

Schneesmelzmodellierung mit indexbasierten Modellen

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur
am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau
Department für Wasser - Atmosphäre - Umwelt
Universität für Bodenkultur

Lutz Rauch

Betreuer: Ao. Univ. Prof. DI Dr. Hubert Holzmann

Wien, im November 2007

Abstract

Deutsch:

Diese Arbeit behandelt die Modellierung der Schmelzprozesse am Goldbergkees des Hohen Sonnblicks mit indexbasierten Verfahren für die Jahre 2003, 2004 und 2005. Zum Einsatz kommt dafür ein am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau (BOKU, Wien) entwickeltes höhenverteiltes Schmelzmodell, welches aufgrund von meteorologischen und geographischen Eingangsgrößen die Akkumulation und Ablation der Schneedecke über diesen Zeitraum berechnet. Das Modell ermittelt ebenso über den vergletscherten Teilflächen des Einzugsgebietes die Ablation des Gletschers und den effektiven Niederschlagsanteil, daraus lässt sich der Abfluss des gesamten Einzugsgebietes bestimmen. Die zeitlich Auflösung beträgt dabei eine Stunde, dies betrifft sowohl die Eingabe- als auch die Ausgabedaten. Die Modellparameter werden im Zuge dieser Arbeit anhand der Abflussmessungen am Gebietsauslass optimiert, weiters wird ein Vergleich mit Schneepegeln im Gebiet durchgeführt. Den Abschluss bietet eine Analyse über den Einfluss einzelner Parameter auf die Modellergebnisse.

English:

This master thesis deals with the modeling of the melting processes on the Goldbergkees glacier using indexbased procedures for the years 2003, 2004 and 2005. This paper utilizes an altitude dependent melting model developed at the Institute for Watermanagement, Hydrology and constructive Waterways. (BOKU, Wien), which calculates the accumulation and ablation of the snow cover over this period based on meteorological and geographical input. Furthermore the model identifies the ablation of the glacier and the effective precipitation, enabling a runoff calculation for the entire catchment. The temporal resolution is hourly for both input and output data. The model parameters were optimized based on runoff measurements at the catchment release point. Results were also compared to snow level measurements in the area. A sensitivity analysis of selected model parameters concludes this paper.

Danksagung

Mein Dank gilt insbesondere meinen Eltern für die finanzielle und moralische Unterstützung während meines Studiums, meinem Betreuer Prof. Dr. Hubert Holzmann für seine fachliche Beratung und seine Geduld, sowie den Kollegen Gernot Kobltschnig und Gernot Michlmayer für ihre Beiträge zu dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	2
INHALTSVERZEICHNIS	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	8
FORMELVERZEICHNIS	9
1 EINLEITUNG	10
1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	10
1.2 GEBIETSBESCHREIBUNG	10
1.2.1 <i>Geographische Lage</i>	10
1.2.2 <i>Geologie</i>	11
1.2.3 <i>Klima</i>	12
2 METHODIK	13
2.1 INDEXVERFAHREN	13
2.2 MODELLGRUNDLAGEN	13
2.3 MODELLPARAMETER	15
2.4 HÖHENGRADIENTEN	16
2.5 SAISONALE VERTEILUNG DES GRAD-TAG FAKTORS.....	17
2.6 SAISONALE VERTEILUNG DER SCHWELLENTEMPERATUR	18
2.7 ALBEDO.....	18
2.8 COLD CONTENT	19
2.9 EXPOSITIONSGEWICHT.....	20
2.10 SPEICHERKOEFFIZIENTEN	21
2.11 BERECHNUNGSOPTIONEN DER SCHNEESCHMELZE	22
2.12 ARBEITEN MIT DEM MODELL.....	23
2.13 MODELLOUTPUT.....	23
3 DATENBASIS FÜR DIE MODELLIERUNG	25
3.1 ABFLUSSMESSUNG AM GOLBERGKEES.....	25
3.2 TEMPERATURMESSUNG.....	28
3.3 STRAHLUNGSMESSUNG.....	30
3.4 NIEDERSCHLAGSMESSUNG UND KORREKTUR	32
3.4.1 <i>Niederschlagsmessung</i>	32
3.4.2 <i>Niederschlagskorrektur</i>	34
3.5 SCHNEEPEGEL.....	34
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	38
4.1 MODELLKALIBRIERUNG UND VALIDIERUNG.....	38
4.2 GÜTEKRITERIEN.....	38
4.2.1 <i>Abfluss</i>	38
4.2.2 <i>Schneepegel</i>	39
4.2.3 <i>Schneewasserwertsondierungen</i>	40
4.3 ERGEBNISSE DES TEMPERATURINDEXVERFAHREN.....	40
4.3.1 <i>Ergebnisse Abfluss</i>	40
4.3.2 <i>Ergebnisse Schneepegel</i>	45
4.3.3 <i>Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen</i>	48
4.4 STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN	49
4.4.1 <i>Ergebnisse Abfluss</i>	49
4.4.2 <i>Ergebnisse Schneepegel</i>	55
4.4.3 <i>Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen</i>	57
4.5 KOMBINIERTES VERFAHREN.....	58
4.5.1 <i>Ergebnisse Abfluss</i>	58

4.5.2	<i>Ergebnisse Schneepegel</i>	63
4.5.3	<i>Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen</i>	65
4.6	METHODENVERGLEICH	67
5	SENSITIVITÄTSANALYSEN	69
5.1	EINFLUSS VON ALBEDO	69
5.2	EINFLUSS VON COLD CONTENT	71
5.3	EINFLUSS VON EXPOSITIONSGEWICHTUNG	74
5.4	EINFLUSS DER ZUSATZMODULE	76
5.5	EINFLUSS DES GRAD-TAG FAKTORS FÜR DIE SCHNEESCHMELZE (<i>FAK</i>).....	78
5.6	EINFLUSS DES GRAD TAG FAKTORS FÜR DIE GLETSCHERSCHMELZE (<i>FAKICE</i>).....	82
5.7	EINFLUSS DES STRAHLUNGSFAKTORS (<i>FAKRAD</i>)	84
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	89
6.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE.....	89
6.2	AUSBLICK	89
6.2.1	<i>Reduktions- / Streckungsfaktor für den Tagesgang</i>	89
6.2.2	<i>Berücksichtigung von Verfrachtungen</i>	90
6.2.3	<i>Abschattungen</i>	90
6.2.4	<i>Saisonal veränderbare Speicherkoeffizienten</i>	90
6.2.5	<i>Höhenzonenabhängige Parameter</i>	90
7	LITERATURVERZEICHNIS	91

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.1: LAGE DES HOHEN SONNBLICKS	11
ABBILDUNG 1.2: LAGE DES HOHEN SONNBLICKS - DETAIL	11
ABBILDUNG 2.1: HÖHENZONEN (KOBOLTSCHNIG ET AL., 2007)	14
ABBILDUNG 2.2: MODELLSTRUKTUR	15
ABBILDUNG 2.3: SAISONALE VERTEILUNG DES GRAD-TAG FAKTORS	17
ABBILDUNG 2.4: ZEITLICHER VERLAUF DES ALBEDOFAKTORS	18
ABBILDUNG 2.5: VERTEILUNG DES GRAD-TAG FAKTORS 2005	19
ABBILDUNG 3.1: PEGELPROFIL	26
ABBILDUNG 3.2: ABFLUSSGANGLINIEN	27
ABBILDUNG 3.3: TEMPERATURVERLAUF	30
ABBILDUNG 3.4: STRAHLUNGSVERLAUF 2003	31
ABBILDUNG 3.5: STRAHLUNGSVERLAUF 2004	31
ABBILDUNG 3.6: STRAHLUNGSVERLAUF 2005	32
ABBILDUNG 3.7: STRAHLUNG AN 5 TAGEN DES AUGUST 2003	32
ABBILDUNG 3.8: GEBIETSNIEDERSCHLAG	34
ABBILDUNG 3.9: SCHNEEHÖHEN 2002/2003	35
ABBILDUNG 3.10: SCHNEEHÖHEN 2003/2004	36
ABBILDUNG 3.11: SCHNEEHÖHEN 2004/2005	36
ABBILDUNG 4.1: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2003	41
ABBILDUNG 4.2: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2004	42
ABBILDUNG 4.3: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2005	42
ABBILDUNG 4.4: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2003	43
ABBILDUNG 4.5: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2004	44
ABBILDUNG 4.6: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2005	44
ABBILDUNG 4.7: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - GANGLINIE AUGUST 2003	45
ABBILDUNG 4.8: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PG6 2003/2004 (3050M)	46
ABBILDUNG 4.9: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PG6 2004/2005 (3050M)	46
ABBILDUNG 4.10: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PG2 2003/2004 (2650M)	47
ABBILDUNG 4.11: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PG2 2004/2005 (2650M)	47
ABBILDUNG 4.12: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2003	48
ABBILDUNG 4.13: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2004	49
ABBILDUNG 4.14: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2005	49
ABBILDUNG 4.15: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2003	50
ABBILDUNG 4.16: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2004	51
ABBILDUNG 4.17: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SUMMENLINIE 2005	51
ABBILDUNG 4.18: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2003	52
ABBILDUNG 4.19: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2004	53
ABBILDUNG 4.20: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - GANGLINIE 2005	53
ABBILDUNG 4.21: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - GANGLINIE AUGUST 2003	54
ABBILDUNG 4.22: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - GANGLINIE JULI 2005	54
ABBILDUNG 4.23: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PG2 2003/2004 (2650M)	55
ABBILDUNG 4.24: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PG2 2004/2005 (2650M)	56
ABBILDUNG 4.25: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PG6 2003/2004 (3050M)	56
ABBILDUNG 4.26: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PG6 2004/2005 (3050M)	57
ABBILDUNG 4.27: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2003	57
ABBILDUNG 4.28: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2004	58
ABBILDUNG 4.29: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2005	58
ABBILDUNG 4.30: KOMBINIERTES VERFAHREN - SUMMENLINIE 2003	60
ABBILDUNG 4.31: KOMBINIERTES VERFAHREN - SUMMENLINIE 2004	60
ABBILDUNG 4.32: KOMBINIERTES VERFAHREN - SUMMENLINIE 2005	61
ABBILDUNG 4.33: KOMBINIERTES VERFAHREN - GANGLINIE 2003	62
ABBILDUNG 4.34: KOMBINIERTES VERFAHREN - GANGLINIE 2004	62
ABBILDUNG 4.35: KOMBINIERTES VERFAHREN - GANGLINIE 2005	63
ABBILDUNG 4.36: KOMBINIERTES VERFAHREN - PG2 2003/2004 (2650M)	64
ABBILDUNG 4.37: KOMBINIERTES VERFAHREN - PG2 2004/2005 (2650M)	64
ABBILDUNG 4.38: KOMBINIERTES VERFAHREN - PG6 2003/2004 (3050M)	65
ABBILDUNG 4.39: KOMBINIERTES VERFAHREN - PG6 2004/2005 (3050M)	65

ABBILDUNG 4.40: KOMBINIERTES VERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2003	66
ABBILDUNG 4.41: KOMBINIERTES VERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2004	66
ABBILDUNG 4.42: KOMBINIERTES VERFAHREN - SCHNEEWASSERWERTMESSUNG 2005	67
ABBILDUNG 4.43: METHODENVERGLEICH - ABFLUSSBILANZ.....	67
ABBILDUNG 4.44: METHODENVERGLEICH - GANGLINIE AUGUST 2003	68
ABBILDUNG 5.1: ALBEDO - ABFLUSSBILANZ 2005	70
ABBILDUNG 5.2: ALBEDO - PG1 2004/2005 (2450M)	70
ABBILDUNG 5.3: ALBEDO - PG2 2004/2005 (2650M)	71
ABBILDUNG 5.4: ALBEDO - PG6 2004/2005 (3050M)	71
ABBILDUNG 5.5: COLD CONTENT - ABFLUSSBILANZ 2005	72
ABBILDUNG 5.6: COLD CONTENT - PG1 2004/2005 (2450M)	73
ABBILDUNG 5.7: COLD CONTENT - PG2 2004/2005 (2650M)	73
ABBILDUNG 5.8: COLD CONTENT - PG6 2004/2005 (2850M)	74
ABBILDUNG 5.9: EXPOSITIONSGEWICHT - ABFLUSSBILANZ 2005	75
ABBILDUNG 5.10: EXPOSITIONSGEWICHT - PG1 2004/2005 (2450M)	75
ABBILDUNG 5.11: EXPOSITIONSGEWICHT - PG2 2004/2005 (2650M)	76
ABBILDUNG 5.12: EXPOSITIONSGEWICHT - PG3 2004/2005 (2850M)	76
ABBILDUNG 5.13: ZUSATZMODULE - ABFLUSSBILANZ 2005.....	77
ABBILDUNG 5.14: ZUSATZMODULE - PG1 2004/2005 (2450M)	78
ABBILDUNG 5.15: ZUSATZMODULE - PG2 2004/2005 (2650M)	78
ABBILDUNG 5.16: GRAD-TAG FAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005	79
ABBILDUNG 5.17: GRAD-TAG FAKTOR - PG1 2004/2005 (2450M).....	80
ABBILDUNG 5.18: GRAD-TAG FAKTOR - PG3 2004/2005 (2850M).....	80
ABBILDUNG 5.19: GRAD-TAG FAKTOR - PG5 2004/2005 (2950M).....	81
ABBILDUNG 5.20: GRAD-TAG FAKTOR - GANGLINIE JULI 2005	81
ABBILDUNG 5.21: GRAD-TAG FAKTOR - GANGLINIE AUGUST 2005	82
ABBILDUNG 5.22: GLETSCHERSCHMELZFAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005	83
ABBILDUNG 5.23: GLETSCHERSCHMELZFAKTOR - GANGLINIE JULI 2005.....	84
ABBILDUNG 5.24: GLETSCHERSCHMELZFAKTOR - GANGLINIE AUGUST 2005	84
ABBILDUNG 5.25: STRAHLUNGSFAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005.....	85
ABBILDUNG 5.26: STRAHLUNGSFAKTOR - PG1 2004/2005 (2450M)	86
ABBILDUNG 5.27: STRAHLUNGSFAKTOR - PG3 2004/2005 (2850M):	86
ABBILDUNG 5.28: STRAHLUNGSFAKTOR - PG5 2004/2005 (2950M)	87
ABBILDUNG 5.29: STRAHLUNGSFAKTOR - GANGLINIE JULI 2005	87
ABBILDUNG 5.30: STRAHLUNGSFAKTOR -GANGLINIE AUGUST 2005	88

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: FLÄCHENVERTEILUNG DER HÖHENZONEN.....	13
TABELLE 2.2: MODELLPARAMETER	16
TABELLE 2.3: EXPOSITIONSKLASSEN UND MULTIPLIKATIONSFAKTOREN FF.....	21
TABELLE 3.1: BEOBACHTUNGSZEITRÄUME DER ABFLUSSMESSUNG	26
TABELLE 3.2: MESSLÜCKEN DER ABFLUSSMESSUNG.....	27
TABELLE 3.3: ABFLUSSSUMMEN.....	27
TABELLE 3.4: TAGESWETTERSTATION - LAGE	28
TABELLE 3.5: MESSLÜCKEN DER TEMPERATURMESSUNG.....	28
TABELLE 3.6: TAGESWETTERSTATION - LAGE	30
TABELLE 3.7: MESSSTELLEN NIEDERSCHLAG.....	33
TABELLE 3.8: KORREKTURFAKTOREN FÜR NIEDERSCHLAG.....	34
TABELLE 3.9: SCHNEEPEGEL - LAGE UND BEZEICHNUNG	35
TABELLE 4.1: SCHNEEDICHTEN	40
TABELLE 4.2: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - ERREICHBARE GENAUIGKEITEN	41
TABELLE 4.3: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PARAMETERSÄTZE	41
TABELLE 4.4: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - ABFLUSSBILANZ.....	43
TABELLE 4.5: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PROZENTANTEILE AN GESAMTABFLUSS	43
TABELLE 4.6: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - KORRELATION SCHNEEPEGEL	45
TABELLE 4.7: TEMPERATURINDEXVERFAHREN - PARAMETERSÄTZE SCHNEEPEGEL.....	48
TABELLE 4.8: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - ERREICHBARE GENAUIGKEITEN.....	50
TABELLE 4.9: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PARAMETERSÄTZE	50
TABELLE 4.10: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - ABFLUSSBILANZ.....	52
TABELLE 4.11: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - PROZENTANTEILE AN GESAMTABFLUSS	52
TABELLE 4.12: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - KORRELATION SCHNEEPEGEL	55
TABELLE 4.13: KOMBINIERTES VERFAHREN - ERREICHBARE GENAUIGKEITEN	59
TABELLE 4.14: KOMBINIERTES VERFAHREN - PARAMETERSÄTZE	59
TABELLE 4.15: KOMBINIERTES VERFAHREN - ABFLUSSBILANZ.....	61
TABELLE 4.16: KOMBINIERTES VERFAHREN - PROZENTANTEILE AN GESAMTABFLUSS.....	61
TABELLE 4.17: KOMBINIERTES VERFAHREN - KORRELATION SCHNEEPEGEL	63
TABELLE 5.1: ALBEDO - ABFLUSSBILANZ 2005	69
TABELLE 5.2: COLD CONTENT - ABFLUSSBILANZ 2005	72
TABELLE 5.3: EXPOSITIONSGEWICHT - ABFLUSSBILANZ 2005.....	74
TABELLE 5.4: ZUSATZMODULE - ABFLUSSBILANZ 2005	77
TABELLE 5.5: GRAD-TAG FAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005.....	79
TABELLE 5.6: GRAD-TAG FAKTOR - PARAMETERSÄTZE	79
TABELLE 5.7: GLETSCHERSCHMELZFAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005	82
TABELLE 5.8: GLETSCHERSCHMELZFAKTOR - PARAMETERSÄTZE	83
TABELLE 5.9: STRAHLUNGSFAKTOR - ABFLUSSBILANZ 2005	85
TABELLE 5.10: STRAHLUNGSFAKTOR - PARAMETERSÄTZE.....	85

Formelverzeichnis

FORMEL 2.1 ALBEDOFAKTOR	18
FORMEL 2.2: COLD CONTENT	20
FORMEL 2.3: EXPOSITIONSFAKTOR.....	20
FORMEL 2.4: SPEICHERGLEICHUNG.....	21
FORMEL 2.5: KONTINUITÄTSGLEICHUNG	22
FORMEL 2.6: DIFFERENTIALGLEICHUNG	22
FORMEL 2.7: TEMPERATURINDEX - SCHMELZFORMEL.....	22
FORMEL 2.8: STRAHLUNGSINDEXVERFAHREN - SCHMELZFORMEL	22
FORMEL 2.9: KOMBINIERTES VERFAHREN - SCHMELZFORMEL	22
FORMEL 2.10: ZUSATZMODULE - MULTIPLIKATIONSFAKTOREN	23
FORMEL 3.1: INVERSE DISTANZGEWICHTUNG.....	33
FORMEL 4.1: RELATIVER SUMMENFEHLER	38
FORMEL 4.2: KORRELATIONSKOEFFIZIENT	39
FORMEL 4.3: KOVARIANZ	39
FORMEL 4.4: MITTLERER ABSOLUTFEHLER	39
FORMEL 4.5: SCHNEEWASSERWERT	40
FORMEL 6.1: STEFAN - BOLTZMANN GESETZ	90

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Hydrologische Vorgänge im Hochgebirge sind teilweise schlecht erfasst und bieten oft nur qualitative Aussagen. Geeignete Messstellen sind oft schwer zugänglich, die Wartung ist mit sehr hohem Aufwand verbunden, teilweise sind bestimmte Messungen überhaupt unmöglich.

Modelle helfen diese Vorgänge zu quantifizieren und liefern Ergebnisse für weitere Überlegungen. So können z.B. Schneeschmelzmodelle zur Berechnung von Abflussgrößen dienen und in weiterer Folge bei der Vorhersage von Hochwasserereignissen helfen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Schneeschmelzmodell für ein gut dokumentiertes Einzugsgebiet über einen Simulationszeitraum von 3 Jahren zu testen, die optimalen Parameter zu bestimmen (Kalibrierung) und eine Übersicht über den Einfluss einzelner Parameter auf die Ergebnisse zu liefern. Diese Arbeit baut auf den Ergebnissen aus den Diplomarbeiten von FLIEDL (2005) und KAUFMANN (2005) auf, die mit einer früheren Version des Modells arbeiteten.

Das Goldbergkees bietet eine gute Grundlage für diese Arbeit, da es über eine große Anzahl an Messstellen verfügt. So werden am Observatorium schon seit über 100 Jahren meteorologische Daten gesammelt.

Die Ergebnisse bieten eine Grundlage um gemeinsam mit anderen Arbeiten, ein übertragbares Modell für ähnliche Gebiete zu erstellen.

1.2 Gebietsbeschreibung

In diesem Kapitel wird kurz auf die Geographie, Geologie und das Klima am Hohen Sonnblick und am Goldbergkees eingegangen. Für ausführlichere Informationen zu diesen Themen sei auf die Arbeiten von FLIEDL (2005) und KAUFMANN (2005) verwiesen.

1.2.1 Geographische Lage

Der Gipfel des Hohen Sonnblicks (3106m über Adria) liegt in der Goldberggruppe der Hohen Tauern, genau an der Grenze zwischen den österreichischen Bundesländern Salzburg im Norden und Kärnten im Süden.

Das Goldbergkees befindet sich auf der Salzburger Seite und liegt somit im Gemeindegebiet von Rauris, ein Teil des politischen Bezirkes Zell am See. Der Gletscher erstreckt sich über eine Größe von 1.49 km², seine Zunge liegt auf 2360m über Adria, direkt über einem kleinen Gletschersee, an dessen Auslass die Pegelstation des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbaues eingerichtet ist.

Das gesamte Einzugsgebiet des Gletscherbaches weist eine Größe von 2.71 km² auf, es umfasst also eine größere Fläche als nur den Gletscher, dementsprechend sind 1.22 km² des Gebietes unvergletschert.



Abbildung 1.1: Lage des Hohen Sonnblicks

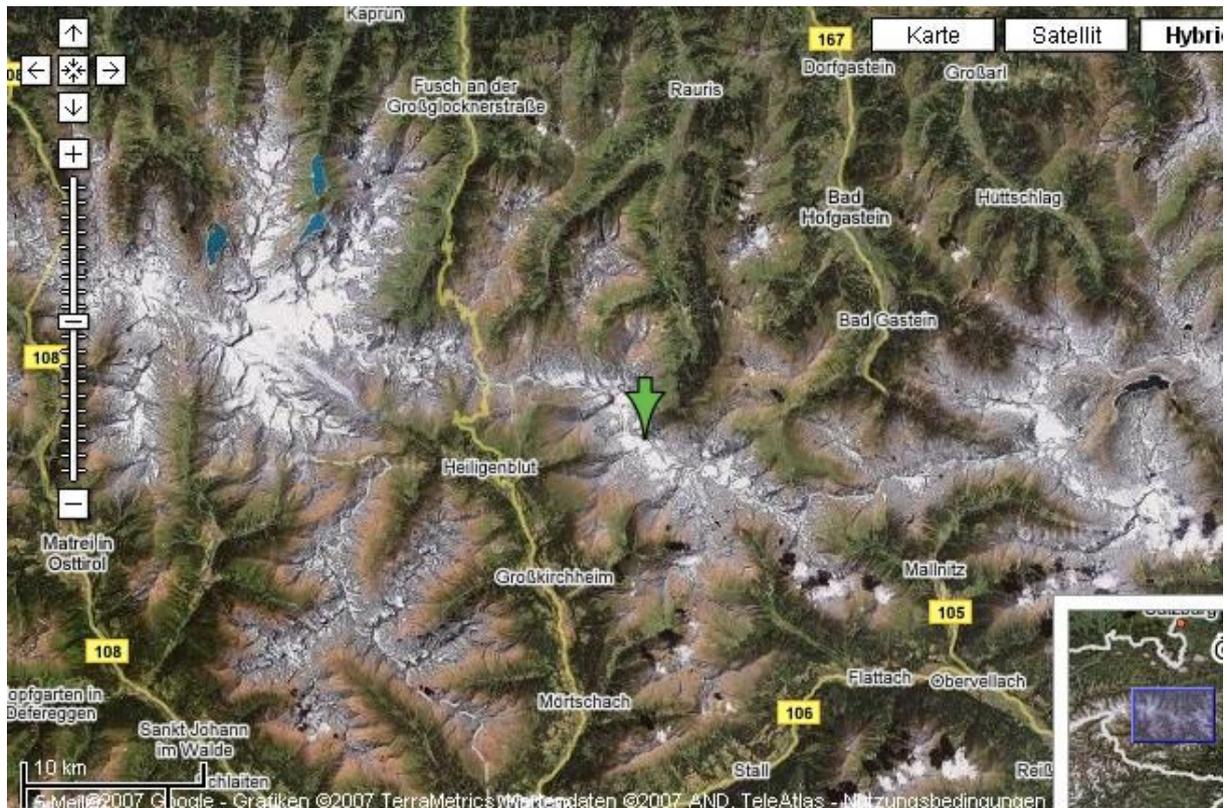


Abbildung 1.2: Lage des Hohen Sonnblicks - Detail

1.2.2 Geologie

Die Gegend um den Sonnblick liegt im östlichen Tauernfenster. Es besteht hauptsächlich aus Zentralgneis umgeben von Schieferhüllen. Im Laufe der

Gebirgsbildung der Alpen wurde dieser Zentralgneis, in der Oberen Kreidezeit (vor 80 Millionen Jahren) bis Jungtertiär (vor 5 Millionen Jahren) am 30. nördlichen Breitengrad, der heutigen afrikanischen Mittelmeerküste, während die afrikanische Platte auf die Europäische drückte, zwischen die Gesteinsdecken im Norden, die Nördliche Kalkalpen und die Grauwackenzone, und im Süden, die Südalpen und die Dinarien, gehoben. (SCHERER, 2000)

1.2.3 Klima

Der Sonnblick liegt in der Goldberggruppe im Übergangsbereich vom kontinentalen zum ozeanischen Klima. In den Tälern herrscht der kontinentale Charakter vor, während in großen Höhen fast ewiges Frostklima mit polar-maritimen Wesenszügen zu finden ist. Der größte Teil der Niederschläge im Bereich des Großglocknergebietes stammt aus frontalen Vorgängen bei West- Nordwestwetterlagen (Warm- und Kaltfronten). In der warmen Jahreszeit spielen auch die Niederschläge der thermischen Konvektion und Wärmegewitter eine Rolle. Im Winter stammen die Niederschläge ausschließlich aus dem Zustrom feuchter Meeresluft, im Sommer kommt dazu die Evaporation. (TOLLNER, 1952).

Für die Südabdachung des Alpenhauptkammes besteht ein doppelter Lee-Effekt. Einerseits bilden die Hohen Tauern eine Barriere gegen die von Norden anströmenden Tiefdruckgebiete. Andererseits werden Südwestwetterlagen von den Julischen, Karnischen und Gailtaler Alpen abgeschwächt. (SCHIECHTL & STERN 1983)

Die Temperatur im Einzugsgebiet ist stark höhenabhängig. Die mittlere Jahrestemperatur am Gipfel des Hohen Sonnblickes liegt für die 3 relevanten Jahre bei -5.1°C . Das absolute Minimum in diesem Zeitraum ist -30.2°C , der absolute Höchstwert ist 14.1°C .

Die relative Luftfeuchtigkeit schwankt zwischen 20 % und 100 % im Winter, im Sommer zwischen 50 % und 100 % und im Mittel zwischen 80 % und 90 %. (FLIEDL, 2005)

Am Sonnblick herrscht eine relative Sonnenscheindauer von 38-42 %, die Tallagen sind sonniger, da die Gipfel oft Wolkenhauben und -fetzen an sich hängen haben. (TOLLNER, 1952)

In der Goldberggruppe kommen die Winde am häufigsten aus den Richtungen SW 25 %, N 25 % und W 17 %, aber bis hinunter zu 3 % SO kommen Winde aus allen Richtungen vor. (AUER et al., 2002)

2 Methodik

2.1 Indexverfahren

Schneeschnmelze wird durch die Summe der eingebrachten Energie bewirkt. Wichtige Energiekomponenten sind die Solarstrahlung, die langwellige Strahlung, die latente Strahlung und der fühlbare Wärmestrom. Die latente Strahlung kann gut durch die Lufttemperatur charakterisiert werde. Weiters liegen im operationellen Betrieb Werte für die Globalstrahlung vor. (HOLZMANN, 2006)

Indexverfahren setzten diese meteorologischen Größen in direkter, linearer Beziehung zu den Schmelzraten. Es wird also keine tatsächliche Strahlungsbilanz oder Energiebilanz berechnet, die Ablation der Schneedecke bzw. des Gletschers ist nur von den gemessenen Strahlungs- und Temperaturwerten, sowie den Modellparametern abhängig.

In dieser Arbeit kommen 3 Schmelzverfahren zum Einsatz:

- Temperaturindexverfahren (Grad Tag Verfahren)
- Strahlungsindexverfahren
- Kombiniertes Verfahren

2.2 Modellgrundlagen

Das Modell rechnet mit einer Höhendiskretisierung von 100 m - Zonen, innerhalb einer Höhenzone wird die Akkumulation und Schmelze als konstant betrachtet, es handelt sich demnach um ein höhenverteiltes Modell.

Tabelle 2.1 stellt die Flächenanteile der Höhenzonen als Absolutwerte und in Prozent der Gesamt Einzugsfläche dar, Abbildung 2.1 zeigt die Lage dieser Höhenzonen:

Tabelle 2.1: Flächenverteilung der Höhenzonen

Höhenzone	Gesamte Teilfläche		Gletscherfläche	
	<i>km²</i>	<i>Prozent</i>	<i>km²</i>	<i>Prozent</i>
2300-2400	0.124	4.57	0.035	2.34
2400-2500	0.328	12.11	0.191	12.79
2500-2600	0.320	11.81	0.052	3.48
2600-2700	0.949	35.03	0.656	43.94
2700-2800	0.497	18.35	0.173	11.59
2800-2900	0.211	7.79	0.119	7.97
2900-3000	0.219	8.08	0.206	13.79
3000-3100	0.061	2.25	0.061	4.09
Gesamt	2.709	100.0	1.493	100.0

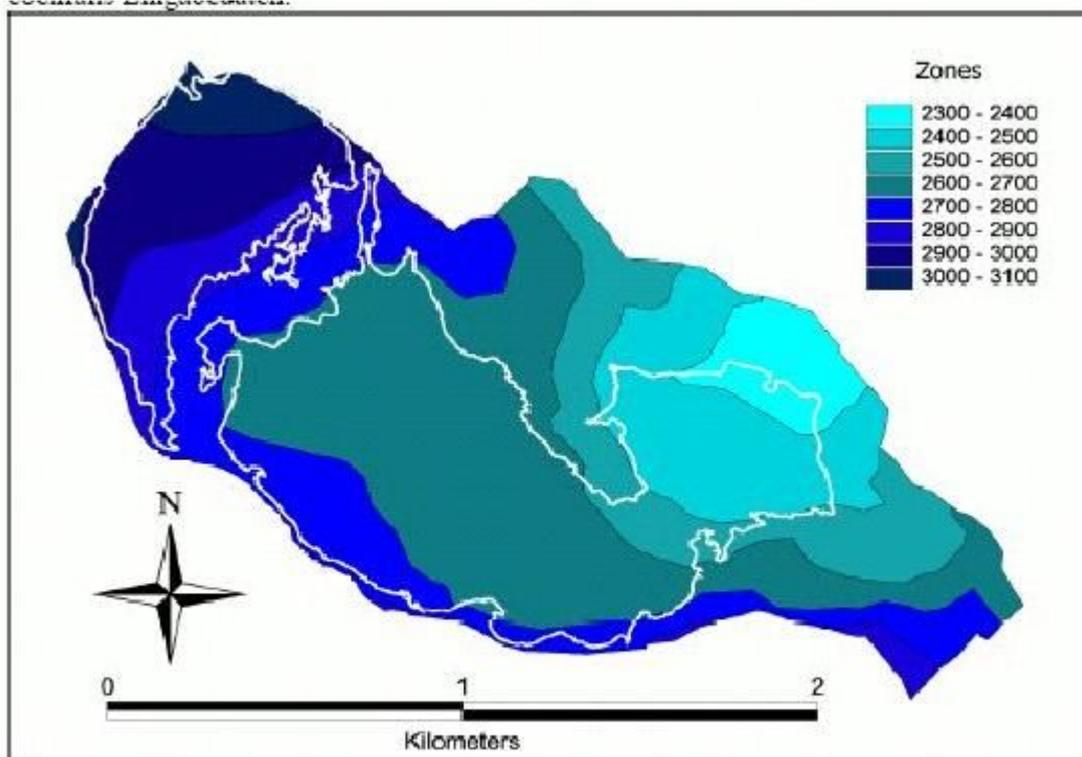


Abb 3.25: Darstellung des Einzugsgebietes rund um das Goldbergkees (weiße Linien umranden den Gletscher) unterteilt in die acht Höhenzonen zu je 100m. (KOBOLTSCHNIG G. in prep.)

Abbildung 2.1: Höhenzonen (KOBOLTSCHNIG et al., 2007)

Der Input des Modells gliedert sich allgemein in einen meteorologischen und einen einzugsgebietsabhängigen Teil. Die einzugsgebietsabhängigen Daten sind die Flächenverteilung (in km²) der einzelnen Höhenzonen und der vergletscherte Anteil der jeweiligen Höhenzone.

Abhängig vom gewählten Schmelzverfahren werden folgende meteorologische Eingangsdaten berücksichtigt:

Niederschlag [mm]	(alle Verfahren)
Temperatur [°C]	(Temperaturindex, Kombiniertes Verfahren)
Strahlung [J/m ²]	(Strahlungsindex, Kombiniertes Verfahren)

Alle Größen sind in stündlicher Auflösung vorhanden und werden auch in dem Modell als solche verwendet.

Die Modellstruktur zeigt Abbildung 2.2:

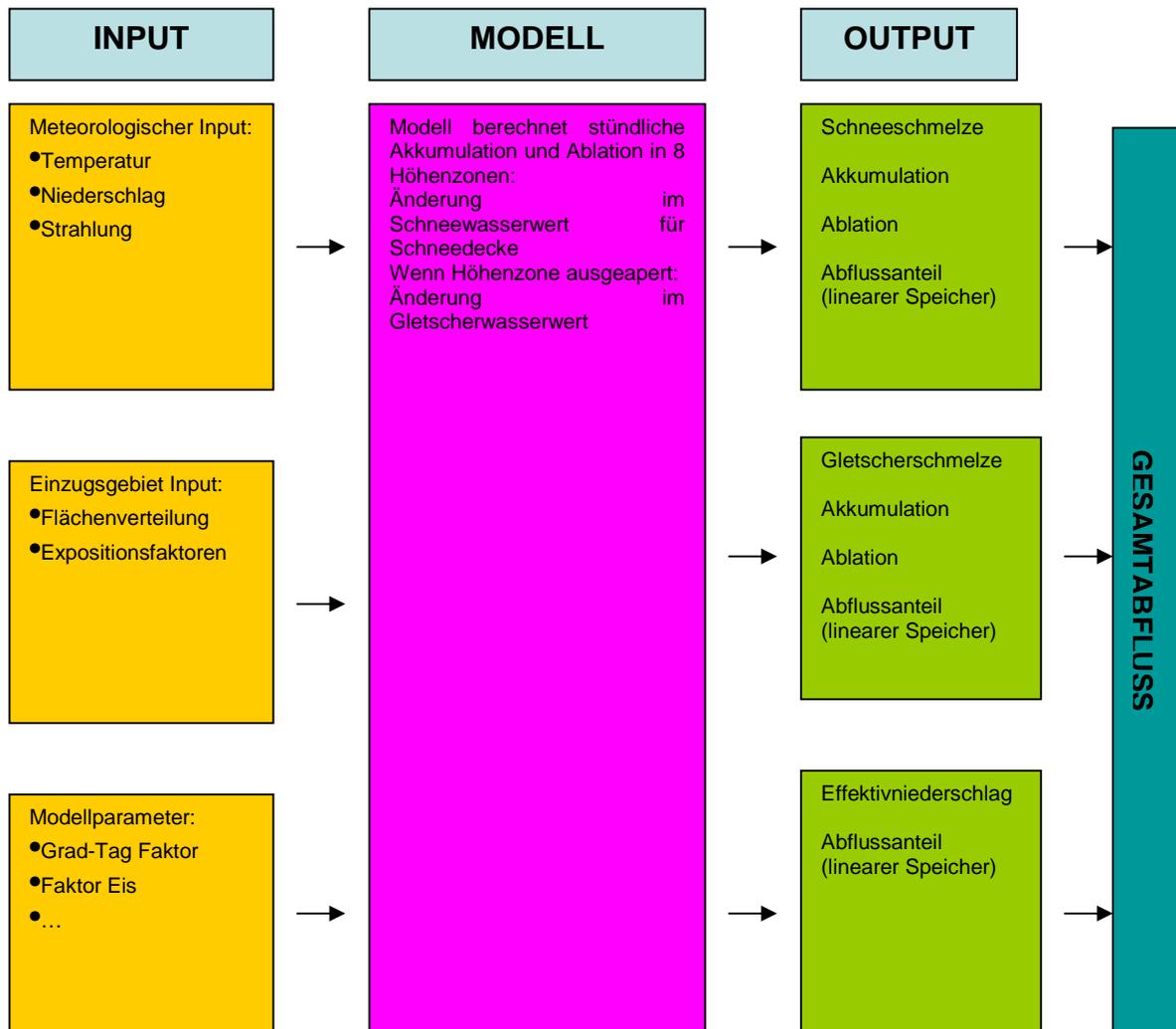


Abbildung 2.2: Modellstruktur

2.3 Modellparameter

Die Modellparameter werden über ein eigenes Inputfile im .txt Format eingelesen. Insgesamt arbeitet das Modell mit 24 Parametern, die die Akkumulation und Schmelze beeinflussen. Einige davon können aber optional nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 2.2 zeigt eine Aufstellung der einzelnen Parameter, die typischen Werte beruhen auf den Ergebnissen dieser Arbeit.

Tabelle 2.2: Modellparameter

Kurzbezeichnung	Erläuterung	Typische Werte
<i>Gletscherschmelze</i>	Berücksichtigung von Gletscherschmelze	0=nein, 1=ja
<i>altref</i>	Seehöhe der Referenztemperaturmessstelle [m]	3104
<i>igeb</i>	Nummer (Codierung) des Berechnungsgebiets	1
<i>hypsgrad</i>	Hypsometrischer Gradient (Temperaturgradient / Lapse Rate) [°C/m]	-0.007
<i>radgrad</i>	Strahlungsgradient [W/m²h]	0.055
<i>thres</i>	Schmelztemperatur (Schwellenwert in °C)	0 bzw. 1
<i>fak</i>	Grad-Tag Faktor für Schnee	2 bis 4
<i>fakice</i>	Grad-Tag Faktor für Eis	6 bis 8
<i>fakrad</i>	Strahlungsfaktor für Schnee	0.02 bis 0.15
<i>fakradice</i>	Strahlungsfaktor für Eis	0.01 bis 0.25
<i>alpha</i>	Gewichtungsfaktor Temperaturindexanteil	0.5 bis 0.9
<i>beta</i>	Gewichtungsfaktor Strahlungsindexanteil	0.1 bis 0.5
<i>ansalb</i>	Mindestniederschlag (mm), ab dem albedo zurückgesetzt wird	4 bis 6
<i>ishift</i>	Minimumwert (Tageszahl des hydrol. Jahres) des jahreszeitlich variierenden Gradtag-Faktors (31.Jänner)	122
<i>shift</i>	Maximum des Tagestemperaturgang (Stunde 15h)	15
<i>reduc</i>	Reduktionsfaktor / Streckungsfaktor des Tagesgangs (Gewichtung)	1 (noch ohne Funktion)
<i>famp</i>	Jahresamplitude (+/-) des Grad-Tag-Faktors	1 bis 2
<i>tamp</i>	Jahresamplitude (+/-) der Schwellentemperatur	0.1 bis 0.5
<i>meltmethod</i>	Methode der Schmelzberechnung	1=Temperaturindex 2=Strahlungsindex 3=Kombiniertes Verfahren
<i>ialb</i>	Berücksichtigung von albedo	0=nein, 1=ja
<i>icc</i>	Verwendung von "Cold-Content"	0=nein, 1=ja
<i>iexp</i>	Verwendung von Expositionsgewichtung	0=nein, 1=ja
<i>aksnow</i>	Speicherkoefizient für Schneeschmelze	5 bis 30
<i>akice</i>	Speicherkoefizient für Eisschmelze	5 bis 30
<i>akrain</i>	Speicherkoefizient für Effektivregen	5 bis 15

Weiters können Anfangsschneehöhen (in mm Schneewasserwert) in das Modell eingegeben werden.

2.4 Höhengradienten

Temperatur und Strahlung sind stark höhenabhängige Größen. Während die Lufttemperatur mit der Höhe abnimmt, nimmt die Strahlung in höheren Lagen zu.

Für die Lufttemperatur beträgt der Richtwert $0,65^{\circ}\text{C}$ pro 100m , dem entsprechend arbeitet das Modell mit einem (frei veränderlichen) Temperaturgradient von $-0,007^{\circ}\text{C}$ pro zusätzlichem Meter Seehöhe (*hypsograd*). Der Temperaturunterschied zwischen der untersten und obersten Höhenzone (2350m und 3050m) beträgt demnach durchschnittlich $4,9^{\circ}\text{C}$. Dieser Parameter wurde im Laufe dieser Arbeit als konstant betrachtet.

Die Globalstrahlung nimmt mit der Höhe exponentiell zu, da die Dichte der Luft im gleichen Maße abnimmt. Für die Zwecke dieser Arbeit genügt eine lineare Approximation, der Strahlungsgradient beträgt $0,055 \text{ J/cm}^2$ pro Höhenmeter (*radgrad*).

Die Berechnung der Temperatur- und Strahlungswerte für die einzelnen Höhenzonen erfolgt ausgehend von einer Referenzmessstelle (*altref*, hier 3104m) für die mittlere Höhe jeder Zone: z.B. die Höhenzone $2300 - 2400\text{m}$ rechnet mit der Temperatur und Strahlung in 2350m Seehöhe

Eine genauere Betrachtung der Höhenabhängigkeit von Temperatur und Strahlung und die Ermittlung der hier verwendeten Gradienten findet sich in der Arbeit von FLIEDL (2005).

2.5 Saisonale Verteilung des Grad-Tag Faktors

Der Grad-Tag Faktor variiert mit der Schneeflächenart, dem Grad der Verschmutzung, der Albedo und der Schneemetamorphose. Typisch ist ein niedriger Tag-Grad-Faktor zu Beginn des Winters, wie $C_{\min} = 0,5 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}/\text{d}$ am 21. Dezember und ein hoher Faktor im Spätwinter, wie $C_{\max} = 3,6 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}/\text{d}$ am 21. Juni. Zwischen diesen Tagen verteilt sich der Grad-Tag-Faktor modellhaft über die Jahreszeiten mit einer Sinusfunktion (ANDERSON, 1973).

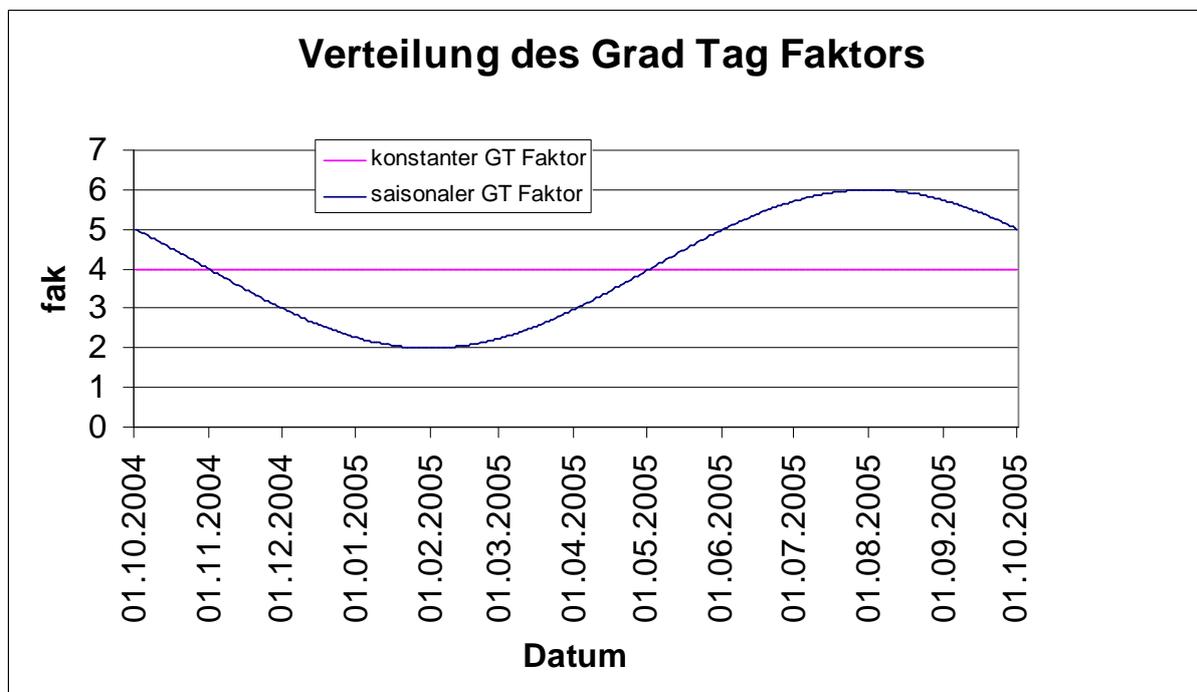


Abbildung 2.3: Saisonale Verteilung des Grad-Tag Faktors

Das Modell berücksichtigt die saisonale Verteilung des Grad-Tag Faktors mit Hilfe des Parameters *famp*.

2.6 Saisonale Verteilung der Schwellentemperatur

Analog der Verteilung des Grad-Tag Faktors kann das Modell auch eine Verteilung der Schwellenwerttemperatur (Temperatur, ab der Schmelze im Modell theoretisch stattfinden kann) in die Berechnung mit einbeziehen. Die Größe der saisonalen Schwankung (Amplitude) steuert der Parameter *tamp*.

2.7 Albedo

Neuschnee reflektiert die einfallende Strahlung um vieles stärker als eine ältere Schneedecke. Der Energieeintrag ist dementsprechend stark verringert und die Schmelzrate geringer. Das Verhältnis einfallender zu reflektierter Strahlung wird als Albedo bezeichnet.

Das Modell trägt diesem Effekt Rechnung durch Einführung eines Albedofaktors. Bei Überschreitung einer Mindestneuschneemenge (*ansalb*) wird der Grad Tag Faktor mit dem Abminderungsfaktor gemäß Formel 2.1 multipliziert.

$$albfak_k = 1 - \exp\left(\frac{-idayalb_k}{fakk}\right) \quad \text{Formel 2.1}$$

Formel 2.1 Albedofaktor

Wobei:	<i>albfak</i>	Albedofaktor
	<i>idayalb</i>	Alter der Neuschneedecke in Tagen
	<i>fakk</i>	Exponent (default = 4.0)
	<i>k</i>	Index der Höhenzone

Abbildung 2.4 zeigt die zeitliche Entwicklung des Albedofaktors.

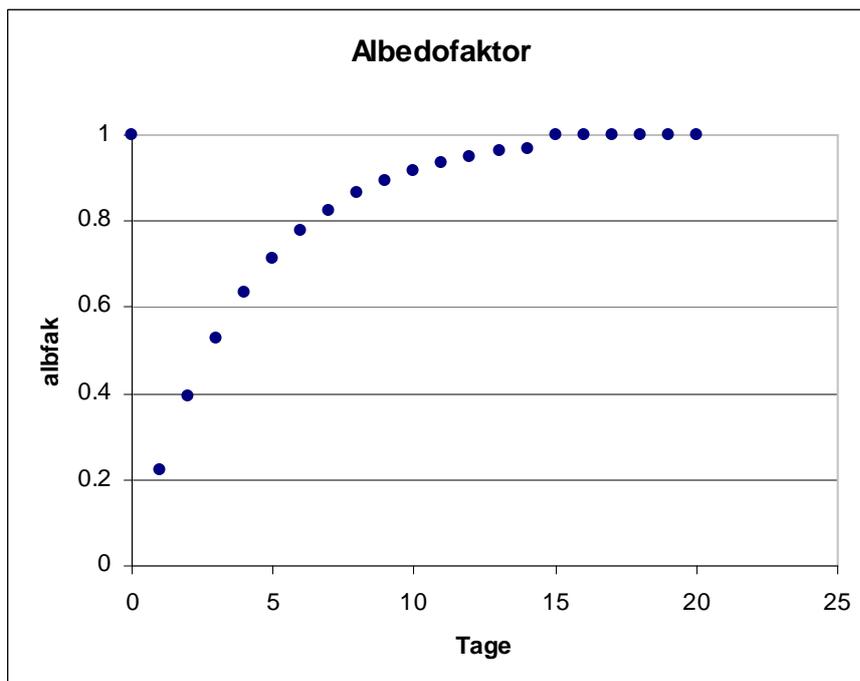


Abbildung 2.4: Zeitlicher Verlauf des Albedofaktors

Am ersten Tag nach Neuschneefall wird die Schmelze auf etwa 22 % gegenüber der potentiellen Schmelze reduziert, nach 5 Tagen nur mehr auf 71 %, nach 10 Tagen 91 %. Die Albedo wird über maximal 14 Tage berücksichtigt, danach wird der Abminderungsfaktor wieder gleich 1 gesetzt.

Die Verwendung des Albedofaktors ist im Modell optional, sie wird durch den Parameter *ialb* gesteuert.

Die Kombination von Albedo und der saisonalen Verteilung des Grad Tag Faktors ergibt starke Schwankungen im Verlauf des Grad-Tag Faktors. Abbildung 2.5 zeigt diesen Verlauf für das hydrologische Jahr 2004/2005.

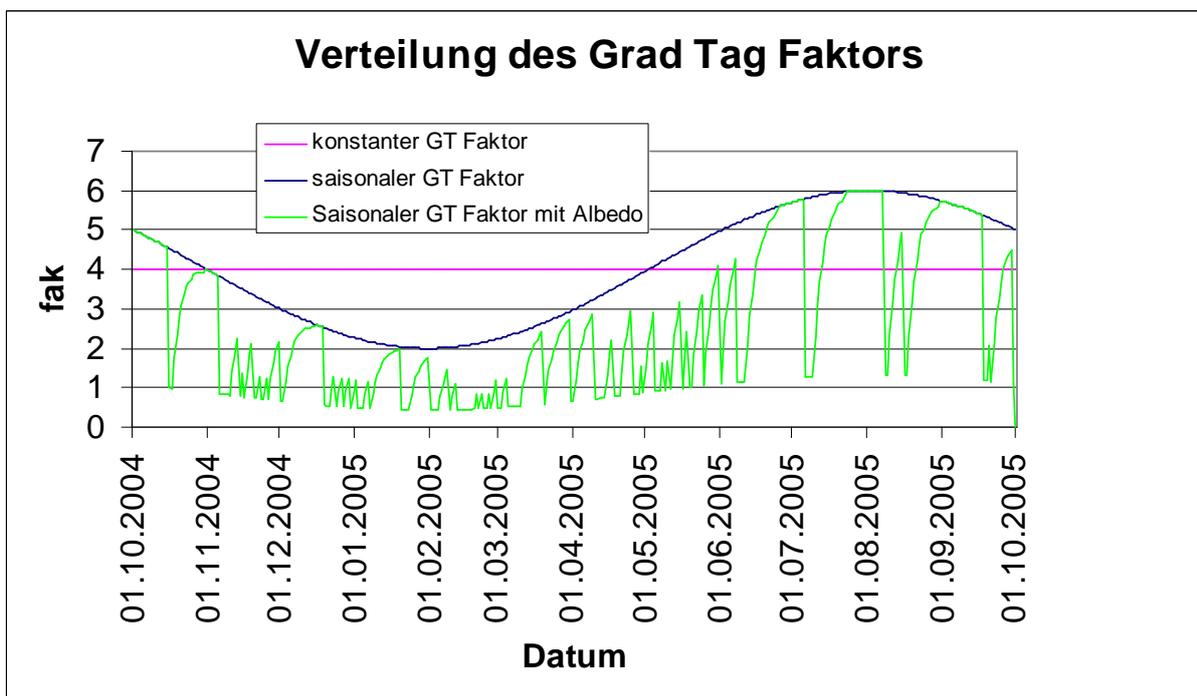


Abbildung 2.5: Verteilung des Grad-Tag Faktors 2005

Für eine Betrachtung der Auswirkungen des Albedofaktors auf die Ergebnisse sei auf Kapitel 5, Sensitivitätsanalysen verwiesen.

2.8 Cold Content

Besonders am Anfang der Schmelzphase im Frühjahr hat die Schneedecke infolge des bis dahin begrenzten Wärmeeintrages noch nicht den Aufbereitungsgrad (Feuchtegrad) für ein wirksames Abschmelzen erreicht. Daher erfolgte bei der alten Programmversion zum Teil eine Überschätzung bzw. ein zu frühes Einsetzen der Schmelze.

Daher wurde ein so genannter „Cold Content“ bzw. „Kälteinhalt“ der Schneedecke definiert, der als Schwellenwert festlegt, ob bereits Schmelze auftreten kann oder nicht. Dieser Kälteinhalt wurde aus der Summe der mittleren Tagestemperaturen der letzten 3 Wochen (21 Tage) berechnet. Als Referenztemperatur wird dabei die Temperatur der ausgewiesenen Referenzhöhe verwendet. Für die einzelnen Höhenzonen wird der Temperaturverlauf der

letzten 3 Wochen anhand der Referenztemperatur unter Berücksichtigung des Standard Temperaturgradienten berechnet.

$$cc_j = \sum_{k=1}^{21} tempref_k \cdot (hypsgrad \cdot (gebalt_j - altref)) \quad \text{Formel 2.2}$$

Formel 2.2: Cold Content

Wobei:	<i>cc</i>	Cold Content der Höhenzone j
	<i>tempref</i>	Mittlere Tagestemperatur in der Referenzhöhe
	<i>hypsgrad</i>	Temperaturgradient
	<i>gebalt</i>	mittlere Höhe der Höhenzone j
	<i>altref</i>	Referenzhöhe (3104m)

Falls der Wert des Kälteinhaltes *cc* größer als die Schmelztemperatur *thres* ist, erfolgt eine Schmelze, falls kleiner dann wird die Schmelze unterbunden. Durch Differenzierung der Höhenzonen kann in den unteren Gebieten bereits Schmelze möglich sein, hingegen ist in höheren Zonen der Aufbereitungsgrad unter Umständen noch nicht gegeben. (HOLZMANN, 2006)

Die Verwendung des Cold Content ist im Modell optional, sie wird durch den Parameter *icc* gesteuert.

Für eine Betrachtung der Auswirkungen des Cold Content auf die Ergebnisse sei wiederum auf Kapitel 5, Sensitivitätsanalysen verwiesen.

2.9 Expositionsgewicht

Eine Höhenstufe eines Teileinzugsgebietes wird im Modell innerhalb eines Berechnungszeitschrittes als homogene Fläche mit konstanter Temperaturverteilung und Schneebedeckung (Höhe in Wasseräquivalent) angesehen. Tatsächlich finden wir in einem realen Gebiet in einer Höhenstufe unterschiedliche Expositionen vor, die auch einem unterschiedlichen Energieeintrag unterworfen sind. Dadurch ist der tatsächliche Schmelzprozess als räumlich heterogen anzusehen.

Um dies zu berücksichtigen und dennoch bei dem Konzept der Höhendiskretisierung zu bleiben, wurden mit Hilfe räumlicher Analysen die Hauptexpositionsklassen innerhalb der Höhenzonen ermittelt. Als Basis für die Analyse wurde ein Digitales Höhenmodell mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 Metern zugrunde gelegt. Es wurden 9 Expositionsklassen festgelegt. Für jede Klasse wird ein so genannter Flächenfaktor definiert. Daraus wird gemäß Formel 2.3 der Expositionsfaktor *exfak* der Höhenzone berechnet. Dieser wirkt als Multiplikationsfaktor (Erhöhungs- oder Dämpfungsfaktor) in der Schmelzberechnung. (HOLZMANN, 2006)

$$exfak = \frac{1}{100} \cdot \sum_{k=1}^9 exarea_k \cdot ff_k \quad \text{Formel 2.3}$$

Formel 2.3: Expositionsfaktor

Wobei:	<i>exfak</i>	Expositionsfaktor einer 100m Höhenzone
	<i>exarea</i>	Flächenanteil (in Prozent) der Expositionsklasse k
	<i>ff</i>	Flächenfaktor der Expositionsklasse k
	<i>k</i>	Index der Expositionsklasse (von 1 bis 9)

Tabelle 2.3: Expositionsklassen und Multiplikationsfaktoren ff

Nr.	Exposition	Flächenfaktor <i>ff</i>
1	Horizontal (maximal 3 Grad Neigung)	1.000 (nicht vorhanden)
2	Nord	0.969
3	Nordost	0.977
4	Ost	0.955
5	Südost	1.279
6	Süd	0.987
7	Südwest	1.049
8	West	0.868
9	Nordwest	0.916

Zur Bestimmung der Flächenfaktoren wurden vom Kollegen Michlmayr im flächenverteilten Modell Alpine 3D (LEHNING et al., 2005) in der Höhenzone 2700-2800m für jede Exposition eine repräsentative Zelle ausgewählt und die Schmelzraten für das Jahr 2003/2004 berechnet. Danach wurden die einzelnen Schmelzraten zueinander in Verhältnis gesetzt und so die Flächenfaktoren bestimmt. Alle ausgewählten Zellen haben zur besseren Vergleichbarkeit eine Neigung zwischen 20 und 30°. Diese Werte sind abhängig von diesem speziellen Einzugsgebiet. Allgemein würde man erwarten, dass Süd den höchsten und Nord den geringsten Flächenfaktor aufweist. Die Lage und Neigung der ausgewählten Zellen spielt bei der Berechnung eine entscheidende Rolle, Abschattungen und Verfrachtungen tragen ebenso zum Ergebnis bei.

Die Verwendung des Expositionsfaktors ist im Modell optional, sie wird durch den Parameter *iexp* gesteuert.

Für eine Betrachtung der Auswirkungen des Expositionsfaktors auf die Ergebnisse sei abermals auf Kapitel 5, Sensitivitätsanalysen verwiesen.

2.10 Speicherkoeffizienten

Die berechneten Größen für Schneeschmelze, Gletscherschmelze und effektiven Niederschlag ergeben große Spitzen, welche die direkten Abflüsse nicht genügend genau nachbilden. Fließzeiten und Retentionseffekte spielen eine große Rolle in der Abflussbildung. Um dieser Tatsache gerecht zu werden durchlaufen die Einzelergebnisse lineare Speicher.

Ein Einzellinearspeicher ist dadurch gekennzeichnet, dass sein Ausfluss q stets proportional zum Speicherinhalt s ist. Aus der Speichergleichung und der Kontinuitätsgleichung ergibt sich die Differentialgleichung des Einzellinearspeichers. (NACHTNEBEL, 2003)

$$s = k \cdot q \quad \text{Formel 2.4}$$

Formel 2.4: Speichergleichung

$$q = p - \frac{ds}{dt} \quad \text{Formel 2.5}$$

Formel 2.5: Kontinuitätsgleichung

$$q = p - k \cdot \frac{dq}{dt} \quad \text{Formel 2.6}$$

Formel 2.6: Differentialgleichung

Wobei:

k	Speicherkonstante
s	Speicherinhalt
$p(t)$	Zufluss
$q(t)$	Abfluss

Die 3 Speicherkonstanten für Schnee- und Gletscherschmelze, sowie Effektivregen werden durch die Parameter $aksnow$, $akice$ und $akrain$ gesteuert.

2.11 Berechnungsoptionen der Schneeschmelze

Das Temperaturindexverfahren verwendet folgenden Berechnungsansatz:

$$q_s = \frac{1}{dt} \cdot fak \cdot (T_{pos} - T_{thres}) \quad \text{Formel 2.7}$$

Formel 2.7: Temperaturindex - Schmelzformel

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Grad-Tag Faktor fak für die Tageswertbilanzierung gilt. Bei kürzeren Berechnungsintervallen ist durch die Anzahl der Intervalle dt zu dividieren.

Das Strahlungsindexverfahren verwendet folgenden Ansatz:

$$q_s = \frac{1}{dt} \cdot fakrad \cdot RAD \quad \text{Formel 2.8}$$

Formel 2.8: Strahlungsindexverfahren - Schmelzformel

Das Kombinierte Verfahren (Temperatur- / Strahlungsindex Verfahren) berücksichtigt sowohl die Temperatur wie auch die Strahlung in der folgenden Form.

$$q_s = \frac{1}{dt} \cdot (\alpha \cdot fak \cdot (T_{pos} - T_{thres}) + \beta \cdot fakrad \cdot RAD) \quad \text{Formel 2.9}$$

Formel 2.9: Kombiniertes Verfahren - Schmelzformel

Wobei:

q_s	Schmelzrate in mm
α	Gewichtungsfaktor des Temperaturanteils
β	Gewichtungsfaktor des Strahlungsanteils
fak	Temperaturindex (Grad-Tag Faktor)
$fakrad$	Strahlungsindex
T_{pos}	positive Lufttemperatur im Zeitintervall
T_{thres}	Schmelztemperatur

RAD Globalstrahlung im Zeitintervall

Bei optionaler Berücksichtigung des Expositionsfaktors, der Albedo und des Kälteinhaltes (Cold Content) der Schneedecke wird das nachfolgende Produkt zu den Formeln 2.7 bis 2.9 hinzugefügt.

$$albout(k) \cdot ccout(k) \cdot exfak(k)$$

Formel 2.10

Formel 2.10: Zusatzmodule - Multiplikationsfaktoren

Dabei ist der Index k für die einzelne Höhenzone anzusetzen. (HOLZMANN, 2006)

2.12 Arbeiten mit dem Modell

Das Arbeiten mit dem Modell gestaltet sich folgendermaßen: zunächst ist ein umfangreiches Pre-Processing erforderlich, sowohl um die meteorologischen Daten (Gebietsniederschlag, meteorologisches Input File), als auch um die vom Einzugsgebiet abhängigen Daten (Flächenanteile, vergletscherte Teilflächen, Expositionsgewicht) vorzubereiten.

Nach dem Setzen der Modellparameter im Input File, dauert der eigentliche Rechengang auf einem aktuellen Notebook oder PC (hier: 1.5 GHz, 512 MB RAM) wenige Sekunden für einen Simulationszeitraum von einem Jahr. Die Auswertung erfolgte für diese Arbeit in Microsoft Excel mittels selbst erstellten Formblättern, so dass von Versuch zu Versuch nur mehr ein Aktualisieren der Ergebnisse erforderlich ist. Ein einzelnes Ergebnis File hat eine Größe von etwa 3.5 MB, das heißt über längere Versuchsreihen ergeben sich beträchtliche Datenmengen.

Zum Vergleich der einzelnen Versuche untereinander wurden Teilergebnisse in ein Ergebnisfile importiert und teilweise graphisch aufgearbeitet.

Insgesamt wurden für diese Arbeit über 450 Versuche in allen 3 Verfahren durchgeführt. Diese Versuche sind aufgrund des größten Parametersatzes beinahe zur Hälfte im Temperaturindexverfahren, und zu jeweils einem Viertel im Strahlungsindexverfahren und im Kombinierten Verfahren. Für das Kombinierte Verfahren wurden Teilergebnisse von den anderen Verfahren übernommen.

2.13 Modelloutput

Der Modelloutput erfolgt getrennt für Tages- und Stundenwerte in jeweils 5 Output Dateien, zusätzlich noch 2 Files für Albedo Werte (nur in Tageswerten) und Systemzustand. Die einzelnen Files im Detail sind:

- sfh.txt: aktuelle Stundenwerte der Tageszahl, Schmelzrate in mm in den 100-Meter Höhenstufen und gewichtete Gesamtschmelze in mm, sowie berechneter Gesamtabfluss in m³/s und aktueller Cold-Content
- soh.txt: aktuelle Stundenwerte der Tageszahl, des wirksamen Niederschlags in mm und der Schneeakkumulation in den 100-Meter Höhenstufen in mm Wasserwert
- gfh.txt: aktuelle Stundenwerte der Tageszahl, Gletscherschmelzrate in mm den 100-Meter Höhenstufen und gewichtete Gesamtschmelze in mm

- goh.txt: aktuelle Stundenwerte der Tageszahl, der Gletscherwasseräquivalente in den 100-Meter Höhenstufen in mm Wasserwert.
- sf.txt, so.txt, gf.txt, go.txt: die entsprechenden Files mit Tages- anstelle von Stundenwerten
- about.txt: Tageswerte für den Albedofaktor in den 8 Höhenzonen
- system.txt: Parameterwerte, die den Systemzustand kennzeichnen (*thres, fak, fakice, fakrad, fakradice, α , β , ishift, shift, reduc, famp, tamp, iexp, icc, ialb, meltmethod*)

3 Datenbasis für die Modellierung

Dieses Kapitel soll eine Übersicht über die verwendeten meteorologischen Daten für die Modellierung bieten.

Das Goldbergkees ist ein gut dokumentiertes Einzugsgebiet in dem zahlreiche meteorologische Messungen stattfinden. Insbesondere werden die Daten vom Observatorium am Gipfel als Eingangsgrößen für Temperatur und Strahlung verwendet.



Abb 2.3: Detailausschnitt aus der ÖK50, Rauris154 mit Einzugsgebietsgrenzen

Abbildung 3.1: Übersicht über die Messstationen

3.1 Abflussmessung am Goldbergkees

Das Einzugsgebiet des Goldbergkees ist klar abgrenzbar, es gibt keine Zuflüsse von anderen Einzugsgebieten.

Strömung im Felsuntergrund und in bodennahen Schichten spielen im Falle des Goldbergkees sicher eine untergeordnete Rolle, da der anstehende Fels, Gneis der Zentralalpen, als praktisch wasserundurchlässig angesehen werden kann. Dadurch entwässert das gesamte Einzugsgebiet über den Gletschersee am Fuße des Unteren Goldbergkees in einen kleinen Gebirgsbach. Dort führt das Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau (IWHW)

auf Einladung der ZAMG seit September 2002 Abflussmessungen am Goldbergkees durch, wobei keine Messungen im Winter stattfinden.

Das ausgewählte Messprofil (Abbildung 3.1) ist wegen dem Felsuntergrund beständig, man kann auch von unveränderlichem Abfluss ausgehen, so dass die ermittelte Pegelschlüsselkurve über eine ganze Abflusssaison gültig ist. (KAUFMANN, FLIEDL, 2005)

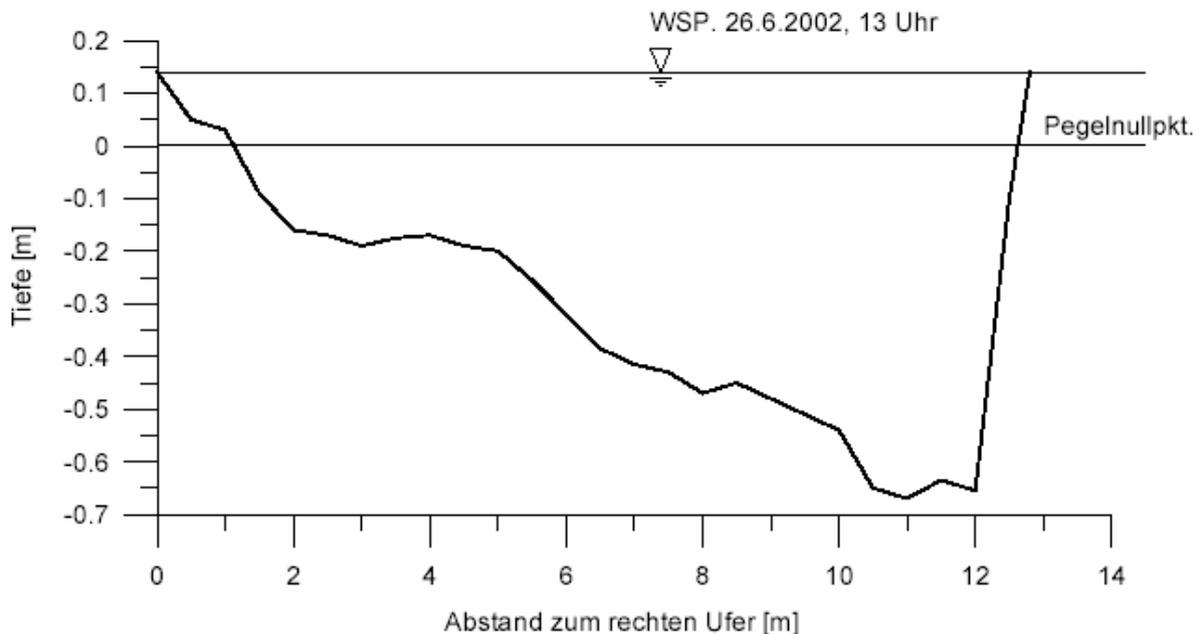


Abbildung 3.1: Pegelprofil

Am 5.9.02 wurde ein freistehender selbstregistrierender Messpegel aufgebaut. Die so genannte Microstation (Typ: Compact - Pneumatikpegel „Nimbus“ mit Modem und EPS 50 Einperltopf, Fa. Ott), arbeitet mit dem Ausperlprinzip: Der Widerstand, der unter Wasser der ausperlenden Druckluft am Ausperltopf an der tiefsten Stelle des Messprofils entgegengesetzt wird, entspricht dem hydrostatischen Druck und so dem aktuellen Wasserstand. Dieser wird auf einer Sensorkarte (Nimbus) aufgezeichnet und kann über ein eingebautes Modem telefonisch abgefragt werden. Ein Akku versorgt das elektronische System, aber vor allem die Kolbenluftpumpe, die je nach einstellbarem Messintervall (Messperiode 02: alle 15 min, Messperiode 2003: 10 minütig) Luftdruck im Röhrensystem bis zum Ausperltopf aufbaut bis zum Zeitpunkt des Ausperlens. Gegen Feuchtigkeit und mechanische Einwirkungen schützt eine Metallhaube, die die Innenteile abdeckt und mit einem Stahlbolzen und Vorhängeschloss gesichert ist. Weiter unten am Standrohr befindet sich die Antenne für die Fernabfrage. Den Fuß des Pegelrohrs bildet eine Stahlplatte, die mittels 4 Stahlschrauben am anstehenden Fels befestigt ist. (KAUFMANN, FLIEDL, 2005)

Tabelle 3.1 zeigt die für diese Arbeit relevanten Beobachtungszeiträume:

Tabelle 3.1: Beobachtungszeiträume der Abflussmessung

Jahr	Beginn der Messung		Ende der Messung	
	Datum	Uhrzeit	Datum	Uhrzeit
2003	7.7.	18:00	15.10.	0:00
2004	28.7.	16:00	7.11.	14:00
2005	9.7.	1:00	31.9.	0:00

Während sich die Beobachtungszeiträume für 2003 und 2005 annähernd decken, fand die Abflussmessung 2004 um beinahe einen Monat später statt. Kursiv geschriebene Jahreszahlen stehen in weiterer Folge, sofern nicht anders angegeben, für den gesamten Beobachtungszeitraum der Abflussmessung des entsprechenden Jahres. Die Messungen weisen für diese Zeiträume nur 2 Lücken auf, beide im Herbst 2004.

Tabelle 3.2: Messlücken der Abflussmessung

Jahr	Beginn der Messlücke		Ende der Messlücke	
	<i>Datum</i>	<i>Uhrzeit</i>	<i>Datum</i>	<i>Uhrzeit</i>
2004	26.10.	12:00	28.10.	1:00
2004	1.11.	0:00	3.11.	6:00

Die Abflusssummen für die einzelnen Beobachtungszeiträume zeigt Tabelle 3.3:

Tabelle 3.3: Abflusssummen

	beobachteter Abfluss [m³]	mittlerer Tagesabfluss [m³/d]	mittlerer Abfluss [m³/s]
<i>2003</i>	6349648	63976	0.74
<i>2004</i>	5015286	49193	0.57
<i>2005</i>	6347336	75607	0.87

Aus den Messergebnissen werden durch Mittelwertbildung der 15 - Minuten - Werte die stündlichen Abflusswerte berechnet. Einen Vergleich der Abflussganglinien in stündlicher Auflösung von Jahr zu Jahr zeigt Abbildung 3.2:

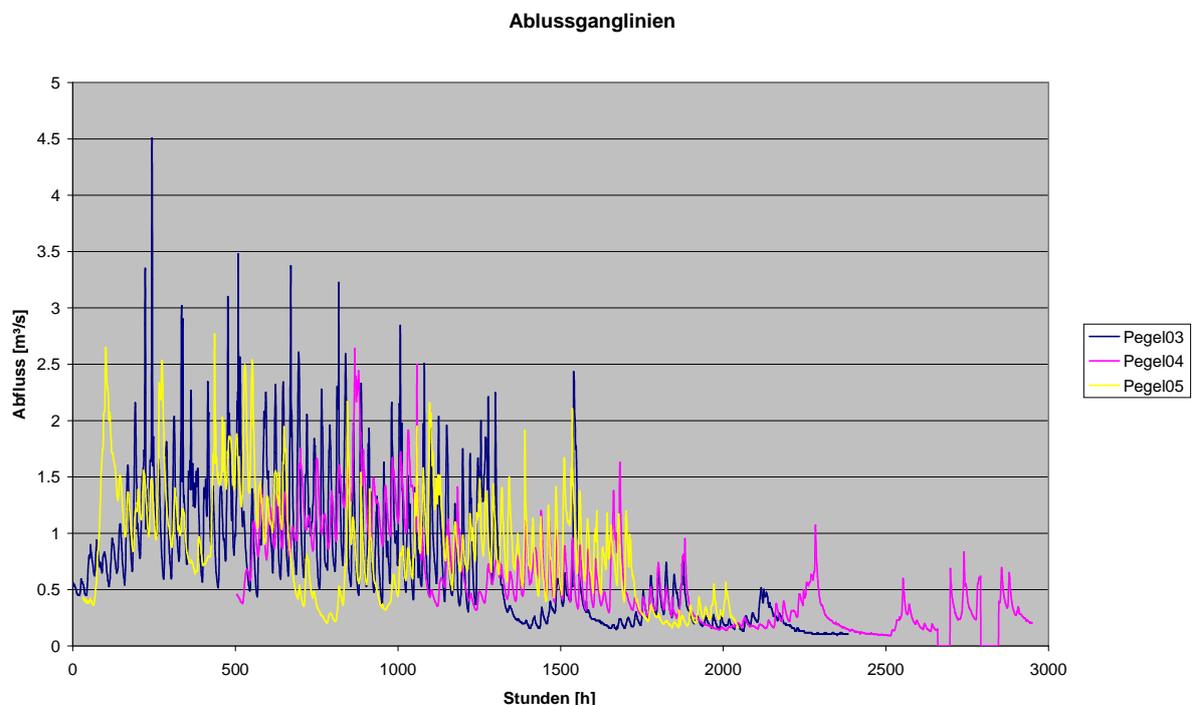


Abbildung 3.2: Abflussganglinien

Die Abflussspitzen für das Jahr 2003 sind deutlich höher als für 2004 und 2005. Später in der Saison weisen die Jahre 2004 und 2005 höhere Werte auf als 2003, wodurch sich die Abflusssummen wieder angleichen. Die hohen Abflussspitzen für 2003 lassen sich leicht durch den überdurchschnittlich heißen Sommer erklären. Der Schnee ist im Frühsommer sehr schnell abgeschmolzen, danach fand hauptsächlich Gletscherschmelze mit einem stark ausgeprägtem Tagesgang statt.

3.2 Temperaturmessung

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) betreibt mehrere Stationen im Einzugsgebiet. Für diese Arbeit werden die Temperaturdaten der Tageswetterstation Sonnblick herangezogen. Die Messung erfolgt über einen Halbleiter in 1/10°C.

Tabelle 3.4: Tageswetterstation - Lage

	Seehöhe	Länge	nördliche Breite
TAWES Sonnblick	3104m	12°57'29“	47°03'18“

Die Temperaturmessung weist im Zeitraum dieser Arbeit folgende Lücken auf:

Tabelle 3.5: Messlücken der Temperaturmessung

Jahr	Beginn der Messlücke		Ende der Messlücke	
	<i>Datum</i>	<i>Uhrzeit</i>	<i>Datum</i>	<i>Uhrzeit</i>
2002	1.10.	0:00	1.10.	0:00
	1.10	2:00	1.10.	8:00
	3.10.	7:00	3.10.	7:00
	3.10.	11:00	3.10	11:00
	8.10.	9:00	8.10.	9:00
	10.10.	7:00	10.10.	7:00
	11.10	9:00	11.10	9:00
	12.10	23:00	17.10.	8:00
	18.10	17:00	18.10.	17:00
	18.10.	20:00	18.10.	20:00
	19.10.	7:00	19.10.	7:00
	19.10.	10:00	19.10	13:00
	19.10.	15:00	19.10.	17:00
	19.10.	20:00	19.10.	20:00
	19.10.	22:00	19.10.	23:00
	20.10.	1:00	20.10.	3:00
	21.10.	17:00	22.10.	0:00
	22.10.	2:00	22.10.	5:00
	22.10.	11:00	22.10.	12:00
	22.10.	14:00	22.10.	14:00
	22.10.	17:00	22.10.	18:00
	22.10.	20:00	22.10.	20:00
	22.10.	22:00	25.10.	5:00
	25.10.	20:00	25.10.	20:00
	26.10.	12:00	26.10.	14:00

	26.10	20:00	26.10.	21:00
	27.10.	4:00	27.10.	4:00
	27.10.	7:00	27.10.	8:00
	29.10.	3:00	29.10.	5:00
	29.10.	12:00	29.10.	12:00
	31.10.	8:00	31.10.	9:00
	27.11.	10:00	27.11.	10:00
	1.12.	1:00	1.12.	6:00
	24.12.	11:00	24.12.	11:00
	26.12.	12:00	26.12.	12:00
	30.12.	16:00	30.12.	16:00
	31.12.	4:00	31.12.	5:00
2003	25.3.	14:00	25.3.	14:00
	9.4.	9:00	9.4.	9:00
	9.5.	19:00	12.5.	8:00
	28.5.	16:00	28.5.	16:00
	3.6.	7:00	3.6.	8:00
	5.6.	10:00	5.6.	10:00
	11.6.	1:00	11.6.	4:00
	13.6.	1:00	13.6.	14:00
	15.7	12:00	15.7.	13:00
	2.8.	23:00	3.8.	5:00
	22.8.	1:00	22.8.	1:00
	27.8.	8:00	27.8.	8:00
	27.8.	11:00	27.8.	11:00
	29.8.	22:00	29.8.	22:00
	30.8.	5:00	30.8.	6:00
	5.9.	16:00	5.9.	17:00
	1.10.	9:00	1.10.	10:00
	4.10.	4:00	4.10	5:00
	21.10.	2:00	1.11.	1:00
	17.11.	2:00	18.11.	1:00
2004	14.1.	10:00	14.1.	13:00
	27.1.	6:00	27.1.	7:00
	29.6.	22:00	30.6.	1:00
	17.7.	2:00	17.7.	5:00
	23.8.	20:00	24.8.	5:00
	17.11.	1:00	17.11.	7:00
	16.12.	2:00	16.12.	6:00
	23.12.	4:00	23.12.	5:00
2005	16.8.	22:00	17.8.	7:00

Das Modell rechnet im Zeitraum dieser Lücken mit der letzten bekannten Temperatur weiter.

Das kälteste hydrologische Jahr im Beobachtungszeitraum ist 2004 (1.10.2003 - 30.9.2004) mit einer Durchschnittstemperatur von -5.4°C , das Wärmste 2003 mit einer durchschnittlichen Temperatur von -4.8°C . 2005 liegt dazwischen mit einer Durchschnittstemperatur von -5.2°C . Abbildung 3.3 zeigt den Temperaturverlauf für die 3 hydrologischen Jahre (jeweils vom 1. Oktober bis zum 30. September). Trotz ausgeprägter kurzfristiger Schwankungen lässt sich

ein deutlicher Jahresverlauf erkennen mit den niedrigsten Temperaturen im Februar und den Höchstwerten im Juli.

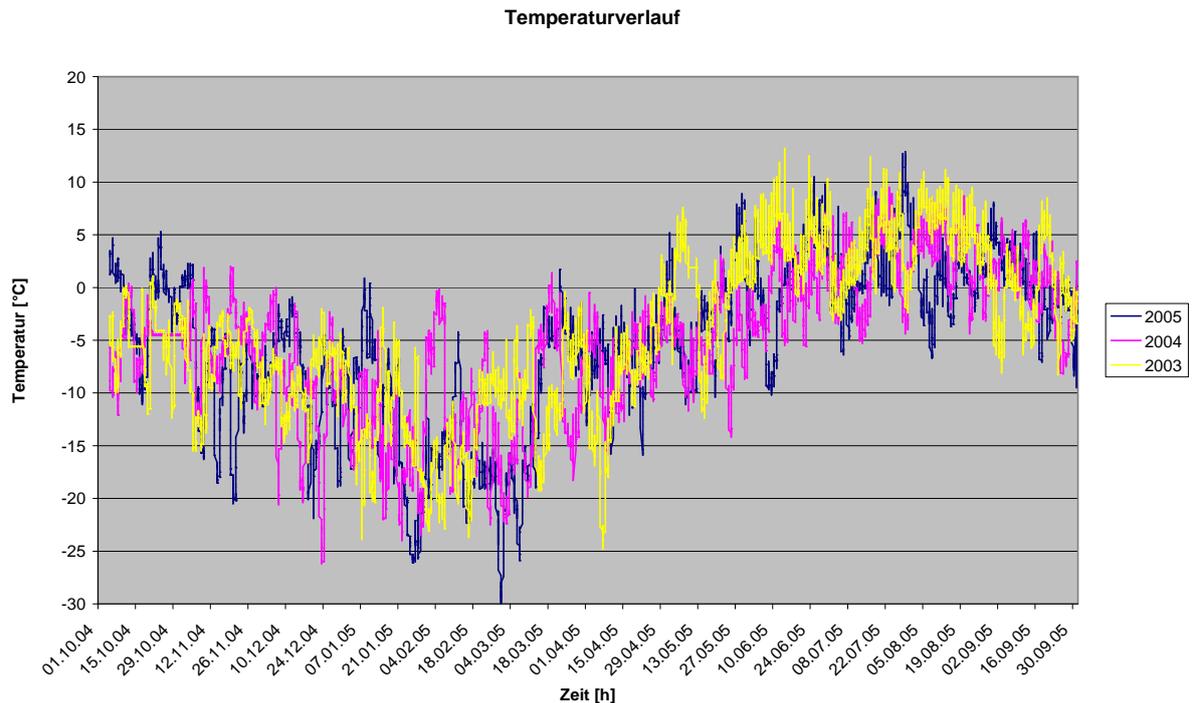


Abbildung 3.3: Temperaturverlauf

3.3 Strahlungsmessung

Unter Globalstrahlung versteht man die an der Erdoberfläche auf eine horizontale Empfangsfläche insgesamt eintreffende Solarstrahlung. Die Globalstrahlung setzt sich zusammen aus der Direkt- und der Diffusstrahlung (Strahlung, die über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreicht).

Die Momentanwerte der Globalstrahlung unterliegen wetterbedingt starken Schwankungen (Bewölkung, atmosphärische Trübung). Wegen des veränderlichen Einfallswinkels des Direktstrahlungsanteils ist die Globalstrahlung mittags stärker als morgens und abends, und im Sommer stärker als im Winter.

Die Messung der Globalstrahlung wird ebenfalls von der ZAMG am Sonnblickgipfel durchgeführt. Hier kommt ein Sternpyranometer (thermisch-elektrisch) zum Einsatz.

Tabelle 3.6: Tageswetterstation - Lage

	Seehöhe	Länge	nördliche Breite
TAWES Sonnblick	3104m	12°57'29"	47°03'18"

Die Strahlungsmessung weist keine Datenlücken auf.

Bei Betrachtung des Strahlungsganges kann man neben dem Tagesgang auch den saisonalen Gang beobachten. Während im Jänner die gemessenen Tageshöchstwerte nicht über 500 W/m² hinaus kommen, erreichen sie im Juni und Juli teilweise über 1000 W/m².

Die Abbildungen 3.4 bis 3.6 lassen deutlich den Jahresgang erkennen, Abbildung 3.7 zeigt eine Vergrößerung für die ersten 5 Tage des August 2003, hier sieht man deutlich den Tagesgang (und den Rückgang der Strahlung auf 0 in der Nacht)

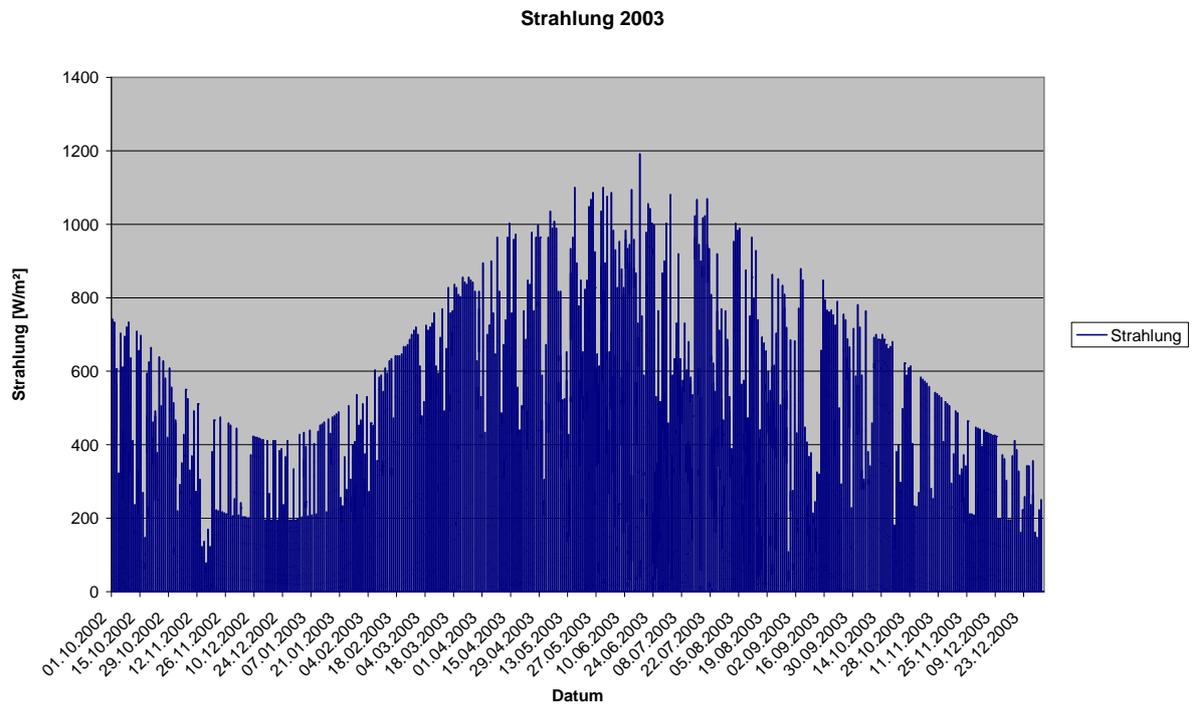


Abbildung 3.4: Strahlungsverlauf 2003

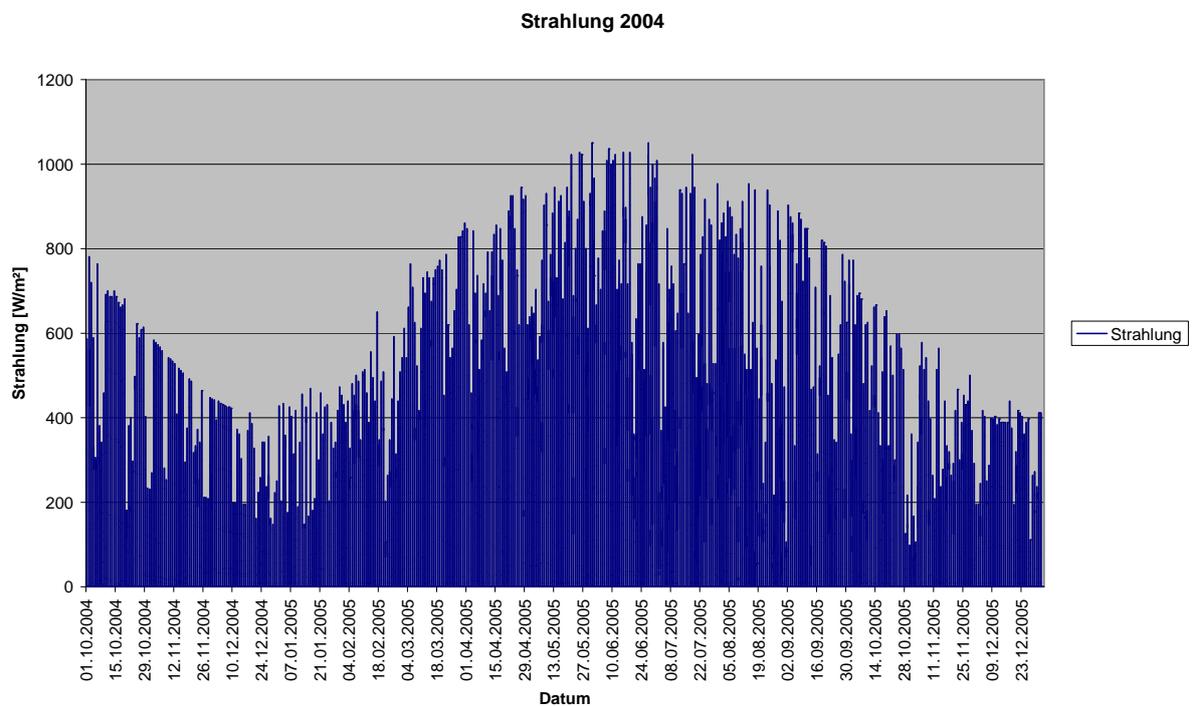


Abbildung 3.5: Strahlungsverlauf 2004

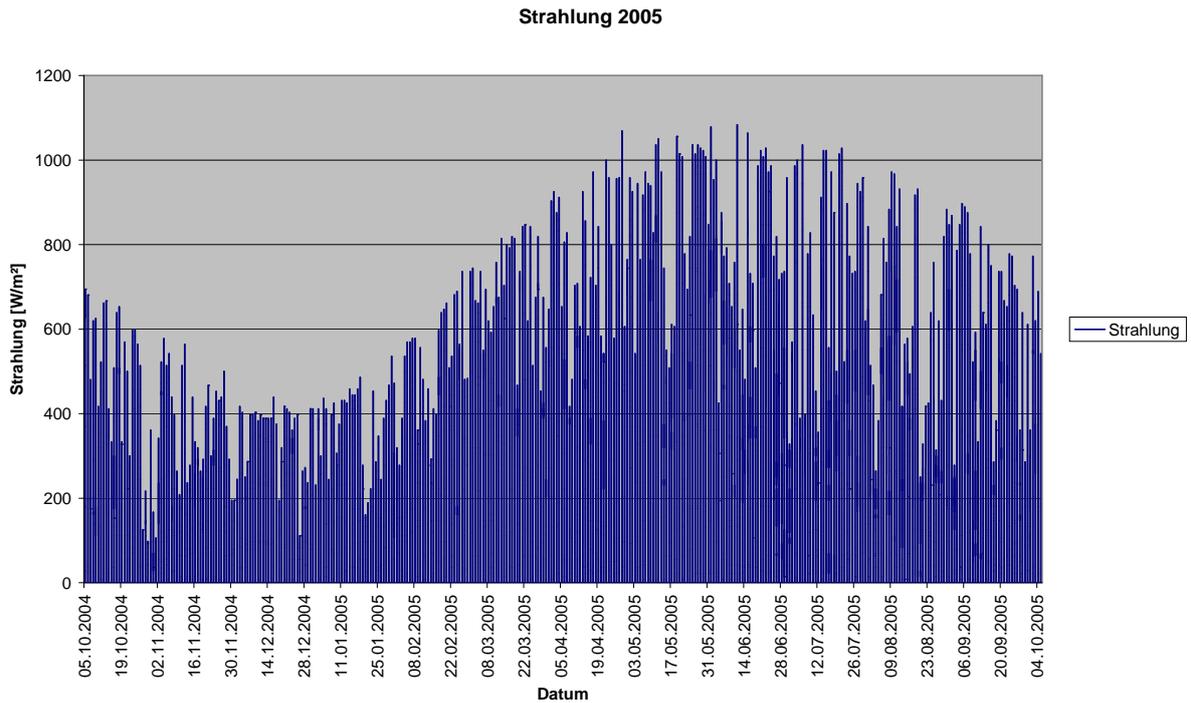


Abbildung 3.6: Strahlungsverlauf 2005

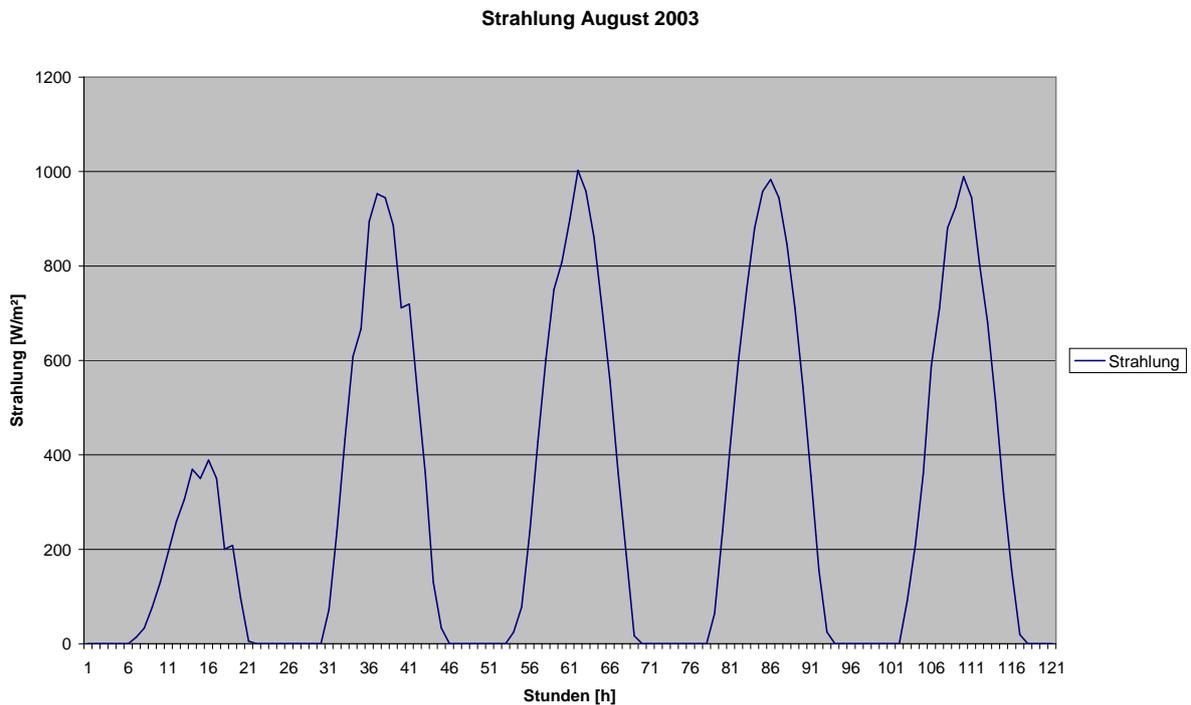


Abbildung 3.7: Strahlung an 5 Tagen des August 2003

3.4 Niederschlagsmessung und Korrektur

3.4.1 Niederschlagsmessung

Am Hohen Sonnblick wird über die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien (ZAMG) seit 1890 Niederschlag erfasst. Der fallende Niederschlag, der neben flüssigem

Regen als Schneefall, Reifgraupel, Eiskörner, Hagel etc. und deren Mischformen auftreten kann, wird aufgetaut und danach nach demselben Verfahren wie flüssige Niederschlagsformen bestimmt (AUER et al., 2002).

Der stündliche Niederschlag wird mittels einer Niederschlagswaage vom Typ 12R54 Kroneis bestimmt. Da die Niederschlagsmessung in stündlicher Auflösung große Ungenauigkeiten zeigt und eine einzelne Messung nicht repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet ist, wurde der Gebietsniederschlag aus 3 Messstellen bestimmt. Diese 3 Stationen sind:

Tabelle 3.7: Messstellen Niederschlag

	Seehöhe	X - Hochwert	Y - Rechtswert
Sonnblick – horizontal NS1	3095m	421495	212780
Radhaus NS14	2117m	423512	213275
unterhalb Rojacherhütte NS15	2585m	422610	212412

Der Gebietsniederschlag wurde mittels inverser Distanzgewichtung berechnet. Hiefür wurden Teilflächen des Einzugsgebietes herangezogen, ihre Distanz zu den Messstellen bestimmt und analog Formel 3.1 der Niederschlag für diese Teilfläche bestimmt. Aus den einzelnen Teilflächen lässt sich dann einfach der Gebietsniederschlag für das gesamte Einzugsgebiet bestimmen. Bei der Methode der inversen Distanzgewichtung wird jeder Messwert in Abhängigkeit vom Abstand zur Lage des Punktes (für den ein Wert interpoliert werden soll) gewichtet. Messwerte, die näher zum gesuchten Punkt liegen, erhalten ein größeres, Messwerte die weiter entfernt liegen, ein geringeres Gewicht. Das Gewicht der gemessenen Variable x_i verhält sich somit invers zur Distanz d_i :

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad \text{Formel 3.1}$$

Formel 3.1: inverse Distanzgewichtung

Abbildung 3.8 zeigt die Niederschlagsdaten über den gesamten Zeitraum, für alle 3 Stationen und für den Gebietsniederschlag.

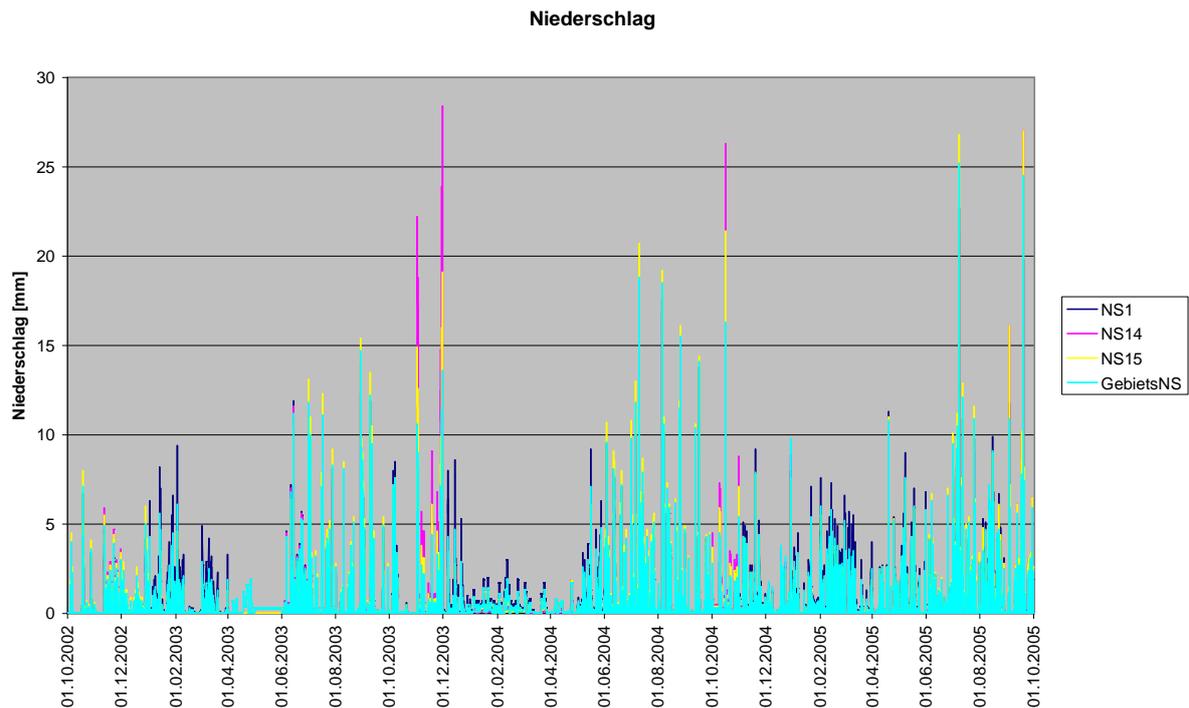


Abbildung 3.8: Gebietsniederschlag

3.4.2 Niederschlagskorrektur

Der ermittelte Gebietsniederschlag wird vom Modell noch mit Korrekturfaktoren multipliziert, Tabelle 3.8 zeigt diese Faktoren:

Tabelle 3.8: Korrekturfaktoren für Niederschlag

	Korrekturfaktor
2003	1.5
2004	1.18
2005	1.18

Die Niederschlagsdaten werden also für 2003 um 50 %, für 2004 und 2005 um 18 % erhöht. Diese Werte basieren auf Vergleiche mit Abfluss- und Massenbilanzdaten im Einzugsgebiet. Besonders im Rekordjahr 2003 wurde der Niederschlag deutlich unterschätzt.

3.5 Schneepegel

Im Einzugsgebiet gibt es zahlreiche Schneepegel, für diese Arbeit wurden die in Tabelle 3.9 aufgelisteten Pegel herangezogen, die Abbildungen 3.9 bis 3.11 zeigen den jahreszeitlichen Verlauf der gemessenen Schneehöhen:

Tabelle 3.9: Schneepegel - Lage und Bezeichnung

Kurzbezeichnung	Name	Seehöhe	X - Hochwert	Y - Rechtswert
PG 1	Unterer Goldbergkeesboden	2450m	420350	5211835
PG 2	Oberer Goldbergkeesboden	2650m	422000	5212050
PG 3	Goldbergkees - Oberer Steilhang	2850m	421389	5212147
PG 4	Goldbergkees - Brettscharte unten	2950m	421343	5212306
PG 5	Goldbergkees - Brettscharte oben	2950m	421308	5212421
PG 6	Fleisscharte	3050m	421313	5212519

Schneehöhen 2002/2003

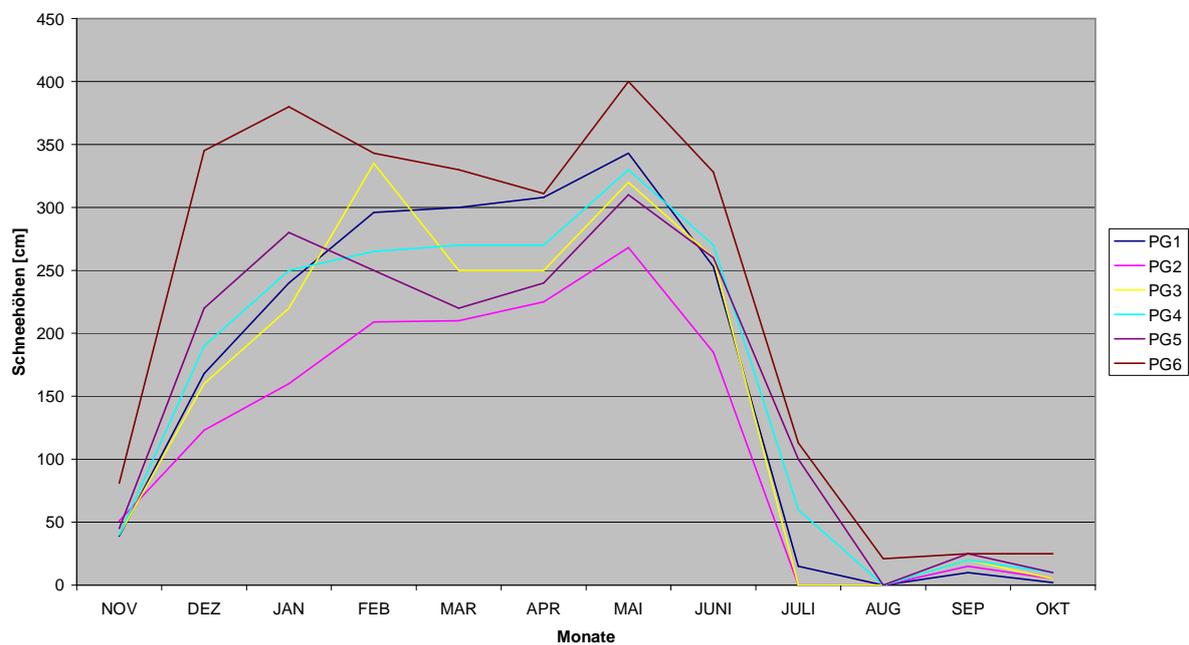


Abbildung 3.9: Schneehöhen 2002/2003

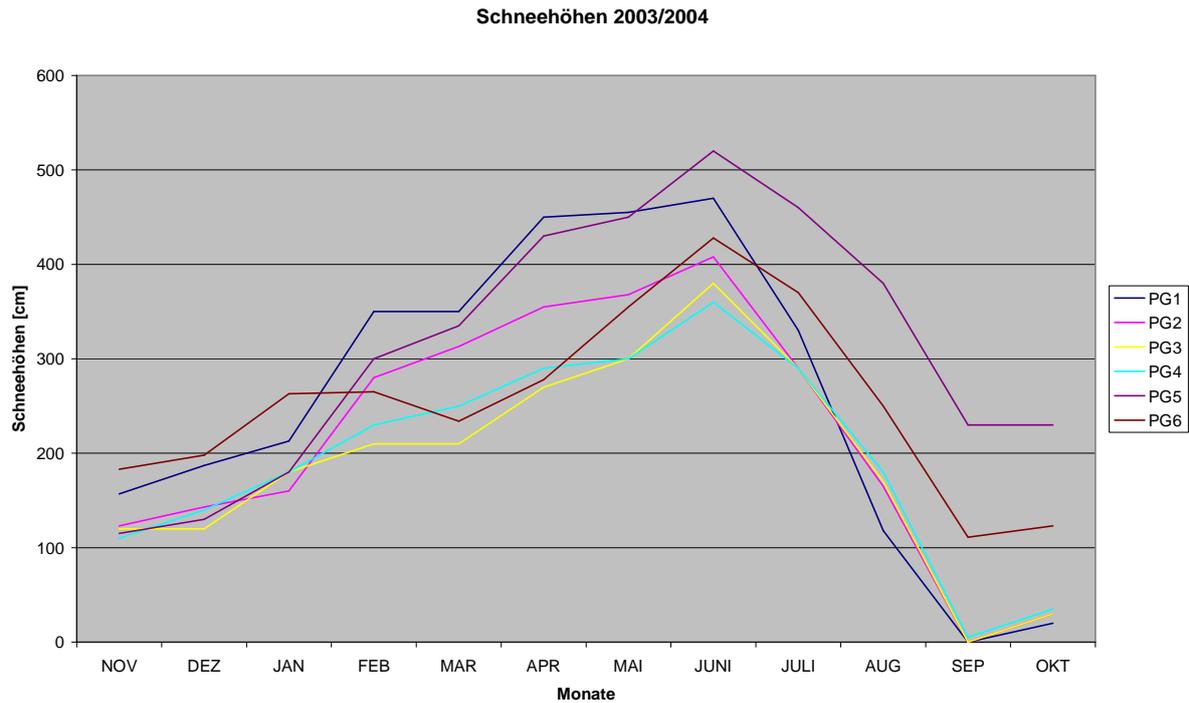


Abbildung 3.10: Schneehöhen 2003/2004

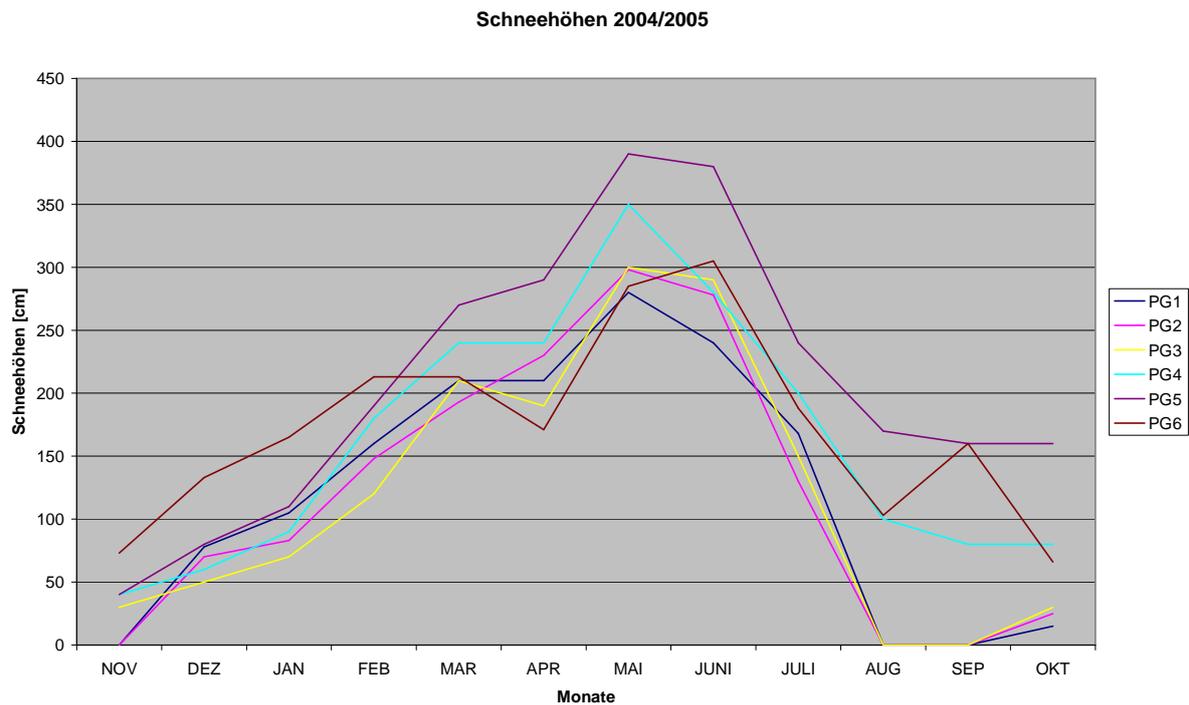


Abbildung 3.11: Schneehöhen 2004/2005

Innerhalb eines Jahres zeigen die verschiedenen Pegel ein ähnliches Bild: der Zeitpunkt der maximalen Akkumulation deckt sich im Allgemeinen, die Schneehöhen weichen üblicherweise zu diesem Zeitpunkt nicht mehr als circa 200 cm von den Werten anderer Pegel ab; ebenso kann man Verfrachtungen beobachten, da die höchstgelegenen Pegel nicht immer die größten Schneehöhen aufweisen (z.B.: PG6 im Jahr 2004 und 2005, PG4 2004). Ein

eindeutiges Verfrachtungsbild ergibt sich allerdings nicht: so liegt zum Beispiel der Pegel PG 5 im mittleren Bereich, für 2004 und 2005 weist er die höchste Akkumulation auf.

Im Vergleich der Schneepegel über die Jahre fällt auf, dass 2004 der Zeitpunkt der maximalen Akkumulation erst später (Juni) stattfindet als in den andern beiden Jahren (Mai). Weiters liegen die Werte für die maximale Schneehöhe (360-520 cm) höher als in den beiden anderen Jahren. (270-400 cm). Auffällig ist ebenso das rasche Abschmelzen im Jahr 2003, hier sind im August bereits 5 von 6 Schneepegel ausgeapert.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse sind im Folgenden in den 3 Verfahren zunächst getrennt erläutert. Anschließend werden die Schmelzmethoden untereinander verglichen. Eine Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Parameter wird in Kapitel 5 behandelt.

4.1 Modellkalibrierung und Validierung

Die Modellkalibrierung erfolgte getrennt für die 3 Beobachtungsjahre, da bei Simulation über den gesamten Zeitraum die oberen Höhenzonen (ab etwa 2800m Seehöhe) sonst in der Regel nicht ausapern. Dadurch fällt aber die Vergleichbarkeit mit den Schneepegeln weg, bei welchen definitionsgemäß die Schneehöhen am 1. Oktober mit 0 festgelegt werden und eventuell vorhandene Restschneehöhen als Altschnee bzw. Gletscher nicht weiter berücksichtigt werden. Ebenso ergaben sich bei Simulationen über alle 3 Jahre schlechte Ergebnisse für die späteren Jahre da hier besonders in den oberen Höhenzonen die Schneewasserwerte sehr hoch sind und es aufgrund der fehlenden Ausaperung praktisch nie zu Gletscherschmelze kommen kann.

Das Procedere für die Kalibrierung erfolgte in mehreren Teilschritten, welche alle aufgrund manueller Auswahl der Parameter durchgeführt wurden: zunächst wurde eine ausgeglichene Abflussbilanz mit einem relativen Summenfehler kleiner 1% modelliert, hierfür wurden die Parameter *fak*, *fakice*, *fakrad*, *fakradice*, *tamp*, *famp* (Grad-Tag Faktor für Schnee bzw. Eis, Strahlungsfaktor für Schnee bzw. Eis, jahreszeitliche Schwankung der Schwellentemperatur bzw. des Grad-Tag Faktors) herangezogen. Im nächsten Schritt wurde durch geringfügige Variation der oben genannten Parameter und Änderung der Speicherkoeffizienten *aksnow*, *akice*, *akrain* der Parametersatz mit der höchsten Korrelation bzw. dem kleinsten mittleren Absolutfehler der Abflussganglinie gesucht, unter gleichzeitiger Beibehaltung der Forderung nach einer ausgeglichenen Bilanz. Eine genauere Erläuterung dieser Gütekriterien enthält Kapitel 4.2. Die Beobachtungszeiträume der Abflussmessung liegen jeweils im Sommer der Jahre 2003, 2004 und 2005. Für eine detaillierte Darstellung sei auf Kapitel 3, Datenbasis für die Modellierung verwiesen. Im weiteren Verlauf werden die *Jahreszahlen* synonym dem Beobachtungszeitraum des Abflusses für das entsprechende Jahr gesetzt.

Eine Validierung für einen weiteren Zeitraum wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, Ziel war es die allgemeine Tauglichkeit des Modells zu testen, diese Tatsache ist durch die von Jahr zu Jahr nicht zu stark voneinander abweichenden Parameter gegeben.

4.2 Gütekriterien

4.2.1 Abfluss

Zur Kalibrierung der Modellparameter wurden folgende Kriterien ausgewählt:

Relativer Summenfehler:

$$RSF = \frac{Abflusssumme_{beobachtet} - Abflusssumme_{Modell}}{Abflusssumme_{beobachtet}} \quad [\text{dim.los}] \quad \text{Formel 4.1}$$

Formel 4.1: Relativer Summenfehler

Der relative Summenfehler erhält hier gegenüber dem absoluten Fehler den Vorzug um die einzelnen Beobachtungsperioden, die ja unterschiedlich lang sind, besser vergleichen zu können. Somit kann ein einheitliches Gütekriterium für die Abflussbilanz bestimmt werden, obwohl Abflusssummen und Beobachtungszeiträume von einander abweichen.

Korrelationskoeffizient Abflussganglinie:

$$\rho_{beob,Modell} = \frac{Cov(Q_{beob}, Q_{Modell})}{\sigma_{beob} \cdot \sigma_{Modell}} \quad \text{Formel 4.2}$$

Formel 4.2: Korrelationskoeffizient

Wobei gilt: $-1 \leq \rho_{beob,Modell} \leq 1$

$$\text{Und: } Cov(Q_{beob}, Q_{Modell}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{beob,i} - \mu_{beob}) \cdot (Q_{Modell,i} - \mu_{Modell}) \quad \text{Formel 4.3}$$

Formel 4.3: Kovarianz

Der Korrelationskoeffizient ist ein dimensionsloses Maß für den linearen Zusammenhang zwischen 2 Größen. Er kann nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei 1 einen vollständigen und 0 keinen linearen Zusammenhang darstellt. Für diese Arbeit wird der Korrelationskoeffizient der Abflussganglinien, also der stündlichen Werte der beobachteten und berechneten Abflüsse aus dem Einzugsgebiet, herangezogen.

Mittlerer Absolutfehler der Abflussganglinie:

$$\text{mittlererAbsolutfehler} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |Q_{beob,i} - Q_{Modell,i}| \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Formel 4.4}$$

Formel 4.4: Mittlerer Absolutfehler

Der mittlere Absolutfehler bezeichnet den Fehler dem Betrag nach. Würde man einfach nur den Mittelwert der Fehler bestimmen, bekäme man keine Aussage über die Güte des Modells, da sich hier Maximal- und Minimalwerte ausgleichen würden. Um dies zu vermeiden wird der Absolutbetrag jedes Fehlers bestimmt und erst daraus der Mittelwert bestimmt.

4.2.2 Schneepegel

Mit den optimalen Parametern wurde ebenso ein Vergleich mit Schneepegeln im Gebiet durchgeführt um die Qualität/Plausibilität der Ergebnisse weiter zu prüfen. Diese Messungen sind aber mit großen Unsicherheiten hauptsächlich durch Verfrachtungen (Lawinen, Wind) behaftet, dementsprechend wurde keine Optimierung hinsichtlich dieser Werte durchgeführt.

Im Einzugsgebiet gibt es zahlreiche Schneepegelstationen (Kapitel 3, Datenbasis). Hier werden die Pegel PG 1 bis PG 6 herangezogen. Aus den gemessenen Schneehöhen wird mittels geschätzter Schneedichten ein Schneewasserwert bestimmt.

$$\text{Schneewasserwert} = \frac{\text{Schneedichte} \cdot \text{Schneehöhe}}{100}$$

Formel 4.5

Formel 4.5: Schneewasserwert

wobei

Schneewasserwert [mm]

Schneedichte [kg/m³]

Schneehöhe [cm]

Tabelle 4.1 zeigt die angenommenen Schneedichten und ihre Verteilung über das Jahr und die Höhenzonen.

Tabelle 4.1: Schneedichten

Schneedichten

[kg/m³]

	Höhe	OKT	NOV	DEZ	JAN	FEB	MÄR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
PG6	3050	340	340	340	340	360	380	390	400	410	410	410	360
PG5	2950	340	340	340	340	360	380	390	400	410	410	410	360
PG4	2950	340	340	340	340	360	380	390	400	410	410	410	360
PG3	2850	345	345	345	345	365	385	395	405	415	415	415	365
PG2	2650	350	350	350	350	370	390	400	410	420	420	420	370
PG1	2450	355	355	355	355	375	395	405	415	425	425	425	375

Der Vergleich der so errechneten Werte und dem Modelloutput (Schneewasserwerte) wurde sowohl visuell als auch nach Korrelation und mittleren Absolutfehler der Schneewasserwertganglinie durchgeführt.

4.2.3 Schneewasserwertsondierungen

Ebenso finden im Einzugsgebiet jährlich Sondierungskampagnen (Dichtemessungen) um den 1. Mai, also den Zeitpunkt der maximalen Akkumulation herum statt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen erhält man Schneewasseräquivalent in allen 8 Höhenstufen, als Maximal- und Minimalwert.

Diese Werte wurden mit den von dem Modell berechneten Werten visuell und nach absolutem Fehler verglichen.

4.3 Ergebnisse des Temperaturindexverfahren

Das Temperaturindexverfahren beruht auf den meteorologischen Inputparametern Niederschlag (in mm) und Temperatur (in °C) in stündlicher Auflösung. Dementsprechend sind nur 13 der 24 Modellparameter im Zuge dieses Teils der Arbeit variiert worden.

4.3.1 Ergebnisse Abfluss

Tabelle 4.2 zeigt die optimalen Werte für Korrelationskoeffizient und mittleren Absolutfehler der Abflussganglinie für die einzelnen Beobachtungszeiträume.

Tabelle 4.2: Temperaturindexverfahren - erreichbare Genauigkeiten

Jahr	Korrelationskoeffizient	mittlerer Absolutfehler [m ³ /s]
2003	0.7884	0.260
2004	0.8629	0.171
2005	0.8742	0.186

Die jeweils optimalen Parametersätze weisen dabei relativ große Unterschiede auf. Tabelle 4.3 zeigt die wichtigsten Parameter für die einzelnen Jahre.

Tabelle 4.3: Temperaturindexverfahren - Parametersätze

Parameter	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler
<i>fak</i>	3	3	2.85	2.85	4	4
<i>fakice</i>	7.2	7.2	6.75	6.75	8	8
<i>famp</i>	1.1	1.1	1.5	1.5	2	2
<i>tamp</i>	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
<i>aksnow</i>	3	3	12	12	13	13
<i>akice</i>	2	2	40	40	4	3
<i>akrain</i>	13	13	25	25	17	17
<i>thres</i>	1	1	1	1	1	1

Beim Temperaturindexverfahren decken sich die optimalen Parameter für Korrelation und mittleren Fehler jeweils genau, im Allgemeinen ist das nicht notwendigerweise der Fall deswegen die doppelte Auflistung.

Die folgenden Abbildungen (4.1 bis 4.3) zeigen die Summenlinien für die Jahre 2003 – 2005:

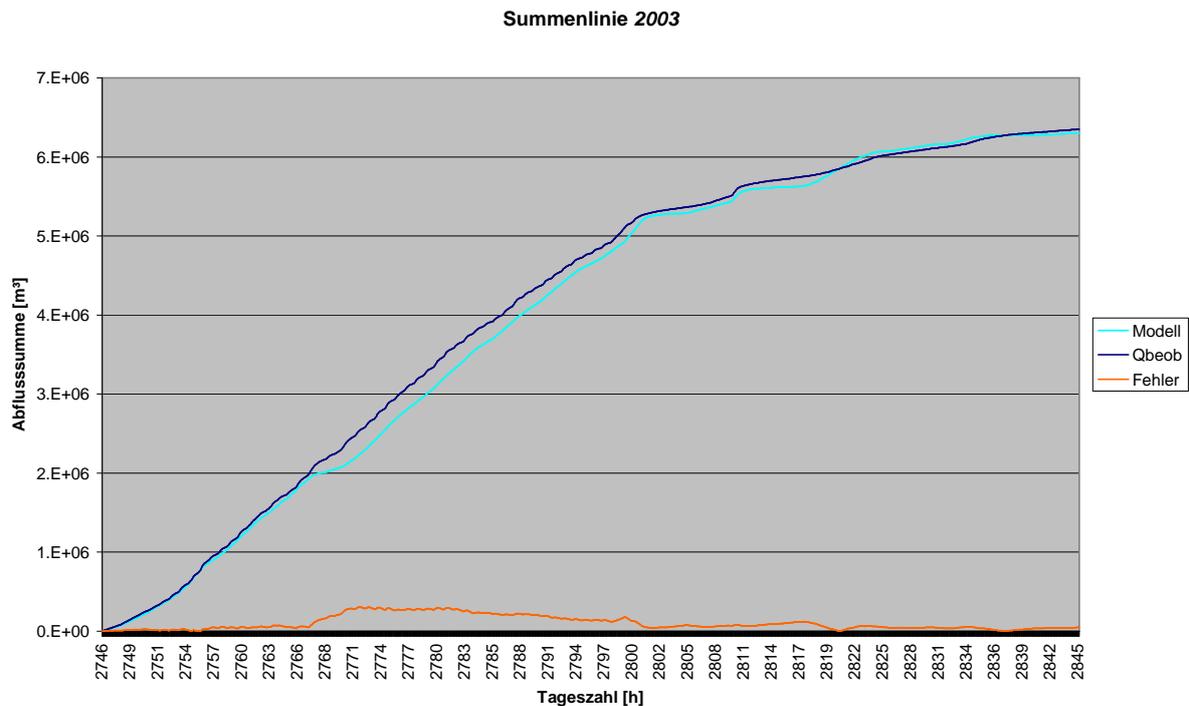


Abbildung 4.1: Temperaturindexverfahren - Summenlinie 2003

Summenlinie 2004

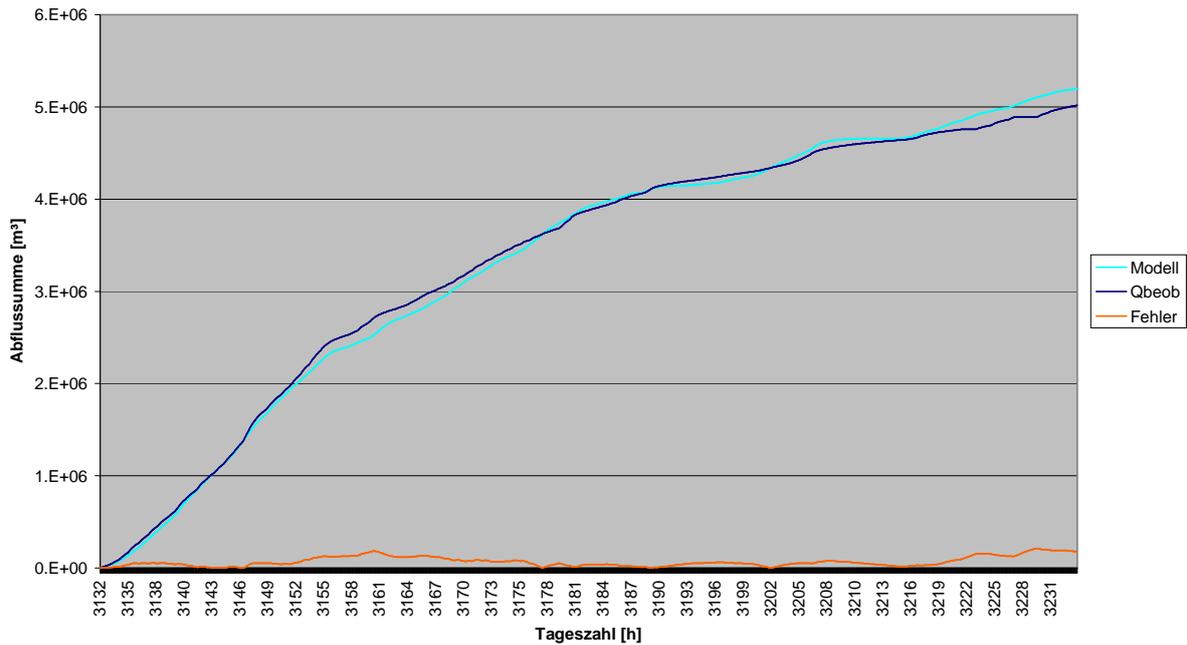


Abbildung 4.2: Temperaturindexverfahren - Summenlinie 2004

Summenlinie 2005

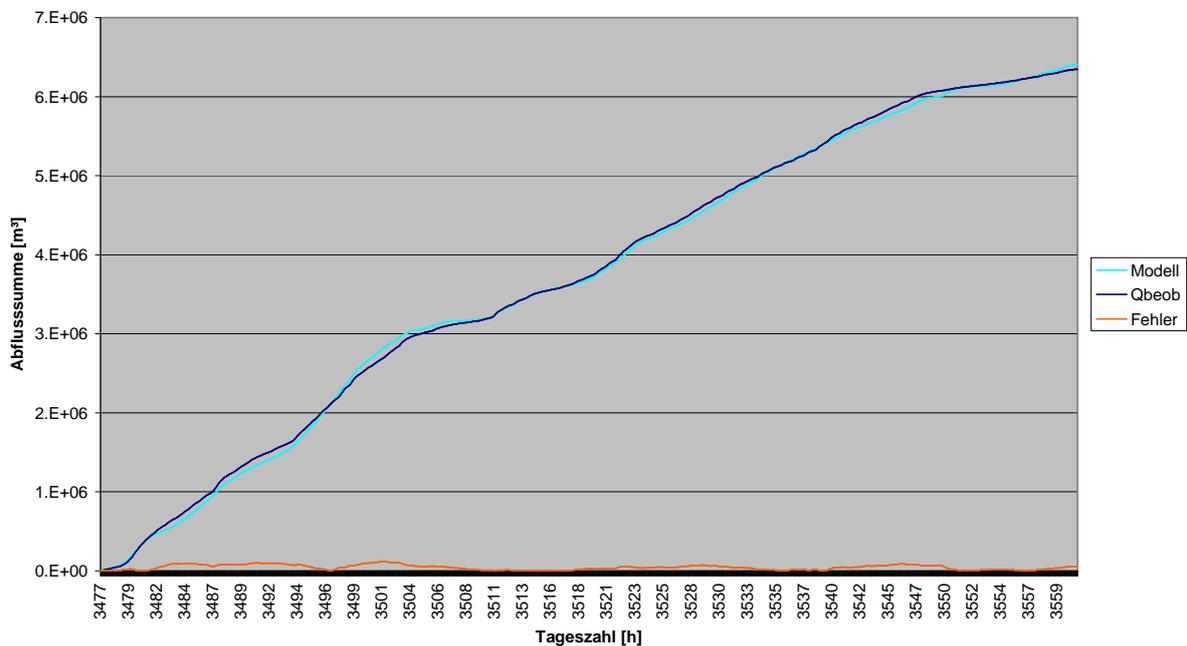


Abbildung 4.3: Temperaturindexverfahren- Summenlinie 2005

Die Übereinstimmung zwischen Modell und Messwerten ist bei Betrachtung der Summenlinie im Allgemeinen sehr gut. Bei einem relativen Summenfehler unter 1 %, beträgt die Korrelation der Summenlinien stets über 0.99.

Die größten Abweichungen weist das Jahr 2003 auf (zwischen Tageszahl 2766 und 2768), hierfür sind Temperaturen nahe der Schwellentemperatur verantwortlich, bei denen im Modell die tatsächlich vorhandene Schmelze nicht nachgebildet wird.

Die Abflussbilanz stellt Tabelle 4.4 dar, die Abweichungen von Jahr zu Jahr lassen sich teilweise durch die unterschiedlichen Beobachtungszeiträume erklären; Tabelle 4.5 zeigt die prozentualen Anteile der Schnee- und Gletscherschmelze sowie des Effektivniederschlages am Modellergebnis:

Tabelle 4.4: Temperaturindexverfahren - Abflussbilanz

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
2003	6349648	6300349	0.78	2205518	3077082	1017907
2004	5015286	5046624	0.62	3306766	438217	1301429
2005	6347336	6401981	0.86	2382905	2227176	1791788

Tabelle 4.5: Temperaturindexverfahren - Prozentanteile an Gesamtabfluss

	Anteil Schneeschmelze [%]	Anteil Eisschmelze [%]	Anteil Regen [%]
2003	35	49	16
2004	66	9	25
2005	37	35	28

Die nächsten Abbildungen 4.4 bis 4.6 zeigen die Ganglinien für die 3 Beobachtungsjahre: Modellwerte sind jeweils in cyan, beobachtete Abflusswerte in blau dargestellt

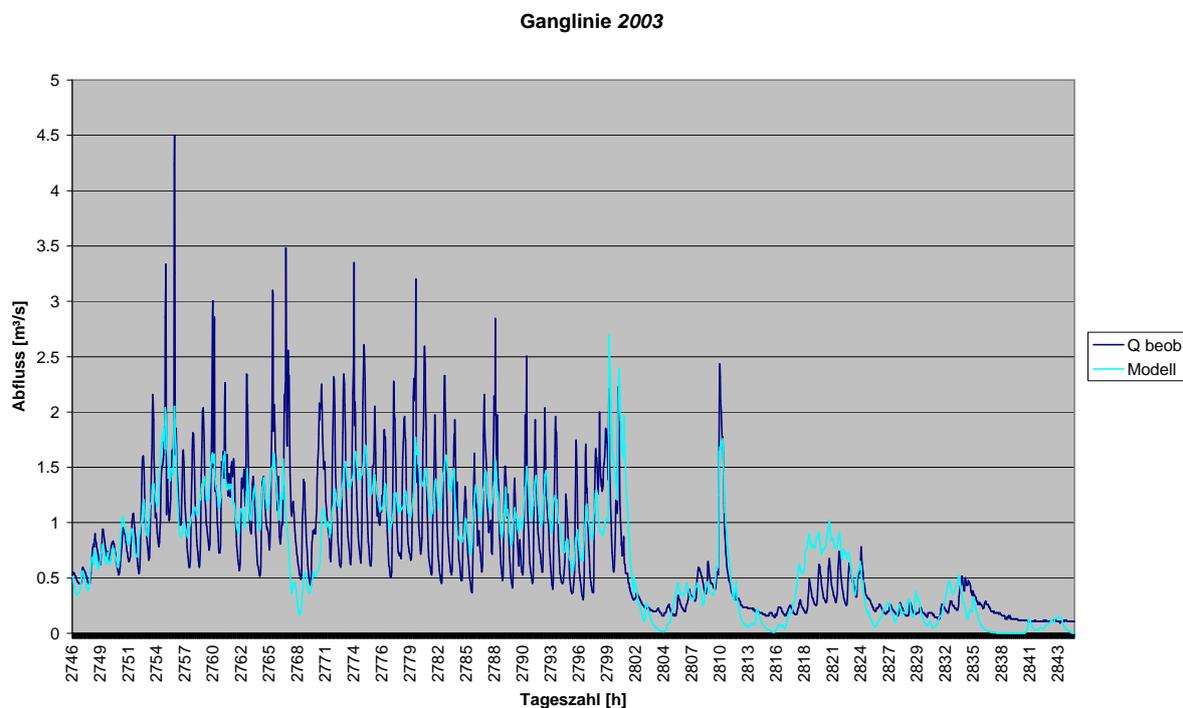


Abbildung 4.4: Temperaturindexverfahren - Ganglinie 2003

Ganglinie 2004

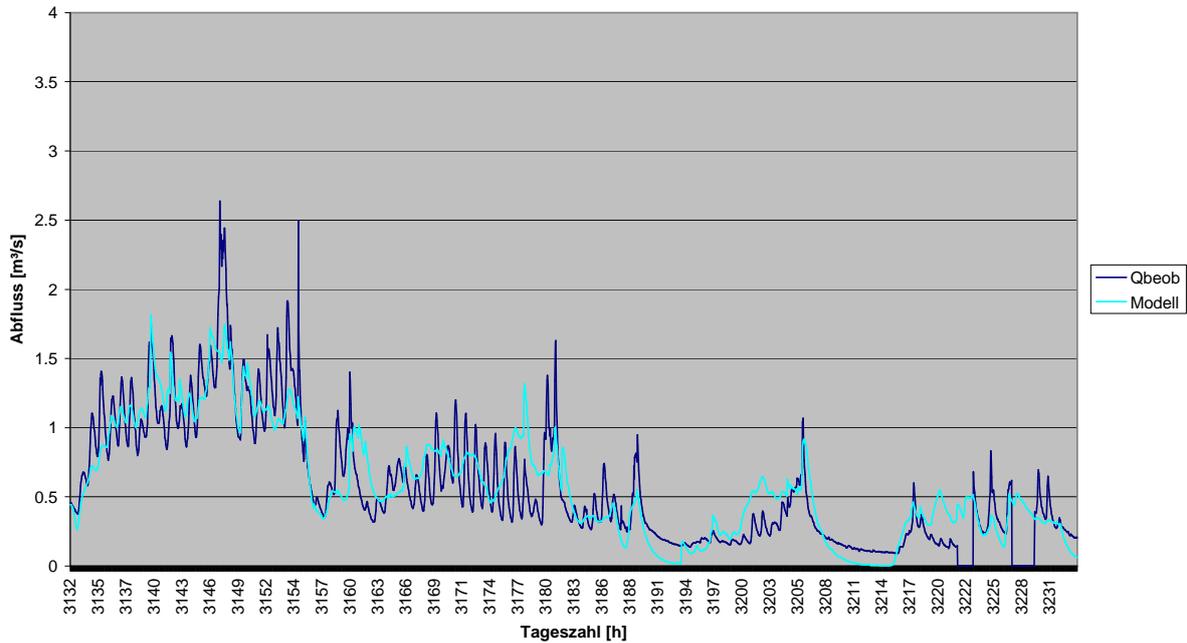


Abbildung 4.5: Temperaturindexverfahren - Ganglinie 2004

Ganglinie 2005

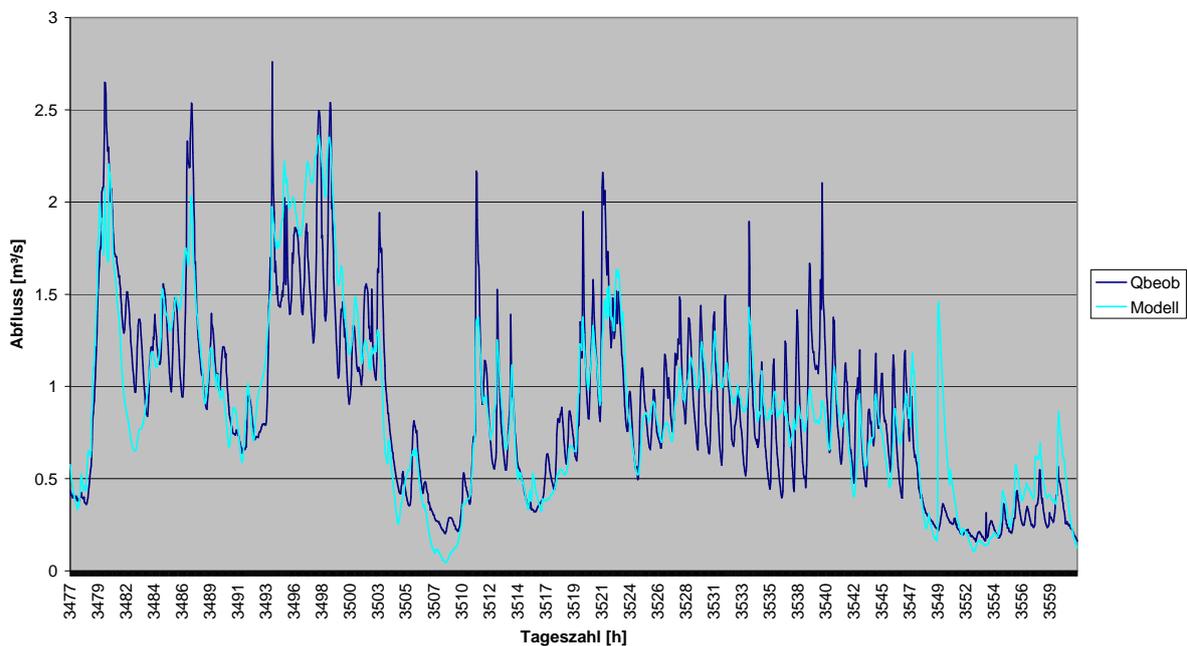


Abbildung 4.6: Temperaturindexverfahren - Ganglinie 2005

Man sieht im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messwerten, jedoch hat das Modell Schwächen in der Nachbildung ausgeprägter Spitzen. Besonders deutlich wird das an der Ganglinie des Jahres 2003. Im Rekordsommer dieses Jahres fand sehr viel Gletscherschmelze statt, die das reine Temperaturindexverfahren nur ungenügend modelliert. Eine genauere Darstellung dieser Tatsache zeigt die Ganglinie August 2003:

August 2003

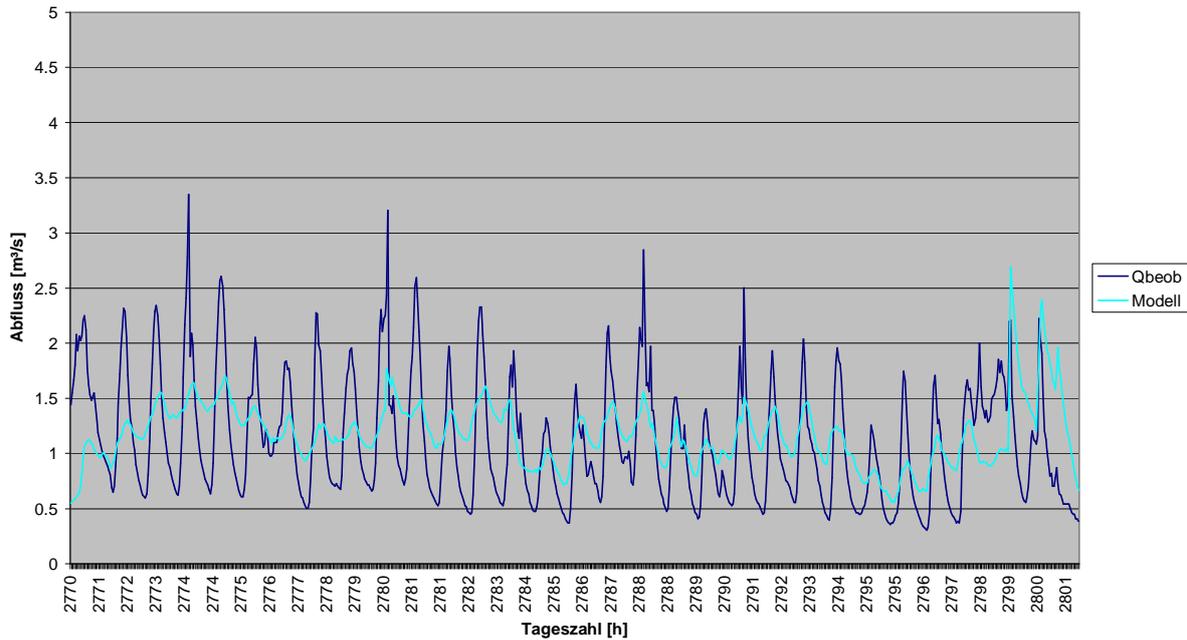


Abbildung 4.7: Temperaturindexverfahren - Ganglinie August 2003

Die Stärken des Temperaturindexverfahrens liegen also eher in der Bilanzierung der Schneeakkumulation und –schmelze, die Schwäche ist die Nachbildung eines ausgeprägten Tagesganges, insbesondere bei einem hohen Anteil an Gletscherschmelze.

4.3.2 Ergebnisse Schneepegel

Die jeweils besten Werte für die Korrelation der Schneepegel mit den Modellwerten (und die zugehörigen mittleren Fehler) für den Schneewasserwert zeigt Tabelle 4.6. Diese Werte wurden nicht in einem eigenständigen Vorgang bestimmt, sie wurden im Laufe der Kalibrierung für die Abflusswerte gleichzeitig mitermittelt und stellen daher keine optimalen Werte dar, sondern nur die besten im Laufe diese Verfahrens gefundenen Werte.

Tabelle 4.6: Temperaturindexverfahren - Korrelation Schneepegel

Schneepegel	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler [mm]	Korrelation	mittlerer Fehler [mm]	Korrelation	mittlerer Fehler [mm]
PG1	0.9793	152.1	0.9796	222.9	0.9839	56.32
PG2	0.9909	119.8	0.9830	104.0	0.9845	79.32
PG3	0.9345	165.3	0.8538	476.2	0.9647	147.6
PG4	0.9435	188.5	0.7058	554.3	0.9344	159.1
PG5	0.9275	232.0	0.9617	146.0	0.9590	119.5
PG6	0.8332	251.3	0.5916	521.1	0.6184	308.8

Auffällig in dieser Tabelle sind insbesondere die schlechten Korrelationswerte für den Pegel PG 6 (3050m), der in allen 3 Beobachtungsjahren die niedrigsten Werte aufweist. Die exponierte Lage des Pegels spielt hier eine entscheidende Rolle: Windverfrachtungen und Rutschungen haben niedrigere beobachtete Schneehöhen zur Folge als das Modell erwarten

lässt. Ebenso könnten eine schlechte Schätzung der Schneedichte das Ergebnis verschlechtern. Die niedrigen Temperaturen dieser Höhenzone haben im Modell zur Folge, dass der Cold Content oft bei Temperaturen über der Schwellentemperatur eine Schmelze verhindert. Die folgenden Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen diese Pegel für das Jahr 2003/2004 und 2004/2005:

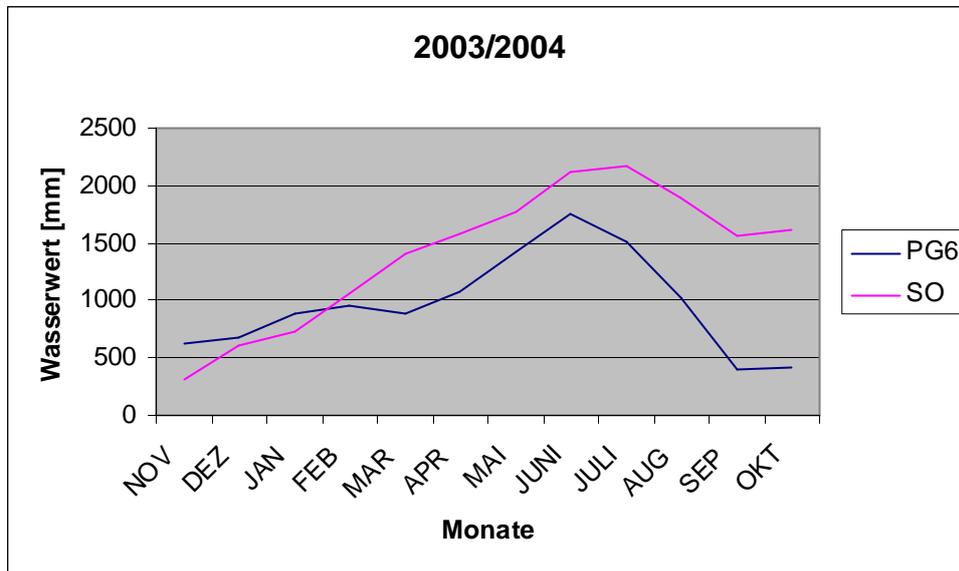


Abbildung 4.8: Temperaturindexverfahren - PG6 2003/2004 (3050m)

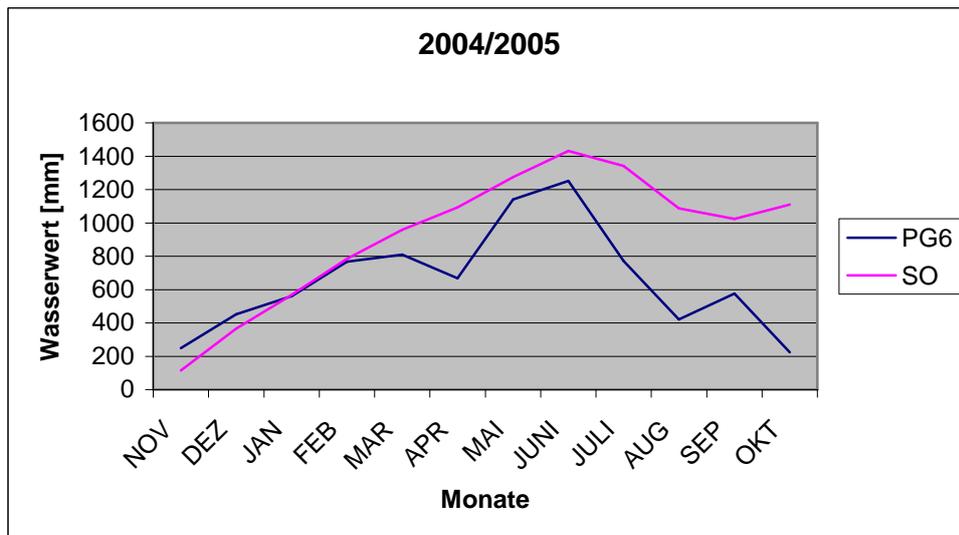


Abbildung 4.9: Temperaturindexverfahren - PG6 2004/2005 (3050m)

Die blauen Kurven stellen den Verlauf der Schneepegel dar, rosa den des Modells.

Man sieht deutlich, dass im Modell wesentlich weniger Schmelze stattfindet, als bei den Pegeln gemessen. Aufgrund des geringen Flächenanteils (0.061 km² oder etwa 2 % der Gesamtfläche des Einzugsgebietes) dieser Höhenzone (3050m) schlägt sich dies aber nicht so stark in den Abflussergebnissen nieder.

In den niedrigeren Höhenzonen ist eine klar bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Schneepegel festzustellen. Beispielhaft ist der Pegel PG2 (2650m) in den Jahren 2003/2004 und 2004/2005 angeführt.

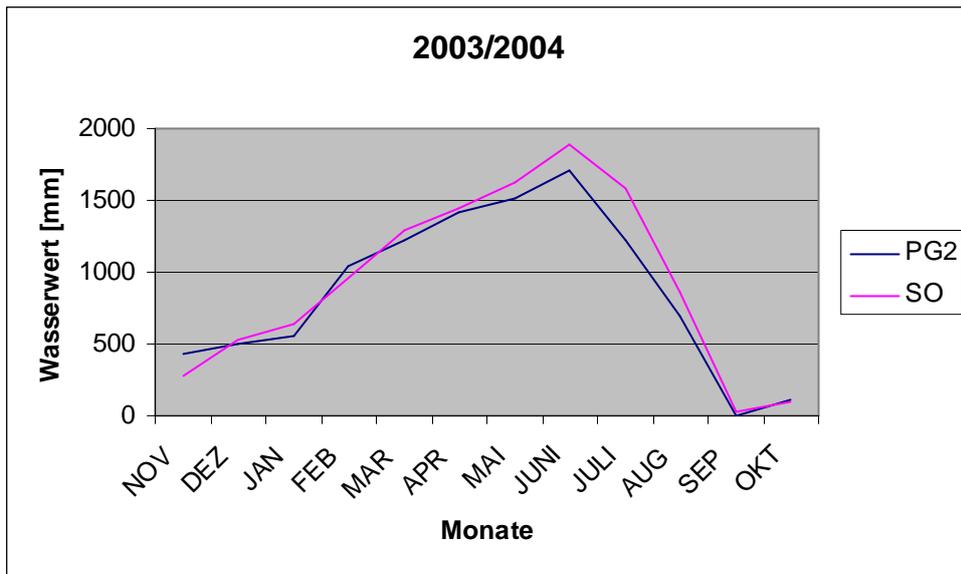


Abbildung 4.10: Temperaturindexverfahren - PG2 2003/2004 (2650m)

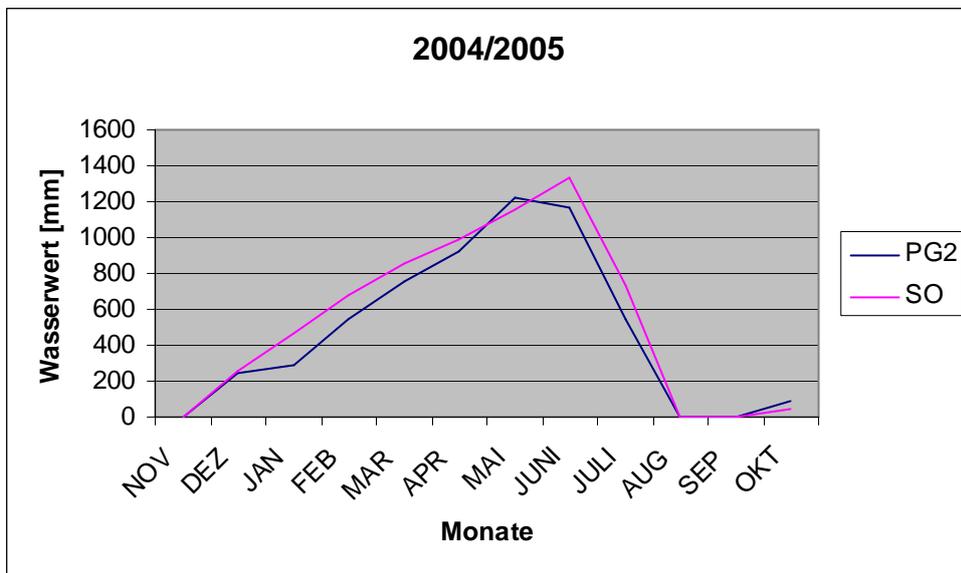


Abbildung 4.11: Temperaturindexverfahren - PG2 2004/2005 (2650m)

Die Parametersätze für die optimale Abflusskorrelation und die besten Werte der Schneepegelkorrelation decken sich im Allgemeinen nicht. Tabelle 4.7 zeigt die Unterschiede für diese Parameter der vorangegangenen 4 Abbildungen:

Tabelle 4.7: Temperaturindexverfahren - Parametersätze Schneepegel

Parameter	PG2 Oberer Goldbergkeesboden (2650m)				PG6 Fleisscharte (3050m)			
	2004		2005		2004		2005	
	Abfl.	Schnp.	Abfl.	Schnp.	Abfl.	Schnp.	Abfl.	Schnp.
<i>fak</i>	2.85	3.75	4	4.25	2.85	3.75	4	3.75
<i>fakice</i>	6.75	7.75	8	8.5	6.75	7.75	8	7.75
<i>ialb</i>	1	0	1	1	1	0	1	0
<i>icc</i>	1	0	1	1	1	0	1	0
<i>iexp</i>	1	0	1	1	1	0	1	0
<i>famp</i>	1.5	1	2	2	1.5	1	2	1
<i>tamp</i>	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5

4.3.3 Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen

Die Abbildungen 4.12 bis 4.14 zeigen einen Vergleich der Modellergebnisse mit den Schneewasserwertsondierungen. Der blaue Bereich stellt die Bandbreite zwischen Maximal und Minimalergebnissen der Beobachtungen dar, die gelbe Linie den Mittelwert dieser beiden Werte und cyan steht für die Modellwerte.

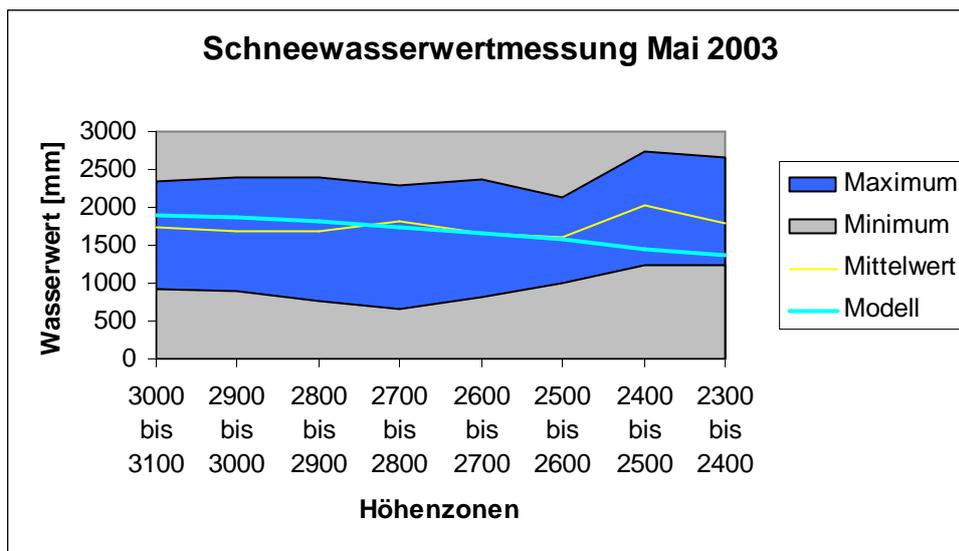


Abbildung 4.12: Temperaturindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2003

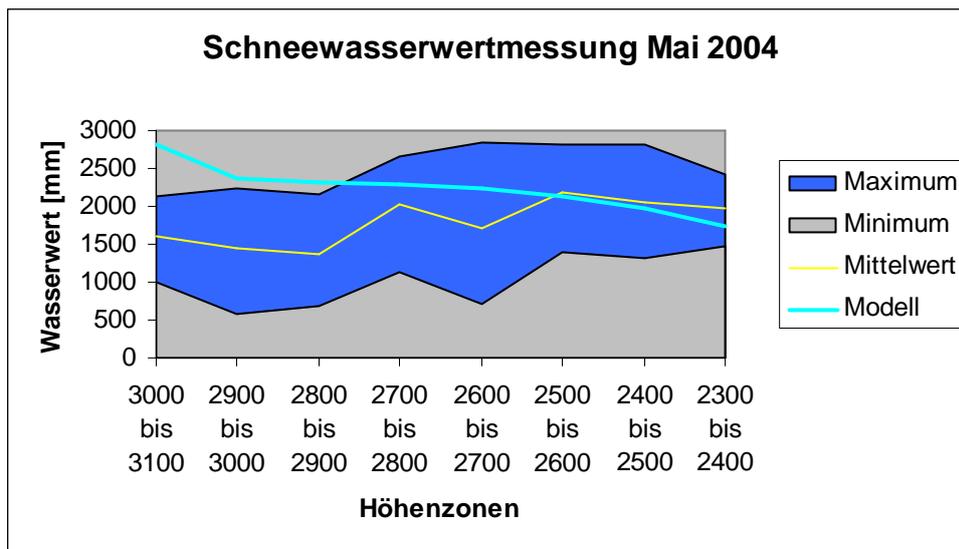


Abbildung 4.13: Temperaturindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2004

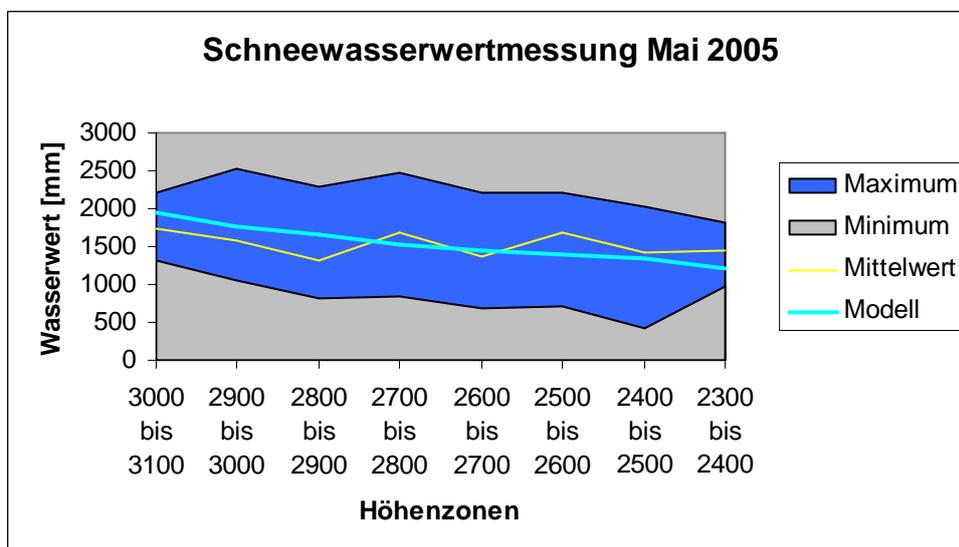


Abbildung 4.14: Temperaturindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2005

Die Modellergebnisse liegen größtenteils innerhalb der zu erwartenden Bandbreite, für die Jahre 2003 und 2004 sogar in der Nähe des Mittelwertes. Eine Ausnahme stellt das Jahr 2004 dar: für die 3 höchstgelegenen Zonen errechnet das Modell höhere Werte als die Messungen ergeben. Grund hierfür könnten Verfrachtungen sein, wie der Sprung im Maximalwert von der Höhenzone 2850m zu 2750m indiziert.

4.4 Strahlungsindexverfahren

Das Strahlungsindexverfahren beruht auf dem meteorologischen Inputparameter Globalstrahlung (in W/m^2) und für die Schmelze auch auf der Temperatur (Schmelze kann nur stattfinden wenn die Temperatur über dem Schwellenwert liegt). Die zeitliche Auflösung beträgt eine Stunde. Anstelle der Grad-Tag Faktoren fak und $fakice$, treten die Strahlungsfaktoren $fakrad$ und $fakradice$. Der Parameter $famp$ ist bei diesem Verfahren ohne Funktion.

4.4.1 Ergebnisse Abfluss

Tabelle 4.8 zeigt die erreichbaren Genauigkeiten für das Strahlungsindexverfahren, Tabelle 4.9 die dafür verwendeten Parametersätze.

Tabelle 4.8: Strahlungsindexverfahren - erreichbare Genauigkeiten

Jahr	Korrelationskoeffizient	mittlerer [m ³ /s]	Absolutfehler
2003	0.8198	0.221	
2004	0.7039	0.240	
2005	0.7381	0.258	

Tabelle 4.9: Strahlungsindexverfahren - Parametersätze

Parameter	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler
<i>fakrad</i>	0.11	0.11	0.11	0.11	0.15	0.15
<i>fakradice</i>	0.25	0.25	0.15	0.15	0.2	0.2
<i>tamp</i>	0.1	0.1	0.6	0.6	0.4	0.4
<i>aksnow</i>	35	35	30	30	40	40
<i>akice</i>	6	7	15	15	15	15
<i>akrain</i>	5	5	5	5	7	7
<i>thres</i>	1	1	1	1	1	1

Die Summenlinien zeigen die folgenden Abbildungen:

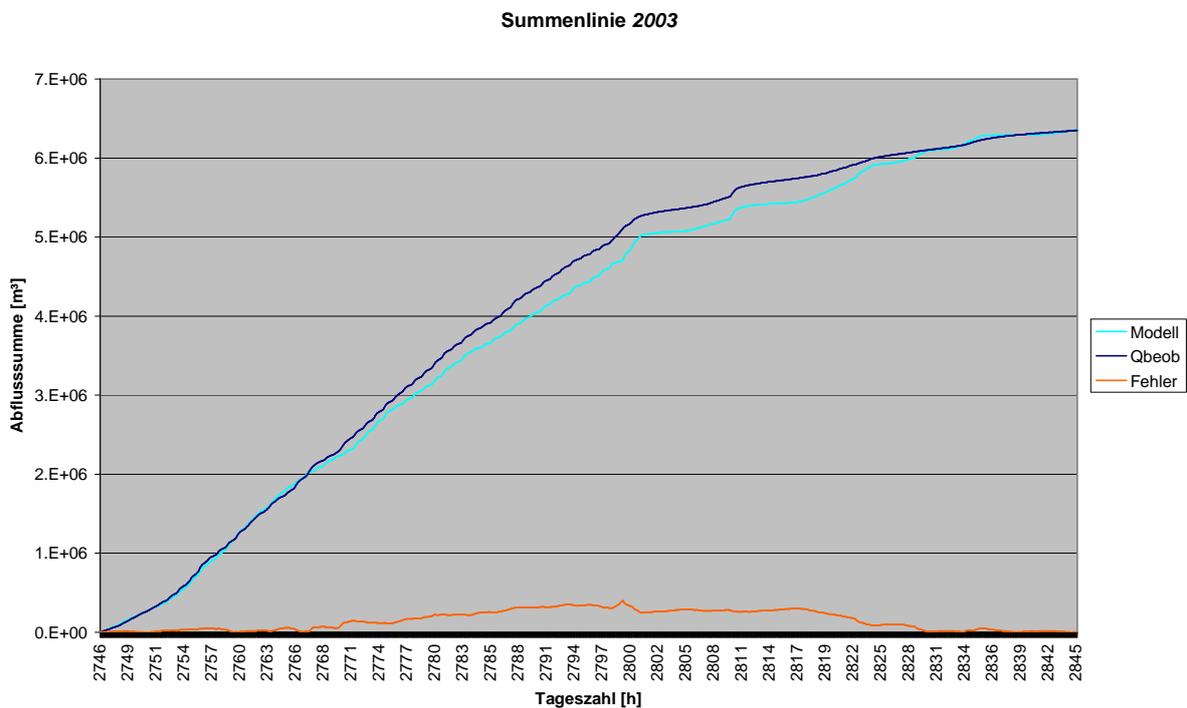


Abbildung 4.15: Strahlungsindexverfahren - Summenlinie 2003

Summenlinie 2004

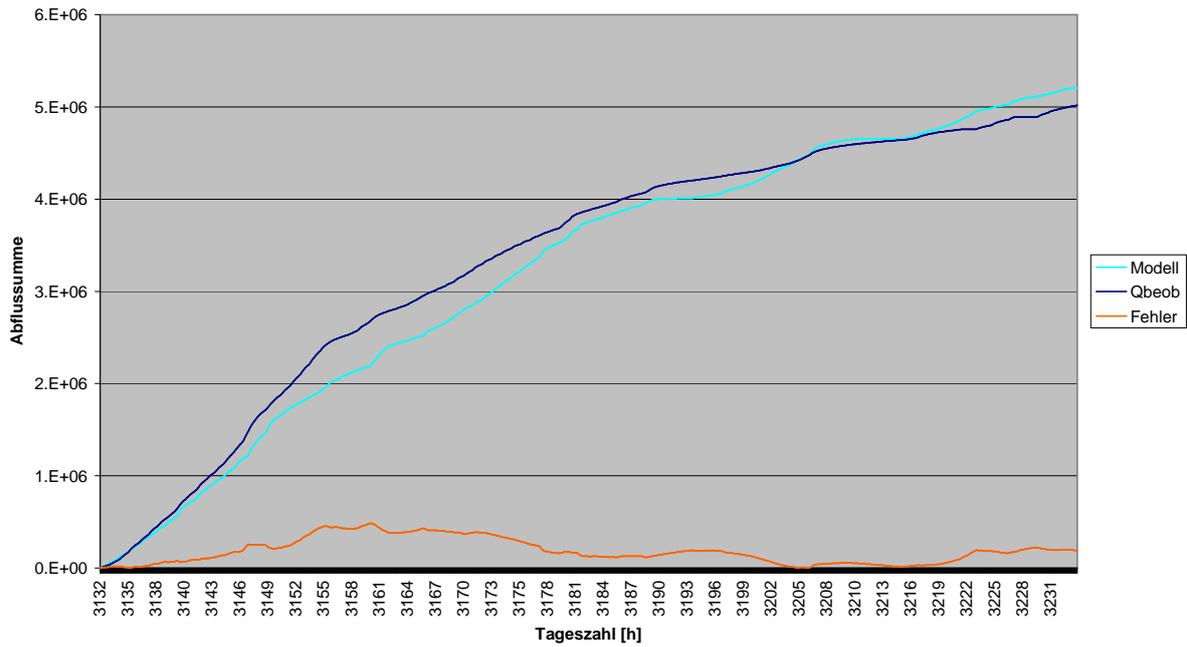


Abbildung 4.16: Strahlungsindexverfahren - Summenlinie 2004

Summenlinie 2005

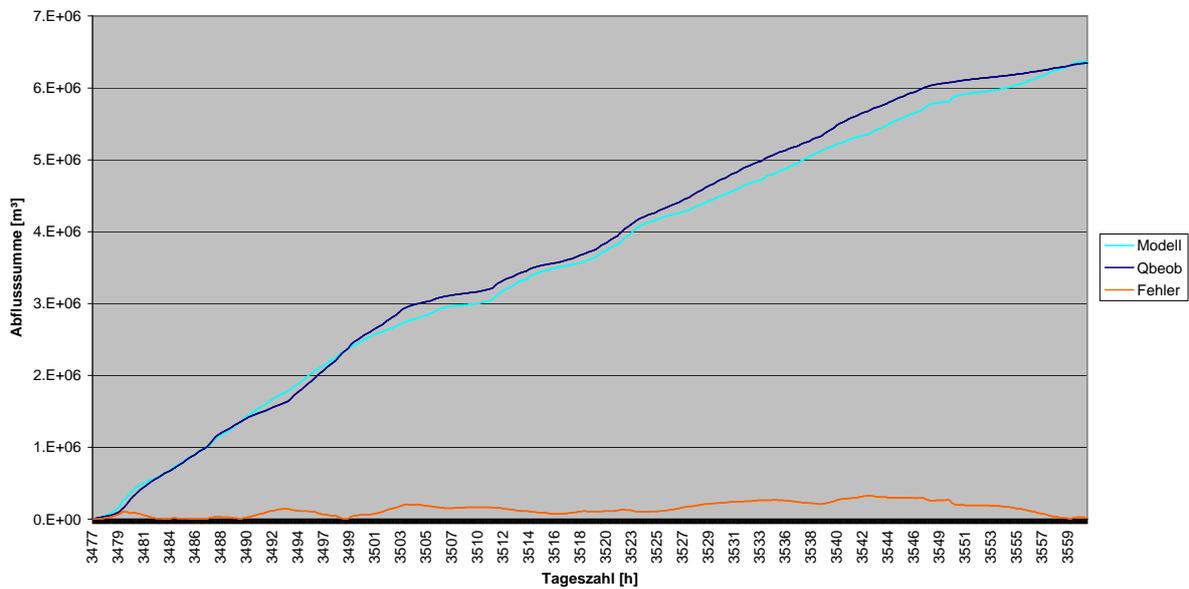


Abbildung 4.17: Strahlungsindexverfahren - Summenlinie 2005

Die relativen Summenfehlern betragen bei den optimalen Parametern weniger als 1%.

Die Abflussbilanz stellt Tabelle 4.10 dar, Tabelle 4.11 zeigt die prozentualen Anteile der Schnee- und Gletscherschmelze, sowie des Effektivregens am Gesamtabfluss des Modells:

Tabelle 4.10: Strahlungsindexverfahren - Abflussbilanz

	beobachteter Abfluss [m³]	Modell insgesamt [m³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m³]	Modell Eisschmelze [m³]	Modell Regen [m³]
2003	6349648	6353989	0.06	1825240	3524512	1004170
2004	5015286	5064635	0.98	3386419	373205	1304788
2005	6347336	6370207	0.36	2027534	2586398	1757837

Tabelle 4.11: Strahlungsindexverfahren - Prozentanteile an Gesamtabfluss

	Anteil Schneeschmelze [%]	Anteil Eisschmelze [%]	Anteil Regen [%]
2003	29	55	16
2004	67	7	26
2005	32	41	27

Die Ganglinien für die 3 Beobachtungszeiträume sind in den nächsten 3 Abbildungen dargestellt:

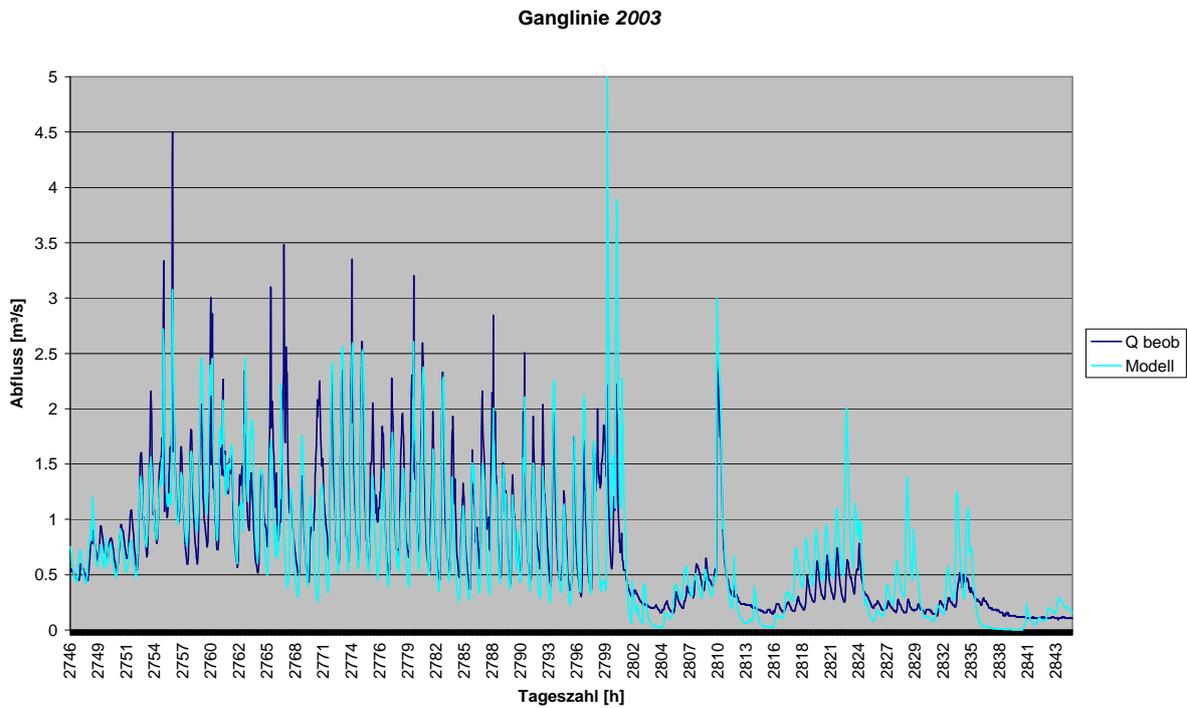


Abbildung 4.18: Strahlungsindexverfahren - Ganglinie 2003

Ganglinie 2004

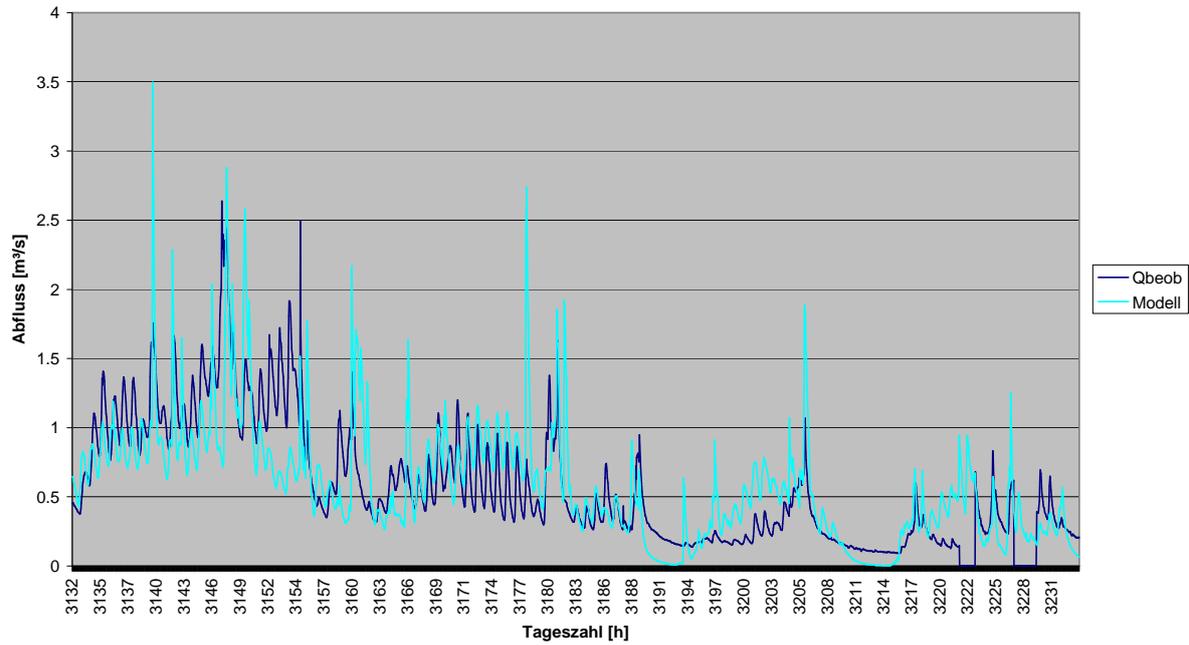


Abbildung 4.19: Strahlungsindexverfahren - Ganglinie 2004

Ganglinie 2005

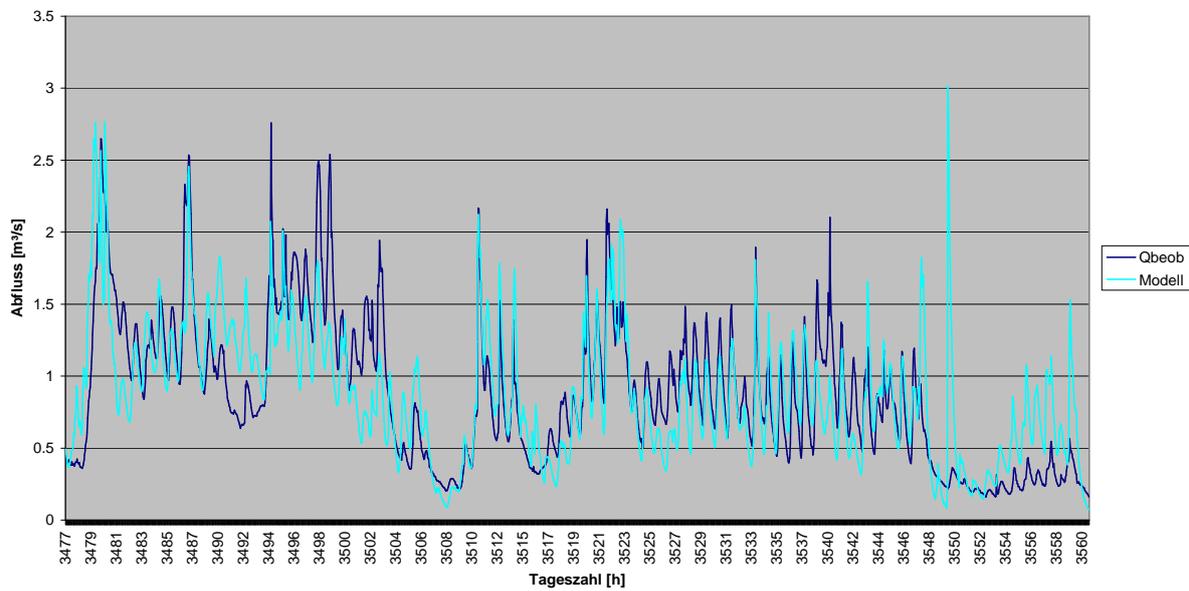


Abbildung 4.20: Strahlungsindexverfahren - Ganglinie 2005

Das Strahlungsindexverfahren zeigt eine gute Nachbildung eines ausgeprägten Tagesganges. Als Beispiel ist wiederum der August 2003 angeführt:

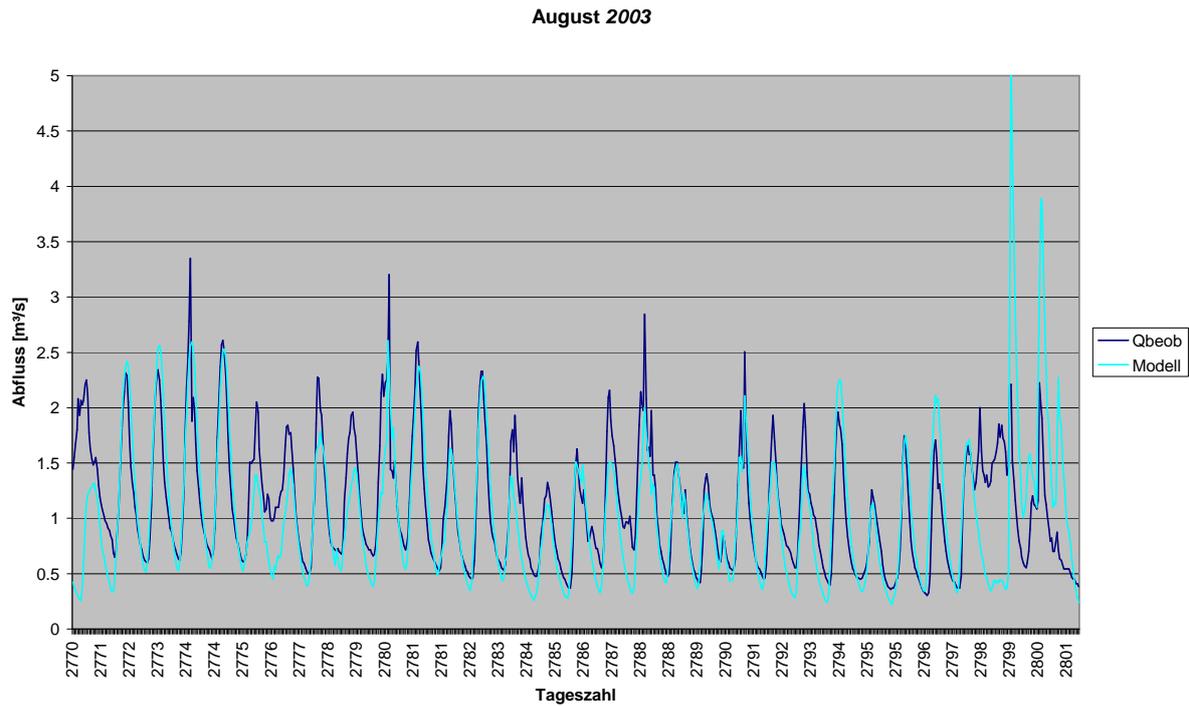


Abbildung 4.21: Strahlungsindexverfahren - Ganglinie August 2003

Weiters lässt sich zu Beginn der Schmelzperiode der Effekt feststellen, dass das Modell Abflussspitzen früher errechnet als diese gemessen wurde. Ursache hierfür dürfte eine Retentionswirkung der Schneedecke (Abbildung 4.22) sein, die evtl. durch saisonal variierbare Speicherkoeffizienten eliminiert werden könnte.

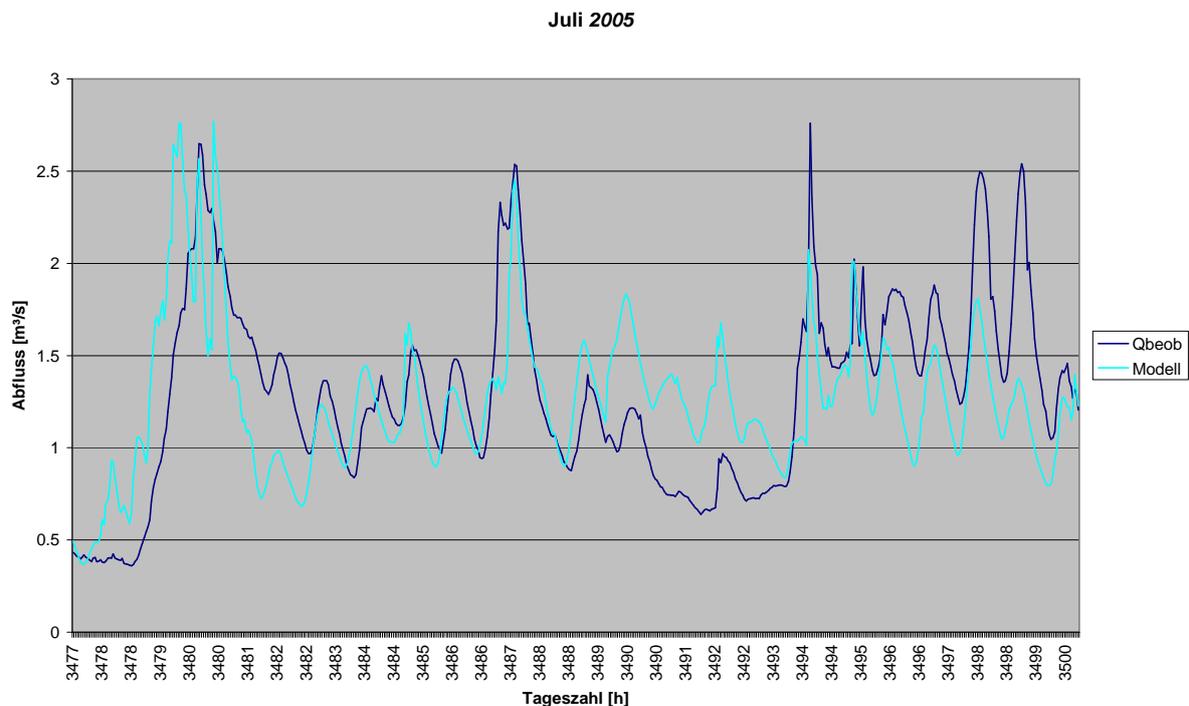


Abbildung 4.22: Strahlungsindexverfahren - Ganglinie Juli 2005

4.4.2 Ergebnisse Schneepegel

Die jeweils besten Werte für Korrelation der Schneepegel mit den Modellwerten (und die zugehörigen mittleren Fehler) für den Schneewasserwert zeigt Tabelle 4.12. Diese Werte wurden nicht in einem eigenständigen Vorgang bestimmt, sie wurden im Laufe der Optimierung für die Abflusswerte gleichzeitig mitermittelt.

Tabelle 4.12: Strahlungsindexverfahren - Korrelation Schneepegel

Schneepegel	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler
PG1	0.9844	108.3	0.9787	204.3	0.9852	48.39
PG2	0.9853	155.3	0.9735	167.0	0.9888	60.99
PG3	0.9571	151.3	0.9248	429.4	0.9726	116.8
PG4	0.9237	217.0	0.7584	547.5	0.9317	193.1
PG5	0.9142	260.4	0.9727	126.7	0.9201	141.7
PG6	0.8065	284.1	0.6062	527.8	0.7281	344.8

Man sieht (ähnlich dem Temperaturindexverfahren) die größten Abweichungen beim Pegel PG6. Im Vergleich der Jahre untereinander fällt auf, dass 2004 schlechter Werte aufweist, 2003 und 2005 von der Größenordnung sich sehr ähnlich sind.

Beispielhaft sind wieder die Pegel PG2 (2650m, gute Übereinstimmung) und PG6 (3050m, geringe Korrelation) angeführt:

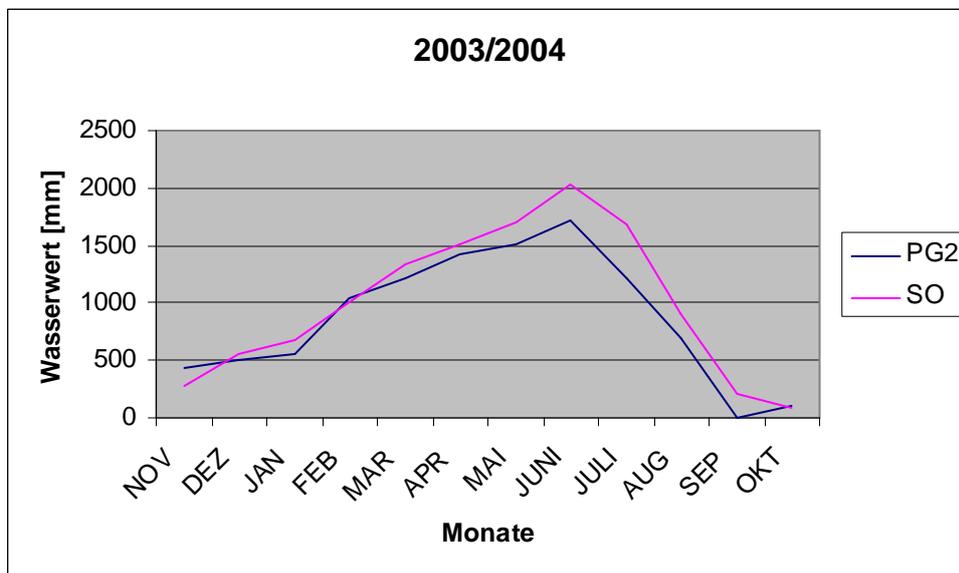


Abbildung 4.23: Strahlungsindexverfahren - PG2 2003/2004 (2650m)

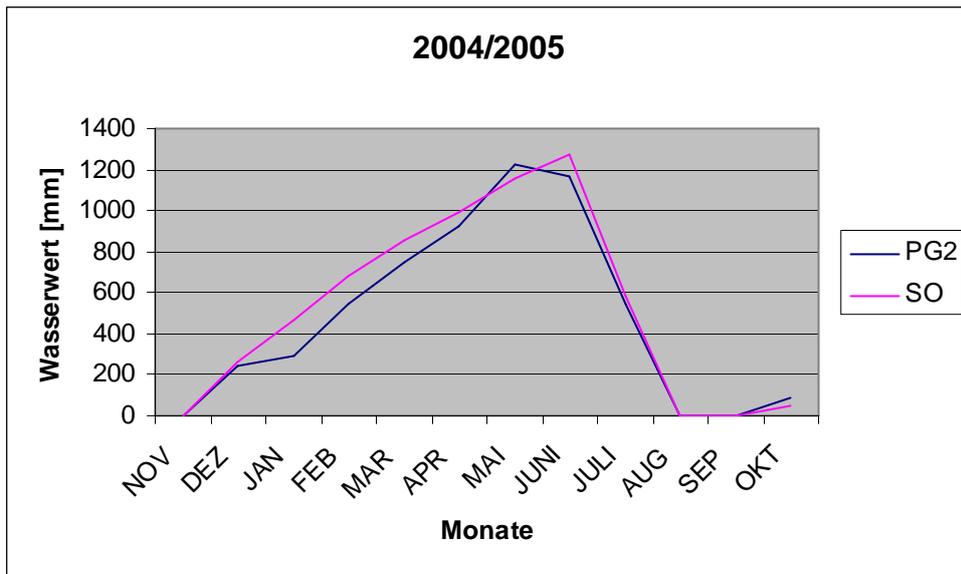


Abbildung 4.24: Strahlungsindexverfahren - PG2 2004/2005 (2650m)

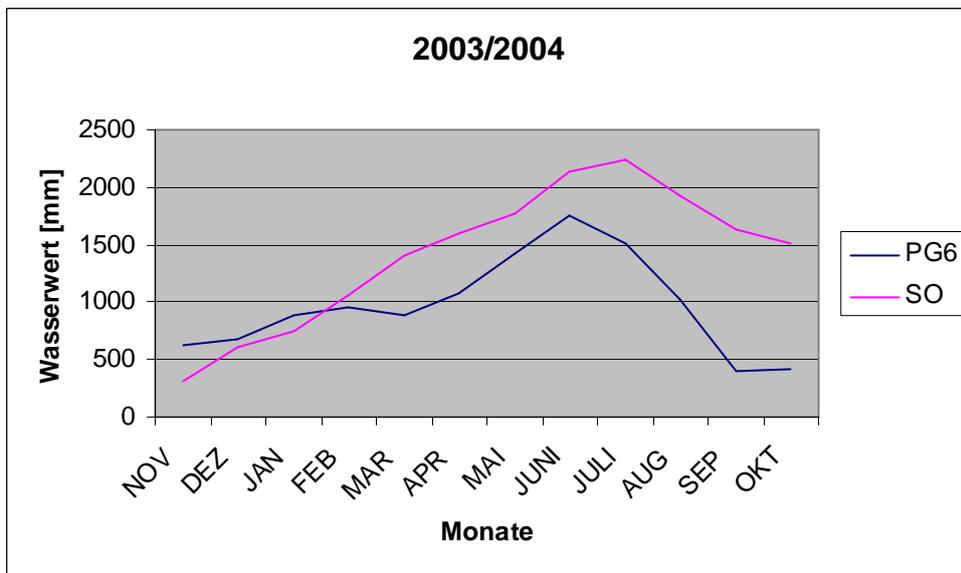


Abbildung 4.25: Strahlungsindexverfahren - PG6 2003/2004 (3050m)

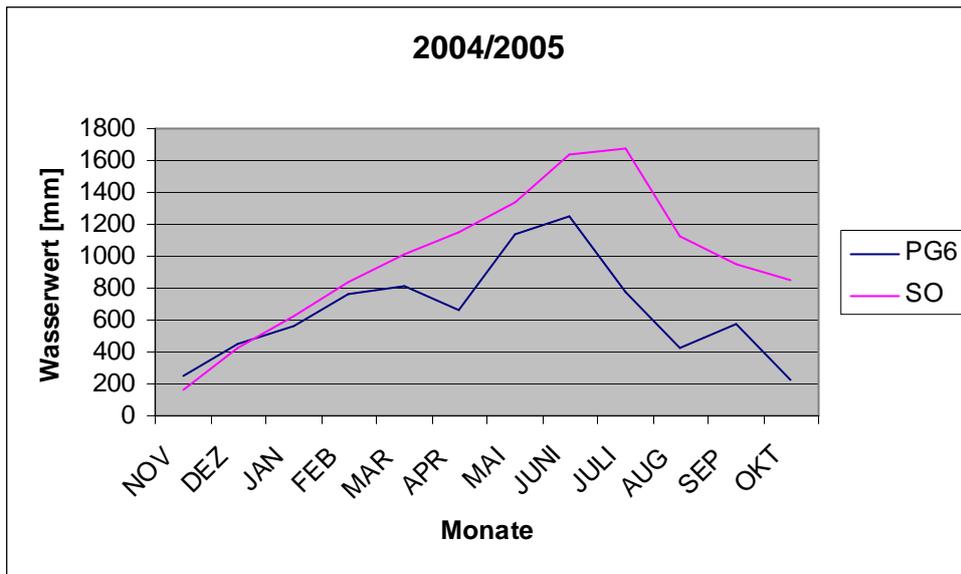


Abbildung 4.26: Strahlungsindexverfahren - PG6 2004/2005 (3050m)

4.4.3 Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen

Die folgenden Abbildungen zeigen analog Kapitel 4.3.3 die Modellergebnisse im Vergleich mit den Schneedichtemessungen.

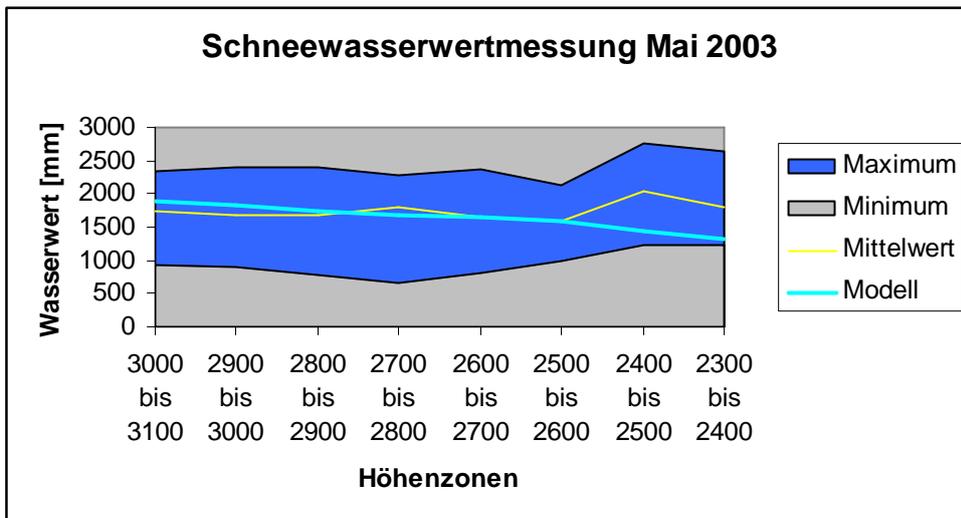


Abbildung 4.27: Strahlungsindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2003

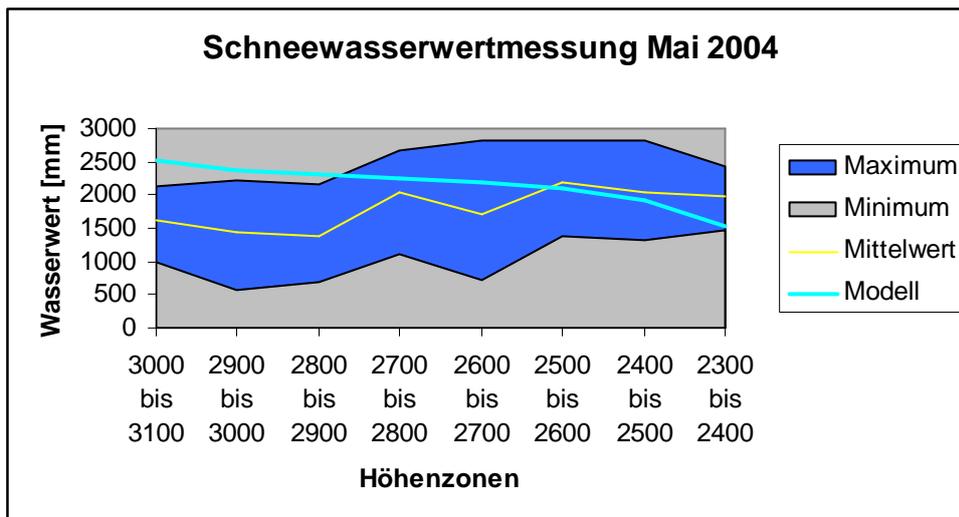


Abbildung 4.28: Strahlungsindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2004

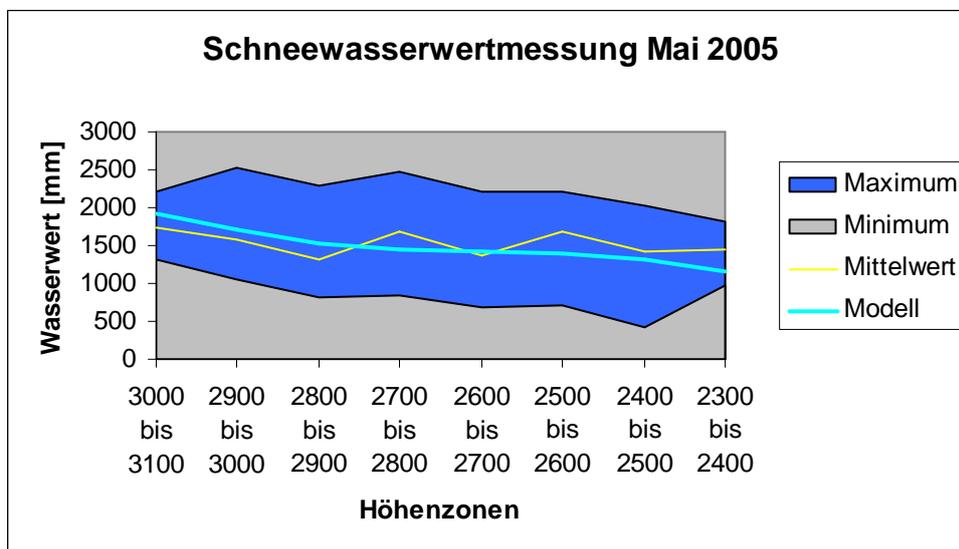


Abbildung 4.29: Strahlungsindexverfahren - Schneewasserwertmessung 2005

Wiederum liegen nur die oberen Höhenzonen für Mai 2004 außerhalb des gemessenen Bereiches.

4.5 Kombiniertes Verfahren

Das kombinierte Verfahren vereint das Temperatur- und das Strahlungsindexverfahren. Dabei wird über Gewichtungsfaktoren (α und β) der Temperatur- und Strahlungsindexanteil gesteuert. Dabei gilt: $\alpha + \beta = 1$. Die Kalibrierung findet in diesem Fall mit den zuvor ermittelten Parametern des Temperatur- und Strahlungsindexverfahrens statt. Diese Parameter (*fak*, *fakice*, *fakrad*, *fakradice*, *tamp*, *thres* und *famp*) werden unverändert verwendet, die Speicherkoeffizienten (*aksnow*, *akice*, *akrain*) werden ebenso wie α und β neu bestimmt.

4.5.1 Ergebnisse Abfluss

Tabelle 4.13 zeigt die erreichbaren Genauigkeiten für das Strahlungsindexverfahren, Tabelle 4.14 die dafür verwendeten Parametersätze.

Tabelle 4.13: Kombiniertes Verfahren - erreichbare Genauigkeiten

Jahr	Korrelationskoeffizient	mittlerer Absolutfehler [m³/s]
2003	0.8479	0.203
2004	0.8499	0.181
2005	0.8870	0.169

Tabelle 4.14: Kombiniertes Verfahren - Parametersätze

Parameter	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler
<i>fak</i>	3	3	2.85	2.85	4	4
<i>fakice</i>	7.2	7.2	6.75	6.75	8	8
<i>fakrad</i>	0.11	0.11	0.11	0.11	0.15	0.15
<i>fakradice</i>	0.25	0.25	0.15	0.15	0.2	0.2
<i>tamp</i>	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
<i>famp</i>	1.1	1.1	1.5	1.5	2	2
<i>aksnow</i>	10	10	10	12	15	14
<i>akice</i>	4	3	5	10	5	5
<i>akrain</i>	8	8	18	18	17	17
α (Gewichtung Temperaturindex)	0.5	0.5	0.9	0.85	0.85	0.85
β (Gewichtung Strahlungsindex)	0.5	0.5	0.1	0.15	0.15	0.15
<i>thres</i>	1	1	1	1	1	1

Die Summenlinien zeigen die folgenden Abbildungen:

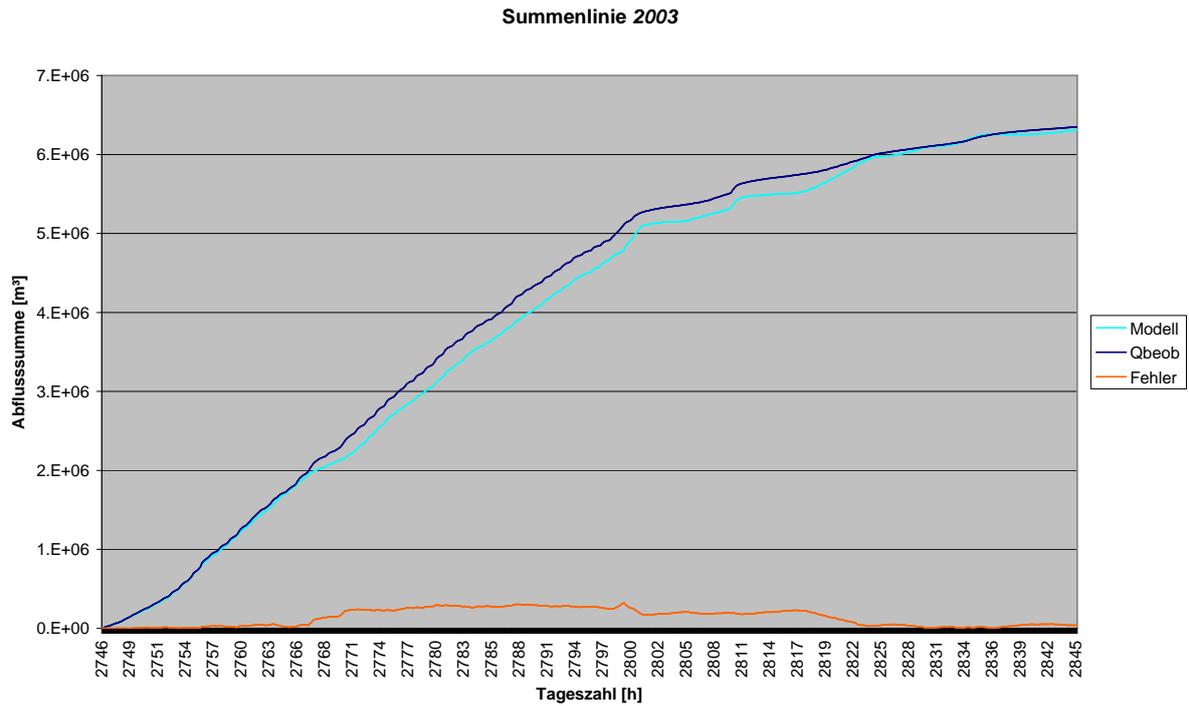


Abbildung 4.30: Kombiniertes Verfahren - Summenlinie 2003

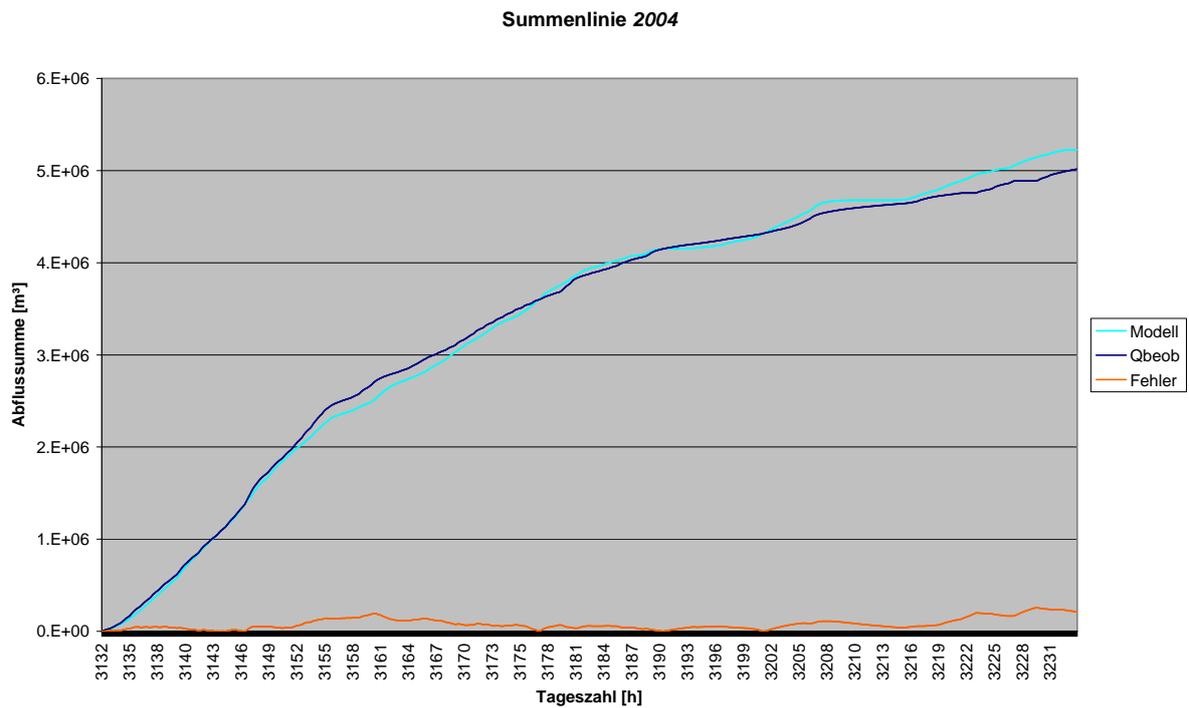


Abbildung 4.31: Kombiniertes Verfahren - Summenlinie 2004

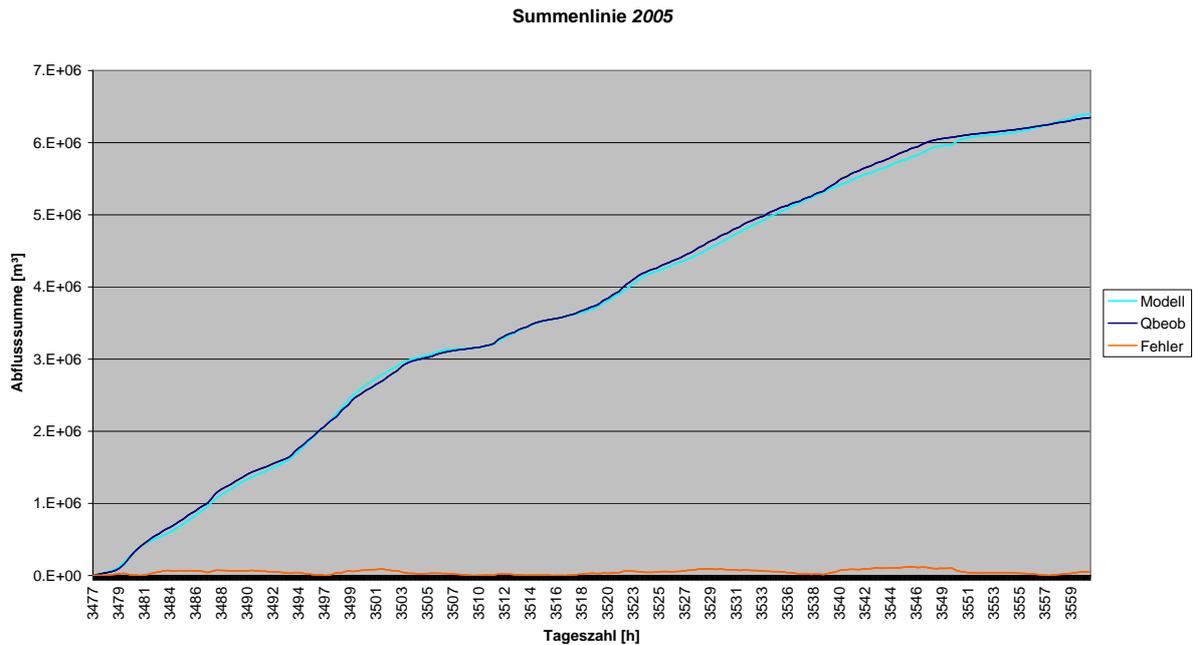


Abbildung 4.32: Kombiniertes Verfahren - Summenlinie 2005

Die relativen Summenfehlern liegen für die optimalen Parameter unter 1%.

Die Abflussbilanz stellt Tabelle 4.15 dar, den prozentuellen Anteil von Schnee-, Gletscherschmelze und Effektivniederschlag am gesamten Modellergebnis zeigt Tabelle 4.16:

Tabelle 4.15: Kombiniertes Verfahren - Abflussbilanz

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
2003	6349648	6307621	0.66	1986260	3304224	1016964
2004	5015286	5070186	1.00	3327768	444715	1301612
2005	6347336	6396959	0.78	2318890	2286349	1791788

Tabelle 4.16: Kombiniertes Verfahren - Prozentanteile an Gesamtabfluss

	Anteil Schneeschmelze [%]	Anteil Eisschmelze [%]	Anteil Regen [%]
2003	32	52	16
2004	66	9	25
2005	36	36	28

Die Ganglinien für die 3 Beobachtungszeiträume sind in den nächsten 3 Abbildungen dargestellt:

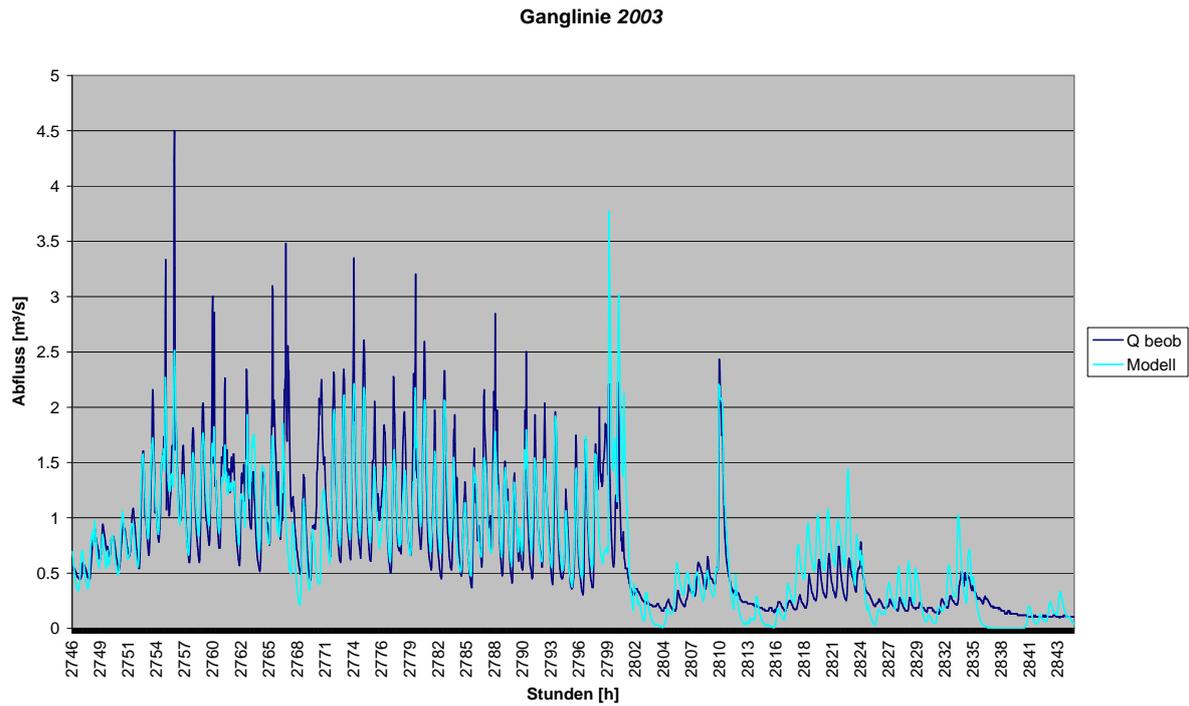


Abbildung 4.33: Kombiniertes Verfahren - Ganglinie 2003

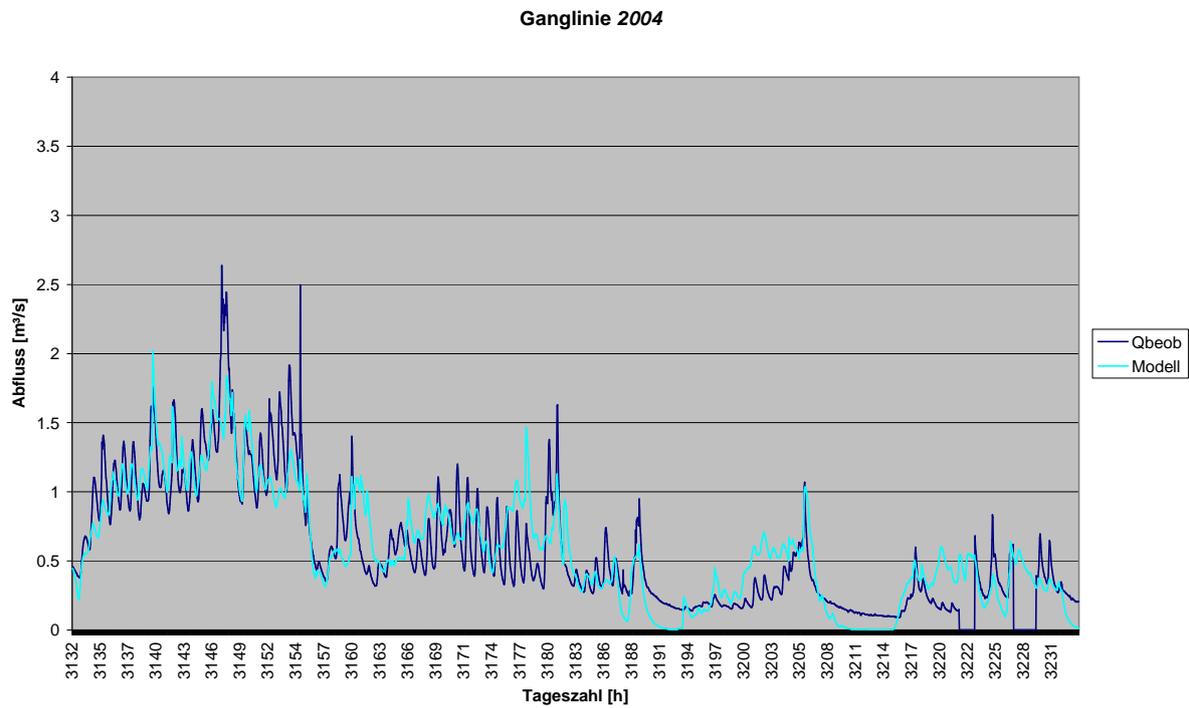


Abbildung 4.34: Kombiniertes Verfahren - Ganglinie 2004

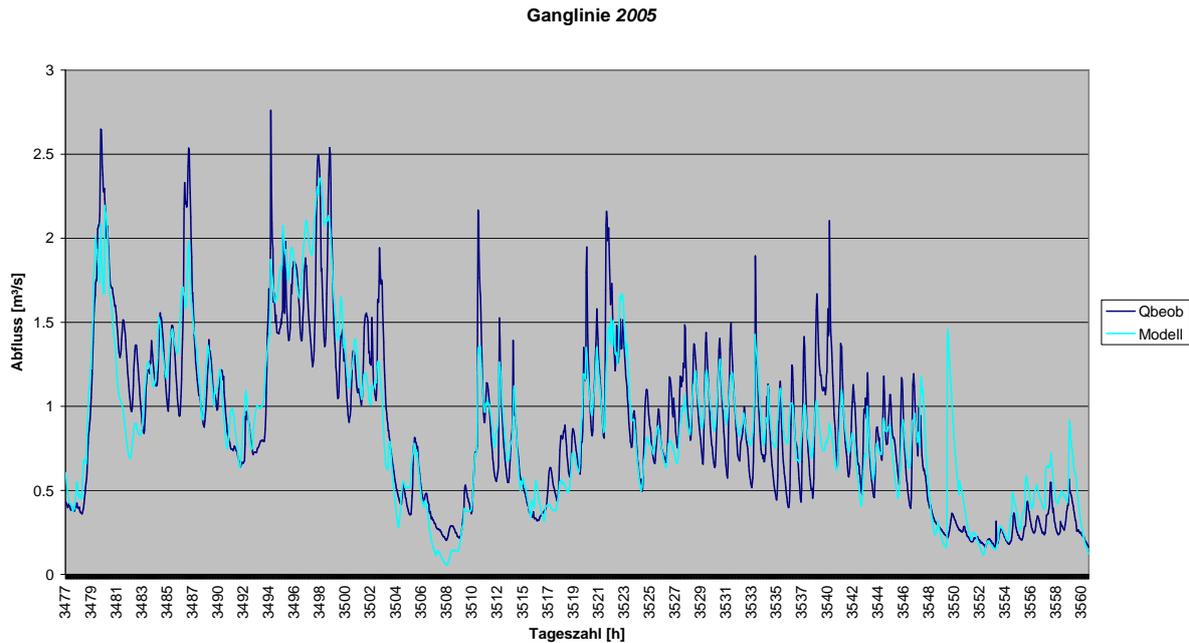


Abbildung 4.35: Kombiniertes Verfahren - Ganglinie 2005

4.5.2 Ergebnisse Schneepegel

Die jeweils besten Werte für Korrelation der Schneepegel mit den Modellwerten (und die zugehörigen mittleren Fehler) für den Schneewasserwert zeigt Tabelle 4.17. Diese Werte wurden nicht in einem eigenständigen Vorgang bestimmt, sie wurden im Laufe der Kalibrierung für die Abflusswerte gleichzeitig mitermittelt.

Tabelle 4.17: Kombiniertes Verfahren - Korrelation Schneepegel

Schneepegel	2003		2004		2005	
	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler	Korrelation	mittlerer Fehler
PG1	0.9823	132.3	0.9832	253.6	0.9918	45.50
PG2	0.9858	184.5	0.9912	60.13	0.9857	76.20
PG3	0.9231	173.2	0.8749	430.0	0.9658	154.4
PG4	0.9388	197.5	0.7527	509.0	0.9563	110.8
PG5	0.9215	240.9	0.9764	111.3	0.9412	115.1
PG6	0.8378	248.1	0.6412	479.8	0.9045	133.6

Beispielhaft sind wieder die Pegel PG2 (gute Übereinstimmung) und PG6 (geringe Korrelation) angeführt:

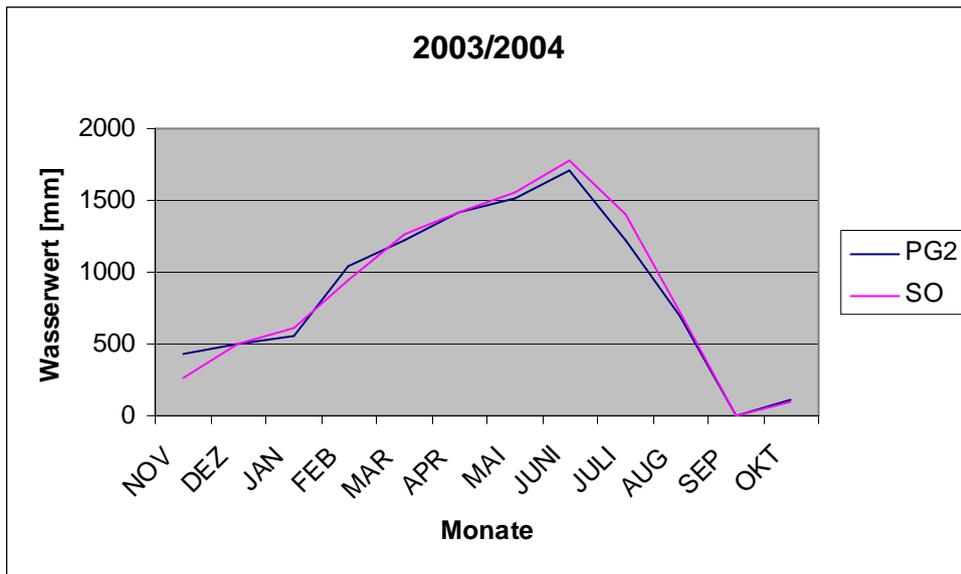


Abbildung 4.36: Kombiniertes Verfahren - PG2 2003/2004 (2650m)

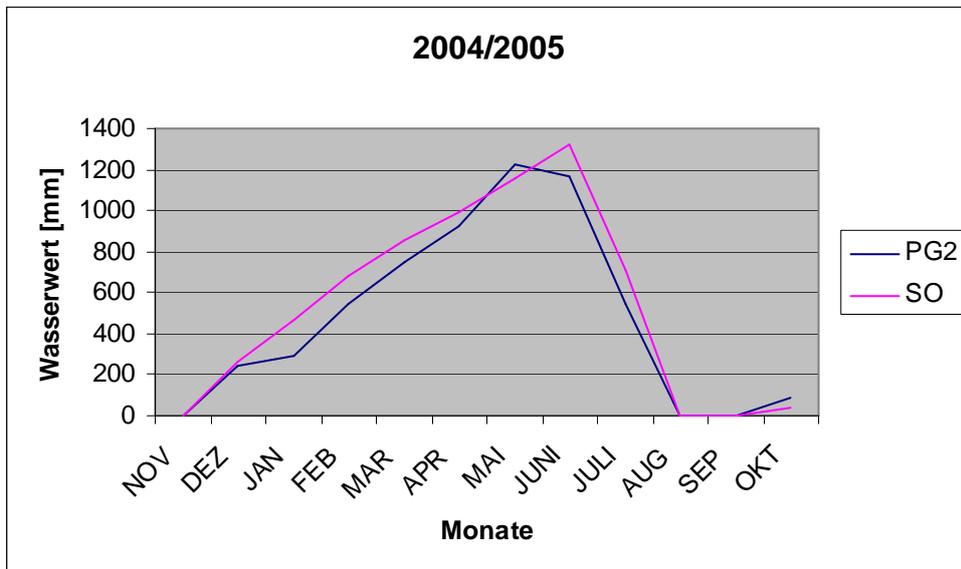


Abbildung 4.37: Kombiniertes Verfahren - PG2 2004/2005 (2650m)

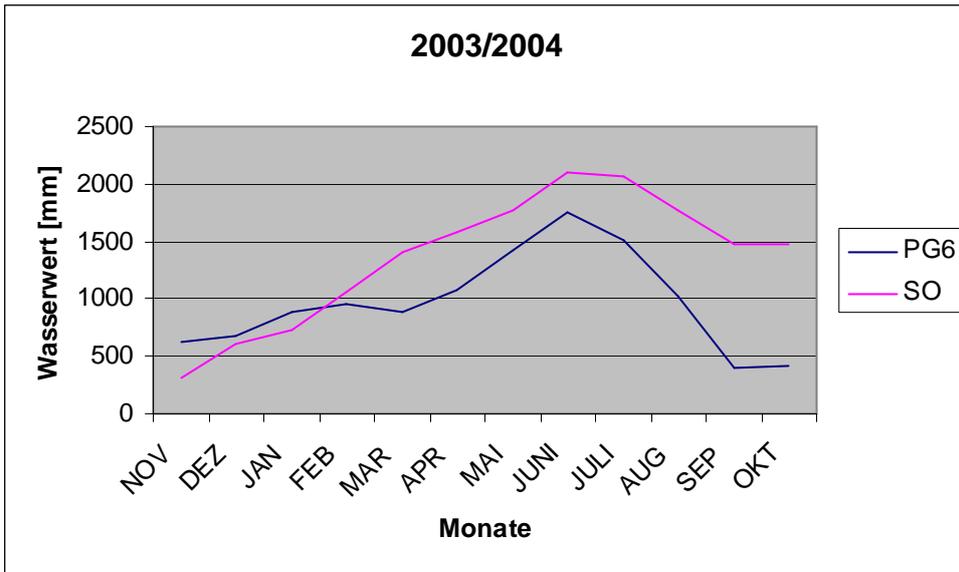


Abbildung 4.38: Kombiniertes Verfahren - PG6 2003/2004 (3050m)

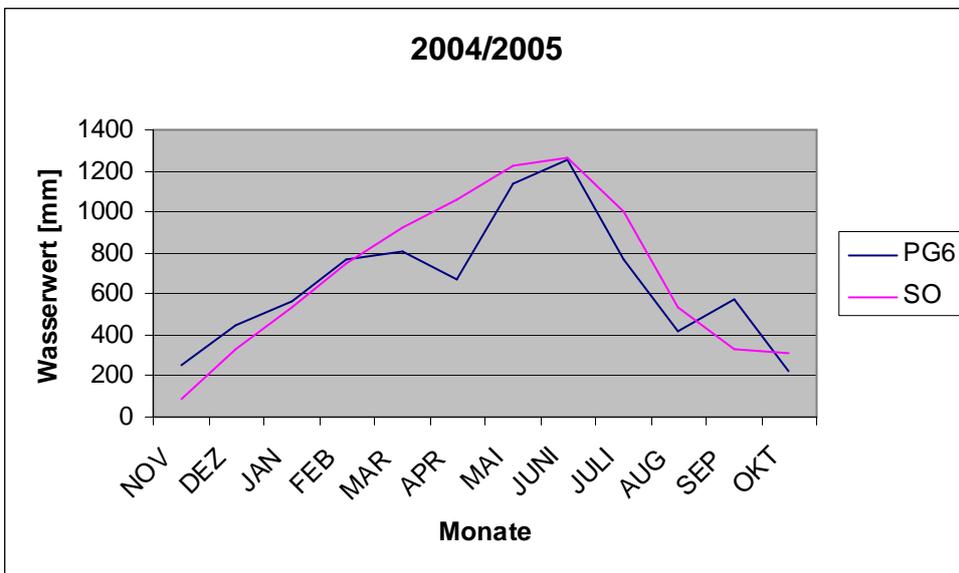


Abbildung 4.39: Kombiniertes Verfahren - PG6 2004/2005 (3050m)

4.5.3 Ergebnisse Schneewasserwertsondierungen

Die folgenden Abbildungen zeigen analog Kapitel 4.3.3 die Modellergebnisse im Vergleich mit den Schneedichtemessungen:

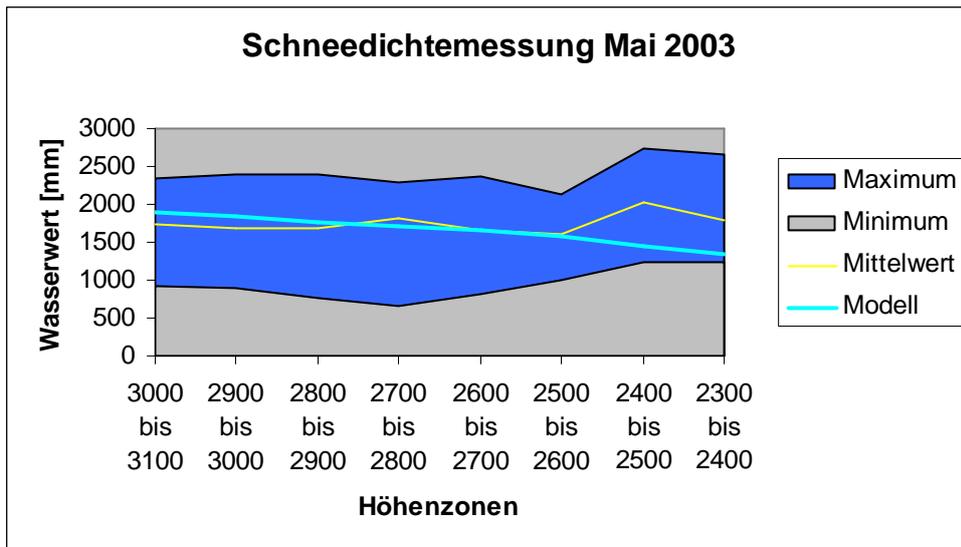


Abbildung 4.40: Kombiniertes Verfahren - Schneewasserwertmessung 2003

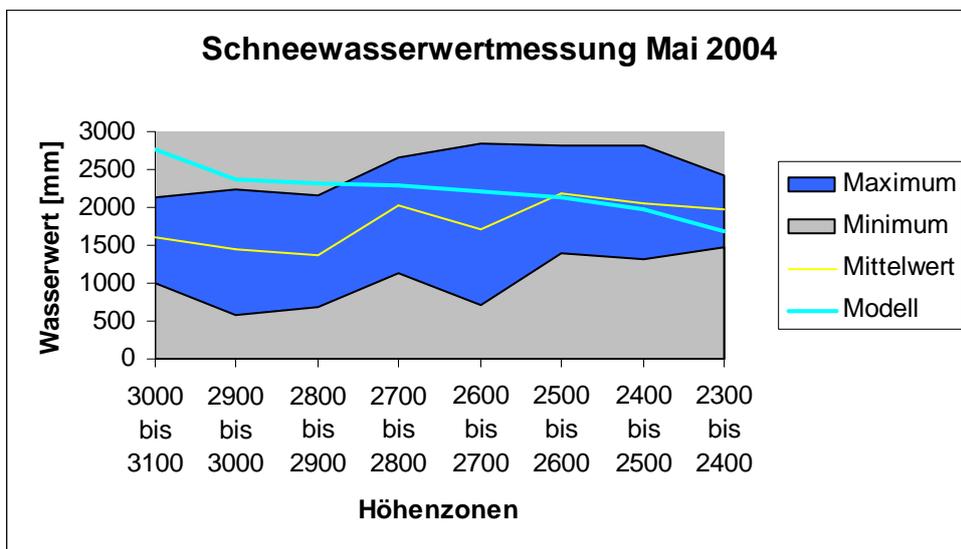


Abbildung 4.41: Kombiniertes Verfahren - Schneewasserwertmessung 2004

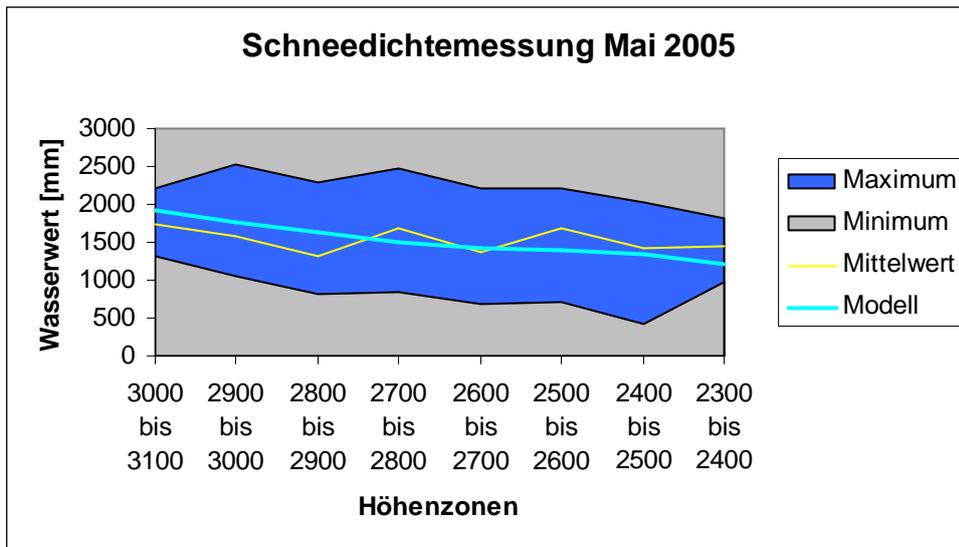


Abbildung 4.42: Kombiniertes Verfahren - Schneewasserwertmessung 2005

4.6 Methodenvergleich

Die Abflussbilanz für alle 3 Verfahren in den 3 Beobachtungszeiträumen (siehe Kapitel 3.1) ist in der folgenden Grafik dargestellt: KV ist kurz für Kombiniertes Verfahren, SI für Strahlungsindexverfahren und TI für Temperaturindexverfahren; blau steht für die Abflusssumme der Abflussmessung, lila für die Schneeschmelze, weiß für die Gletscherschmelze, und grün für den Effektivregen.

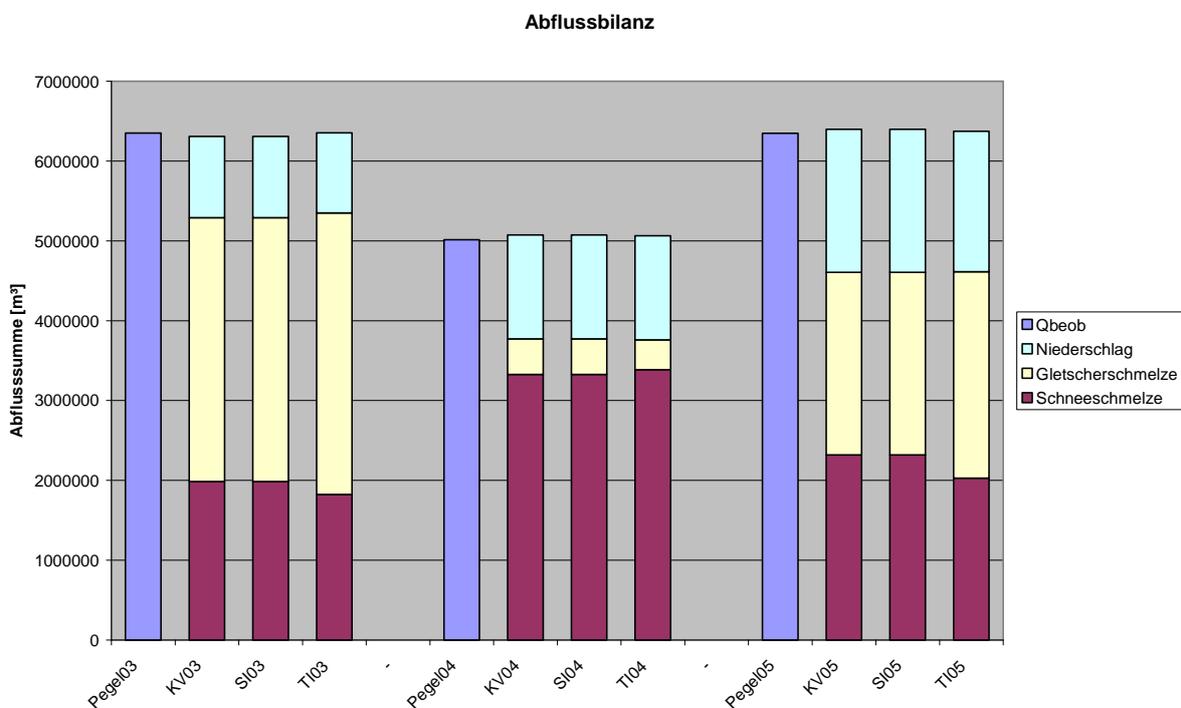


Abbildung 4.43: Methodenvergleich - Abflussbilanz

Man sieht deutliche Unterschiede von Jahr zu Jahr: 2003 ist zu einem großen Teil von Gletscherschmelze geprägt, 2004 mehr von Schneeschmelze, 2005 ist in etwa ausgeglichen. Der Effektivniederschlagsanteil nimmt in den 3 Jahren leicht zu, ist aber annähernd konstant.

Wie in Kapitel 4.3 gesehen hat das Temperaturindexverfahren Schwierigkeiten in der Nachbildung des Tagesganges, aber Stärken in der Bilanzierung des Schmelzvorganges. Besonders bei ausgeprägter Gletscherschmelze hat das Temperaturindexverfahren Schwächen. Das Strahlungsindexverfahren bildet Spitzen im Tagesverlauf deutlich besser wieder vor allem auch bei Gletscherschmelze. Das Kombinierte Verfahren liegt zwischen diesen beiden Möglichkeiten.

Ein gutes Beispiel für diese Tatsache bietet die Betrachtung eines Teiles der Ganglinie des August 2003. Hier findet fast nur Gletscherschmelze statt, es fällt kaum Niederschlag.

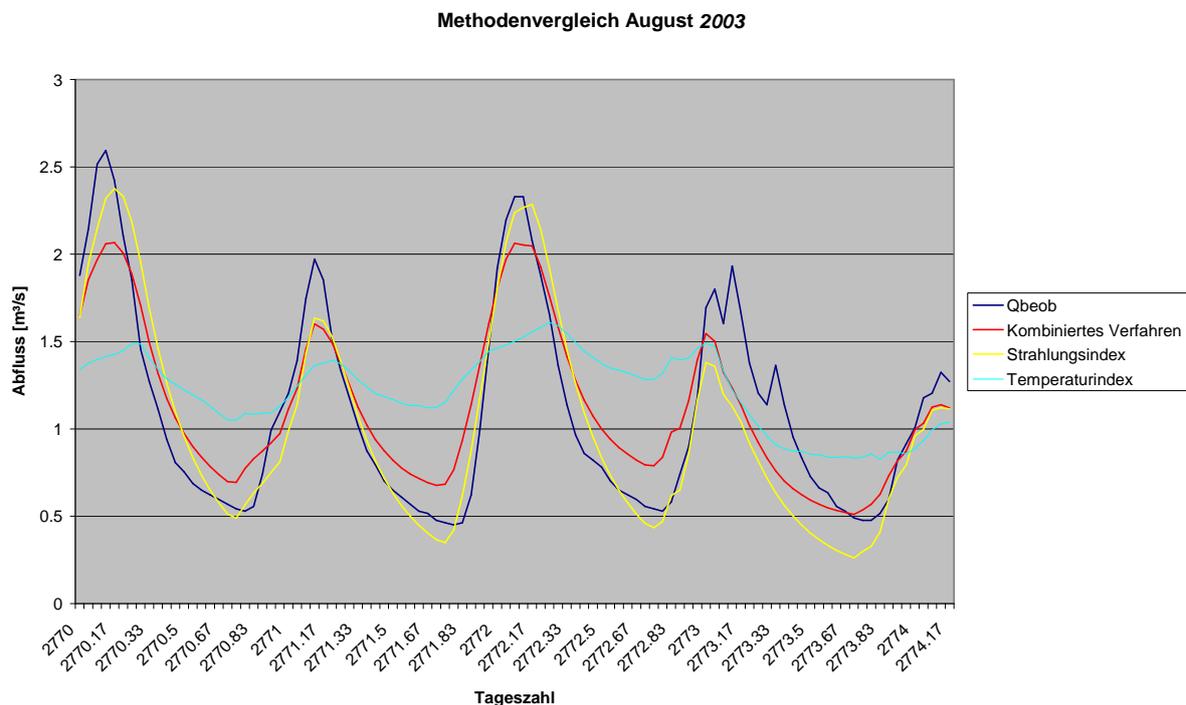


Abbildung 4.44: Methodenvergleich - Ganglinie August 2003

5 Sensitivitätsanalysen

Dieses Kapitel soll eine Übersicht über den Einfluss einzelner Parameter und Module auf das Gesamtergebnis geben. Das Jahr 2005 bietet auf Grund seiner ausgeglichenen Verhältnisse von Gletscher- und Eisschmelze die besten Vergleichsmöglichkeiten. Das bedeutet im Detail, dass für alle abflussbezogenen Daten im folgenden Kapitel der Zeitraum 9. Juli 2005 (1:00) bis 30. September 2005 (0:00) betrachtet wird. Für alle Schneepegel Beobachtungen wird das gesamte hydrologische Jahr (1. Oktober 2004 bis 30. September 2005) herangezogen. Die einzelnen Kapitel erläutern die Auswirkungen auf das Ergebnis wenn nur einzelne Parameter verändert werden. Alle übrigen Parameter entsprechen den Ergebnissen des Kapitel 4.

5.1 Einfluss von Albedo

Nachfolgend die Abflussbilanz für das Jahr 2005 im Kombinierten Verfahren mit und ohne Albedo (alle übrigen Parameter sind in beiden Versuchen gleich):

Tabelle 5.1: Albedo - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m³]	Modell insgesamt [m³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneesmelze [m³]	Modell Eisschmelze [m³]	Modell Regen [m³]
mit Albedo	6347336	6396959	0.78	2318890	2286349	1791788
ohne Albedo	6347336	6763212	6.55	2002061	2969352	1791788

Insgesamt errechnet das Modell ohne das Zusatzmodul Albedo für den Beobachtungszeitraum eine höhere Abflusssumme, wobei die Schneesmelze geringer und die Gletschersmelze größer als bei der Berechnung mit Albedo ist. Abbildung 5.1 illustriert diese Tatsache:

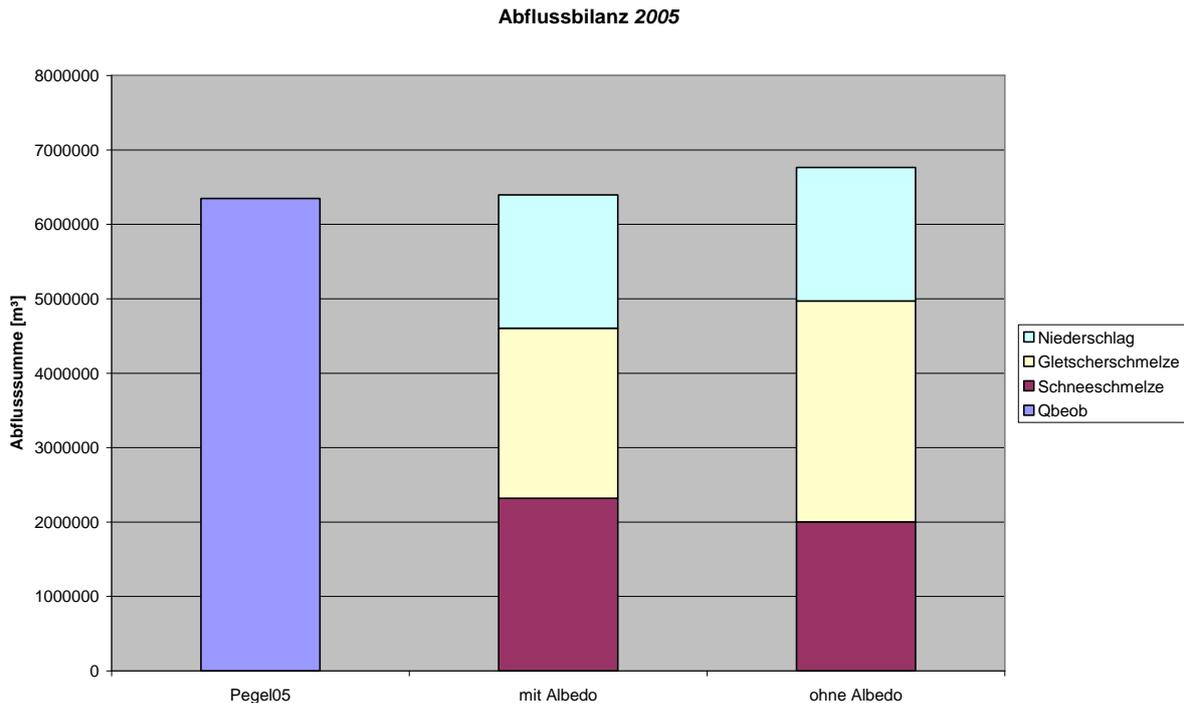


Abbildung 5.1: Albedo - Abflussbilanz 2005

Die geringere Schneeschmelze lässt sich durch einen Blick auf den Verlauf des Schneewasserwertes erklären. Während in der Akkumulationsphase sich die Modelle mit und ohne Albedo noch genau decken, apert das Modell ohne Albedo schneller aus, deshalb findet im Beobachtungszeitraum der Abflussmessung, welcher erst später beginnt als das Einsetzen der Schmelze, weniger Schneeschmelze statt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen diese Tatsache für verschiedene Höhenzonen (PG1 2450m, PG2 2650m, PG6 3050m):

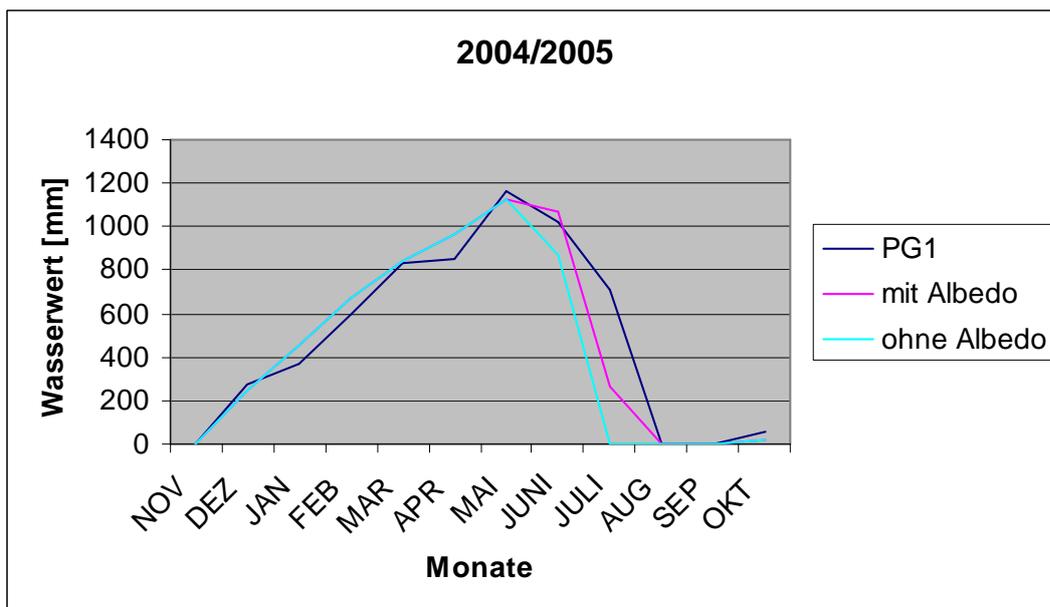


Abbildung 5.2: Albedo - PG1 2004/2005 (2450m)

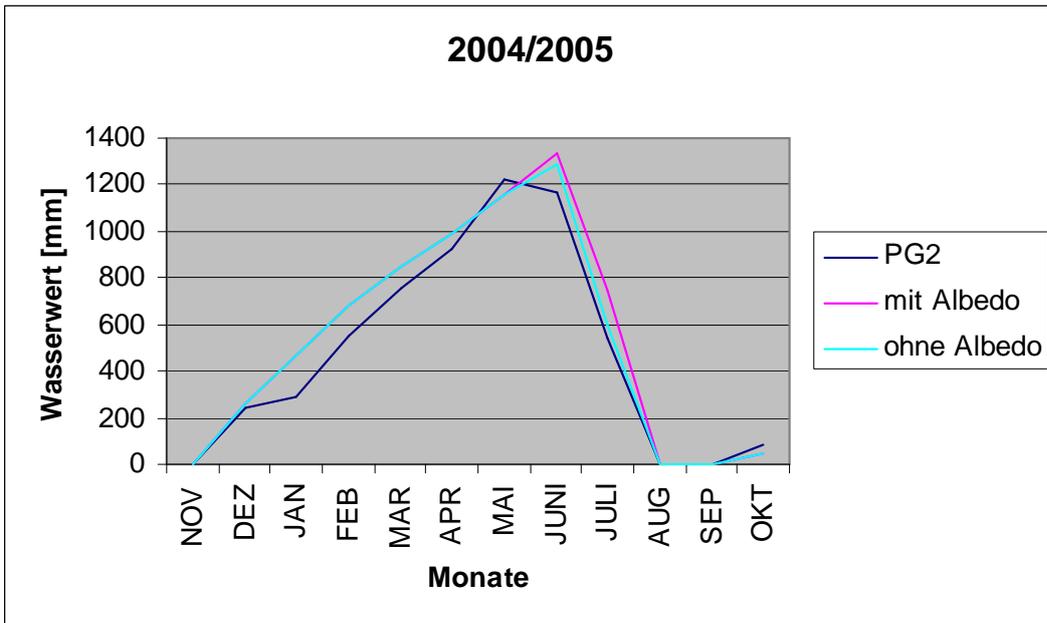


Abbildung 5.3: Albedo - PG2 2004/2005 (2650m)

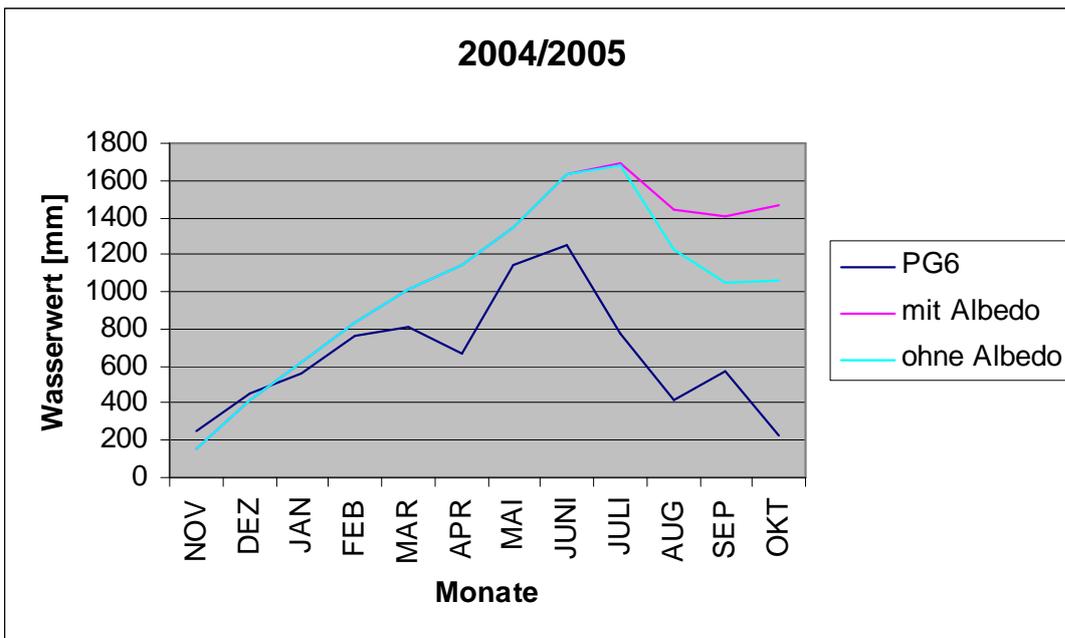


Abbildung 5.4: Albedo - PG6 2004/2005 (3050m)

5.2 Einfluss von Cold Content

Der Einfluss von Cold Content auf die Abflussbilanz wird in Tabelle 5.2 und Abbildung 5.5 dargestellt:

Tabelle 5.2: Cold Content - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
mit Cold Content	6347336	6396959	0.78	2318890	2286349	1791788
ohne Cold Content	6347336	6271171	1.20	1869818	2609625	1791788

Abflussbilanz 2005

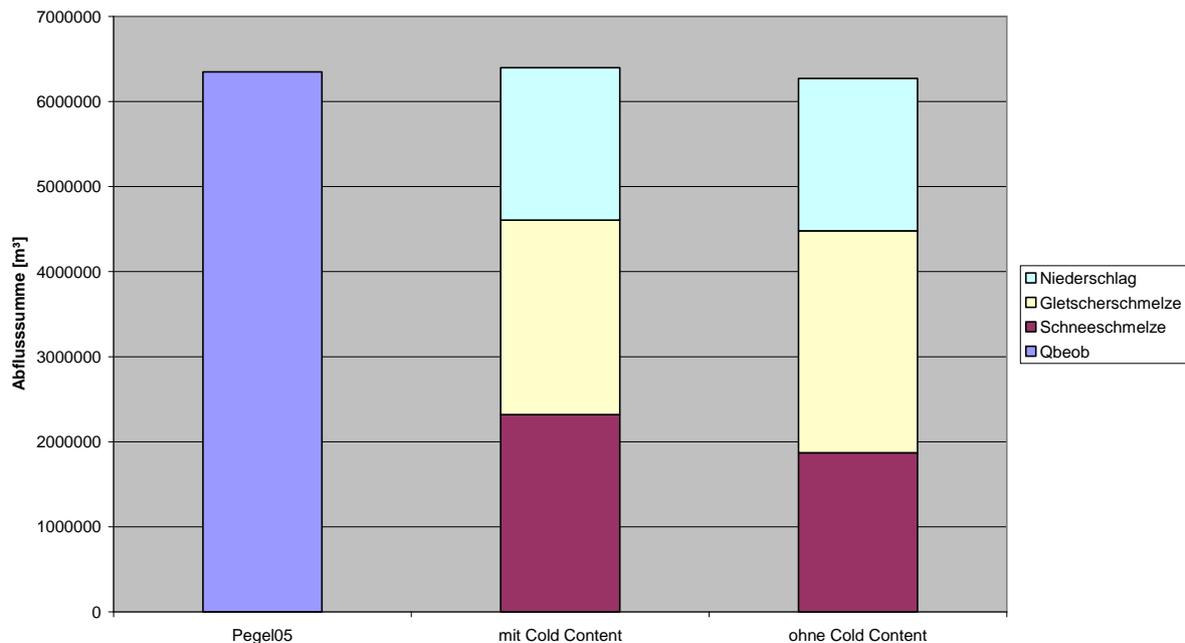


Abbildung 5.5: Cold Content - Abflussbilanz 2005

Wenn man das Cold Content Modul ausschaltet, nimmt die Schneeschmelze während des Beobachtungszeitraumes ab, die Gletscherschmelze nimmt zu. Die geringere Schneeschmelze lässt sich durch ein früheres Abschmelzen und daraus resultierend auch aus einer geringeren Akkumulation erklären. Die folgenden Abbildungen zeigen deutlich, dass ohne Cold Content im Modell weniger Schnee (geringerer Schneewasserwert) akkumuliert wird. In den obersten Höhenzonen findet teilweise erst bei Ausschalten von Cold Content eine Schmelze statt, da hier oft die Temperaturen auch im Hochsommer um 0°C liegen.

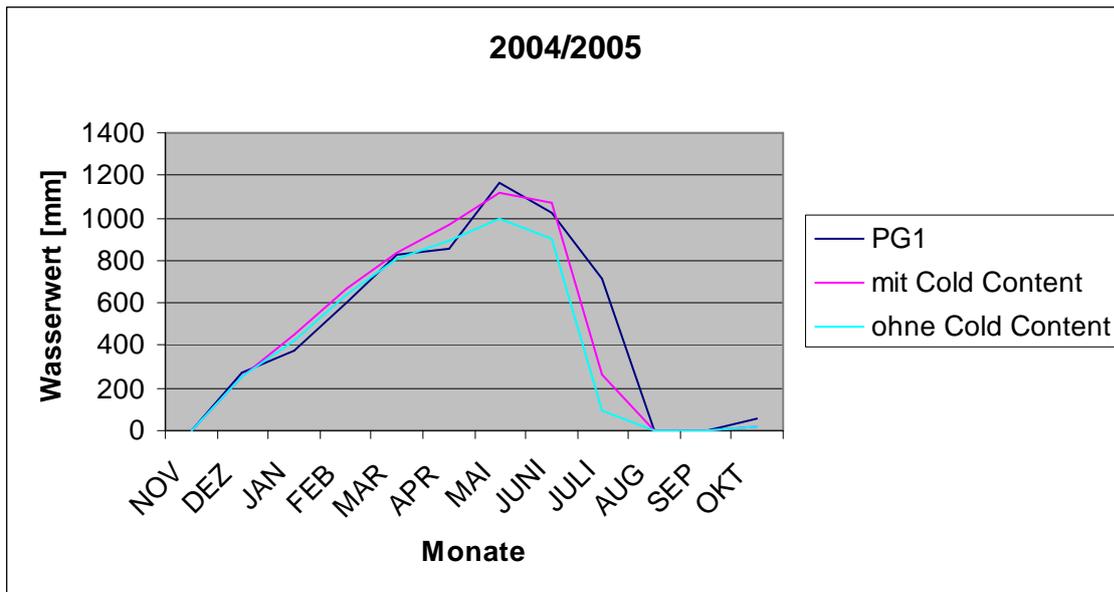


Abbildung 5.6: Cold Content - PG1 2004/2005 (2450m)

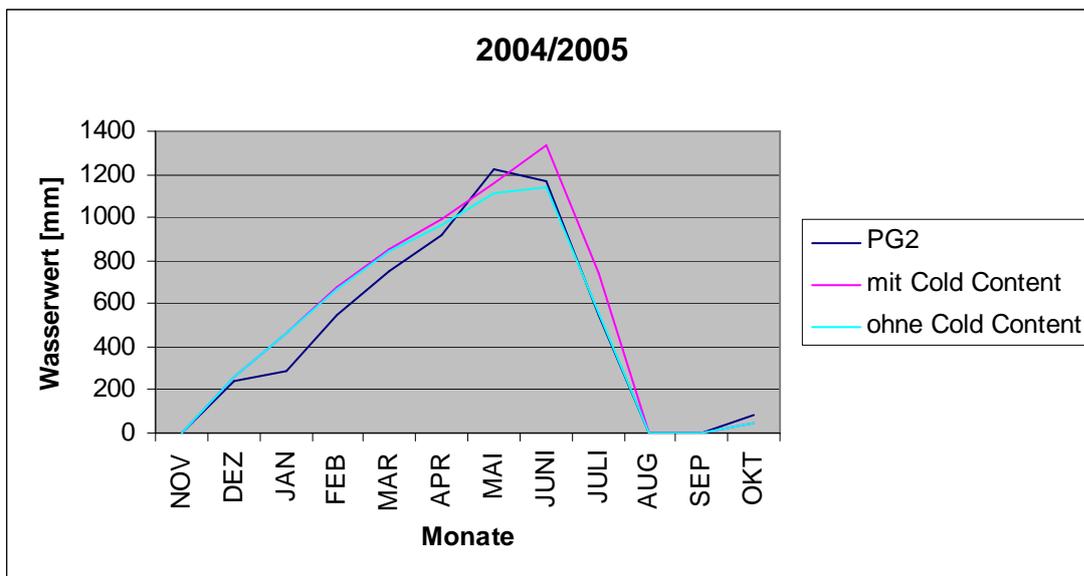


Abbildung 5.7: Cold Content - PG2 2004/2005 (2650m)

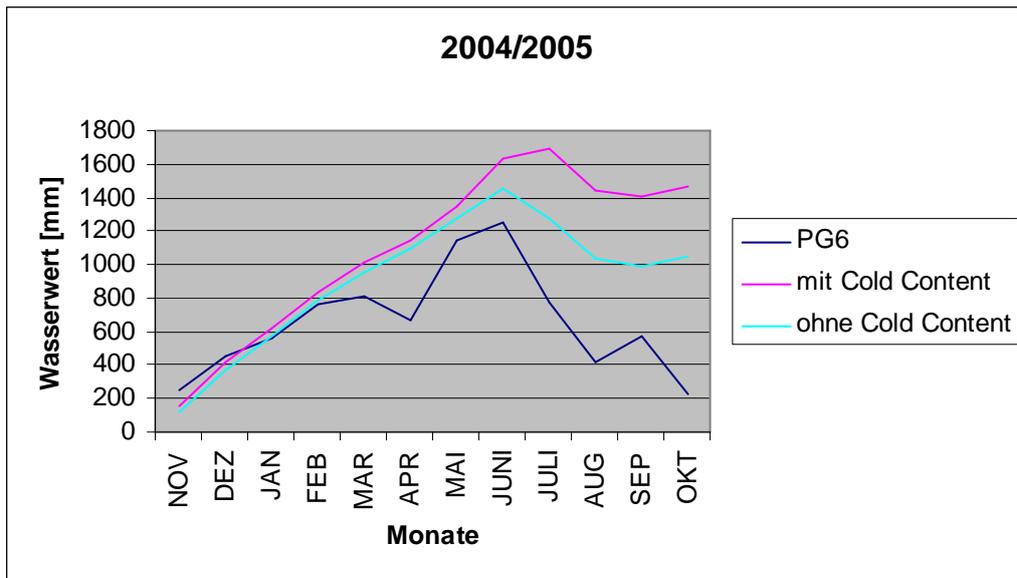


Abbildung 5.8: Cold Content - PG6 2004/2005 (2850m)

5.3 Einfluss von Expositionsgewichtung

Die Expositionsgewichtung hat in dieser Arbeit einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Ergebnis, begründet durch die Annahme der Gewichtungsfaktoren nahe eins. Kapitel 2.9 erläutert wie diese Faktoren bestimmt wurden. Der Einfluss des Moduls Expositionsgewicht auf die Abflussbilanz wird in Tabelle 5.3 und Abbildung 5.9 dargestellt:

Tabelle 5.3: Expositionsgewicht - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
mit Exposition	6347336	6396959	0.78	2318890	2286349	1791788
ohne Exposition	6347336	6317172	0.48	2361636	2163503	1791788

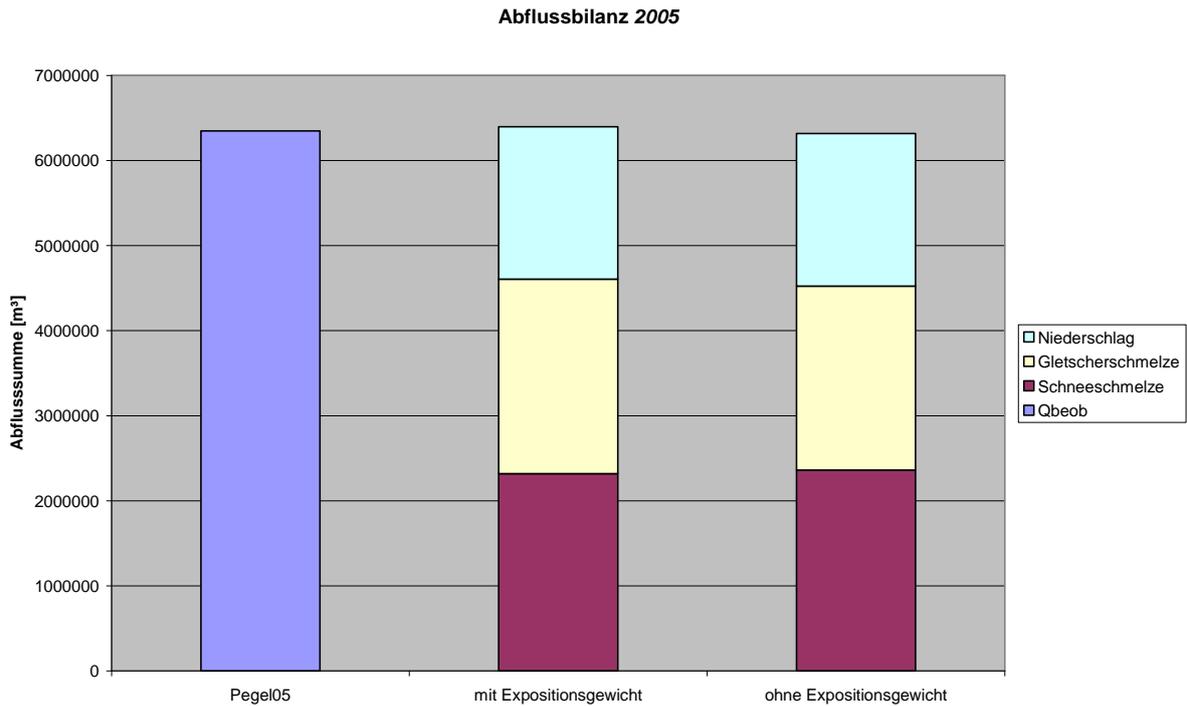


Abbildung 5.9: Expositionsgewicht - Abflussbilanz 2005

Der Einfluss der Expositionsgewichtung bedingt in Summe für das Einzugsgebiet Goldbergkees eine geringfügig höhere Schneeschmelze und eine Verringerung der Gletscherschmelze. Der Effekt kann aber nicht auf alle Höhenzonen übertragen werden, da die Flächenanteile der Expositionsklassen der Natur entsprechend nicht in allen Höhenzonen gleich ist. Einen besseren Überblick bietet die Betrachtung der Schneepegel:

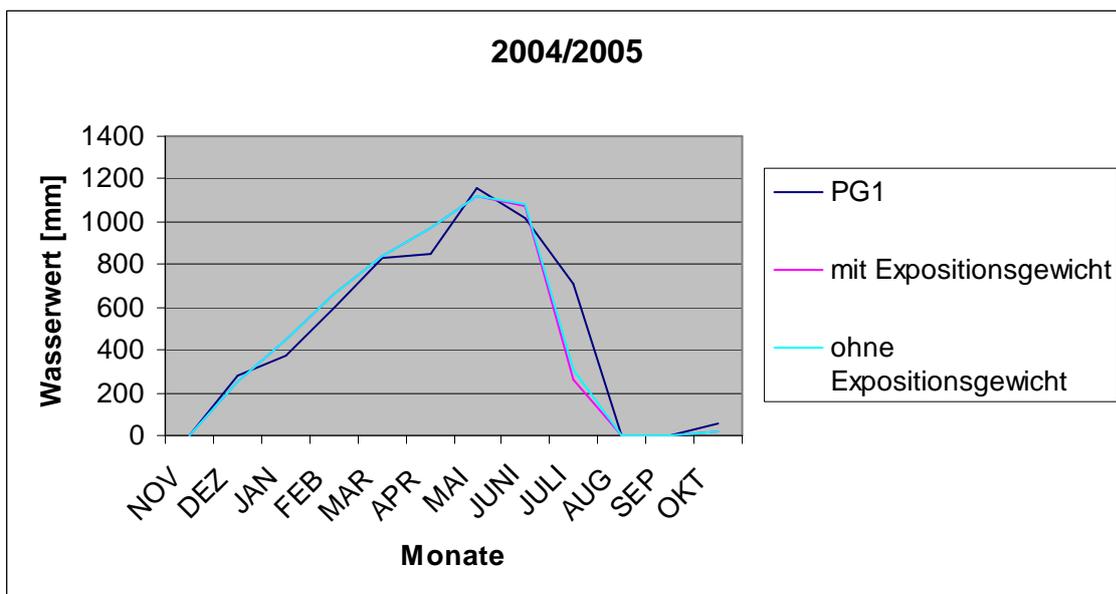


Abbildung 5.10: Expositionsgewicht - PG1 2004/2005 (2450m)

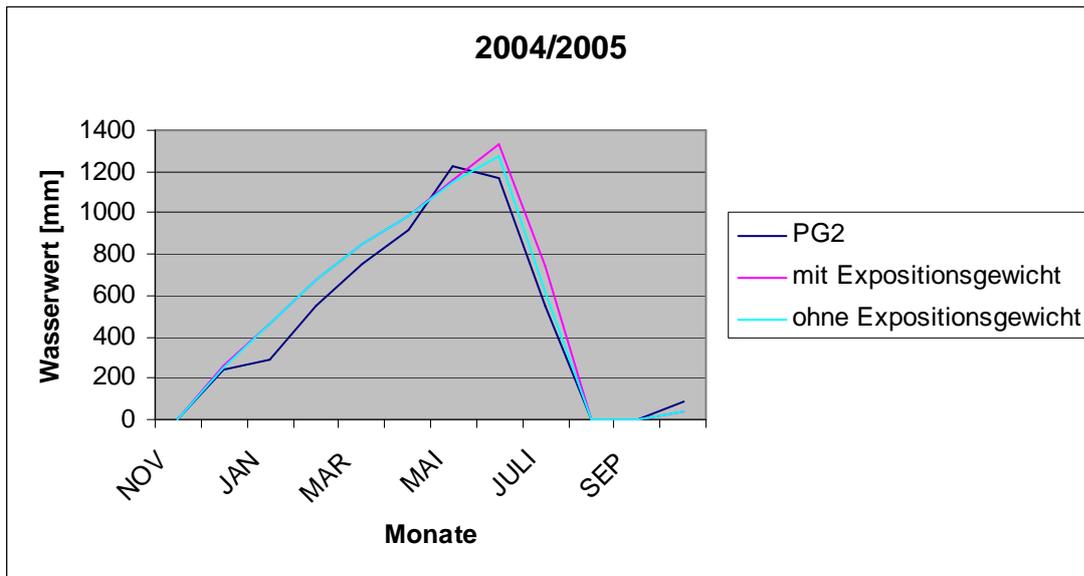


Abbildung 5.11: Expositionsgewicht - PG2 2004/2005 (2650m)

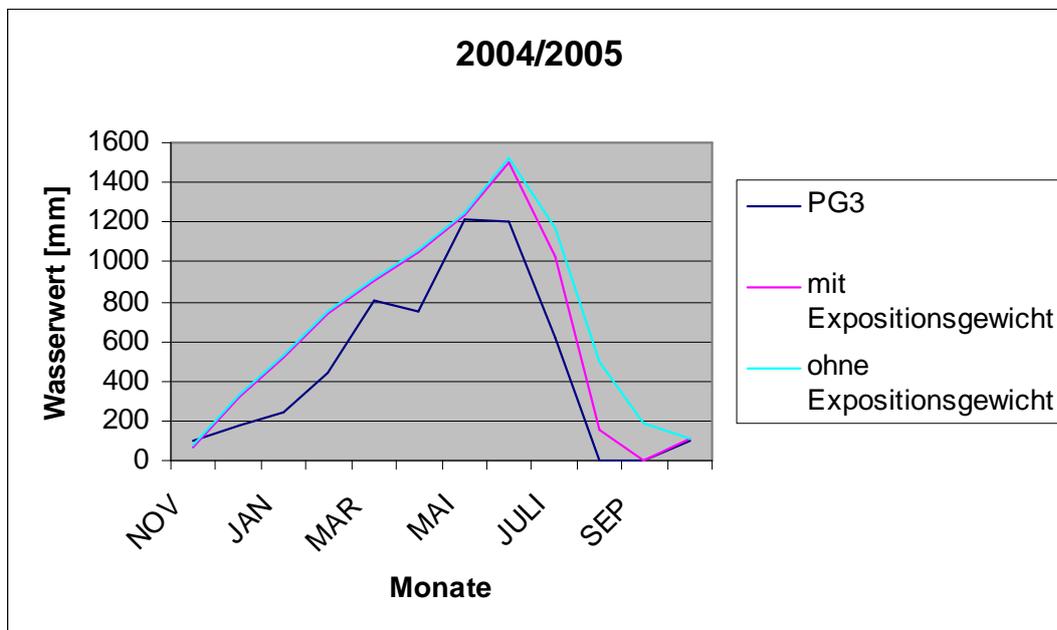


Abbildung 5.12: Expositionsgewicht - PG3 2004/2005 (2850m)

In diesen Beispielen liegen in den Höhenzonen des Pegels PG 1(2450m) und PG3(2850m) die Werte ohne Expositionsgewicht knapp über den Modellergebnissen mit Expositionsgewicht, in der Höhenzone des Pegels PG 2 (2650m) verhält es sich umgekehrt.

5.4 Einfluss der Zusatzmodule

Als Zusatzmodule werden hier der Albedofaktor, Cold Content und die Expositionsgewichtung bezeichnet. Im Vergleich der einzelnen Module untereinander hat Expositionsgewicht den geringsten Effekt, Cold Content wirkt sich auf die Akkumulation aus und Albedo hat einen Effekt auf die Geschwindigkeit des Abschmelzens.

Tabelle 5.4: Zusatzmodule - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
mit Modulen	6347336	6396959	0.78	2318890	2286349	1791788
ohne Albedo	6347336	6763212	6.55	2002061	2969352	1791788
ohne Cold Content	6347336	6271171	1.20	1869818	2609625	1791788
ohne Exposition	6347336	6317172	0.48	2361636	2163503	1791788
ohne Module	6347336	6493608	2.30	1263103	3438716	1791788

Abflussbilanz 2005

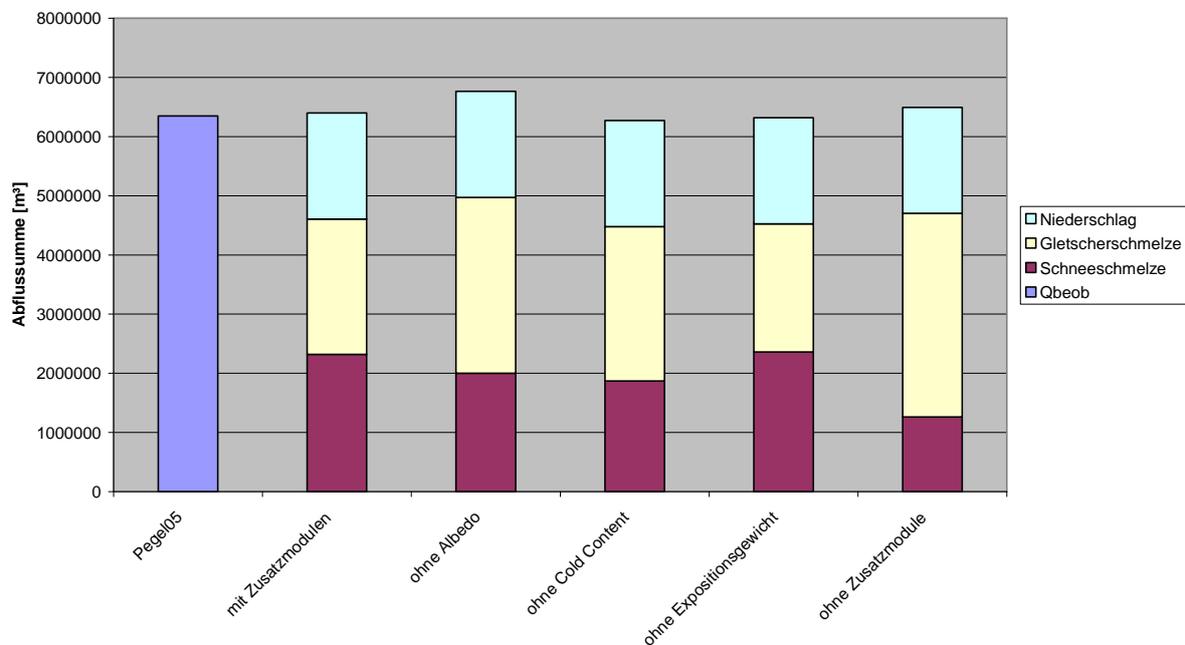


Abbildung 5.13: Zusatzmodule - Abflussbilanz 2005

Eliminiert man alle 3 Zusatzmodule zur gleichen Zeit so kumulieren sich die Effekte, besonders Cold Content und Albedo bewirken gemeinsam eine geringere Akkumulation und ein früheres Abschmelzen und dadurch bleibt in Folge weniger Schnee übrig, der im Beobachtungszeitraum abschmelzen könnte. Dies bedingt weiters auch eine höhere Gletscherschmelze. Die Schneepegeldiagramme bestätigen diese Beobachtung:

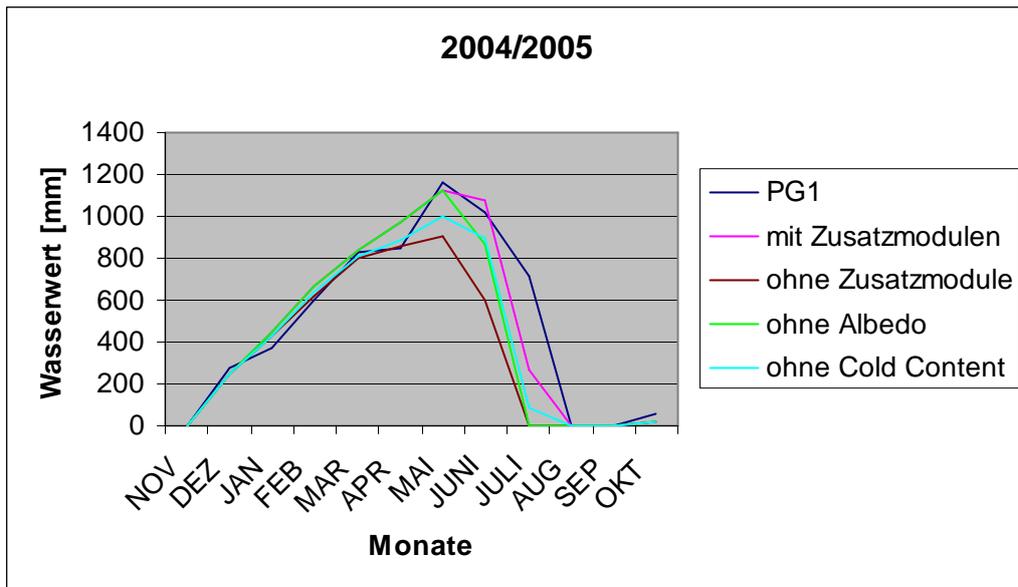


Abbildung 5.14: Zusatzmodule - PG1 2004/2005 (2450m)

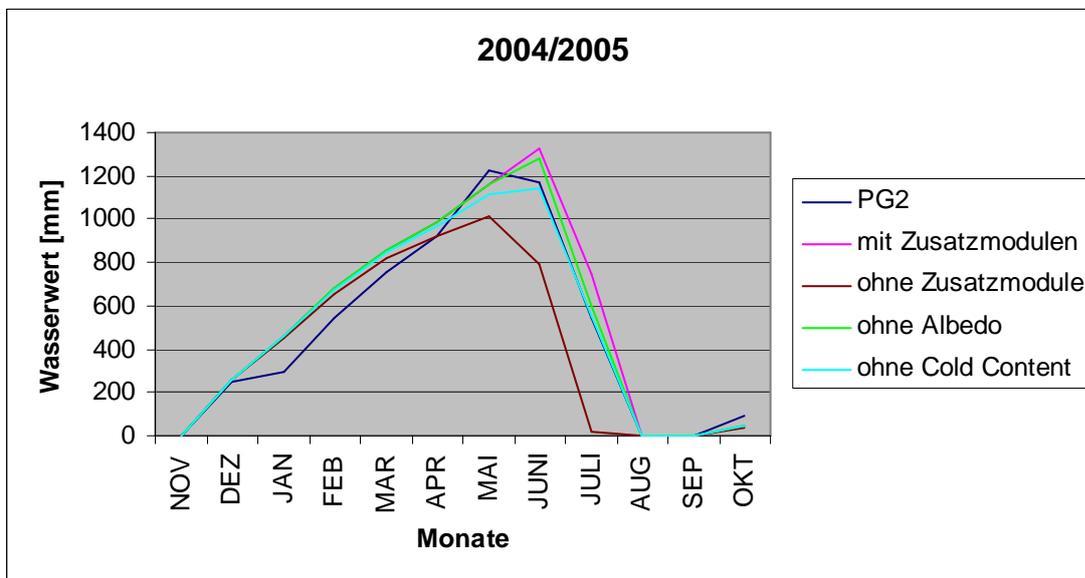


Abbildung 5.15: Zusatzmodule - PG2 2004/2005 (2650m)

5.5 Einfluss des Grad-Tag Faktors für die Schneeschmelze (*fak*)

Für die Analyse des Einflusses des Grad Tag Faktors (*fak*) wird das Temperaturindexverfahren für das Jahr 2005 verwendet. Bei ansonsten gleich bleibenden Parametern wird *fak* variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die Abflussbilanz bei unterschiedlichen Grad Tag Faktoren stellen Tabelle 5.5 und Abbildung 5.16 dar; die für diese Analyse verwendeten Parameter sind in Tabelle 5.6 zusammen gestellt:

Tabelle 5.5: Grad-Tag Faktor - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
<i>fak=2</i>	6347336	5456722	14.03	2885843	779065	1791788
<i>fak=4</i>	6347336	6396959	0.78	2377883	2229865	1791788
<i>fak=6</i>	6347336	6577365	3.62	1779106	3006468	1791788

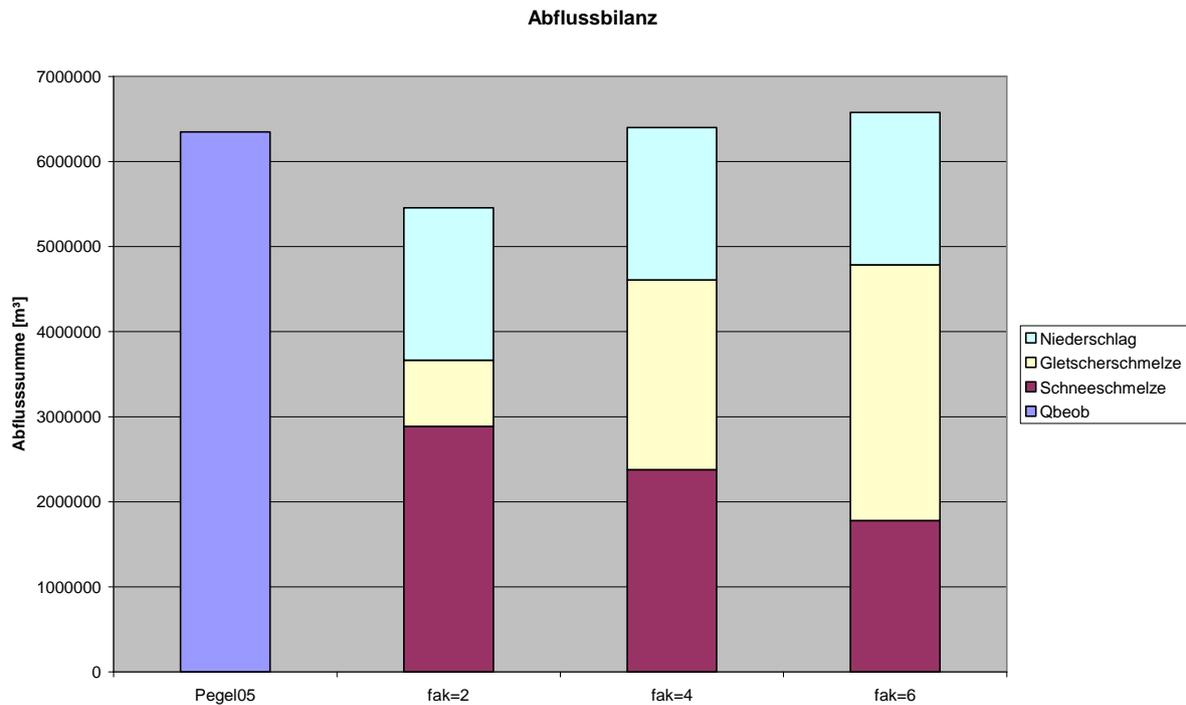


Abbildung 5.16: Grad-Tag Faktor - Abflussbilanz 2005

Tabelle 5.6: Grad-Tag Faktor - Parametersätze

Parameter	
<i>fak</i>	2 4 6
<i>fakice</i>	8
<i>tamp</i>	0.5
<i>famp</i>	2
<i>aksnow</i>	13
<i>akice</i>	4
<i>akrain</i>	17
<i>thres</i>	1

Je höher der Grad Tag Faktor, desto früher apert das Gebiet aus, dementsprechend ist während des Beobachtungszeitraumes (9. Juli bis 30. September) der Schneeschmelzanteil geringer. In Summe steigt damit die Schmelze, da der Grad Tag Faktor für die Gletscherschmelze größer ist als der für die Schneeschmelze. (*fakice* > *fak*).

Der Vergleich mit den Schneepegeln bestätigt diese Beobachtungen: während die Akkumulationsphase wiederum gleich verläuft, sinkt der Schneewasserwert bei größerem *fak* rascher ab.

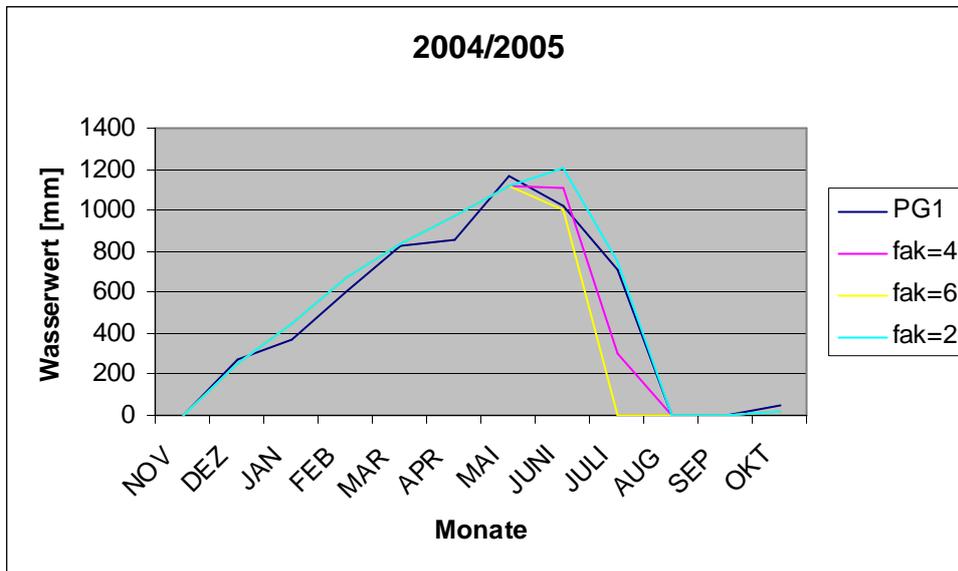


Abbildung 5.17: Grad-Tag Faktor - PG1 2004/2005 (2450m)

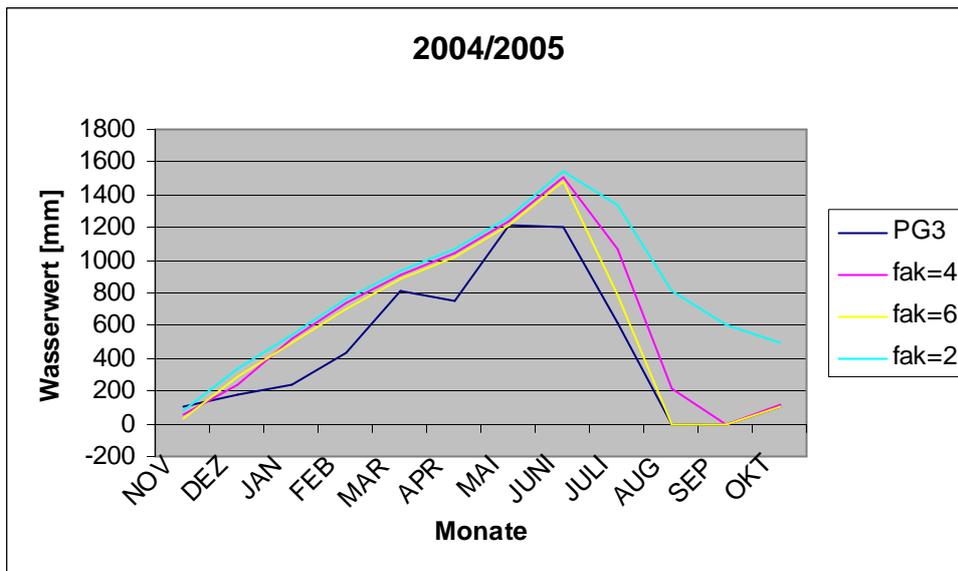


Abbildung 5.18: Grad-Tag Faktor - PG3 2004/2005 (2850m)

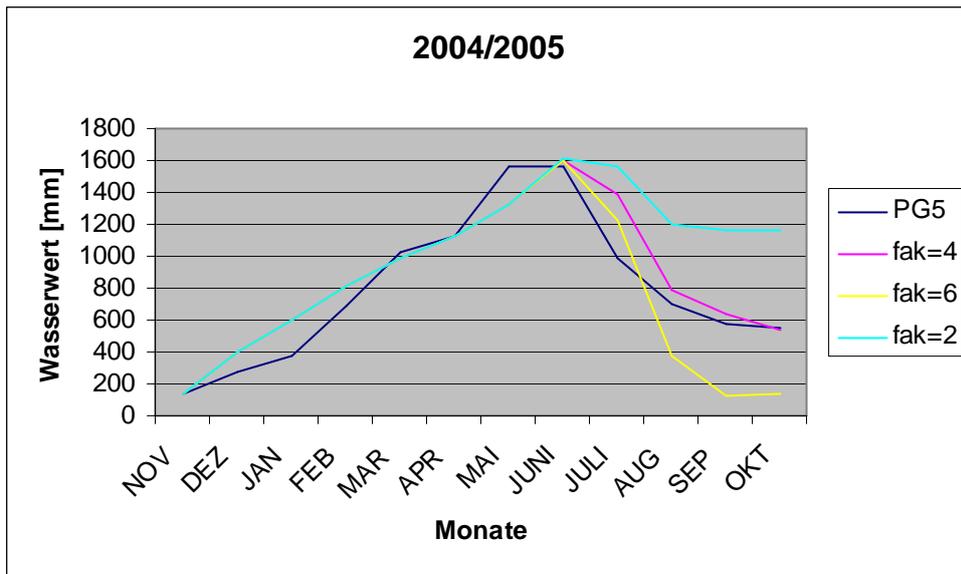


Abbildung 5.19: Grad-Tag Faktor - PG5 2004/2005 (2950m)

Beim Vergleich mit dem Tagesgang sieht man zunächst höhere Unterschiede im Juli 2005. Diese kommen nicht nur durch die höhere Schneeschmelze, sondern auch durch die schneller Ausaperung zustande ($fak_{ice} > fak$). Sobald auch bei niedrigerem Grad Tag Faktor die Höhenzonen beginnen auszuapern, gleichen sich die Ganglinien wieder einander an.

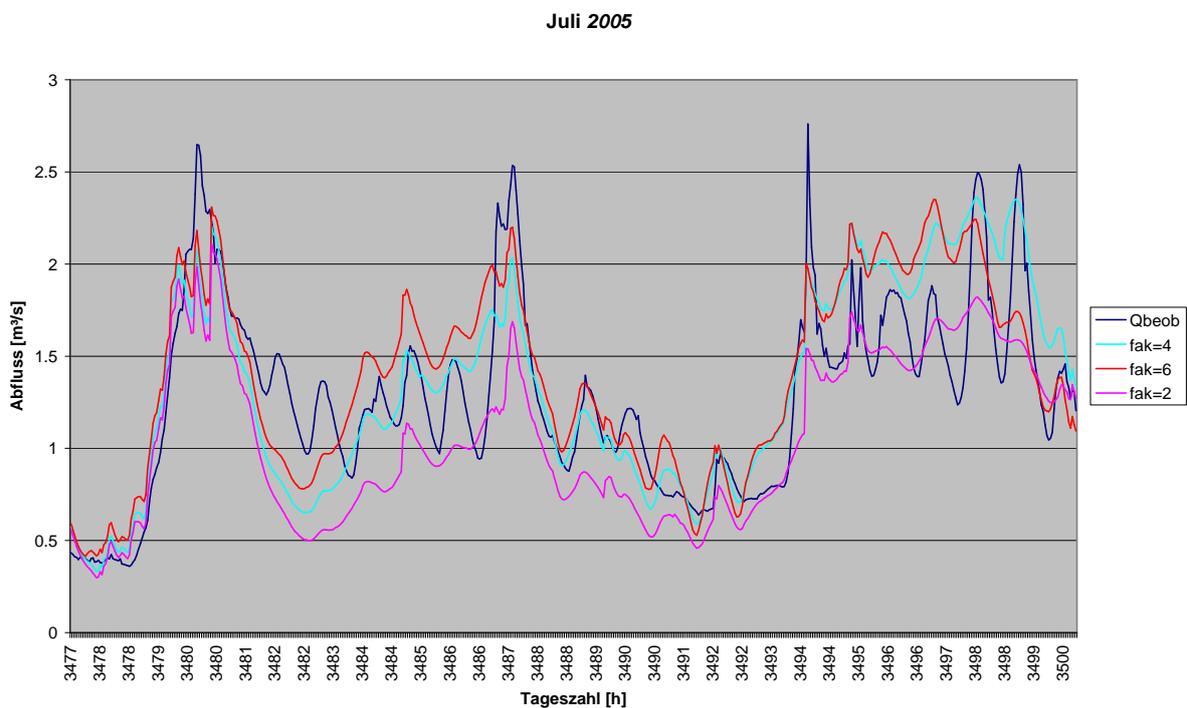


Abbildung 5.20: Grad-Tag Faktor - Ganglinie Juli 2005

August 2005

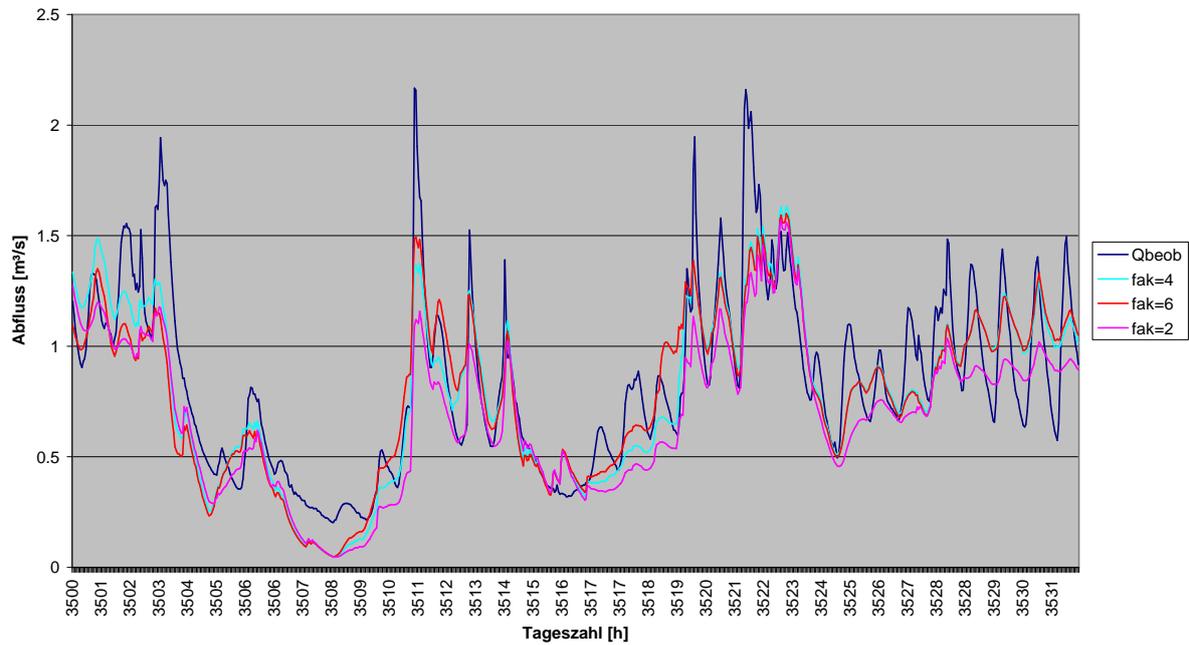


Abbildung 5.21: Grad-Tag Faktor - Ganglinie August 2005

5.6 Einfluss des Grad Tag Faktors für die Gletscherschmelze (*fakice*)

Für die Analyse des Einflusses des Grad Tag Faktors für die Gletscherschmelze (*fakice*) wird das Temperaturindexverfahren für das Jahr 2005 verwendet. Bei ansonsten gleich bleibenden Parametern wird *fakice* variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die Abflussbilanz bei unterschiedlichen Grad Tag Faktoren stellen Tabelle 5.7 und Abbildung 5.22 dar, die verwendeten Parameter zeigt Tabelle 5.8

Tabelle 5.7: Gletscherschmelzfaktor - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneesmelze [m ³]	Modell Eissmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
<i>fakice=6</i>	6347336	5842012	7.96	2377883	1672340	1791788
<i>fakice=8</i>	6347336	6396959	0.78	2377883	2229865	1791788
<i>fakice=10</i>	6347336	6956956	9.60	2377883	2787286	1791788

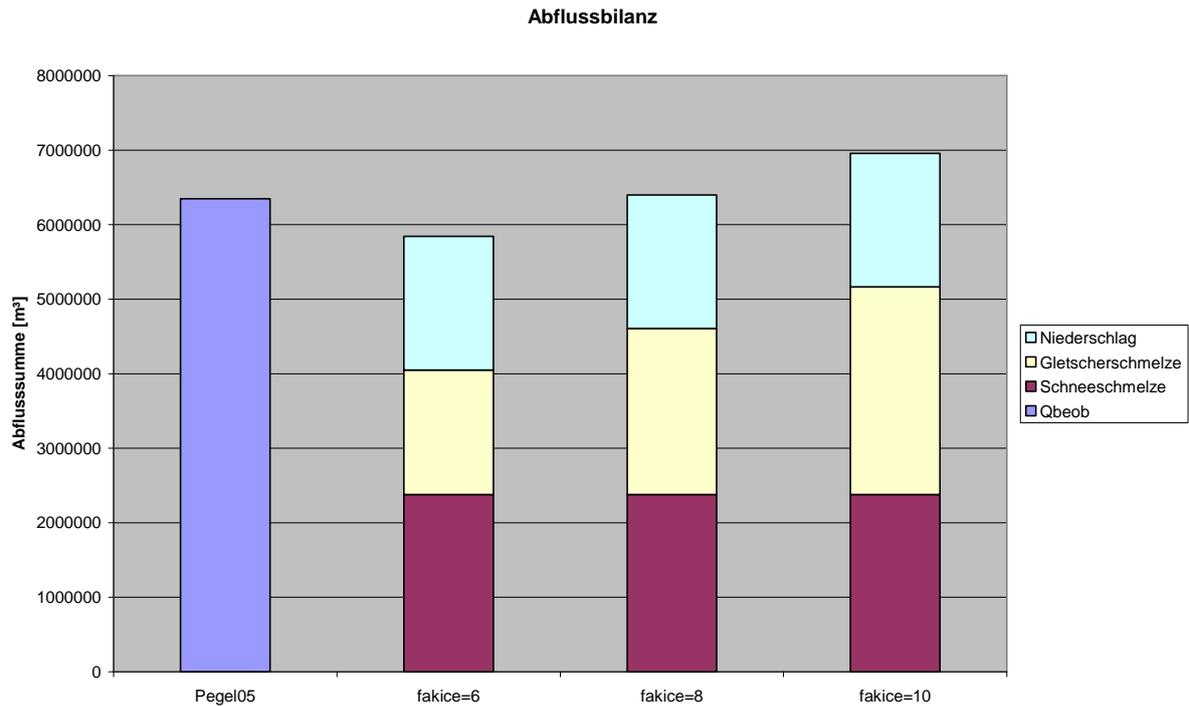


Abbildung 5.22: Gletscherschmelzfaktor - Abflussbilanz 2005

Tabelle 5.8: Gletscherschmelzfaktor - Parametersätze

Parameter	
<i>fak</i>	4
<i>fakice</i>	6 8 10
<i>tamp</i>	0.5
<i>famp</i>	2
<i>aksnow</i>	13
<i>akice</i>	4
<i>akrain</i>	17
<i>thres</i>	1

Variiert man nur den Faktor für die Gletscherschmelze, so verläuft die Schneeakkumulation und –schmelze genau gleich. Die Unterschiede machen sich nur in der Größe der Gletscherschmelze bemerkbar.

In der Ganglinie sieht man dementsprechend erst bei Ausaperung einer Höhenzone Unterschiede:

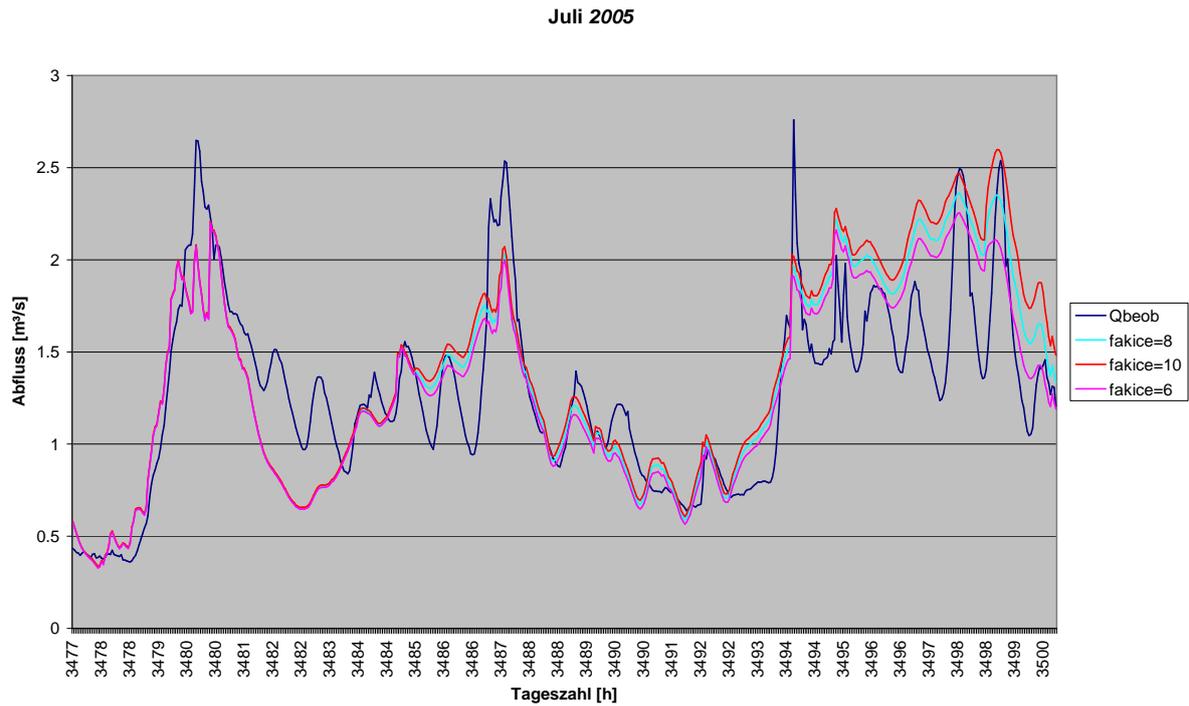


Abbildung 5.23: Gletscherschmelzfaktor - Ganglinie Juli 2005

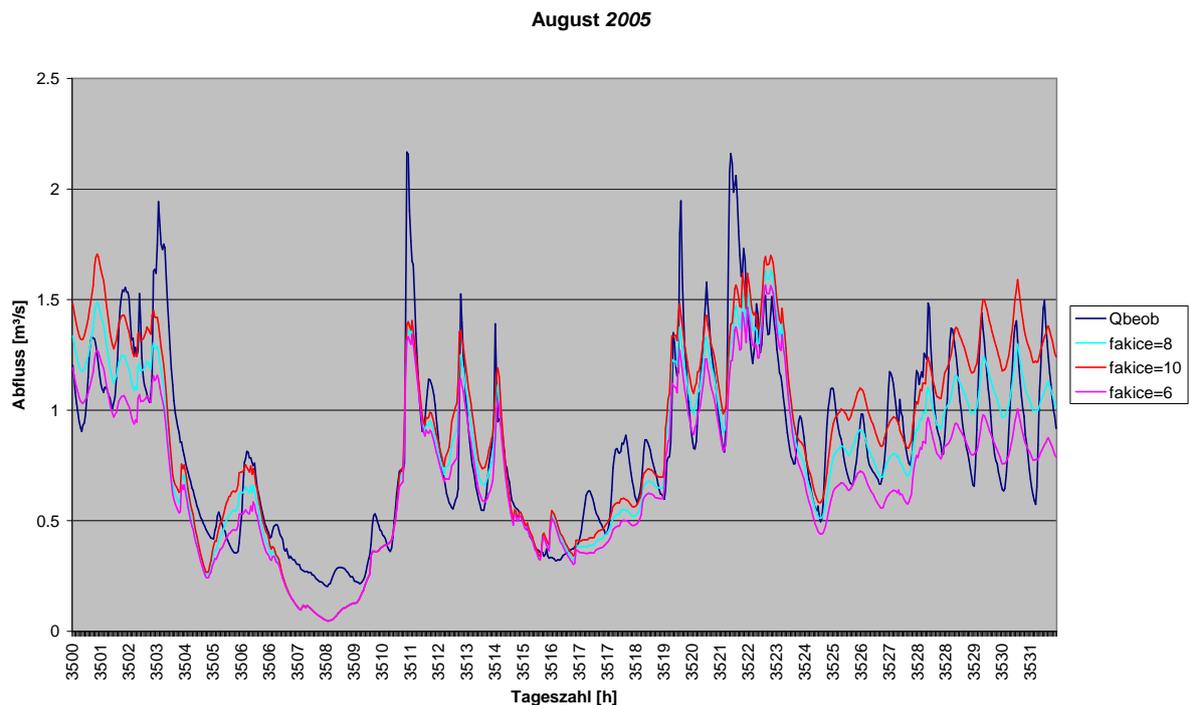


Abbildung 5.24: Gletscherschmelzfaktor - Ganglinie August 2005

5.7 Einfluss des Strahlungsfaktors (*fakrad*)

Für die Analyse des Einflusses des Strahlungsfaktors (*fakrad*) wird das Strahlungsindexverfahren für das Jahr 2005 verwendet. Bei ansonsten gleich bleibenden Parametern wird *fakrad* variiert und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Die Abflussbilanz bei unterschiedlichen Strahlungsfaktoren stellen Tabelle 5.9 und Abbildung 5.25 dar, die für diese Analyse verwendeten Parameter zeigt Tabelle 5.10:

Tabelle 5.9: Strahlungsfaktor - Abflussbilanz 2005

	beobachteter Abfluss [m ³]	Modell insgesamt [m ³]	Relativ Fehler [%]	Modell Schneeschmelze [m ³]	Modell Eisschmelze [m ³]	Modell Regen [m ³]
<i>fakrad</i> =0,10	6347336	5538849	12.73	2758928	1022696	1757225
<i>fakrad</i> =0,15	6347336	6396959	0.78	2026746	2586139	1757225
<i>fakrad</i> =0,20	6347336	6496164	2.34	1309410	3429388	1757225

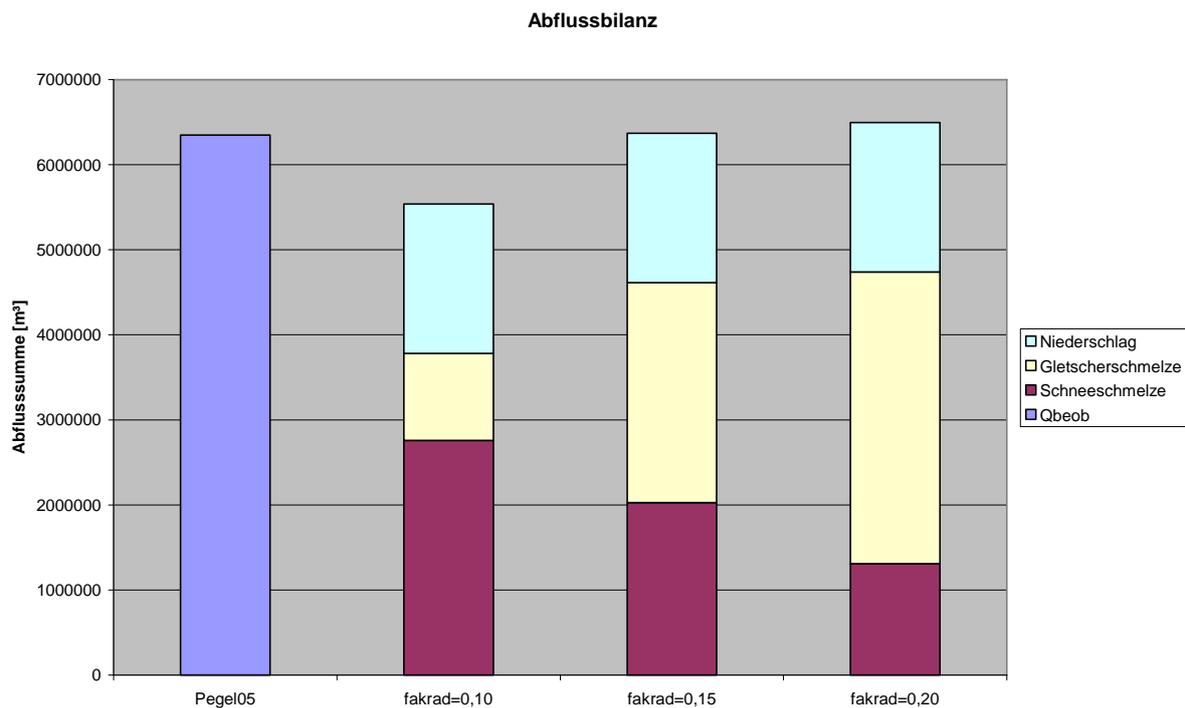


Abbildung 5.25: Strahlungsfaktor - Abflussbilanz 2005

Tabelle 5.10: Strahlungsfaktor - Parametersätze

Parameter	
<i>fakrad</i>	0.10 0.15 0.20
<i>fakradice</i>	0.2
<i>tamp</i>	0.4
<i>aksnow</i>	40
<i>akice</i>	15
<i>akrain</i>	7
<i>thres</i>	1

Die Ergebnisse zeigen das gleiche Bild wie die Analyse des Grad Tag Faktors im Temperaturindexverfahren: je höher fakrad desto schneller apert das Einzugsgebiet aus. Im Beobachtungszeitraum (9. Juli bis 30. September) sinkt somit der Anteil der Schneeschmelze an der Gesamtabflusssumme, dafür steigt der Anteil der Gletscherschmelze.

Auch die Schneepegel und der Tagesgang zeigen ähnliche Ergebnisse wie in Kapitel 5.5

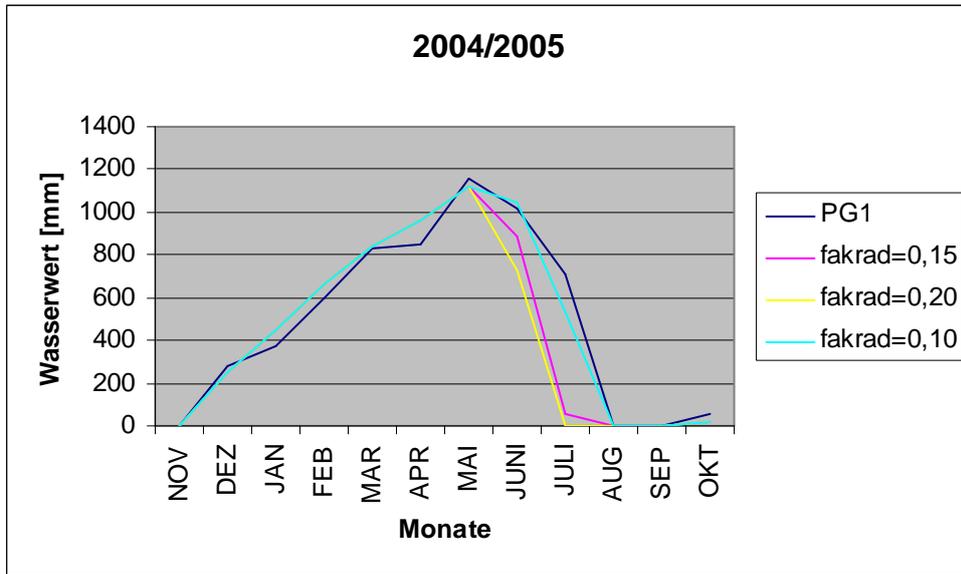


Abbildung 5.26: Strahlungsfaktor - PG1 2004/2005 (2450m)

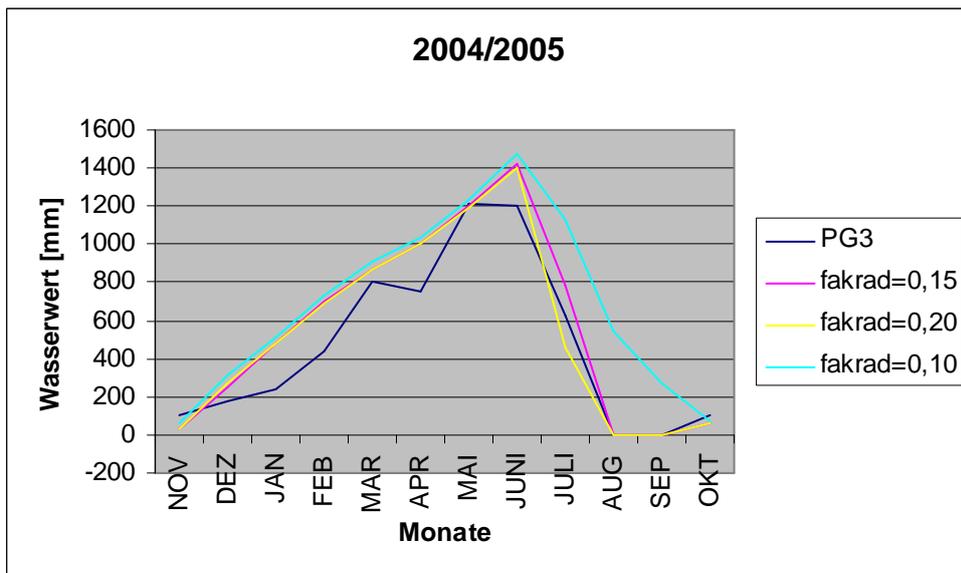


Abbildung 5.27: Strahlungsfaktor - PG3 2004/2005 (2850m):

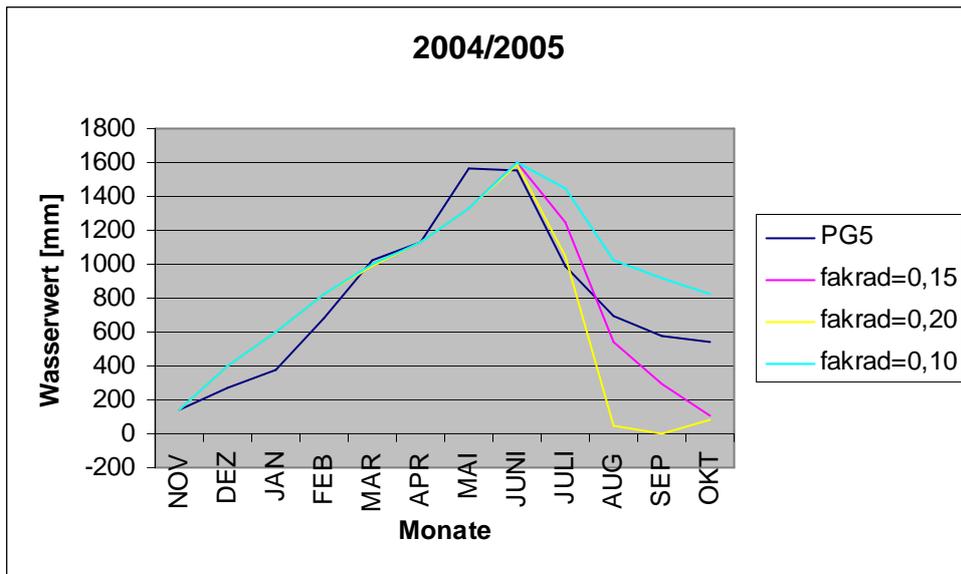


Abbildung 5.28: Strahlungsfaktor - PG5 2004/2005 (2950m)

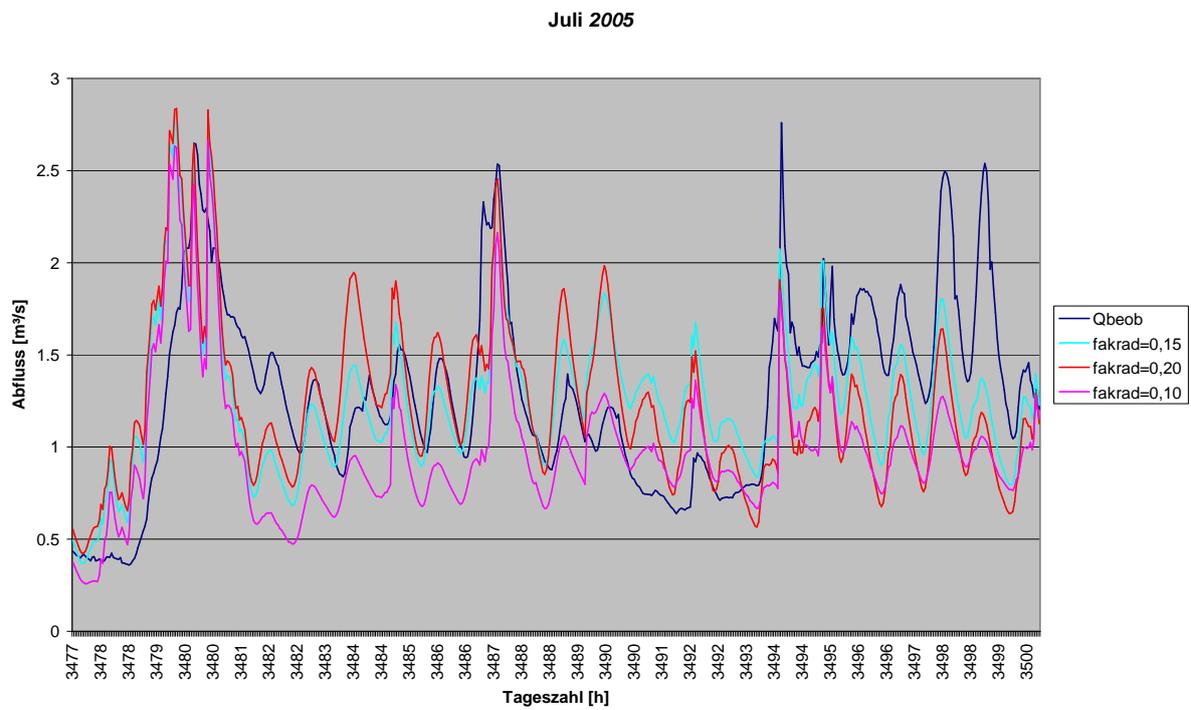


Abbildung 5.29: Strahlungsfaktor - Ganglinie Juli 2005

August 2005

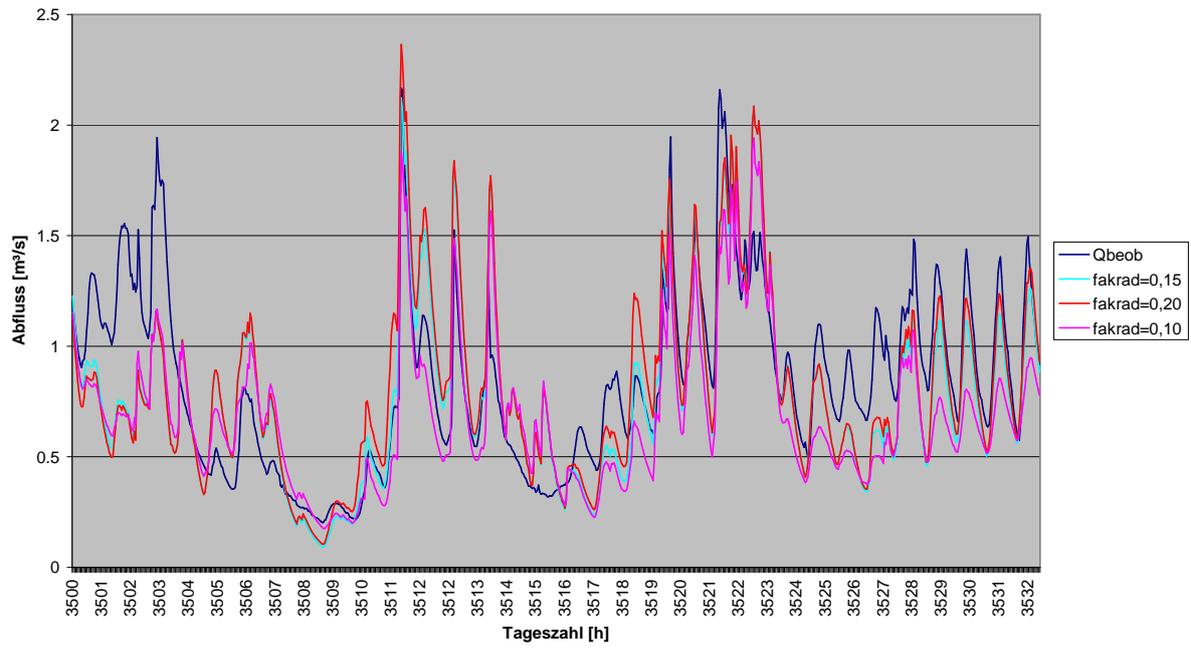


Abbildung 5.30: Strahlungsfaktor -Ganglinie August 2005

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt erzeugt das Modell in allen 3 Verfahren brauchbare Ergebnisse, die Schneeakkumulation wird präzise nachgebildet, das Abschmelzen wird in den meisten Höhenzonen sowohl qualitativ als auch quantitativ gut modelliert. Schwächen ergeben sich insbesondere in der obersten Höhenzone (3050m), hier apert das Modell nicht aus und die berechneten Schneewasserwerte liegen deutlich über den Werten der Schneepegel. Ursache hierfür könnten Verfrachtungen (Wind, Lawinen), eine schlecht geschätzte Schneedichte oder Fehler in der Annahme der Modellparameter (Schwellentemperatur, Höhengradient) sein.

Der Abfluss kann in Summe sehr genau nachgebildet werden, mit relativen Summenfehlern kleiner 1%. Der Tagesgang des Abflusses wird nicht in allen Verfahren hinreichend stark modelliert: insbesondere das Temperaturindexverfahren hat Schwächen ausgeprägte Spitzen zu zeigen, im Strahlungsindexverfahren (und in weiterer Folge damit auch im Kombinierten Verfahren) funktioniert dies deutlich besser, dafür sind die Ergebnisse der Abflussbilanz meist im Temperaturindexverfahren besser.

Die Analyse der Zusatzmodule zeigt einen großen Einfluss von Albedo und Cold Content auf die Modellergebnisse: Cold Content hat Auswirkungen auf die Akkumulation der Schneedecke, während Albedo besonders die Abschmelzgeschwindigkeit beeinflusst. Expositionsgewicht hat insgesamt einen geringeren Einfluss, hauptsächlich durch die hier gewählten Gewichtungsfaktoren nahe 1, zeigt aber doch eine geringe Verbesserung der Modellergebnisse, wobei die Festlegung der Expositionsfaktoren noch Variationsspielraum offen lässt.

Die Grad-Tag Faktoren (fak und $fakrad$) steuern die Geschwindigkeit des Abschmelzens der Schneedecke, höhere Faktoren bewirken durch das raschere Abschmelzen in der Bilanz auch eine höhere Gletscherschmelze, da ein längerer Zeitraum für die Ablation des Gletschers verfügbar ist.

Ziel dieser Arbeit war eine optimale, jahresweise Anpassung der Parameter, weitere Ziele sind die Festlegung repräsentativer und allgemeingültiger Parameter.

6.2 Ausblick

Eine weitere Verbesserung der Modellgenauigkeit könnten folgende Ansätze bieten:

6.2.1 Reduktions- / Streckungsfaktor für den Tagesgang

Besonders für das Temperaturindexverfahren, könnte ein Streckungsfaktor die Ergebnisse des Tagesganges verbessern. Das Stefan - Boltzmann Gesetz zeigt den Zusammenhang zwischen Temperatur und Strahlung:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Formel 6.1

Formel 6.1: Stefan - Boltzmann Gesetz

wobei: P	Strahlungsleistung
σ	Stefan - Boltzmann Konstante
A	Fläche
T	Temperatur

Die Strahlungsleistung ist also proportional zur vierten Potenz der Temperatur. Ausgehend von diesem Zusammenhang kann man eventuell die Ergebnisse des Temperaturindexverfahrens verbessern und den Tagesgang ähnlich dem Strahlungsindexverfahren nachbilden (ohne Daten für die Globalstrahlung mit einbeziehen zu müssen).

6.2.2 Berücksichtigung von Verfrachtungen

Sind eindeutige Verfrachtungsbilder bekannt (häufige Lawinenabgänge, Rutschungen, Wind), kann man durch Quantifizierung dieser eine Verbesserung der Modellergebnisse erzielen. Oft sind solche Bilder allerdings nicht vorhanden oder eindeutig bestimmbar, weiters sind solche Verbesserungen nur spezifisch für ein Einzugsgebiet und müssten bei Übertragung auf ein anderes Gebiet neu bestimmt werden.

6.2.3 Abschattungen

Eine weitere Verbesserung des Expositionsfaktors könnten Untersuchungen über die Abschattungen am Einzugsgebiet ergeben. Mitunter kann z.B. eine Fläche zwar südliche Exposition aufweisen, aber durch Abschattung eine geringer Schmelze ergeben als erwartet. Auch diese Verbesserungen könnten nur gebietsspezifisch sein und erfordern ein umfangreicheres Pre-Processing.

6.2.4 Saisonal veränderbare Speicherkoeffizienten

Der Retentionseffekt der Schneedecke (siehe Kapitel 4.3.2) könnte durch saisonal veränderliche Speicherkoeffizienten eliminiert werden.

6.2.5 Höhenzonenabhängige Parameter

Derzeit rechnet das Modell nur mit wenigen höhenzonenabhängigen Parametern (Temperatur, Strahlung, Exposition), eine Erweiterung auf andere Parameter wäre vorstellbar: Niederschlag, Grad-Tag Faktor,..

7 Literaturverzeichnis

ANDERTON S.P., WHITE S.M., ALVERA B. (2002): Micro-scale spatial variability of the timing of snow melt runoff in a high mountain catchment; *Journal of Hydrology* 268 (2002) 158-176

AUER I., BÖHM R., LEYMÜLLER M., SCHÖNER W. (2002): Das Klima des Sonnblick; Heft 28 Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik

FIERZ C., RIBER P., ADAMS E.E., CURRAN A.R., FÖHN P.M.B., LEHNING M., PLÜSS C. (2003): Evaluation of snow-surface energy balance models in alpine terrain; *Journal of Hydrology* 282 (2003) 76-94

FLIEDL, Berthold (2005): Schmelzprozesse am Goldbergkees; Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

HOLZMANN H., SCHÖNER W., KOBOLTSCHNIG G., KROISLEITNER Ch., HYNEK B., MICHLMAYR G., SCHNEIDER W., KAISER G., VOLLMANN M., RAUCH L. (2007): Snowtrans, Regionalisation of snow- and ice melt processes in the Hohe Tauern mountains in Austria, Summary Report
Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU; Institut für Vermessung, Fernerkundung und Rauminformation, BOKU; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik;

HOLZMANN, Hubert (2006): Verbesserung der Schneeschnmelzmodellierung, Programmbeschreibung; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

HYNEK, Bernhard (2005): Strahlungsbilanz am Hohen Sonnblick; Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

KAUFMANN, Andreas (2005): Abflussmessung und -modellierung am Goldbergkees im Rekordsommer 2003; Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

KOBOLTSCHNIG, Gernot (2007): Mehrfachvalidierung hydrologischer Eis- und Schneeschnmelzmodelle in hochalpinen, vergletscherten Einzugsgebieten, Dissertation am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

KOBOLTSCHNIG G., SCHÖNER W., HOLZMANN H. (2007): Extensive hydrological monitoring of a small, highly glacierized watershed in Hohe Tauern region, Austrian Alps

LEHNING M., VÖLKSCH I., GUSTAFSSON D., NGYUEN T.A., STÄHLI M., ZAPPA M. (2005): ALPINE 3D: A detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology

MICHLMAYR, Gernot (2007): Simulation von Schnee- und Eisschnmelzprozessen im hochalpinen Raum, Diplomarbeit am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

NACHTNEBEL H.P., GAMPERLING C., LEROCH K., FÜRST J., HOLZMANN H. (2003): Studienblätter Hydrologie; Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, BOKU

NACHTNEBEL, Hans-Peter (2002): Studienblätter Gewässerkunde und Hydrometrie. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktivem Wasserbau, BOKU.

PICHLER A. (2000): Untersuchung zu Klima und Hydrologie in einem hochalpinen Einzugsgebiet in den Hohen Tauern; Diplomarbeit am Institut für alpine Naturgefahren und forstlichen Ingenieurwesen der BOKU Wien.

SCHERER E. (2000): Auf dem Weg zum Hohen Sonnblick. Mit meteorologischen Beiträgen von BÖHM R., MANDL M., STAUDINGER M. und SCHÖNER W., ÖAV Sektion Rauris: Rubertus - Verlag, Salzburg.

SCHIECHTL M. & STERN R. (1983): Die aktuelle Vegetation der Hohen Tauern. Veröffentlichungen des Österreichischen MaB - Hochgebirgsprogrammes Hohe Tauern 7:33-60. Universitätsverlag Wagner: Innsbruck.

TOLLNER H. (1952): Wetter und Klima im Gebiete des Großglockners, Sonderheft Nr. 14 Klagenfurt, Kärnten.

ZAPPA M., POS F., STRASSER U., WARMERDAM P., GURTZ J. (2003): Seasonal Water Balance of Alpine Catchment as Evaluated by Different Methods for Spatially Distributed Snowmelt Modelling, Nordic Hydrology, 34 (3), 2003, 179-202