

StartClim2007.E

Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke

IMGI - Institut für Meteorologie und Geo-
physik, Universität Innsbruck



Projekt-Koordination:

Univ. Prof. Dr. Michael Kuhn

Dr. Andrea Fischer

Verfasser:

Univ. Prof. Dr. Michael Kuhn

Mag. Marc Olefs

Wien, im August 2007

StartClim2007.E

Teilprojekt von StartClim2007

Projektleitung von StartClim2007:

Universität für Bodenkultur, Department für Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Institut für Meteorologie, Peter Jordan-Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

StartClim2007 wurde aus Mitteln des BMLFUW, des BMWF, des BMWA, der Österreichischen Hagelversicherung, der Verbund AHP und des BMGFJ gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	7
E-1 Einführung	8
E-1.1 Ziele und Methodik der Untersuchung	8
E-1.2 Lage und allgemeine Charakteristika der Einzugsgebiete	8
E-2 Modellanpassung an den heutigen Zustand	11
E-2.1 Das hydrometeorologische Modell OEZ	11
E-2.2 Modellverifikation	14
E-3 Szenarien	19
E-3.1 Das verwendete Klimaszenario	19
E-3.2 Das modellierte Abflussszenario	19
E-4 Änderung der Gletscherfläche, des Eisvolumens und des Abflusses	23
E-4.1 Eisdicke aus Radarmessungen	23
E-4.2 Eisdicke und Fläche 1969 – 1997 – 2006	24
E-4.3 Höhenänderung vs. spezifische Bilanz	29
E-4.4 Szenario mit Flächen- und Dickenänderungen	30
E-5 Ausblick	45
Literaturverzeichnis	46
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	47

Kurzfassung

Klimaänderungen führen zu einer Änderung des Abflussverhaltens in vergletscherten Einzugsgebieten. Dies ist ein für die Energiewirtschaft wichtiger Aspekt des Klimawandels, da sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Gesamtmenge des für Speicherkraftwerke in vergletscherten Einzugsgebieten zur Verfügung stehenden Wassers geändert werden. Bisherige Studien untersuchten den direkten Einfluss von Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf den Abfluss in vergletscherten Einzugsgebieten ohne Berücksichtigung der Änderung der Gletscherfläche und -höhe.

Im vorgeschlagenen Projekt soll für ein stark vergletschertes (Gepatschferner, 17 km²), ein schwach vergletschertes und ein eisfreies Gebiet die Wasserbilanz für den Zeitraum 1983-03 als Referenz modelliert werden. Davon ausgehend werden die Folgen einer Klimaänderung nach dem IPCC A1B Szenario modelliert.

Von der heutigen Verteilung der Eisdicke des Gepatschfernens und ihrer gemessenen Änderung von 1997 bis 2006 werden Gletscherspende, Eisvolumen und Eisfläche für Schritte von 1°C berechnet. Bis zu einer Erwärmung von 3°C (im Modell ca. 2030 - 40) nimmt die Gletscherspende zu, danach überwiegt die fortschreitende Verringerung der Eisfläche über die Wirkung der Erwärmung. Bei kleineren Gletschern tritt dieser Effekt bereits früher auf.

Abstract

Climate changes lead to changes in the runoff regime of glacierized basins. This is an aspect of climate change that is of prime importance for the production of hydro power in alpine reservoirs since both the annual hydrograph and the total amount of runoff are affected. While previous studies investigated the effect of the changed energy balance at unchanged glacier shape, this study calculates the down-wasting and the ensuing change of surface elevation and glacier area available for melt.

The proposed project models the water balance of three adjacent basins that are strongly or weakly glacierized or ice free at all, for the reference period 1983-2003. Based on this reference changes in melt and runoff are modelled for a scenario in accordance with IPCC A1B.

Starting with the present distribution of ice thickness on Gepatsch Glacier and with its measured change from 1997 to 2006, ice melt, ice volume and glacier surface area are calculated for increments of 1°C. Up to a temperature increase of 3°C (which corresponds to the decade 2030-40 in the model assumptions) total ice melt continues to increase. With further warming the reduction of glacier area outweighs the increase of specific melt and reduces glacier runoff. For glacier smaller than Gepatsch Glacier (17 km²) this turning point occurs at lower temperatures.

E-1 Einführung

E-1.1 Ziele und Methodik der Untersuchung

Die vorliegende Untersuchung hat das Ziel, die zukünftige Entwicklung des Abflusses aus vergletscherten Einzugsgebieten zu modellieren. Dazu wird ein gängiges Klimaszenario verwendet, das wärmere, trockenere Sommer (Mai-Oktober: Niederschlag -20%, Temperatur +2°C) und geringfügig wärmere, niederschlagsreichere Winter (November – April: Niederschlag +15%, Temperatur +1°C) vorgibt und auf dem Szenario A1B des letzten IPCC Berichtes (Solomon, 2007; reclip:more 2007) basiert.

Um dieses Szenario auf alpine Einzugsgebiete anzuwenden, wird das hydrometeorologische Modell OEZ 2.1 eingesetzt, das mit der gut dokumentierten Periode 1983 – 2003 für Monatsschritte und 100-m-Höhenstufen angepasst wird, bis der simulierte Abfluss mit den gemessenen Monatswerten um 20 mm oder besser übereinstimmt. Mit diesen Modellparametern wird das Klimaszenario für ein stark vergletschertes, ein schwach vergletschertes und ein eisfreies Einzugsgebiet mit heutiger Gletschergröße berechnet.

Der Beitrag der Gletscherspende zum Gesamtabfluss wird durch die anhaltende Erwärmung zunächst wachsen, mit dem fortschreitenden Schmelzen wird aber die Oberfläche der Gletscher verringert, die zum Schmelzen zur Verfügung steht, wodurch der Abfluss abnimmt. Das Zusammenspiel dieser beiden Effekte führt zu einem vorübergehenden Maximum der Gletscherspende, das beim zweitgrößten Gletscher Österreichs, dem Gepatschferner, nach einer Erwärmung um 3°C erreicht wird, bei kleineren Gletschern entsprechend früher.

Zur Bestimmung dieses Maximums wurde die im Zeitraum 1997 – 2006 gemessene Änderung der Gletscheroberflächenhöhe, die die Energiebilanz und die Eisdynamik darstellt, zugrunde gelegt. Vom Zustand im Jahr 2006 wurde die Verringerung der Eisdicke mit einer Sensitivität von -800 mm w.e. / °C in Schritten von 1°C berechnet. Dazu wurden jeweils die neue Gletscherfläche und ihre Verteilung mit der Höhe neu bestimmt, um Fläche, Volumen und Gletscherspende für den nächsten Schritt der Erwärmung zu berechnen.

E-1.2 Lage und allgemeine Charakteristika der Einzugsgebiete

Als Modellgebiet wurden die Einzugsgebiete (EZG) Gepatschalm, Radurschl und Nauderer Tschey gewählt (s. Abb. E- 1) an welche das Modell OEZ in einem ersten Schritt für den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 angepasst wurde.

Das Einzugsgebiet Gepatschalpe (55 km², 1900 m - 3500 m) ist mit 21,4 km² Gletscherfläche zu ca. 40 % vergletschert, entwässert direkt in den Gepatschstausee (Speicherkraftwerk der TIWAG) und beinhaltet Österreichs zweitgrößten Gletscher, den Gepatschferner mit einer Fläche von 17,15 km² (Österreichisches Gletscherinventar 1997; Lambrecht und Kuhn, 2007). Die westlich gelegenen, kleineren EZG Radurschl (Gemeindegebiet Nauders, 25 km², 1800 m – 3300 m) und Tschey (Gemeindegebiet Pfunds, 17 km², 1800 m – 3000 m) haben Wasserfassungen und entwässern somit via Überleitungen ebenfalls in den Gepatschstausee. Das EZG Radurschl ist mit 1,5% der Gesamtfläche sehr schwach, das EZG Tschey gar nicht vergletschert. Der Waldflächenanteil ist im EZG Radurschl mit 10,4% am höchsten, Tschey hat 3,9%, Gepatschalpe überhaupt keine Waldfläche (s. Abb. E- 2). Alle drei EZG bilden mit ihren südlichen Abgrenzungen die Grenze zu Italien.

Das EZG Gepatschalpe hat mit 1586 mm den höchsten Jahresabfluss verglichen mit 1032 mm im EZG Radurschl und 903 mm im EZG Tschey. Die Jahresganglinien der Gebietsabflüsse (s. Abb. E- 3) zeigen, dass das Abflussmaximum am Pegel Gepatschalpe durch den hohen Vergletscherungsgrad und die größere Höhe im Vergleich zu den Gebieten Radurschl und Tschey um einen Monat nach hinten verschoben ist (Juli statt Juni). Die unterschiedliche Flächen-Höhenverteilung der beiden EZG Radurschl und Tschey (s. Abb. E- 2) führt zu weiteren Unterschieden in der Ganglinie. So wird durch den größeren Flächenanteil unterhalb von 2200 m im EZG Tschey etwas mehr winterlicher Basisabfluss

produziert. Ab Mai ist der Abfluss im EZG Radurschl durch die größeren Flächen zwischen 2500 m und 3000 m (mehr Schneeschmelze) und der leichten Vergletscherung im Vergleich zum EZG Tschey wieder größer. Der sog. Pardé-Koeffizient (Pardé, 1947) bildet das Verhältnis aus monatlichem Abfluss zu einem Zwölftel des Jahresabflusses und ermöglicht die verschiedenen EZG in Abflussregimetypen zu unterteilen (Mader et al., 1996). Derartig lässt sich das EZG Gepatschalpe eindeutig als glazialer (ausgeprägte Abflussspitzen im Juli und August und höherer Abfluss im Herbst durch starke Vergletscherung), das EZG Radurschl als nivo-glazialer (Abflussspitze im Juni und Juli durch größere Höherenerstreckung und leichte Vergletscherung) und das EZG Tschey als nivaler Typ (Ausgeprägtes, singuläres Maximum im Juni durch geringere mittlere Höhe und Fehlen von Gletschern) identifizieren.

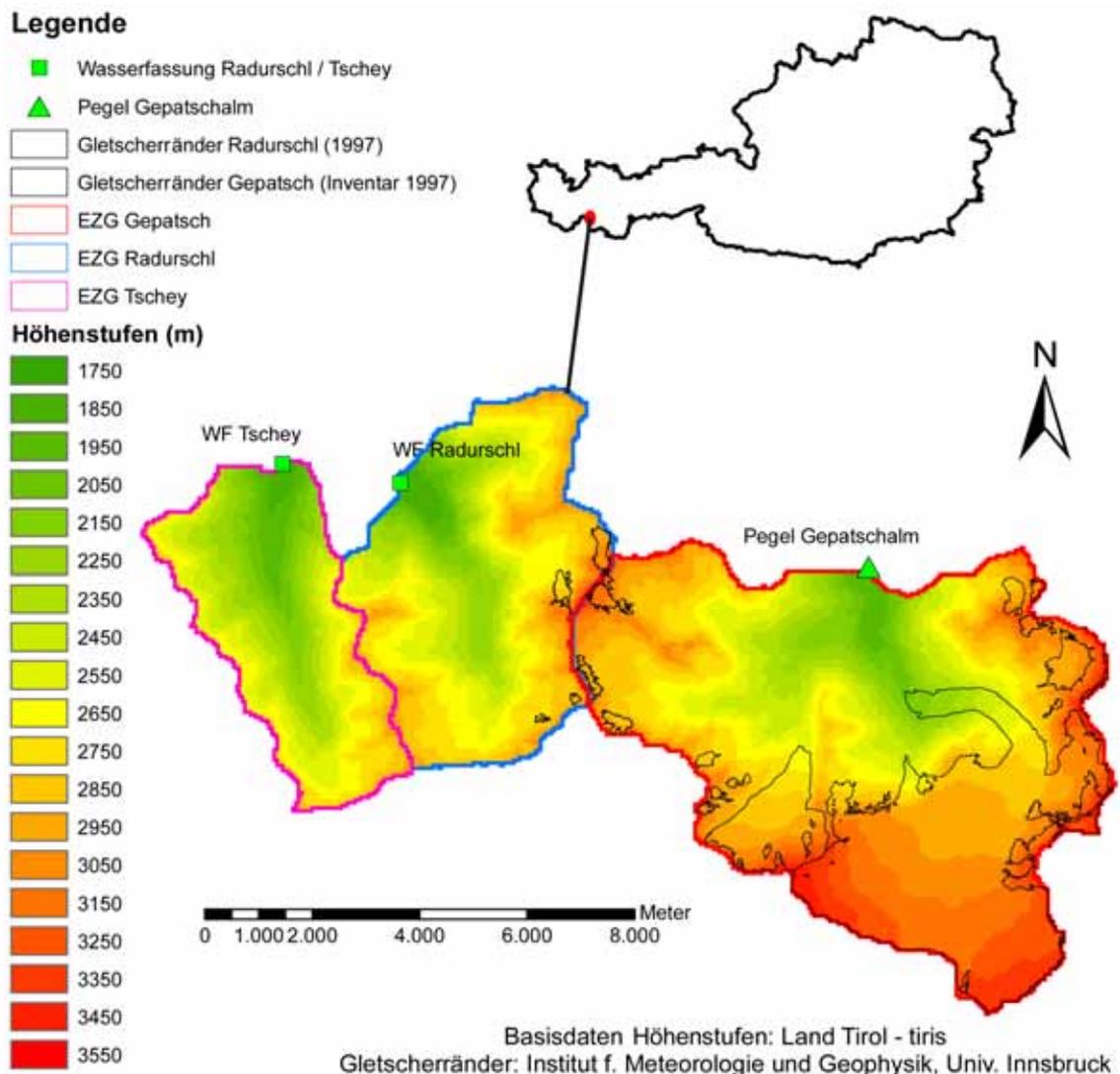


Abb. E- 1: Übersichtskarte der betrachteten Einzugsgebiete im Kaunertal, Radurschltal und Nauderer Tschey Tal: Gepatsch (Pegel Gepatschalm, TIWAG), Tschey (Wasserfassung TIWAG, Überleitung Gepatschstausee), Radurschl (Wasserfassung TIWAG, Überleitung Gepatschstausee).

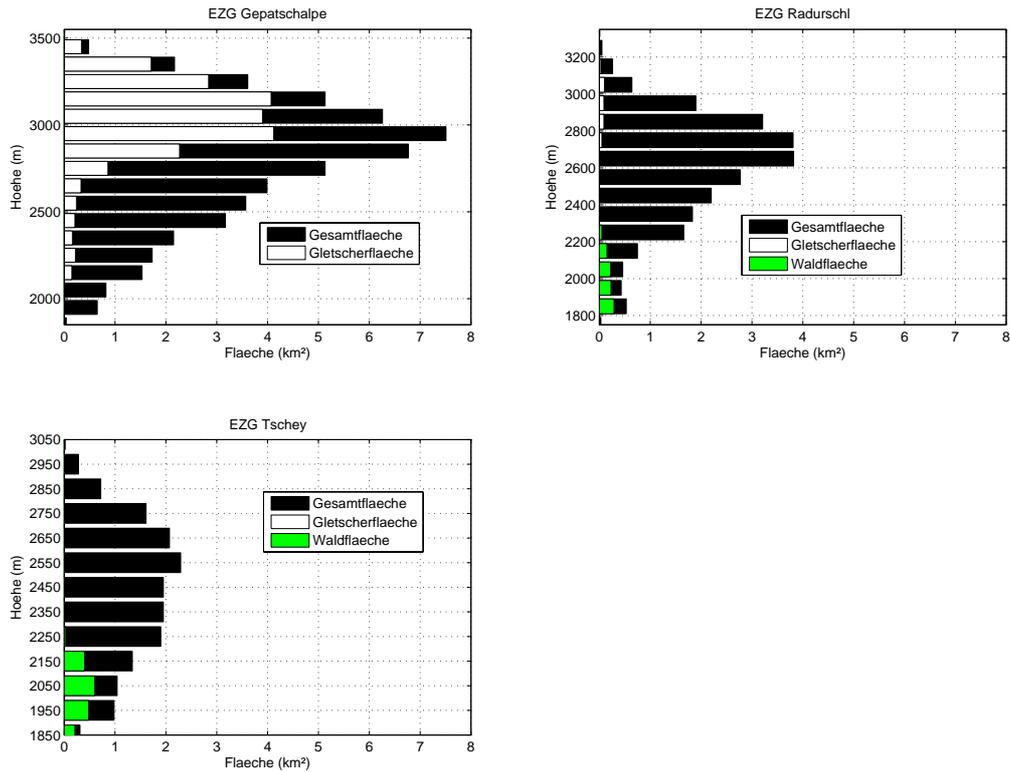


Abb. E- 2: Flächen-Höhenverteilung der Gesamt-, Wald-, und Gletscherfläche in 100 m Höhenstufen für die betrachteten EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey.

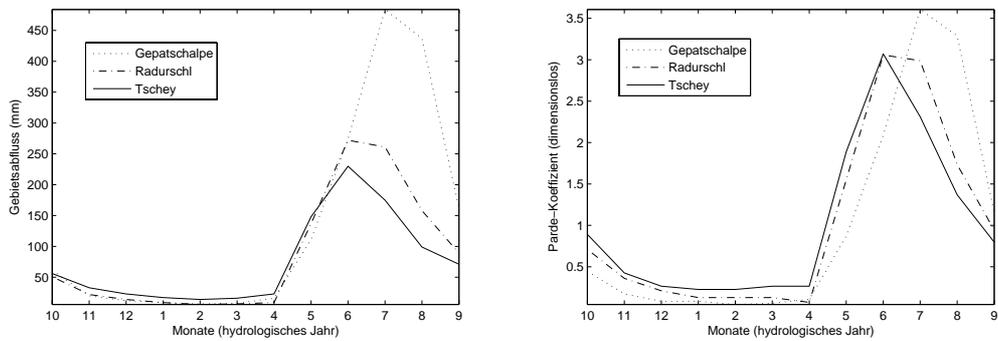


Abb. E- 3: Jahresganglinie des Gebietsabflusses der EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey (links), sowie Pardé-Koeffizient zur Charakterisierung des Abflussregimes (rechts). Die Werte stellen Mittelwerte der Periode 1983-2003 dar, wie sie später ins Modell einfließen.

E-2 Modellanpassung an den heutigen Zustand

Anhand des hydrometeorologischen Modelles OEZ wird der Abfluss jedes einzelnen Einzugsgebietes über die Wasserbilanz rückgerechnet und die Modellparameter derart angepasst, dass die monatliche Abweichung zwischen modellierten und gemessenen Werten kleiner als 20 mm ist.

Die Modellperiode erstreckt sich von Januar 1983 bis Dezember 2003.

E-2.1 Das hydrometeorologische Modell OEZ

Das Modell wurde in den achtziger Jahren am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck entwickelt und seither kontinuierlich verbessert und ausgebaut (Kuhn, Nickus, Pellet 1982; Kuhn & Batlogg 1998; Kuhn & Batlogg 1999; Kuhn 2000; Kuhn 2003). Messdaten von Temperatur, Niederschlag, sowie Gletschermassenbilanzen liefern die nötigen Eingabeparameter. Gemessene Abflusswerte werden als Verifikationsgrundlage verwendet. Das Modell arbeitet mit Monatswerten der Wasserbilanz in 100 m Höhenstufen und liefert als Ergebnis Werte des Niederschlages, der Schneedecke, des Massenhaushaltes der Gletscher und den Abfluss aufgeteilt in Schmelzwasser und Regenwasser.

Benötigte Inputparameter des Modells sind die Flächen-Höhenverteilung der Gesamt-, Wald- und Gletscherfläche des jeweiligen Einzugsgebietes.

Mittlere Monatswerte von Temperatur, Niederschlag, korrigiert auf systematische Messfehler nach Sevruk (1983), und deren vertikale Gradienten für die betreffende Periode wurden aus Referenzstationen gewonnen. Kaunertal-Feichten (Hydrographischer Dienst (HD) Tirol) und Rauher Kopf (Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG)) lieferten die Werte für das Einzugsgebiet Gepatschalm, wohingegen die Stationen Obergurgl (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)), Vent (IMGI), Nauders (HD) und St. Valentin auf der Heide (Hydrographisches Amt der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol) für die Einzugsgebiete Radurschl und Tschey verwendet wurden. Die Abflussdaten vom Pegel Gepatschalpe stammen vom HD, die der Wasserfassungen Radurschl und Tschey von der TIWAG (Übersichtkarte aller verwendeten Stationen und Pegel in Abbildung Abb. E- 5). Abbildung Abb. E- 4 zeigt den verwendeten Temperatur- und Niederschlagsinput.

Die Flächenhöhenverteilungen für die Gesamt- und Waldfläche stammen aus Daten eines digitalen Höhenmodelles mit einer räumlichen Auflösung von 50x50m, bzw. 25x25m für Südtirol (Basisdaten Land Tirol – TIRIS / Amt für überörtliche Raumordnung der autonomen Provinz Bozen - Südtirol).

Für die Gletscherflächen waren die Daten des neuesten Österreichischen Gletscherinventars (Lambrech und Kuhn, 2007) mit Gletscherständen von 1997 erste Wahl (s. Gletscherränder in Abb. E- 1). Diese werden als repräsentativ für die Modellperiode 1983-2003 angesehen.

Für die Quantifizierung des Massenhaushaltes der Gletscher in den jeweiligen Einzugsgebieten wurden die Mittelwerte der spezifische Massenbilanz $b(h)$ des Hintereisferners im hinteren Ötztal übertragen. Der Hintereisferner grenzt an den Südrand des Gepatschferners (Abb. E-5).

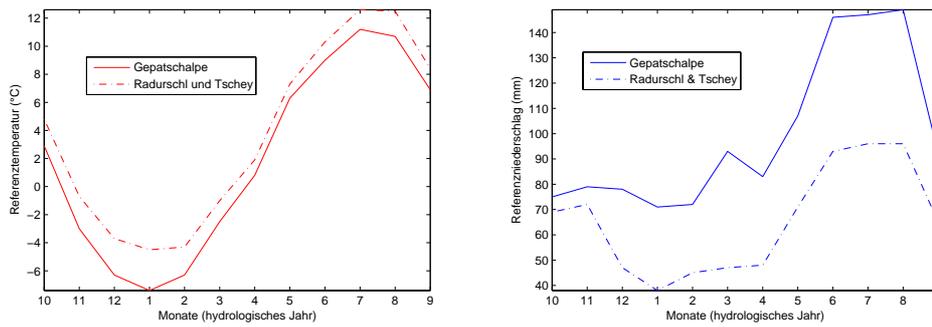
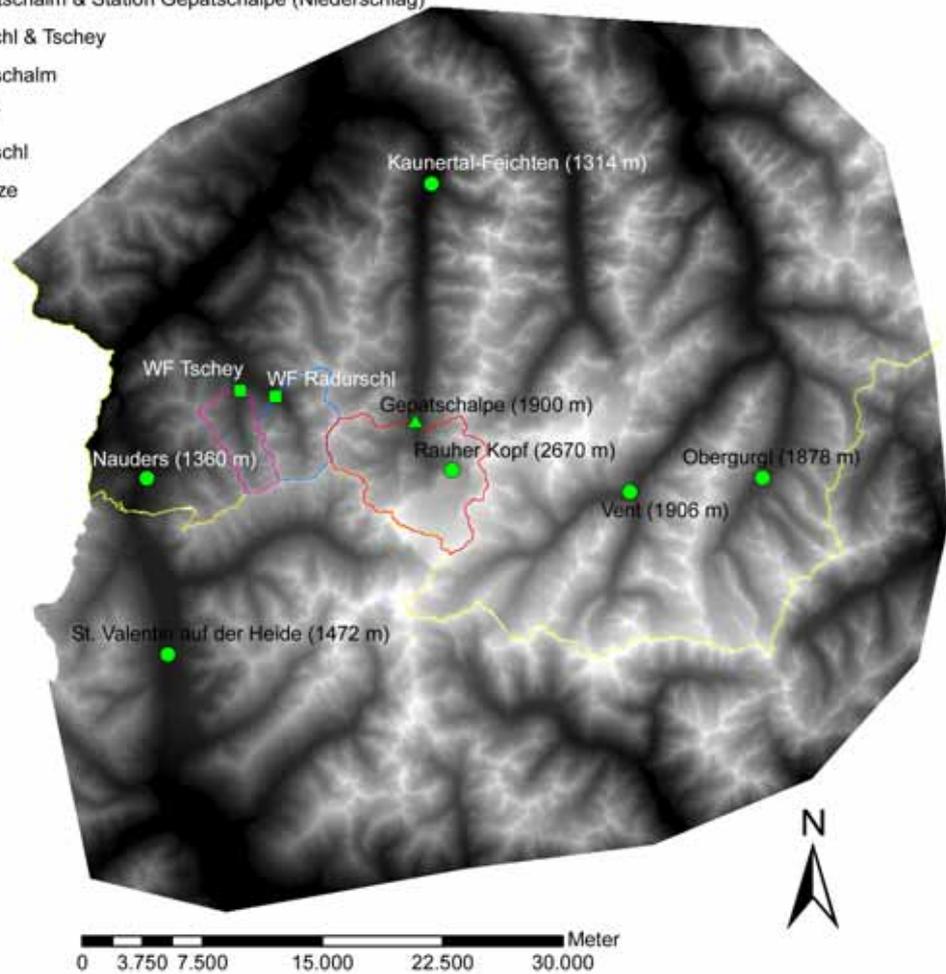


Abb. E- 4: Referenztemperatur und Referenzniederschlag der EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey wie sie für die unterste Höhenstufe im Modell verwendet wurden. Die Wasserfassungen Radurschl (1787 m) und Tschey (1796 m) liegen praktisch auf der gleichen Höhe in einer Entfernung von 2 km Luftlinie, weswegen die gleichen meteorologischen Inputparameter verwendet wurden.

Legende

- Station Rauher Kopf (Niederschlag)
- Station Obergurgl (Temperatur, Niederschlag)
- Station Kaunertal Feichten (Temperatur)
- Station St. Valentin auf der Heide (Temperatur, Niederschlag)
- Station Nauders (Temperatur, Niederschlag)
- Station Vent (Temperatur, Niederschlag)
- ▲ Pegel Gepatschalm & Station Gepatschalpe (Niederschlag)
- WF Radurschl & Tschey
- EZG Gepatschalm
- EZG Tschey
- EZG Radurschl
- Landesgrenze



Basisdaten Höhenstufen Nordtirol: Land Tirol - tiris
Basisdaten Höhenstufen Südtirol: Amt für überörtliche Raumordnung der autonomen Provinz Bozen - Südtirol.

Abb. E- 5: Übersichtskarte der modellierten Einzugsgebiete Gepatsch, Radurschl und Tschey mit den verwendeten Referenzstationen für die meteorologischen Inputparameter: Kaunertal-Feichten und Rauher Kopf für das EZG Gepatsch, sowie Obergurgl, Vent, Nauders und St. Valentin auf der Heide für die EZG Radurschl und Tschey.

E-2.2 Modellverifikation

Die Abb. E- 6, Abb. E- 7 und Abb. E- 8 zeigen die Modellverifikation anhand des Gebietsabflusses für die 3 untersuchten Einzugsgebiete in der mittleren Periode 1983-2003. Die Abweichung zwischen Modell und Messung durfte in keinem Monat die Marke von 20 mm überschreiten, was angesichts der Messungenauigkeiten des Abflusses (z.B. Ausspülung des Bachbettes, veränderte Schlüsselkurve) als ausreichend angesehen wird.

Nach Einstellen der Modellparameter und Anpassung des flüssigen Speicherterms (Boden, Schneedecke, Gletscher) liegen die Abweichungen im Bereich der Messgenauigkeiten der Abflüsse (max. mittlerer Absoluter Fehler der Monatswerte < 20 mm, max. rel. Fehler der Jahressummen < 1%). Die Modellierung der mittleren Gebietsabflüsse ist somit in allen Einzugsgebieten dieser Studie erfolgreich.

Der Vergleich der modellierten Abflusskomponenten in den verschiedenen EZG (Abb. E- 6, Abb. E- 7, Abb. E- 8 sowie Tab. E- 1) zeigt den bereits erwähnten Grund für die unterschiedlichen Abflussganglinien. Im EZG Gepatschalpe beträgt der Anteil der Schneeschmelze (vergletscherte und unvergletscherte Flächen) bis zu 75% des Gesamtabflusses im Mai, sinkt aber dann kontinuierlich bis auf 47% im September, da einerseits immer weniger Schneedecke vorhanden ist, die Eisschmelze einen Anteil ausmacht und der Regenwasserabfluss auf 37% steigt. Die Schmelze von Gletschereis macht einen maximalen Anteil von 20% im August aus. Im EZG Radurschl ist der größte Unterschied im August zu verzeichnen, hier macht die Schneeschmelze nur 32% aus (Hälfte von Gepatschalpe), da der Großteil der Schneedecke bereits geschmolzen ist (geringere mittlere Höhe) und sich somit das Niederschlagsmaximum der Sommermonate mit einem Regenwasserabflussanteil von 67% deutlich durchpaust. Die 1,5% Vergletscherung führen zu einem Anteil der Eisschmelze von nur maximal 2% im August. Im EZG Tschey steigt der maximale Anteil der Schneeschmelze im Juni bis auf 81%, im August dreht sich dies um, der Abfluss besteht bereits zu 87% aus Regenwasser. Der leicht erhöhte winterliche Basisabfluss im selben EZG resultiert ebenfalls aus Regenwasserabfluss, wie bereits vorher angedeutet. Abbildung Abb. E- 9 zeigt den aufgrund der Höhenlage und klimatischen Lage unterschiedlichen Auf- und Abbau der modellierten Schneedecke in den drei EZG. Die Mächtigkeit der Schneedecke nimmt allgemein mit der Höhe zu, da der Niederschlagsgradient mit der Höhe positiv ist, zudem wird dieser aufgrund der Stationsdatenanalyse monatlich variiert, was auch in den Abbildungen Abb. E- 10, Abb. E- 11 und Abb. E- 12 zu sehen ist. Sie zeigen die modellierten Komponenten der Wasserbilanz: Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Speicherterm aller drei EZG.

Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten im Hinblick auf Speicherkraftwerke

Tab. E- 1: Relative Anteile (in %) der modellierten Abflusskomponenten mit OEZ für die Monate Mai bis September in den verschiedenen EZG.

	Schneesmelze	Eissmelze	Regenwasser
Gepatsch			
Mai	75	0	25
Juni	62	10	28
Juli	58	15	27
August	54	20	26
September	47	14	39
Radurschl			
Mai	75	0	25
Juni	67	0	33
Juli	61	0,9	38,1
August	32	2	66
September	43	1	56
Tschesy			
Mai	81	0	19
Juni	68	0	32
Juli	48	0	52
August	13	0	87
September	34	0	66

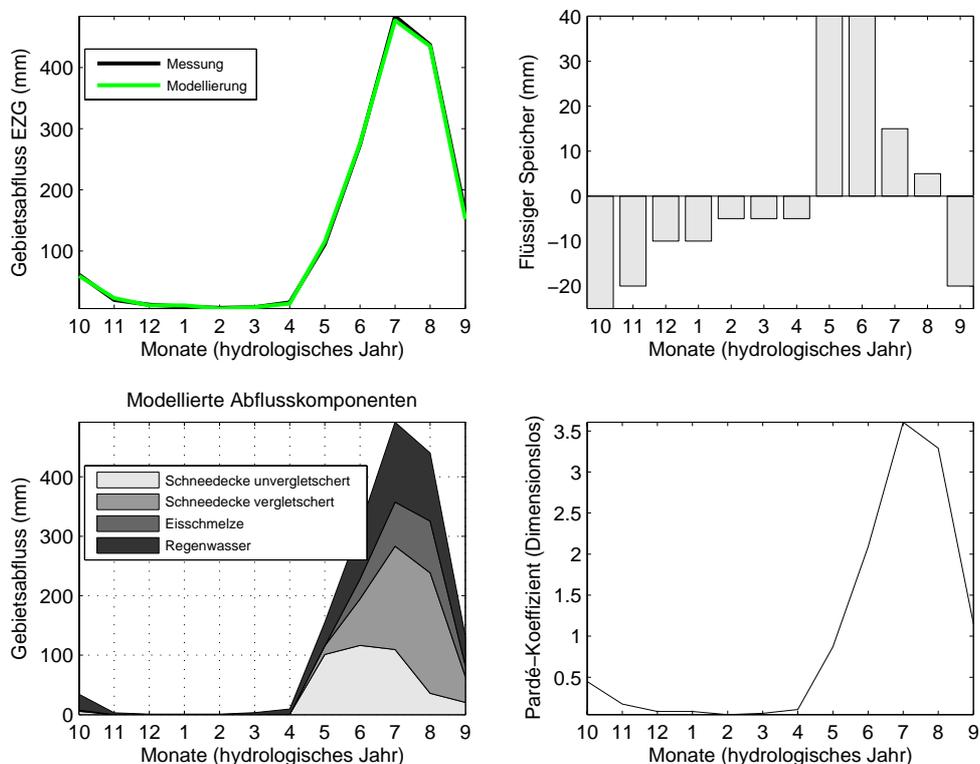


Abb. E- 6: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Gepatschalpe (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar.

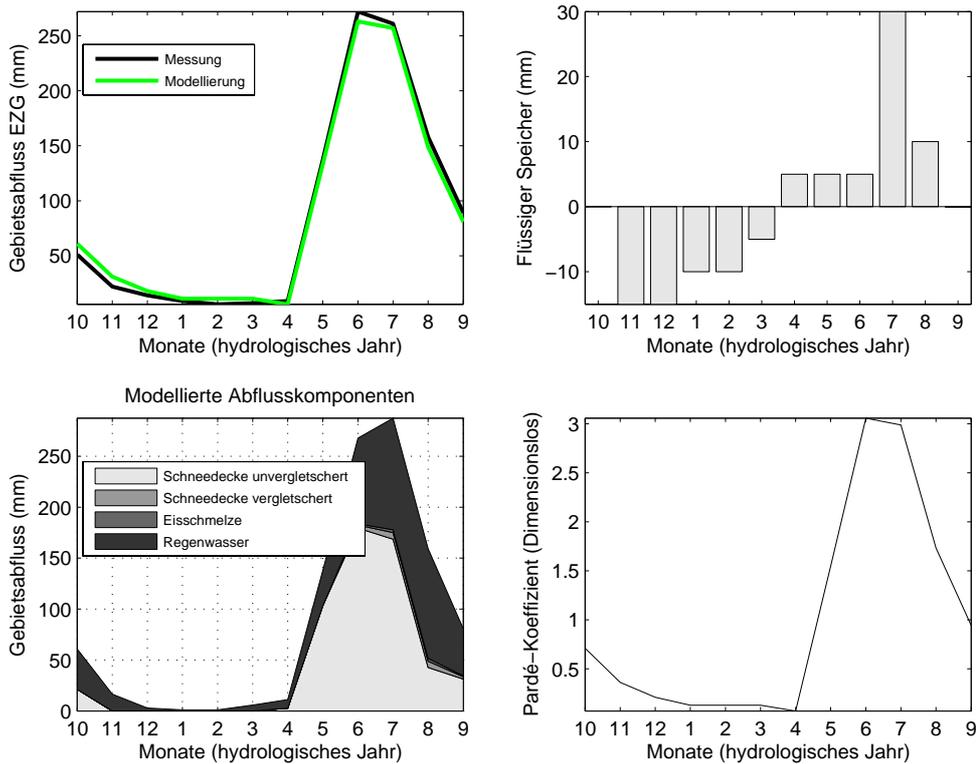


Abb. E- 7: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Radurschl (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar.

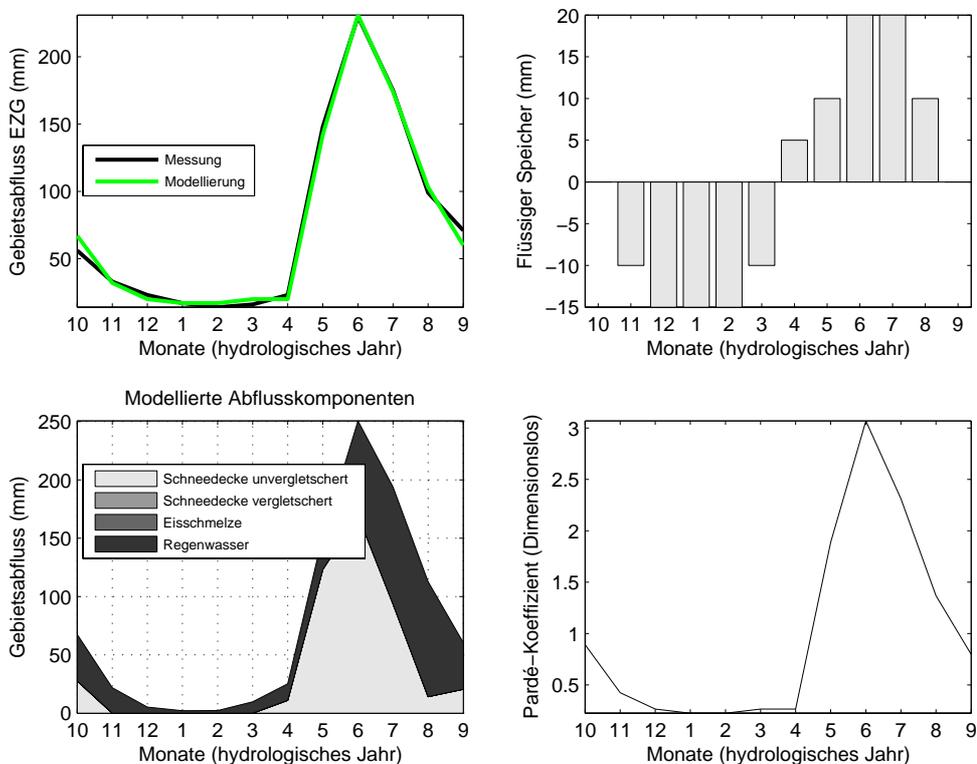


Abb. E- 8: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Tschey (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar.

Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten im Hinblick auf Speicherkraftwerke

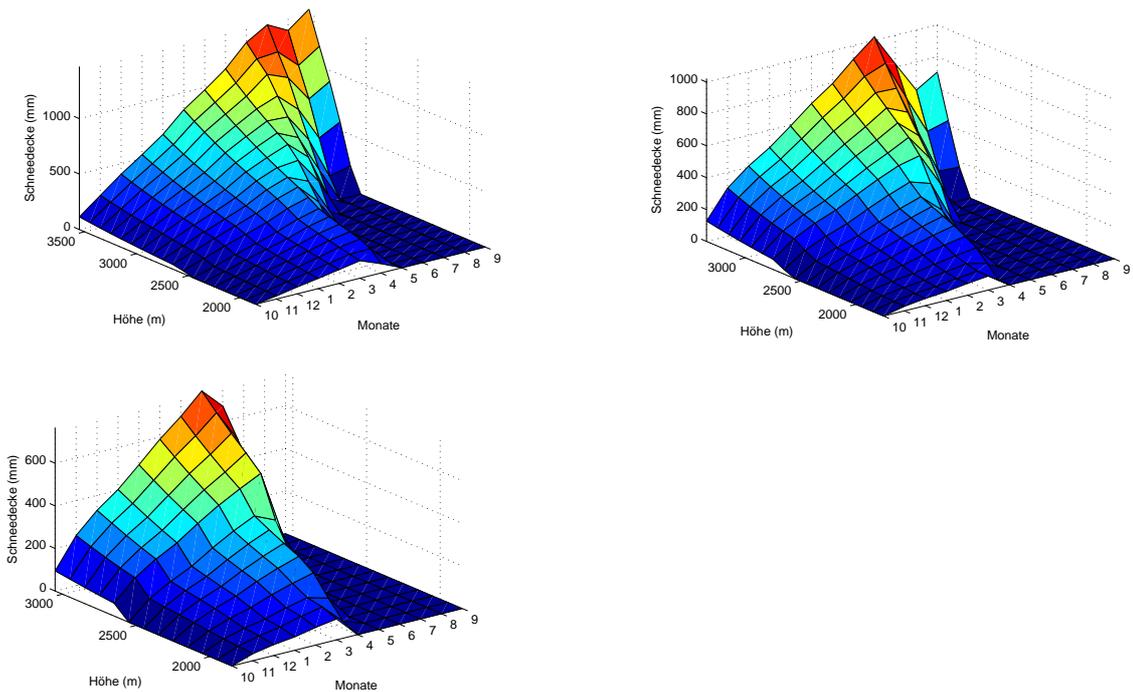


Abb. E- 9: Auf- und Abbau der Schneedecke 1983 – 2003 im EZG Gepatschalpe (oben links), EZG Radurschl (oben rechts) und EZG Tschey (unten links), modelliert mit OEZ.

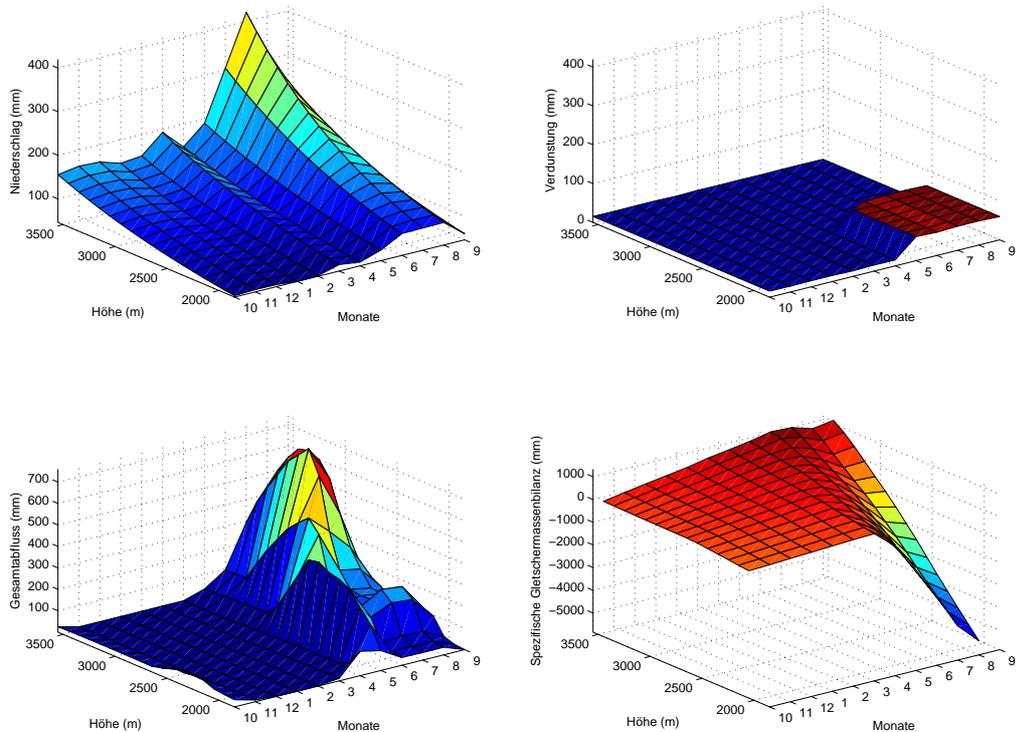


Abb. E- 10: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Gepatschalm (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und spezifische Gletschermassenbilanz).

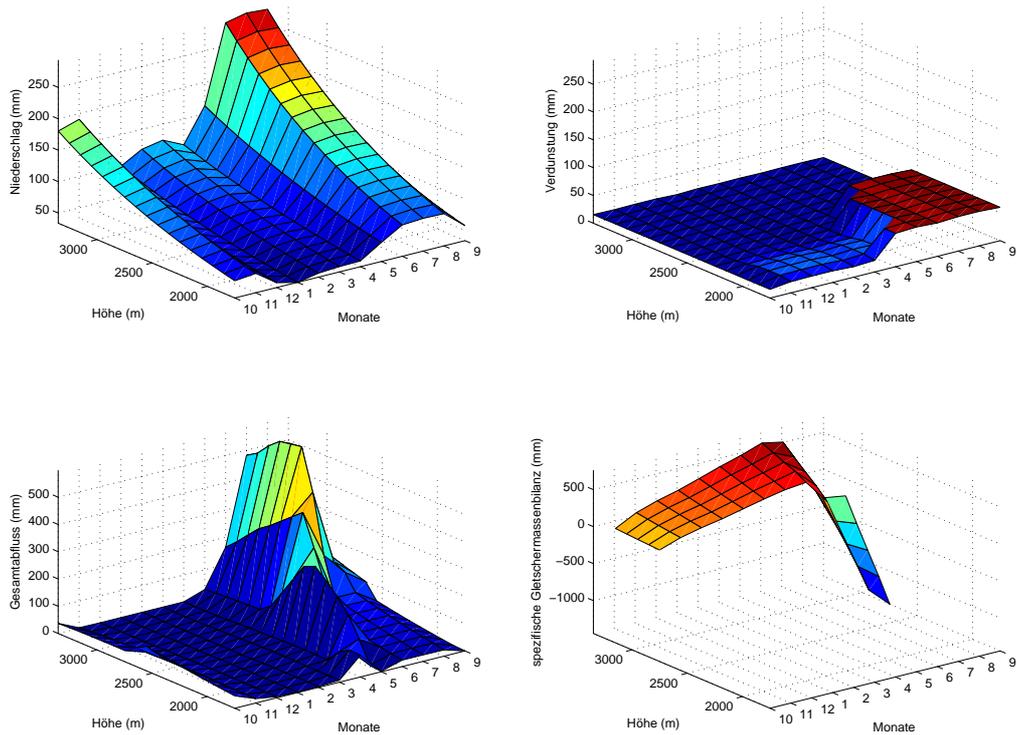


Abb. E- 11: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Radurschl (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und spezifische Gletschermassenbilanz).

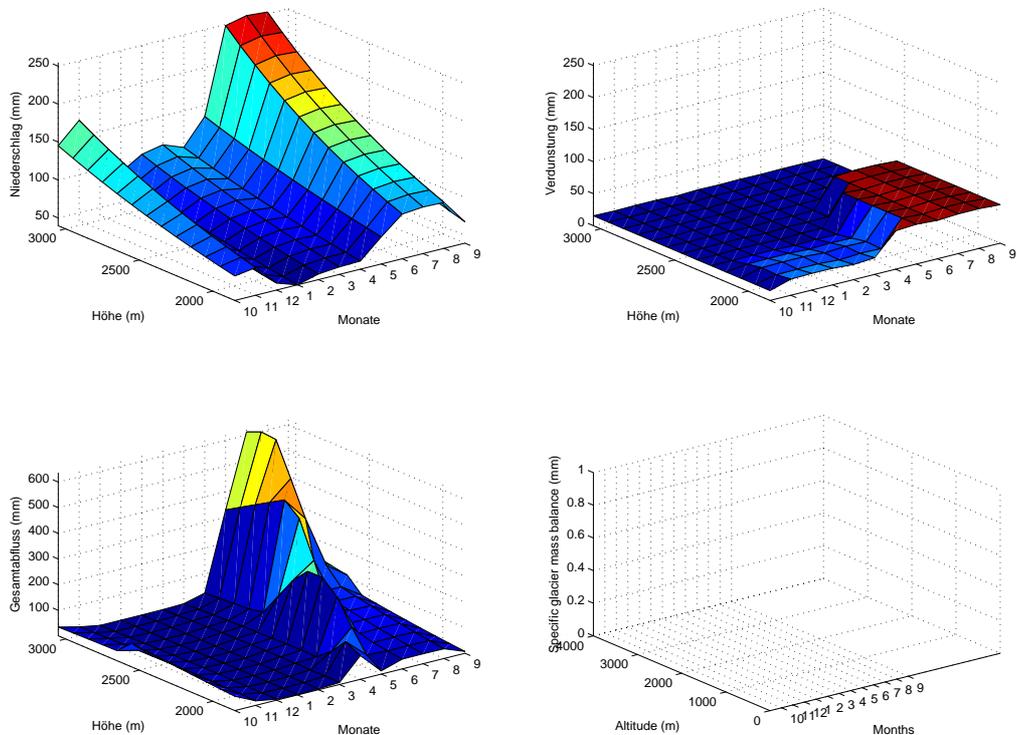


Abb. E- 12: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Tschey (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung und Gesamtabfluss) . Das EZG ist nicht vergletschert.

E-3 Szenarien

E-3.1 Das verwendete Klimaszenario

Um die zukünftige Änderung des Abflussverhaltens in diesen EZG abschätzen zu können wurden die Eingangsgrößen Temperatur und Niederschlag im Modell verändert. Die Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Verdunstung und Speicherung werden direkt vom Klima beeinflusst, der Abfluss wird sich an ein geändertes Klima also über diese drei Größen anpassen. Das hier verwendete Klimaszenario ist für alle drei EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey gleich und wird in Tabelle Tab. E- 2 beschrieben. Es zeigt wärmere, trockenere Sommer (Mai-Oktober: Niederschlag -20%, Temperatur +2°C) und geringfügig wärmere, niederschlagsreichere Winter (November – April: Niederschlag +15%, Temperatur +1°C) und basiert auf dem Szenario A1B des letzten IPCC Berichtes (Solomon, 2007; reclip:more 2007).

Tab. E- 2: Klimaszenario wie im Modell OEZ für die EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey verwendet mit den unterschiedlichen Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Sommer- und Winterhalbjahr.

Klimaszenario OEZ												
Monate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
delta T (°C)	+1	+1	+1	+1	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+1	+1
delta N (%)	+15	+15	+15	+15	-20	-20	-20	-20	-20	-20	+15	+15

E-3.2 Das modellierte Abflussszenario

Das Klimaszenario bewirkt durch höhere Temperaturen in allen EZG eine mehr oder weniger starke Verschiebung von Schneefall zu Regen, was zu mehr Abfluss im Winter, und einer geringeren Schneedecke führt, wie in Abbildung Abb. E- 13 zu sehen ist. Der erhöhte Winterniederschlag im Szenario trägt zusätzlich zum winterlichen Abfluss bei. Diese Erhöhung ist im niedrigsten EZG (Tschey) am deutlichsten, im höchsten EZG (Gepatschalm) am schwächsten. Im stark vergletscherten und hoch gelegenen EZG Gepatschalm gibt es eine frühere Schmelzwasserspitze aus der Schneedecke und verstärkte Spitze im Juli und August durch das Schmelzen von Gletschereis. Der Jahresgebietsabfluss erhöht sich um 38% auf 2188 mm. Die Gletscherspende ist der jährliche Beitrag des Schmelzens der Gletscher eines Einzugsgebiets zum Abfluss. Er wird als der negative Wert der mittleren spezifischen Massenbilanz der Gletscher berechnet und auf das gesamte Einzugsgebiet bezogen. Im Vergleich zu den vorangegangenen Jahrzehnten war der Massenhaushalt im Untersuchungszeitraum 1983-2003 stark negativ, er steigt von 246 mm für die Referenzperiode 1983-2003 auf 848 mm im Szenario. Somit erhöht sich der Gletscherbeitrag am Gesamtabfluss von 16% auf 38%. Wohlgemerkt stellt diese Erhöhung, berechnet mit der heutigen Gletscherfläche ein Extremszenario dar.

Mit einem ähnlichen Klimaszenario haben Vischer und Bader (1999) den Abfluss des Rheins bei Felsberg simuliert, sind damit aber in einem mit 2% nur schwach vergletscherten Einzugsgebiet. Ihre Ergebnisse bestätigen im Wesentlichen die Modellierung des schwach vergletscherten EZG Radurschl.

In den beiden tiefer gelegenen EZG Radurschl und Tschey verflacht sich die Jahresganglinie des Abflusses im Szenario durch mehr Winterwasser und eine frühere aber niedrigere Schmelzwasserspitze. Die Jahressumme des Abflusses verändert sich

unwesentlich. Die genauen Zahlenwerte des Gebietsabflusses der verschiedenen EZG für den Referenzlauf der Mittelperiode und das Klimaszenario sind in den Tabellen Tab. E- 3, Tab. E- 4 und Tab. E- 5 angegeben.

Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten im Hinblick auf Speicherkraftwerke

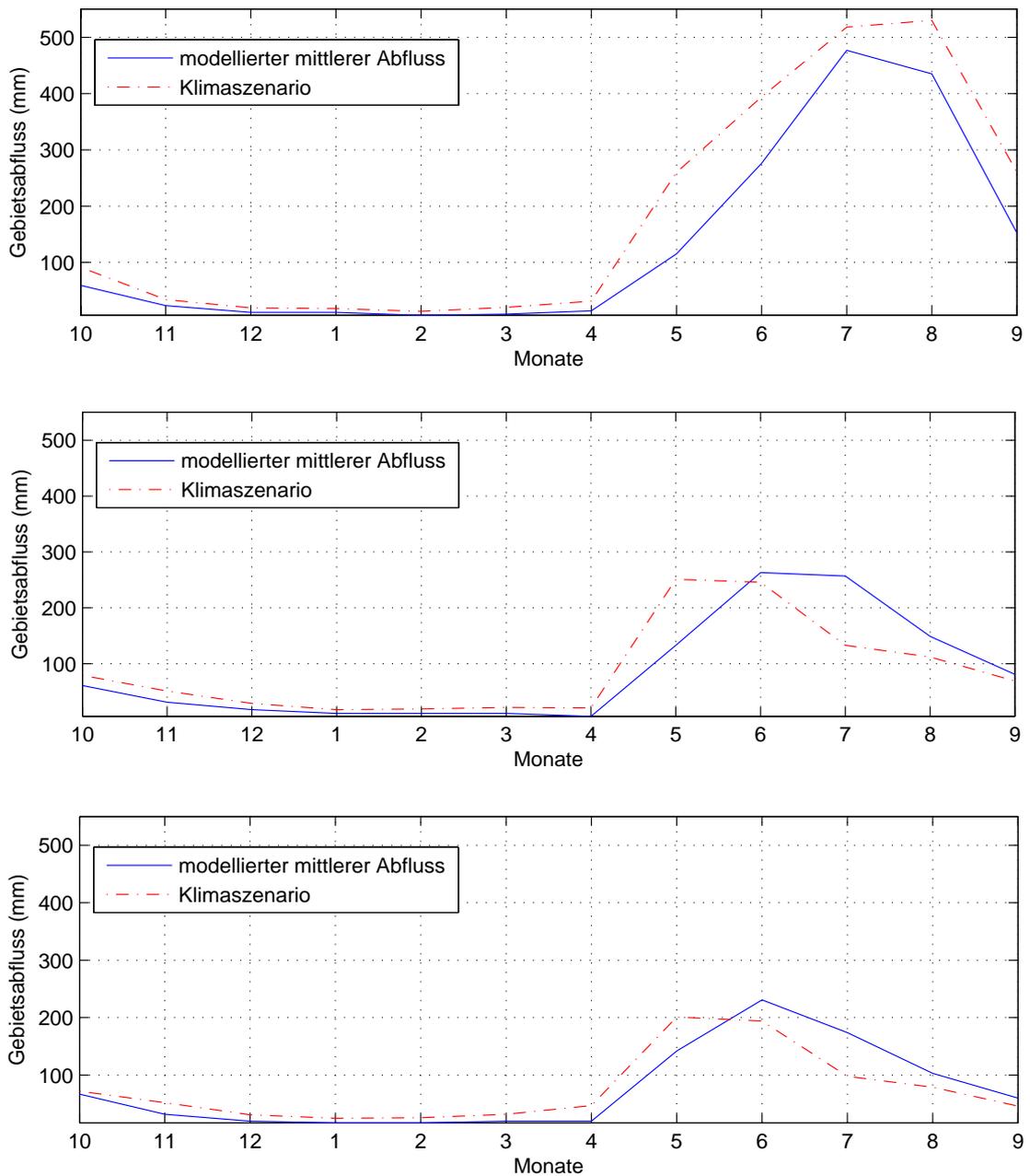


Abb. E- 13: Gemessener Abfluss und Klimaszenario für die Einzugsgebiete Gepatschalm (oben), Radurschl (Mitte) und Tschey (unten). Mögliche Änderung des mittleren Zustandes von 1983-2003 als Reaktion auf eine Temperatur- und Niederschlagsänderung wie im Szenario (s. Tab. E-2) definiert, gerechnet mit heutiger Gletscherfläche.

Tab. E- 3: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Gepatschalpe mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.

EZG Gepatschalpe, Gebietsabfluss (mm)													
Monate	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Jahressumme
Mittel 1983-2003	59	23	11	11	6	8	14	115	276	477	435	152	1586
Klimaszenario	91	34	19	18	13	20	31	260	394	518	530	260	2188

Tab. E- 4: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Radurschl mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.

EZG Radurschl, Gebietsabfluss (mm), Klimaszenario OEZ													
Monate	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Jahressumme
Mittel 1983-2003	61	31	18	11	11	11	6	133	263	257	149	81	1032
Klimaszenario	79	51	29	18	19	22	21	236	231	158	117	69	1049

Tab. E- 5: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Tschey mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.

EZG Tschey, Gebietsabfluss (mm), Klimaszenario OEZ													
Monate	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Jahressumme
Mittel 1983-2003	67	32	20	17	17	20	20	142	231	174	103	60	903
Klimaszenario	72	52	31	25	26	32	47	201	194	98	79	46	904

E-4 Änderung der Gletscherfläche, des Eisvolumens und des Abflusses

E-4.1 Eisdicke aus Radarmessungen

Die Dicke des Gepatschferners ist an über 250 Punkten mit Radarmessungen bestimmt worden (Span et al. 2005). Für etwa 10% der Gletscherfläche konnten solche Messungen nicht durchgeführt werden, hier wurde die Eisdicke mit der Annahme einer basalen Schubspannung von 1 bar aus der Oberflächenneigung errechnet. Schließlich wurde aus diesen Daten ein digitales Höhenmodell des Gletscheruntergrunds erstellt. Die Eisdicke im Jahr 1997 ist in der Abbildung E-14 wiedergegeben.

Im Vergleich zu anderen Gletschern Österreichs hat der Gepatschferner ein geringes Flächen/Volumen Verhältnis, er ist im Firngebiet und in seiner Zunge besonders dick, bei den bisher gemessenen Änderungen der Eisdicke hat sich seine Fläche entsprechen wenig verändert.

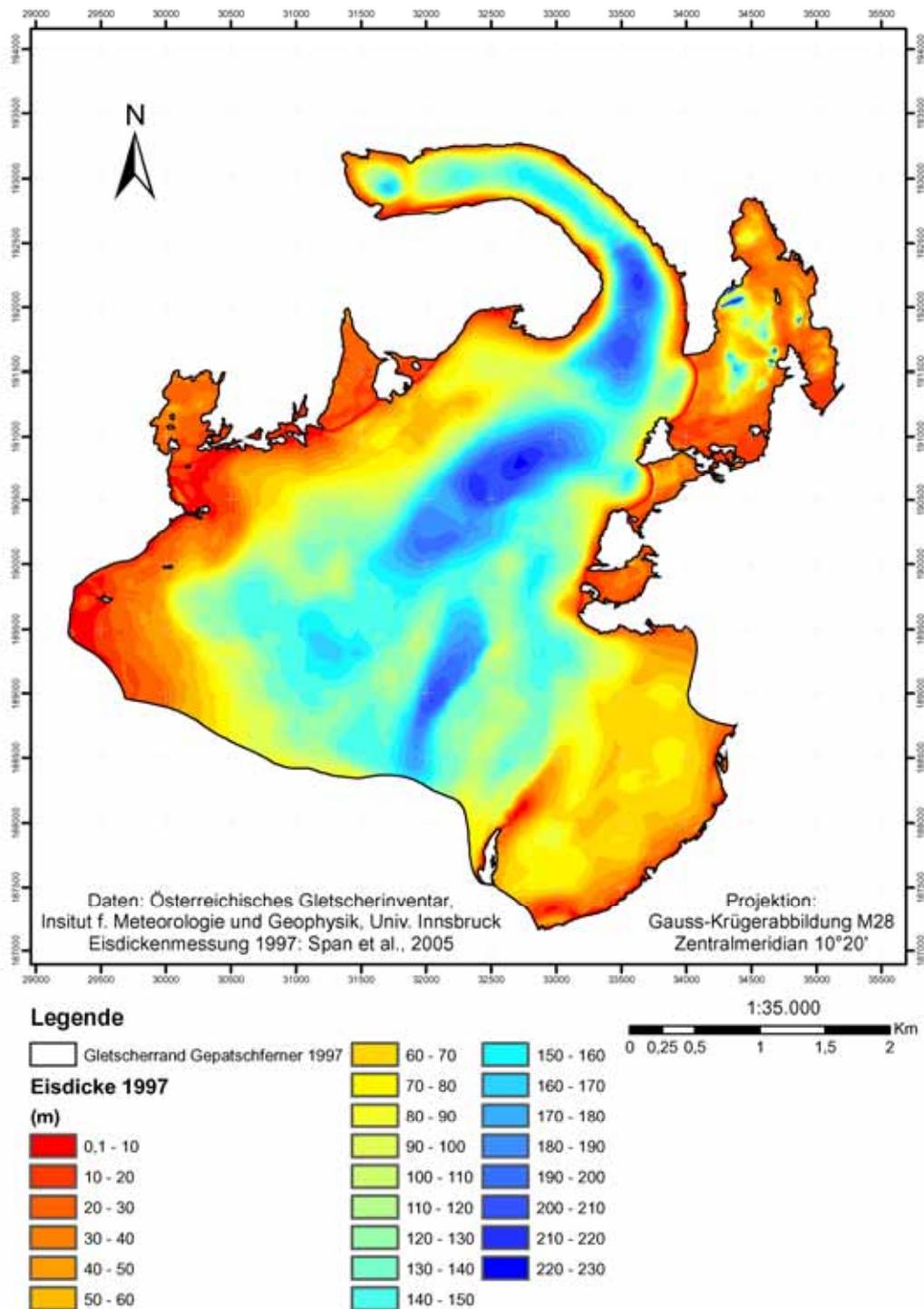


Abb. E- 14: Eisdicke des Gepatschferners im Jahr 1996, die Daten wurden aus gemessenen Radarprofilen räumlich extrapoliert, für kleine Randgebiete aus der Oberflächenneigung berechnet.

E-4.2 Eisdicken und Flächen 1969 – 1997 – 2006

Da das Wasserdargebot im zu 40% vergletscherten EZG Gepatschalpe in den Sommermonaten nennenswert von der Eisschmelze mitgesteuert wird (s. modellierte Abflusskomponenten (**Abb. E- 6**)), ist eine Analyse der vergangenen Änderungen der Gletscherfläche von großer Bedeutung. Wie sich diese in Zukunft ändert, ist neben den

klimatischen Randbedingungen als treibende Kraft maßgeblich von der vorhandenen Eisdicke und ihrer Änderung abhängig. Hierzu gibt die Untersuchung der Flächen- und Höhenänderung des Gepatschferners über die Periode 1969-1997-2006 Auskunft (s. Abb. E- 15 und E-16). Messungen der Eisdicke aus dem Jahr 1996 weisen selbst im untersten Teil der Gletscherzunge noch Werte von deutlich über 100 m (Span et al, 2005; s. Abb. E- 14) aus.

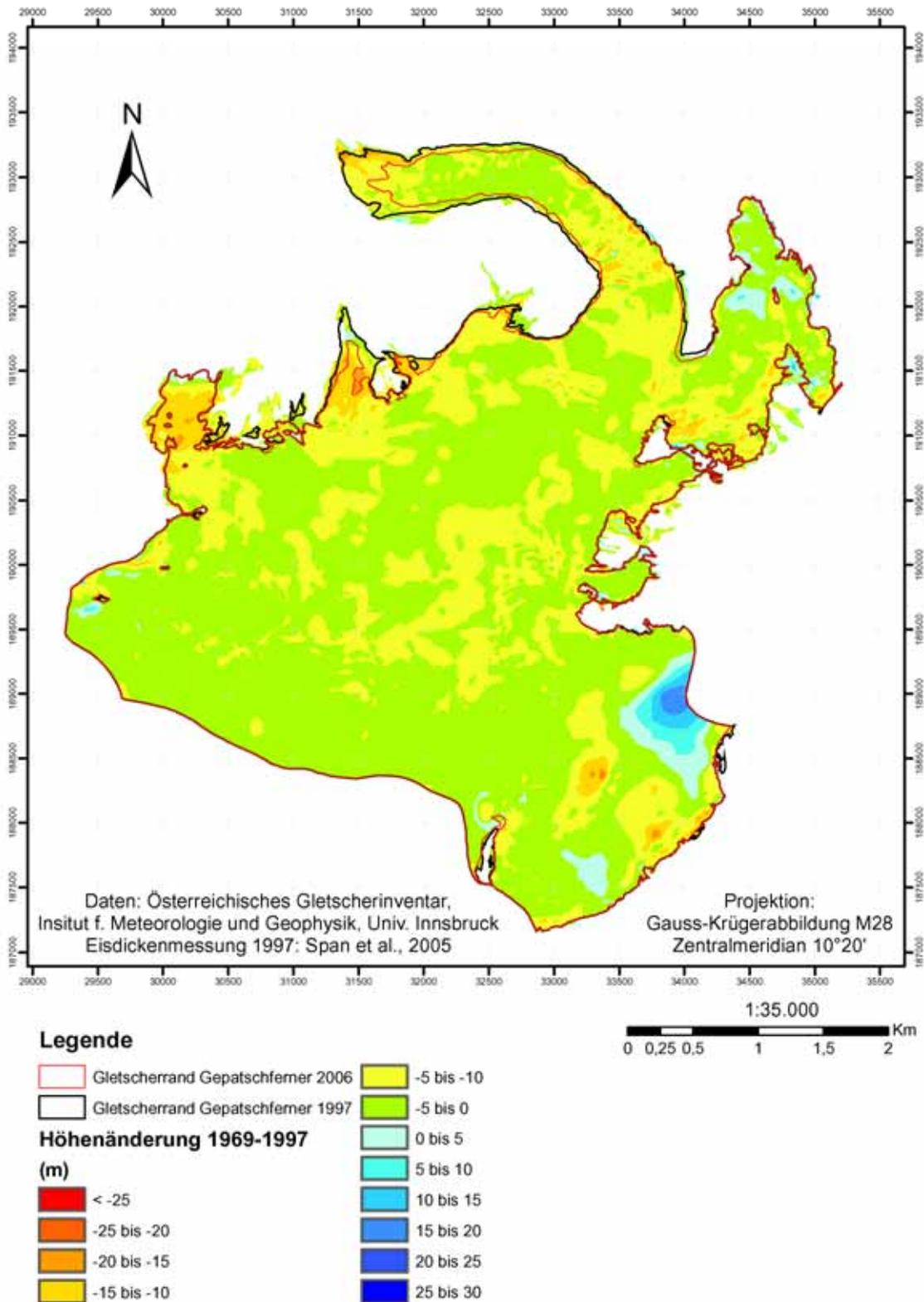


Abb. E- 15: Eisdickenänderung und Flächenänderung des Gepatschferners zwischen 1969 und 1997, berechnet aus Daten der Österreichischen Gletscherinventare.

Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten im Hinblick auf
Speicherkraftwerke

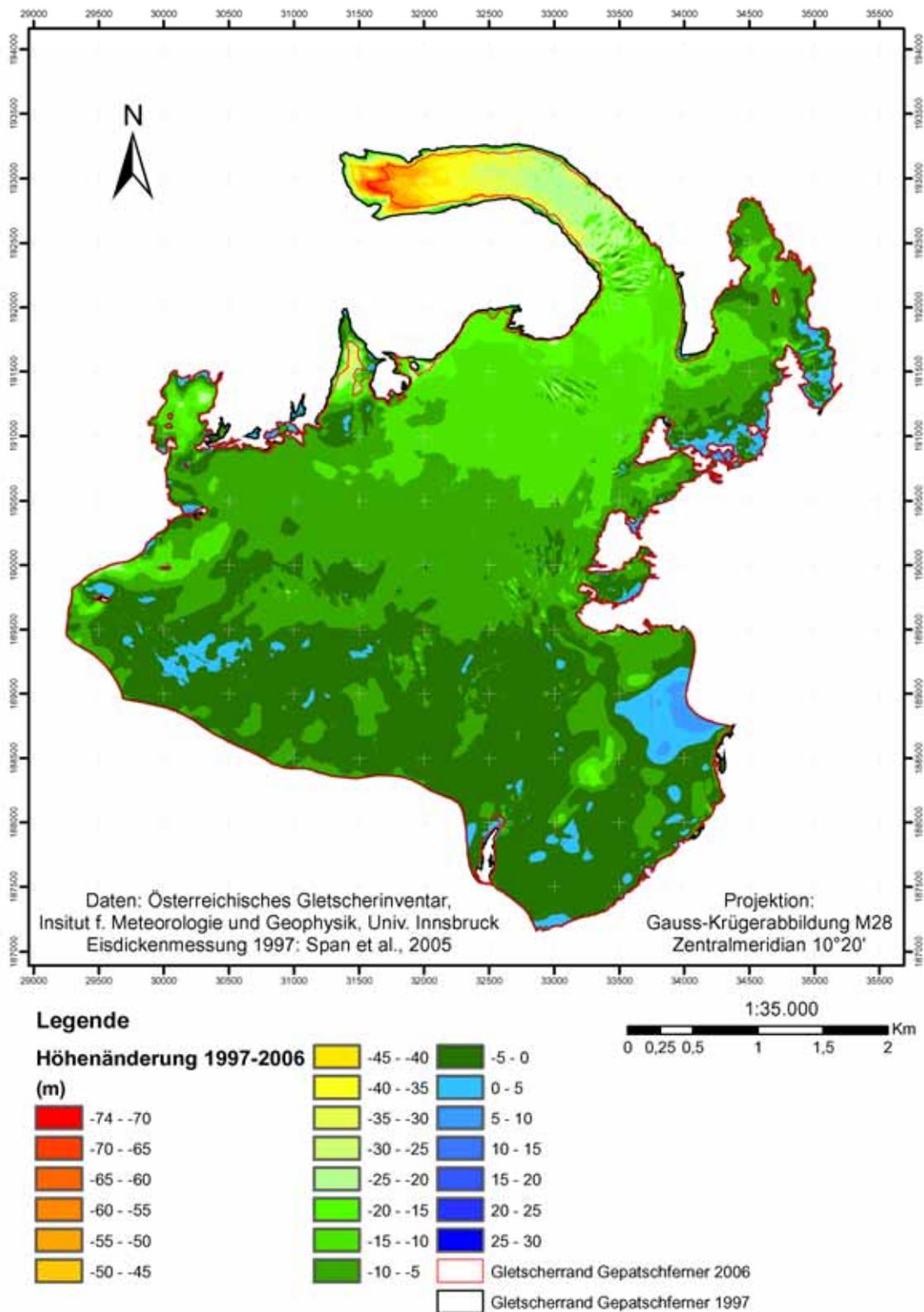


Abb. E- 16: Eisdickenänderung und Flächenänderung des Gepatschferners zwischen 1997 (Österreichisches Gletscher Inventar) und 2006 (Laser Scan der Tiroler Landesregierung).

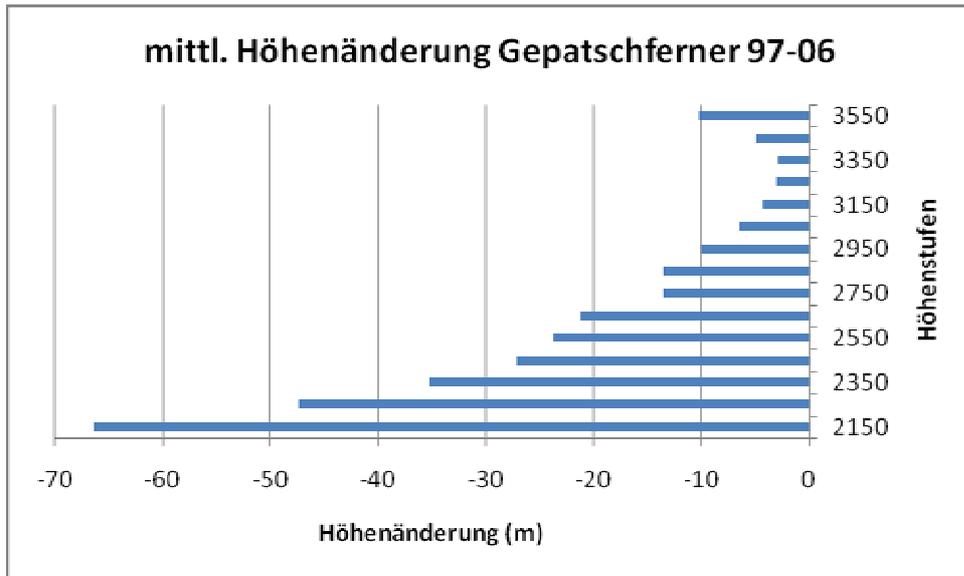


Abb. E - 17: Höhenänderung des Gepatschferners von 1997 bis 2006 nach Höhenstufen gemittelt.

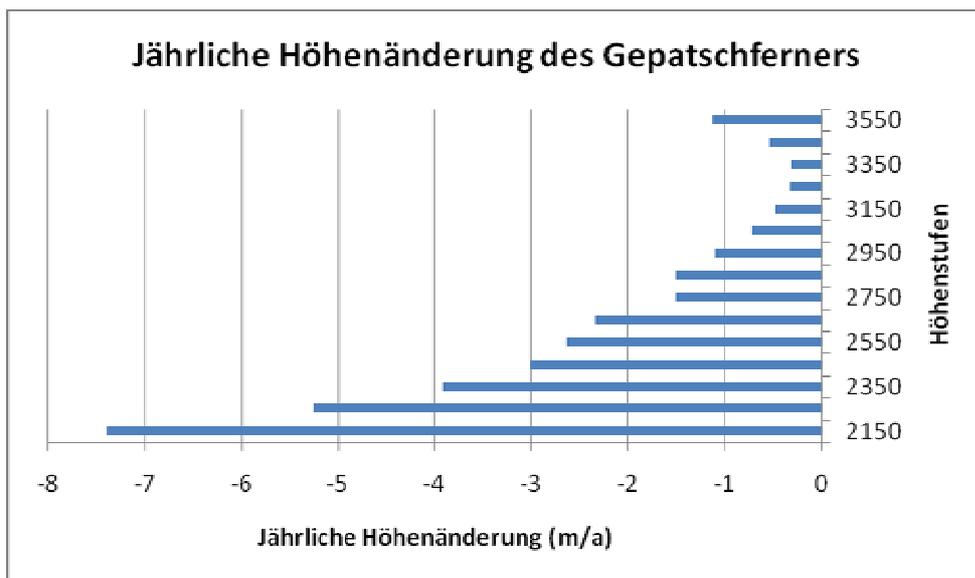


Abb. E- 18: Jährliche Höhenänderung des Gepatschferners von 1997 bis 2006 nach Höhenstufen gemittelt.

E-4.3 Höhenänderung vs. spezifische Bilanz

Die gemessene Änderung der Oberflächenhöhe $\Delta z(x,y)$ entspricht der Änderung der Eisdicke $\Delta H(x,y)$. Sie ist das Resultat der Ablation und Akkumulation von Eis und Schnee auf der Gletscheroberfläche und der Eisbewegung, die den Massenüberschuss aus dem Akkumulationsgebiet in das Ablationsgebiet transportiert und damit im Fall eines stationären Gletschers das dortige Defizit wieder ausgleicht. Die heutigen Alpengletscher sind weit von einem stationären Zustand entfernt.

Die spezifische Massenbilanz b eines Gletschers bezieht sich nur auf das Resultat von Akkumulation und Ablation, die von meteorologischen Bedingungen bestimmt werden, sie berücksichtigt nicht die Bewegung des Eises. Ihre Werte werden als kg m^{-2} oder mm w.e. (water equivalent) angegeben. Dagegen sind die Höhenänderungen in m angegeben, ihre Umrechnung in Wasseräquivalent oder Masse erfordert die Kenntnis der entsprechenden Dichte, die die verschwundene oder dazugekommene Schicht des Gletschers hat. Im Allgemeinen wird für Eis 900 kg m^{-3} und für Sommerfirn 500 kg m^{-3} eingesetzt.

Die beobachtete Höhenänderung des Gepatschferners $\Delta z(z)$ ist als Mittelwert für 100 m Höhenstufen in Abb. E-17 für den gesamten Zeitraum, und in Abb. E-18 als Jahreswerte dargestellt. Sie hat durchwegs negative Werte, am geringsten in der Mitte des Akkumulationsgebiets (3350 m). Im obersten Teil nehmen die Höhenverluste wieder zu, teils durch die Eisbewegung, teils durch das Schmelzen des Eises.

Die berechnete spezifische Massenbilanz zeigt so wie auf den meisten Alpengletschern einen positiven Bereich im Akkumulationsgebiet in den obersten 300 m. Im unteren Teil des Gletschers nimmt sie nahezu linear mit der Höhe zu, anders als die Höhenänderung $\Delta z(z)$, die durch ihren unregelmäßigen Verlauf die Höhenstufen angibt, in denen die Ablation durch Nachschub mit der Eisbewegung teilweise ausgeglichen wird.

Die Verwendung von Höhenänderungen $\Delta z(x,y)$ in einem Klimaszenario berücksichtigt also die klimatische Wirkung und die Eisdynamik zugleich, ohne dass diese Dynamik explizit modelliert werden muss.

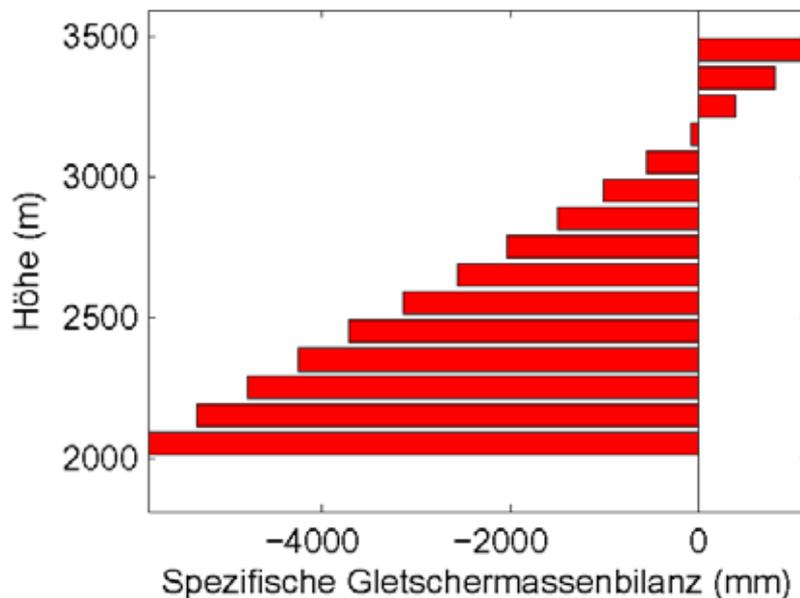


Abb. E- 19: Mittlere spezifische Bilanz der Gletscher im EZG Gepatschalpe in mm w.e./a.

E-4.4 Szenario mit Flächen- und Dickenänderungen

Für die Modellierung der zukünftigen Gletscherspenden muss die Fläche bekannt sein, die zum Schmelzen zur Verfügung steht. Da die dreidimensionale Ausdehnung des Gepatschferners bekannt ist, kann die Größe seiner Oberfläche nach jeder Änderung der Eisdicke neu bestimmt werden.

Die Modellierung geht von den gemessenen Höhenänderungen $\Delta z(x,y)$ zwischen 1997 (Gletscherinventar) und 2006 (Laserscan) aus, wie sie in Abb. E-16 gezeigt werden. Die negativen Änderungen zeigen, dass der Gletscher in der Referenzperiode nicht im Gleichgewicht war, sondern sich noch an die vorhergegangenen Klimaänderungen anpassen musste. Bei einer weiteren Erwärmung wirkt diese alte Anpassung weiter, dazu kommt dann die Reaktion auf die neuen Temperaturänderungen.

Für die Szenarien 2006 plus 1°C bis plus 4°C wurden also die Höhenänderung 1997 – 2006 und ein weiterer Verlust von 800 mm w.e. pro Grad eingesetzt, die neue Höhe der Gletscheroberfläche $z(x,y)$ und ihre Ausdehnung wurden bestimmt. Durch die Verringerung der Oberfläche nach jedem Schritt von 1°C müssen die mittlere spezifische Bilanz, der Volumenverlust und die Gletscherspende nach der neuen Flächen-Höhenverteilung neu berechnet werden.

Die bisher gemessenen und im Szenario projizierten Flächen-Höhenverteilungen und Gesamtflächen sind für den Gepatschferner in den Tabellen E-6 und E-8 dargestellt, die jeweils verbleibenden Eisdicken in den Abb. E-23 bis E-27.

Da der Gepatschferner, wie schon erwähnt, ein durchwegs dicker Gletscher ist, nimmt seine Fläche bei einer gegebenen Dickenänderung zunächst wenig ab. Um ein repräsentatives Beispiel für mittelgroße Gletscher zu analysieren, wurde der Fernaufener im Stubai (11°08' E, 46°59' N) ausgesucht. Er hat mit 1,5 km² nur ca. ein Zehntel der Oberfläche des Gepatschferners und seine maximale Eisdicke ist weniger als die Hälfte der Dicke des Gepatschferners, seine Flächen sind in den Tabellen E-7 und E-8 wiedergegeben.

Für die bisherigen Messungen 1969, 1997, 2006 und für die Szenarien 2006 plus 1°C bis 2006 plus 4°C wurden jeweils die Gesamtbilanz als m³ Wasser und die mittlere spezifische Bilanz (mm w.e. oder kg m⁻²) berechnet, sie sind in den Abbildungen E-20 und E-21 dargestellt.

Der große Gepatschferner verliert im Mittel seiner Oberfläche (mittlere spezifische Bilanz) bis zur Erwärmung um 4°C kontinuierlich mehr Masse pro Fläche, bis zu einem Wert von -3700 mm w.e. pro Jahr bei $\Delta T = 4^\circ\text{C}$. Zugleich verliert er so viel Oberfläche, dass seine Gesamtbilanz (m^3 Wasser = Gletscherspende) bis $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ stark steigt, dann nur noch wenig bis $\Delta T = 3^\circ\text{C}$, wo sie ihr Maximum erreicht.

Beim kleineren Fernaufener wird dieses Maximum schon bei $+2^\circ\text{C}$ erreicht, bei $+4^\circ\text{C}$ ist er nahezu verschwunden. Auch seine mittlere spezifische Bilanz erreicht im Gegensatz zum Gepatschferner maximale Verluste bei $+3^\circ\text{C}$, danach sind nur noch die höchsten Teile des Gletschers übrig, die aufgrund ihrer Höhenlage geringere spezifische Verluste haben.

In der Abb. E-22 wird der Verlauf der Gesamtbilanz, die der Gletscherspende entspricht, für den großen Gepatschferner und den kleinen Fernaufener so gezeigt, dass sich ihre Kurven bis zu $+2^\circ\text{C}$ nahezu decken. Der Unterschied in den Zeitreihen der beiden Gletscherspenden in Abhängigkeit von ihrer Fläche kommt dabei klar zum Ausdruck.

Die Eisdicken und -flächen in diesem Szenario als Zwischenschritte in der Berechnung der Abflussszenarien sind für den Gepatschferner in den Abb. E-23 bis E-27 dargestellt. Im Verlauf des Szenarios reduziert sich der Gepatschferner auf einen Kern, der schon in Abb. E-23 (Eisdicke 2006) erkennbar ist. Erst bei einer Erwärmung von 3°C zerfällt seine Zunge, der Zusammenhang mit dem Kesselwandferner im Südosten zerreißt schon davor. Der Gipfel der Weißseespitze (westlichster Punkt der Karte) verliert schon bald sein Eis, ebenso die südwärts orientierten Flächen bis zum Rauhen Kopf am Beginn der Zunge, und ebenso die östlichen Seitengebiete. Es ist bemerkenswert, dass maximale Eisdicken von >200 m bis zum $+3^\circ\text{C}$ Szenario erhalten bleiben.

Beim kleineren Fernaufener (Abb. E-26 bis E-32) sind im Jahr 2006 große Flächen um 100 m dick, im Szenario $+1^\circ\text{C}$ werden schon größere Verluste an den Randflächen berechnet. Bei $+2^\circ\text{C}$ bleibt ein Kern von ca. 100 m Dicke übrig, bei $+4^\circ\text{C}$ ist der Gletscher praktisch verschwunden.

Tab. E- 6: Flächen-Höhenverteilung des Gepatschferners 1969-1997-2006 und in den Szenarien bis zu +4°C.

Inventardater	1969	1997	2006	Szenarien plus1°C	plus2°C	plus3°C	plus4°C
Höhenstufe Fläche (km ²)							
2050	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
2150	0,12	0,10	0,06	0,05	0,01	0,00	0,00
2250	0,27	0,23	0,17	0,11	0,04	0,00	0,00
2350	0,20	0,19	0,12	0,11	0,09	0,03	0,00
2450	0,20	0,20	0,16	0,15	0,11	0,03	0,00
2550	0,22	0,24	0,19	0,11	0,06	0,05	0,05
2650	0,20	0,17	0,12	0,11	0,12	0,24	0,26
2750	0,47	0,42	0,46	0,49	0,63	0,57	0,43
2850	1,28	1,21	1,31	1,42	1,59	1,33	1,02
2950	2,83	2,81	2,79	2,74	2,39	1,89	1,21
3050	3,39	3,22	3,04	2,65	1,98	2,25	2,31
3150	3,79	3,68	3,70	3,59	3,21	1,99	0,45
3250	2,85	2,70	2,59	2,23	1,80	0,95	0,03
3350	1,64	1,56	1,53	1,22	0,53	0,01	0,00
3450	0,39	0,34	0,32	0,08	0,01	0,00	0,00
3550	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	17,87	17,08	16,56	15,07	12,57	9,34	5,76

Tab. E- 7: Flächen-Höhenverteilung des Fernaufenerners 1969-1997-2006 und in den Szenarien bis zu +4°C.

Flächen-Höhenverteilung Fernaufenerner							
Inventardaten	1969	1997	2006	Szenarien plus 1°C	plus 2°C	plus 3°C	plus 4°C
Höhenstufe Fläche (km ²)							
2550	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2650	0,05	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
2750	0,20	0,17	0,17	0,18	0,19	0,12	0,00
2850	0,65	0,62	0,56	0,51	0,23	0,03	0,00
2950	0,63	0,59	0,55	0,43	0,16	0,00	0,00
3050	0,26	0,20	0,19	0,14	0,05	0,01	0,00
3150	0,07	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01
3250	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3350	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SUMME	1,87	1,66	1,54	1,29	0,65	0,17	0,01

Tab. E- 8: Volumina, Flächen und mittlere Dicke von Fernau- und Gepatschferner für 1969-1997-2006 und die Szenarien bis zu +4°C.

	Gepatschferner			Fernaufenerner		
	Vol (km ³)	Flä (km ²)	Hquer (m)	Vol (km ³)	Flä (km ²)	Hquer (m)
1969	1,75	17,9	103	0,082	1,87	42
1997	1,62	17,1	94	0,068	1,66	41
2006	1,47	16,6	89	0,059	1,54	39
plus 1°C	1,2	15,4	78	0,038	1,29	30
plus 2°C	0,85	12,6	67	0,015	0,65	23
plus 3°C	0,49	9,3	53	0,0018	0,17	10
plus 4°C	0,17	5,8	29	0,0003	0,01	32

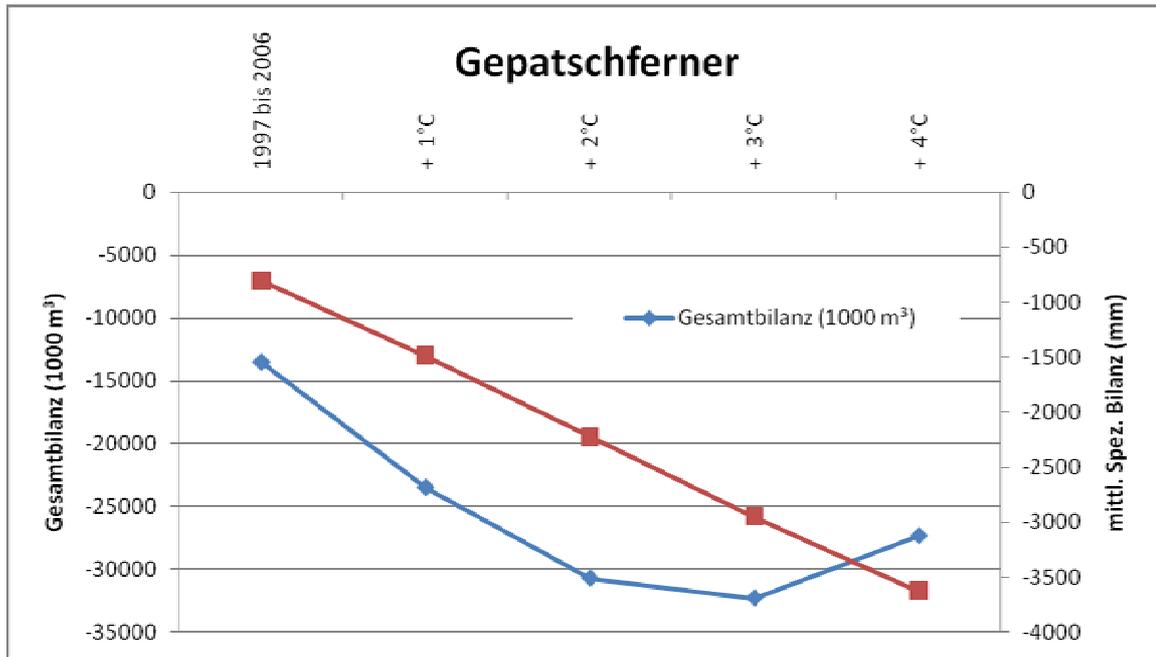


Abb. E- 20: Gesamtbilanz (1000 m³) und mittlere spezifische Bilanz (mm w.e.) des Gepatschferners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.

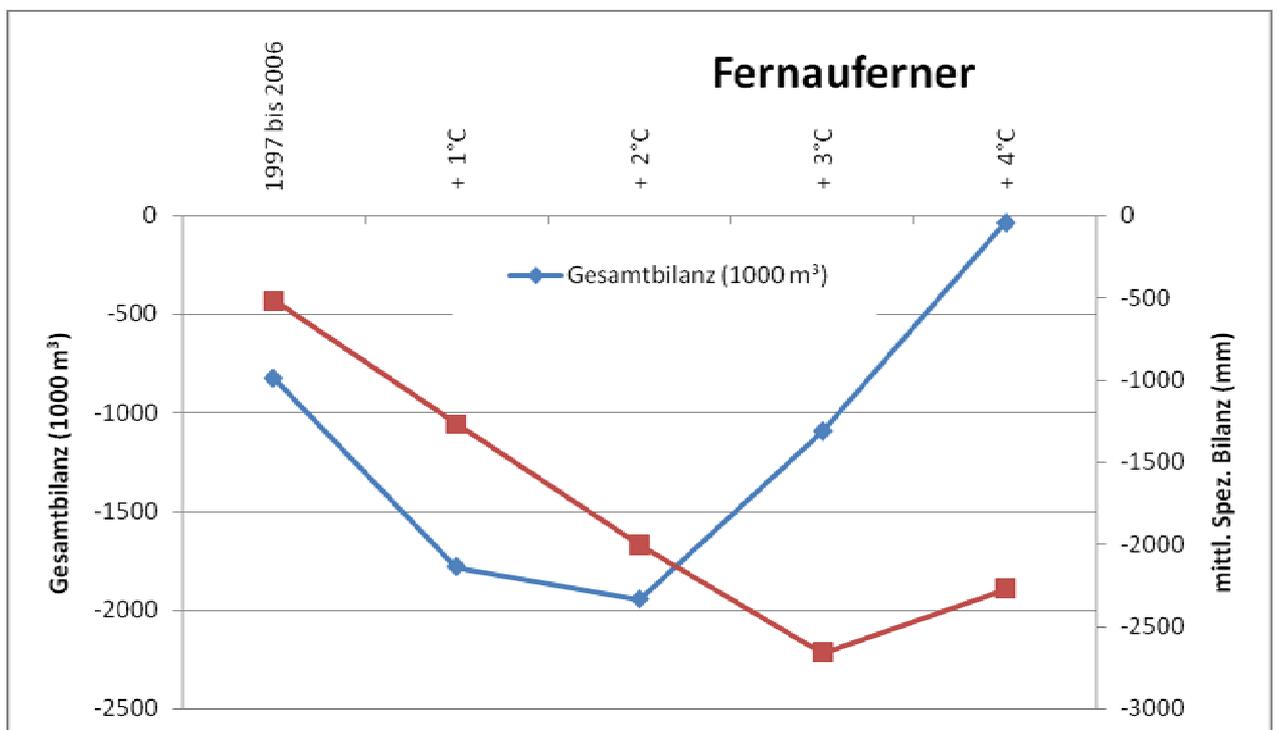


Abb. E- 21: Gesamtbilanz (1000 m³) und mittlere spezifische Bilanz (mm w.e.) des Fernaufenerners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.

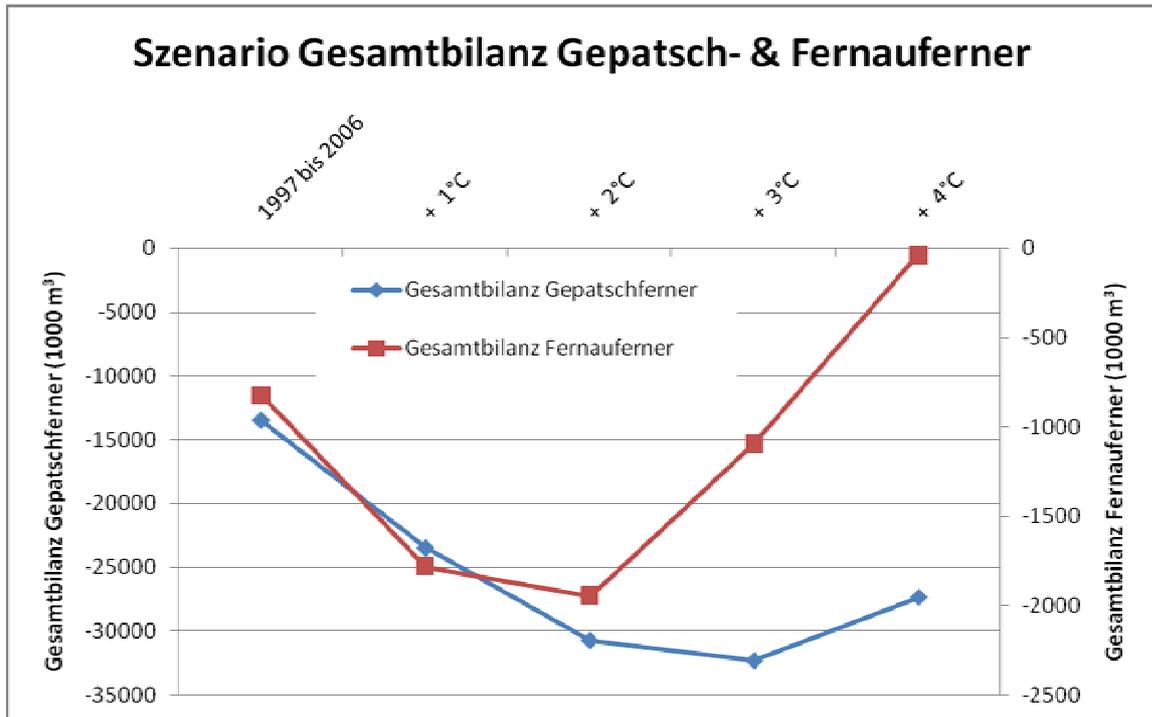


Abb. E- 22: Gesamtbilanz (1000 m³) des Gepatsch- und Fernauferners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.

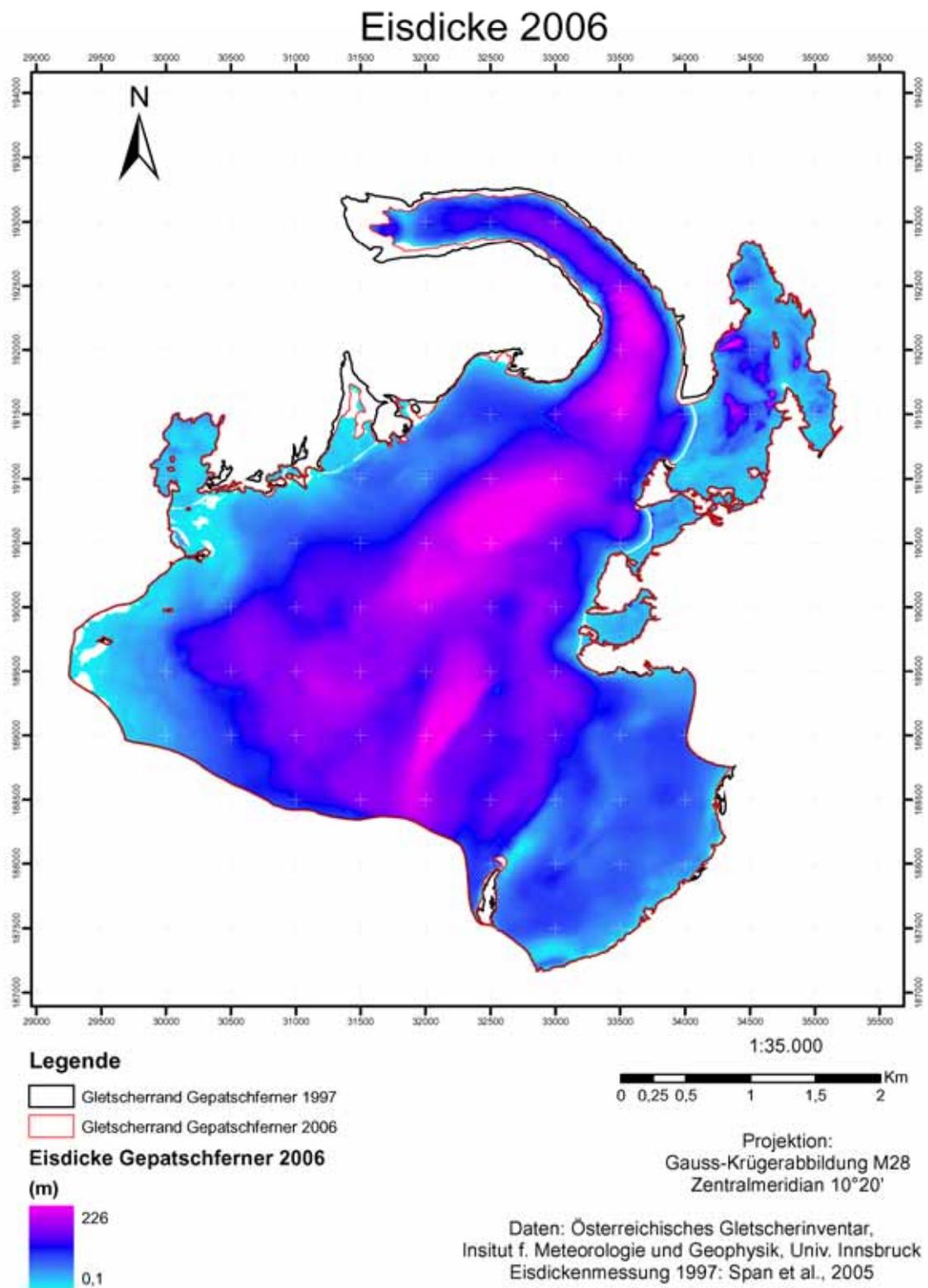


Abb. E- 23: Eisdicke des Gepatschferners im Jahr 2006.

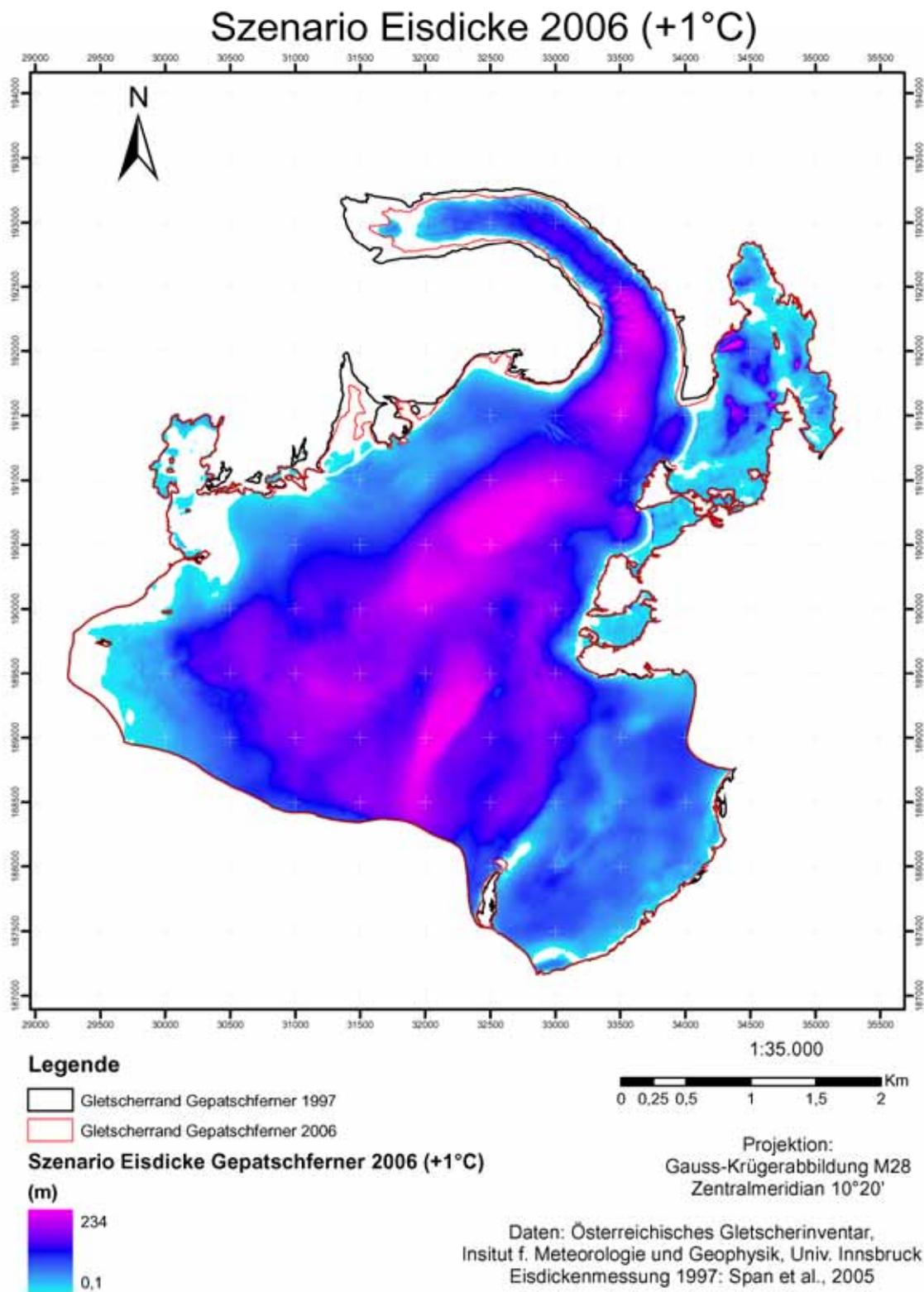


Abb. E- 24: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +1°C.

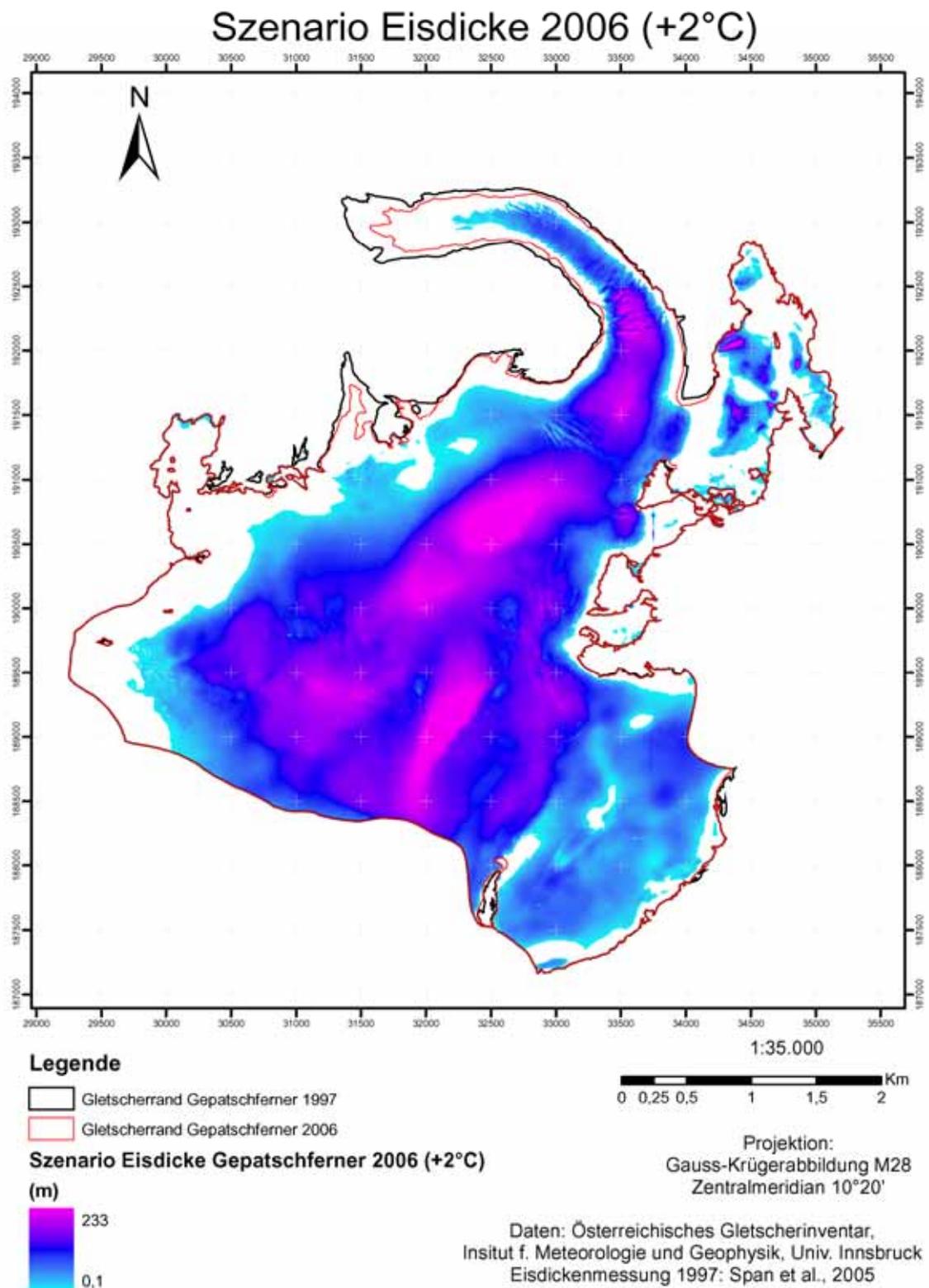


Abb. E- 25: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +2°C

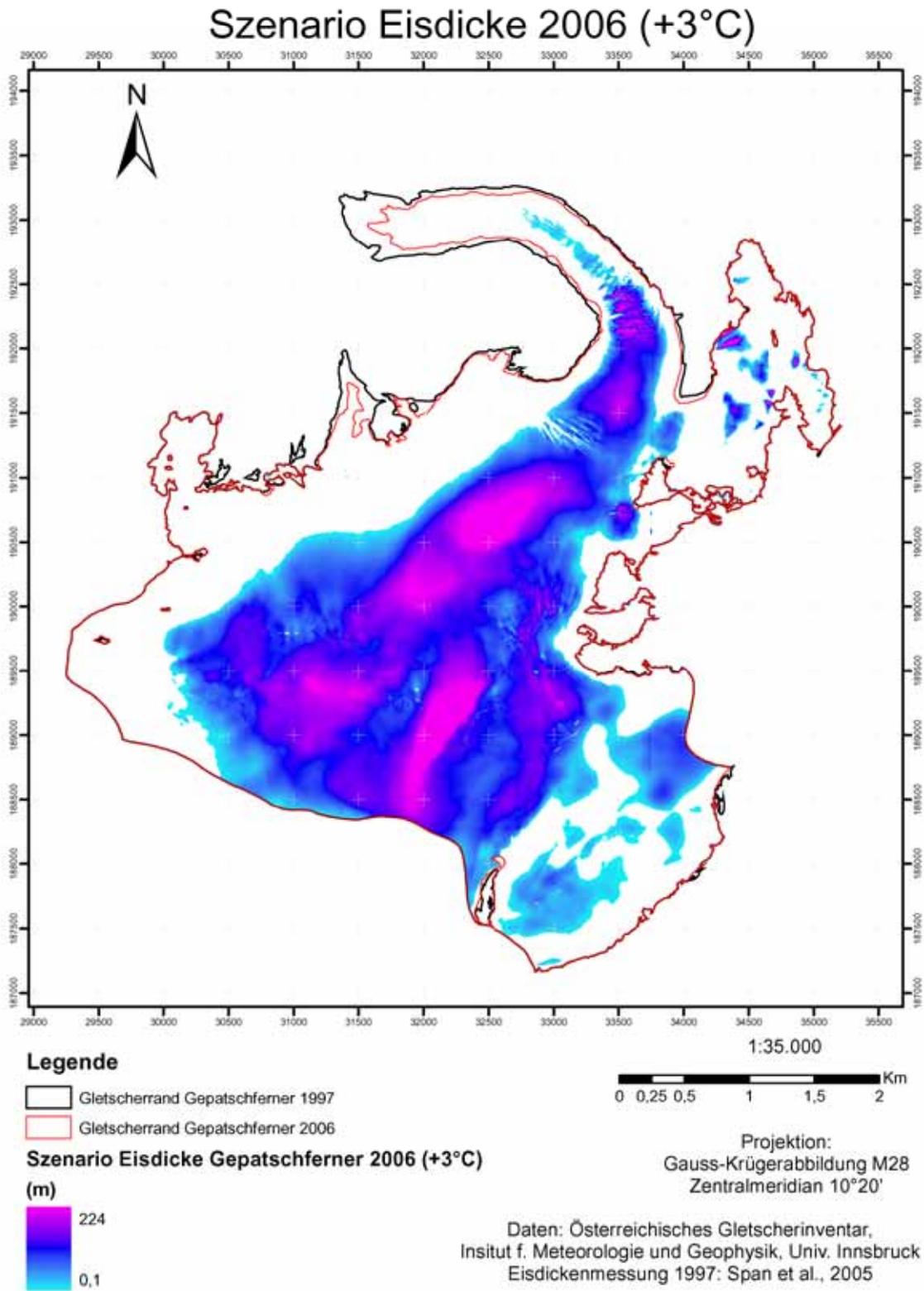


Abb. E- 26: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +3°C

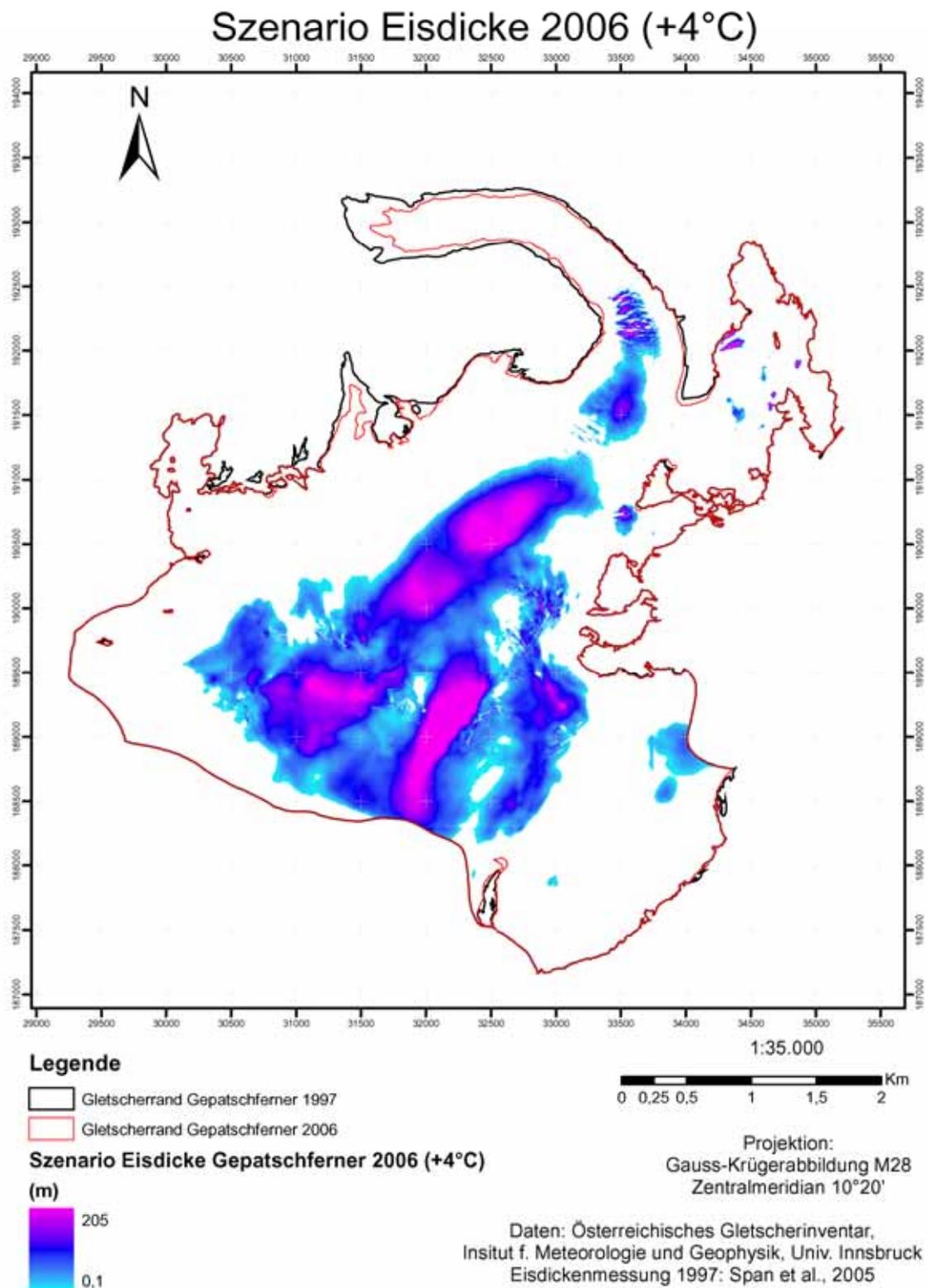


Abb. E- 27: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +4°C

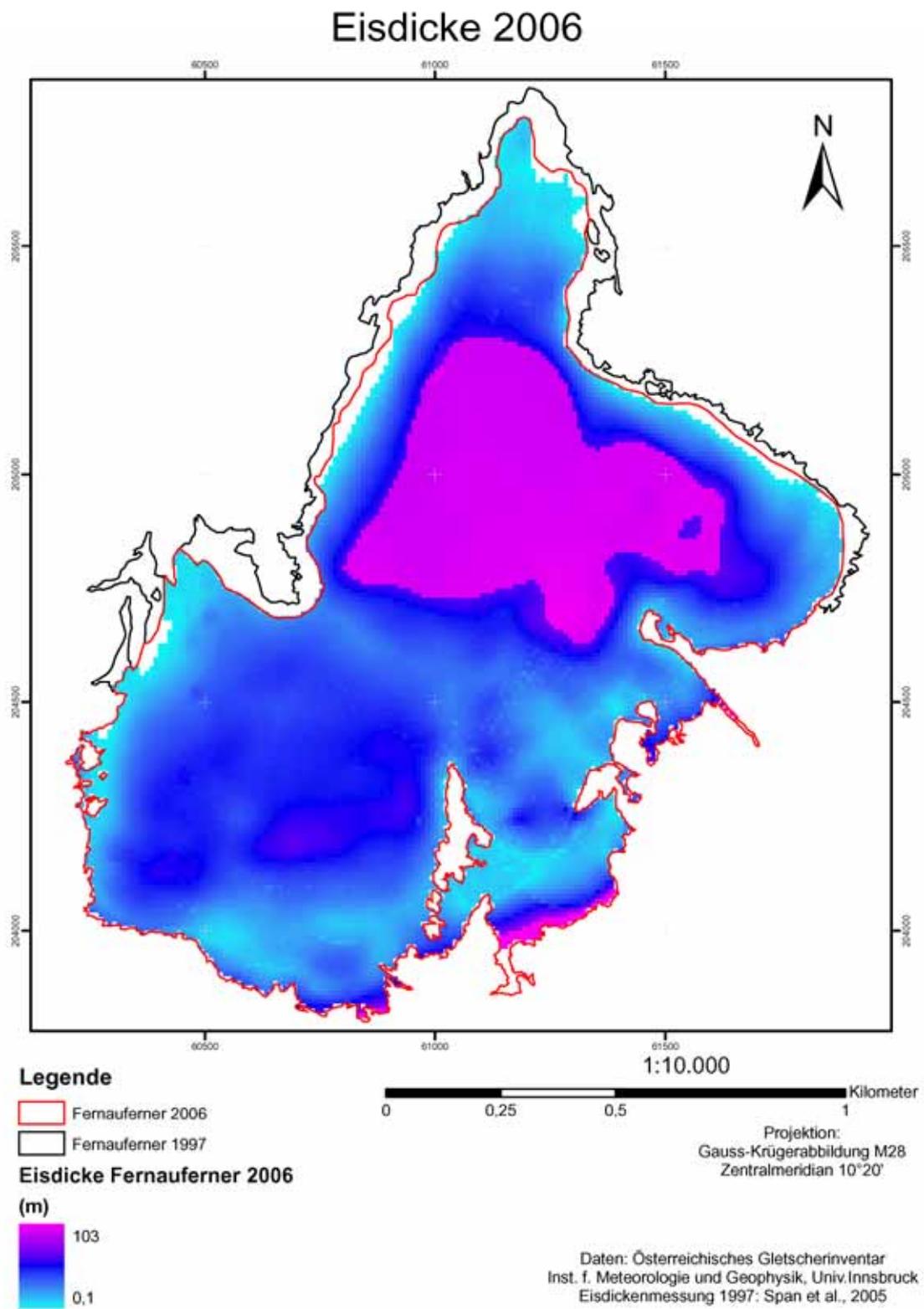


Abb. E- 28: Eisdicke des Feraufeners im Jahr 2006.

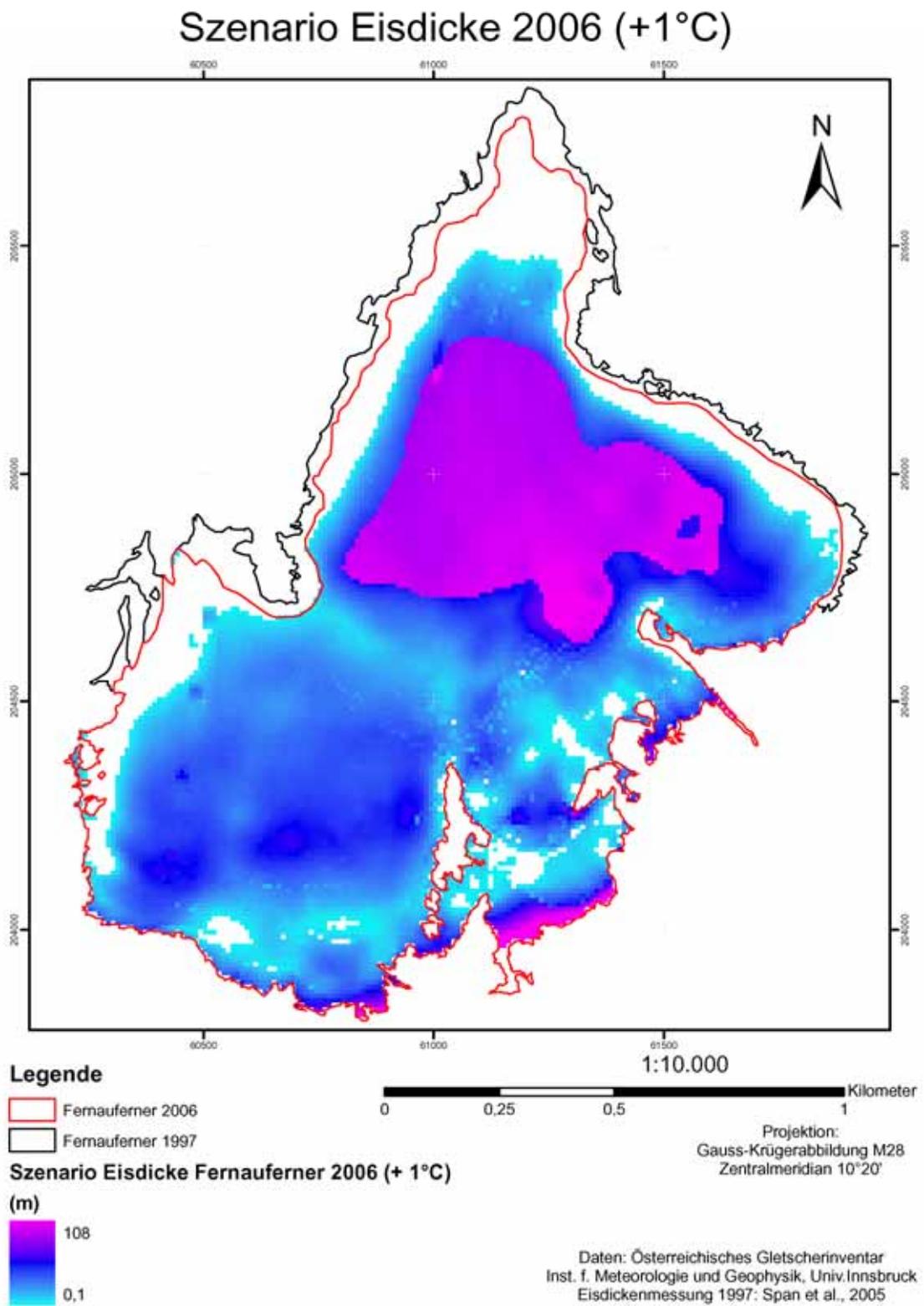


Abb. E- 29: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +1°C.

Szenario Eisdicke 2006 (+2°C)

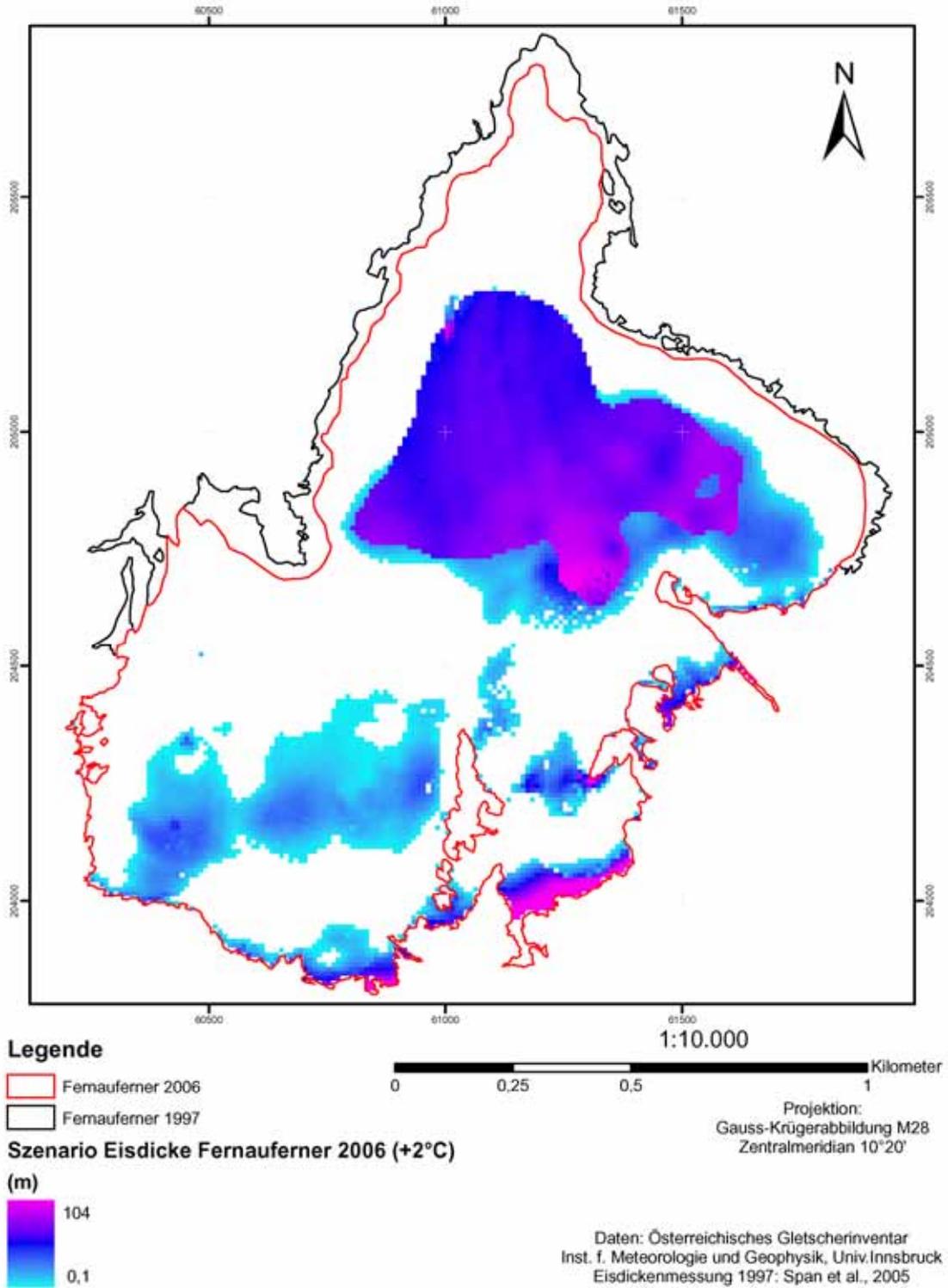


Abb. E- 30: Eisdicke des Feraufeners im Szenario 2006 +2°C.

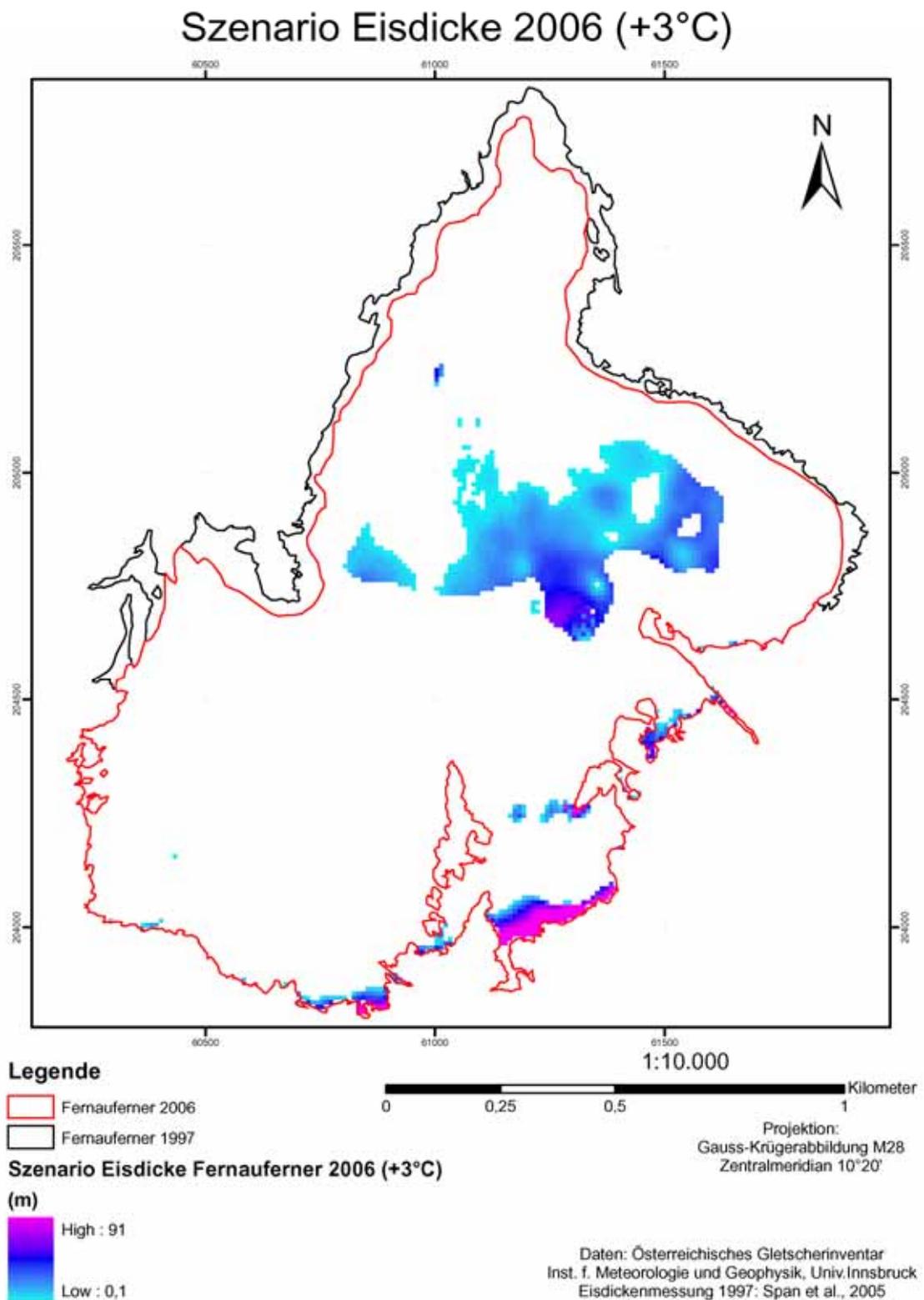


Abb. E- 31: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +3°C.

Szenario Eisdicke 2006 (+4°C)

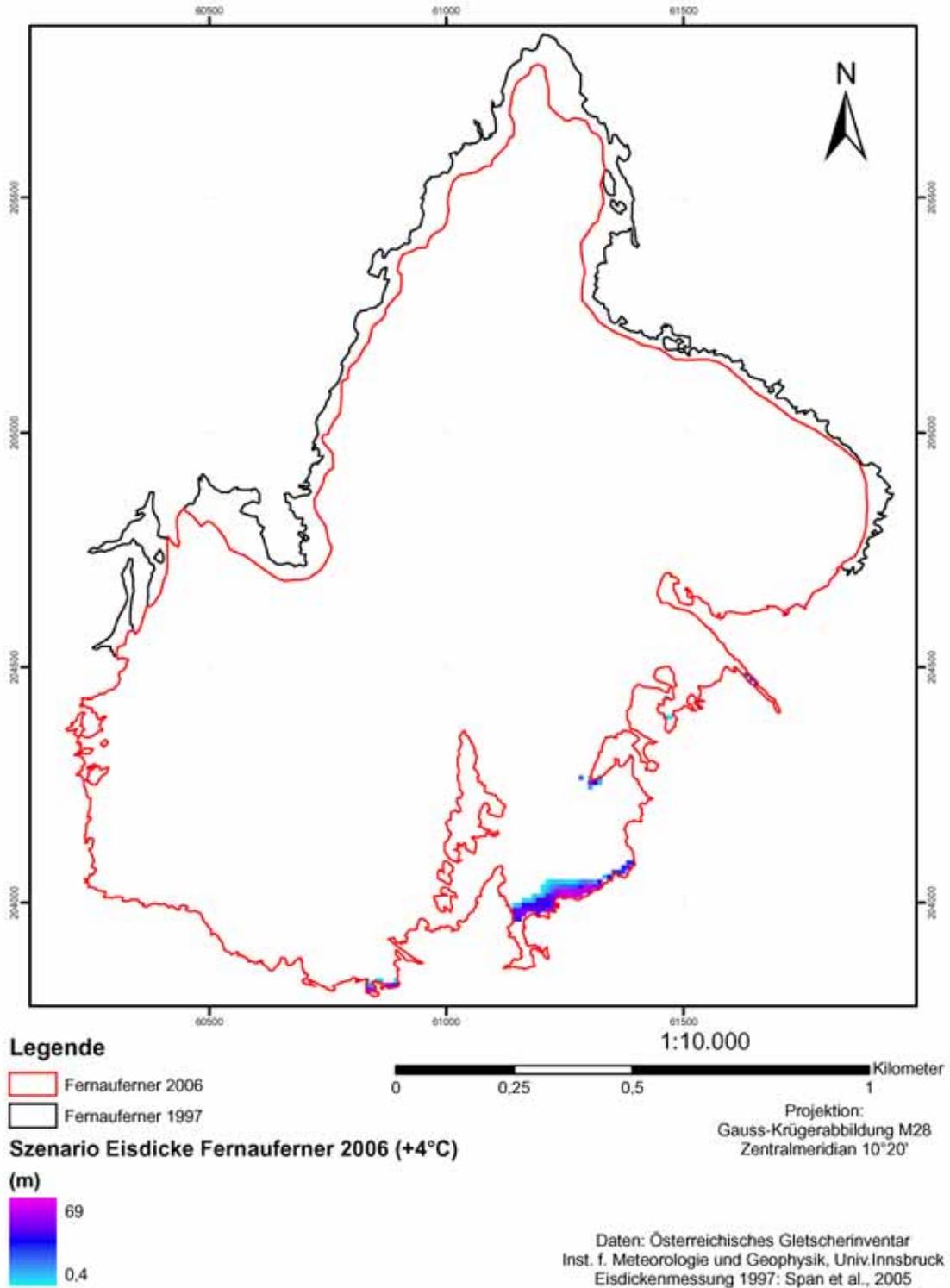


Abb. E- 32: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +4°C.

E-5 Beurteilung und Ausblick

Die Szenarien des 3. und 4. Kapitels zeigen für den großen Gepatschferner (17 km²) eine Zunahme der Gletscherspende bis zu einer Erwärmung von 3°C, für den kleineren Fernaufener (1,5 km²) bis zu einer Erwärmung von 2°C. Bei einem weiteren Temperaturanstieg überwiegt die Verringerung der Gletscherfläche über die Erwärmung und die Gletscherspende nimmt ab, wobei zum Beispiel der Fernaufener nach einer Erwärmung um 4°C praktisch verschwunden ist.

Wann diese Werte erreicht werden, kann nicht mit Gewissheit festgelegt werden. Hier sollen zwei Versuche dazu gemacht werden:

1. Verschiedene Emissionsszenarien liefern zusammen mit verschiedenen Klimamodellen breit gefächerte Projektionen der globalen Mitteltemperatur, die aufgrund des Szenarios A1B, das häufig verwendet wird, vom Mittelwert der Periode 1980-1999 bis zum Mittelwert der Periode 2090-2099 von +1,7 bis +4,4°C reichen und ein „best estimate“ von +2,8°C haben.

Nimmt man dazu an, dass so wie bisher die Temperaturen in den Alpen etwa doppelt so stark ansteigen wie im globalen Mittel, dann würde das „best estimate“ +5,6°C betragen und das Spektrum der Projektionen für diesen Zeitraum von 3,4 bis 8,8°C reichen. Diese bisher beobachtete Verdoppelung hängt aber unter anderem von der Luftdruckverteilung und der Meeresströmung im Nordatlantik ab, die sich im Lauf eines Jahrzehnts ändern können.

2. Nach Angaben der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik hat sich das Dezennienmittel der Lufttemperatur in Innsbruck von 8,6°C (1970-79) auf 9,6°C (1990-99) erhöht, die Sommertemperaturen (Juni, Juli, August), die für die Gletscher maßgeblich sind, stiegen in diesem Zeitraum in Innsbruck um ca. 1,5°C. Wenn man diese Messungen linear auf die kommenden Jahrzehnte extrapoliert, wird das im 3. Kapitel beschriebene Szenario von +2°C Sommertemperatur in ca. 27 Jahren erreicht, die Wendepunkte der Gletscherspende im 4. Kapitel (2 bzw. 3°C Jahresmitteltemperatur) in 40 bzw. 60 Jahren.

Unabhängig vom Zeitpunkt und dem Ausmaß der Erwärmung bedeuten höhere Temperaturen eine Verschiebung des Niederschlags vom Schnee zum Regen, damit höheres Winterwasser, geringere und frühere Abflussspitzen. Zugleich auch einen geänderten Energiebedarf, weniger Heizung im Winter, mehr Kühlung im Sommer. Schließlich muss in die Planung der Speicherkraftwerke auch die klimabedingte Änderung im Betrieb von Laufkraftwerken oder die bei höheren Flusstemperaturen verringerte Kühlmöglichkeit von Atomkraftwerken berücksichtigt werden.

In diesem Sinn muss betont werden, dass die vorliegende Studie auf klimatologische, hydrologische und glaziologische Überlegungen beschränkt ist. Als unmittelbarer Handlungsbedarf folgt daraus, dass technische und wirtschaftliche Planung für Speicherkraftwerke in enger Zusammenarbeit mit Glaziologen und Klimatologen durchgeführt werden sollte.

Literaturverzeichnis

- Kuhn, M., U. Nickus, F. Pellet 1982: Die Niederschlagsverhältnisse im inneren Ötztal. 17. *Internationale Tagung für Alpine Meteorologie*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach. 235-237.
- Kuhn, M., N. Batlogg 1998: Glacier runoff in alpine headwaters in a changing climate. *IAHS Publication no. 248*, 79-88.
- Kuhn, M., N. Batlogg 1999: Modellierung der Auswirkung von Klimaänderungen auf verschiedene Einzugsgebiete in Österreich. *Schriftenreihe Forschung im Verbund*, Wien, 98 S.
- Kuhn, M. 2000: Verification of a hydrometeorological model of glacierized basins, *Annals of Glaciology*, 31, 15-18.
- Kuhn, M. 2003: Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrometeorological model, *Journal of Hydrology*, 282, 95-103.
- Lambrecht, A., Kuhn, M. 2007: Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Mader, H., Steidl, T., Wimmer, R. 1996: Abflussregime österreichischer Fließgewässer, *Monographien* Bd. 82, BM für Umwelt, Jugend und Familie
- Pardé, M. 1947: *Fleuves et Rivières*, 3. Aufl., Paris, 1947.
- reclip:more 2007: Research for Climate Protection: Model Run Evaluation. Working report by A. Gobiet, H. Truhetz, A. Riegler, Wegener Center for Climate and Global Change, University of Graz.
- Sevruk, B. 1983: Correction of measured precipitation in the Alps using the water equivalent of new snow. *Nordic Hydrology* 1983, 49 – 58.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Span, N., Fischer, A., Kuhn, M. (2005): Radarmessungen der Eisdicke Österreichischer Gletscher, *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, Heft 33.
- Vischer, D., S. Bader (1999): Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserkraft. *wasser, energie, luft – eau, énergie, air* 91. Jhg., Heft 7/8, 149-152.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

- Abb. E- 1: Übersichtskarte der betrachteten Einzugsgebiete im Kaunertal, Radurschltal und Nauderer Tschey Tal: Gepatsch (Pegel Gepatschalm, TIWAG), Tschey (Wasserfassung TIWAG, Überleitung Gepatschstausee), Radurschl (Wasserfassung TIWAG, Überleitung Gepatschstausee). 9
- Abb. E- 2: Flächen-Höhenverteilung der Gesamt-, Wald-, und Gletscherfläche in 100 m Höhenstufen für die betrachteten EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey. 10
- Abb. E- 3: Jahresganglinie des Gebietsabflusses der EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey (links), sowie Pardé-Koeffizient zur Charakterisierung des Abflussregimes (rechts). Die Werte stellen Mittelwerte der Periode 1983-2003 dar, wie sie später ins Modell einfließen. 10
- Abb. E- 4: Referenztemperatur und Referenzniederschlag der EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey wie sie für die unterste Höhenstufe im Modell verwendet wurden. Die Wasserfassungen Radurschl (1787 m) und Tschey (1796 m) liegen praktisch auf der gleichen Höhe in einer Entfernung von 2 km Luftlinie, weswegen die gleichen meteorologischen Inputparameter verwendet wurden. 12
- Abb. E- 5: Übersichtskarte der modellierten Einzugsgebiete Gepatsch, Radurschl und Tschey mit den verwendeten Referenzstationen für die meteorologischen Inputparameter: Kaunertal-Feichten und Rauher Kopf für das EZG Gepatsch, sowie Obergurgl, Vent, Nauders und St. Valentin auf der Heide für die EZG Radurschl und Tschey. 13
- Abb. E- 6: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Gepatschalpe (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar. 15
- Abb. E- 7: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Radurschl (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar. 16
- Abb. E- 8: Verifikation für die Anpassung des Modells OEZ an den Pegel Tschey (oben), modellierte Abflusskomponenten und Pardé-Koeffizienten (unten). Die Abflusswerte stellen den mittleren Zustand der Periode 1983-2003 dar. 16
- Abb. E- 9: Auf- und Abbau der Schneedecke 1983 – 2003 im EZG Gepatschalpe (oben links), EZG Radurschl (oben rechts) und EZG Tschey (unten links), modelliert mit OEZ. 17
- Abb. E- 10: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Gepatschalm (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und spezifische Gletschermassenbilanz). 17
- Abb. E- 11: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Radurschl (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung, Gesamtabfluss und spezifische Gletschermassenbilanz). 18
- Abb. E- 12: Modellierte Komponenten der Wasserbilanz 1983 – 2003 für das Einzugsgebiet Tschey (Mittelwerte 1983-2003) als Funktion von Zeit und Höhe (Niederschlag, Verdunstung und Gesamtabfluss) . Das EZG ist nicht vergletschert. 18
- Abb. E- 13: Gemessener Abfluss und Klimaszenario für die Einzugsgebiete Gepatschalm (oben), Radurschl (Mitte) und Tschey (unten). Mögliche Änderung des mittleren Zustandes von 1983-2003 als Reaktion auf eine Temperatur- und

Niederschlagsänderung wie im Szenario (s. Tab. E- 2) definiert, gerechnet mit heutiger Gletscherfläche.	21
Abb. E- 14: Eisdicke des Gepatschferners im Jahr 1996, die Daten wurden aus gemessenen Radarprofilen räumlich extrapoliert, für kleine Randgebiete aus der Oberflächenneigung berechnet.....	24
Abb. E- 15: Eisdickenänderung und Flächenänderung des Gepatschferners zwischen 1969 und 1997, berechnet aus Daten der Österreichischen Gletscherinventare.	26
Abb. E- 16: Eisdickenänderung und Flächenänderung des Gepatschferners zwischen 1997 (Österreichisches Gletscherinventar) und 2006 (Laser Scan der Tiroler Landesregierung).....	27
Abb. E - 17: Höhenänderung des Gepatschferners von 1997 bis 2006 nach Höhenstufen gemittelt.....	28
Abb. E- 18: Jährliche Höhenänderung des Gepatschferners von 1997 bis 2006 nach Höhenstufen gemittelt.	28
Abb. E- 19: Mittlere spezifische Bilanz der Gletscher im EZG Gepatschalpe in mm w.e./a..	30
Abb. E- 20: Gesamtbilanz (1000 m ³) und mittlere spezifische Bilanz (mm w.e.) des Gepatschferners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.	33
Abb. E- 21: Gesamtbilanz (1000 m ³) und mittlere spezifische Bilanz (mm w.e.) des Fernaufeners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.	33
Abb. E- 22: Gesamtbilanz (1000 m ³) des Gepatsch- und Fernaufeners für 1997-2006 und Erwärmung um bis zu 4°C.	34
Abb. E- 23: Eisdicke des Gepatschferners im Jahr 2006.....	35
Abb. E- 24: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +1°C.....	36
Abb. E- 25: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +2°C.....	37
Abb. E- 26: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +3°C.....	38
Abb. E- 27: Eisdicke des Gepatschferners im Szenario 2006 +4°C.....	39
Abb. E- 28: Eisdicke des Fernaufeners im Jahr 2006.....	40
Abb. E- 29: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +1°C.....	41
Abb. E- 30: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +2°C.....	42
Abb. E- 31: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +3°C.....	43
Abb. E- 32: Eisdicke des Fernaufeners im Szenario 2006 +4°C.....	44

Tabellen

Tab. E- 1: Relative Anteile (in %) der modellierten Abflusskomponenten mit OEZ für die Monate Mai bis September in den verschiedenen EZG.....	15
Tab. E- 2: Klimaszenario wie im Modell OEZ für die EZG Gepatschalpe, Radurschl und Tschey verwendet mit den unterschiedlichen Temperatur- und Niederschlagsänderungen im Sommer- und Winterhalbjahr.	19
Tab. E- 3: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Gepatschalpe mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.	22
Tab. E- 4: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Radurschl mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.	22
Tab. E- 5: Modellierte Werte des monatlichen Gebietsabflusses am Pegel Tschey mit dem Modell OEZ für den Mittelwert der Periode 1983-2003 und das Klimaszenario.	22

Tab. E- 6: Flächen-Höhenverteilung des Gepatschferners 1969-1997-2006 und in den Szenarien bis zu +4°C.	32
Tab. E- 7: Flächen-Höhenverteilung des Fernaufeners 1969-1997-2006 und in den Szenarien bis zu +4°C.	32
Tab. E- 8: Volumina, Flächen und mittlere Dicke von Fernau- und Gepatschferner für 1969-1997-2006 und die Szenarien bis zu +4°C.	32