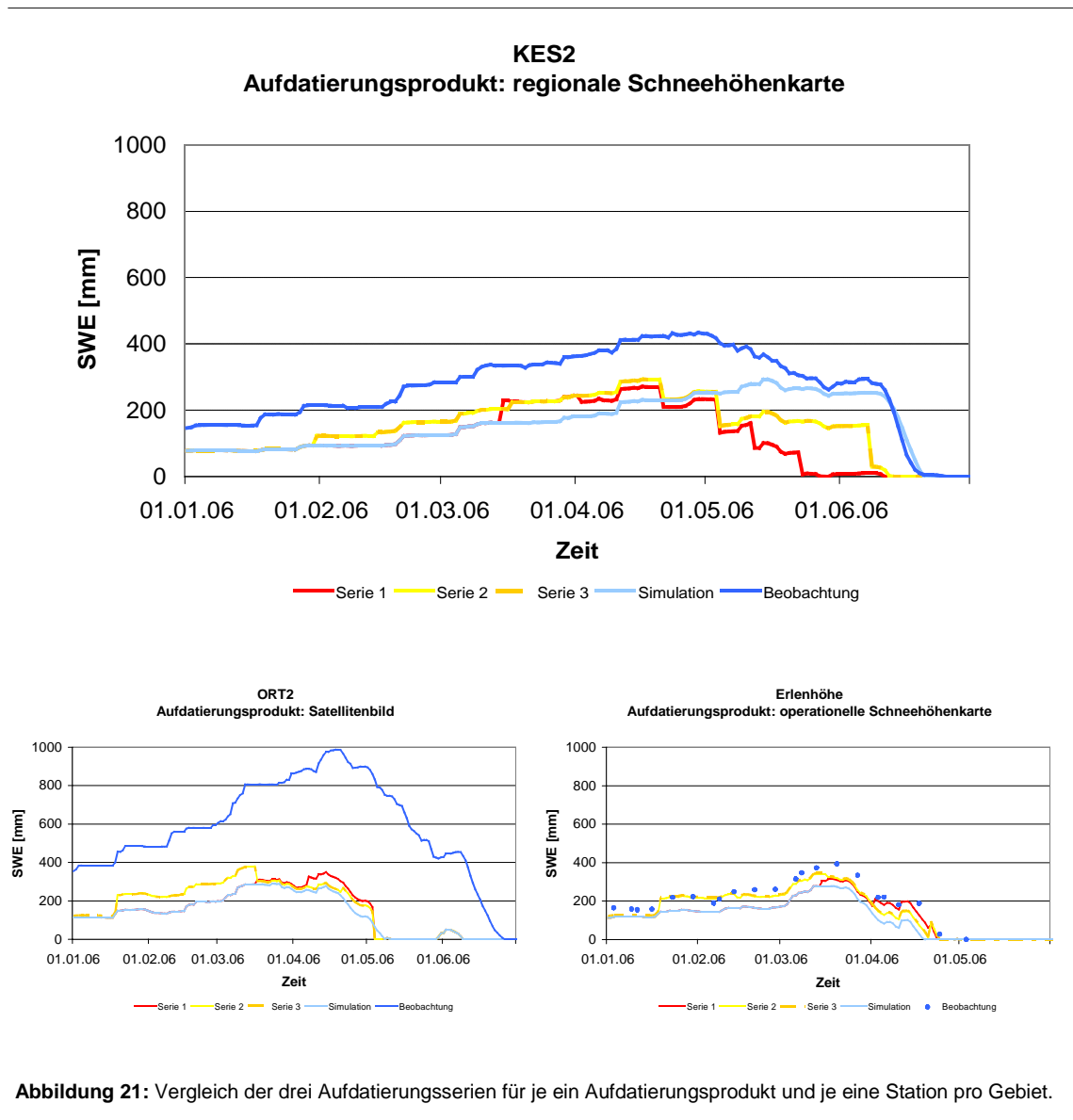


Abbildung 20: Beobachtetes (gepunktet) und simuliertes (hellblau) Schneewasseräquivalent im Winter 2005/6 für das Einzugsgebiet Alptal

7.2 AUSWERTUNG DER RESULTATE NACH DER AUFDATIERUNG

Abbildung 21 zeigt den Unterschied zwischen den drei Aufdatierungsserien. Dabei ist zu sehen, dass zwischen Serie 2 und 3 kein Unterschied besteht. Einzig im Januar sieht man einen kleinen Einfluss der Update im November und Dezember der Serie 3, welcher sich in einem wenig höheren Schneewasseräquivalent auszeichnet. Serie 1 unterscheidet sich von den anderen zwei Serien dadurch, dass in dieser Serie im Frühling öfters aufdatiert wurde. Das häufigere Updaten wirkt sich sogleich auf das simulierte SWE aus. Man kann aber nicht sagen, dass häufigere Updaten im Frühling bessere Resultate liefert. Es sind bei allen drei Serien sowohl Verschlechterungen als auch Verbesserungen zu sehen und keine Serie stellt sich gegenüber den anderen als die bessere heraus. Aus diesem Grunde wird im Folgenden nur noch auf Serie 3 eingegangen.



a) Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz

Im Engadin erreicht man durch ein Update mit der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz in beiden Wintern mit Serie 3 nur bei einer von sechs IMIS-Stationen eine Verbesserung des durchschnittlichen SWE (Abbildung 27). Dabei handelt es sich in beiden Wintern um die Station BER2. Das SWE beträgt nach dem Update 25% im Winter 2005/06 respektive 18% im Winter 2006/07 des beobachteten Wertes. Dies ist viel zu wenig.

Bei den Beobachterstationen kann bis auf die Station 7CO im Engadin an allen Stationen eine Verbesserung des durchschnittlichen SWE beobachtet werden. Allerdings erreicht dieses schliesslich nie mehr als 50% des beobachteten SWE. Dasselbe zeigt sich

im Linthtal. Ein Vergleich zwischen dem beobachteten, simulierten und aufdatierten SWE für je eine Beobachterstation pro Gebiet zeigt Abbildung 22.

Im Linthtal zeigen sich bei den IMIS-Stationen im Winter 2005/06 bei allen drei Stationen Verbesserungen des simulierten SWE. Diese sind jedoch sehr klein und liegen im Bereich von 1% - 10%. Diese geringen Verbesserungen tragen folglich nicht zur Verbesserung des durchschnittlichen simulierten SWE bei und so beträgt dieses je nach Station nur 16% bis 42% der Beobachtung. Im Winter 2006/07 beträgt das maximal durchschnittlich simulierte SWE sogar nur 17% des beobachteten SWE.

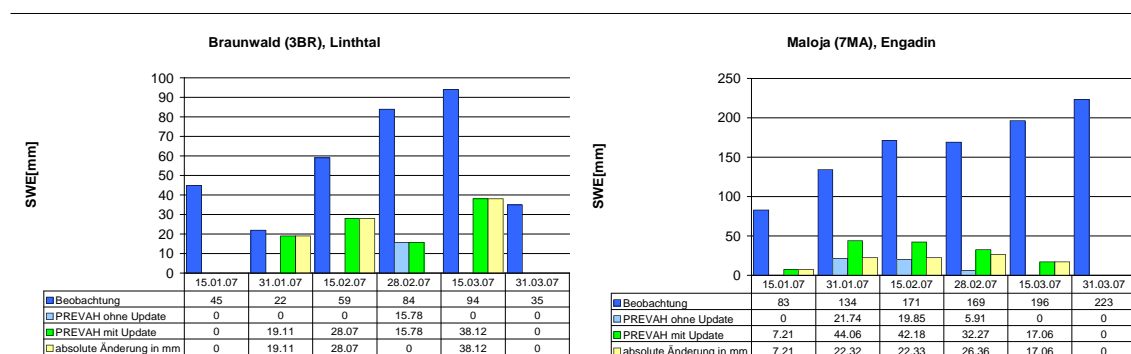


Abbildung 22: Darstellung der Höhe des Schneewasseräquivalents der aufdatierten Simulation für je eine Beobachterstation für die Untersuchungsgebiete Linthtal und Engadin im Winter 2006/07. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz.

Im Alptal wurde für die Stationen Lämpenen und Erlenhöhe Verbesserungen erreicht. Bei der Station Vogelbach gab es ebenfalls eine Erhöhung des neu simulierten SWE. Dies führte jedoch zu einer Überkorrektur, was bedeutet, dass das neu simulierte SWE im Schnitt über der Beobachtung liegt. Das neu berechnete SWE beträgt im Winter 2005/06 fast 80% für die beiden Stationen Erlenhöhe und Lämpenen, was als gut bezeichnet werden kann. Allerdings muss erwähnt werden, dass das ursprünglich ohne Update simulierte SWE nicht wesentlich unter dem neuen liegt. Dies bedeutet, dass auch im Alptal die Verbesserung sehr klein ist. Im Winter 2006/07 werden im Schnitt bei den Stationen Erlenhöhe und Lämpenen nach den Update nur die Hälfte der beobachteten Schneemenge simuliert. Auch hier ist der Unterschied zur nicht aufdatierten Simulation minim.

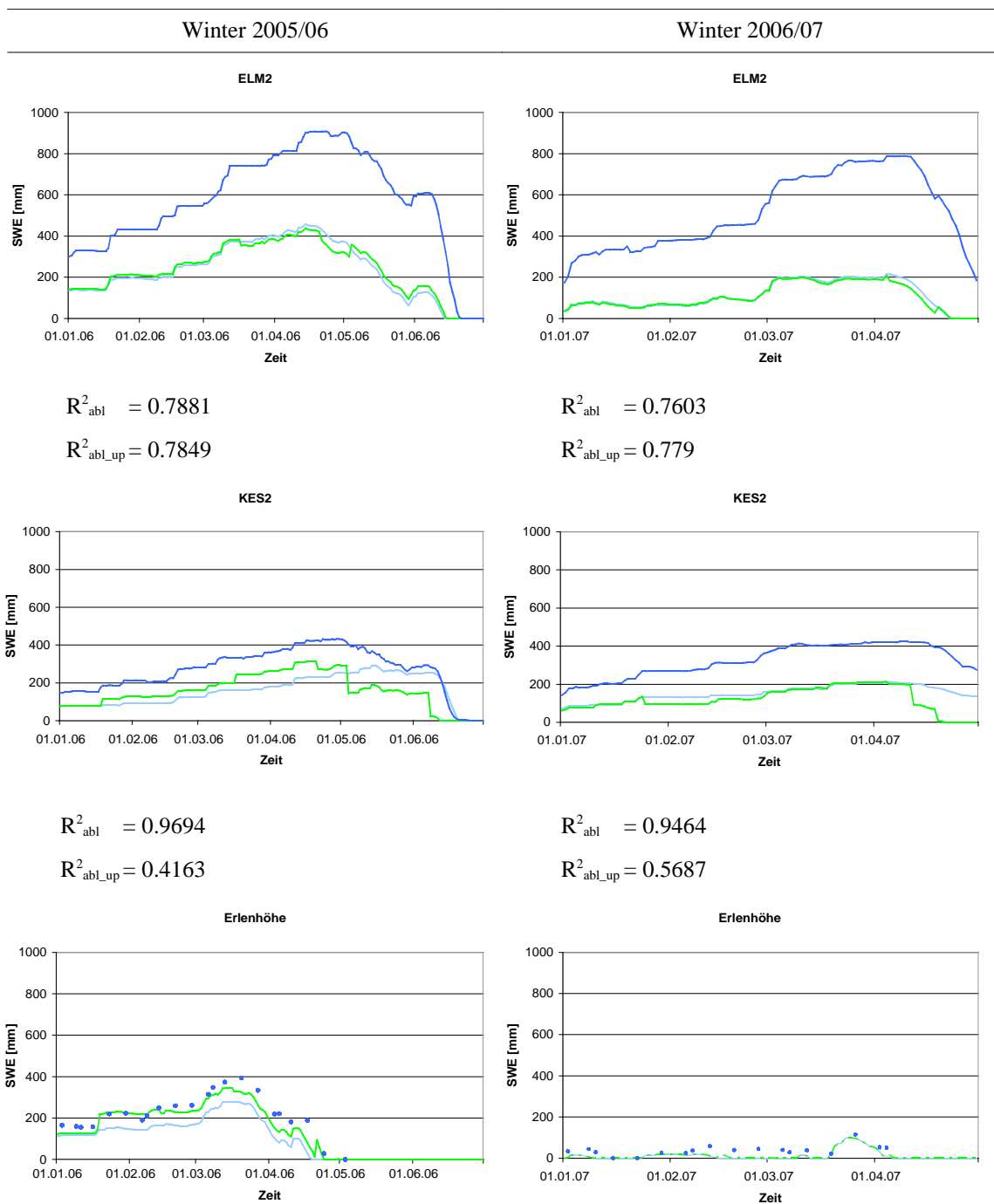


Abbildung 23: Beobachtung (dunkelblau) und Simulation (hellgrün: aufdatiert; hellblau: nicht aufdatiert) für je eine Station pro Untersuchungsgebiet (ELM2, Linthtal; KES2, Engadin; Erlenhöhe, Alptal) in den beiden Wintern 2005/06 und 2006/07. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte.

Schliesslich ist in Abbildung 23 für jedes Untersuchungsgebiet eine Station dargestellt, welche den Verlauf des beobachteten SWE, des nicht aufdatierten und des mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz aufdatierten SWE für die beiden Winter zeigt.

b) Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte

Mit der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte kann im Gegensatz zur operationellen Schneehöhenkarte im Winter 2005/06 im Engadin an drei von sechs Stationen eine Verbesserung des simulierten SWE erreicht werden (Abbildung 27). Dabei handelt es sich um die Stationen LAG2, BER2 und BEV2. Im Winter 2006/07 betrifft es nur die Station BER2. Allgemein zeigt sich mit der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte ein erfreulicheres Verbesserungsbild. Das aufdatierte SWE beträgt jedoch immer noch nur maximal 54% des beobachteten SWE (Station LAG2, 2005/06), was zu tief ist.

Im Linthtal erreicht man mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten in beiden Wintern an allen drei Stationen eine Verbesserung des simulierten SWE. Wie im Engadin muss man aber auch hier feststellen, dass zwar Verbesserungen von mehr als 10% beispielsweise an den Stationen GLA2 und ORT2 im Winter 2006/07 erreicht werden können. Das neu simulierte SWE beträgt jedoch immer noch nur 13% - 24% im Winter 2006/07 bzw. 18 – 46% im Winter davor.

Das Aufdatieren mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten war im Alptal im Winter 2005/06 nicht erfolgreich. Die Station Erlenhöhe und Lämpenen resultieren in einem tieferen durchschnittlichen Schneewasseräquivalent als vor dem Update, die Station Vögelbach wird überkorrigiert. Im Winter 2006/07 erreicht man mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten die selben Resultate wie mit den operationellen Schneehöhenkarten.

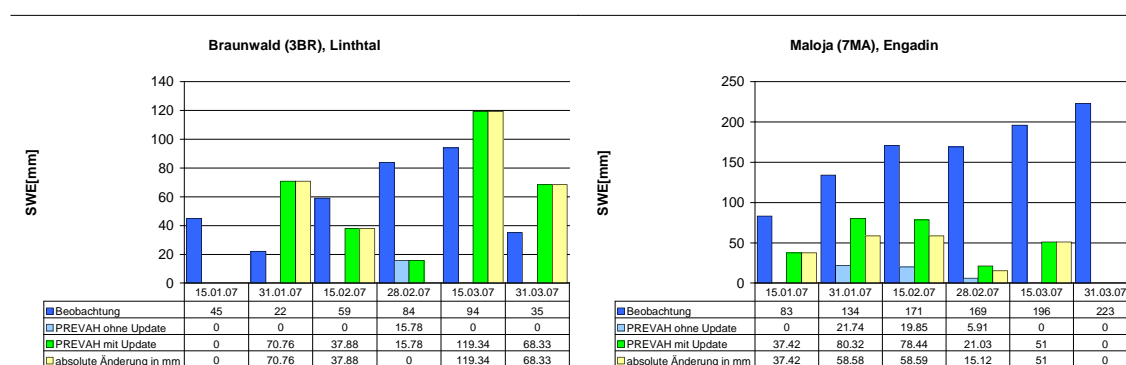


Abbildung 24: Darstellung der Höhe des Schneewasseräquivalents der aufdatierten Simulation für je eine Beobach-terstation für die Untersuchungsgebiete Linthtal und Engadin. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR

Die besten Ergebnisse mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten wurden sowohl im Linthtal als auch im Engadin an den Beobachterstationen erreicht (Abbildung 24). Im Engadin gibt es zwei Stationen, wo das neu berechnete SWE mehr als 60% respektive 80% des beobachteten beträgt. Im Linthtal sind es für beide Stationen mehr als 60%. Dies sind im Vergleich zu den IMIS-Stationen relativ gute Zahlen. Zudem lag das simulierte SWE vor dem Update an diesen Stationen nie über 24%.

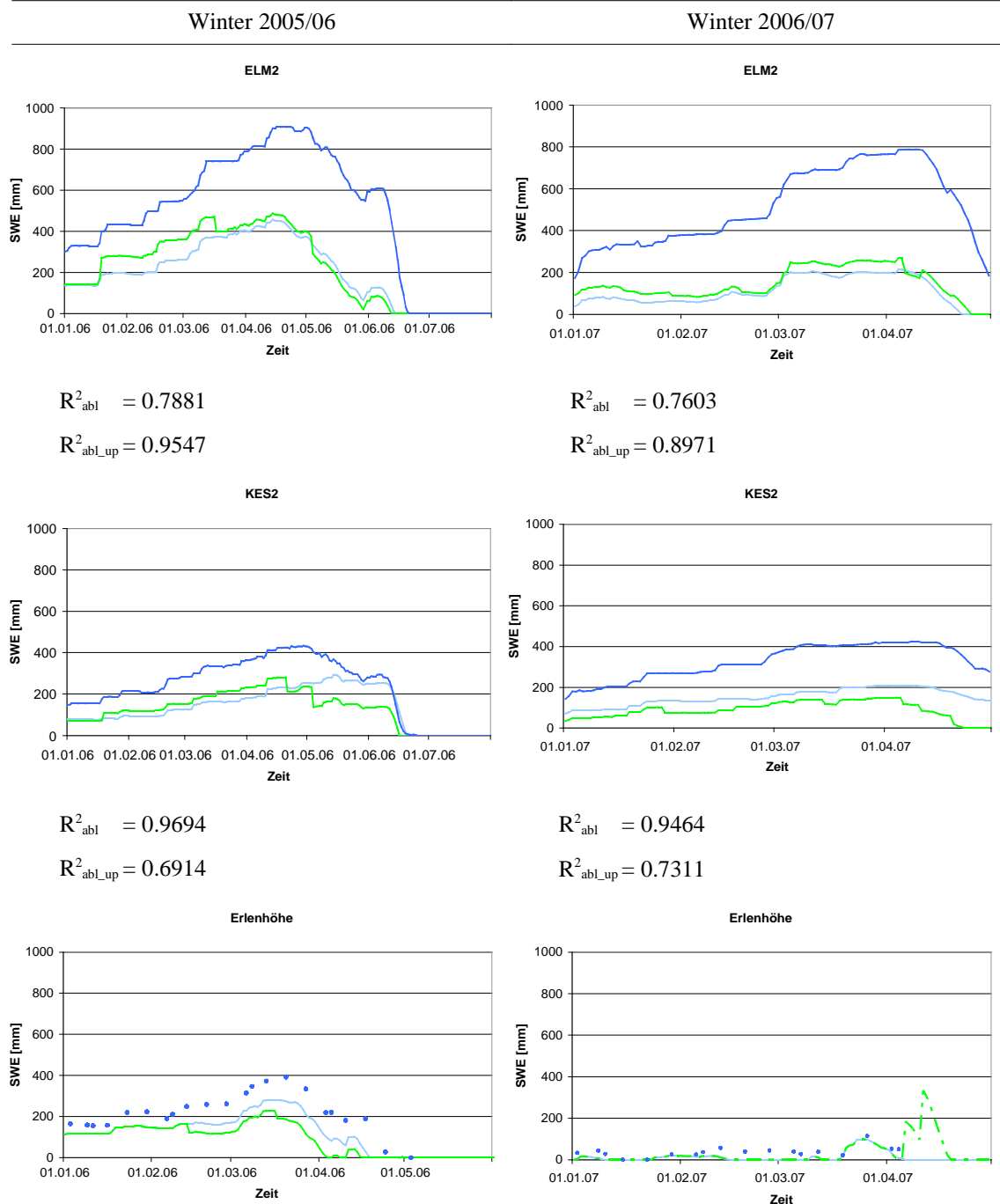


Abbildung 25: Beobachtung (dunkelblau) und Simulation (hellgrün: aufdatiert; hellblau: nicht aufdatiert) für je eine Station pro Untersuchungsgebiet (ELM2, Linthtal; KES2, Engadin; Erlenhöhe, Alptal) in den beiden Wintern 2005/06 und 2006/07. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR

In Abbildung 25 ist wiederum der Verlauf des beobachteten SWE, des nicht aufdatierten und des aufdatierten SWE für je eine Station pro Untersuchungsgebiet dargestellt.

b) Aufdatierungsprodukt: Regionale Schneehöhenkarte

Im Engadin sind an drei von sechs Stationen Verbesserungen des durchschnittlich simulierten SWE zu sehen. Dabei handelt es sich um dieselben Stationen, bei denen bereits mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten Verbesserungen erreicht werden konnten. Allerdings ist die Verbesserung gesamthaft gesehen mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten höher, als mit der regionalen Schneehöhenkarte. Einzig bei der Station BEV2 ist die Verbesserung mit der regionalen Schneehöhenkarte höher. Das berechnete durchschnittliche SWE beträgt an dieser Station nach dem Update 56.83% des beobachteten (Abbildung 27). Dies ist insgesamt das beste Ergebnis, woraus geschlossen werden kann, dass auch mit den regionalen Schneehöhenkarten kein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht werden kann.

Im Linthtal kristallisieren sich die regionalen Schneehöhenkarten sogar als schlechtestes Aufdatierungsprodukt heraus. Nur gerade bei einer der drei Stationen kann von einer Verbesserung gesprochen werden. Es ist dies die Station ORT2. Mit dem Update erreichen wir an dieser Station nur ein neu simuliertes Schneewasseräquivalent von 24% des beobachteten, was, wie in den Fällen zuvor, nicht genügend ist.

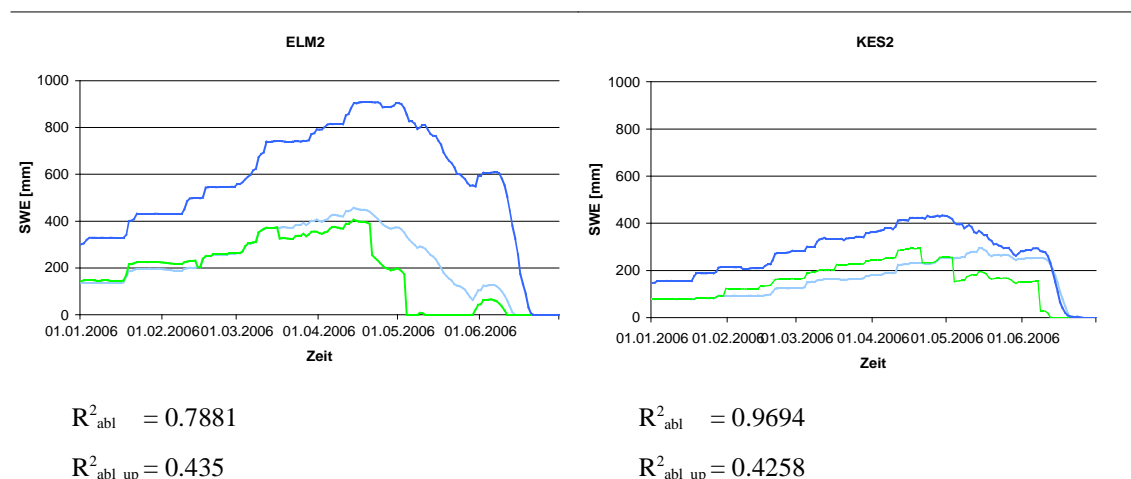


Abbildung 26: Beobachtetes (dunkelblau), simuliertes (hellblau) und aufdatiertes (hellgrün) SWE für die Stationen KES2 im Engadin und ELM2 im Linthtal im Winter 2005/06. Aufdatierungsprodukt: regionale Schneehöhenkarte

Es wurde bereits erwähnt, dass die regionalen Karten nur im Winter 2005/06 als Aufdatierungsprodukt verwendet wurden. Ebenfalls stehen im Alptal keine regionalen Schneehöhenkarten zur Verfügung. In Abbildung 42 sind je ein Beispiel aus dem Engadin und dem Linthtal dargestellt und zeigen den Effekt des Updates durch die regionalen Schneehöhenkarten.

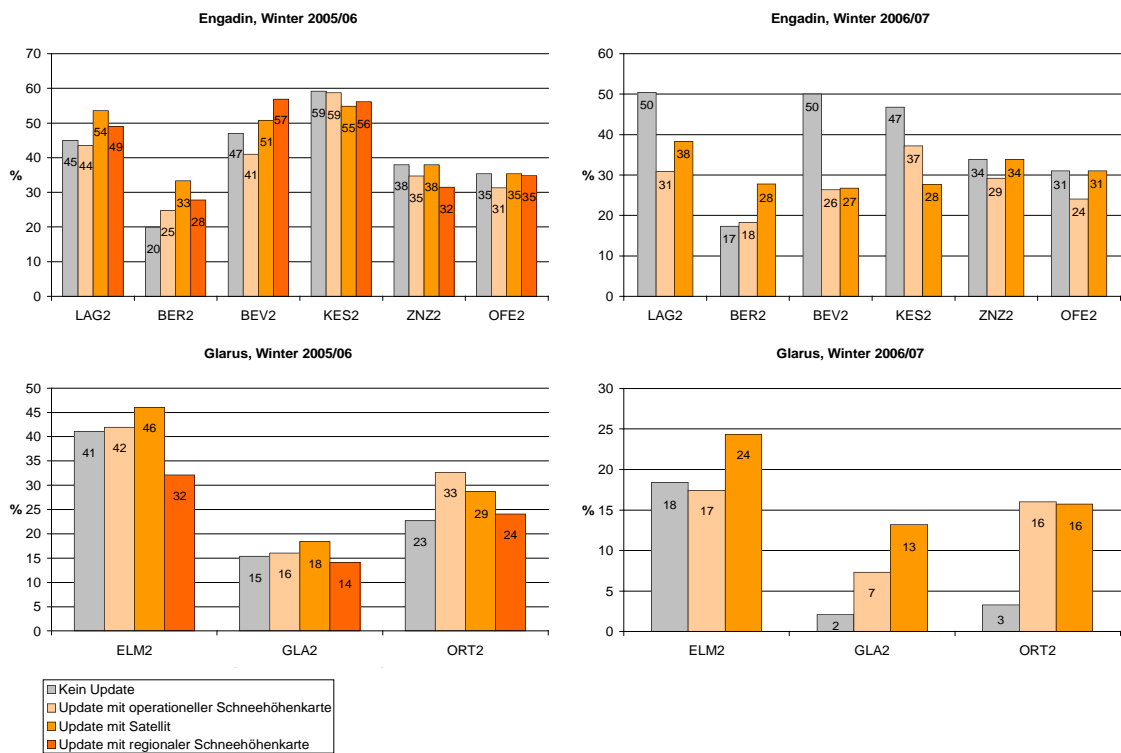


Abbildung 27: Darstellung des mittleren (beachtete Periode: Januar bis Ende April) simulierten Schneewasseräquivalents in Prozent des mittleren beobachteten Schneewasseräquivalents für die Gebiete Linthal und Engadin (Aufdatierungsreihe 3).

In allen drei Gebieten ist bei fast allen Stationen zu beobachten, dass der simulierte Ausaperungszeitpunkt viel früher erfolgt, als es die Beobachtung zeigt. Durch das Update erfolgt dieser Zeitpunkt bei gewissen Stationen sogar noch viel früher. Dies ist gut in Abbildung 26 zu sehen.

Die Tabellen 10 bis 14 im Anhang zeigen eine Zusammenstellung sämtlicher beobachteter und simulierter Schneewasseräquivalentwerte für die verschiedenen Stationen der drei Gebiete für beide Winter.

7.3 ANALYSE DES SCHNEEMUSTERS

7.3.1 ALLGEMEINE SITUATION

PREVAH berechnet einerseits das SWE, welches mit den punktuellen Vergleichen verifiziert wurde, und andererseits das räumliche Schneemuster. Durch das Aufdatieren des Modells wird eine Umverteilung des Schnees vorgenommen. Daher soll in einer weiteren Validierung die Veränderung des Schneemusters nach dem Update untersucht werden. Gegenwärtig und zukünftig ist und wird es Usus sein, differenzierte hydrologische Modelle mit beobachteten räumlichen Mustern wie z.B. Satellitenbildern zu evaluieren (Zappa, 2002). Grayson und Blöschl (2001) stellen eine Auswahl an Fallstudien dar, wo hydrologische Modelle durch den Vergleich von beobachteten und simulierten Rasterkarten von hydrologischen Variablen geprüft und bestätigt werden. Der Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Schneemustern ist eine der geläufigsten Methoden für eine explizite Validierung von räumlich differenzierten hydrologischen Modellen. Blöschl et al. (1991) validieren ein Modell, indem sie ein Luftphoto eines teilweise schneebedeckten alpinen Gebietes mit simulierten Schneemusterdaten auf einem digitalen Geländemodell dieses Gebietes verglichen. Strasser & Mauser (2001) bestimmten die Qualität einer räumlich differenzierten Simulation der Schneedecke von grösseren Einzugsgebieten, indem sie die Simulation mit NOAA/AVHRR Satellitenbildern verglichen. Blöschl et al. (2002) wendeten ähnliche Techniken an, um mit 12 SPOT XS Satellitenbildern ein räumlich differenziertes Schneeschmelzmodell zu prüfen. Auf diese Weise konnten sie aufzeigen, wo das Modell die Schneedecke respektive das SWE systematisch unter- bzw. überschätzt.

In dieser Arbeit werden die Simulationen mit den jeweiligen Aufdatierungsprodukten (operationelle Schneehöhenkarten der Schweiz, NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten, regionale Schneehöhenkarten) verglichen. Um zu testen, ob das Modell nach dem Update das Schneemuster besser simuliert, werden sowohl das ursprüngliche Modell als auch das aufdatierte Modell mit den Schneehöhen- bzw. Satellitenkarten verglichen. Die Auswertung erfolgt mit einer kategoriellen Statistik (Kapitel 4.2). Eine korrekte Vorhersage des Modells bedeutet entweder schneefrei (zeros) oder schneebedeckt (hits). Berechnet das Modell mehr Schnee als zu beobachten ist, sind dies 'false alarms'. Eine Unterschätzung des Modells an Schnee wird mit 'misses' bezeichnet. Die Pixel, welche Seen oder Wolken darstellen, wurden nicht in die Analyse miteinbezogen.

Für die Analyse wurden die Schneehöhenprodukte, sowie die NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten in ein binäres Format gebracht. Das bedeutet entweder ist ein Pixel schneefrei (Null) oder schneebedeckt (Eins). Die Schwellenwerte für den Übergang von schneefrei zu schneebedeckt sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Schwellenwerte für den Übergang von schneebedeckt zu aper für die vier Schneemuster-Karten

Produkt	Schwellenwert
PREVAH	SWE in mm: 1
operationelle SH-Karte SLF	SH in cm: 10
Satellitenbild	%-Anteil an Schnee pro Pixel: 20
regionale SH-Karte	SH in cm: 30

Der Vergleich der Simulation wurde jeweils an den Aufdatierungstagen, sowie an ausgewählten Tagen dazwischen durchgeführt. Abbildung 28 zeigt einen solchen Vergleich zwischen der Simulation ohne Update und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz am 21. April 2006 für alle 3 Einzugsgebiete.

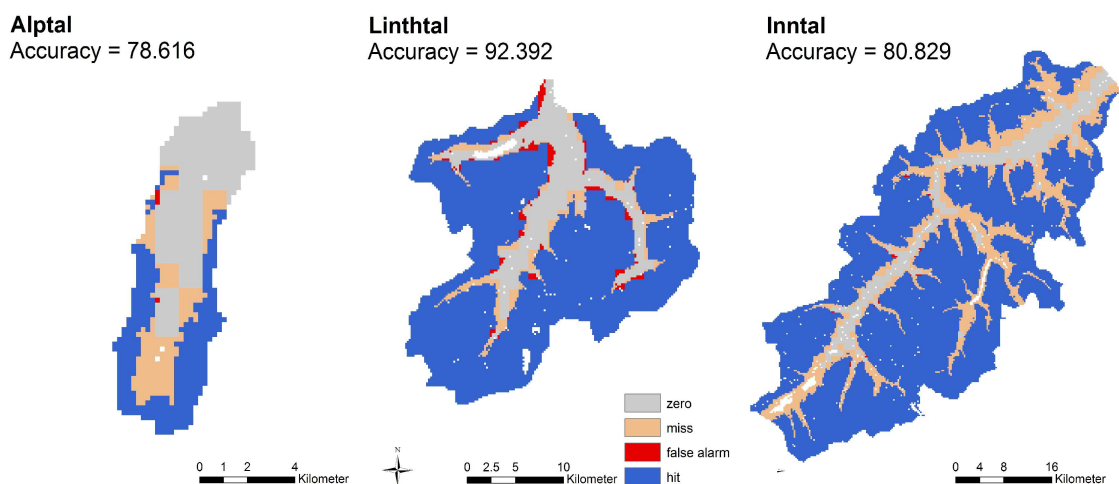


Abbildung 28: Vergleich des beobachteten (operationelle Schneehöhenkarte) und simulierten Schneemusters für die 3 Einzugsgebiete Alptal, Linthtal und Engadin am 21. April 2006.

Der Anteil an korrekten Voraussagen nimmt in allen Gebieten gegenüber den falschen Voraussagen überhand. Im Winter liegt die ACC zwischen der Simulation und der Schneehöhenkarte der Schweiz bzw. der regionalen Schneehöhenkarte für beide Winter zwischen 80% und 100%. Die ACC gegenüber den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten ist tiefer und liegt im Durchschnitt mit ganz wenigen Ausnahmen zwischen 60%

- 90%. Gegen Mai und Juni hin nimmt die ACC gegenüber allen 3 Schneeprodukten ab, sinkt aber nie unter 50% .

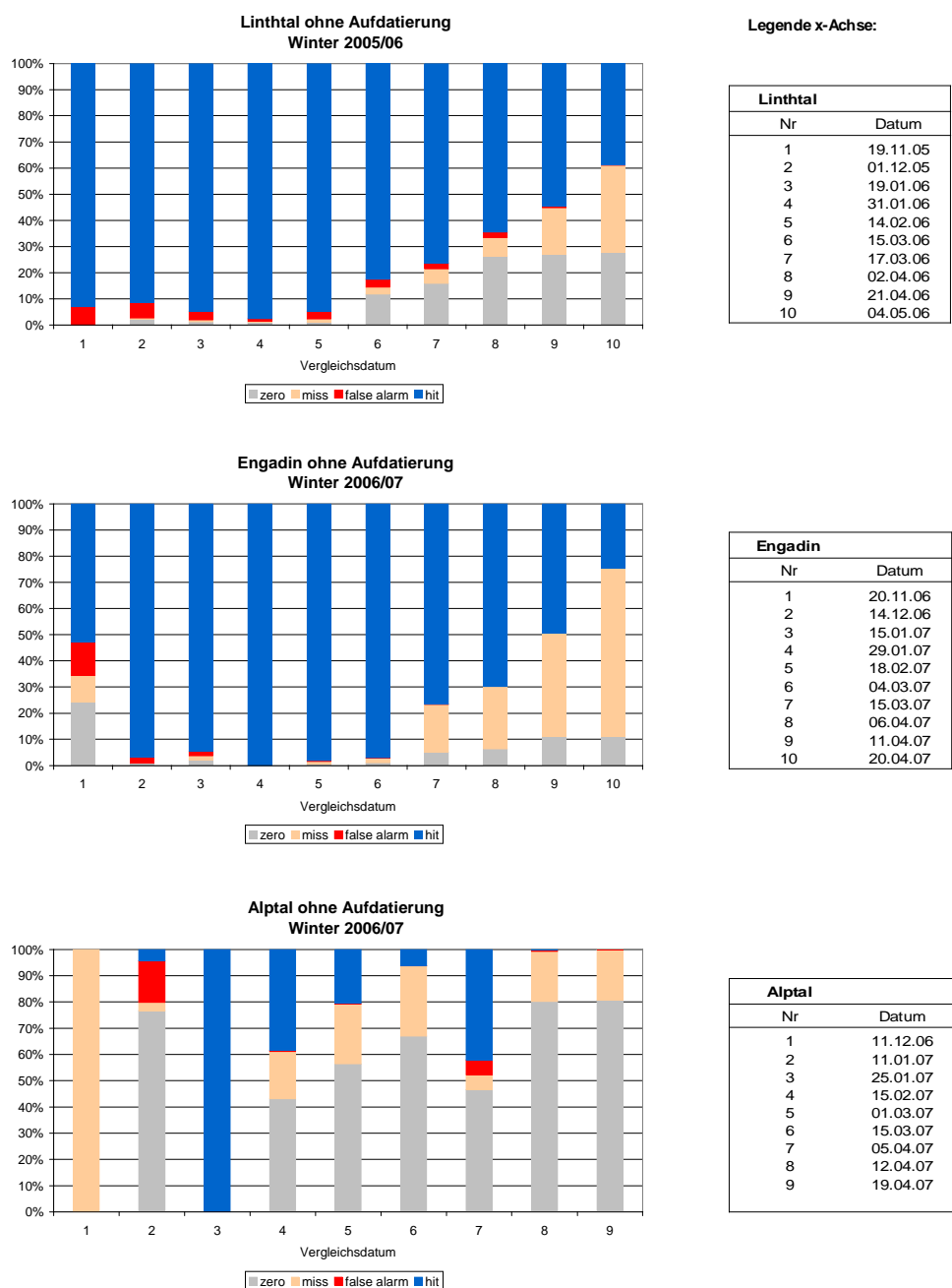


Abbildung 29: Vergleich des Schneemusters zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz

Der CSI ist gegenüber den schneefreien Ereignissen ('zero') nicht sensibel. Ein CSI, der tiefer ist als die ACC bedeutet in Fällen von schneebedeckten Pixeln entweder eine Überschätzung oder Unterschätzung. Es gilt, wenn der POD1, also die Ermittlung von schneebedeckten Pixeln, und die FAR hoch sind, dann wurde die Schneebedeckung

überschätzt. Ist hingegen der POD0 hoch und der CSI tief, sind die schneefreien Pixel überschätzt worden. Der durchschnittliche POD1 ist im Winter 2005/06 gegenüber allen drei Vergleichskarten für alle drei Gebiete grösser als der durchschnittliche POD0. Ausnahmen bilden das Alptal im Winter 2006/07 gegenüber der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz und den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten, sowie das Linthtal gegenüber den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten. Der höhere POD1 ist auf eine systematische Überschätzung der schneebedeckten Pixel über den gesamten Winter hinweg zurückzuführen. Ist er tiefer, liegt eine Unterschätzung der schneebedeckten Pixel vor. Betrachtet man das Verhältnis von POD1 und POD0 im Frühling, stellt man fest, dass gegen den Frühling hin eine Tendenz zur Unterschätzung der Schneedecke besteht. Dies ist in Abbildung 29 sehr gut zu sehen. Im Falle des Linthtal und Engadin nehmen die 'miss'-Pixel im Frühling während der Schneeschmelze sehr stark zu. Im Alptal sind die 'miss'-Pixel während des gesamten Winters 2006/07 in grosser Zahl vorhanden. Dies ist auf die frühlingshaften Wetterbedingungen während des gesamten Winters zurückzuführen. Die leichte Überschätzung ist vor allem im Linthtal im Winter 2005/06 zu betrachten. Es treten in diesem Falle vermehrt 'false alarm'-Pixel auf.

Der BIAS ist in den meisten Fällen grösser als 1, was ebenfalls auf eine Überschätzung des Modells hindeutet, und sinkt gegen den Frühling hin unter 1. Betrachtet man den BIAS des Winters 2006/07, zeigt sich dasselbe Bild, das sich mit dem Verhältnis der beiden POD's bereits ergab. So liegt der BIAS für das Alptal und für das Linthtal im Vergleich mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten grösstenteils unter 1. Im Winter 2005/06 ist die Überschätzung im Vergleich zur operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz tendenziell kleiner als im Vergleich mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten wo im Frühling ebenfalls eine Überschätzung zu sehen ist und somit BIAS-Werte über 1 zu finden sind. Für den Winter 2006/07 lässt sich diese Feststellung nicht bestätigen.

Eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse der kategoriellen Statistik zwischen PREVAH und der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte zeigt Abbildung 47 am Beispiel des Linthtals für beide Winter 2005/06 und 2006/07.

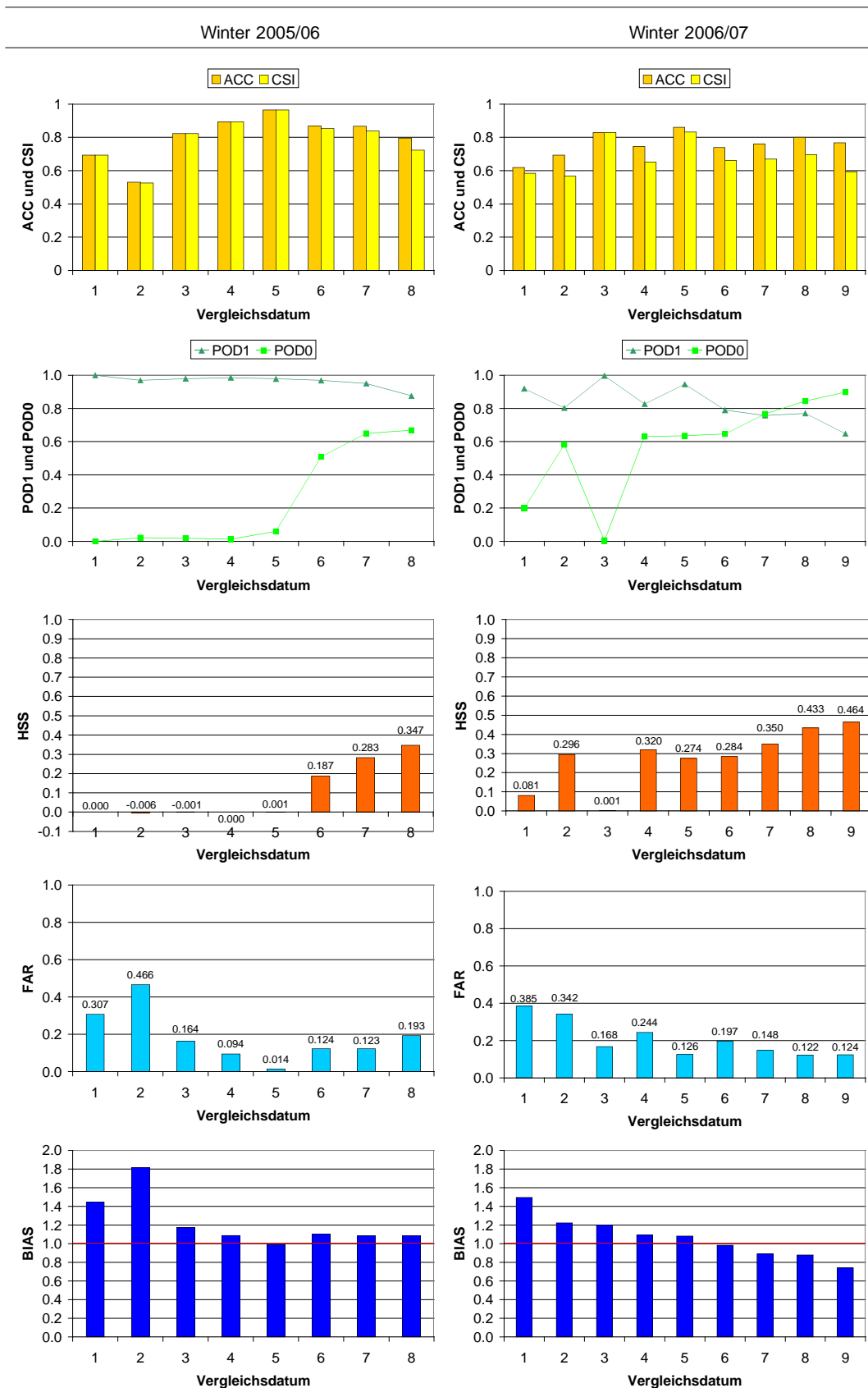


Abbildung 30: Kategorielle Statistik zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und PREVAH für beide Winter im Einzugsgebiet der Linth.

Beschriftung der x-Achse für Winter 2005/06: 1: 19. Januar, 2: 31. Januar, 3: 14. Februar, 4: 15. März, 5: 17. März, 6: 2. April, 7: 21. April, 8: 4. Mai.

Beschriftung der x-Achse für Winter 2006/07: 1: 14. Dezember, 2: 15. Januar, 3: 29. Januar, 4: 18. Februar, 5: 4. März, 6: 15. März, 7: 6. April, 8: 11. April, 9: 20. April.

Die Lage der Fehlpixel ist im Übergangsbereich von schneebedecktem zu aperem Gebiet. Abbildung 31 zeigt eine mögliche Erklärung für die scheinbare Schneeüberschätzung des Modells. Auf Grund schlechter Beleuchtungsverhältnisse, z.B. entlang von Kämmen, oder dichter Bewaldung entstehen im Winter bei der Berechnung der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte Fehlpixel (Foppa et al., 2007). Die Folge davon sind apere Gebiete in der Schneemuster-Karte, die auf Grund ihrer topographischen Höhe schneebedeckt sein müssten (siehe Kreise). In der kategoriellen Statistik zeigt sich dies als 'false alarm'-Pixel in hohen Lagen. Die 'miss'-Pixel am 19. Januar 2006 im Alptal sind auf eine deutliche Abweichung des Modells zurückzuführen.

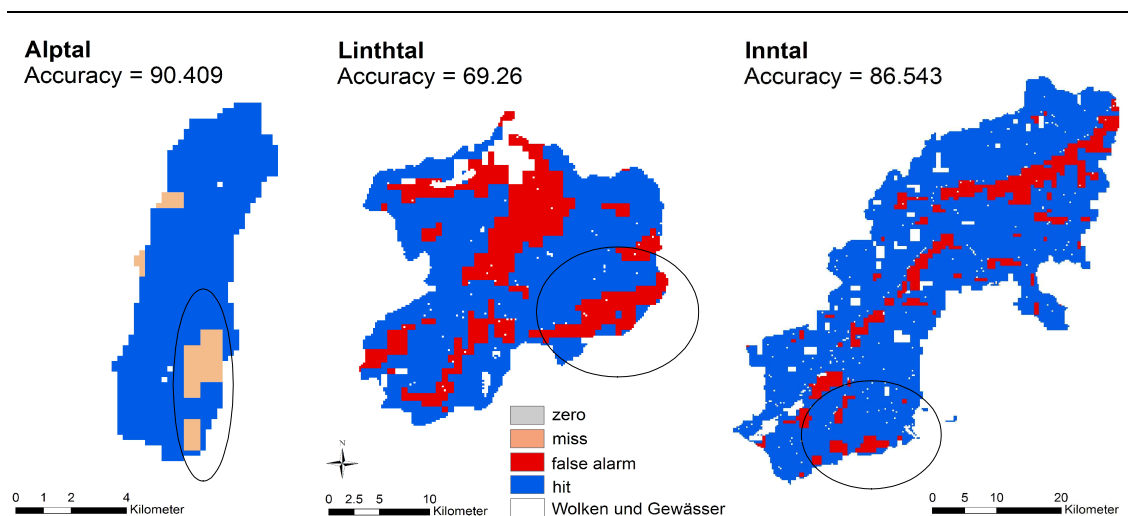


Abbildung 31: Vergleich des Schneemusters zwischen der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte und PREVAH am 19. Januar 2006 für alle drei Untersuchungsgebiete

Bei einem Event, wo mehr schneefreie als schneebedeckte Pixel vorkommen, ist eine zufällige Vorhersage grösser als bei einem Event, wo die Verteilung der Pixel ausgeglichen ist. Das Heidke Skill Score ist ein quantitatives Mass, welches beschreibt, wie sich eine modellierte Prognose gegenüber einer Zufallsprognose verbessert. Sie basiert auf der kleinräumigen Erfassung von Ereignissen im beobachteten und modellierten Gebiet. Aus diesem Grunde ist das HSS für die relative Qualität der Simulation aussagekräftiger als andere Masse. Bei allen betrachteten Fällen steigt das HSS nicht höher als 0.5. Dies bedeutet, dass im Maximum 50% der nicht zufällig vorhergesagten Pixel korrekt simuliert wurden. Im Frühling 2006 und praktisch den gesamten Winter 2006/07 kommen mehr schneefreie als schneebedeckte Pixel vor. Dies ist der Grund für das tiefe HSS, da in diesem Fall, wie oben erwähnt, die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Vorhersage gross ist.

7.3.2 SITUATION DER SCHNEEDECKENVERTEILUNG NACH DER AUFDATIERUNG

Die Überschätzung bzw. Unterschätzung der Schneedecke soll nun mit den durchgeführten Updates verbessert werden. Die Resultate dazu werden im folgenden präsentiert und erläutert. Dabei wird jedes Gebiet einzeln betrachtet. Auf den Unterschied der drei Aufdatierungsserien im Winter 2005/06 wird nicht speziell eingegangen, da es für das Schneemuster keinen grossen Unterschied ausmacht, ob nun erst im Frühling, oder schon im November mit Aufdatieren begonnen wird.

a) Linthtal

Betrachtet man die ACC, stellt man fest, dass durch das Update im Grossen und Ganzen Verbesserungen des Schneemusters erzielt werden können. Am grössten sind die Verbesserungen im Mai/Juni und in Anbetracht der Serie 3 auch im November/Dezember. Dies gilt für alle drei Schneeprodukte und beide Winter.

Abbildung 32 zeigt die Veränderung der ACC nach den Updates durch die operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz im Winter 2006/07. Im April liegen sie zwischen 10% und 28%. Ansonsten reichen sie von 2% bis 8%. Allgemein stellt man fest, dass durch das Aufdatieren mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz jeweils für beide Winter eine neue ACC von mindestens 90% erzielt werden konnte. Mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten ist dies nicht immer gelungen.

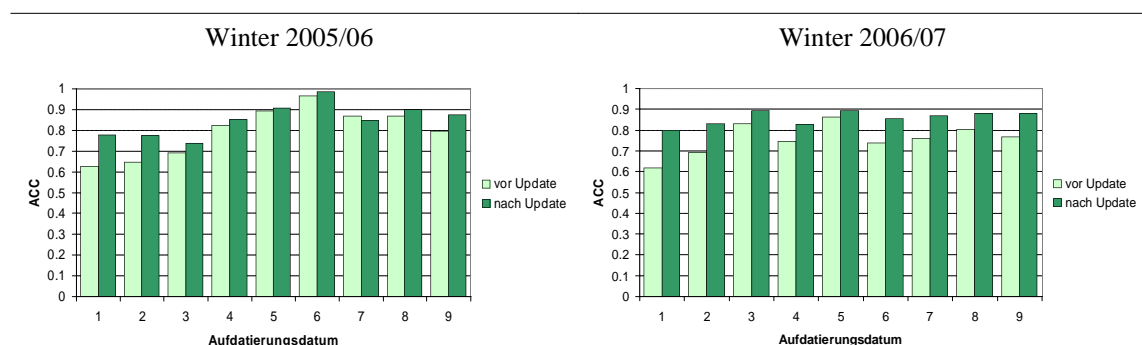


Abbildung 32: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte für das Linthtal. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.

Die Verbesserungen durch die regionalen Schneehöhenkarten im Frühling bzw. im Mai 2006 betragen unabhängig der Aufdatierungsserie 29%. Somit kann im Mai mit den regionalen Karten die höchste Verbesserung erzielt werden. Allerdings sind auch hier stellenweise geringe Verschlechterungen zu verzeichnen. Die ACC fällt nie unter 0.9 nach dem Update.

Der CSI liegt nach dem Update immer noch unter der ACC, wenn auch nicht mehr so stark, wie dies vorher der Fall war. Im Winter 2006/07 haben die beiden Masse für das Linthtal nach dem Update mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz sogar fast denselben Wert. Im Allgemeinen besteht jedoch immer noch eine Über- oder Unterschätzung, wenn auch nicht mehr eine so grosse. Der durchschnittliche POD1 liegt immer noch über dem durchschnittlichen POD0. Allerdings ist auch hier der Unterschied, mit Ausnahme der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten im Winter 2005/06, wesentlich kleiner geworden als vor dem Update. Die Betrachtung der BIAS-Werte zeigt, dass diese durch das Update näher zu 1 hin gerutscht sind. Die Unterschätzung im Frühling ist folglich leicht verbessert worden. Dies gilt für alle drei Aufdatierungsprodukte und beide Winter. Die Veränderung der HSS ist verschwindend klein. Folglich werden nach den Updates immer noch nur maximal 50% der nicht zufällig vorhergesagten Pixel korrekt simuliert.

Die Abbildung 33 und 34 zeigen, dass durch Aufdatieren die 'misses' sehr stark zurückgehen. Die Unterschätzung des Modells im Frühling kann also verbessert werden. Allerdings neigt das Modell dazu, durch die Updates an gewissen Stellen Schnee zu plazieren, wo gar keiner wäre. Die 'false alarms' nehmen also im Vergleich zu vorher etwas zu. Insgesamt konnten die falschen Pixel jedoch stark vermindert werden.

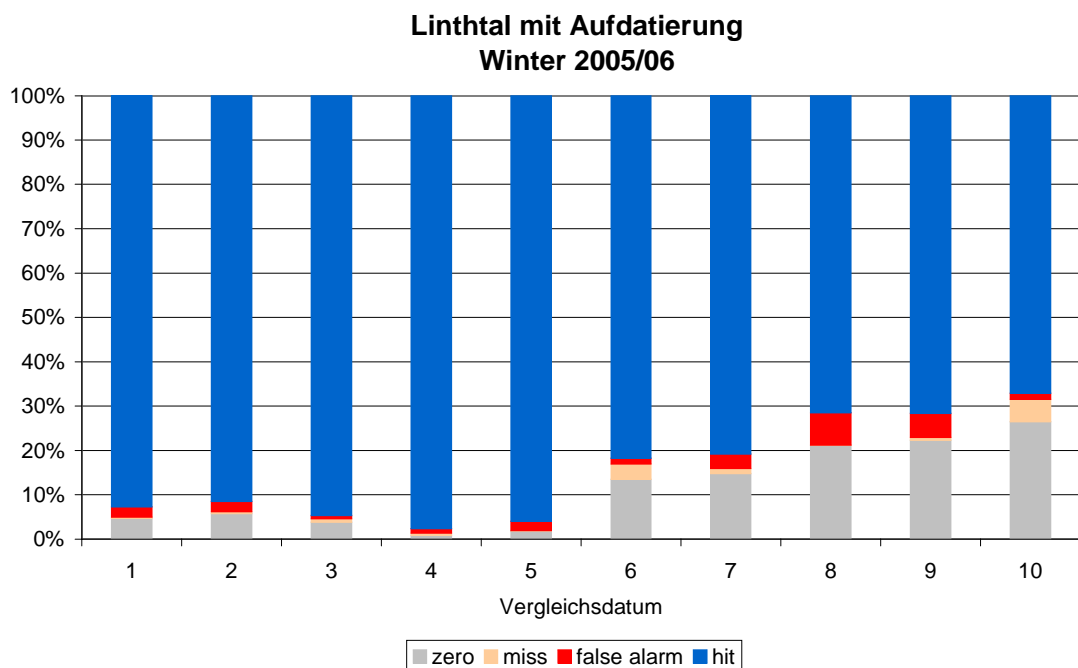
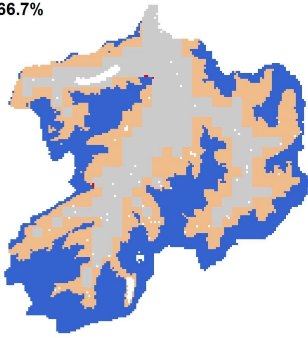


Abbildung 33: Vergleich zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte nach dem Update mit der operationellen Schneehöhenkarte. Legende der x-Achse und Vergleichsgrafik ohne Update sind in Abbildung 29 zu finden.

11. Juni 2006

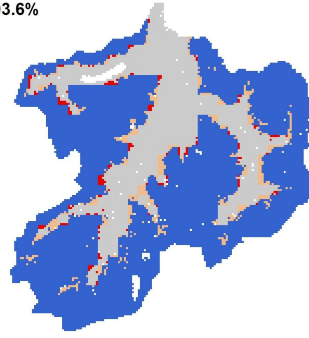
vor Update

Accuracy: 66.7%



nach Update
(Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte)

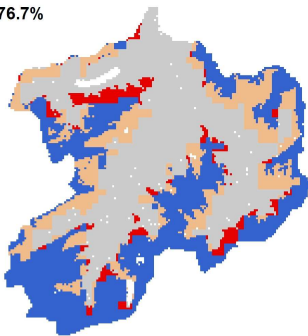
Accuracy: 93.6%



20. April 2007

vor Update

Accuracy: 76.7%



nach Update
(Aufdatierungsprodukt: Satellitenbild)

Accuracy: 88.0%

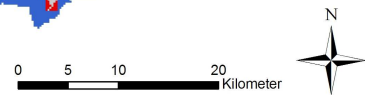
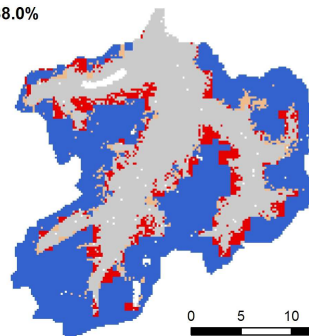


Abbildung 34: Schneemuster am 11. Juni 2006 und 20. April 2007 für das Einzugsgebiet der Linth. Räumliche Darstellung der kategoriellen Statistik.

b) Engadin

Im Inntal kann durch das Aufdatieren gleichermassen eine Verbesserung der ACC erreicht werden. Allerdings ist das Resultat nicht ganz so gut wie im Linthtal. Die verbesserte ACC liegt nicht immer über 90%. Betrachtet man die Verbesserungen nach den Aufdatierungsserien mit der Schneehöhenkarte der Schweiz, stellt man fest, dass die Verbesserungen wiederum im November/Dezember und Frühling sind. Im Winter 2005/06 bringt das Update am 11. Juni eine Verschlechterung der ACC von 10% für alle Serien. Auch im Winter 2006/07 ist eine Verschlechterung zu verzeichnen. Diese ist am 19. April 2007 und beträgt 20%. Im Januar und Februar sind praktisch keine Verbesserungen zu sehen. Dies bedeutet jedoch nicht eine Schwäche des Updates, da zu dieser Zeit die ACC sowieso schon ohne Update bei 99% liegt.

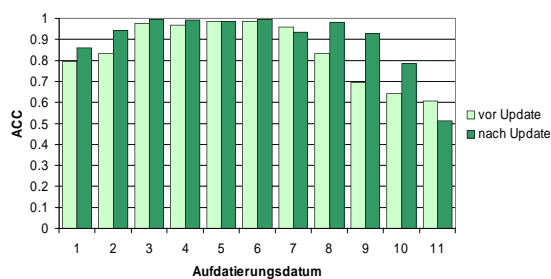
Ein ähnliches Bild (Abbildung 35) zeigt sich durch die Updates mit den regionalen Schneehöhenkarten im Winter 2005/06. Auch hier bringt das Update am 11. Juni eine Verschlechterung mit sich. Im Mai wird eine Verbesserung von 23 % erreicht.

Die Verbesserungen mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten sind relativ klein. Sie liegen nie höher als 12%.

Der Vergleich der POD zeigt keinen eindeutigen Trend. Die Updates mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz bewirken eine Erhöhung sowohl des durchschnittlichen POD1, aber auch des durchschnittlichen POD0. Schliesslich ist der Unterschied dieser beiden Masse immer noch gleich gross wie vorher. Das Modell hat sich in Bezug auf die Überschätzung für beide Winter also nicht verbessert.

Aufdatierungskarte:

regionale Schneehöhenkarte



Aufdatierungskarte:

operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz

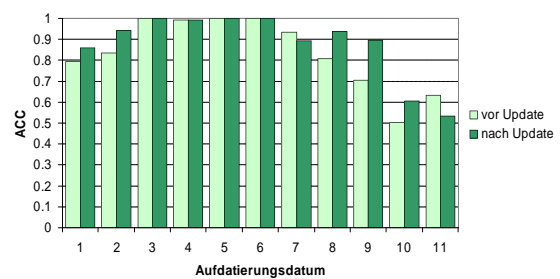


Abbildung 35: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der regionalen und operationellen Schneehöhenkarte für das Engadin im Winter 2005/06. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.

Im Falle der regionalen Schneehöhenkarten im Winter 2005/06 sind die POD Werte nach den Updates praktisch gleich gross. Der POD0 ist nur wenig grösser als der POD1. Dies bedeutet, dass im Falle des Engadins mit den regionalen Schneehöhenkarten die Überschätzungstendenz stark reduziert werden konnte. Die Betrachtung der POD Werte bei den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten zeigt keine Verbesserung für beide Winter.

Die Betrachtung des BIAS zeigt nach den Updates mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz und den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten keine Verbesserung. Im Winter ist er zwar ziemlich nahe bei 1, fällt im Frühling jedoch teilweise massiv ab. Der HSS zeigt ebenfalls keine Verbesserung. Allgemein liegt dieser noch tiefer als im Linthtal.

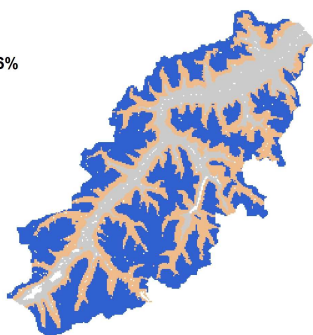
Abbildung 36 stellt die Veränderung der Schneedecke für den 4. Mai und den 11. Juni 2006 dar. Die Darstellung des Verteilungsmusters der Kategoriellen Statistik zeigt die oben beschriebenen Beobachtungen sehr schön. Am 4. Mai sind vor dem Update noch

sehr viele 'misses' beim Übergang Schnee/nicht Schnee zu beobachten. Nach dem Update, in diesem Falle mit den regionalen Schneehöhenkarten, sind die 'misses' massiv zurückgegangen, was die oben beschriebenen 23% Verbesserung der ACC bewirkt. Anders sieht es im Falle des 11. Juni aus. Vor dem Update sind sehr viele 'misses' zu verzeichnen, welche nach dem Update weiter zunehmen und somit eine Verschlechterung der ACC bewirken.

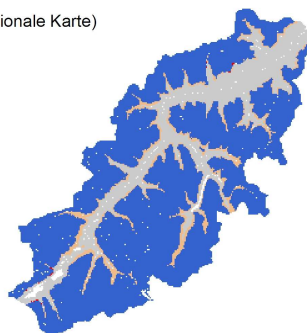
4. Mai 2006

vor Update

Accuracy: 69.6%



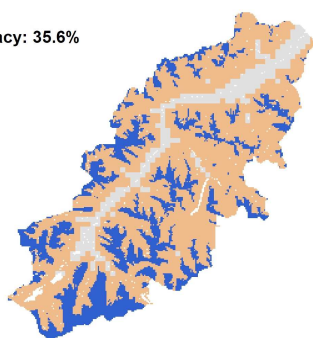
nach Update
(Schneehöhenprodukt: regionale Karte)
Accuracy: 92.7%



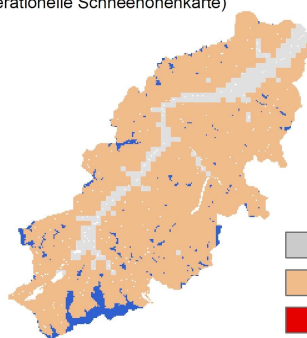
19. April 2007

vor Update

Accuracy: 35.6%



nach Update
(Schneehöhenprodukt: operationelle Schneehöhenkarte)
Accuracy: 15.5%



0 5 10 20
Kilometer



Abbildung 36: Kategorielle Statistik zwischen PREVAH und der regionalen Schneehöhenkarte für das Engadin am 4. Mai und 11. Juni 2006 vor und nach dem Update

c) Alptal

Die Betrachtung der ACC im Alptal zeigt, dass hauptsächlich die operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz eine Verbesserung im November/Dezember 2005 (18%/27%) und April 2006 (14%) brachten. Im Mai 2006 sind sie nur noch klein. Allerdings war das Gebiet ab Anfang Mai praktisch schneefrei. Die ACC im Winter liegt bei 100%, daher ist dort keine Verbesserung möglich. Im Winter 2006/07 sind die Verbesserungen kleiner. Im Januar und Februar 2007 betragen sie zwischen 8 und 14%. Danach sind sie nur noch klein. Die schlechteren Resultate für das Alptal im Winter

2006/07 sind darauf zurückzuführen, dass sehr wenig Schnee lag und das Gebiet relativ klein ist.

Gegenüber den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten (Abbildung 37) sind Ende April und Anfang Mai 2006 Verbesserungen von 16% bzw. 2% zu verzeichnen. Im November 2006 liegen sie bei 12% und im Dezember 2006 bei 7%. Am 2. April 2006 hat das Update für Serie 2 und 3 25% Verschlechterung gebracht, für Serie 1 3%. Im Winter 2006/07 kann man am 6. April 2007 eine Verbesserung von 20% feststellen, ansonsten liegen die Verbesserungen zwischen 0% und 8%.

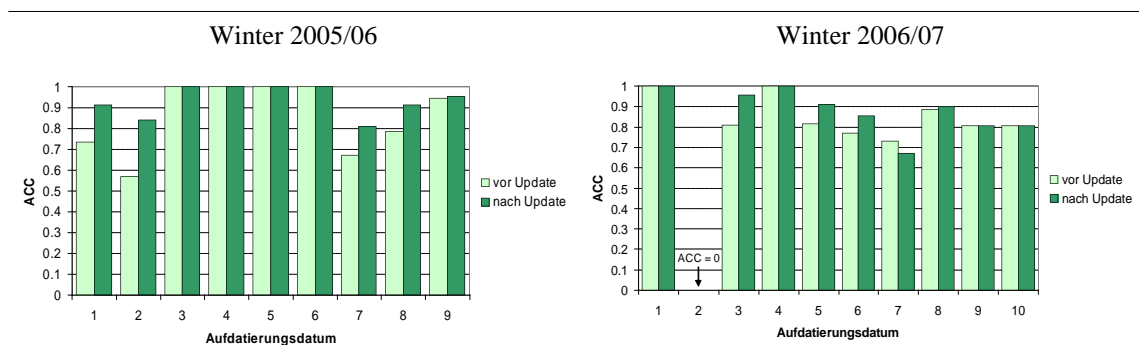


Abbildung 37: Darstellung der ACC vor und nach dem Update mit der operationellen Schneehöhenkarte für das Alpenal. Die entsprechenden Daten der x-Achse befinden sich im Anhang.

Nach dem Aufdatieren mit den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz im Winter 2005/06 sind der POD1 und der POD0 nahe beieinander mit einer leichten Tendenz zur Unterschätzung des Modells. D.h. der POD0 ist leicht höher als der POD1. Im Winter 2006/07 hat sich das Verhältnis nicht verändert nach dem Update, weder mit den operationellen Schneehöhenkarten noch mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten. Der POD0 ist immer noch grösser als der POD1. Es liegt also weiterhin eine Unterschätzung vor. Beim Vergleich mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten liegt der POD1 im Winter 2005/06 massiv über dem POD0. Es liegt also eine Überschätzung des Modells vor. Auch nach dem Update mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten konnte keine Verbesserung des POD erreicht werden. Hingegen konnte durch das Aufdatieren mit den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten im Winter 2005/06 einen besseren BIAS erzielt werden, welcher beinahe bei 1 liegt. Mit den operationellen Schneehöhenkarten wurde der BIAS-Wert im Schnitt um 0.2 verschlechtert. Im Winter 2006/07 hat sich der BIAS zwar erhöht, liegt aber selten in der Nähe von 1.

Der HSS ist sehr tief, was bedeutet, dass er immer um Null herum liegt, sowohl für die NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten als auch für die operationellen Schneehöhenkarten. Einzig gegen Frühling hin steigt er für alle 3 Serien im Winter 2005/06 gegen maximal 0.5, was immer noch sehr tief ist.

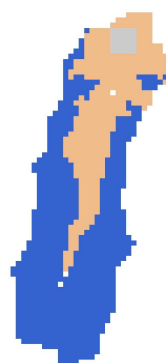
Die Darstellung der Kategoriellen Statistik in Abbildung 38 zeigt, dass im Falle der operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz eine Unterschätzung des Schnees besteht. Durch das Aufdatieren mit selbigem Schneehöhenprodukt kann eine Verbesserung erzielt werden, jedoch besteht immer noch eine Unterschätzung in tiefen Lagen. Im Falle der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten haben die 'false alarm' überhand. Das heisst, es besteht eine Überschätzung des Schnees. Durch Aufdatierungen wird dieser Effekt weiter verstärkt. Es gibt keine Verbesserung. Dies zeigt sich auch in der Analyse der ACC- Werte, die am 2. April für Serie 2 und 3 massiv sinken.

2. April 2006

Vergleichs- und Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz

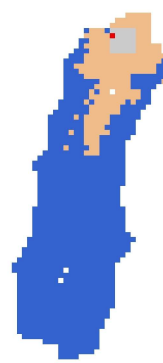
vor Update

Accuracy: 67.2%



nach Update

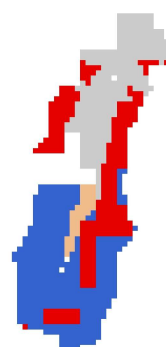
Accuracy: 81.8%



Vergleichs- und Aufdatierungsprodukt: Satellitenbild

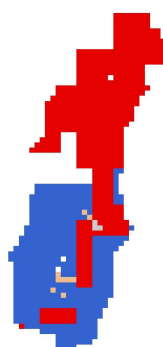
vor Update

Accuracy: 69.7%



nach Update

Accuracy: 44.7%



0 1,5 3 6 Kilometer



Abbildung 38: Kategorielle Statistik für das Alptal am 2. April 2006.

7.4 ANALYSE DES ABFLUSSES

Zuletzt soll noch der Einfluss des Aufdatierens auf den Abfluss getestet werden. Hier stellt sich die Frage, ob Aufdatierungen auch eine Verbesserung des Gesamtabflusses im Frühling bewirken. Dies wird mit dem Korrelationskoeffizienten R^2 und dem Gütekoeffizient E von Nash und Sutcliffe (1970) (siehe Kapitel 5.1.2) untersucht.

7.4.1 WINTER 2005/06

7.4.1.1 Allgemeine Situation

Die Analyse des Abflusses wird nur für das Gebiet der Linth und das Alptal durchgeführt. Der gemessene Abfluss im Engadin ist auf Grund von anthropogenen Einflüssen nicht repräsentativ. Für das Linthtal stehen stündliche Abflusswerte zur Verfügung. Für das Alptal sind sie täglich.

Ohne Update ergibt sich ein Korrelationskoeffizient für das Linthtal von 0.746 bzw. für das Alptal von 0.922. Der Nash-Sutcliffe Koeffizient beträgt für das Linthtal 0.65 und für das Alptal 0.91. Dies sind relativ gute Werte, vor allem was das Alptal betrifft.

Abbildung 39 zeigt, dass im Linthtal vor allem in Fällen von Abflussspitzen zu viel Abfluss simuliert wird. Im Alptal ist genau das Gegenteil der Fall. Dort ist eher eine Unterschätzung der Abflussspitzen zu beobachten.

7.4.1.2 Auswertung der Resultate nach den Updates

Tabelle 6 zeigt die Nash-Sutcliffe Werte nach den jeweiligen Updates. Auffällig ist, dass die Werte durch das Aufdatieren schlechter werden.

Tabelle 6: Darstellung des Nash-Sutcliffe Koeffizienten nach den durchgeführten Aufdatierungsserien für das Alptal und Linthtal für den Winter 2005/06. Abkürzungen: OP=operationelle Schneehöhenkarte, AVHRR=Satellitenbild, REG=regionale Schneehöhenkarte

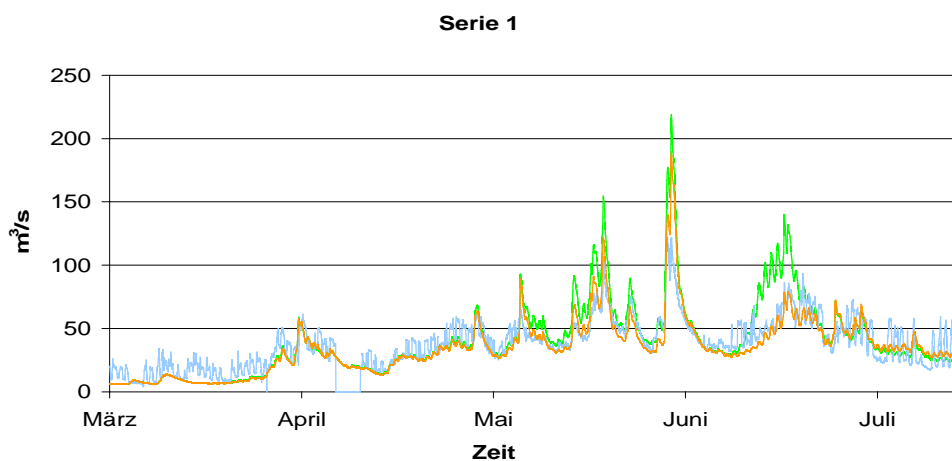
Linthtal				
	Aufdatierungsprodukt	OP	AVHRR	REG
	Serie 1	0.250	0.248	0.574
	Serie 2	0.451	0.599	0.576
	Serie 3	0.451	0.599	

Alptal			
	Aufdatierungsprodukt	OP	AVHRR
	Serie 1	0.872	0.820
	Serie 2	0.888	0.854
	Serie 3	0.888	0.853

Vor allem Serie 1 im Linthtal ergibt nach dem Update mit der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz und der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte eine massive Verschlechterung auf einen Wert von 0.25.

Alleinig Updates im Frühling hat also einen schlechten Einfluss auf den Abfluss. Die Verschlechterung ist darauf zurückzuführen, dass durch die Updates Schnee in tief gelegene Gebiete verfrachtet wird, wo er schliesslich früh schmilzt und somit im Modell Schneeschmelze verursacht. Das Modell überschätzt in diesem Fall den Abfluss, was beispielsweise im Linthtal Mitte Juni zu beobachten ist (Abbildung 39).

a)



b)

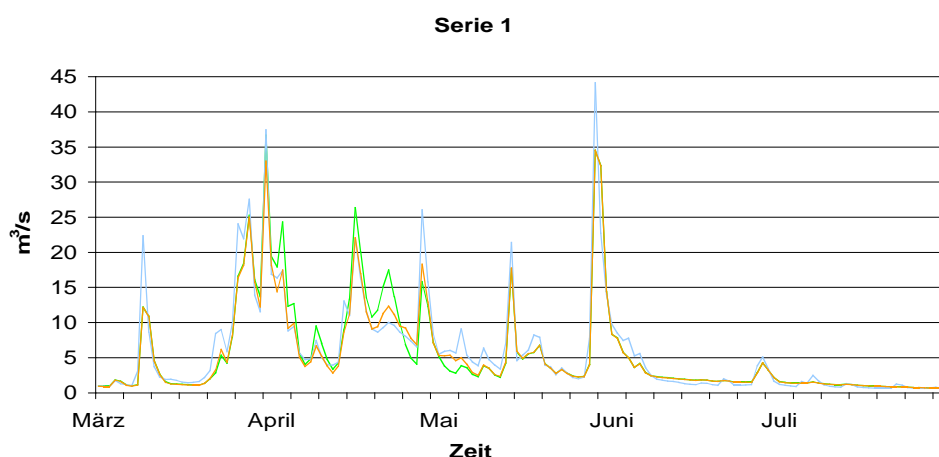


Abbildung 39: Darstellung des Abflusses für a) Linthtal und b) Alptal. Hellblau: Beobachtung; orange: PREVAH ohne Update; hellgrün: PREVAH nach Update mit operationeller Schneehöhenkarte der Schweiz

7.4.2 WINTER 2006/07

7.4.2.1 Allgemeine Situation

Für die Periode vom 1. März bis 30. April 2007 ist ein Nash-Sutcliffe-Koeffizient von 0.595 und ein Korrelationskoeffizient von 0.593 für das Linthtal berechnet. Im Alptal ist die Abflussgüte mit einem NSE von 0.875 und einem Korrelationskoeffizienten von 0.918 wesentlich besser. Insgesamt liegen die Werte für beide Gebiete etwas tiefer als im vorherigen Winter. Es fällt auf, dass der simulierte Abfluss im Linthtal im 2. und 3. Drittel des März überschätzt und ansonsten eher unterschätzt wird. Im Alptal haben wir insgesamt, mit wenigen Ausnahmen eine Unterschätzung des Abflusses.

7.4.2.2 Auswertung der Resultate nach den Updates

Tabelle 7 zeigt, dass die Nash-Sutcliffe-Effizienz und die Korrelation durch das Aufdatieren sehr schwach wird für das Linthtal. Im Alptal ist der Einfluss minimal.

Tabelle 7: Zusammenstellung der Gütekoeffizienten für den Winter 2006/07

Linthtal			
Aufdatierungsprodukt	kein Update	operationelle Schneehöhenkarte SLF	NOAA/AVHRR
E	0.595	0.296	0.191
r ²	0.593	0.301	0.336

Alptal			
Aufdatierungsprodukt	kein Update	operationelle Schneehöhenkarte SLF	NOAA/AVHRR
E	0.875	0.867	0.869
r ²	0.918	0.916	0.905

In Abbildung 40 ist der beobachtete Abfluss zu betrachten. Dabei erkennt man in den Monaten Januar und Februar starke Abflussschwankungen, die durch das Turbinieren der Wasserkraftwerke entstehen¹. Auf Grund des Abflusses kann gesagt werden, dass ab März die Kraftwerke keinen Strom produzieren. Dies zeigt sich an den geringen täglichen Abflussschwankungen. In dieser Zeit wird jedoch Wasser zurückgehalten, was einen tiefen beobachteten Abfluss zur Folge hat. Dies wiederum bewirkt, dass der simulierte Abfluss über dem beobachteten liegt. Betrachtet man die rote, also die aufdatierte

¹ Daher wurden diese Monate für die Berechnung von E und der Korrelation nicht miteinbezogen. Die Werte beziehen sich folglich nur auf die Monate März und April.

simulierte Kurve, stellt man fest, dass diese von Mitte März bis Ende April mit einem mehr oder weniger konstantem Abstand zur beobachteten Kurve über dieser liegt. Berücksichtigt man, dass Wasser von den Kraftwerken zurückgehalten wird, kann gesagt werden, dass der Abfluss in diesem Bereich entgegen dem NSE mit grosser Wahrscheinlichkeit eine Verbesserung aufweist. Eine Ausnahme ist der letzte Peak der aufdatierten Simulation, welcher in der Beobachtung nicht zu verzeichnen ist. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich wieder darin, dass durch das Update Schnee in tiefe Lagen umverteilt wurde, wo er auf Grund der warmen Temperaturen sofort wieder schmilzt.

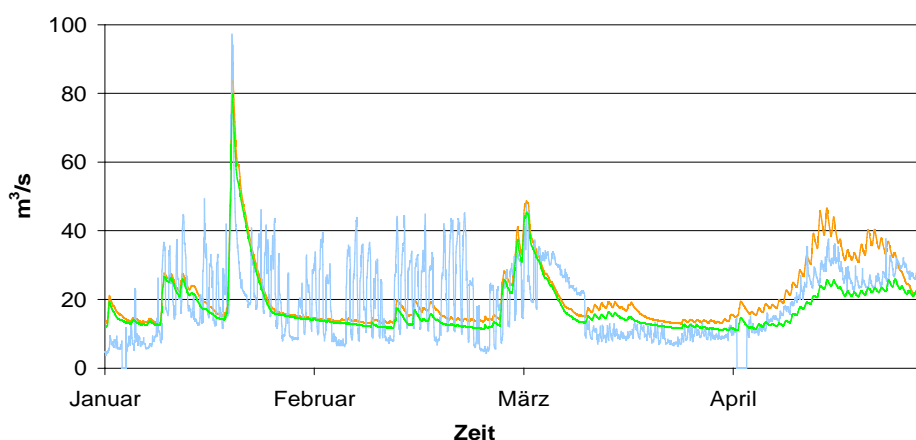


Abbildung 40: Darstellung des Abflusses im Linthtal von Januar bis April 2007. hellblau: Beobachtung; hellgrün: Simulation ohne Update; orange: Simulation mit Update. Aufdatierungsprodukt: NOAA/AVHRR

7.5 SENSITIVITÄTSANALYSE FÜR DAS ALPTAL

Die verschiedenen Modellparameter können das Resultat eines Modells unterschiedlich stark beeinflussen. Um herauszufinden, wie sich Veränderungen eines Parameterwertes auf das Modellergebnis auswirken, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Schwanbeck, 2004).

Eine Sensitivitätsanalyse im Alptal wurde in Bezug auf den Schneekorrekturefaktor PSNOKOR gemacht. Der ursprüngliche, während einer Kalibrierungsphase berechnete PSNOKOR-Wert beträgt -8.3. Bei der Analyse wurde auf die Sensitivität des Schneekorrekturefaktors bei einem Update geachtet. Als Aufdatierungsschneekarten wurden die operationell verfügbare Schneehöhenkarte der Schweiz und die NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte verwendet. Da sich herausstellte, dass die besten Resultate mit Up-

dates während des ganzen Winters erreicht werden, wurde Serie 3 durchgeführt. Zur Überprüfung der Sensitivität wurden jeweils die Werte -16.6, -12.4, -5.8 und 0 für PSNOKOR gewählt (Abbildung 41).

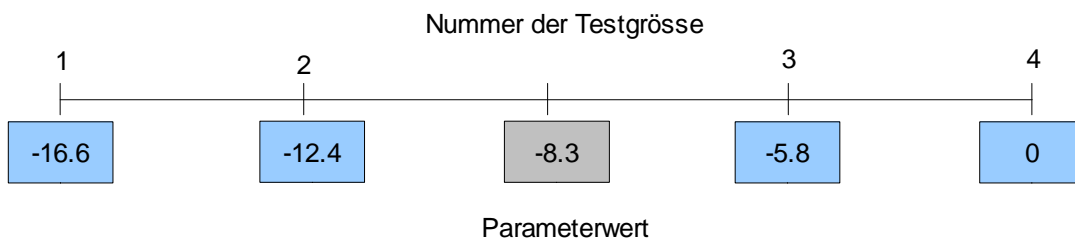


Abbildung 41: Darstellung der verwendeten Parameterwerte für den Schneekorrekturfaktor SNOKOR

Betrachtet man in Abbildung 42 die ACC, stellt man fest, dass PSNOKOR im Bereich zwischen -5.8 und -12.4 sensitiv ist, wenn mit den operationellen Schneehöhenkarten des Schweiz aufdatiert wird. Erfolgt das Update jedoch mit der NOAA/AVHRR Schneemuster-Karte, zeigt sich SNOKOR wenig sensitiv.

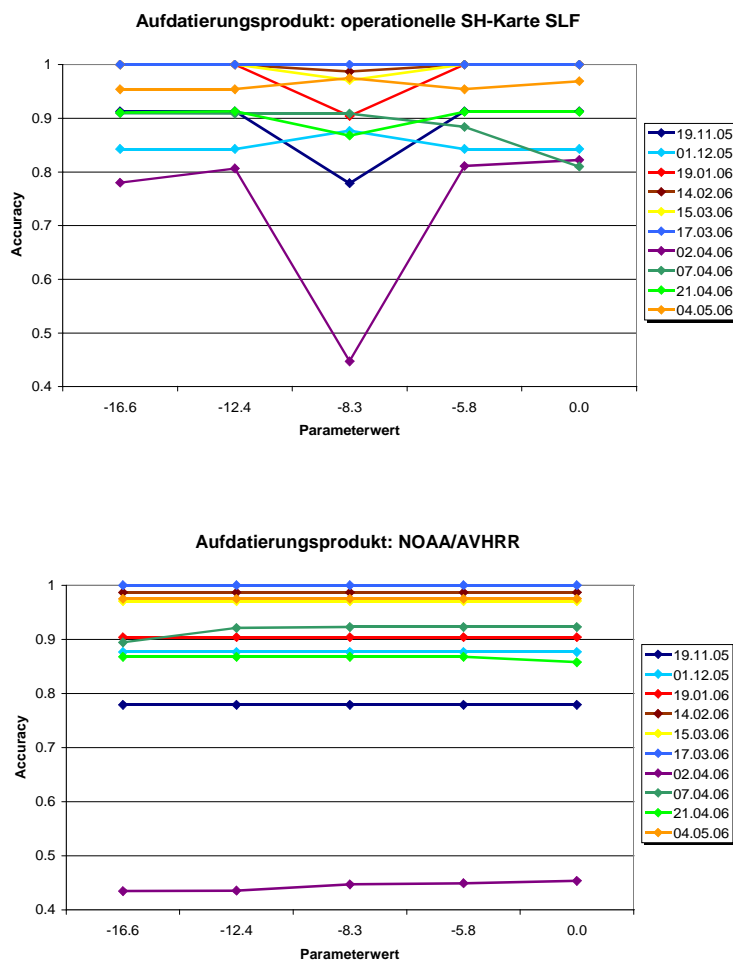


Abbildung 42: Einfluss des veränderten Parameters SNOKOR auf das Schneemuster und somit auf die ACC

Als weiteres wurde der Einfluss des veränderten Parameterwertes auf die Modellierung des SWE untersucht. Abbildung 43 zeigt den Verlauf des SWE für die 5 Parameterwerte nach dem Update mit den operationellen Schneehöhenkarten. Als Vergleich ist ebenfalls die Beobachtung des SWE dargestellt. Die Diagramme zeigen, dass die Veränderung des Parameterwertes eine Verschiebung der SWE-Kurve bewirkt, welche praktisch parallel zur ursprünglichen Kurve verläuft. Ebenfalls zu beobachten ist, dass die Verschiebungen an allen drei Stationen etwa im selben Ausmasse erfolgen. Eine Erhöhung des Parameterwertes bewirkt eine Erhöhung des simulierten SWE bezüglich des ursprünglich aufdatierten simulierten SWE. Eine Veränderung des Parameterwertes weiter ins Negative bewirkt das Gegenteil. Die Veränderung des SWE für alle Testgrößen betragen ungefähr 30 mm bzw. -30 mm. Weiter ist zu sehen, dass für die Station Erlenhöhe die Simulation mit einem Update am besten mit einem PSNOKOR von Null an die Beobachtung herankommt. Ebenfalls für die Station Lümpepenen gilt diese Beobachtung. Allerdings liegt dort die Simulation immer noch unter der Beobachtung. Für die Station Vogelbach ist es hingegen der PSNOKOR von -16.6.

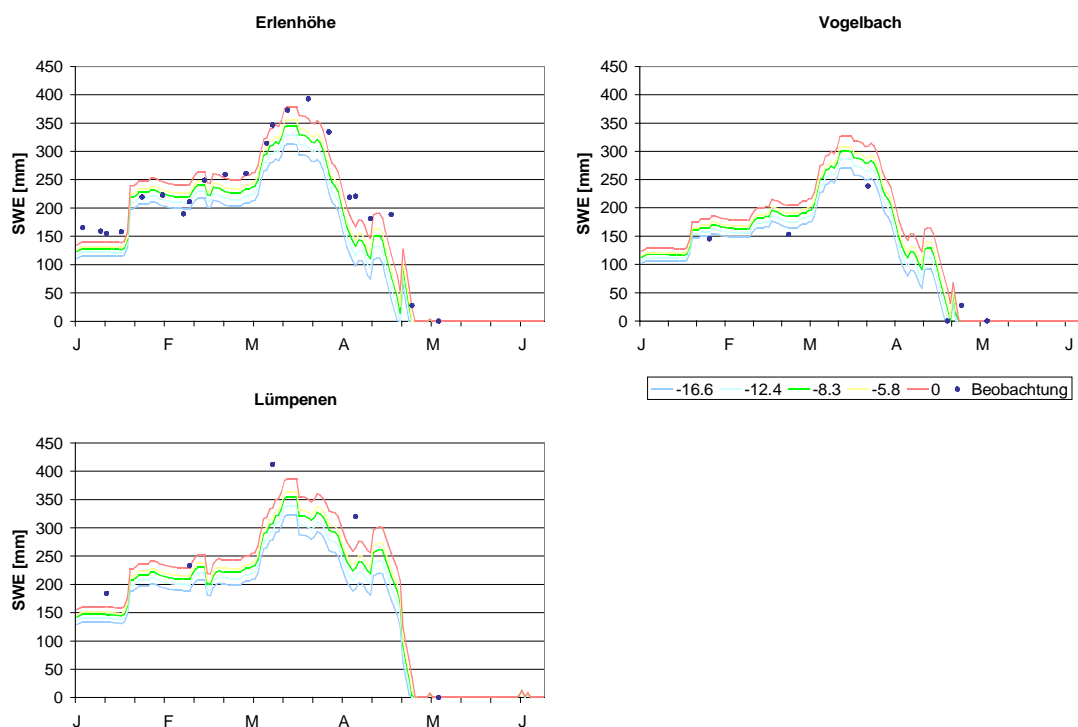


Abbildung 43: Darstellung des aufdatierten modellierten SWE und des beobachteten SWE nach der Sensitivitätsanalyse. Aufdatierungsprodukt: operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz.

Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass der Parameter PSNOKOR je nach Aufdatierungsprodukt sehr sensibel reagiert und somit Einfluss auf die Modellierungsergebnisse hat.

7.6 GEÄNDERTE PARAMETER FÜR DAS ENGADIN

Eine Kalibrierung gegenüber dem Abfluss für das gesamte Einzugsgebiet Engadin ist nicht möglich. Daher wurden die Parameterwerte für das gesamte Gebiet auf Grund von Erfahrungswerten geschätzt. Es ist jedoch möglich, kleinere Einzugsgebiete, welche im Gebiet Engadin liegen zu kalibrieren und die erhaltenen Parameter anschliessend auf das gesamte Einzugsgebiet zu verwenden. Die Kalibrierung lokaler Parameter im Engadin wurde im Laufe meiner Arbeit von Molnar & Zappa (2007) durchgeführt. In Tabelle 8 sind die durch die Kalibrierung erhaltenen Parameterwerte aufgeführt. Dabei handelt es sich um die Parameter für die Schneeschmelze (Gleichung 2): Der Temperaturschwellenwert für den Schneeschmelzbeginn (T_0), der minimalen und maximalen Schmelzfaktor (TMF_{EMA}) und der Strahlungskoeffizient RMF_{EMA} .

Tabelle 8: Parameterwerte für die Berechnung der Schneeschmelze für das Engadin.

Parameter	nicht kalibriert	kalibriert
T_0	0.5	0.3
TMF_{EMA}	minimal	1.5
	maximal	3
RMF_{EMA}	0.00025	0.00010

In diesem kleinen Kapitel möchte ich nun kurz darstellen, was passiert, wenn wir die Simulationen mit den neu berechneten Parameterwerten durchführen.

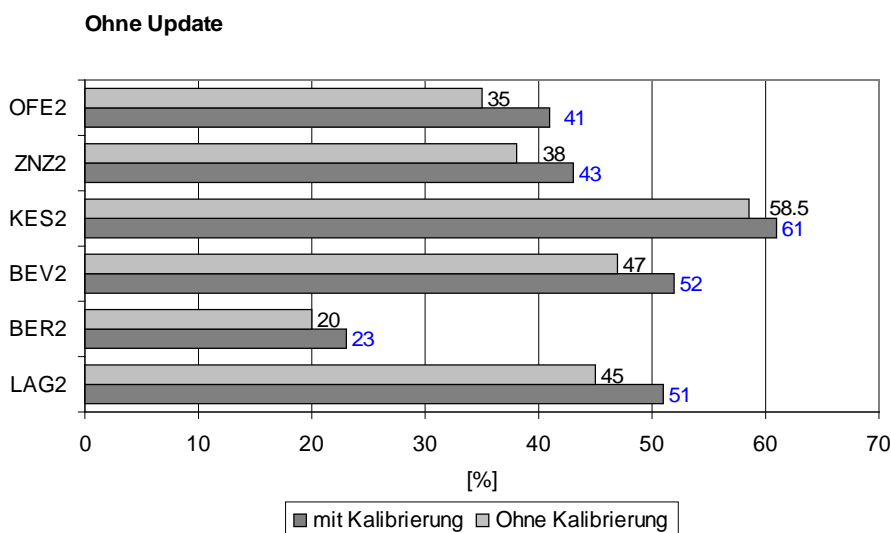


Abbildung 44: Durchschnittlich simuliertes SWE für das Engadin in % des beobachteten SWE mit und ohne Kalibrierung. Kein Update.

Durch die neuen Parameterwerte haben wir eine geringere Schneeschmelze, was bewirkt, dass der Schnee bei derselben Temperatur länger liegen bleibt als mit den nicht kalibrierten Werten.

Führt man wieder einen punktuellen Vergleich durch, stellt man fest, dass das durchschnittliche simulierte SWE über den Zeitraum vom 1. Januar 2006 bis 31. Juli 2006 höher ist als zuvor. Werte von ursprünglich 20% – 58.5% können auf 23% – 61% gesteigert werden (Abbildung 44). Nach einem Update, in diesem Falle mit der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz, zeigt sich dasselbe Bild. Werte von ursprünglich 25% – 59% haben sich auf Werte von 31% – 64% verbessert (Abbildung 45).

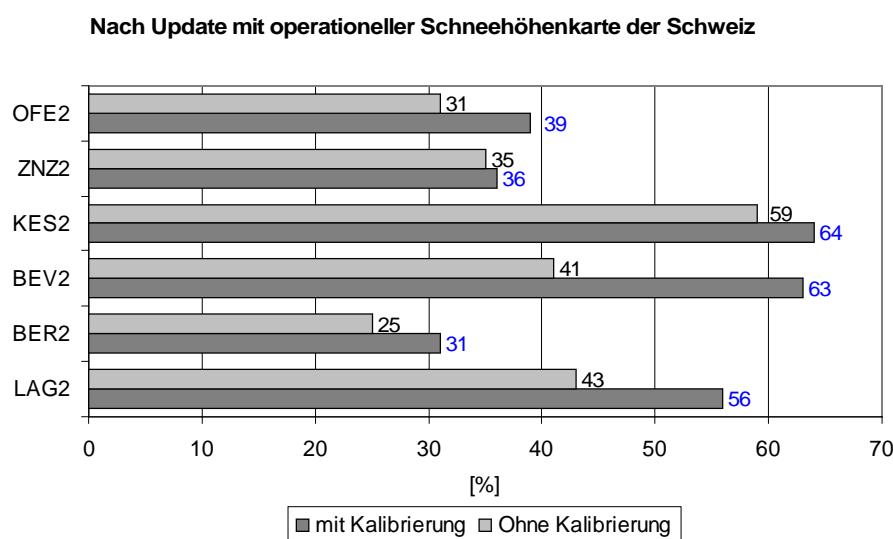


Abbildung 45: Durchschnittlich simuliertes SWE für das Engadin in % des beobachteten SWE mit und ohne Kalibrierung. Update mit operationeller Schneehöhenkarte der Schweiz.

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen, dass durch die neu eingeführten Parameter, mehr Schnee im System vorhanden ist und somit die Simulation des SWE allgemein höher ausfällt. Dies bestätigt auch der Vergleich des Schneemusters zwischen dem Modell und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz (Abbildung 46).

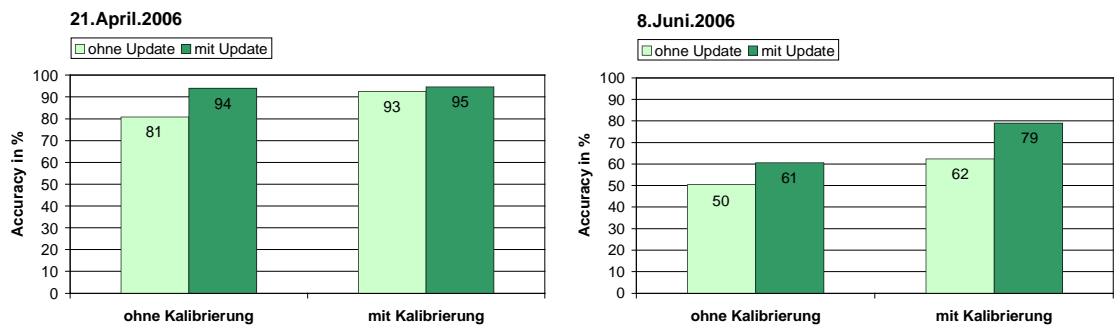


Abbildung 46: Vergleich des Schneemusters im Engadin zwischen PREVAH und der operationellen Schneehöhenkarte der Schweiz mit und ohne Kalibrierung.

Durch die verminderte Schneeschmelze stimmt das mit den kalibrierten Parameterwerten simulierte Schneemuster besser mit der Beobachtung überein, als die Simulation ohne kalibrierte Parameter, ist aber immer noch zu tief.

8 DISKUSSION UND AUSBLICK

8.1 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

In der Einleitung der vorliegenden Diplomarbeit habe ich mir vier Fragen gestellt, die während meine Arbeit beantwortet werden sollten. In diesem Kapitel möchte ich daher diese Fragen wieder aufnehmen und diskutieren.

- (1) Wie gut stimmen die Simulationen des Schneemusters für die drei Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichen Schneehöhenkarten und NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten überein?

Andere Studien (Zappa, 2002; Garen & Marks, 2005; Foppa et al., eingereicht Nov. 2006) haben ergeben, dass generell eine gute Übereinstimmung zwischen Schneemuster-Karten, die mit zwei unterschiedlichen Methoden berechnet wurden, herrscht. Zappa (2002) zeigte für das Jahr 1984, dass PREVAH in der Lage ist, Schnee für die gesamte Schweiz in 80% der Fälle richtig zu simulieren. Dabei erfolgte der Vergleich ebenfalls mit NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten.

In Kapitel 7.2 konnte gezeigt werden, dass die Übereinstimmung der simulierten Schneedecke mit den drei Schneeprodukten für die drei Untersuchungsgebiete im Allgemeinen relativ gut ist. Betrachtet man die Aufdatierungsprodukte im Einzelnen, ist die ACC gegenüber den NOAA/AVHRR Schneemuster-Karten etwas tiefer als gegenüber den operationellen Schneehöhenkarten der Schweiz und den regionalen Schneehöhenkarten. Dabei liegt die Problemzone gegenüber allen drei Aufdatierungsprodukten beim Übergang von schneebedecktem zu schneefreiem Gebiet. Das Modell tendiert in diesen Gebieten dazu, zu wenig Schnee zu simulieren. Die Unstimmigkeit zwischen PREVAH und den Schneemuster-Produkten kann verschiedene Ursachen haben. Generell besteht die Möglichkeit von inhärenten Fehlern in der Berechnung des Schneemusters entweder im Modell oder im Vergleichsprodukt (Foppa et al., eingereicht Nov. 2006). Die Gründe für fehlerhafte Berechnungen durch PREVAH sind beispielsweise Fehlschätzungen des Niederschlages, Unsicherheiten in der Bestimmung der lokalen Lufttemperatur oder der Wahl der freien Parameter (Zappa, 2002). Eine Überschätzung des Schnees an windexponierten und/oder steilen Abhängen kann seine Ursache auch in der fehlenden Parameterisierung der Schneedrift-Prozesse (z.B. Blöschl et al., 2002) in PREVAH haben.

Fehler in der vom NOAA/AVHRR Sensor abgeleiteten Schneedeckenklassifikation sind meist technischen Ursprungs. So werden sie bestimmt durch technische Einschränkun-

gen des Sensors, aber auch durch die Eigenschaften der alpinen und voralpinen Zone, sowie durch die Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie. In der voralpinen Zone spielt vor allem der Wald eine grosse Rolle (Foppa et al., eingereicht Nov. 2006). Gerade im Frühling, wenn die Schneegrenze in bewaldete Gebiete fällt, verursacht der Beschattungseffekt Absenz von Schnee in diesen Gebieten (Foppa et al. eingereicht Nov. 2006).

- (2) Als nächstes stellte sich die Frage, wie gut die Simulation des Schneewasseräquivalents (SWE) und des Abflusses mit der Beobachtung übereinstimmt.

Betrachtete man das SWE, muss man feststellen, dass die Übereinstimmung schlecht ist. Dies gilt vor allem für das Linthtal und Engadin, wo das über eine bestimmte Zeitperiode gemittelte simulierte SWE in den seltensten Fällen über 50% des beobachteten SWE beträgt. Die schlechtesten Resultate zeigen sich im Frühling. PREVAH tendiert dazu, zu früh auszuapern. Dies gilt für beide Winter. Die Ergebnisse im Alptal sind besser.

Das Problem hierfür könnte, wie in Kapitel 7.1 beschrieben wurde, das unterschiedliche Zustandekommen der beobachteten und simulierten Werte sein. Das SWE wird über eine gesamte HRU berechnet, die Messung erfolgt nur an einem Punkt. Zudem haben die Messung und die HRU nicht dieselbe Exposition und Neigung und somit nicht dieselbe Sonneneinstrahlung. Eine weitere mögliche Erklärung ist eine unzureichende Modelleichung. In Kapitel 7.6 konnte gezeigt werden, dass durch die Änderung der Parameter, welche für die Schneeschmelze verantwortlich sind, die Schneemenge im System erhöht werden kann. Ein anderes Problem ist die in Kapitel 8.2 angesprochen Repräsentativität der Inputvariablen für das Modell.

Die Resultate des Abflusses ergaben für das Alptal mit einem Gütekoeffizienten E von über 80% zufriedenstellende Resultate. Das Resultat für das Linthtal ist weniger erfreulich. In diesem Gebiet wurde nur eine Güte von 60% erreicht. Der Grund dafür ist die Beeinflussung der Wasserkraftwerke auf den Abfluss im Linthtal. Während der Schneeschmelze werden in zwei Rückhaltebecken grosse Mengen an Wasser durch die Kraftwerke zurückgehalten. Dies hat zur Folge, dass der beobachtete Abfluss tiefer ist als der simulierte, was nicht unbedingt der Realität entsprechen muss.

Die teils erfreulichen, teils weniger erfreulichen Resultate führen dazu, die nächsten zwei Fragen zu beantworten.

(3,4) Kann die Güte der Berechnungen durch die Assimilation der Schneeprodukte verbessert werden und wenn ja, welches ist das geeignetste Produkt?

Sowohl die punktuelle Betrachtung des SWE, als auch die Betrachtung des Abflusses, sowie des Schneemusters haben ergeben, dass durch die in dieser Diplomarbeit verwendete Assimilationsmethode zwar Verbesserungen erzielt werden können, diese jedoch klein und unberechenbar sind. Unberechenbar in dem Sinne, dass Verbesserungen und Verschlechterungen entstehen, ohne dass sich irgend eine Systematik dahinter zeigt.

Die integrale Betrachtung zeigt im Frühling zeitweise sehr hohe simulierte Abflüsse. Der Grund dafür liegt möglicherweise im Aufdatierungsalgorithmus, welcher den Schnee im System umverteilt. Eine geringe Schneemenge auf ein kleines Gebiet konzentriert, wird durch das Aufdatieren auf ein grosses Gebiet verteilt. Dies hat eine geringere Schneemenge pro Zelle zur Folge. Wird nun an warmen Tagen aufdatiert, wird diese zu dünne Schneedecke auf Grund der erhöhten Schneeschmelze sowohl in hohen als auch in tiefen Lagen gänzlich weggeschmolzen. Dieser Effekt ist durch die erhöhte Anzahl der 'miss'-Pixel zu beobachten. Wäre genügend Schnee im System, wäre pro Zelle eine grössere Schneemenge zu verzeichnen und die Schmelze würde nicht ausreichen, diesen Schnee vollständig wegzuschmelzen. Die Verfrachtung von Schnee in tiefere Lagen führt zudem zu einem erhöhten simulierten Abfluss. Der Grund ist wiederum die suboptimale Eichung der Parameter für die Schneeschmelze, was sich in einer für die herrschenden Temperaturen zu hohen Schneeschmelze auswirkt.

Bei der Analyse des Schneemusters fällt auf, dass durch das Aufdatieren die 'misses' grösstenteils eliminiert wurden, die 'false alarms' jedoch tendenziell zunehmen. Diese entstehen beim Aufdatieren durch das Setzen eines Schwellenwertes, der die Grenze von Schnee zu aper bestimmt. So ist es möglich, dass durch die Aggregation der einzelnen Pixel zu HRUs Mittelwerte entstehen, welche knapp über dem Schwellenwert liegen und somit nicht auf Null gesetzt werden. Alle Pixel in dieser HRU, welche nun aber schneefrei wären, werden als 'false alarm' taxiert.

Bei den Auswertungen hat sich keine Schneehöhen- bzw. Schneemuster-Karte als besonders geeignet herausgestellt. Dies liegt aber vorwiegend nicht an den Produkten, sondern an der angewendeten Aufdatierungsmethode oder am Modell selber. Die Verwendung der Regionalen Schneehöhenkarten ist jedoch problematisch, da für die Interpolation der Schneehöhen zu wenige Messtationen vorhanden sind.

8.2 SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

Mit dem hydrologischen Modell PREVAH ist es zwar möglich, relativ gute Ergebnisse zu erzielen, um verlässliche Voraussagen zu machen, ist es jedoch nützlich, das Modell zu verbessern.

Wie der vorliegenden Diplomarbeit zu entnehmen ist, hat die hier vorgeschlagene Aufdatierungsmethode keine Verbesserung der Schnee- und Abflussmodellierung mit PREVAH ergeben. Es haben sich folgende Kernpunkte herausgestellt, welche einen Einfluss auf die Güte der Modellierungsergebnisse haben und bei einem derartigen Aufdatierungsversuch mit Schneehöhen- und Schneemuster-Karten unbedingt beachtet werden sollten:

➔ **Repräsentativität der Aufdatierungsprodukte**

Ob Satellitenbilder, operationell hergestellte Schneehöhenkarten oder eigens interpolierte regionale Schneehöhenkarten, all dies sind modellierte Produkte und entsprechen nicht 100% der Realität. Unstimmigkeiten müssen folglich nicht zwingend auf das Modell zurückzuführen sein.

➔ **Repräsentativität der automatisch gemessenen Meteo-Daten**

Da es sich hier um eine operationelle Modellierung handelt, muss auch mit operationell zur Verfügung stehenden Daten gearbeitet werden. Im Winter sind auf Grund der tiefen Temperaturen viele Ausfälle der unbeheizten IMIS-Stationen zu verzeichnen, was die Qualität der Inputvariablen verkleinert. Der Ausfall der IMIS-Stationen, welche sich in höheren Lagen befinden als die restlichen Meteo-Stationen der MeteoSchweiz, verursacht einen Datenverlust in hoch gelegenen schneereichen Gebieten. Dies wiederum kann zu sehr tiefen simulierten Schneewasseräquivalentwerten, wie dies in dieser Diplomarbeit festgestellt wurde, führen.

➔ **Aufdatierungszeitpunkt**

Wird eine Aufdatierungsmethode angewendet, welche auf dem Prinzip der Umverteilung des im System vorhandenen Schnees beruht, wie dies in dieser Arbeit der Fall war, sollte unbedingt der Aufdatierungszeitpunkt berücksichtigt werden. So führt das Aufdatieren an warmen Tagen zu überhöhten Abflusswerten, wenn Schnee in tiefe Lagen umverteilt wurde.

➡ Einzugsgebiet

Eine grosse anthropogene Beeinflussung des hydrologischen Einzugsgebiet erschwert eine zufriedenstellende Kalibrierung des Modells. Bei kleineren Einzugsgebieten stellt sich das Problem der Auflösung der Schneekarten, welche mit einem 1 km beispielsweise ein zu grosses Maschennetz aufweist.

Aus diesen Gründen möchte ich im folgenden einige weitere Methoden vorschlagen, welche zur Verbesserung des Modells beitragen könnten. Wie die Literatur zeigt, haben sich bereits viele Forscher um das Aufdatieren von hydrologischen Modellen gekümmert. Dabei ist ein eindeutiger Trend hin zur Verwendung von satellitengestützten Schneemuster-Karten zu sehen. In Kapitel 1.3.2 wurden bereits einige Beispiele zur Aufdatierung von hydrologischen Modellen genannt. Ein weiteres Beispiel ist die in der vorliegenden Diplomarbeit vorgeschlagene Methode, welche jedoch nicht zu den erhofften Verbesserungen geführt hat. Daher scheint es mir sinnvoll, an dieser Stelle nochmals auf die verschiedenen Aufdatierungsmöglichkeiten einzugehen und ihre Vor- und Nachteile zur Anwendung für PREVAH aufzuzeigen.

Das Hauptproblem von PREVAH ist, dass zu wenig Schnee im System vorhanden ist. Dieser Effekt tritt hauptsächlich im Linthtal und Engadin auf. Hier stellt sich die Frage, ob das Modell genügend kalibriert ist. Das Modell ist für diese Gebiete in Bezug auf den Abfluss kalibriert, allerdings ist dies nicht ganz einfach, da die Beeinflussung von Wasserkraftwerken eine zentrale Rolle spielt. Engeset et al. (2003) schlagen daher die Kalibrierung nicht nur gegenüber dem Abfluss vor, sondern auch gegenüber des Schneemusters. Damit können sie eine verbesserte Modelleistung im Bezug auf die Simulation des Schneemusters erzielen, ohne dass die Qualität des Abflusses abnimmt. Eine Möglichkeit wäre folglich PREVAH für diese Einzugsgebiete nochmals zu kalibrieren und dabei das Schneemuster ebenfalls zu berücksichtigen.

Ein weiterer Weg der Neukalibrierung hat sich in Kapitel 7.6 gezeigt. Die Eichung von mehreren kleineren unbeeinflussten Teileinzugsgebieten und anschliessend eine Übertragung der lokalen Parameter auf das gesamte Gebiet führt insgesamt zu besseren Resultaten.

Ein weiterer Grund für die Schneeknappheit im System ist, neben der möglicherweise unzureichenden Kalibrierung, die limitierte Leistung der automatischen Niederschlagsmesser im Winter. Eine Möglichkeit, dieses Problem in den Griff zu bekommen, ist die

Korrektur der Niederschlags- und Temperaturdaten. Engeset et al. (2003) schlagen neben ihrer Kalibrierungsmethode zusätzlich Aufdatierungsmethoden in dieser Art vor, um die Modelleistung zu erhöhen. Dabei vergleichen sie die simulierte mit der beobachteten Schneedeckenverteilung. Stimmen die beiden Datensätze nicht überein, wird die Temperatur und der Niederschlag so angepasst, dass die Diskrepanz minimiert werden kann. Ähnliches schlagen Udnaes et al. (2004) vor (siehe auch Kapitel 1.3.2) indem sie eine prozentuale Änderung des Winterniederschlages oder die Temperatur während der Schneeschmelzsaison modifizieren.

Der einfachste und vielversprechendste Weg für eine verbesserte Modelleistung durch ein Update wäre das Ersetzen des SWE durch beobachtete SWE Werte. Dafür werden jedoch SWE-Karten gebraucht, welche für das Gebiet der Schweiz nicht zur Verfügung stehen. Pulliainen und Hallikainen (2001) beispielsweise zeigen aber, dass es mit passiver Mikrowellenfernerkundung möglich ist, das SWE räumlich zu berechnen.

Ein weiteres Erfolg bringendes Vorgehen wäre möglicherweise die Anwendung des Kalman Filters (Kalman, 1960). Der Kalman Filter ist ein Set von mathematischen rekursiven Gleichungen, welche als Hilfsmittel für das Schätzen eines Prozesszustandes oder Parameters dienen. Dabei wird mit Beobachtungen, welche beispielsweise aus Satellitendaten stammen, der mittlere quadratische Fehler der Schätzung minimiert. Der Filter unterstützt Schätzungen in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft und sogar, wenn die genaue Natur des Modellsystems nicht bekannt ist (Welch und Bishop, 2006). Dies gilt für lineare Modelle. Bei nicht linearen Modellen, kommt der Extended Kalman Filter (EKF) zum Zuge. Dieser datiert Modellzustände auf wann immer eine Beobachtung verfügbar ist und berücksichtigt zugleich Fehler in der Modelldynamik und der Beobachtung (Walker et al., 2001). Bei nicht linearen Modellen, wie bei PREVAH, ist die Anwendung dieses Filters jedoch hoch komplex (Wöhling et al. 2006). Dennoch ist es Clark et al. (2006) gelungen, ein hydrologisches Modell mit dem Ensemble Kalman Filter (EnKF) aufzudatieren und somit die Abflussgüte zu verbessern. Der EnKF läuft grundsätzlich gleich wie der EKF. Der Hauptunterschied liegt darin, dass der EnKF für einen gesamten Modellzustand das Monte Carlo Sampling benutzt, um den Fehler zu schätzen, während der EKF den Fehler durch eine dynamische Gleichung berechnet (Andreadis et al., 2006). Mit dem Kalman Filter ist es nicht nur Clark et al. (2006) sondern auch Andreadis et al. (2006) gelungen, ein hydrologisches Modell aufzudatieren und zu verbessern.

Auch wenn die in dieser Diplomarbeit vorgeschlagene Assimilierungsmethode nicht zum gewünschtem Erfolg führte, konnten dennoch massgebende Erkenntnisse gewonnen werden. Die gründliche Validierung der Schneemodellierung hat wichtige Schwächen des Modells aufgedeckt, welche schliesslich auch zum Misslingen der Assimilierungsmethode geführt haben. Abschliessend hoffe ich, mit meinen Empfehlungen für alternative Methoden nützliche Denkanstösse für weiterführende Arbeiten geben haben zu können, die zur weiteren Verbesserung von PREVAH beitragen werden.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- Abbott M.B. et al. (1986):** An introduction to the European System: Systeme Hydrologique Europeen (SHE), In: Journal of Hydrology, 87: S. 61-77.
- Adams J.B., Smith M.O., Johnson P.E. (1986):** Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. In: Journal of Geophysical Research, 91, S. 8098–8112.
- Alfnes E., Udnaes H.-Chr., Andreassen L. M. (2004):** Satellite-observed snow covered area and spring flood prediction in the HBV-model. Paper submitted to the XXIII Nordic Hydrological Conference and UNESCO IHP joint session "Fresh Water Resources Management". Tallin.
- Anderton S.P., White S.M., Alvera B. (2004):** Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment. In: Hydrological Processes, 18, S. 435–453.
- Andreadis K.M. & Lettenmaier D.P. (2006):** Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. In: Advances in Water Resources, 29, S. 872–886.
- Badoux A. (1999):** Untersuchung zur flächendifferenzierten Modellierung von Abfluss und Schmelze in teilvergletscherten Einzugsgebieten. Diplomarbeit am Institut für Atmosphäre und Klima der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ).
- BAFU (2005):** Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz. Bundesamt für Umwelt. Ittigen.
- Bahrenberg G., Giese E., Nipper J. (1999):** Statistische Methoden in der Geographie. Band 1: Univariate und bivariate Statistik. B. G. Teubner Verlag. Leipzig.
- Barrett A.P. (zur Veröffentlichung eingereicht):** Integrating remotely sensed snow cover with a distributed hydrologic model. In: Hydrological Processes
- Bergström S. (1992):** The HBV model - it's structure and applications. SMHI Hydrology. RH Nr. 4, Norrköping.
- Beven K.J. (1989):** Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. In: Journal of Hydrology, 105, S. 157–172.
- Beven, K.J. et al. (1995):** TOPMODEL In: Singh V.J. (Hrsg.). Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Beven, K.J. (2001):** How far can we go in distributed hydrological modelling? In: Hydrology and Earth System Sciences, 5, 1, S. 1–12.
- Beven K.J. (2003):** Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK.
- BfLT (1991):** Digitales Geländemodell RIMINI. Bundesamt für Landestopographie. Wabern.
- BfLT:** Digitale Übersichtskarte der Schweiz. Bundesamt für Landestopographie. Wabern.
- BfR (1980):** Bodeneignungskarte der Schweiz. Grundlagen für die Raumplanung. Bundesamt für Raumplanung. Bern.
- BfS:** CORINE Land Cover. Bundesamt für Statistik. Neuchâtel.
- BfS (1992/97):** Die Bodennutzung der Schweiz. Arealstatistik. Bundesamt für Statistik. Neuchâtel.
- Blöschl, G. (2001):** Scaling in Hydrology. In: Hydrological Processes, 15, S. 709 – 711.
- Blöschl G., Kirnbauer R. Gutknecht D. (1991):** Distributed snowmelt simulations in an alpine catchment: 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. In: Water Resources Research, 27, S. 3171–3179.

- Blöschl G., Kirnbauer R., Jansa J., Kraus K., Kusching G., Gutknecht D., Reszler Ch. (2002):** Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Schneemodells. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 54, 1/2, S. 1–16.
- Braun L., Brun E., Durand Y., Martin E. (1994):** Simulation of discharge using different methods of meteorological data distribution, basin discretization and snow modelling. In: Nordic Hydrology, 25, S. 129–144.
- Bremicker M. (1999):** Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Version 9/99 – Modellgrundlagen und Programmumgebung. Karlsruhe.
- Burkhardt U. J. (1991):** Simulation und Prognose des Schmelzwasserabflusses sowie Bestimmung des regionalen Schneewasseräquivalents unter Zuhilfenahme von Satellitenbilddaten. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Zürich, Abteilung für Fernerkundung.
- Clark M.P., Slater A.G. Barrett A.P. Hay L.E. McCabe G.J. Rajagopalan B. Leavesley G.H. (2006):** Assimilation of snow covered area information into hydrologic and land-surface models. In: Advances in Water Resources, 29, S. 1209–1221.
- DVWK (1996):** Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 238.
- Dyck S. & Peschke G. (1995):** Grundlagen der Hydrologie. 3. Aufl. Verlag für Bauwesen. Berlin.
- Engeset R.V., Udnaes H.-Chr., Guneriussen T., Koren H., Malnes E., Solberg R., Alfnes E. (2003):** Improving runoff simulations using satellite-observed time-series of snow covered area. In: Nordic Hydrology, 34, 4, S. 281–294.
- Essery R. & Yang Z.L. (2001):** An overview of models participating in the Snow Model. Intercomparison Project (SnowMIP). Proceedings of the SnowMIP workshop, 11 July 2001, 8th Scientific Assembly of IAMAS, Innsbruck.
- Foppa N., Wunderle S., Hauser A., Oesch D., Kuchen F. (2004):** Operational sub-pixel snow mapping over the Alps with NOAA AVHRR data. In: Annals of Glaciology, 38, S. 245–252.
- Foppa N., Stoffel A., Meister R. (2005):** Snow depth mapping in the Alps: Merging of in situ and remotely-sensed data. In: EARSeL eProceedings 4, 1, S. 119–129.
- Foppa N., Stähli M., Cunningham C., Zappa M., Gustafsson D., Lehning M. (zur Veröffentlichung eingereicht im November 2006):** A comparison of satellite-derived and modelled snow cover extent within alpine and subalpine zone of the Swiss Alps.
- Foppa N., Stoffel A., Meister R. (2007):** Synergy of in situ and space borne observation for snow depth mapping in the Swiss Alps. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9, S. 294–310.
- Garen D. & Marks D. (2001):** Spatial fields of meteorological input data including forest canopy corrections for an energy budget snow simulation model: In: Dolman A.J., Hall, A.J., Kavvas M.L., Oki T. and Pomeroy, J.W. (Hrsg.). Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large Scale Hydrological Models, S. 349–353.
- Garen D. & Marks D. (2005):** Spatially distributed energy balance snowmelt modelling in a mountainous river basin: estimation of meteorological inputs and verification of model results. In: Journal of Hydrology, 315, S. 126–153.
- Grayson R. & Blöschl G. (2000):** Spatial patterns in catchment hydrology. Observations and modelling. University Press. Cambridge, UK.
- Gurtz J. & Zappa M. (2004):** Application training on hydrological models. Online verfügbar unter: http://www.wsl.ch/hazards/prevah/pdf/prevah_modelling_system.pdf.
- Gurtz J., Baltensweiler A., Lang H. (1999):** Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. In: Hydrological Processes, 13, S. 2751–2768.

- Gurtz J., Zappa M., Jasper K., Lang H., Verbunt M., Badoux A., Vitvar T. (2003):** A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. In: *Hydrological Processes*, 17, S. 297–311.
- Hegg Ch., Badoux A. et al. (2000):** Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1999. In: *Wasser Energie Luft*, 92, 3/4, S. 59–68.
- Hock R. (1998):** A distributed temperature index ice and snow melt model including potential direct solar radiation. In: *Zürcher Geographische Schriften*, ETH Zürich, 70, S. 59–75.
- Kalman R.E. (1960):** A new approach to linear filtering and prediction problems. In: *Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D), ISSN 0021-9223, S. 35–45.
- Klok E.J., Jasper K., Roelofsma K.P., Badoux A., Gurtz J. (2001):** Distributed hydrological modelling of a glaciated Alpine river basin. In: *Hydrological Sciences Journal*, 46, S. 553–570.
- Krause P., Boyle D.P., Bäse F. (2005):** Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: *Advances in Geosciences*, 5, S. 89–97.
- Leavesley G.H. & Stannard L.G. (1995):** The precipitation-runoff modelling system. In: V.J. Singh (Hrsg.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, S. 281 – 310.
- Legates D.R. & McCabe Jr. (1999):** Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. In: *Water Resources Research*, 35,1, S. 233–241.
- Lehning M., Bartelt P., Brown R.L., Russi T., Stöckli U., Zimmerli M. (1999):** Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a snow network of weather and snow stations. In: *Cold Regions Science and Technology*, 30, S. 145–157.
- Lehning M., Völksch I., Gustafsson D., Nguyen T.A., Stähli M und Zappa M. (2006):** ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. In: *Hydrological Processes*, 20.
- Luterbacher J., Liniger M., Menzel A., Estrella N., Della-Marta P.M., Pfister Chr., Ruthishauser T., Xoplaxi E. (2007):** Exceptional European warmth of autumn 2006 and winter 2007: Historical context, the underlying dynamics, and its phenological impacts. In: *Geophysical Research Letters*, 34, LI2704.
- Marks D. et al. (1999):** A spatially distributed energy balance snowmelt model for application in mountain basins. In: *Hydrological Processes*, 13, S. 1935 – 1959.
- MeteoSchweiz (2005 - 2007):** Messdaten verschiedener Stationen. Bundesamt für Meteorologie und Klima. Zürich.
- MeteoSchweiz (2006/07):** Monatsflash der Witterung. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Zürich.
- Molnar L. & Zappa M. (2007):** Towards a better understanding of Swiss mountain hydrology: a regional analysis using PREVAH. In: *Geophysical Research Abstracts*, 9, 03331. European Geoscience Union EGU, April 2007, Wien.
- Monteith J.L. (1975):** *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. 1: Principles, Academic Press INC., London, UK.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970):** River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. In: *Journal of Hydrology*, 10, 3, S. 282–290.
- Ohmura, A. (2001):** Physical basis for the temperature-based melt-index method. In: *Journal of Applied Meteorology*, 40, S. 753–761.
- Penman H.L. (1963):** *Vegetation and Hydrology*, Technical Communication No. 53. Commonwealth Agricultural Bureaux, Lampport Gilbert & Co. Ltd., Reading, UK.
- Perl M. (2002):** Verdunstungsmodellierung für die Schweiz. Regionale Auswertung und Validierung. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.

- Pulliainen J. (2006):** Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. In: *Remote Sensing of Environment*, 101, S. 257–269.
- Pulliainen J. & Hallikainen M. (2001):** Retrieval of regional snow water equivalent from space-borne passive microwave observations. In: *Remote Sensing of Environment*, 75, S. 76–85.
- Rohmann M. & Menzel L. (1999):** Räumliche Interpolation von Niederschlag, Lufttemperatur und Verdunstung. Grundlagen und Methoden. Berichte und Schriften Nr. 67. Geographisches Institut ETH Zürich
- Rykiel E.J. (1996):** Testing ecological models: The meaning of validation. In: *Ecological Modeling*, 90, S. 229–244.
- Schulla J. (1997):** Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. In: *Zürcher Geographische Schriften*, ETH Zürich, 69.
- Schwanbeck J. (2004):** Flächendifferenzierte Modellierung von Teileinzugsgebieten der Aare. Berechnung der Abflussganglinien und des Wasserhaushalts mit PREVAH. Diplomarbeit an der Universität Rostock, Institut für Kulturtechnik und Siedlungswasserwirtschaft. Deutschland.
- Schwarze R., Droege W., Opherden K. (1997):** Regional Analysis and modelling of groundwater runoff components from small catchments in solid rock areas. Intern. Confer. on „Regionalisation in Hydrology“, Braunschweig, 10-14 March 1997.
- Singh V.P. (1995):** Computer models of watershed hydrology. Water Ressource Publications.
- Sonderegger Ch. (2004):** Rainfall/Runoff modelling of a sub-catchment of the Yangtze in China. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.
- Stoffel A., Foppa N., Raderschall N. (2006):** Mapping snow depth in the Alps. In: *ISSW Proceedings*, Telluride, CO, USA.
- Strasser U. & Mauser W (2001):** Modelling the spatial and temporal variations of the water balance for the Weser catchment 1965 - 1994. In: *Journal of Hydrology*, 254, S. 199–214.
- Udnaes H.-Chr. & Alfnes E. (2005):** Real time demonstration of satellite-observed snow covered area in the HBV-model. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Hydrology Departement. Oslo.
- Walker J.P. & Houser P.R. (2001):** A methodology for initializing soil moisture in a global climate model: assimilation of near-surface soil moisture observations. In: *Journal of Geophysical Research*, 106, S. 11761–11774.
- Welch G. & Bishop G. (2006):** An introduction to the Kalman filter. TR 95-041, University of North Carolina, Department of Computer Science.
- Wendling U. (1975):** Zur Messung und Schätzung der potentiellen Verdunstung. In: *Zeitschrift für Meteorologie*, 25, S. 103 – 111.
- Wöhling Th., Lennartz F., Zappa M. (2006):** Technical Note: Real-time updating procedure for flood forecasting with conceptual HBV-type models. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, S. 925–940.
- Zappa M. (2002):** Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ).
- Zappa M., Pos F., Strasser U., Warmerdam P., Gurtz J. (2003):** Seasonal water balance of an alpine catchment as evaluated by different methods for spatially distributed snowmelt modelling. In: *Nordic Hydrology*, 34, S. 179–202.
- Zappa M. (2007):** Objective quantitative spatial verification of distributed snow cover simulations - an experiment for entire Switzerland. In: *Hydrological Sciences Journal*, Angenommen und in Druck (Juni 2007).

ANHANG A

Tabelle 9: Verwendete Schneemesstationen für die Berechnung der regionalen Schneehöhenkarten

Linthtal 435 - 3609 m. ü. M.

Netz	TAG	Bezeichnung	X	Y	Höhe [m.ü.M]
IMIS	AMD2	Amden Baerenfall	729500	225840	1610
	ELM2	Elm Chueebodensee	729230	199700	2050
	GLA2	Glaernisch Guppen	721610	206300	1630
	ORT2	Ortstock Matt	715750	197450	1830
	SCA2	Schaechental Seew li	697550	185500	2030
	SCA3	Schaechental Alpler Tor	702200	194250	2330
	TAM2	Taminatal Wildsee	748600	203840	2460
	TUM2	Tumpiv Val Miez	720865	182315	2195
ANETZ	ALT	Aldorf	690960	191700	449
	CHU	Chur-Ems	759460	193170	555
	GLA	Glarus	723750	210580	515
KKS	ELM	Elm	732400	198500	965
	RAG	Bad Ragaz	756900	209370	496
ENET	CMA2	Crap Masegn	733050	189875	2330
Beobachter	3BR	Braunwald	718000	199725	1310
	3MT	Mettlenruns	729150	205050	900
	3FB	Flumserberg	740900	217000	1310
	20G	Oberiberg	702030	210700	1080
	2ST	Stoos	694040	203320	1280

Inntal 1045 - 3868 m. ü. M.

Netz	TAG	Bezeichnung	X	Y	Höhe [m.ü.M]
IMIS	BER2	Bernina Motta Bianco	799100	144300	2450
	BEV2	Bever Valetta	783930	157050	2510
	DAV2	Davos Baerentaelli	782100	174760	2560
	DAV3	Davos Hanengretji	778300	184580	2450
	JUL2	Julier Vairana	773070	149930	2430
	KES2	Kesch Porta d'Es-cha	788350	166300	2725
	KLO2	Klosters Madrisa	785500	198200	2140
	KLO3	Klosters Gatschiefer	790100	190800	2310
	LAG2	Piz Lagrev Schneestation	777150	147050	2730
	OFE2	Ofenpass Murtaroel	818230	168460	2360
	PAR2	Parsenn Kreuzweg	780430	191680	2290
	SLF2	SLF Fluelastrasse	783800	187400	1560
	SMN2	Samnaun Ravaischer Salaas	820750	204680	2520
	VIN2	Vinadi Alpetta	828750	202250	2730
	ZNZ2	Zernez Puelschezza	797300	175080	2680
	ANETZ	ROB	Robbia	801850	136180
SAM		Samedan Flugplatz	787150	156040	1705
WFJ		Weissfluhjoch	780600	189630	2690
KKS	ARO	Arosa	770730	183320	1840
	SIA	Sils-Maria	778975	145025	1802
	SMM	Sta. Maria	828760	165350	1390
ENET	WFJ2	Weissfluhjoch	780850	189260	2540
	NAS2	Naluns Schneestation	814900	188750	2350
	PMA2	Piz Martegnas	760870	160875	2430
Beobachter	7FA	Ftan	813640	186150	1710
	7SC	S-chanf	795040	165430	1660
	7DI	Bernina Diavolezza	795820	146460	2090

ANHANG B

RESULTATE ZUR PUNKTUELLEN AUSWERTUNG DES SCHNEEWASSERÄQUIVALENTS

Tabelle 10: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Engadin. Vergleich erfolgt an den IMIS Stationen.

Engadin											
			Kein Update		Update mit Satellitenbild		Update mit operationeller Schneehöhenkarte		Update mit regionaler Schneehöhenkarte		
		IMIS Station	SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}
Winter 2005/06 Beobachtungszeitraum: Januar 2006 bis Ende Juli 2006	Serie 1	LAG2	200	90	45	91	45.5	85	42.5	85	42.5
		BER2	291	58	19.93	77	26.46	67	23.02	69	23.71
		BEV2	183	86	46.99	81	44.26	76	41.53	88	48.09
		KES2	230	136	59.13	112	48.7	127	55.22	101	43.91
		ZNZ2	311	118	37.94	118	37.94	106	34.08	96	30.87
		OFE2	198	70	35.35	70	35.35	67	33.84	69	34.85
	Serie 2	LAG2	200	90	45	107	53.5	87	43.5	98	49
		BER2	291	58	19.93	96	32.99	72	24.74	80	27.49
		BEV2	183	86	46.99	93	50.82	76	41.53	104	56.83
		KES2	230	136	59.13	126	54.78	135	58.7	129	56.09
		ZNZ2	311	118	37.94	118	37.94	109	35.05	98	31.51
		OFE2	198	70	35.35	70	35.35	62	31.31	69	34.85
	Serie 3	LAG2	200	90	45	107	53.5	87	43.5	98	49
		BER2	291	58	19.93	97	33.33	72	24.74	81	27.84
		BEV2	183	86	46.99	93	50.82	75	40.98	104	56.83
		KES2	230	136	59.13	126	54.78	135	58.7	129	56.09
		ZNZ2	311	118	37.94	118	37.94	108	34.73	98	31.51
		OFE2	198	70	35.35	70	35.35	62	31.31	69	34.85
Winter 2006/07 Beobachtungszeitraum: Januar 2007 bis Ende April 2007	LAG2	230	116	50.43	88	38.26	71	30.87	-	-	
	BER2	306	53	17.32	85	27.78	56	18.3	-	-	
	BEV2	254	127	50	68	26.77	67	26.38	-	-	
	KES2	325	152	46.77	90	27.69	121	37.23	-	-	
	ZNZ2	325	110	33.85	110	33.85	95	29.23	-	-	
	OFE2	158	49	31.01	49	31.01	38	24.05	-	-	

Tabelle 11: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Engadin. Vergleich erfolgt an den Beobachter Stationen

Beobachterstationen Engadin						
7CO						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		317	221	205	184	231.75
SWE _{sim}		88	133	159	89	117.25
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		27.76	60.18	77.56	48.37	53.47
SWE _{simup}	Satellit	76	79	112	16	70.75
	operationelle Schneekarte	54	69	75	0	49.5
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	23.97	35.75	54.63	8.7	30.76
	operationelle Schneekarte	17.03	31.22	36.59	0	21.21
7ZU						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		50	74	87	-	70.33
SWE _{sim}		4	20	0	-	8
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		8	27.03	0	-	11.68
SWE _{simup}	Satellit	37	82	53	-	57.33
	operationelle Schneekarte	9	31	9	-	16.33
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	74	110.81	60.92	-	81.91
	operationelle Schneekarte	18	41.89	10.34	-	23.41
7MT						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		115	169	-	-	142
SWE _{sim}		18	8	-	-	13
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		15.65	4.73	-	-	10.19
SWE _{simup}	Satellit	94	90	-	-	92
	operationelle Schneekarte	25	44	-	-	34.5
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	81.74	53.25	-	-	67.5
	operationelle Schneekarte	21.74	26.04	-	-	23.89
7MA						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		83	171	196	-	150
SWE _{sim}		0	20	0	-	6.67
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		0	11.7	0	-	3.9
SWE _{simup}	Satellit	37	78	51	-	55.33
	operationelle Schneekarte	7	42	17	-	22
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	44.58	45.61	26.02	-	38.74
	operationelle Schneekarte	8.43	24.56	8.67	-	13.89

Tabelle 12: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Linthtal. Vergleich erfolgt an den IMIS Stationen.

Glarus											
			Kein Update		Update mit Satellitenbild		Update mit operationeller Schneehöhenkarte		Update mit regionaler Schneehöhenkarte		
		IMIS Station	SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	SWE _{sim}	SWE _{sim} in % des SWE _{beob}
Winter 2005/06 Januar bis Ende April 2006	Serie 1	ELM2	489	201	41.1	209	42.74	217	44.38	158	32.31
		GLA2	728	112	15.38	120	16.48	145	19.92	117	16.07
		ORT2	502	114	22.71	126	25.1	162	32.27	123	24.5
	Serie 2	ELM2	489	201	41.1	225	46.01	203	41.51	157	32.11
		GLA2	728	112	15.38	134	18.41	140	19.23	103	14.15
		ORT2	502	114	22.71	144	28.69	162	32.27	121	24.1
	Serie 3	ELM2	489	201	41.1	225	46.01	205	41.92	157	32.11
		GLA2	728	112	15.38	134	18.41	117	16.07	103	14.15
		ORT2	502	114	22.71	144	28.69	164	32.67	121	24.1
Winter 2006/07 Januar bis Ende April 2007		ELM2	608	112	18.42	148	24.34	106	17.43	-	-
		GLA2	424	9	2.12	56	13.21	31	7.31	-	-
		ORT2	394	13	3.3	62	15.74	63	15.99	-	-

Tabelle 13: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Linthtal. Vergleich erfolgt an den Beobachter Stationen.

Beobachterstationen Glarus						
3BR						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		45	59	94	-	66
SWE _{sim}		0	0	0	-	0
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		0	0	0	-	0
SWE _{simup}	Satellit	0	38	119	-	52.33
	operationelle Schneekarte	0	28	38	-	22
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	0	64.41	126.6	-	63.67
	operationelle Schneekarte	0	47.46	40.43	-	29.29
3EL						
		Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}		-	-	257	-	257
SWE _{sim}		-	-	63	-	63
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}		-	-	24.51	-	24.51
SWE _{simup}	Satellit	-	-	174	-	174
	operationelle Schneekarte	-	-	125	-	125
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}	Satellit	-	-	67.7	-	67.7
	operationelle Schneekarte	-	-	48.64	-	48.64

Tabelle 14: sämtliche simulierte Schneewasseräquivalentwerte vor und nach dem Aufdatieren für das Alptal

Alptal					
Winter 2005/06, Serie 3					
<i>Erlenhöhe</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	158	249	373	188	242
SWE _{sim}	116	164	279	29	147
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	73.42	65.86	74.8	15.43	57.38
SWE _{simup}					
Satellit	117	164	228	0	127.25
operationelle Schneekarte	127	241	345	79	198
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	74.05	65.86	61.13	0	50.26
operationelle Schneekarte	80.38	96.79	92.49	42.02	77.92
<i>Vogelbach</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	145	153	239	0	134.25
SWE _{sim}	135	150	255	0	135
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	93.1	98.04	106.69	0	74.46
SWE _{simup}					
Satellit	167	161	270	12	152.5
operationelle Schneekarte	165	185	280	21	162.75
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	115.17	105.23	112.97	-	111.12
operationelle Schneekarte	113.79	120.92	117.15	-	117.29
<i>Lümpenen</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	184	233	412	320	287.25
SWE _{sim}	142	181	309	267	224.75
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	77.17	77.68	75	83.44	78.32
SWE _{simup}					
Satellit	133	168	254	158	178.25
operationelle Schneekarte	147	209	307	229	223
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	72.28	72.1	61.65	49.38	63.85
operationelle Schneekarte	79.89	89.7	74.51	71.56	78.92
Winter 2006/07					
<i>Erlenhöhe</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	0	58	38	50	36.5
SWE _{sim}	0	10	11	9	7.5
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	100	17.24	28.95	18	41.05
SWE _{simup}					
Satellit	0	11	11	9	7.75
operationelle Schneekarte	0	11	11	9	7.75
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	100	18.97	28.95	18	41.48
operationelle Schneekarte	100	18.97	28.95	18	41.48
<i>Vogelbach</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	9	0	80	-	29.67
SWE _{sim}	9	0	68	-	25.67
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	100	100	85	-	95
SWE _{simup}					
Satellit	9	0	68	-	25.67
operationelle Schneekarte	9	0	68	-	25.67
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	100	100	85	-	95
operationelle Schneekarte	100	100	85	-	95
<i>Lümpenen</i>					
	Jan	Feb	Mrz	Apr	Ø
SWE _{beob}	26	28	72	75	50.25
SWE _{sim}	7	24	0	52	20.75
SWE _{sim} in % des SWE _{beob}	26.92	85.71	0	69.33	45.49
SWE _{simup}					
Satellit	7	25	12	52	24
operationelle Schneekarte	7	29	0	52	22
SWE _{simup} in % des SWE _{beob}					
Satellit	26.92	89.29	16.67	69.33	50.55
operationelle Schneekarte	26.92	103.57	0	69.33	49.96

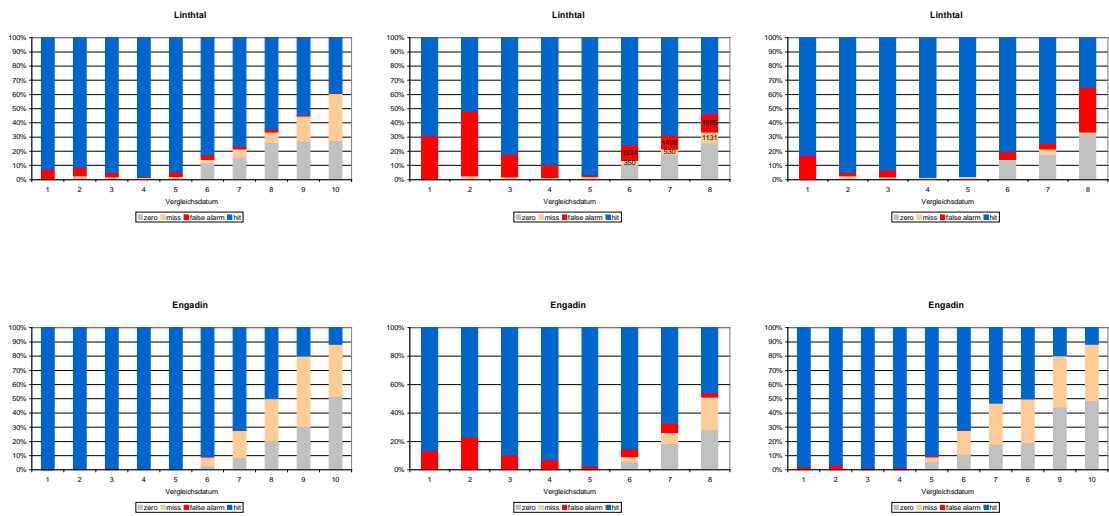
RESULTATE DER RÄUMLICHEN AUSWERTUNG

Ohne Update

operationelle Schneehöhenkarte

NOAA/AVHRR

Regionale Schneehöhenkarte



Mit Update

operationelle Schneehöhenkarte

NOAA/AVHRR

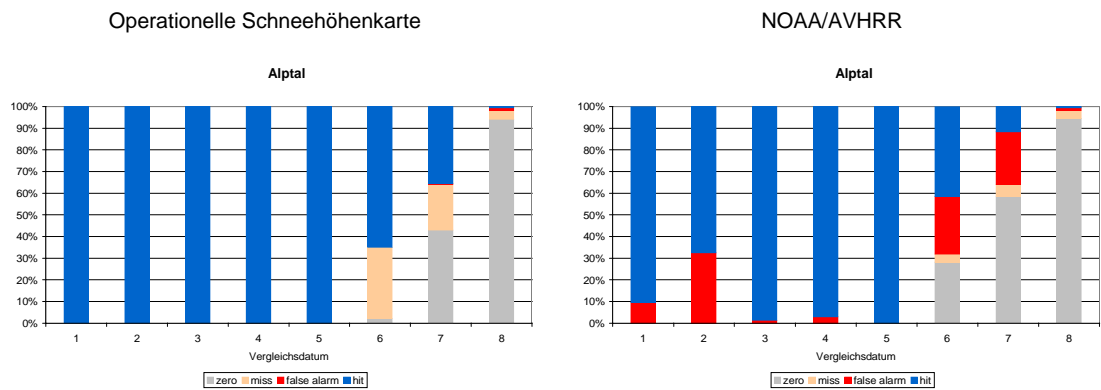
Regionale Schneehöhenkarte



Abbildung 47a: Zusammenstellung der Kategoriellen Statistik für den Winter 2005/06 (Serie 3). Linthtal und Engadin.

Legende x-Achse: 1: 19. Januar, 2: 31. Januar, 3: 14. Februar, 4: 15. März, 5: 17. März, 6: 2. April, 7: 21. April, 8: 4. Mai, 9: 8. Juni, 10: 11. Juni.

Ohne Update



mit Update

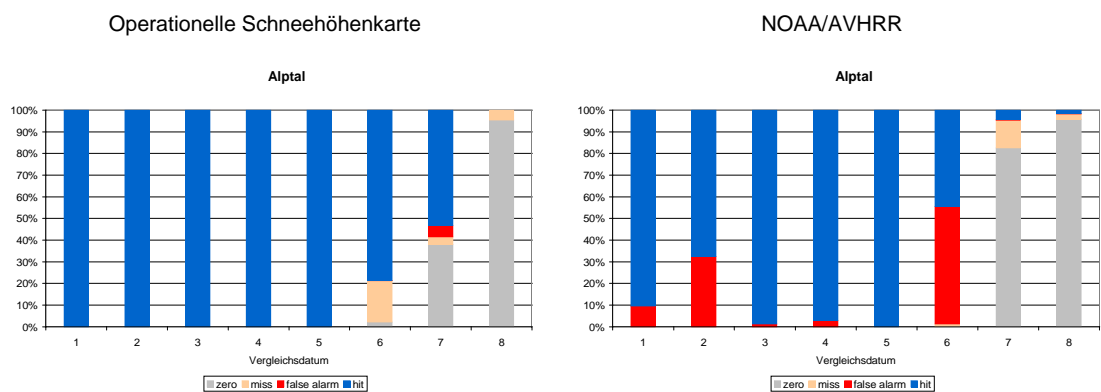


Abbildung 47b: Zusammenstellung der Kategoriellen Statistik für den Winter 2005/06 (Serie 3). Alptal.

Legende x-Achse: 1: 19. Januar, 2: 31. Januar, 3: 14. Februar, 4: 15. März, 5: 17. März, 6: 2. April, 7: 21. April, 8: 4. Mai.

ANHANG C

Tabelle 15: Zusammenstellung der Aufdatierungstage für die verschiedenen Aufdatierungsreihen für den Winter 2005/06 und 2006/07

Winter 2005/06			
Serie 1			
Aufdatierungsdatum	operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz	Satellitenkarte	regionale Schneehöhenkarte
15. Mrz. 2006	x	x	x
17. Mrz. 2006	x	x	x
2. Apr. 2006	x	x	x
7. Apr. 2006	x	x	x
21. Apr. 2006	x	x	x
4. Mai. 2006	x	x	x
12. Mai. 2006			x ²
23. Mai. 2006			x ²
8. Jun. 2006	x		x
11. Jun. 2006	x		x
Serie 2			
Aufdatierungsdatum	operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz	Satellitenkarte	regionale Schneehöhenkarte
19. Jan. 2006	x	x	x
14. Feb. 2006	x	x	x
17. Mrz. 2006	x	x	x
21. Apr. 2006	x	x	x
4. Mai. 2006	x	x	x
8. Jun. 2006	x		x
Serie 3			
Aufdatierungsdatum	operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz	Satellitenkarte	regionale Schneehöhenkarte ¹
19. Nov. 2005	x	x	x
1. Dez. 2005	x	x	x
19. Jan. 2006	x	x	x
14. Feb. 2006	x	x	x
17. Mrz. 2006	x	x	x
21. Apr. 2006	x	x	x
4. Mai. 2006	x	x	x
8. Jun. 2006	x		x ²
Winter 2006/07			
Aufdatierungsdatum	operationelle Schneehöhenkarte der Schweiz	Satellitenkarte	
10. Nov. 2006		x	
20. Nov. 2006	x		
11. Dez. 2006	x		
14. Dez. 2006		x	
11. Jan. 2007	x		
15. Jan. 2007		x	
25. Jan. 2007	x		
29. Jan. 2007		x	
15. Feb. 2007	x		
18. Feb. 2007		x	
1. Mrz. 2007	x		
4. Mrz. 2007		x	
15. Mrz. 2007	x	x	
5. Apr. 2007	x		
6. Apr. 2007		x	
11. Apr. 2007		x	
12. Apr. 2007	x		
19. Apr. 2007	x		
20. Apr. 2007		x	

¹Die Updates mit den regionalen Schneehöhenkarten wurden nur für das Linthtal und Engadin gemacht. Im Alptal standen für die Interpolation zu wenige Meteo-Stationen zur Verfügung.

²Die Updates im Juni mit den regionalen Schneehöhenkarten wurden nur für das Engadin gemacht. Für das Linthtal wiesen die regionalen Karten ab Anfang Mai kein plausibles Muster mehr auf.

³Auf Grund guter Qualität der regionalen Schneehöhenkarten für das Engadin, wurden im Mai zusätzlich zwei weitere Tage genommen, nicht aber für das Linthtal

Tabelle 16: Daten der Aufdatierungstage für die Grafiken der Kategoriellen Statistik in Kapitel 7.3.2

Linthal		Engadin				Alptal					
Abbildung links		Abbildung rechts		Abbildung links		Abbildung rechts		Abbildung links		Abbildung rechts	
Nr	Datum	Nr	Datum	Nr	Datum	Nr	Datum	Nr	Datum	Nr	Datum
1	19.11.05	1	14.12.06	1	19.11.05	1	19.11.05	1	19.11.05	1	20.11.06
2	01.12.05	2	15.01.07	2	01.12.05	2	01.12.05	2	01.12.05	2	11.12.06
3	19.01.06	3	16.01.07	3	31.01.06	3	19.01.06	3	19.01.06	3	11.01.07
4	14.02.06	4	17.01.07	4	14.02.06	4	14.02.06	4	14.02.06	4	25.01.07
5	15.03.06	5	18.01.07	5	15.03.06	5	15.03.06	5	15.03.06	5	15.02.07
6	17.03.06	6	19.01.07	6	17.03.06	6	17.03.06	6	17.03.06	6	01.03.07
7	02.04.06	7	20.01.07	7	02.04.06	7	02.04.06	7	02.04.06	7	15.03.07
8	21.04.06	8	21.01.07	8	21.04.06	8	21.04.06	8	21.04.06	8	05.04.07
9	04.05.06	9	22.01.07	9	04.05.06	9	04.05.06	9	04.05.06	9	12.04.07
				10	08.06.06	10	08.06.06			10	19.04.07
				11	11.06.06	11	11.06.06				