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

Nicolai Dietermann

# Stabile Isotope im Schnee: Räumliche und zeitliche Variabilität

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. M. Weiler Freiburg i. Br. November 2010

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

Nicolai Dietermann

# Stabile Isotope im Schnee: Räumliche und zeitliche Variabilität

Referent: Prof. Dr. M. Weiler Koreferent: Dr. Ch. Külls

Masterarbeit unter der Leitung von

Prof. Dr. M. Weiler

Freiburg i. Br. November 2010

## Inhaltsverzeichnis

| Inh | alts       | verzeichnis   | Ι    |
|-----|------------|---|------|
| Ve  | rzeic      | hnis der Abbildungen im Text                              | V    |
| Ta  | belle      | nverzeichnis  | IX   |
| Ve  | rzeic      | hnis der Abbildungen im Anhang                            | XI   |
| Zu  | sami       | nenfassung  | XIII |
| Su  | mma        | ıry   | XV   |
| 1   | Ein        | leitung   | 1    |
| 1   | . <b>1</b> | Problemstellung und Zielsetzung                           | 1    |
| 1   | .2         | Literaturrückblick und Stand der Forschung                | 3    |
|     | 1.2        | .1 Schneeprofile  | 3    |
|     | 1.2        | .2 Höheneffekt im Schnee                                  | 7    |
| 2   | Isot       | ope   | 11   |
| 2   | 2.1        | Isotope des Wassers                                       | 11   |
| 2   | 2.2        | Standard und <b>δ-Notation</b>                            | 12   |
| 2   | 2.3        | Isotopenfraktionierung                                    | 13   |
|     | 2.3        | .1 Isotopenfraktionierung unter Gleichgewichtsbedingungen | 15   |
|     | 2.3        | .2 Kinetische Isotopenfraktionierung                      | 15   |
|     | 2.3        | .3 Diffusive Isotopenfraktionierung                       | 16   |
|     | 2.3        | .4 Fraktionierung durch den Rayleigh-Prozess              | 17   |
| 2   | 2.4        | Isotopeneffekte   | 18   |
|     | 2.4        | .1 Kontinentaleffekt                                      | 18   |
|     | 2.4        | .2 Mengeneffekt   | 18   |
|     | 2.4        | .3 Temperatureffekt                                       | 19   |
|     | 2.4        | .4 Breiteneffekt  | 19   |
|     | 2.4        | .5 Saisonaler Effekt                                      | 19   |
|     | 2.4        | .6 Höheneffekt  | 20   |

| 2.5 I        | sotope im Schnee  | 21 |
|--------------|---|----|
| 3 Meth       | hoden   | 23 |
| 3.1 I        | Einzugsgebiete  | 23 |
| 3.1.1        | l Lage  | 23 |
| 3.1.2        | 2 Einzugsgebiet Taschinasbach                               | 24 |
| 3.1.3        | 3 Einzugsgebiet Engstligen                                  | 26 |
| 3.1.4        | 4 Einzugsgebiet Dischma                                     | 27 |
| 3.1.5        | 5 Einzugsgebiet Laschadura                                  | 29 |
| 3.2 I        | Probenentnahme  | 30 |
| 3.2.1        | 1 Entnahme der höhenabhängigen Schneeproben                 | 30 |
| 3.2.2        | 2 Entnahme der Schneeprofile                                | 32 |
| 3.3 N        | Messung des Isotopengehaltes                                | 34 |
| 3.3.1        | 1 Messgerät   | 34 |
| 3.3.2        | 2 Fehlerabschätzung   | 34 |
| 3.3.3        | 3 Messgenauigkeit   | 36 |
| 3.3.4        | Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung des Deuterium-Excess | 36 |
| 3.3.5        | 5 Fazit   | 37 |
| <b>3.4</b> N | Modellierung  | 37 |
| 3.4.1        | 1 Multiple Lineare Regression                               | 38 |
| 3.4.2        | 2 Vorgehensweise  | 39 |
| 3.4.3        | 3 Verwendete Parameter                                      | 40 |
| 3.4.4        | 4 Höhengradient   | 41 |
| 3.5 I        | Local Meteoric Water Line                                   | 42 |
| 4 Erge       | bnisse  | 43 |
| 4.1 \$       | Schneeprofile   | 43 |
| 4.1.1        | 1 Einzugsgebiet Taschinasbach                               | 43 |
| 4.1.2        | 2 Einzugsgebiet Engstligen                                  | 46 |
| 4.1.3        | 3 Einzugsgebiet Dischma                                     | 48 |
| 4.1.4        | 4 Einzugsgebiet Laschadura                                  | 51 |
| 4.1.5        | 5 Fazit   | 54 |
| 4.2 I        | Höhenproben   | 55 |
| 4.2.1        | 1 Einzugsgebiet Taschinasbach                               | 55 |
| 4.2.2        | 2 Einzugsgebiet Engstligen                                  | 59 |
| 4.2.3        | 3 Einzugsgebiet Dischma                                     | 63 |

| 4.2.4               | Einzugsgebiet Laschadura                                       | 67  |
|---------------------|--|-----|
| 4.2.5               | Fazit  | 70  |
| 4.3 Be              | rechnung des mittleren δ <sup>2</sup> Η Wert der Schneeprofile | 71  |
| Multiple            | e Lineare Regression   | 73  |
| 4.3.1               | Übersicht  | 73  |
| 4.3.2               | Einzugsgebiet Taschinasbach                                    | 75  |
| 4.3.3               | Einzugsgebiet Engstligen                                       | 79  |
| 4.3.4               | Einzugsgebiet Dischma  | 82  |
| 4.3.5               | Einzugsgebiet Laschadura                                       | 87  |
| 4.3.6               | Regression für alle Einzugsgebiete                             | 90  |
| 4.3.7               | Fazit  | 93  |
| 5 Diskus            | ssion  | 95  |
| 5.1 Sc              | hneeprofile  | 95  |
| 5.1.1               | Fazit  | 99  |
| 5.2 Hà              | ihenproben   | 99  |
| 5.2.1               | Fazit  | 101 |
| 5.3 M               | ultiple Lineare Regression                                     | 101 |
| 5.3.1               | Fazit  | 105 |
| Fazit und           | Ausblick   | 107 |
| Literaturv          | perzeichnis  | 109 |
| Anhang A            | 1  | 114 |
| Tabella             | rische Übersicht der Höhenproben und Schneeprofile             | 114 |
| Anhang B            | 8  | 125 |
| δ <sup>18</sup> Ο W | erte in den Schneeprofilen                                     | 125 |
| δ <sup>18</sup> Ο W | erte der Höhenproben   | 127 |
| Anhang C            |  | 133 |
| Abkürz              | ungsverzeichnis  | 133 |
| Symboly             | verzeichnis  | 135 |

# Verzeichnis der Abbildungen im Text

| Abbildung 1-1: a) $\delta^2$ H-Werte von aufeinander folgenden Schneefällen am Zugspitzblatt. b) $\delta^2$ | <sup>2</sup> H- |
|---|-----------------|
| Werte aus einem am 2. Januar beprobten Schneeprofil. Aus MOSER & STICHLER (1974).                           | 4               |
| Abbildung 1-2: Zeitlicher Verlauf des $\delta^2$ H-Gehaltes in einem Schneeprofil am Zugspitzblatt          |                 |
| während der Ablationsperiode. Aus Moser und Stichler 1974.  | 5               |
| Abbildung 2-1: Darstellung der internationalen Standards und der am Institut für Hydrologie in              | n               |
| Freiburg verwendeten Laborstandards. Die Werte entstammen den Publikationen von                             |                 |
| MOOK (2000) und KÖNIGER (2006).   | 13              |
| Abbildung 2-2: Boxplot der langjährigen Monatsmittelwerte (Juli 1992 - Dezember 2009) der                   |                 |
| <sup>18</sup> O-Gehalte im Niederschlag. Daten aus zwei Stationen des Schweizer Isotopenmessnetz            | zes             |
| (NISOT).  | 20              |
| Abbildung 3-1: Lage der untersuchten Einzugsgebiete   | 24              |
| Abbildung 3-2: Einzugsgebiet Taschinasbach  | 25              |
| Abbildung 3-3: Einzugsgebiet Engstligen   | 26              |
| Abbildung 3-4: Einzugsgebiete Dischma und Sertig  | 28              |
| Abbildung 3-5: Einzugsgebiet Laschadura   | 29              |
| Abbildung 3-6: Alusonde   | 30              |
| Abbildung 3-7: Entnahme der Schneeproben  | 31              |
| Abbildung 3-8: Schneeprofile  | 32              |
| Abbildung 3-9: Local Meteoric Water Line für das Taschinasbach-Einzugsgebiet                                | 42              |
| Abbildung 4-1: 8 <sup>2</sup> H Werte in den Schneeprofilen des Taschinasbach-Einzugsgebietes.              | 44              |
| Abbildung 4-2: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des                        |                 |
| Taschinasbach-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.  | 45              |
| Abbildung 4-3: $\delta^2$ H Werte in den Schneeprofilen des Engstligen-Einzugsgebietes.                     | 46              |
| Abbildung 4-4: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen des Engstligen-                        |                 |
| Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.  | 47              |
| Abbildung 4-5: 8 <sup>2</sup> H Werte in den Schneeprofilen des Dischma-Einzugsgebietes.                    | 49              |

| Abbildung 4-6: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des             |     |
|--|-----|
| Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.                                  | 50  |
| Abbildung 4-7: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Südhang des              |     |
| Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.                                  | 51  |
| Abbildung 4-8: <sup>2</sup> H Werte in den Schneeprofilen des Laschadura-Einzugsgebietes.        | 52  |
| Abbildung 4-9: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des             |     |
| Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.                                  | 53  |
| Abbildung 4-10: Vergleich der Isotopengehalte, aus dem Schneeprofil im Südhang des               |     |
| Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.                                  | 54  |
| Abbildung 4-11: Darstellung der $\delta^2$ H Werte der Schneedecke im Nordhang des Taschinasbach | h-  |
| Einzugsgebietes.   | 56  |
| Abbildung 4-12: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des                    |     |
| Taschinasbach-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.                               | 57  |
| Abbildung 4-13: Darstellung der $\delta^2$ H Werte der Schneedecke im Südhang des Taschinasbach  | 1-  |
| Einzugsgebietes.   | 58  |
| Abbildung 4-14: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Südhang des Taschinasbad        | ch- |
| Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.   | 59  |
| Abbildung 4-15: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke im höheren Nordhang des        |     |
| Engstligen-Einzugsgebietes.  | 60  |
| Abbildung 4-16: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Engstligen-        |     |
| Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.   | 61  |
| Abbildung 4-17: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke der ersten Begehungen im       |     |
| Engstligen-Einzugsgebietes.  | 62  |
| Abbildung 4-18: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben der ersten Begehungen im           |     |
| Engstligen-Einzugsgebiet, mit der Global Meteoric Water Line.                                    | 63  |
| Abbildung 4-19: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke im Nordhang des Dischma-       |     |
| Einzugsgebietes.   | 64  |
| Abbildung 4-20: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Dischma-           |     |
| Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.   | 65  |
| Abbildung 4-21: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke im Südhang des Dischma-        |     |
| Einzugsgebietes.   | 66  |
| Abbildung 4-22: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Südhang des Dischma-            |     |
| Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.   | 67  |

| Abbildung 4-23: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke im Nordhang des Laschadura-   |         |
|---|---------|
| Einzugsgebietes.  | 68      |
| Abbildung 4-24: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Laschadura-<br>Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line. | 69      |
| Abbildung 4-25: Darstellung der $\delta$ 2H Werte der Schneedecke im Südhang des Laschadura-<br>Einzugsgebietes.                                  | 70      |
| Abbildung 4-26: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess im Taschinasbach-Einzugsgebiet.                                   | 76      |
| Abbildung 4-27: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für beide Begehungen im Taschinasbach-Einzugsgebiet.                 | 78      |
| Abbildung 4-28: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die erste Begehung im Engstligen-Einzugsgebiet.               | 80      |
| Abbildung 4-29: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle<br>Begehungen im Engstligen-Einzugsgebiet.                  | 81      |
| Abbildung 4-30: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für die erst<br>Begehung im Dischma-Einzugsgebiet.                   | e<br>84 |
| Abbildung 4-31: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Dischma-Einzugsgebiet.                        | 86      |
| Abbildung 4-32: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die erste Begehung im Laschadura-Einzugsgebiet.               | 87      |
| Abbildung 4-33: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Laschadura-Einzugsgebiet.                     | 89      |
| Abbildung 4-34: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die ersten Begehungen in allen Einzugsgebieten.               | 90      |
| Abbildung 4-35: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen in den verschiedenen Einzugsgebieten.            | 92      |
| Abbildung 5-1: Boxplot der entnommen Proben in den einzelnen Einzugsgebieten  | 104     |

## Tabellenverzeichnis

| Tabelle 2-1: Charakteristik der Isotope von Wasserstoff und Sauerstoff (DINGMAN, 2002)            | 11    |
|---|-------|
| Tabelle 2-2: Physikalische Eigenschaften von zwei isotopisch unterschiedlichen                    |       |
| Wassermolekülen (HÖLTING, 1996).  | 14    |
| Tabelle 3-1: Übersicht der Schneeprofile  | 33    |
| Tabelle 4-1: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung des mittleren $\delta^2 H$ Wert in den    |       |
| Schneeprofilen.   | 72    |
| Tabelle 4-2: Bestimmtheitsmaß $R^2$ zwischen den einzelnen Parametern und $\delta^2 H$            | 73    |
| Tabelle 4-3: Bestimmtheitsmaß $R^2$ zwischen den einzelnen Parametern und $\delta^{18}O$          | 74    |
| Tabelle 4-4: Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> zwischen den einzelnen Parametern und Deuterium-Exce | ss 75 |
| Tabelle A 1: Übersicht der entnommenen Höhenproben und der dazugehörigen Parameter                | 114   |
| Tabelle A 2: Übersicht der entnommenen Schneeprofile und Eigenschaften der einzelnen              |       |
| Schneeschichten   | 120   |

# Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

| Abbildung A-B 1: $\delta^{18}$ O Werte in den Schneeprofilen des Taschinasbach-Einzugsgebietes.          | 125        |
|--|------------|
| Abbildung A-B 2: $\delta^{18}$ O Werte in den Schneeprofilen des Engstligen-Einzugsgebietes.             | 126        |
| Abbildung A-B 3: $\delta^{18}$ O Werte in den Schneeprofilen des Dischma-Einzugsgebietes.                | 126        |
| Abbildung A-B 4: $\delta^{18}$ O Werte in den Schneeprofilen des Laschadura-Einzugsgebietes.             | 127        |
| Abbildung A-B 5: Darstellung der $\delta$ <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Nordhang des          |            |
| Taschinasbach-Einzugsgebietes.   | 127        |
| Abbildung A-B 6: Darstellung der 8 <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Südhang des Taschinasba      | ch-        |
| Einzugsgebietes.   | 128        |
| Abbildung A-B 7: Darstellung der 8 <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Nordhang des Engstligen-     | -          |
| Einzugsgebietes.   | 128        |
| Abbildung A-B 8: Darstellung der $\delta^{18}$ O Werte der Schneedecke der ersten Begehungen im          |            |
| Engstligen-Einzugsgebietes.  | 129        |
| Abbildung A-B 9: Darstellung der $\delta$ <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Nordhang des Dischma- |            |
| Einzugsgebietes.   | 129        |
| Abbildung A-B 10: Darstellung der 8 <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Südhang des Dischma-        |            |
| Einzugsgebietes.   | 130        |
| Abbildung A-B 11: Darstellung der 8 <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Nordhang des Laschadur      | ra-        |
| Einzugsgebietes.   | 130        |
| Abbildung A-B 12: Darstellung der 8 <sup>18</sup> O Werte der Schneedecke im Südhang des Laschadura      | <b>ì</b> - |
| Einzugsgebietes.   | 131        |

### Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Modellierung des mittleren Isotopengehaltes der Schneedecke an einem Punkt und die Quantifizierung der Fraktionierungsprozesse während der Ablationsperiode. Zudem sollte die Höhenabhängigkeit des mittleren Isotopengehaltes in der Schneedecke überprüft werden. Dazu wurden am Ende der Akkumulationsperiode, im April 2010 und ein zweites Mal einen Monat später, in vier Schweizer Einzugsgebieten Proben der gesamten Schneedecke entnommen. Die Probenentnahme erfolgte, in jeweils einem Süd- und einem Nordhang mit ca. 1000 m vertikaler Differenz, in einem Abstand von 100 Höhenmetern. Zusätzlich wurde in jedem Hang ein Schneeprofil gegraben und der Isotopengehalt der einzelnen Schichten bestimmt. Anschließend wurden über verschiedene Parameter, mit einer schrittweise durchgeführten Multiplen Linearen Regression, die Isotopengehalte der erhobenen Proben modelliert.

Durch die entnommenen Proben zeigte sich, dass ein Höheneffekt für den mittleren Isotopengehalt der Schneedecke nur bedingt vorhanden ist. Dies liegt an der hohen Variabilität des Isotopengehaltes in den winterlichen Niederschlägen, sowie an den vor allem in den Südhängen deutlich werdenden Anreicherungsprozessen durch Sublimation und Verdunstung. Diese Anreicherung an schweren Isotopen konnte auch durch die zeitliche Differenz der Probenentnahmen belegt werden. Der in einigen Nordhängen ermittelte Höhengradient, führte in der Multiplen Linearen Regression durch gegenläufige Gradienten in den Südhängen zu einem geringen Einfluss der Höhe. Dagegen stellte sich die Schneetiefe in Abhängigkeit von der Höhe als signifikanter Parameter heraus. Des Weiteren wurde über die erhobenen Schneeprofile die Anreicherung, durch Sublimation und Verdunstung, in den oberen Schichten veranschaulicht und die Homogenisierung des Isotopengehaltes während der Ablationsperiode durch perkolierendes Schmelzwasser verdeutlicht.

**Schlüsselwörter:** δ<sup>2</sup>H, δ<sup>18</sup>O, Deuterium-Excess, Höheneffekt, Schneeprofile, Multiple Lineare Regression, Sublimation, Verdunstung, Ablationsperiode

### Summary

The goal of this study was the modeling of the mean isotopic composition of the snow cover at specific geographic locations and altitudes and the quantification of the processes which lead to fractionations during the ablation period. In addition the dependence of the mean isotopic composition of the snow cover on the altitude was analyzed. For this purpose samples of the snow cover in four Swiss watersheds were taken at the end of the accumulation period in April 2010 and a second time in Mai 2010. The sampling was conducted at both a southern slope and a northern slope at steps of 100 meters in altitude for a total vertical distance of approx. 1000 meters in altitude. At every slope a snowpit was dug in order to determine the isotopic composition of each snow layer. The isotopic composition of the snow cover was modeled over several different parameters by carrying out a stepwise multiple linear regression.

The measurements of the samples indicated that there is only a limited altitude effect on the isotopic composition of the snow cover. This is due to the high variability of the isotopic composition of the precipitation during the winter months and, in particular in the case of southern slopes, the enrichment in heavy isotopes during sublimation and evaporation. This enrichment in heavy isotopes could clearly be observed in the samples which were taken later in the year. The altitudinal gradient, which could be observed at some northern slopes, led in the multiple linear regression analysis only to a small influence of the altitude on the isotopic composition because of the opposite altitudinal gradient at the southern slopes. Instead the dependence of the snow depth on the altitude was a significant parameter. The analysis of the isotopic composition of the different layers of the snowpits showed enrichment in heavy isotopes in the upper layers and a smoothing during the ablation period, which was attributed to percolation of the melting water.

**Keywords:**  $\delta^{2}$ H,  $\delta^{18}$ O, deuterium excess, altitude effect, multiple linear regression, snowpits, sublimation, evaporation, ablation period

### 1 Einleitung

Diese Arbeit ist eingegliedert in das Projekt "DROUGHT-CH", in dem ausgewählte Einzugsgebiete in der Schweiz hydrologisch analysiert werden. Das Projekt mit dem englischen Titel "Early recognition of critical drought and low-flow conditions in Switzerland - coping with shortages in soil moisture, groundwater and runoff ", dient der frühzeitigen Erkennung von Trockenperioden und Niedrigwasserbedingungen in der Schweiz (SENEVIRATNE, 2009). Das Projekt ist in mehrere Arbeitsgruppen aufgeteilt, die einzelne Themen genauer untersuchen. Die Arbeitsgruppe 3 (WP3) analysiert kritische Niedrigwasserbedingungen und Speichercharakteristiken in Schweizer Einzugsgebieten. Dazu werden ca. 20 mesoskalige Einzugsgebiete ausgesucht, die einen weiten Bereich der klimatischen, geologischen und geomorphologischen Verhältnisse der Schweiz abdecken. In diesen Einzugsgebieten wird, zur Abschätzung der Verweilzeit des Wassers und des Gesamtspeichervermögens, der Isotopengehalt von  $\delta^{18}$ O im Niederschlag, im Grundwasser und in den Oberflächengewässern gemessen (GUNDEL, 2010). Zur Bestimmung des Isotopengehaltes der Niederschläge werden dabei Daten des Schweizer Isotopen Messnetzes (NISOT) regionalisiert. Einige der ausgewählten Einzugsgebiete liegen in alpinen Regionen. Dadurch dominieren die winterliche Speicherung des Niederschlags und die Schneeschmelze im Frühjahr das jährliche Abflussregime (RODHE, 1998). In der vorliegenden Arbeit werden Prozesse erfasst, die den Isotopengehalt in der Schneedecke beeinflussen und eine Datengrundlage für die Interpretation des Isotopengehaltes im Schmelzwasser erhoben.

#### 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Modellierung des Schmelzwassereinflusses auf Grundwasser und Oberflächengewässer wird durch Isotopenfraktionierungen, während der Schneebildung, der Akkumulation, der Ablation und des Phasenwechsels bei der Schneeschmelze, erschwert (COOPER, 1998). Vor allem die Isotopenfraktionierungen während der Ablationsperiode sind dabei kaum verstanden (UNNIKRISHNA ET AL, 2002). Um diesen Einfluss zu quantifizieren werden in der vorliegenden Arbeit, am Ende der Akkumulationsperiode und einen Monat später, in vier der ausgewählten Einzugsgebiete Schneeproben entnommen und der Isotopengehalt von <sup>18</sup>O und <sup>2</sup>H bestimmt. Die ersten Probenentnahmen finden in allen Einzugsgebieten im April 2010 und die zweiten Probenentnahmen im Mai 2010 statt. In jedem Einzugsgebiet wird ein Nordhang und ein Südhang, vom Beginn der Schneedecke bis zur höchst möglich begehbaren Erhebung, alle 100 Höhenmeter beprobt. Dabei wird mit Hilfe einer Alusonde eine Probe über die gesamte Schneetiefe entnommen und der mittlere Isotopengehalt der Schneedecke erfasst. Zusätzlich wird in der Mitte jedes untersuchten Hanges ein Schneeprofil gegraben und Proben der einzelnen Schneeschichten entnommen.

Durch die Verteilung der untersuchten Einzugsgebiete in der Schweiz, soll die räumliche Variabilität der Isotopengehalte charakterisiert und durch die vertikale Differenz der Probenentnahmen von ca. 1000 Höhenmeter pro Einzugsgebiet, die Höhenabhängigkeit überprüft werden. Gleichzeitig wird mit der zweiten Probenentnahme, die einen Monat später stattfindet, die zeitliche Entwicklung der Isotopengehalte analysiert. Anhand dieser Daten werden multiple lineare Regressionsmodelle, sowohl auf Einzugsgebietsebene als auch für alle Einzugsgebiete zusammen, erstellt. Dabei wird über die Parameter Höhe ü. NN, Hangneigung, Hangexposition, Schneetiefe, Tag des Jahres. Waldbedeckung und Hangkonvexität, der mittlere Isotopengehalt der Schneedecke an einem bestimmten Punkt modelliert. Für die Modelle, die alle Einzugsgebiete mit einbeziehen, werden zusätzlich die Parameter Längen- und Breitengrad verwendet.

Die entnommenen Schneeprofile werden genutzt, um die stratigraphische Schichtung des Isotopengehaltes in der Schneedecke zu charakterisieren und die Fraktionierungsprozesse während der Schneeschmelze zu identifizieren. Zudem wird mit der Analyse der Schneeprofile überprüft, ob der gemessene mittlere Isotopengehalt der Schneedecke den nach der Mächtigkeit gemittelten Isotopengehalt der einzelnen Schichten widerspiegelt. Des Weiteren sollte ursprünglich untersucht werden, wie sich der, im Schweizer Isotopenmessnetz gemessene, Isotopengehalt der Niederschläge auf die Schneedecke übertragen lässt. Kurzfristig stellte sich jedoch heraus, dass die dafür notwendigen Daten erst ab Januar 2011 zur Verfügung stehen.

#### 1.2 Literaturrückblick und Stand der Forschung

Eine der ersten Arbeiten, die sich mit dem Isotopengehalt des Wassers beschäftigt, stammt von GILFILLAN (1934) und stellt fest, dass Süßwasser im Vergleich zu den Ozeanen an schweren Isotopen abgereichert ist. Weitere Veröffentlichungen folgen von EPSTEIN & MAYEDA (1953) über die gleichförmige Verteilung des Isotopengehaltes in den Ozeanen und von FRIEDMAN (1953) über das parallele Verhalten von <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O in den Ozeanen. DAANSGARD (1953, 1954) beschreibt die Abreicherung schwerer Isotope im Niederschlag mit abnehmender Kondensationstemperatur, zunehmendem Breitengrad und zunehmender Höhe. CRAIG ET AL (1956) erklären den kinetischen Effekt bei schneller Verdunstung über einer Wasseroberfläche und FRIEDMAN ET AL (1962) versuchen den Isotopenaustausch zwischen der flüssigen und der Gasphase des Wassers zu quantifizieren. Eine Zusammenführung dieser Veröffentlichungen lässt sich bei DAANSGARD (1964) finden. Daneben werden in dieser Arbeit die verschiedenen Fraktionierungsprozesse, die zu einer Änderung des Isotopengehaltes führen, beschrieben und die daraus resultierenden Isotopeneffekte, wie der Mengeneffekt, der Höheneffekt und der saisonale Effekt aufgezeigt.

#### 1.2.1 Schneeprofile

Aufbauend auf die Arbeit von DAANSGARD (1964) befassen sich DEUTSCH ET AL (1966) mit dem Isotopengehalt der Schneedecke auf alpinen Gletschern und weisen in nicht von Sommerregen beeinflussten Höhenlagen den saisonalen Effekt von  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O in Schneeprofilen nach. Die Variation des Isotopengehaltes in einem Schneeprofil während der winterlichen Akkumulationsperiode wird für  $\delta^2$ H erstmals von JUDY ET AL (1970) und für  $\delta^{18}$ O von AMBACH ET AL (1972) untersucht. Erstere kommen dabei zu dem Ergebnis, dass die große Variation des Isotopengehaltes der winterlichen Niederschläge während der Ablationsperiode, durch das Abschmelzen der Schneedecke und das Eindringen des Schmelzwassers, weitgehend homogenisiert wird. Dies wird in der Untersuchung von ARNASON ET AL (1972) bestätigt. AMBACH ET AL (1972) stellen nur eine geringe Änderung des  $\delta^{18}$ O-Gehaltes der einzelnen Schneeschichten während der Ablationsperiode fest und sind damit der gegenteiligen Meinung wie KROUSE & SMITH (1972), die den Einfluss des durch die Schneedecke perkolierenden Schmelzwassers auf den  $\delta^{18}$ O-Gehalt einzelner Schichten als markant beschreiben. MOSER & STICHLER

(1974) untersuchen ebenfalls die isotopische Entwicklung eines Schneeprofils in den Alpen und analysieren den Einfluss der Verdunstung auf die Schneedecke in einer Kühlkammer.



Abbildung 1-1: a) δ<sup>2</sup>H-Werte von aufeinander folgenden Schneefällen am Zugspitzblatt. b) δ<sup>2</sup>H-Werte aus einem am 2. Januar beprobten Schneeprofil. Aus MOSER & STICHLER (1974).

Zudem zeigen sie, wie in Abbildung 1-1 dargestellt, dass sich der Isotopengehalt einzelner Niederschlagsereignisse in der stratigraphischen Abfolge eines Schneeprofils nachvollziehen lässt.

Weiterhin kommen MOSER & STICHLER (1974) zu dem Ergebnis, dass sich die Isotope  ${}^{2}$ H und  ${}^{18}$ O in den oberen Schneeschichten eines Schneeprofils anreichern, während sich der Isotopengehalt der tieferen Schichten trotz der Perkolation von Schmelzwasser nur geringfügig verändert. In der Kühlkammer weisen sie die Anreicherung der Isotope durch Verdunstung und Sublimation einer Schneeschicht nach. Weiterhin führen sie Veränderungen im Isotopengehalt der oberen Schichten auf Verdunstung, Sublimation, nächtliche Kondensation und die Metamorphose der Schneekristalle bei der Schmelze zurück. MARTINEC ET AL (1977) untersuchen die zeitliche Entwicklung von  $\delta$   ${}^{2}$ H und  $\delta$   ${}^{18}$ O in einzelnen Schneeschichten und stellen eine Annäherung im Isotopengehalt der einzelnen Schichten durch den Austausch mit dem Schmelzwasser fest. Die

Anreicherung der schweren Isotope in den oberen Schichten durch Verdunstung weisen sie über die Abweichung des Deuterium-Excess von der "Global Meteoric Water Line" (GMWL) nach.



Abbildung 1-2: Zeitlicher Verlauf des δ<sup>2</sup>H-Gehaltes in einem Schneeprofil am Zugspitzblatt während der Ablationsperiode. Aus Moser und Stichler 1974.

Zusammenfassend lässt sich bis hierhin feststellen, dass in den oberen Schneeschichten einer temperierten Schneedecke eine Anreicherung der schweren Isotope stattfindet, die durch Verdunstung, Sublimation, Metamorphose der Schneekristalle und isotopisch angereicherten Niederschlag verursacht wird. Bei starker Schmelze oder hohen Niederschlägen kann isotopisch angereichertes Wasser in die Schneedecke infiltrieren und führt dabei zu einer Homogenisierung der Schichtung des Isotopengehaltes, sowie zu einer Erhöhung der mittleren  $\delta$ <sup>2</sup>H und  $\delta$ <sup>18</sup>O-Werte der gesamten Schneedecke (MOSER & RAUERT, 1980). Die Schichtung des Isotopengehaltes bleibt dabei jedoch weitgehend erhalten, wie in Abbildung 1-2 zu erkennen ist.

Jüngere Untersuchungen von RABEN & THEAKSTONE (1994) in Norwegen und von AIZEN ET AL (1996) im Himalaya kommen ebenfalls zu den oben beschriebenen Ergebnissen in alpinen Regionen. STICHLER ET AL (2001) befassen sich auf einem hochgelegenen Andengletscher mit dem Einfluss der Sublimation auf die obersten Schichten eines Schneeprofils. Sie finden heraus, dass durch Sublimation 2 bis 4 mm "Snow-Water-Equivalent" (SWE) täglich abschmelzen und durch die nächtliche Kondensation des Wasserdampfes in den Firnporen die isotopisch angereicherte Oberfläche in tiefere Schichten eindringen kann. Dies steht im Gegensatz zu der von MOSER & STICHLER (1974) gefundenen isotopischen Abreicherung durch die nächtliche Kondensation. TAYLOR ET AL (2001) quantifizieren den Austausch des perkolierenden Schmelzwassers mit der Schneedecke und weisen nach, dass mit zunehmender Schmelze das Schmelzwasser isotopisch angereichert ist. Dies gilt sowohl für die Zunahme der Schneeschmelze im Frühjahr als auch für die Zunahme der Schmelze im Tagesverlauf. Sie führen dies auf die von O'NEIL (1968) beschriebene Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Wasser und Eis zurück, die zu einer Abreicherung der <sup>18</sup>O-Isotope von ca. 3 ‰ und einer Abreicherung der <sup>2</sup>H-Isotope von ca. 16 ‰ in der flüssigen Phase führt. Bei hohen Sickerraten findet keine Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Wasser und Eis statt und das Sickerwasser, das aus den oberen Schichten stammt, bleibt isotopisch angereichert. Diese Annahme wird von UNNIKRISHNA ET AL (2002) bestätigt und mit dem Erreichen der 0° Grad-Isotherme in Zusammenhang gesetzt. So ist das Schmelzwasser bis zum Erreichen der Isothermie an stabilen Isotopen abgereichert. Anschließend dringt das isotopisch angereicherte Sickerwasser aus den oberen Schichten durch Piston-Flow-Prozesse schneller in die gesamte Schneedecke ein. SINCLAIR & MARSHALL (2008) untersuchen den Einfluss der Diffusion des Wasserdampfes auf die Schichtenabfolge des Isotopengehaltes und können in den unteren Schichten keine Veränderung feststellen. Auch in den oberen Schichten ist die Beeinflussung des Isotopengehaltes geringer als durch das angewandte Modell angenommen.

Insgesamt kann man feststellen, dass die stratigraphische Schichtung des Isotopengehaltes in der Schneedecke bis zum Erreichen der Isothermie weitgehend erhalten bleibt und sich die Variabilität des Isotopengehaltes der Winterniederschläge im Schneeprofil widerspiegelt. Eine Anreicherung schwerer Isotope in den jeweils oberen Schichten findet dabei durch Verdunstung und Sublimation, die sich nur schwer abgrenzen lassen (MOSER & RAUERT, 1980), sowie durch nächtliche Kondensation statt. Des Weiteren kommt es durch Diffusion des Wasserdampfes zu einer geringfügigen isotopischen Annäherung zwischen den einzelnen Schichten. Ab dem Zeitpunkt der Isothermie wird die Homogenisierung des Isotopenprofils durch schnelle Sickerraten und im Frühjahr häufiger auftretende Rain-on-Snow-Ereignisse beschleunigt (UNNIKRISHNA ET AL, 2002).

#### 1.2.2 Höheneffekt im Schnee

Der Höheneffekt des Niederschlags wird im Schnee erstmals von AMBACH ET AL (1967) untersucht. Da bis dahin angenommen wurde, dass der Höheneffekt im Niederschlag nur durch die Verdunstung von fallenden Tropfen entsteht und somit im Schnee nicht vorhanden ist, wird in der Arbeit von AMBACH ET AL (1967) der festgestellte Höhengradient in den Neuschneeproben mit Winddrift und höheren Verdunstungsraten in tiefer gelegenen Regionen erklärt. In MOSER & STICHLER (1970, 1971) wird aufgezeigt, dass der Höheneffekt des Niederschlags durch die orographische Hebung von Luftmassen und der damit verbundenen Abnahme der Kondensationstemperatur zu einer Abreicherung der schweren Isotope mit der Höhe führt. Somit sollte dieser Effekt auch im Neuschnee zu erkennen sein. MOSER & STICHLER (1970) untersuchen den Höheneffekt für  $\delta^2$ H in Neuschneeproben in den West- und Ostalpen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass der durchschnittliche Höhengradient bei ca. -3 ‰ pro 100 Höhenmeter liegt, mit Schwankungen zwischen -2 ‰ bis -10 ‰ pro 100 Höhenmeter. Andere Autoren wie RENAUD (1960) in Grönland, GONFIANTINI (1970) am Kilimandscharo oder FRIEDMAN & SMITH (1970) in der Sierra Nevada stellen im Neuschnee ebenfalls eine Abreicherung von  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O mit der Höhe fest. Für  $\delta^{18}$ O liegt die festgestellte Abreicherung dabei zwischen -0,25 ‰ bis -1,25 ‰ pro 100 Höhenmeter.

Eine umfassende Arbeit über den Höhengradienten des <sup>18</sup>O-Isotops in weltweit verteilten Gebirgen liefern NIEWODNICZANSKI ET AL (1981). In den südamerikanischen Anden, dem zentralasiatischen Hindu Kush und Himalaya, sowie auf dem Mount Kenya und dem Kilimandscharo in Afrika nehmen sie Schneeproben 5 bis 10 cm unterhalb der Schneeoberfläche. Dabei finden sie einen Höhengradienten zwischen -0,6 ‰ und -1,0 ‰ pro 100 Höhenmeter. Allerdings unterliegen die entnommenen Proben einer weiten Streuung mit kleinräumig inversen Gradienten und sind somit nur bedingt einem linearen Höhengradienten zuzuordnen. Die Streuung der entnommenen Proben führen NIEWODNICZANSKI ET AL (1981) auf die Bedingungen bei und nach der Ablagerung des Schnees, wie z.B. Winddrift und Fraktionierung durch Schmelzprozesse, sowie auf die Topographie und die klimatischen Verhältnisse der beprobten Gebiete zurück. MORAN ET AL (2007) sammeln in den kanadischen Rocky Mountains während zwei Akkumulationsperioden Neuschneeproben und untersuchen den  $\delta$  <sup>18</sup>O-Isotopengehalt. Bei ihnen reicht der ermittelte Höhengradient von -0,3 ‰ bis zu +1,8 ‰ pro 100 Höhenmeter und die erhobenen Daten unterliegen einer weiten Streuung. Die differierenden Höhengradienten bringen sie mit den verschiedenen Anströmrichtungen der einzelnen Wetterlagen in Verbindung.

Im Gegensatz zum Höhengradient in Neuschneeproben ist das Verhalten des Isotopengehaltes der gesamten Schneedecke sehr komplex (MOSER & STICHLER, 1974). Dieselben Prozesse, die auch zu den in den Schneeprofilen beschriebenen Änderungen des Isotopengehaltes führen, können den Höheneffekt der Neuschneeproben überlagern und zu inversen Gradienten führen, wie von MOSER & STICHLER (1970) am Kitzsteinhorn beobachtet. RABEN & THEAKSTONE (1991), die in Norwegen den mittleren Isotopengehalt der Schneedecke untersuchen, stellen fest, dass sich kein Höhengradient ermitteln lässt. MAST ET AL (1995) entnehmen Schneeproben der gesamten Schneedecke, in einem alpinen Einzugsgebiet in den Rocky Mountains in den USA, und finden heraus, dass sich der  $\delta$  <sup>18</sup>O Wert weder mit der Höhe, noch mit der Schneetiefe oder dem Schneewasseräquivalent in Bezug bringen lässt. Die Untersuchung von GURNEY & LAWRENCE (2004) in Norwegen, mit einer vertikalen Differenz von 230 m, stellt ebenso wie die Untersuchung von KÖNIGER ET AL (2008) in den USA, mit einer vertikalen Differenz von ca. 300 m, keinerlei Zusammenhang zwischen dem mittleren Isotopengehalt der Schneedecke und er Höhe fest.

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass ein Höhengradient des Isotopengehaltes im Neuschnee nur bedingt vorhanden ist. Ein nicht vorhandener Höhengradient lässt sich zum Einen dadurch erklären, dass die Luftmassen in denen der Schnee gebildet wird keiner kleinräumigen orographischen Hebung unterliegen und zum Anderen ist der Ursprung der Großwetterlage entscheidend für den durchschnittlichen Isotopengehalt, wie auch für den Verlauf des Gradienten (MORAN ET AL, 2007). Für den Isotopengehalt der gesamten Schneedecke ist die Herkunft der verschiedenen Großwetterlagen ebenfalls entscheidend, da die Schichtung des Isotopengehaltes stratigraphisch erhalten bleibt. Des Weiteren sind die Verhältnisse während der Ablagerung des Schnees, sowie die atmosphärischen Einflüsse nach der Ablagerung, die wiederum stark von der Topographie des beprobten Gebietes abhängen, entscheidende Faktoren, die den Isotopengehalt beeinflussen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Isotopengehalt der gesamten Schneedecke und der Höhe, ließ sich in keiner der vorgestellten Untersuchungen finden.

### 2 Isotope

#### 2.1 Isotope des Wassers

Das Wassermolekül H2O setzt sich aus den Atomen Wasserstoff H und Sauerstoff O zusammen. Diese Atome kommen als verschiedene Isotope vor, dass heißt sie besitzen aufgrund unterschiedlicher Neutronenanzahl im Kern differierende Atommassen. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs, sowie ihre natürliche Häufigkeit und die relative Molekülmasse dargestellt. Aus dieser Tabelle wird ersichtlich, dass es drei verschiedene Wasserstoffisotope und drei verschiedene Sauerstoffisotope gibt. Das natürlicherweise am häufigsten vorkommende Wasserstoffisotop ist Protium. Dieses ist ebenso wie das Deuteriumisotop stabil. Das dritte Wasserstoffisotop Tritium ist radioaktiv mit einer Halbwertzeit von 12,5 Jahren. Die drei Isotope des Sauerstoffs sind stabil und werden anhand ihrer Neutronenanzahl mit <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O und <sup>18</sup>O bezeichnet.

| Isotop                     | Natürliche Häufigkeit [%] | Relative Molekülmasse | Stabilität |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------|
| <sup>1</sup> H (Protium)   | 99.985                    | 1.008                 | stabil     |
| <sup>2</sup> H (Deuterium) | 0.015                     | 2.014                 | stabil     |
| <sup>3</sup> H (Tritium)   | < 0.01                    | 3.016                 | radioaktiv |
| <sup>16</sup> O            | 99.76                     | 15.995                | stabil     |
| <sup>17</sup> O            | 0.04                      | 16.999                | stabil     |
| <sup>18</sup> O            | 0.20                      | 17.999                | stabil     |

Tabelle 2-1: Charakteristik der Isotope von Wasserstoff und Sauerstoff (DINGMAN, 2002)

#### 2.2 Standard und *δ*-Notation

Für den Einsatz der Isotope im hydrologischen Kreislauf ist nicht die absolute Häufigkeit entscheidend, viel mehr wird das Verhältnis von <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O zu den natürlich am häufigsten vorkommenden Isotopen <sup>1</sup>H und <sup>16</sup>O gemessen, dass sich durch folgende Formel berechnen lässt:

$$R = \frac{N_i}{N}$$
Gl. 2-1

Dabei ist *R* das Verhältnis (ratio),  $N_i$  das seltenere Isotop und *N* das am häufigsten vorkommende Isotop. Um für dieses Verhältnis den Bezug zu einer festen Größe festzulegen, wurde von der "International Atomic Energy Agency" (IAEA) ein internationaler Standard "Vienna Standard Mean Ocean Water" (V-SMOW) eingeführt (CLARK & FRITZ, 1997; MOOK, 2001). Dieser Standard entspricht den folgenden Verhältnissen und näherungsweise dem von CRAIG (1961) festgestellten durchschnittlichen Isotopengehalt der Ozeane:

$$R\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O} = \left(\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O}\right)_{V-SMOW} = (2005.2 \pm 0.45) * 10^{-6}$$
Gl. 2-2

(BAERTSCHI, 1976)

$$R\frac{{}^{2}H}{{}^{1}H} = \left(\frac{{}^{2}H}{{}^{1}H}\right)_{V-SMOW} = (155.95 \pm 0.08)$$
Gl. 2-3

(DE WIT ET AL, 1980)

Für die Messung isotopisch stark abgereicherten Wassers wurden zwei zusätzliche Standards, der "Standard Light Antarctic Precipitation" (SLAP) und der "Greenland Ice Sheet Precipitation" (GISP), festgelegt (GONFIANTINI, 1978). Des Weiteren werden von der IAEA verschiedene Laborstandards ausgegeben, um Messungen in den Zwischenbereichen genau kalibrieren zu können. In Abbildung 2-1 sind die oben erwähnten internationalen Standards, sowie die am Institut für Hydrologie verwendeten Laborstandards im  $\delta$  <sup>2</sup>H -  $\delta$  <sup>18</sup>O Diagramm dargestellt. Zusätzlich ist die "Global Meteoric Water Line" (GMWL) abgebildet, die den globalen Mittelwert im Verhältnis zwischen  $\delta$  <sup>2</sup>H und  $\delta$  <sup>18</sup>O beschreibt.



Abbildung 2-1: Darstellung der internationalen Standards und der am Institut für Hydrologie in Freiburg verwendeten Laborstandards. Die Werte entstammen den Publikationen von MOOK (2000) und KÖNIGER (2006).

Die Werte für <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O sind in Abbildung 2-1 als Abweichung  $\delta$  [‰] von V-SMOW angegeben, der als Ausgangswert 0 festgelegt ist. Die Berechnung von  $\delta$  erfolgt durch folgende Formel:

$$\delta = \frac{R_{\Pr obe} - R_{S \tan dard}}{R_{S \tan dard}}$$
Gl. 2-4

Da das Wasser der Ozeane an schweren Isotopen angereichert ist, enthält das meiste Süßwasser der Erde weniger schwere Isotope und somit einen negativen  $\delta$ -Wert.

#### 2.3 Isotopenfraktionierung

Das natürliche Verhältnis der Isotope <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O zu den am häufigsten vorkommenden Isotopen <sup>1</sup>H und <sup>16</sup>O kann sich im hydrologischen Kreislauf durch Fraktionierungsprozesse verändern. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich <sup>2</sup>H und <sup>18</sup>O aufgrund einer höheren Atommasse in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften von den leichteren Isotopen unterscheiden (MOSER & RAUERT, 1980). Eine Übersicht der physikalischen Unterschiede für zwei isotopisch verschiedene Wassermoleküle ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Physikalische Eigenschaften von zwei isotopisch unterschiedlichen Wassermolekülen (HÖLTING, 1996).

| Physikalische Eigenschaft     | <sup>1</sup> H <sub>2</sub> <sup>16</sup> O | <sup>2</sup> H <sub>2</sub> <sup>16</sup> O |
|-------------------------------|---|---|
| Relative Molekülmasse         | 18.011                                      | 20.023                                      |
| Maximale Dichte [g/ml]        | 1.000                                       | 1.106                                       |
| Dichtemaximum bei [°C]        | 3.98  | 11.23                                       |
| Viskosität (bei 25°C) [mPa/s] | 0.893                                       | 1.101                                       |
| Schmelzpunkt [°C]             | 0.000                                       | 3.813                                       |
| Siedepunkt [°C]               | 100.00                                      | 101.42                                      |

Isotopenfraktionierung tritt bei jeglichen Phasenübergängen auf, an denen verschiedene Isotopenspezies beteiligt sind. Daraus resultiert, dass eine Seite einer solchen Reaktion immer ein anderes Isotopenverhältnis aufweist, als die andere Seite. In der Isotopenhydrologie wird der Unterschied des Verhältnisses von Produkt und Edukt durch den Fraktionierungsfaktor  $\alpha$  ausgedrückt, der mit folgender Formel beschrieben wird (CLARK & FRITZ, 1997):

$$\alpha = \frac{R_{Edukt}}{R_{\Pr odukt}}$$
Gl. 2-5

Die Isotopenfraktionierung bei Phasenübergängen kann in verschiedene Formen unterteilt werden. Isotopenfraktionierung gibt es unter Gleichgewichtsbedingungen und unter kinetischen Bedingungen. Teilprozesse der kinetischen Fraktionierung sind die molekulare Diffusion und die Rayleigh-Fraktionierung. Diese Fraktionierungsprozesse werden in den folgenden Unterkapiteln nach CLARK & FRITZ (1997) einzeln erklärt. Die diffusive Fraktionierung und die Rayleigh-Fraktionierung werden nach LEIBUNDGUT ET AL (2009) beschrieben.

#### 2.3.1 Isotopenfraktionierung unter Gleichgewichtsbedingungen

Grundlage der Isotopenfraktionierung ist, dass die verschiedenen Isotope eines Elements unterschiedlich starke Bindung aufweisen. Dabei sind die Bindungen der schweren Isotope prinzipiell stärker und benötigen deswegen mehr Energie, um gelöst zu werden. Um diesen Effekt unter thermodynamischem Gleichgewicht zu beschreiben, werden hier zuerst die Voraussetzungen aufgelistet unter denen Gleichgewichtsbedingungen vorliegen.

- Ein Gleichgewicht existiert, wenn die Geschwindigkeit einer Reaktion in beide Richtungen gleich schnell verläuft.
- Die Reaktionen verlaufen in beiden Richtungen so, dass die Isotope genügend Zeit haben sich im Reservoir des Edukts und des Produkts zu durchmischen.
- Sowohl das Reservoir des Edukts wie auch das Reservoir des Produkts der Reaktion müssen gut durchmischt sein.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, werden in der thermodynamischen Reaktion kontinuierlich Bindungen gelöst und wieder neu gebildet. Dabei reichern sich die schweren Isotope, durch ihre stärkere Bindung in der energieärmeren Phase an. Im Phasenübergang z. B. von Wasser zu Wasserdampf führt die Gleichgewichtsfraktionierung bei 100°C zu einer Anreicherung von  $\delta^{18}$ O im Wasser um 5 ‰ und von  $\delta^{2}$ H um 27 ‰ gegenüber dem Wasserdampf.

#### 2.3.2 Kinetische Isotopenfraktionierung

Bei einem plötzlichen Temperaturwechsel oder bei Entfernung oder Zugabe eines der Reaktionspartner wird das thermodynamische Gleichgewicht einer Reaktion verändert und führt zur Beschleunigung einer Reaktionsrichtung. In so einem Fall wird von einer kinetischen Reaktion gesprochen. Dabei kann die Fraktionierung der Isotope durch den kinetischen Effekt verstärkt oder vermindert werden. Die meisten dieser kinetischen Effekte sind reversibel. Eine irreversible Fraktionierung findet fast nur durch biologische Prozesse z.B. durch Bakterien oder Enzyme statt.

Natürliche Systeme sind offene Systeme, in denen durch Transportvorgänge ein ständiger Reservoiraustausch stattfindet. Dadurch unterliegen fast alle natürlichen

Fraktionierungsvorgänge kinetischen Effekten und sind somit nicht mit einer Gleichgewichtsreaktion zu beschreiben. Im hydrologischen Kreislauf ist der kinetische Effekt der Isotopenfraktionierung auf sich stetig verändernde Temperaturen, Windgeschwindigkeiten und Salz- bzw. Feuchtegehalte zurückzuführen.

#### 2.3.3 Diffusive Isotopenfraktionierung

Eine Form der kinetischen Isotopenfraktionierung tritt bei der Diffusion von Atomen oder Molekülen entlang eines Konzentrationsgradienten auf. Im hydrologischen Kreislauf ist dies z.B. bei der Verdunstung der Fall, wenn Wasserdampf in die Luft diffundiert. Hierbei nimmt die Fraktionierung mit steigender Differenz in der Diffusionsgeschwindigkeit der einzelnen Moleküle zu. Die Diffusionsgeschwindigkeit v ist dabei abhängig von der Temperatur und der Masse der Moleküle bzw. der einzelnen Isotope und errechnet sich nach folgender Formel:

$$v = \sqrt{\frac{k*T}{(2*\pi*m)}} \qquad \left[\frac{m}{s}\right] \qquad Gl. 2-6$$

Die Formel setzt sich aus der Boltzmann-Konstanten  $k = 1,3806504*10^{-24}$  [J/K], der absoluten Temperatur *T* [K] und der relativen Molekülmasse *m* [kg] zusammen. Aus dieser Gleichung kann die Diffusion zweier Moleküle mit unterschiedlichen Massen im Vakuum berechnet werden. Von der molekularen Geschwindigkeit dieser Moleküle kann dann abgeleitet werden, dass die Diffusionsrate für ein ideales Gas im Vakuum invers proportional zur Wurzel der Masse der Moleküle ist. Nachdem die anderen Konstanten und die Temperatur gekürzt werden, ergibt sich folgende Gleichung:

$$\alpha_{Diffusion(A-B)} = \sqrt{\frac{m_B}{m_A}}$$
Gl. 2-7

 $M_B$  und  $M_A$  sind die relativen Molekülmassen der unterschiedlichen Moleküle. Um diese Gleichung auf trockene Luft anzuwenden, muss die molare Masse der trockenen Luft miteinbezogen werden und es ergibt sich folgende Gleichung:
$$\alpha_{Diffusion-Luft(A-B)} = \sqrt{\frac{m_B * (m_A + 28,8)}{m_A * (m_B + 28,8)}}$$
Gl. 2-8

Dabei ist 28,8 die durchschnittliche, relative Molekülmasse der trockenen Luft (79% N<sub>2</sub> und 21% O<sub>2</sub>). Die sich daraus ergebenden Fraktionierungsfaktoren können abgeleitet und transformiert werden, um die Isotopendifferenz aus der Gleichung für den Anreicherungsfaktor  $\varepsilon$  zu berechnen. Dadurch ergibt sich für den kinetischen Effekt bei der Diffusion ein Unterschied von 32,3 ‰ für das Verhältnis von  ${}^{1}\text{H}_{2}{}^{18}\text{O} / {}^{1}\text{H}_{2}{}^{16}\text{O}$  und von 16,6 ‰ für das Verhältnis von  ${}^{2}\text{H}_{2}{}^{16}\text{O} / {}^{1}\text{H}_{2}{}^{16}\text{O}$ . Dieses Ergebnis ist allerdings nur für trockene Luft gültig und beinhaltet nicht die atmosphärische Luftfeuchte und Turbulenz, die in natürlichen hydrologischen Systemen einen erheblichen Einfluss auf die Fraktionierung nehmen (LEIBUNDGUT ET AL, 2009).

#### 2.3.4 Fraktionierung durch den Rayleigh-Prozess

Die Rayleigh-Fraktionierung, auch "Rayleigh-Destillation" genannt, ist eine weitere Form der kinetischen Fraktionierung. Sie beschreibt den Prozess, der stattfindet wenn das Produkt einer Reaktion stetig entfernt wird. Dies ist im hydrologischen Kreislauf z. B. bei der Verdunstung unter Einfluss von Wind oder bei der Kondensation in Wolken mit anschließendem Ausregnen der Fall. Die Destillations-Gleichung des Rayleigh-Prozess erklärt, dass das resultierende Isotopenverhältnis R eine Funktion des Anfangsisotopenverhältnis  $R_0$ , der im Reservoir verbleibenden Fraktionierung f und des Fraktionierungsfaktor  $\alpha$  ist. Diese Funktion lautet:

$$R = R_0 f^{(\alpha - 1)}$$
 Gl. 2-9

Daraus ergibt sich, dass im Falle der Rayleigh-Destillation die Fraktionierung umso größer ist, je kleiner der Wert im verbleibenden Reservoir wird. Allerdings ist diese Gleichung nur gültig, wenn der Fraktionierungsfaktor konstant ist oder durch einen konstanten Wert abgeschätzt werden kann. Beim Höheneffekt des Kondensationsprozesses kann beispielsweise nicht mit einem konstanten Fraktionierungsfaktor gerechnet werden. In diesem Fall sollte eine Differentialgleichung verwendet werden und mit einer variablen Temperatur integriert werden.

# 2.4 Isotopeneffekte

Die oben beschriebenen Fraktionierungsprozesse an den Phasengrenzen führen im hydrologischen Kreislauf durch Isotopenaustausch, Diffusion und Dispersion zu messbaren Isotopeneffekten in einer Wasserprobe (MOSER & RAUERT, 1980). Diese Isotopeneffekte werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

## 2.4.1 Kontinentaleffekt

Feuchte Luftmassen, die Wasserdampf über den Ozeanen aufgenommen haben und über Kontinente ziehen, reichern sich durch Kondensation und anschließendem Ausregnen stetig an schweren Isotopen ab. Diese Abreicherung folgt dem oben beschriebenen Prozess der Rayleigh-Fraktionierung. Für Europa und Nordafrika liegt der Mittelwert dieser Abreicherung für  $\delta$  <sup>18</sup>O bei -0,3 ‰ / 100 km und für  $\delta$  <sup>2</sup>H bei -2,5 ‰ / 100 km Distanz von der Küste. Im Sommer ist der Kontinentaleffekt, durch Transpiration und Wiederverdunstung von den Kontinenten, weniger stark ausgeprägt (LEIBUNDGUT ET AL, 2009).

#### 2.4.2 Mengeneffekt

Niederschlagswasser aus kleinen Niederschlagsereignissen ist gegenüber größeren Ereignissen, generell an schweren Isotopen Niederschlagswasser aus angereichert. auf zwei Effekte zurückzuführen. Dies ist Bei kleinen Niederschlagsereignissen hat die Atmosphäre unter den Wolken eine geringere Luftfeuchte, was zu einer höheren Verdunstungsrate und einer Anreicherung mit schweren Isotopen führt. Bei größeren Niederschlagsereignissen wird die Luftfeuchte in der Atmosphäre unter den Wolken sukzessiv höher und es findet eine geringere Verdunstung der Regentropfen statt. Dadurch wird die Anreicherung der schweren Isotope durch Verdunstung reduziert (INGRAHAM, 1998). Der andere Effekt wird durch den Rayleigh-Prozess während der Kondensation verursacht. Moleküle mit schweren Isotopen kondensieren und regnen schneller aus als Moleküle mit leichten Isotopen. Die verbleibenden Moleküle haben einen geringeren Gehalt an schweren Isotopen und führen dadurch zu einer Abreicherung der schweren Isotope mit zunehmender Niederschlagsmenge.

#### 2.4.3 Temperatureffekt

Jegliche Isotopenfraktionierung folgt einer thermodynamischen Reaktion und ist damit stark temperaturabhängig. Die Fraktionierung ist dabei in einer kalten Umgebung höher als in einer warmen Umgebung. Die Fraktionierung von  $\delta^2$ H zwischen Wasserdampf und Wasser z.B. führt bei 0°C zu einer Anreicherung von +106 ‰ im Wasser und bei 100°C nur noch zu einer Anreicherung von +27 ‰ im Wasser (CLARK & FRITZ, 1997). Insgesamt ist die Temperatur einer der maßgeblichen Parameter zur Bestimmung des Isotopengehaltes und einer der Haupteinflüsse für die drei folgenden Isotopeneffekte.

#### 2.4.4 Breiteneffekt

Der Breiteneffekt, der die Abreicherung der schweren Isotope mit zunehmendem Breitengrad beschreibt, wurde schon von DANSGAARD (1964) belegt und auf die Beziehung von Isotopengehalt und Temperatur zurückgeführt. Die Abreicherung der schweren Isotope wird dabei noch durch den Ausregnungseffekt des Rayleigh-Prozess unterstützt, dessen Einfluss mit zunehmendem Breitengrad steigt. In Nordamerika und Europa liegt der Gradient für den Breiteneffekt und  $\delta$  <sup>18</sup>O bei -0,6 ‰ pro Breitengrad, in der Antarktis bei -2 ‰ pro Breitengrad, in den Tropen dagegen ist der Gradient weniger ausgeprägt (CLARK & FRITZ, 1997).

#### 2.4.5 Saisonaler Effekt

Der saisonale Effekt ist stark durch den Jahresgang der Temperatur beeinflusst und ist somit in kontinentalen Bereichen ausgeprägter als in Küstennähe. In Abbildung 2-2 ist der saisonale Verlauf des Isotopengehaltes von  $\delta$  <sup>18</sup>O im Niederschlag an zwei Schweizer Isotopenmessstationen dargestellt.



Abbildung 2-2: Boxplot der langjährigen Monatsmittelwerte (Juli 1992 - Dezember 2009) der <sup>18</sup>O-Gehalte im Niederschlag. Daten aus zwei Stationen des Schweizer Isotopenmessnetzes (NISOT).

Aus Abbildung 2-2 wird ersichtlich, dass der Niederschlag im Sommer an schweren Isotopen angereichert und im Winter abgereichert ist. Der saisonale Effekt des Isotopengehaltes ist eine wichtige Eingangsgröße für hydrologische Systeme und liefert über Messungen im Boden, im Abfluss und im Grundwasser Informationen über die mittlere Verweilzeit des Wassers im Systems (LEIBUNDGUT ET AL, 2009). Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Boxplots werden mit der Statistiksoftware "R" erstellt. Dabei stellt der Balken in der Mitte den Median der Werte, die umgebende Box den Raum zwischen erstem und drittem Quartil dar. Für die weiteren Werte erstreckt sich die gestrichelte Linie bis zur 1.5 fachen Größe der Box ab dem nächstliegenden Ende. Außerhalb dieses Bereichs liegende Werte werden durch Extrapunkte gekennzeichnet (SACHS & HEDDERICH, 2006).

#### 2.4.6 Höheneffekt

Der Höheneffekt im Niederschlag führt zu einer Abreicherung der schweren Isotope mit der Höhe. Luftmassen, die auf Gebirge treffen werden orographisch gehoben, kühlen ab und kondensieren. Dabei nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab und führt zu einer stärkeren Fraktionierung während des Kondensationsprozesses. Des Weiteren kommt es durch wiederholtes Ausregnen während der orographischen Hebung zu einer Rayleigh-Fraktionierung, die den Abreicherungseffekt mit der Höhe zusätzlich verstärkt (CLARK & FRITZ 1997). In einigen Fällen wird der Höheneffekt durch andere Einflüsse, wie differierende Niederschlagsbildungsprozesse, oder das Aufeinandertreffen verschiedener Luftmassen überlagert. Deswegen sollte der Höheneffekt mit regionalen Daten verifiziert werden (LEIBUNDGUT ET AL, 2009).

## 2.5 Isotope im Schnee

Der Isotopengehalt des Schnees stellt einen Spezialfall in der Isotopenhydrologie dar. Im Gegensatz zu den flüssigen Niederschlägen, findet beim Fallen der festen Niederschläge kein isotopischer Austausch mit der atmosphärischen Luftfeuchte statt. Dadurch konserviert der fallende Schnee den, bei der Entstehung in den Wolken gebildeten, Isotopengehalt (GAT, 1996). Bei der Ablagerung behält der Schnee seine isotopische Signatur, unterliegt jedoch Verfrachtungen durch Winddrift. In wärmeren Perioden wird der Schnee, durch Sublimation, Schicht für Schicht abgetragen. Im Gegensatz zur Verdunstung von der Oberfläche eines Wasserkörpers, bei der sich das verbleibende Wasser stetig an schweren Isotopen anreichert, wird man erwarten, dass sich durch die Sublimation keine Veränderung des Isotopengehaltes in der verbleibenden Schneedecke ergibt. In der Praxis findet jedoch eine Anreicherung an schweren Isotopen statt, die auf Diffusion von Wasserdampf in die Firnporen der Schneedecke, sowie auf Verdunstung geschmolzenen Schnees an der Oberfläche zurückzuführen ist (GAT, 1996). Daher kommt es zu der in Kapitel 1.2.1 beschriebenen Anreicherung an schweren Isotopen in den oberen Schneeschichten, durch Sublimation und Verdunstung.

# 3 Methoden

# 3.1 Einzugsgebiete

Die vier untersuchten alpinen Einzugsgebiete liegen in den Schweizer Alpen und sind Teil der ausgewählten Einzugsgebiete im Projekt *"DROUGHT-CH*". In jedem Einzugsgebiet wird ein Nord- und ein Südhang beprobt. Für die Auswahl der betreffenden Hänge wird die, das jeweilige Gebiet darstellende, Skitourenkarte der Schweiz im Maßstab 1: 50'000 benutzt. Anhand dieser werden die begehbaren Hänge mit der höchstmöglichen vertikalen Differenz ermittelt. Im Folgenden wird kurz die geographische Lage der Einzugsgebiete erläutert und anschließend werden die einzelnen Einzugsgebiete mit den entsprechenden Probepunkten vorgestellt. Da die Proben aus der zweiten Begehung meistens an denselben Stellen wie die Proben der ersten Begehung entnommen wurden, sind in den Übersichtskarten nur die Probenpunkte aus der ersten Begehung abgebildet.

# 3.1.1 Lage

Die untersuchten Einzugsgebiete befinden sich alle in den Schweizer Alpen. Ihre geographische Lage ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass drei der Einzugsgebiete im Kanton Graubünden liegen. Das nördlichste ist das Taschinas-Einzugsgebiet und liegt an der Grenze zu Liechtenstein und Österreich. Südöstlich davon liegt das Dischma-Einzugsgebiet. Dies ist eines der meistuntersuchten Einzugsgebiete der Schweiz, da es sich direkt oberhalb von Davos befindet, wo das Schweizer Schneeund Lawinenforschungsinstitut SLF ansässig ist. Noch weiter südöstlich befindet sich das Laschadura-Einzugsgebiet, welches am Rand des Schweizer Nationalparks zwischen Zernez und dem Ofenpass liegt. Ursprünglich sollten hier zwei angrenzende Einzugsgebiete untersucht werden, diese stellten sich allerdings als nicht begehbar heraus. Das vierte Einzugsgebiet, das der Engstligen, liegt im Süden des Kantons Bern.



Abbildung 3-1: Lage der untersuchten Einzugsgebiete

In Abbildung 3-1 sind die in der Nähe der Einzugsgebiete liegenden Klima-, Niederschlags- und Isotopenstationen dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass sich die Klima- und Niederschlagsstationen meist in der Nähe oder sogar innerhalb der Einzugsgebiete befinden, während die Isotopenstationen meist weiter entfernt sind. Zur Auswertung des Isotopengehaltes werden für das Engstligen-Einzugsgebiet die Daten der Isotopenstation Bern genutzt. Die Isotopenstation in Sion liegt zwar näher, ist aber wegen der Lage im Wallis durch andere Wetterlagen geprägt. Für das Laschadura-Einzugsgebiet werden die Daten der südwestlich gelegenen Isotopenstation Pontresina herangezogen. Die nächstgelegene Isotopenstation hat das Taschinasbach-Einzugsgebiet. Diese liegt in Vaduz. Für die Interpretation des Isotopengehaltes im Dischma-Einzugsgebiet wird sowohl die Isotopenstation in Vaduz, als auch die Isotopenstation in Pontresina genutzt.

#### 3.1.2 Einzugsgebiet Taschinasbach

Das Taschinasbach-Einzugsgebiet hat eine Fläche von 63,02 km<sup>2</sup> und reicht von 667 m ü. NN bis zu 2957 m ü. NN. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes liegt bei 1774 m ü. NN. In der Einteilung der Schweizer Einzugsgebiete hat es die Basis-Nummer 10305 und



gehört zum Flussgebiet des Rheins. In Abbildung 3-2 ist das gesamte Einzugsgebiet mit Höhenlinien und Hangneigung dargestellt.

Abbildung 3-2: Einzugsgebiet Taschinasbach

In Abbildung 3-2 sind die Probenentnahmepunkte der jeweils ersten Begehung im Nordund Südhang dargestellt. Es könnte der Eindruck entstehen, dass die Probenentnahme der Punkte TS5 bis TS11 nicht im Südhang stattgefunden hat. Die Tour führte jedoch über einen Grat von dem für die jeweilige Probenentnahme in den Südhang gequert werden konnte. Im Taschinasbach-Einzugsgebiet wurden sowohl im Nordhang als auch im Südhang elf Proben entnommen. In der zweiten Begehung wurden im Nordhang die höchsten acht Punkte und im Südhang die obersten fünf Punkte ein weiteres Mal beprobt. Bei der zweiten Probenentnahme im Südhang wurden aufgrund der Schneelage bzw. der fehlenden Schneelage teilweise leicht abweichende Punkte gewählt. Die Lagedifferenz war jedoch so gering, dass sie in Abbildung 3-2 nicht ersichtlich gewesen wäre. Aus diesem Grund und weil es sich nur um zwei abweichende Entnahmepunkte handelte, wurde auf eine Extradarstellung der zweiten Begehung verzichtet.

# 3.1.3 Einzugsgebiet Engstligen

Das Engstligen-Einzugsgebiet umfasst drei kleinere Einzugsgebiete, hat eine Fläche von 146,3 km<sup>2</sup> und reicht von 1250 m ü. NN bis 3250 m ü. NN. Die drei darin liegenden Einzugsgebiete haben in der Einteilung der Schweizer Einzugsgebiete die Basis-Nummer 20101, 20102 und 20103. Das Einzugsgebiet der Engstligen gehört zum Flussgebiet der Aare und ist in Abbildung 3-3 mit Höhenlinien und Hangneigung dargestellt. Die Engstligen mündet bei Frutigen in die Kander und fließt über den Thuner See in die Aare.



Abbildung 3-3: Einzugsgebiet Engstligen

In Abbildung 3-3 sind die Probenpunkte der ersten Begehungen im Nord- und im Südhang ersichtlich. Im Engstligen-Einzugsgebiet wurden bei der ersten Begehung zwei Nordhänge beprobt, um eine größere Höhendifferenz zu erreichen. Bei der zweiten Begehung wurden nur noch Proben im höher gelegenen Nordhang (EN1-EN9) entnommen. Dies ist auch der einzige Nordhang, der dreimal untersucht wurde. Bei der dritten Begehung wurden die Punkte EN2-EN8 noch einmal beprobt. Wie sich später herausstellte, gab es in der zweiten und dritten Begehung Probleme mit der GPS-Genauigkeit. Wie in Abbildung 3-3 ersichtlich, wurden die Probepunkte EN3-EN8 in einem fast 40° steilen Hang entnommen. Da die zweite und dritte Begehung nach den GPS-Koordinaten der ersten Begehung durchgeführt wurden, ergaben sich in den Auswertungen Abweichungen von bis zu 30 Höhenmetern an einzelnen Punkten, die wohl auf die Steilheit des Geländes zurückzuführen sind. Weitere Probleme ergaben sich in diesem Einzugsgebiet aufgrund von Lawinen, wegen denen die Punkte EN2 und EN8 bei der dritten Begehung nicht an derselben Stelle beprobt werden konnten, sowie wegen der Beschädigung einer Probe (EN7) während der ersten Begehung.

#### 3.1.4 Einzugsgebiet Dischma

Das Dischma-Einzugsgebiet hat eine Fläche von 54 km<sup>2</sup> und reicht von 1546 m ü. NN bis 3140 m ü. NN. Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes liegt bei 2294 m ü. NN. In der Einteilung der Schweizer Einzugsgebiete hat es die Basis-Nummer 10172 und liegt im Flussgebiet des Rheins. In Abbildung 3-4 sind die Einzugsgebiete der Dischma (rechts) und der Sertig (links) mit Höhenlinien und Hangneigung dargestellt. Ursprünglich sollte die Beprobung nur im Einzugsgebiet der Dischma stattfinden. Da dort kein geeigneter Südhang mit ausreichender Höhendifferenz vorhanden war, wurde unter der Annahme, dass die Variabilität des Isotopengehaltes sich in beiden Einzugsgebieten ähnlich verhält, ein Südhang im angrenzenden Sertig-Einzugsgebiet beprobt. Wenn im Folgenden die Hänge des Dischma-Einzugsgebietes besprochen werden, ist somit auch der Südhang des Sertig-Einzugsgebietes inbegriffen.



Abbildung 3-4: Einzugsgebiete Dischma und Sertig

In Abbildung 3-4 sind die Probepunkte der ersten Begehung im Dischma- und im Sertig-Einzugsgebiet dargestellt. Im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes wurden dabei 11 Proben und im Südhang des Sertig-Einzugsgebietes 9 Proben entnommen. Bei der zweiten Begehung wurden die höchsten 8 Punkte im Nordhang und die höchsten 3 Punkte im Südhang ein weiteres Mal beprobt. Im Südhang waren bei der zweiten Begehung allerdings nur noch Schneeflecken vorhanden, sodass die Punkte DS7 und DS8 an abweichenden Standorten beprobt wurden. Die Abweichungen in Lage und Höhe können dem Anhang A entnommen werden. Der einzige Punkt im Südhang, der an derselben Stelle doppelt beprobt werden konnte, war somit die Gipfelprobe DS9.

#### 3.1.5 Einzugsgebiet Laschadura

Das Laschadura-Einzugsgebiet hat eine Fläche von 35 km<sup>2</sup> und reicht von 1470 m ü. NN bis zu 3073 m ü. NN. Die mittlere Einzugsgebietshöhe liegt bei 2147 m ü. NN. In der Einteilung der Schweizer Einzugsgebiete hat es die Basis-Nummer 80102 und gehört zum Flussgebiet des Inn. Da in der Beschreibung der Schweizer Einzugsgebiete außer der Basis-Nummer kein Name angegeben war, erfolgte die Namensgebung Laschadura nach dem gleichnamigen Tal und Fluss, in dem die Probenentnahme stattfand. In Abbildung 3-5 ist das Laschadura-Einzugsgebiet mit Höhenlinien und Hangneigung dargestellt.



Abbildung 3-5: Einzugsgebiet Laschadura

In Abbildung 3-5 sind die Probepunkte der ersten Begehung im Nord- und im Südhang ersichtlich. Im Nordhang wurden 9 Proben und im Südhang 7 Proben entnommen. In der

zweiten Begehung wurde nur der Nordhang und dabei die Punkte LN1- LN7 ein weiteres Mal beprobt.

# 3.2 Probenentnahme

Die Probenentnahme erfolgt bei allen Proben nachdem in CLARK & FRITZ (1997) beschriebenen Prinzip für das Sammeln von Schneeproben. Der entnommene Schnee wird in luftdicht abgeschlossene Plastikbeutel gepackt und nachdem er geschmolzen ist, in Probeflaschen umgefüllt. Der Schnee wird dabei nicht aktiv geschmolzen, sondern durch die wärmere Umgebungstemperatur, während des Transports und der Lagerung bei Zimmertemperatur, langsam aufgetaut. Dieser Vorgang dauert je nach Größe und Dichte der Schneeprobe 5 bis 15 Stunden. Da der Schmelzvorgang in einem luftdichten Plastikbeutel stattfindet, wird eine Isotopenfraktionierung ausgeschlossen.

### 3.2.1 Entnahme der höhenabhängigen Schneeproben

Für die Messung des mittleren Isotopengehaltes der Schneedecke wird eine selbstgebaute Alusonde verwendet.



Abbildung 3-6: Alusonde

Diese, in Abbildung 3-6 dargestellte, Alusonde besteht aus drei 1 m langen Rohren mit einem Durchmesser von 6 cm. Die drei Rohre können zusammengesteckt und über eine Madenschraube fixiert werden. Um den mittleren Isotopengehalt der gesamten Schneedecke zu erfassen, wird die Alusonde bei jedem Punkt bis auf den Untergrund gerammt. In den untersuchten Einzugsgebieten wurde die maximale Länge der Alusonde von 3 m, nur an einem einzigen Punkt überschritten und es mussten zusätzlich 20 cm gegraben werden. Der mit der Alusonde entnommene Schnee wird anschließend in wasserdichte Ziplocks gefüllt.



Abbildung 3-7: Entnahme der Schneeproben

Bei geringen Schneemächtigkeiten, wie im linken Bild der Abbildung 3-7 zu erkennen, kann der gesamte entnommene Schnee in den Ziplock gefüllt werden. Ab einer Entnahmetiefe von ca. 1 m wird das entnommene Schneevolumen zu groß für den Ziplock. Deshalb wird, wie im rechten Bild der Abbildung 3-7 zu sehen, ein größerer Plastiksack zum Mischen der Probe verwendet und nur ein Teil der Probe abgepackt. Um trotzdem eine präzise Messung zu erhalten, wird die Probe gut durchgemischt, immer wieder kleine Teile entnommen und der Ziplock möglichst prall gefüllt. Diese Proben werden in jedem Einzugsgebiet ca. alle 100 Höhenmeter an jeweils einem Südhang und einem Nordhang entnommen. Zusätzlich werden an jedem Punkt die GPS-Koordinaten, die Schneetiefe, die Hangneigung und die Hangexposition gemessen. Eine genaue Übersicht jeder einzelnen Probe, mit dem dazugehörigen Isotopengehalt und den erfassten Parametern ist in Anhang A aufgelistet.

# 3.2.2 Entnahme der Schneeprofile

In jedem beprobten Hang wird, wie in Abbildung 3-8 dargestellt, ca. in der Mitte ein Schneeprofil gegraben und eine Schneeprobe aus jeder einzelnen Schicht entnommen. Die einzelnen Schichten werden visuell und durch manuelles Testen der Festigkeit voneinander unterschieden.



Abbildung 3-8: Schneeprofile

In Abbildung 3-8 ist zu erkennen, dass die Schneehöhe der gegrabenen Schneeprofile sehr variabel ist. Dies liegt an der Höhe über NN, vor allem aber daran, ob es sich um einen Nordhang (linkes Bild) oder einen Südhang (rechtes Bild) handelt. Eine Beschreibung der aufgenommenen Schneeprofile und der dazugehörigen Daten ist in Tabelle 3-1 aufgelistet.

| EZG           | Name | Datum       | Hang     | Höhe [m ü. NN] | Profiltiefe [m] |
|---------------|------|-------------|----------|----------------|-----------------|
| Taschinasbach | TSP1 | 03.04.2010  | Südhang  | 1975           | 1.15            |
|               | TNP1 | 11.04.2010  | Nordhang | 2070           | 2.45            |
|               | TSP2 | 09.05.2010  | Südhang  | 1970           | 0.75            |
|               | TNP2 | 18.05.2010  | Nordhang | 2041           | 1.90            |
| Engstligen    | ENP1 | 06.04.2010  | Nordhang | 2591           | 2.40            |
|               | ESP1 | 07.04. 2010 | Südhang  | 2191           | 0.65            |
|               | ENP2 | 29.04.2010  | Nordhang | 2553           | 1.75            |
|               | ENP3 | 05.06.2010  | Nordhang | 2579           | 0.56            |
| Dischma       | DSP1 | 16.04. 2010 | Südhang  | 2710           | 0.45            |
|               | DNP1 | 17.04.2010  | Nordhang | 2345           | 1.80            |
|               | DNP2 | 22.05.2010  | Nordhang | 2345           | 1.25            |
|               | DSP2 | 23.05.2010  | Südhang  | 2681           | 0.25            |
| Laschadura    | LNP1 | 24.04. 2010 | Nordhang | 2510           | 1.74            |
|               | LSP1 | 25.04. 2010 | Südhang  | 2754           | 1.13            |
|               | LNP2 | 26.05.2010  | Nordhang | 2529           | 1.20            |

Tabelle 3-1: Übersicht der Schneeprofile

Aus Tabelle 3-1 wird ersichtlich, dass in allen Einzugsgebieten die Nordhänge mit einem Abstand von ca. einem Monat mindestens zweimal beprobt wurden. Die Südhänge wurden nur im Taschinasbach- und im Dischma-Einzugsgebiet doppelt beprobt. In den anderen beiden Einzugsgebieten war nicht mehr genügend Schnee im Südhang vorhanden um ein Schneeprofil aufzunehmen. Der Nordhang im Engstligen-Einzugsgebiet wurde insgesamt dreimal beprobt. Im unteren Nordhang des Engstligen-Einzugsgebiet wurde ebenso ein Schneeprofil gegraben ist hier aber nicht aufgelistet. Aus unerklärlichen Gründen, gingen diese 5 Proben zusammen mit 3 Schneeprofilproben aus dem Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes während der Laboranalysen verloren. Eine detaillierte Übersicht der Schneeprofile mit Festigkeit und Körnung der einzelnen Schneeschichten und den dazugehörigen Werten des Isotopengehaltes befindet sich in Anhang A.

# 3.3 Messung des Isotopengehaltes

#### 3.3.1 Messgerät

Die gesammelten Proben werden im Labor des Institutes für Hydrologie (IHF) auf den Isotopengehalt von  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O untersucht. Die Messung findet mit dem Messgerät Picarro 1102i statt und nutzt die "Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy" (Resonatorabklingzeitspektroskopie). Dieses Gerät besitzt eine Kammer, in der sich mehrere reflektierende Spiegel befinden um den Laufweg eines Laserstrahls zu verlängern. Aus den präparierten Wasserproben wird für jede einzelne Messung ein Aliquot von 1 µl entnommen, in einer kleineren Kammer verdampft und in die größere Kammer überführt. Für die Messung wird zuerst Licht von einem kontinuierlichen Laser in die größere Kammer injiziert, ausgeschaltet und dann die Abklingzeit der Lichtintensität gemessen. Da iedes H<sub>2</sub>O-Molekül mit verschiedener Isotopenzusammensetzung ein spezifisches Absorptionsspektrum besitzt, kann anhand der Messung der Wellenlänge des Lasers im Spektralbereich von H<sub>2</sub>O und der Messung der Abklingzeit der Lichtintensität, sowie der eigentlichen Wellenlänge des Lasers, ein detailliertes Spektralprofil generiert werden. Die Konzentration jedes Isotops ist dann proportional zur Fläche unter dem jeweiligen Spektralbereich und kann anschließend über die mit gemessenen Standards kalibriert werden (BRAND ET AL, 2009).

# 3.3.2 Fehlerabschätzung

Bei einer Messreihe, von der angenommen wird, dass keine systematischen Fehler auftreten, besteht das Problem in der quantitativen Abschätzung des zufälligen Fehlers bzw. der Messgenauigkeit. Liegt nun eine Messreihe  $\alpha_i$  mit numerisch unterschiedlichen Messwerten vor, so ist in erster Annäherung, der arithmetische Mittelwert  $\overline{\alpha}$  nach Gauß der Bestwert der Messung. Wenn nun

$$a_i' = a_i - a \qquad \qquad Gl. \quad 3-1$$

die in einer Messreihe auftretenden Abweichungen vom Bestwert der Messung sind, dann ist

$$\pm d = \pm \frac{1}{n} \sum |a_i'| \qquad \qquad Gl. \quad 3-2$$

der mittlere absolute Fehler und

$$\pm s = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum {a_i'}^2} \qquad Gl. \ 3-3$$

der Standardfehler eines einzelnen Messwertes. Das wichtigste Maß um die Messgenauigkeit festzulegen ist jedoch der absolute Standardfehler des Bestwertes der Messung, der sich wie folgt berechnet.

$$\pm \Delta a = \pm \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum {a_i'}^2} = \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$$
 Gl. 3-4

Das Messergebnis des Bestwertes sollte nicht genauer angegeben werden als die erste in  $\pm \Delta \alpha$  erscheinende Ziffer. Um die Messgenauigkeit in Relation zum Absolutwert der Messung zu stellen wird der relative Standardfehler des Bestwertes prozentual nach folgender Gleichung berechnet.

$$\pm \frac{\Delta a}{a} 100\% = \pm \delta a \qquad \qquad Gl. 3-5$$

Dieser Abschnitt bezieht sich nur auf den Fehler bei der Messung und wurde nach SCHÖNWIESE (2006) beschrieben.

Ein externer Fehler bei der Probenvorbereitung, wird durch das Prinzip der doppelten Präparierung und Messung jeder einzelnen Probe ausgeschlossen (KöNIGER, 2003). Zusätzlich bleibt allerdings der Fehler bei der Probenentnahme, der sich nur schwer quantifizieren lässt. Fehler können dadurch entstehen, dass teilweise nur Mischproben entnommen werden und somit der prozentuale Isotopengehalt der einzelnen Schneeschichten nicht exakt erfasst wird. Eine weitere Möglichkeit für einen Fehler ist, dass die verwendeten Ziplocks nicht ausreichend luftdicht sind. Diesem Fehler wird versucht entgegen zu wirken indem jede Probe doppelt eingepackt wird. Eine andere mögliche Fehlerquelle entsteht dadurch, dass sich in den Ziplocks aufgrund der Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Wasser und Wasserdampf unterschiedliche Isotopengehalte ergeben und das Wasser, dass in die Probeflaschen gegeben wird somit an schweren Isotopen angereichert ist. Insgesamt ergeben sich somit drei Fehlerquellen bei der Probenentnahme die sich nur schwer quantifizieren lassen.

#### 3.3.3 Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit für das Picarro - Messgerät wird allgemein mit < 0,2 ‰ für  $\delta$  <sup>18</sup>O und < 1 ‰ für  $\delta$  <sup>2</sup>H angegeben. In einem Messdurchlauf des Picarro wird jede eingestellte Probe und die verwendeten Standards sechsmal gemessen. In der vorliegenden Arbeit wurde zusätzlich jede Probe zweimal präpariert und in das Messgerät gegeben, um den oben erwähnten externen Fehler durch die Probenvorbereitung auszuschließen. Insgesamt wurde somit jede Probe zwölfmal gemessen. Die im vorigen Abschnitt beschriebene Berechnung der Messgenauigkeit wurde durch Stichproben überprüft. Dabei wurde in allen Stichproben ein absoluter Standardfehler  $\Delta$  < 0.1 ‰ für  $\delta$  <sup>18</sup>O und < 0.5 ‰ für  $\delta$  <sup>2</sup>H festgestellt. Nach der Definition aus dem Kapitel 3.3.2 für den absoluten Standardfehler  $\Delta$  ist somit eine Angabe des Isotopengehaltes bis zur zweiten Nachkommastelle für  $\delta$  <sup>18</sup>O und bis zur ersten Nachkommastelle für  $\delta$  <sup>2</sup>H sinnvoll (SCHÖNWIESE, 2006).

## 3.3.4 Fehlerfortpflanzung bei der Berechnung des Deuterium-Excess

Der Deuterium-Excess beschreibt den Unterschied im Verhältnis von  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O. Berechnet wird der Deuterium-Excess *d* über die in CLARK & FRITZ (1997) beschriebene Formel.

$$d = \delta^2 H - 8 * \delta^{18} O \qquad \qquad \text{Gl. 3-6}$$

Im globalen Mittelwert liegt der Deuterium-Excess bei 10 ‰, regionale Unterschiede ergeben sich durch Variationen der Luftfeuchte, Windgeschwindigkeiten und der Temperatur der Meeresoberfläche während der erstmaligen Verdunstung des Wasserdampfes (CLARK & FRITZ, 1997). Zudem zeigten LIEBMINGER ET AL (2006) in den österreichischen Alpen, dass der Deuterium-Excess von der Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit abhängig ist, welche die Rate der Verdunstung beim Fallen der Regentropfen steuern. Der Deuterium-Excess setzt sich aus zwei Messgrößen zusammen und unterliegt somit einer doppelten Fehlerbelastung. Der Gesamtfehler *E* für den Deuterium-Excess lässt sich aus den beiden ermittelten absoluten Fehlern  $\Delta$  für  $\delta$ <sup>2</sup>H und

 $\delta$  <sup>18</sup>O berechnen. Die Fehlerfortpflanzung für Summen und Differenzen kann nach SCHÖNWIESE (2006) über folgende Formel berechnet werden.

$$\Delta E = \pm \sqrt{\left(\Delta a\right)^2 + \left(\Delta b\right)^2}$$
Gl. 3-7

Mit den oben berechneten absoluten Fehlern  $\Delta$  für  $\delta$  <sup>2</sup>H und  $\delta$  <sup>18</sup>O ergibt sich dadurch für den Deuterium-Excess ein absoluter Fehler von 0.51.

#### 3.3.5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Messung des Isotopengehaltes sehr exakt ist, während sich durch die Probenentnahme verschiedene Fehlerquellen ergeben. Diesen Fehlern wurde versucht durch gewissenhaften Umgang mit den Proben entgegenzuwirken. Fehler lassen sich dadurch weder ausschließen, noch quantifizieren, sondern nur minimieren. Für die Darstellung des Fehlers in den Ergebnissen wird der Fehler der Messgenauigkeit verdoppelt und damit versucht den Fehlern aus der Probeentnahme einen Raum zu geben. Dieser Raum ist natürlich nur geschätzt und wird systematischen Fehlern aus der Probeentnahme nicht gerecht.

#### 3.4 Modellierung

Der mittlere Isotopengehalt der Schneedecke unterliegt komplexen atmosphärischen Einflüssen und physikalischen Prozessen. Schon die Luftmassen, aus denen der Niederschlag fällt, besitzen aufgrund ihrer Entstehung unterschiedliche Isotopengehalte. Auf ihren Zugbahnen über die Kontinente unterliegen sie durch Kondensation, Ausregnen und Aufnahme von wiederverdunstetem Wasserdampf weiteren Fraktionierungsprozessen. Die daraus entstehende Isotopensignatur des Niederschlags in einem Einzugsgebiet ist hauptsächlich von der Kondensationstemperatur abhängig und führt zu einem Höheneffekt des Isotopengehaltes. Im Winterhalbjahr lagern sich diese isotopisch unterschiedlichen Niederschläge als Schneedecke ab und werden teilweise vom Wind verfrachtet. In den wärmeren Phasen findet in den oberen Schichten der Schneedecke eine Isotopenfraktionierung durch Verdunstung und Sublimation statt, die sich über Diffusion und Perkolation in die unteren Schichten überträgt und allgemein zu einer Anreicherung der schweren Isotope, sowie zu einer leichten Homogenisierung des Isotopengehaltes führt. Die winterliche Schneedecke speichert somit eine erhebliche

Menge an Informationen über die isotopische Entstehungsgeschichte des Niederschlags und die anschließend ablaufenden Fraktionierungsprozesse.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht den gemessenen mittleren Isotopengehalt der Schneedecke an einem Punkt über verschiedene Parameter zu modellieren. Ein rein physikalisches Modell hätte hierfür einen erheblichen höheren Messaufwand erfordert und den Rahmen dieser Arbeit überschritten. Daher wurde für die Modellierung des mittleren Isotopengehaltes und des Deuterium-Excess in der Schneedecke die Multiple Lineare Regression gewählt. Die Modellierung wird für jedes Einzugsgebiet einzeln und jeweils für die erste Begehung und für beide Begehungen zusammen durchgeführt. Anschließend werden unter Berücksichtigung des Längen- und Breitengrades alle Einzugsgebiete zusammen modelliert.

## 3.4.1 Multiple Lineare Regression

Das Ziel einer Multiplen Linearen Regression (MLR) ist die Variabilität der beobachteten Zielgröße *y* durch mehrere erklärende Variablen zu beschreiben und dadurch den unerklärbaren Teil der Zielgröße zu verringern (HELSEL & HIRSCH, 2002). Die allgemeine Gleichung einer MLR lautet:

$$\gamma_{i} = \beta_{0} + \beta_{1} * x_{i1} + \beta_{2} * x_{i2} + \dots + \beta_{p} x_{ip} + \varepsilon_{i}$$
*Gl.* 3-8

| $\gamma_i$ :                    | i-ter Wert der Zielgröße                     |  |  |
|---------------------------------|--|--|--|
| $x_{1i}$ :                      | i-ter Wert der ersten erklärenden Variablen  |  |  |
| $x_{2i}$ :                      | i-ter Wert der zweiten erklärenden Variablen |  |  |
| $\beta_0,\ \beta_1,\ \beta_2$ : | Regressionkoeffizienten                      |  |  |
| $\varepsilon_i$ :               | Residuen                                     |  |  |

Das Problem einer MLR besteht darin, die Regressionskoeffizienten so zu bestimmen, dass die resultierenden Residuen minimal werden. Dies geschieht über die Methode der kleinsten Fehlerquadratschätzung. Die Güte der Schätzung kann anschließend mit dem Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> konkretisiert werden, welches den Anteil der im Modell erklärten Varianz von *y* ausdrückt (SACHS & HEDDERICH, 2006). Im Fall der MLR geschieht das über das angepasste Bestimmtheitsmaß  $R_a^2$ , das den Verlust der Freiheitsgrade gewichtet, indem das Verhältnis der totalen Freiheitsgrade (n-1) zum Fehler der Freiheitsgrade (n-p) in die Gleichung des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup> miteinbezogen wird.

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p)} \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \overline{\gamma})^2}$$
Gl. 3-9

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  sollte bei einer MLR nicht angewendet werden, da dieses mit jeder zusätzlichen Variablen höher wird, auch wenn diese aus einer zufälligen Zahlenreihe besteht (HELSEL & HIRSCH, 2002).

#### 3.4.2 Vorgehensweise

Für die Bestimmung der aussagekräftigsten MLR Gleichung werden zunächst alle verwendeten Variablen auf Multikollinearität überprüft. Die Begriffe Variable und Parameter werden in dieser Arbeit analog verwendet. Die Überprüfung der Multikollinearität erfolgt anhand des Varianzinflationsfaktors (VIF), dessen Wert 10 nicht überschreiten soll (HELSEL & HIRSCH, 2002). Dieser Grenzwert wurde bei keiner der verwendeten Variablen überschritten. Um die aussagekräftigste MLR Gleichung zu erhalten wird bei der Auswahl der Variablen für das jeweilige Modell das Verfahren der Rückwärtselimination nach STAHEL (2007) gewählt. Dafür werden zunächst alle möglichen erklärenden Variablen in die Gleichung der MLR miteinbezogen und dann schrittweise einzelne Variablen anhand des Signifikanzniveaus aus der Gleichung eliminiert. Die Auswahl der "besten" MLR Gleichung wird mit der Statistiksoftware "R" durchgeführt. Dieses Programm errechnet über den F-Test die Signifikanz jeder einzelnen Variablen im Modell, sodass die Variablen mit der geringsten Signifikanz schrittweise ausgeschlossen werden können. Diese schrittweise Eliminierung der Variablen wird solange durchgeführt bis das höchstmögliche R<sup>2</sup> erreicht ist. Anschließend wird jede ausgeschlossene Variable noch einmal einzeln in die MLR Gleichung miteinbezogen um einen etwaigen erklärenden Einfluss auf die Zielgröße zu identifizieren. Mit der Statistiksoftware "R" kann auch eine automatisch implizierte schrittweise Regression durchgeführt werden. Diese nutzt zur Bestimmung der bestmöglichen MLR Gleichung das Informations-Kriterium AIC von Akaike (STAHEL, 2007) und wird zur Überprüfung der ermittelten MLR Gleichung genutzt. Die

berechneten MLR Gleichungen werden anhand der in "R" implizierten Diagnostikplots auf Normalverteilung, die Cook's Distanz, sowie auf Ausreißer mit Hebelwirkung kontrolliert. Zudem wird die Homoskedastizität der modellierten Werte, also die Normalverteilung der standardisierten Residuen überprüft. Beschrieben werden in den Ergebnissen nur die Regressionsgleichungen mit einem  $R_a^2$  größer als 0.5.

#### 3.4.3 Verwendete Parameter

Der mittlere Isotopengehalt der Schneedecke an einem Punkt wird, wie in der Einleitung zu Kapitel 3.4 beschrieben, durch viele Faktoren beeinflusst. Da die Isotopengehalte einzelner Niederschlagsereignisse für diese Arbeit nicht vorliegen, wird versucht den Input durch den Höheneffekt zu beschreiben und somit der Parameter Höhe ü. NN in die Regressionsgleichung miteinbezogen. Bei der Ablagerung der festen Niederschläge als Schnee spielt die Winddrift eine große Rolle. Um diesem Einfluss gerecht zu werden, wird die am Punkt gemessene Schneetiefe als weiterer Parameter verwendet. Die Schneetiefe ist nicht nur durch die Winddrift beeinflusst, sondern umfasst auch die in der Schneedecke ablaufenden Ablationsprozesse, erklärt aber zumindest einen Teil der Windrift. Da sich dieser Parameter zudem nicht als signifikant herausstellte, wurde für alle Probenpunkte eine lineare Regression zwischen der Höhe ü. NN und der Schneetiefe durchgeführt und die Abweichung der einzelnen Punkte von der Regressionsgeraden berechnet. Diese Differenz der Schneetiefe fließt in die MLR Gleichung mit ein. Wenn der Schnee abgelagert ist, werden die Fraktionierungsprozesse, die den Isotopengehalt der Schneedecke beeinflussen, hauptsächlich durch die Verdunstung, die Perkolation und die Diffusion gesteuert. Die Perkolation und die Diffusion lassen sich ohne hohen Messaufwand an den einzelnen Punkten kaum quantifizieren. Für die Modellierung wurde daher versucht den Einfluss der Verdunstung zu identifizieren, der wiederum hauptsächlich von der Exposition bzw. der Sonneneinstrahlung abhängig ist. Zum Teil wird die Verdunstung durch die Differenz der Schneetiefe beschrieben, da an Stellen an denen viel Schnee verdunstet bzw. sublimiert die Schneehöhe sicherlich geringer ist. Weitere Faktoren, welche die Verdunstung über die Sonneneinstrahlung steuern sind die Hangneigung, die Hangausrichtung, die vertikale und horizontale Hangkonvexität bzw. Hangkonkavität, sowie die Waldbedeckung. Die Hangneigung in Grad [°], wurde ursprünglich vor Ort gemessen, stellte sich aber als zu ungenau heraus und wird daher

mit ArcGis 9.3.1 auf der Grundlage eines DGM 25 der gesamten Schweiz neu berechnet. Die Hangausrichtung wurde vor Ort gemessen, für die Verwendung in der MLR über die Kosinusfunktion transformiert und ist somit dimensionslos. Die vertikale und horizontale Hangkonvexität bzw. Hangkonkavität werden mit ArcGis 9.3.1 berechnet. Die Werte hierfür werden in 1/100 der z-Einheit [m] angegeben, positive Werte zeigen dabei die Hangkonkavität, negative Werte die Hangkonvexität. Die Waldbedeckung spielte in den meisten Einzugsgebieten eine untergeordnete Rolle, da die Probepunkte über der Waldgrenze liegen. Um die Beschattung der tiefer gelegenen Punkte zu quantifizieren, wird ein dimensionsloser Faktor eingeführt, der in dichtem Wald 1 beträgt in offeneren Waldbereichen 0.5 und für alle anderen Punkte 0. Da Proben in den Gipfelregionen oftmals erhebliche Abweichungen in den Isotopengehalten aufweisen (MOSER & STICHLER, 1970; NIEWODNICZANSKI ET AL, 1981), wird ein zusätzlicher Gipfelparameter verwendet, der bei den Punkten auf dem Gipfel 1 beträgt und bei allen anderen Punkten 0. Für die Regressionsgleichungen, die mehrere Begehungen erklären wird zudem der Tag des Jahres miteinbezogen um die Anreicherung an schweren Isotopen über die Zeit mit ein zu beziehen. Die Parameter Längen- und Breitengrad werden für die MLR Gleichungen verwendet die alle Einzugsgebiete beinhalten. Längen- und Breitengrad werden dabei in Dezimalgrad des WGS 84 Koordinatensystems angegeben.

Zusammenfassend ergeben sich für die MLR Gleichungen der ersten Begehungen in den einzelnen Einzugsgebieten die Parameter Höhe ü. NN (Höhe), Hangneigung (HN), Hangausrichtung (HA), Differenz der Schneetiefe (Diff), Waldbedeckung (WB), Gipfelparameter (G), sowie vertikale (Kvert) und horizontale (Khori) Hangkonvexität. Für die MLR Gleichungen die beide Begehungen enthalten, werden zusätzlich der Parameter Tag des Jahres (DOY), sowie für das Gesamtmodell, das alle Einzugsgebiete beinhaltet die Parameter Breitengrad (LA) und Längengrad (LO) verwendet.

#### 3.4.4 Höhengradient

Der Höhengradient der einzelnen Begehungen wird über eine einfache lineare Regression berechnet und in den Ergebnissen der Höhenproben mit dargestellt. Für die Güte des Gradienten wird dabei das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben.

# 3.5 Local Meteoric Water Line

Für den Vergleich der entnommen Proben im  $\delta^{18}$ O -  $\delta^{2}$ H Diagramm in den Ergebnissen wurden für die verschiedenen Einzugsgbiete "*Local Meteoric Water Lines*" (LMWL) erstellt.



Abbildung 3-9: Local Meteoric Water Line für das Taschinasbach-Einzugsgebiet

Die dafür verwendeten Daten stammen von den, in Kapitel 3.1.1 beschriebenen, Isotopenstationen. Ausgewertet wurden Monatsmittelwerte des Isotopengehaltes von langjährigen Zeitreihen (Juli 1992 - Dezember 2009). Bei einem Vergleich dieser LMWLs mit den entnommenen Schneeproben und der GMWL stellte sich heraus, dass die erhobenen Daten über die GMWL besser beschrieben werden können. Zudem unterliegen berechnete LMWLs oftmals einem Verdunstungseffekt, wie in Abbildung 3-9 ersichtlich, und sind von daher mit Vorsicht zu handhaben (mündl. Mitteilung Dr. Ch. Külls). Aus diesem Grund werden die entnommenen Schneeproben in den Ergebnissen mit der GMWL verglichen.

# 4 Ergebnisse

# 4.1 Schneeprofile

Im Folgenden werden die Isotopengehalte in den Schneeprofilen nach Einzugsgebieten geordnet vorgestellt. Dargestellt und beschrieben werden jeweils nur die Isotopengehalte von  $\delta^{2}$ H, die Abbildungen für den Isotopengehalt von  $\delta^{18}$ O befinden sich in Anhang B. Dies dient der Übersichtlichkeit und erfolgt aus der Annahme, dass sich die beiden Isotope des Wassermoleküls im hydrologischen Kreislauf ähnlich verhalten. Um die Mächtigkeit der einzelnen Schneeschichten abzubilden, erfolgt die Darstellung der Schneeprofile in Linien. Gleichzeitig wird jede Schneeschicht beschriftet, so dass die Eigenschaften und genauen Isotopengehalte, sowie die Deuterium-Excess Werte aus Anhang A entnommen werden können. Die Beschriftung der Schneeschichten erfolgt immer von oben nach unten, die ersten Begehungen fangen dabei jeweils mit Schicht 1 zweiten Begehungen mit Schicht 21 an. Unterschiede die durch und Fraktionierungsprozesse ergeben sich zwischen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O hauptsächlich durch Verdunstung. Um diesen Einfluss zu charakterisieren werden die Isotopengehalte von  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O gegeneinander abgebildet und mit der GMWL verglichen.

# 4.1.1 Einzugsgebiet Taschinasbach

Das Schneeprofil der ersten Begehung im Nordhang liegt auf 2070 m ü. NN und hat eine Gesamttiefe von 2.32 m. Die  $\delta^2$ H Werte variieren in diesem Profil zwischen -96 ‰ und -174.1 ‰. Das Schneeprofil der zweiten Begehung liegt auf derselben Höhe, hat eine Gesamttiefe von 1,8 m und die Variation der  $\delta^2$ H Werte reicht von -110.7 ‰ bis -155.8 ‰. Das Schneeprofil der ersten Begehung im Südhang liegt auf 1957 m ü. NN und hat eine Gesamttiefe von 1.12 m. Die  $\delta^2$ H Werte variieren in diesem Profil zwischen -122.8 ‰ und -133.3 ‰. Das Schneeprofil der zweiten Begehung liegt auf 2247 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 0.57 m und die Variation der  $\delta^2$ H Werte reicht von -110.7 ‰ bis -107.3 ‰ bis -145.2 ‰.



Abbildung 4-1: δ<sup>2</sup>H Werte in den Schneeprofilen des Taschinasbach-Einzugsgebietes.

Die vier oben beschriebenen Schneeprofile sind in Abbildung 4-1 dargestellt. In den beiden Schneeprofilen im Nordhang wird ersichtlich, dass die jeweils oberste und unterste Schicht an <sup>2</sup>H angereichert ist und die Schichten TNP6 sowie TNP25 die Schichten mit den geringsten  $\delta$  <sup>2</sup>H Werten sind. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die stratigraphische Schichtung im Schneeprofil der ersten Begehung im Schneeprofil der zweiten Begehung widerspiegelt, die Variabilität des Isotopengehaltes aber geringer wird. Dabei sind die Schichten TNP8 und TNP7 gegenüber den Schichten TNP27 und TNP26 an  $\delta$  <sup>2</sup>H angereichert, während die übrigen Schichten der ersten Begehung an <sup>2</sup>H abgereichert sind. Insgesamt ist im Nordhang von der ersten zur zweiten Begehung eine Verringerung der Schichtmächtigkeit, eine Abnahme der Variabilität des Isotopengehaltes und eine Anreicherung des <sup>2</sup>H-Isotopes in den oberen Schichten festzustellen.

Aufgrund des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Problems sind im Schneeprofil der ersten Begehung aus dem Südhang nur die obersten 3 Schichten dargestellt. Der Vergleich der Schneeprofile ist von daher, sowie durch die Lage- und Höhendifferenz der aufgenommenen Profile problematisch. Im Schneeprofil der zweiten Begehung ist allerdings eine stetige Anreicherung an <sup>2</sup>H von der untersten bis zur obersten Schicht festzustellen.



Abbildung 4-2: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

Deutlich wird in Abbildung 4-2, dass die Anreicherung des <sup>2</sup>H-Isotopes in den meisten Schichten parallel zur GMWL verläuft und somit keiner Fraktionierung durch Verdunstung unterliegt. Ein deutlicher Verdunstungseffekt ist nur von Schneeschicht TNP3 zu Schneeschicht TNP22 zu erkennen. Die hier graphisch dargestellte Zuordnung der Schichten aus der ersten Begehung zu denen aus der zweiten Begehung, erfolgte anhand der Darstellung in Abbildung 4-1. Die einzige Schneeschicht deren Isotopengehalt unter der GMWL liegt ist die Schicht TNP2 aus der ersten Begehung. Diese ist hier der Schicht TNP21 zugeordnet, die eine Neuschneeprobe ist, wodurch kein wirklicher Zusammenhang besteht.

Auf eine Gegenüberstellung der Schneeprofilproben aus dem Südhang mit der GMWL wird aufgrund der geringen Probenzahl verzichtet. Erwähnt sei hier nur, dass die beiden oberen Schichten aus der ersten Begehung TSP1 und TSP2 unter der GMWL liegen, während die vier Proben aus der zweiten Begehung sich knapp über der GMWL befinden.

# 4.1.2 Einzugsgebiet Engstligen

Im Engstligen-Einzugsgebiet wurde der obere Nordhang dreimal begangen, der Südhang dagegen nur einmal. Das Schneeprofil der ersten Begehung im Nordhang liegt auf 2591 m ü. NN und hat eine Gesamttiefe von 2.32 m. Die  $\delta^2$ H Werte variieren in diesem Profil zwischen -84.6 ‰ und -199.1 ‰. Das Schneeprofil der zweiten Begehung liegt auf 2583 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 1.75 m und die Variation der  $\delta^2$ H Werte reicht von -56 ‰ bis -185.1 ‰. Das Schneeprofil der dritten Begehung liegt auf 2579 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 0.56 m und die Variation der  $\delta^2$ H Werte reicht von -85.7 ‰ bis -101.7 ‰. Das Schneeprofil der ersten Begehung im Südhang liegt auf 2191 m ü. NN und hat eine Gesamttiefe von 0.65 m. Die  $\delta^2$ H Werte variieren in diesem Profil zwischen -130.5 ‰ und -157.8 ‰.



Abbildung 4-3: δ<sup>2</sup>H Werte in den Schneeprofilen des Engstligen-Einzugsgebietes.

Die oben beschriebenen Schneeprofile sind in Abbildung 4-3 dargestellt. Bei der obersten Schneeschicht, ENP1, der ersten Begehung im Nordhang, handelt es sich um Neuschnee mit einem  $\delta^2$ H Wert von -127.7 ‰, darunter folgt die Harschschicht ENP2 mit einem  $\delta^2$ H Wert von -163.9 ‰. Die darunter liegenden Altschneeschichten ENP3 und ENP4 haben mit -103.6 ‰ und -102 ‰ einen ähnlichen  $\delta^2$ H Wert. Die

Schneeschicht ENP5 hat mit -199.1 ‰ den niedrigsten  $\delta^{2}$ H Wert aller in dieser Arbeit untersuchten Proben. Die unterste Schneeschicht der ersten Begehung ENP6 hat mit -84.6 ‰ den höchsten  $\delta^{2}$ H Wert in diesem Profil. Die Sulzschneeschicht ENP21 aus der zweiten Begehung im Nordhang hat mit -56 ‰ einen sehr hohen  $\delta^{2}$ H Wert. Die darunter liegenden Altschneeschichten sind bis zur Schneeschicht ENP24 mit einem  $\delta^{2}$ H Wert von -185 ‰ sukzessiv an <sup>2</sup>H abgereichert und darunter bis zur Schneeschicht ENP26 sukzessiv an <sup>2</sup>H angereichert. Die Eisschicht ENP27 ist die unterste Schicht in diesem Profil und hat mit -95.9 ‰ einen leicht niedrigeren  $\delta^{2}$ H Wert als die darüber liegende Altschneeschicht ENP26. Im Schneeprofil des Südhangs ist die unterste Schicht die isotopisch leichteste Schicht und die oberste Neuschneeschicht die isotopisch schwerste.



Abbildung 4-4: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen des Engstligen-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

Einzelne Schneeschichten aus der ersten Begehung lassen sich im Nordhang nur schwer entsprechenden Schichten aus der zweiten Begehung zuweisen und sind deswegen in Abbildung 4-4 nicht miteinander verbunden. Allerdings lässt sich wie im TaschinasbachEinzugsgebiet feststellen, dass die unteren Schichten in der zweiten Begehung isotopisch leichter sind und wenn man die Sulzschneeschicht ENP21 außer Acht lässt eine Homogenisierung des Isotopengehaltes stattgefunden hat. Dieser Trend zur Homogenisierung setzt sich auch im Schneeprofil der dritten Begehung fort, in dem die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem  $\delta^2$ H Wert nur noch 16 ‰ beträgt. Wie aus Abbildung 4-4 ersichtlich ist, liegt das Isotopenverhältnis der einzelnen Schneeschichten aus der dritten Begehung auf oder unter der GMWL und lässt somit auf einen Verdunstungseffekt schließen. Im Schneeprofil des Südhangs befinden sich die beiden unteren Schneeschichten nahe der GMWL und die beiden oberen Schneeschichten darauf. In den Schneeprofilen der ersten zwei Begehungen befindet sich lediglich die Eisschicht ENP27 auf der GMWL.

#### 4.1.3 Einzugsgebiet Dischma

Im Dischma-Einzugsgebiet wurde sowohl der Nordhang als auch der Südhang zweimal begangen und jeweils ein Schneeprofil entnommen. Das Schneeprofil aus der ersten Begehung im Nordhang hat eine Gesamttiefe von 1.8 m liegt auf 2345 m ü. NN und die  $\delta^2$ H Werte reichen von -101.1 ‰ bis -178.5 ‰. Das Schneeprofil aus der zweiten Begehung im Nordhang liegt auf derselben Höhe, hat eine Gesamttiefe von 1.25 m und die  $\delta^2$ H Werte variieren zwischen -52.5 ‰ und -144.1 ‰. Das Schneeprofil aus der ersten Begehung im Südhang liegt auf 2710 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 0.45 m und die  $\delta^2$ H Werte reichen von -124.7 ‰ bis -144.4 ‰. Das Schneeprofil aus der zweiten Begehung im Südhang liegt auf 2681 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 0.26 m und die  $\delta^2$ H Werte variieren zwischen -87.4 ‰ und -125.8 ‰.



Abbildung 4-5: δ<sup>2</sup>H Werte in den Schneeprofilen des Dischma-Einzugsgebietes.

In Abbildung 4-5 wird ersichtlich, dass in den Schneeprofilen aus den Nordhängen, die jeweils oberste Schicht die isotopisch schwerste ist. Die darunter liegenden Schichten lassen in der ersten Begehung kein klares Muster erkennen und die  $\delta^2$ H Werte variieren zwischen -131.2 ‰ und 178.5 ‰. Im Schneeprofil der zweiten Begehung sind die Schneeschichten unter der ersten Sulzschicht sukzessiv an <sup>2</sup>H abgereichert. Ab der Altschneeschicht DNP24 ist auch hier kein klares Muster zu erkennen und die  $\delta^2$ H Werte der darunter liegenden Schichten liegen zwischen -123.8 ‰ und -141.7 ‰.

Das Schneeprofil aus der ersten Begehung im Südhang zeigt eine relativ geringe Variabilität in den  $\delta^2$ H Werten. Die isotopisch schwerste Schneeschicht ist hier die unterste Eisschicht DSP3, gefolgt von der obersten Sulzschicht DSP1. Das Schneeprofil aus der zweiten Begehung im Südhang ist allgemein an <sup>2</sup>H angereichert, nur die unterste Eisschicht DSP23 ist isotopisch leichter als die unterste Schicht aus dem ersten Schneeprofil.

Im Nordhang ist eine Zuordnung der Schichten aus der ersten Begehung zu denen aus der zweiten Begehung nicht trivial, da einige der Schichten sich durch Schmelzprozesse nicht mehr voneinander unterscheiden und somit zwei Schneeschichten zu einer Schneeschicht geschrumpft sind. Für die Darstellung in Abbildung 4-6 und einen ungefähren Vergleich wurden die Schneeschichten DNP5, DNP6, DNP8 und DNP10 aus der ersten Begehung den Schichten DNP24, DNP25, DNP26 und DNP27 aus der zweiten Begehung zugeordnet.



Abbildung 4-6: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

Deutlich wird in Abbildung 4-6, dass aus dem Schneeprofil der ersten Begehung die Schneeschichten DNP1, DNP3, DNP4 und DNP6 nahe bei der GMWL liegen und die Schneeschicht DNP2 sogar darunter. Aus den Schichten der zweiten Begehung liegen die Schichten DNP21 und DNP 25 knapp über der GMWL und die Schichten DNP22 und DNP23 knapp darunter.

Die Zuordnung der jeweils drei Schichten aus dem Südhang fiel wesentlich leichter, allerdings ist zu beachten, dass an dem Punkt, an dem das Schneeprofil der ersten Begehung aufgenommen wurde, bei der zweiten Begehung kein Schnee mehr vorhanden war und auf einen Schneefleck knapp darunter ausgewichen wurde.



Abbildung 4-7: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

Aus Abbildung 4-7 wird deutlich, dass schon die Schichten aus dem Schneeprofil der ersten Begehung unter der GMWL liegen und damit durch den Fraktionierungsprozess der Verdunstung geprägt sind. Auch die Schneeschichten aus der zweiten Begehung liegen unter der GMWL, am deutlichsten die Schicht DSP23.

## 4.1.4 Einzugsgebiet Laschadura

Im Laschadura-Einzugsgebiet wurde der Nordhang zweimal beprobt, der Südhang dagegen nur einmal. Das Schneeprofil aus der ersten Begehung hat eine Gesamttiefe von 1.73 m und liegt auf 2510 m ü. NN. Die  $\delta^2$ H Werte reichen in diesem Profil von -108.1 ‰ bis -170.9 ‰. Das Schneeprofil aus der zweiten Begehung im Nordhang liegt auf derselben Höhe, hat eine Gesamttiefe von 1.1 m und die  $\delta^2$ H Werte variieren zwischen -96,5 ‰ und -137.8 ‰. Das Schneeprofil im Südhang liegt auf 2754 m ü. NN, hat eine Gesamttiefe von 1.08 m und die  $\delta^2$ H Werte reichen von -101.8 ‰ bis -143.6 ‰.



Abbildung 4-8: <sup>2</sup>H Werte in den Schneeprofilen des Laschadura-Einzugsgebietes.

Die Schneeprofile aus dem Laschadura-Einzugsgebiet sind in Abbildung 4-8 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass im Schneeprofil der ersten Begehung im Nordhang die unterste Schneeschicht LNP7 die isotopisch schwerste ist. Die isotopisch leichteste Schicht ist die Schicht LNP3. Im Schneeprofil der zweiten Begehung ist die Schicht LNP23 die isotopisch leichteste, die isotopisch schwerste Schicht ist hier die oberste Sulzschneeschicht. Insgesamt ist das Schneeprofil aus der zweiten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert. Im Südhang ist die isotopisch schwerste Schicht die oberste Sulzschneeschicht, die isotopisch leichteste Schicht ist die Altschneeschicht LSP3. Dazwischen liegt die Harschschicht LSP2 mit einem  $\delta$  <sup>2</sup>H Wert von -115.7 ‰. Die unter LSP3 liegenden Schichten sind bis zur Eisschicht LSP6 sukzessiv an <sup>2</sup>H angereichert.


Abbildung 4-9: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Schneeprofilen im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-9 sind die Isotopengehalte der Schneeprofile aus dem Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes der GMWL gegenübergestellt. Von den Schneeschichten aus der ersten Begehung liegen die Schichten LNP2 und LNP5 knapp über, die Schicht LNP4 knapp unter der GMWL. Die Proben aus der zweiten Begehung liegen alle auf oder unter der GMWL. Am stärksten vom Fraktionierungsprozess der Verdunstung beeinflusst sind die Schichten LNP22 und LNP23.



Abbildung 4-10: Vergleich der Isotopengehalte, aus dem Schneeprofil im Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-10 wird ersichtlich, dass die oberen drei Schneeschichten aus dem Südhang knapp über (LSP3) der GMWL liegen oder knapp darunter (LSP1, LSP2). Die drei unteren Schneeschichten liegen deutlich oberhalb der GMWL und sind somit nicht durch den Fraktionierungsprozess der Verdunstung beeinflusst.

#### 4.1.5 Fazit

Insgesamt lässt sich in allen Einzugsgebieten von der ersten zur zweiten Begehung im Mittelwert des Schneeprofils eine Anreicherung an <sup>2</sup>H feststellen. Am deutlichsten wird die Anreicherung dabei in den oberen Schichten des jeweiligen Schneeprofils. In den beiden Nordprofilen des Taschinasbach- und des Laschadura-Einzugsgebietes ist die unterste Schicht des Schneeprofils aus der zweiten Begehung isotopisch leichter als die unterste Schicht aus der ersten Begehung. In den Nordprofilen des Dischma- und des Engstligen-Einzugsgebietes besitzen die untersten Schichten in beiden Begehungen einen ähnlichen Isotopengehalt. In allen Einzugsgebieten ist zu erkennen, dass die Variabilität des Isotopengehaltes in der zweiten Begehung deutlich nachgelassen hat. Vor allem wenn die oberste Schneeschicht, die allgemein isotopisch angereichert ist außer Acht gelassen wird. Am deutlichsten wird dies im Schneeprofil aus der dritten Begehung des Engstligen-Einzugsgebiet, bei dem die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten  $\delta^2$ H Wert nur 16 ‰ beträgt, im Gegensatz zur Variabilität von 115 ‰ in der ersten Begehung. Augenscheinlich ist auch die Variabilität des  $\delta^2$ H Wertes in den Südhängen deutlich geringer als in den entsprechenden Nordhängen. Die Südhangprofile zeigen sich zudem im  $\delta^{18}$ O -  $\delta^2$ H Diagramm mehr durch den Fraktionierungsprozess der Verdunstung beeinflusst als die jeweiligen Nordhänge.

#### 4.2 Höhenproben

Die Darstellung der mittleren Isotopengehalte der Schneedecke erfolgt wie die Darstellung der Schneeprofile zuerst auf Einzugsgebietsebene und anschließend im Gesamtüberblick. Dargestellt und beschrieben werden nur die Ergebnisse für das <sup>2</sup>H-Isotop, die Ergebnisse für das <sup>18</sup>O-Isotop befinden sich in Anhang B. Für alle Proben findet eine Gegenüberstellung im  $\delta$  <sup>18</sup>O -  $\delta$  <sup>2</sup>H Diagramm statt, sodass diese mit der Steigung der GMWL verglichen werden können. Die einzelnen Punkte sind zusätzlich beschriftet und die dazugehörigen erhobenen Parameter in Anhang A aufgelistet. Die Probepunkte sind mit steigender Höhe durchlaufend nummeriert. Der tiefstgelegene Punkt jeder Probenentnahme aus der ersten Begehung beginnt mit 1, die Probenpunkte aus der zweiten Begehung beginnen mit 2 und der Nummer der entsprechenden Höhe aus der ersten Begehung.

# 4.2.1 Einzugsgebiet Taschinasbach

Im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebiet liegen die  $\delta^2$ H Werte der ersten Begehung zwischen -116 ‰ und -158.8 ‰ und die der zweiten Begehung zwischen -104.9 ‰ und -122.9 ‰.



Abbildung 4-11: Darstellung der δ<sup>2</sup>H Werte der Schneedecke im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes.

Deutlich zu sehen ist in Abbildung 4-11, dass alle Punkte aus der zweiten Begehung gegenüber den Punkten aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert sind. Die größte Differenz im  $\delta$  <sup>2</sup>H Wert der beiden Beprobungen ergibt sich zwischen den Punkten TN6 und TN26 mit einem Unterschied von 26.8 ‰, zwischen TN10 und TN30 mit einem Unterschied von 23.9 ‰ und zwischen TN11 und TN31 mit einem Unterschied von 36.3 ‰. Den geringsten Unterschied der  $\delta$  <sup>2</sup>H Werter weisen die Punkte TN7 und TN27 mit einer Differenz von 7 ‰ und die Punkte TN8 und TN28 mit einer Differenz von 9‰ auf. Die durchschnittliche Anreicherung aller doppelt beprobten Punkte beträgt 19.5 ‰. Für die erste Begehung ergibt sich ein Höhengradient von -2.58 ‰ / 100 m mit einem Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> von 0.6. Der Höhengradient der zweiten Begehung beträgt -1.58 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.3. Auffallend ist, dass die vier am tiefsten gelegenen Probenpunkte TN1-TN4 sehr nahe an dem berechneten Höhengradienten liegen. Diese vier Punkte liegen unterhalb der Waldgrenze.



Abbildung 4-12: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-12 sind die doppelt beprobten Punkte aus dem Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes der GLMW gegenübergestellt. Dabei ist ebenfalls deutlich zu sehen, dass die Probenpunkte der zweiten Begehung gegenüber denen aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert sind. Ein deutlicher Verdunstungseffekt ist hierbei nicht zu erkennen, lediglich die Punkte TN24, TN27 und TN30 aus der zweiten Begehung liegen nur knapp über der GMWL.

Die im Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebiet entnommenen Proben sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Die Variation des  $\delta^2$ H Wertes reicht in der ersten Begehung von -124.1 ‰ bis zu -145.8 ‰. In der zweiten Begehung liegen die  $\delta^2$ H Werte zwischen -106.8 ‰ und -120.9 ‰. Deutlich zu sehen ist auch hier, dass von der ersten zur zweiten Begehung eine Anreicherung von <sup>2</sup>H in der Schneedecke stattgefunden hat. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Schneelage die Punkte TS27 und TS28 sich in Lage und Höhe von den Punkten TS7 und TS8 unterscheiden.



Abbildung 4-13: Darstellung der δ<sup>2</sup>H Werte der Schneedecke im Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes.

Die größte Differenz in den  $\delta^2$ H Werten ergibt sich zwischen den Punkten TS9 und TS29 mit einem Unterschied von 25.8 ‰. Den geringsten Unterschied des  $\delta^2$ H Wertes weisen die beiden Gipfelproben TS11 und TS31 mit einer Differenz von 3.3 ‰ auf. Die durchschnittliche Anreicherung an  $\delta^2$ H von der ersten zur zweiten Begehung beträgt 12.5 ‰. Der ermittelte Höhengradient für die erste Begehung und <sup>2</sup>H liegt bei +0.75 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.16. Auf eine Berechnung des Höhengradienten für die zweite Begehung wurde hier aufgrund der geringen Probenanzahl verzichtet.



Abbildung 4-14: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-14 sind die Proben aus dem Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes der GMWL gegenübergestellt. Deutlich zu sehen ist, dass die Proben aus der ersten Begehung näher an der GMWL liegen als die Proben aus der zweiten Begehung. Vor allem die Probe TS5 liegt deutlich unter der GMWL. Die Proben TS4, TS6, TS7, TS8 und TS11 befinden sich knapp unter oder auf der GMWL. Die Proben aus der zweiten Begehung liegen alle deutlich über der GMWL sind aber gegenüber den Proben aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert.

# 4.2.2 Einzugsgebiet Engstligen

Im Engstligen-Einzugsgebiet wurde die Probenentnahme mit der höchsten Probe begonnen, sodass die fortlaufende Nummerierung der Proben im Vergleich mit den anderen Einzugsgebieten hier gegenteilig verläuft. Die Nummerierung der ersten Begehung beginnt hier mit der höchstgelegenen Probe EN1, bei der zweiten Begehung mit der höchstgelegenen Probe EN31 und bei der dritten Begehung mit der höchstgelegenen Probe EN31 und bei der dritten Begehung mit der höchstgelegenen Probe EN41. Die im höher gelegenen Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes entnommenen Proben sind in Abbildung 4-15 dargestellt. Die  $\delta^2$ H Werte aus der ersten Begehung reichen dabei von -110.5 ‰ bis zu -140.6 ‰. Die  $\delta^2$ H Werte aus der zweiten Begehung variieren zwischen -79.2 ‰ und -140.3 ‰ und die  $\delta^2$ H Werte aus der dritten Begehung variieren zwischen -85.4 ‰ und -118.4 ‰.



Abbildung 4-15: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke im höheren Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes.

Wie in Kapitel 3.1.3 erwähnt, ergaben sich im höher gelegenen Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes diverse Probleme bei der Probenentnahme, die zu der, in Abbildung 4-15 ersichtlichen, Abweichung der Höhe einzelner Punkte in den verschiedenen Begehungen führt. Ingesamt ergibt sich ein diffuses Bild zwischen den Punkten der einzelnen Begehungen. So sind die Punkte EN35, EN33, EN32 und EN31 aus der zweiten Begehung gegenüber den Punkten EN5, EN3, EN2 und EN1 aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert, während die Punkte EN34, EN38 und EN39 aus der zweiten Begehung gegenüber den Punkten EN4, EN8 und EN9 aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H abgereichert sind. Die Probepunkte aus der dritten Begehung sind bis auf die Probe EN47, gegenüber den entsprechenden Punkten aus den anderen Begehungen an <sup>2</sup>H angereichert. Der ermittelte Höhengradient liegt für die erste Begehung bei -0.88 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.06, für die zweite Begehung bei +2.47 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.12 und für die dritte Begehung bei +1.25 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.04.



Abbildung 4-16: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-16 sind die Proben aus dem höher gelegenen Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes im Vergleich mit der GMWL dargestellt. Auf eine Verbindung der Punkte der dritten Begehung mit denen aus der zweiten Begehung, sowie die Abbildung des isotopisch schwersten Punkt EN37 der über der GMWL liegt, wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Probenpunkte aus der ersten und zweiten Begehung liegen hier deutlich über der GMWL. Eine Ausnahme stellen dabei die auf dem Talgrund der Engstligen-Hochebene entnommenen Proben EN9 und EN39 dar, die sich nur knapp über der GMWL befinden. Die Probenpunkte aus der dritten Begehung liegen, bis auf den Punkt EN42, alle knapp über (EN45, EN46, EN47) oder unter (EN43, EN44, EN48) der GMWL und sind somit deutlich durch den Fraktionierungsprozess der Verdunstung beeinflusst.

In Abbildung 4-17 sind alle Punkte aus den ersten Begehungen im Engstligen-Einzugsgebiet dargestellt. Zum Vergleich der beiden Nordhänge ist hier auch der höher gelegene Nordhang noch einmal abgebildet. Im tiefer gelegenen Nordhang variieren die  $\delta^2$ H Werte zwischen -118 ‰ und -130.3 ‰. Die Variation der  $\delta^2$ H Werte im Südhang liegt zwischen -115.6 ‰ und -147.8 ‰



Abbildung 4-17: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke der ersten Begehungen im Engstligen-Einzugsgebietes.

Aus Abbildung 4-17 wird deutlich, dass die Variation der  $\delta^{2}$ H Werte im tieferen Nordhang wesentlich geringer ist als die Variation im höheren Nordhang. Bei der Betrachtung des Südhanges fällt auf, dass vor allem die Gipfelprobe ES1 an <sup>2</sup>H angereichert ist und zusammen mit der isotopisch leichten im Hang liegenden Probe ES3, fast die gesamte Variabilität der Proben im Südhang erklären. Für den Südhang ergibt sich ein Höhengradient  $\delta^{2}$ H von +0.18 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.00. Der Höhengradient von  $\delta^{2}$ H für beide Nordhänge liegt bei -0.7 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.17. Der Höhengradient für den unteren Nordhang ist hier nicht dargestellt, ergibt aber eine Steigung von -1.56 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.6.



Abbildung 4-18: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben der ersten Begehungen im Engstligen-Einzugsgebiet, mit der Global Meteoric Water Line.

Alle Punkte der ersten Begehungen aus dem Engstligen-Einzugsgebiet sind in Abbildung 4-18 der GMWL gegenübergestellt. Wie schon in Abbildung 4-16 zu sehen. liegen die Probenpunkte aus dem höheren Nordhang, bis auf die Probe EN9, alle deutlich über der GMWL. Die Proben aus dem tieferen Nordhang dagegen liegen eindeutig näher an der GMWL und der Punkt EN27 deutlich darunter. Im Südhang liegt der Punkt ES6 nahe an der GMWL, der Punkt ES4 auf der GMWL und die Punkte ES7 und ES8 unter der GMWL. Die restlichen Punkte des Südhangs liegen eindeutig über der GMWL.

# 4.2.3 Einzugsgebiet Dischma

Die  $\delta^{2}$ H Werte der Schneedecke im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes sind in Abbildung 4-19 dargestellt. Die  $\delta^{2}$ H Werte aus der ersten Begehung liegen hier zwischen -142.5 ‰ und -153.3 ‰, die  $\delta^{2}$ H Werte aus der zweiten Begehung variieren zwischen -111.3 ‰ und -146.6 ‰. Die  $\delta^{2}$ H Werte der ersten Begehung zeigen somit eine deutlich geringere Variabilität als die der zweiten Begehung.



Abbildung 4-19: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes.

Deutlich zu sehen ist in Abbildung 4-19, dass die Probenpunkte der zweiten Begehung gegenüber den entsprechenden Punkten aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert sind. Die größte Differenz der  $\delta$  <sup>2</sup>H Werte ergibt sich dabei zwischen den Punkten DN7 und DN27 mit einem Unterschied von 35.3 ‰ und die zweitgrößte zwischen den Punkten DN6 und DN26 mit einem Unterschied von 22.1 ‰. Den geringsten Unterschied der  $\delta$  <sup>2</sup>H Werte weisen die Punkte DN4 und DN24 mit einer Differenz von 3.2 ‰ und die Punkte DN9 und DN29 mit einer Differenz von 4.25 ‰ auf. Die durchschnittliche Anreicherung mit  $\delta$  <sup>2</sup>H von der ersten zur zweiten Begehung aller doppelt beprobten Punkte beträgt 14.8 ‰. Der ermittelte Höhengradient von  $\delta$  <sup>2</sup>H für die erste Begehung beträgt -0.72 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.5, der Höhengradient für die zweite Begehung -1.36 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.1.



Abbildung 4-20: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-20 sind die doppelt beprobten Punkte im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes im Vergleich mit der GMWL aufgetragen. Augenscheinlich liegen die Punkte der ersten Begehung, bis auf den Punkt DN4, über der GMWL. Von den Punkten der zweiten Begehung liegen die Punkte DN28, DN29, DN30 und DN31, also die höchstgelegen Probepunkte, knapp über der GMWL, während die tiefer gelegenen Probepunkte unter der GMWL liegen. Auffällig ist hier auch, dass die Steigung der Geraden, die die jeweiligen Probepunkte miteinander verbindet, eindeutig geringer ist als die Steigung der GMWL. Besonders auffallend ist dabei die Verbindungsgerade zwischen Punkt DN9 und DN 29, welche die geringste Steigung aufweist.

Die Probenpunkte aus den beiden Begehungen im Südhang des Dischma-Einzugsgebietes sind in Abbildung 4-21 dargestellt. Die Variation des  $\delta^2$ H Wertes reicht dabei in der ersten Begehung von -132 ‰ bis -145.4 ‰. Die Proben aus der zweiten Begehung variieren zwischen -117.7 ‰ und -140.3 ‰. Ersichtlich ist hier, dass die Punkte aus der zweiten Begehung gegenüber denen aus der ersten Begehung an <sup>2</sup>H angereichert sind. Allerdings handelt es sich bei der zweiten Begehung nur um drei Probepunkte, von denen sich die beiden Punkte DS27 und DS28, aufgrund des in Kapitel 3.1.4 beschriebenen Schneemangels, in Lage und Höhe von den Punkten der ersten Begehung unterscheiden. Die Differenz des  $\delta^2$ H Wertes beträgt zwischen den Punkten DS7 und DS27 6.7 ‰, zwischen den Punkten DS8 und DS28 26.7 ‰ und zwischen den Punkten DS9 und DS29 4.4 ‰.



Abbildung 4-21: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke im Südhang des Dischma-Einzugsgebietes.

Auffallend ist in der ersten Begehung, dass die Punkte DS1 und DS7 isotopisch angereichert sind, während alle anderen Punkte, bis auf DS4, unter dem ermittelten Höhengradienten liegen und damit geringere  $\delta^2$ H Werte aufweisen. Der ermittelte Höhengradient beträgt für die erste Begehung -0.92 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.3. Für die zweite Begehung wurde aufgrund der geringen Probenzahl auf eine Darstellung des Höhengradienten verzichtet.



Abbildung 4-22: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Südhang des Dischma-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-22 sind die Isotopengehalte der Proben aus dem Dischma-Südhang der GMWL gegenübergestellt. Auffallend ist dabei, dass alle Probenpunkte der ersten Begehung, bis auf die Gipfelprobe DS9 auf oder unter der GMWL liegen. Am weitesten unter der GMWL liegen die Punkte DS4 und DS5. Die Probenpunkte DS7 und DS27, sowie die Punkte DS8 und DS28 sind zwar miteinander verbunden, lassen sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Höhe und Lage kaum miteinander vergleichen. Die Verbindungsgerade zwischen DS9 und DS29 weist eine wesentlich geringere Steigung auf als die GMWL. Auffallend ist auch, dass der Punkt DS27 aus der zweiten Begehung über der GMWL liegt.

#### 4.2.4 Einzugsgebiet Laschadura

In Abbildung 4-23 sind die  $\delta^2$ H Werte der Proben aus dem Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes dargestellt. Die  $\delta^2$ H Werte der ersten Begehung variieren dabei zwischen -130.5 ‰ und 150.6 ‰. Diese Variation ist allerdings hauptsächlich durch die ersten zwei Probenpunkte LN0 und LN1 verursacht und nimmt mit der Höhe ab. Bei einer Betrachtung der höchsten vier Punkte liegt die Variation des  $\delta^2$ H Wertes nur noch zwischen -131.1 ‰ und -139.1 ‰. Die  $\delta^2$ H Werte der zweiten Begehung variieren zwischen -107.6 ‰ und -137.5 ‰. Auffällig ist dabei, dass die höchstgelegene Probe LN27 der zweiten Begehung die isotopisch schwerste ist und die am zweittiefsten gelegene Probe LN22 die isotopisch leichteste ist.



Abbildung 4-23: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes.

Insgesamt ist eine eindeutige Anreicherung an  $\delta^2$ H von der ersten zur zweiten Begehung festzustellen. Die größte Differenz weisen die Punkte LN1 und LN21 mit 26.9 ‰ auf und die zweitgrößte die Punkte LN7 und LN27 mit 25.7 ‰. Der geringste Unterschied im  $\delta^2$ H Wert besteht zwischen den Punkten LN6 und LN26 mit 8.5 ‰. Die durchschnittliche Anreicherung an  $\delta^2$ H von der ersten zur zweiten Begehung beträgt 17.9 ‰. Der Höhengradient für die erste Begehung und  $\delta^2$ H liegt bei +0.46 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.03. der Höhengradient für die zweite Begehung beträgt +3.1 ‰ mit einem R<sup>2</sup> von 0.46.



Abbildung 4-24: Vergleich der Isotopengehalte, aus den Proben im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes, mit der Global Meteoric Water Line.

In Abbildung 4-24 sind die Proben aus dem Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes der GMWL gegenübergestellt. Die Proben aus der ersten Begehung liegen meist über der GMWL, am weitesten entfernt liegen die Punkte LN6, LN7 und LN9. Auf der GMWL liegt nur der Punkt LN0. Von den Proben aus der zweiten Begehung liegen die Punkte LN26 und LN27 über der GMWL, die restlichen Proben darunter. Augenscheinlich weisen alle Verbindungslinien zwischen den Punkten aus der ersten und der zweiten Begehung geringere Steigungen als die GMWL auf. Die geringsten Steigungen besitzen die Verbindungslinien zwischen den Punkten LN2 und LN22 und den Punkten LN6 und LN26.



Abbildung 4-25: Darstellung der δ 2H Werte der Schneedecke im Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes.

Die  $\delta^2$ H Werte der Schneedecke im Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes sind in Abbildung 4-25 dargestellt. Die Variation der  $\delta^2$ H Werte liegt dabei zwischen -118.3 ‰ und -148.1 ‰. Erstaunlich ist, dass die höchst gelegene Probe LS6 den höchsten  $\delta^2$ H Wert aufweist und die am tiefsten gelegene Probe LS6 den niedrigsten  $\delta^2$ H Wert. Weiterhin fällt die Probe LS1 mit einem hohen  $\delta^2$ H Wert und die Probe LS4 mit einem niedrigen  $\delta^2$ H Wert auf. Der ermittelte Höhengradient für  $\delta^2$ H liegt im Südhang bei +2.58 ‰ / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.36. Auf einen Vergleich der Proben aus dem Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes mit der GMWL wird hier aufgrund der geringen Probenzahl verzichtet. Erwähnt sei hier nur, dass die Proben LS0 und LS5 über der GMWL liegen, die Probe LS6 auf der GMWL und die restlichen Proben unter der GMWL. Am weitesten unter der GMWL befindet sich die Probe LS1.

#### 4.2.5 Fazit

Durch die erhobenen Höhenproben lässt sich feststellen, dass ein signifikanter Höhengradient nur in drei der sechzehn Begehungen vorhanden ist. Dies sind jeweils erste Begehungen in Nordhängen. Zudem ergeben sich in den meisten Südhängen und in allen Begehungen im Laschadura-Einzugsgebiet inverse Gradienten. Deutlich wird, dass in der Zeit zwischen der ersten und der zweiten Begehung in allen Einzugsgebieten eine Anreicherung an <sup>2</sup>H stattfindet. Lediglich im Engstligen-Einzugsgebiet ist diese zwischen der ersten und zweiten Begehung weniger ausgeprägt. Durch die Darstellung im  $\delta$  <sup>18</sup>O -  $\delta$  <sup>2</sup>H Diagramm wird zudem deutlich, dass die Anreicherung an schweren Isotopen hauptsächlich auf Verdunstung und Sublimation zurückzuführen ist.

# 4.3 Berechnung des mittleren $\delta^2 H$ Wert der Schneeprofile

Für einen Vergleich der Höhenproben mit dem mittleren Isotopengehalt der Schneeprofile, muss die Schneehöhe der einzelnen Schneeprofilschichten in das Schneewasseräquivalent umgerechnet werden, damit der prozentuale Anteil am Gesamtprofil bestimmt werden kann. Bei der Aufnahme der Schneeprofile vor Ort wurden nur die Festigkeit und die Körnung, sowie die Mächtigkeit der einzelnen Schichten bestimmt. Wie sich später herausstellte ist diese manuelle Methode für eine Bestimmung des Schneewasseräquivalentes ungeeignet (TECHEL & PIELMEIER, 2010). Aus diesem Grund wurden drei Methoden zur Abschätzung des prozentualen Anteils der einzelnen Schichten getestet und anhand der jeweils neben dem Profil entnommenen Probe des mittleren Isotopengehaltes der Schneedecke überprüft. Zuerst wurde der mittlere Isotopengehalt des Schneeprofils nur nach der Schichthöhe gewichtet berechnet. Für die zweite Berechnung wurden die Festigkeit und die Höhe der einzelnen Schichten gewichtet. Bei der dritten Berechnung wurde die Gewichtung anhand der Höhe und einer stetigen Zunahme der Dichte mit der Tiefe durchgeführt. Die Ergebnisse dieser drei Methoden sind in Tabelle 4-1 dargestellt und werden dort mit dem  $\delta^{2}H$  Wert der neben den Schneeprofilen entnommenen Höhenproben verglichen.

| Schneeprofil | Nach der Höhe<br>gewichtet |       | Nach Fe<br>und I<br>gewi | estigkeit<br>Höhe<br>chtet | Nach T<br>Höhe ge | iefe und<br>ewichtet | Höhenprobe |        |  |
|--------------|----------------------------|-------|--------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|------------|--------|--|
|              | ‰ Δ                        |       | ‰                        | Δ                          | ‰                 | Δ                    | ‰          |        |  |
| TNP1         | -135.1                     | -3.3  | -131.8                   | 0                          | -135.6            | -3.8                 | -131.8     | (TN8)  |  |
| TNP2         | -131.2                     | -8.3  | -130.7                   | -7.8                       | -132.6            | -9.7                 | -122.9     | (TN28) |  |
| TSP2         | -131.7                     | -10.8 | -132.7                   | -11.8                      | -134.6            | -13.7                | -120.9     | (TS30) |  |
| ENP1         | -132.9                     | 1     | -134.3                   | -0.4                       | -134.2            | -0.3                 | -133.9     | (EN5)  |  |
| ENP2         | -128.8                     | -18.8 | -125                     | -15                        | -128.8            | -18.8                | -110       | (EN35) |  |
| ENP3         | -90                        | -4.6  | -90.2                    | -4.8                       | -89.9             | -4.5                 | -85.4      | (EN44) |  |
| ESP1         | -146                       | 1.8   | -145                     | 2.8                        | -147.3            | 0.5                  | -147.8     | (ESP1) |  |
| DNP1         | -149                       | -2.4  | -153.6                   | -7                         | -151.2            | -4.6                 | -146.6     | (DN7)  |  |
| DNP2         | -128.2                     | -16.9 | -129.8                   | -18.5                      | -130.3            | -19                  | -111.3     | (DN27) |  |
| DSP1         | -140.8                     | 3.6   | -137.9                   | 6.5                        | -140.6            | 3.8                  | -144.4     | (DS8)  |  |
| DSP2         | -119.6                     | -1.9  | -120.8                   | -3.1                       | -121.1            | -3.4                 | -117.7     | (DS28) |  |
| LNP1         | -136.5                     | -0.6  | -133.4                   | 2.5                        | -133.6            | 2.3                  | -135.9     | (LN5)  |  |
| LNP2         | -118.5                     | -6.6  | -117.6                   | -5.7                       | -119.1            | -7.2                 | -111.9     | (LN25) |  |
| LSP1         | -128.6                     | -10.1 | -127.6                   | -9.1                       | -130.2            | -11.7                | -118.5     | (LS6)  |  |
|              | $\sigma_1$                 | 6.8   | $\sigma_2$               | 7.1                        | $\sigma_3$        | 7.3                  |            |        |  |
|              | $\sigma_{1N}$              | 1.9   | $\sigma_{\rm 2N}$        | 4.1                        | $\sigma_{\rm 3N}$ | 3.2                  |            |        |  |

Tabelle 4-1: Vergleich der drei Methoden zur Bestimmung des mittleren δ<sup>2</sup>H Wert in den Schneeprofilen.

In Tabelle 4-1 wird ersichtlich, dass die durch die drei Methoden berechneten  $\delta^2$ H Werte nur ungenügend geeignet sind, um die mit den Höhenproben ermittelten mittleren  $\delta^2$ H Werte der Schneedecke darzustellen. Die Standardabweichung  $\sigma$  ergibt für alle drei Methoden Werte um 7 ‰, die maximale Differenz beträgt fast 20 ‰. Am besten lässt sich der, durch die Höhenproben ermittelte, Isotopengehalt durch die nach der Höhe gewichteten Werte berechnen. Auffallend ist, dass sich durch alle drei Methoden die Nordhangprofile aus der ersten Begehung in allen Einzugsgebieten gut ermitteln lassen. Diese sind in Tabelle 4-1 durch dicke Schriftzeichen hervorgehoben. Die Standardabweichung  $\sigma_N$  variiert dabei zwischen 1.9 ‰ und 4.1 ‰, die maximale Differenz zwischen 3.3 ‰ und 7 ‰.

# Multiple Lineare Regression

# 4.3.1 Übersicht

Für einen ersten Eindruck über den Einfluss der Parameter, auf den mittleren Isotopengehalt und den mittleren Deuterium-Excess der Schneedecke, wird für jeden Parameter eine einfache lineare Regression mit der jeweiligen Zielgröße durchgeführt. Der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Zielgröße wird dabei durch das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> quantifiziert. In Tabelle 4-2 ist das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> der einfachen linearen Regression, für jeden einzelnen Parameter und die Zielgröße  $\delta^2$ H, dargestellt. Für eine bessere Verständlichkeit der Tabellen werden die elf verwendeten Parameter und die entsprechenden Abkürzungen kurz aufgelistet. Der erste Parameter ist die Höhe ü. NN (Höhe). Darauf folgen die Differenz der Schneetiefe (Diff), die Hangneigung (HN), die Hangausrichtung (HA), der Gipfelparameter (G), die Waldbedeckung (WB), die horizontale (Khori) und die vertikale (Kvert) Hangkonvexität, der Tag des Jahres (DOY), der Breitengrad (LA) und der Längengrad (LO). Die signifikantesten Parameter, ab einem R<sup>2</sup> von 0.1, sind in den folgenden Tabellen durch dicke Schriftzeichen hervorgehoben.

| Parameter | Taschinasbach |             | Engstligen |             | Dischma   |             | Laschadura |             | Alle EZG  |             |
|-----------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|
|           | Beg.<br>1     | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1  | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 | Beg.       | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 |
| Höhe      | 0.02          | 0.01        | 0.07       | 0.07        | 0.07      | 0.00        | 0.12       | 0.15        | 0.13      | 0.00        |
| Diff      | 0.03          | 0.14        | 0.02       | 0.18        | 0.31      | 0.15        | 0.01       | 0.00        | 0.01      | 0.03        |
| HN        | 0.05          | 0.05        | 0.14       | 0.10        | 0.04      | 0.01        | 0.00       | 0.02        | 0.06      | 0.01        |
| HA        | 0.02          | 0.06        | 0.02       | 0.10        | 0.44      | 0.03        | 0.00       | 0.10        | 0.00      | 0.05        |
| G         | 0.02          | 0.00        | 0.01       | 0.00        | 0.05      | 0.03        | 0.00       | 0.01        | 0.01      | 0.01        |
| WB        | 0.02          | 0.03        | 0.02       | 0.01        | 0.00      | 0.01        | 0.04       | 0.00        | 0.07      | 0.00        |
| Kvert     | 0.00          | 0.00        | 0.01       | 0.22        | 0.02      | 0.02        | 0.06       | 0.01        | 0.00      | 0.02        |
| Khori     | 0.10          | 0.08        | 0.01       | 0.00        | 0.00      | 0.00        | 0.00       | 0.00        | 0.01      | 0.00        |
| DOY       | -             | 0.56        | -          | 0.42        | -         | 0.35        | -          | 0.38        | 0.19      | 0.17        |
| LA        | -             | -           | -          | -           | -         | -           | -          | -           | 0.00      | 0.01        |
| LO        | -             | -           | -          | -           | -         | -           | -          | -           | 0.18      | 0.14        |

Tabelle 4-2: Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen den einzelnen Parametern und  $\delta^{2}H$ 

Insgesamt ist festzustellen, dass die verwendeten Parameter einzeln nur einen geringen Einfluss auf die Zielgröße  $\delta^2$ H erklären. Von den in allen Modellierungen verwendeten Parametern besitzt die Differenz der Schneetiefe die höchsten Korrelationen. Die Höhe weist in allen Einzugsgebieten eine geringe Korrelation auf. Lediglich im Laschadura-Einzugsgebiet, in dem ein inverser Höhengradient vorliegt, ist sie als signifikant zu bezeichnen. Auffallend ist die hohe Korrelation mit dem Parameter Tag des Jahres in allen Einzugsgebieten. Zudem erweist sich für die Proben aus allen Einzugsgebieten der Parameter Längengrad als signifikant. In Tabelle 4-3 ist das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> der einfachen linearen Regression für jeden einzelnen Parameter und die Zielgröße  $\delta^{18}$ O abgebildet.

| Parameter | Taschinasbach |             | Engstligen |             | Dischma   |             | Laschadura |             | Alle EZG  |             |
|-----------|---------------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|
|           | Beg.<br>1     | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1  | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1  | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 |
| Höhe      | 0.03          | 0.00        | 0.22       | 0.03        | 0.11      | 0.00        | 0.06       | 0.09        | 0.18      | 0.00        |
| Diff      | 0.13          | 0.21        | 0.02       | 0.20        | 0.35      | 0.18        | 0.07       | 0.02        | 0.00      | 0.05        |
| HN        | 0.03          | 0.05        | 0.21       | 0.07        | 0.06      | 0.01        | 0.02       | 0.01        | 0.04      | 0.01        |
| HA        | 0.00          | 0.02        | 0.00       | 0.06        | 0.47      | 0.06        | 0.04       | 0.06        | 0.02      | 0.02        |
| G         | 0.04          | 0.00        | 0.00       | 0.00        | 0.08      | 0.03        | 0.01       | 0.03        | 0.03      | 0.02        |
| WB        | 0.03          | 0.02        | 0.06       | 0.00        | 0.01      | 0.00        | 0.05       | 0.00        | 0.09      | 0.00        |
| Kvert     | 0.01          | 0.00        | 0.02       | 0.18        | 0.02      | 0.01        | 0.09       | 0.00        | 0.00      | 0.02        |
| Khori     | 0.08          | 0.08        | 0.00       | 0.00        | 0.00      | 0.00        | 0.00       | 0.00        | 0.00      | 0.00        |
| DOY       | -             | 0.45        | -          | 0.44        | -         | 0.32        | -          | 0.43        | 0.17      | 0.20        |
| LA        | -             | -           | -          | -           | -         | -           | -          | -           | 0.00      | 0.01        |
| LO        | -             | -           | -          | -           | -         | -           | -          | -           | 0.13      | 0.11        |

Tabelle 4-3: Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen den einzelnen Parametern und  $\delta$  <sup>18</sup>O

Auch in Tabelle 4-3 ist festzustellen, dass sich insgesamt nur eine geringe Korrelation der einzelnen Parameter mit der Zielgröße  $\delta^{18}$ O ergibt. Die größte Korrelation wird bei den in allen Regressionen verwendeten Parametern ebenso durch die Differenz der Schneetiefe erreicht. Auffallend ist die größere Korrelation des Parameters Höhe im Engstligen- und im Dischma-Einzugsgebiet gegenüber der geringeren Korrelation im Laschadura-Einzugsgebiet. Deutlich wird auch wieder die hohe Korrelation des

Parameters Tag des Jahres für die Proben aus mehreren Begehungen, sowie der Einfluss des Parameters Längengrad für alle Einzugsgebiete. In Tabelle 4-4 ist die Korrelation der einzelnen Parameter mit der Zielgröße Deuterium-Excess dargestellt.

| Parameter | Taschinasbach |             | Engstligen |               | Dischma   |             | Laschadura |             | Alle EZG  |             |
|-----------|---------------|-------------|------------|---------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------|-------------|
|           | Beg.<br>1     | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1  | Beg.<br>1+2+3 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 | Beg.       | Beg.<br>1+2 | Beg.<br>1 | Beg.<br>1+2 |
| Höhe      | 0.01          | 0.09        | 0.75       | 0.39          | 0.19      | 0.10        | 0.21       | 0.18        | 0.15      | 0.06        |
| Diff      | 0.66          | 0.24        | 0.00       | 0.08          | 0.33      | 0.22        | 0.48       | 0.20        | 0.21      | 0.15        |
| HN        | 0.03          | 0.01        | 0.21       | 0.06          | 0.12      | 0.03        | 0.10       | 0.01        | 0.02      | 0.00        |
| HA        | 0.48          | 0.28        | 0.31       | 0.14          | 0.38      | 0.17        | 0.66       | 0.13        | 0.42      | 0.19        |
| G         | 0.07          | 0.01        | 0.11       | 0.11          | 0.05      | 0.04        | 0.08       | 0.08        | 0.06      | 0.05        |
| WB        | 0.01          | 0.03        | 0.21       | 0.11          | 0.01      | 0.02        | 0.03       | 0.01        | 0.03      | 0.01        |
| Kvert     | 0.11          | 0.05        | 0.06       | 0.03          | 0.01      | 0.00        | 0.15       | 0.01        | 0.00      | 0.01        |
| Khori     | 0.00          | 0.00        | 0.09       | 0.04          | 0.00      | 0.00        | 0.17       | 0.06        | 0.01      | 0.00        |
| DOY       | -             | 0.25        | -          | 0.06          | -         | 0.08        | -          | 0.22        | 0.01      | 0.04        |
| LA        | -             | -           | -          | -             | -         | -           | -          | -           | 0.02      | 0.01        |
| LO        | -             | -           | -          | -             | -         | -           | -          | -           | 0.06      | 0.09        |

Tabelle 4-4: Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> zwischen den einzelnen Parametern und Deuterium-Excess

Aus Tabelle 4-4 wird ersichtlich, dass die einzelnen Parameter eine deutlich höhere Korrelation mit der Zielgröße Deuterium-Excess aufweisen als mit den beiden anderen Zielgrößen. Auch hier ergibt sich die größte Korrelation mit dem Parameter Differenz der Schneetiefe, lediglich im Engstligen-Einzugsgebiet ist der Einfluss dieses Parameters geringer. Auffallend ist zudem, dass die Parameter Höhe und Hangausrichtung eine hohe Korrelation aufweisen. Der Einfluss der Parameter Tag des Jahres und Längengrad ist hier deutlich geringer.

# 4.3.2 Einzugsgebiet Taschinasbach

#### **Begehung 1**

In der ersten Begehung im Taschinasbach-Einzugsgebiet ergibt sich, wie aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 ersichtlich, für  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O nur eine geringe Korrelation mit den einzelnen Parametern. Aus diesem Grund führt auch die schrittweise MLR nur zu einem  $R_a^2$  von 0.19 für  $\delta^2 H$  und zu einem  $R_a^2$  von 0.21 für  $\delta^{18}$ O. Von daher werden diese Modelle verworfen und nicht mehr weiter beschrieben. Die aussagekräftigste Regressionsgleichung für den Deuterium-Excess beeinhaltet die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung. Diese Gleichung führt zu einem  $R_a^2$  von 0.69. Bei der Überprüfung dieser Gleichung wurde festgestellt, dass eine Probe aus der Grundgesamtheit von 22 Proben ein eindeutiger Ausreißer ist. Dies ist die Gipfelprobe TN11 aus dem Nordhang. Laut dem Leverage-Plot ist dies ein Ausreißer mit einer eindeutigen Hebelwirkung und auch die Cook's Distanz, die normalerweise nicht größer als 1 sein sollte, liegt über 5. Da sich der Probenpunkt TN11 auch in der Regression aller Probenpunkte als Ausreißer identifizieren lässt, wird dieser Punkt eliminiert. Anschließend wird durch die schrittweise MLR ein  $R_a^2$  von 0.76 erreicht. Eine Verbesserung des  $R_a^2$  von 0.0019 kann durch das Entfernen des Parameters Höhe erreicht werden, darauf wird jedoch verzichtet. Die ermittelte MLR Gleichung lautet:

$$Deuterium - Excess = 9.83 + 0.000513 * H\ddot{o}he + 1.74 * Diff + 0.906 * HA$$
 Gl. 4-1

Der signifikanteste Parameter ist dabei die Differenz der Schneetiefe. Einen großen erklärenden Einfluss hat auch die Hangausrichtung, während der Parameter Höhe nur einen geringen erklärenden Einfluss besitzt.



Abbildung 4-26: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess im Taschinasbach-Einzugsgebiet.

Die Signifikanz der verwendeten Parameter ist in Abbildung 4-26 dargestellt und zeigt ein weiteres Mal den starken Einfluss der Differenz der Schneetiefe auf den Deuterium-Excess und die geringere Signifikanz der Höhe.

#### Begehung 1 und 2

Im Taschinasbach-Einzugsgebiet wurden in beiden Begehungen zusammen 35 Proben entnommen. Nachdem für alle drei Zielgrößen die schrittweise MLR durchgeführt und die Diagnostikplots überprüft wurden, stellte sich die Gipfelprobe der ersten Begehung wiederum als Ausreißer mit Hebelwirkung heraus und wurde aus der Grundgesamtheit eliminiert. Die aussagekräftigste MLR Gleichung ergab sich anschließend für Deuterium-Excess unter Berücksichtigung der Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangneigung, Hangausrichtung, horizontale Hangkonvexität, Gipfelparameter und Tag des Jahres. Eine minimale Verbesserung des  $R^2_a$  von 0.01 konnte durch das Weglassen der Parameter Höhe und Hangneigung erreicht werden, darauf wurde jedoch verzichtet. Die MLR Gleichung für den Deuterium-Excess hat ein  $R^2_a$  von 0.65 und lautet:

$$Deuterium-Excess = 5.39 + 0.00119 * H\"ohe + 1.52 * Diff - 0.0448 * HN + 0.377 * HA + 0.411 * K_{hori} + 1.04 * G + 0.0443 * DOY$$
Gl. 4-2

Den stärksten Einfluss auf die Zielgröße Deuterium-Excess hat in dieser Gleichung die Differenz der Schneetiefe. Die Signifikanz der anderen Parameter nimmt in folgender Reihenfolge ab: Tag des Jahres, Gipfelparameter, Höhe, Hangausrichtung, horizontale Hangkonvexität und Hangneigung.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O wurden in der schrittweisen MLR dieselben erklärenden Parameter ermittelt. Dies sind die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Neigung, horizontale Hangkonvexität, und Tag des Jahres. Für  $\delta^{2}$ H hat die beste ermittelte MLR Gleichung ein  $R_{a}^{2}$  von 0.63 und lautet:

$$\delta^2 H = -151.8 - 0.0078 * H\ddot{o}he - 3.35 * Diff + 0.163 * HN - 3.68 * K_{hori} + 0.361 * DOY$$
  
Gl. 4-3

Für  $\delta^{18}$ O hat die beste ermittelte MLR Gleichung ein  $R_a^2$  von 0.58 und lautet:

$$\delta^{18}O = -19.5 - 0.00116 * H\ddot{o}he - 0.62 * Diff + 2.63 * HN - 0.502 * K_{hori} + 0.0387 * DOY$$
  
Gl. 4-4

Den stärksten Einfluss in den ermittelten MLR Gleichungen für  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O hat der Parameter Tag des Jahres. Bei  $\delta^{2}$ H folgen darauf die Parameter Höhe und Differenz der

Schneetiefe. Bei  $\delta^{18}$ O ist die Signifikanz der Schneetiefe stärker als die Höhe. Den geringsten Einfluss der verwendeten Variablen bei  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O hat der Parameter Hangneigung.



Abbildung 4-27: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für beide Begehungen im Taschinasbach-Einzugsgebiet.

Die Parametersignifikanz, der in den Modellen verwendeten Parametern, ist in Abbildung 4-27 dargestellt. Die jeweiligen nicht verwendeten Parameter sind mit einem X gekennzeichnet. In dieser Abbildung wird vor allem der Einfluss der Parameter Differenz der Schneetiefe und Tag des Jahres, sowohl für den Deuterium-Excess, als auch für  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O deutlich. Zudem zeigt sich der geringe Einfluss des Parameters Hangneigung auf alle drei Zielgrößen.

4.3.3 Einzugsgebiet Engstligen

#### **Begehung 1**

In der ersten Begehung im Engstligen-Einzugsgebiet ergibt sich, wie aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 ersichtlich ist, für  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O nur eine geringe Korrelation mit den einzelnen Parametern. Aus diesem Grund führt auch die schrittweise MLR nur zu einem  $R_{a}^{2}$  von 0.2 für  $\delta^{2}$ H und zu einem  $R_{a}^{2}$  von 0.29 für  $\delta^{18}$ O. Von daher werden diese Modelle verworfen und nicht mehr weiter beschrieben. Für die Beschreibung des Deuterium-Excess werden durch die schrittweise MLR die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, die Hangausrichtung und die horizontale Hangkonvexität ausgewählt. Die berechnete MLR Gleichung hat ein  $R_{a}^{2}$  von 0.8 und lautet:

$$Deuterium-Excess = 3.88 + 0.00404 * H\"ohe + 0.793 * Diff + 0.492 * HA - 0.479 * K_{hori}$$
  
Gl. 4-5

Der signifikanteste Parameter in dieser Gleichung ist eindeutig die Höhe. Von den anderen drei Parametern hat die Hangausrichtung die größte Signifikanz, gefolgt von der Differenz der Schneetiefe und der horizontalen Hangkonvexität.



Abbildung 4-28: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die erste Begehung im Engstligen-Einzugsgebiet.

In Abbildung 4-28 wird ein weiteres Mal der signifikante Einfluss des Parameters Höhe auf die Zielgröße Deuterium-Excess deutlich. Hier zeigt sich auch der geringere Einfluss der Parameter horizontale Hangkonvexität und Differenz der Schneetiefe.

## Begehung 1,2 und 3

Für die MLR Gleichungen aller drei Begehungen steht eine Grundgesamtheit von 39 Proben zur Verfügung. Die aussagekräftigste MLR Gleichung für den Deuterium-Excess besteht aus den sechs Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, Tag des Jahres und der vertikalen und horizontalen Hangkonvexität. Diese Gleichung hat ein  $R_a^2$  von 0.81 und lautet:

$$Deuterium-Excess = 10.3 + 0.00421 * H\"ohe + 1.28 * Diff + 0.614 * HA - 0.428 * K_{hori} + 0.725 * K_{vert} - 0.0687 * DOY$$

$$Gl. 4-6$$

Für die Zielgröße Deuterium-Excess ist der Parameter Höhe am signifikantesten, aber auch die Parameter Tag des Jahres und Differenz der Schneetiefe weisen eine hohe Signifikanz auf. Die geringste erklärende Signifikanz wird hier durch den Parameter horizontale Hangkonvexität beschrieben.



Abbildung 4-29: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Engstligen-Einzugsgebiet.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O wurden in der schrittweisen MLR dieselben erklärenden Parameter ermittelt. Dies sind die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, vertikale Hangkonvexität und der Tag des Jahres. Für  $\delta^{2}$ H ergibt sich dabei ein R<sup>2</sup> von 0.5 und die MLR Gleichung lautet:

$$\delta^2 H = -149.1 - 0.00649 * H\ddot{o}he - 6.66 * Diff + 4.8 * HA + 4.39 * K_{vert} + 0.348 * DOY$$
  
Gl. 4-7

Für  $\delta^{18}$ O ergibt sich ein R<sup>2</sup> von 0.53 und die MLR Gleichung lautet:

$$\delta^{-18}O = -19.91 - 0.00136 * H\ddot{o}he - 0.979 * Diff + 0.523 * HA + 0.46 * K_{vert} + 0.0523 * DOY Gl. 4-8$$

Der signifikanteste Parameter ist sowohl für  $\delta^{2}$ H als auch für  $\delta^{18}$ O der Tag des Jahres gefolgt von der Differenz der Schneetiefe. Die Standardabweichung der 39 Probenpunkte beträgt für  $\delta^{2}$ H 11.5 und für  $\delta^{18}$ O 1.4. In Abbildung 4-29 ist die Parametersignifikanz auf die einzelnen Zielgrößen dargestellt. Deutlich wird hier ein weiters Mal der Einfluss der Parameter Differenz der Schneetiefe und Tag des Jahres auf alle drei Zielgrößen. Der in den MLR Gleichungen für  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O nicht verwendete Parameter horizontale Hangkonvexität ist mit einem X gekennzeichnet.

#### 4.3.4 Einzugsgebiet Dischma

#### Begehung 1

Für die Berechnung der MLR Gleichungen der ersten Begehungen im Dischma-Einzugsgebiet stand eine Grundgesamtheit von 20 Probenpunkten zur Verfügung. Die beste MLR Gleichung für den Deuterium-Excess ergab sich dabei mit den Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung und Waldbedeckung. Diese MLR Gleichung hat ein  $R_a^2$  von 0.81 und lautet:

Die größte erklärende Signifikanz hat in dieser MLR Gleichung der Parameter Höhe, die zweitgrößte erklärende Signifikanz der Parameter Differenz der Schneetiefe. Der geringste erklärende Anteil in dieser MLR Gleichung wird durch den Parameter Hangausrichtung beschrieben.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O wurden in der schrittweisen MLR dieselben erklärenden Parameter ermittelt. Dies sind die drei Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung. Für die Zielgröße  $\delta^{2}$ H konnte durch das Entfernen des Parameters Differenz der Schneetiefe eine Verbesserung des R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.004 erreicht werden, das R<sup>2</sup> verschlechterte sich dadurch jedoch um 0.02. Diese geringe Verbesserung des R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.004 wurde von daher als nicht relevant eingestuft und der Parameter Differenz der Schneetiefe in der MLR Gleichung belassen. Die MLR Gleichung für  $\delta^{2}$ H hat somit ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.58 und lautet:

$$\delta^2 H = -126 - 0.00821 * H\ddot{o}he - 2.36 * Diff - 3.304 * HA$$
 Gl. 4-10

Die MLR Gleichung für  $\delta^{18}$ O hat ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.72 und lautet:

$$\delta^{18}O = -15.7 - 0.00164 * H\ddot{o}he - 0.566 * Diff - 0.493 * HA$$
 Gl. 4-11

Für die beiden Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O hat, in den beiden obigen Gleichungen der Parameter Höhe die stärkste Signifikanz. Die geringste Signifikanz besitzt jeweils der Parameter Differenz der Schneetiefe.



Abbildung 4-30: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für die erste Begehung im Dischma-Einzugsgebiet.

In Abbildung 4-30 ist die Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für die erste Begehung im Dischma-Einzugsgebiet dargestellt. Die in den einzelnen Geichungen nicht verwendeten Parameter sind mit einem X gekennzeichnet. Deutlich wird hier der Einfluss des Parameters Höhe auf alle drei Zielgrößen, sowie der Einfluss der Hangausrichtung auf die beiden Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O.

# Begehung 1 und 2

Für die Berechnung der MLR Gleichungen aller Begehungen im Dischma-Einzugsgebiet stand eine Grundgesamtheit von 31 Probenpunkten zur Verfügung. Durch die schrittweise MLR stellten sich für alle drei Zielgrößen, die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Tag des Jahres als signifikant heraus. Für den Deuterium-Excess zeigte sich zusätzlich der Parameter Hangausrichtung als relevant. Die beste ermittelte MLR Gleichung für die Zielgröße Deuterium-Excess hat ein  $R^2_a$  von 0.67 und lautet:

$$Deuterium-Excess = 8.34 + 0.00428 * H\"ohe + 0.859 * Diff + 1.133 * HA$$
  
- 0.0673 \* DOY Gl. 4-12

Die größte erklärende Signifikanz in dieser Gleichung wird durch den Parameter Höhe beschrieben, die zweitgrößte Signifikanz besitzt der Parameter Tag des Jahres. Den geringsten erklärenden Einfluss in dieser Gleichung hat der Parameter Differenz der Schneetiefe.

Die beste ermittelte MLR Gleichung für die Zielgröße  $\delta^{2}$ H hat ein  $R_{a}^{2}$  von 0.54 und lautet:

$$\delta^{2}H = -165.5 - 0.00927 * H\ddot{o}he - 7.34 * Diff + 0.386 * DOY$$
 Gl. 4-13

Die beste ermittelte MLR Gleichung für die Zielgröße  $\delta^{18}$ O hat ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.6 und lautet:

$$\delta^{18}O = -21.7 - 0.00164 * H\ddot{o}he - 1.17 * Diff + 0.055 * DOY$$
 Gl. 4-14

Die größte erklärende Signifikanz auf die beiden Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O hat in den beiden obigen Gleichungen der Parameter Tag des Jahres. Signifikant ist auch der Parameter Differenz der Schneetiefe, während die Signifikanz des Parameters Höhe geringer ist.



Abbildung 4-31: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Dischma-Einzugsgebiet.

In Abbildung 4-31 ist die Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen dargestellt. Deutlich wird hier der Einfluss des Parameters Tag des Jahres auf alle drei Zielgrößen und der geringere Einfluss des Parameters Höhe auf die Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O.

# 4.3.5 Einzugsgebiet Laschadura

#### Begehung 1

Für die Berechnung der MLR Gleichungen der ersten Begehungen im Laschadura-Einzugsgebiet steht eine Grundgesamtheit von 16 Probenpunkten zur Verfügung. Die Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O weisen, wie aus Tabelle 4-2 und Tabelle 4-3 ersichtlich, nur eine geringe Korrelation mit den einzelnen Parametern auf. Daher führt auch die schrittweise MLR nur zu einem R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.45 für  $\delta^2$ H und zu einem R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.4 für  $\delta^{18}$ O. Aus diesem Grund werden die Modelle verworfen und nicht weiter beschrieben. Für die Zielgröße Deuterium-Excess stellen sich die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangneigung, Hangausrichtung und der Gipfelparameter als signifikant heraus. Die ermittelte MLR Gleichung hat ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.8 und lautet:

$$Deuterium-Excess = 7.11 + 0.00246 * H\"ohe + 1.044 * Diff - 0.066 * HN + 1.002 * HA + 2.04 * G$$

$$Gl. 4-15$$

Der signifikanteste Parameter in dieser Gleichung ist die Höhe. Den nächst größeren, aber eindeutig geringen Einfluss, hat der Parameter Hangausrichtung. Den geringsten Einfluss in dieser Gleichung besitzt der Parameter Hangneigung.



Abbildung 4-32: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die erste Begehung im Laschadura-Einzugsgebiet.

In Abbildung 4-32 wird der Einfluss der Höhe und der Hangausrichtung auf den Deuterium-Excess ein weiteres Mal deutlich. Dabei zeigt sich auch die weite Streuung der Punkte unter dem Einfluss des Parameters Hangneigung.

# Begehung 1 und 2

Mit der zweiten Begehung im Laschadura-Einzugsgebiet, stehen für die Berechnung der MLR-Gleichungen 23 Proben zur Verfügung. Die beste ermittelte Gleichung für den Deuterium-Excess hat ein  $R_a^2$  von 0.81 und besteht aus den Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangneigung, Hangausrichtung, Gipfelparameter und Tag des Jahres. Diese lautet:

$$Deuterium-Excess = 19.1 + 0.00324 * H\"ohe + 0.536 * Diff - 0.105 * HN + 1.14 * HA + 1.24 * G - 0.112 * DOY$$

$$Gl. 4-16$$

Die größte erklärende Signifikanz in dieser Gleichung wird durch den Parameter Tag des Jahres beschrieben, die zweitgrößte durch den Parameter Höhe. Den geringsten Einfluss hat in dieser Gleichung der Gipfelparameter.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O werden in der schrittweisen MLR dieselben erklärenden Parameter ermittelt. Dies sind die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangneigung, Waldbedeckung, Gipfelparameter, vertikale Hangkonvexität und Tag des Jahres. Für die Zielgröße  $\delta^{2}$ H ergibt die ermittelte MLR Gleichung ein  $R_{a}^{2}$  von 0.76 und lautet:

$$\delta^{2}H = -252.6 + 0.0398 * H\ddot{o}he - 6.26 * Diff - 1.31 * HN + 5.03 * K_{vert} + 40 * WB$$
  
- 26.5 \* G + 0.437 \* DOY Gl. 4-17

Für die Zielgröße  $\delta^{18}$ O ergibt die ermittelte MLR Gleichung ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.76 und lautet:

$$\delta^{18}O = -33.3 + 0.00445 * H\ddot{o}he - 0.942 * Diff - 0.15 * HN + 0.637 * K_{vert} + 4.77 * WB$$
  
- 3.54 \* G +0.0657 \* DOY Gl. 4-18

Für die Zielgröße  $\delta^{18}$ O ist der Parameter Tag des Jahres am signifikantesten, gefolgt von den Parametern Höhe und dem Gipfelparameter. Den geringsten Einfluss auf beide Zielgrößen hat die vertikale Hangkonvexität. Für die Zielgröße  $\delta^{2}$ H beschreibt die Höhe den größten erklärenden Einfluss gefolgt vom Tag des Jahres und dem Gipfelparameter.


Abbildung 4-33: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Laschadura-Einzugsgebiet.

In Abbildung 4-33 ist die Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen im Laschadura-Einzugsgebiet dargestellt. Die in der jeweiligen MLR Gleichung nicht verwendeten Parameter sind mit einem X gekennzeichnet. Deutlich wird hier der positive Einfluss des Parameters Höhe auf alle drei Zielgrößen und die Signifikanz des Parameters Tag des Jahres und des Gipfelparameters.

### 4.3.6 Regression für alle Einzugsgebiete

### **Begehung 1**

In allen Einzugsgebieten zusammen werden in den ersten Begehungen 82 Proben gesammelt. Für die Berechnung der schrittweisen MLR werden hier noch die Parameter Längengrad und Breitengrad miteinbezogen. Diese beiden Parameter stellten sich neben der Höhe und der Hangausrichtung als signifikant für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O heraus. Allerdings ergibt sich sowohl für  $\delta^{2}$ H als auch für  $\delta^{18}$ O nur ein  $R^{2}_{a}$  von 0.28 und die Modelle werden verworfen.



Abbildung 4-34: Parametersignifikanz der MLR Gleichung für den Deuterium-Excess und die ersten Begehungen in allen Einzugsgebieten.

Für die Zielgröße Deuterium-Excess erweisen sich durch die schrittweise MLR die Parameter Höhe, Differenz, Hangneigung, Hangausrichtung, Waldbedeckung, Längengrad und Breitengrad als signifikant. Diese ermittelte MLR Gleichung hat ein  $R_a^2$  von 0.74 und lautet:

$$Deuterium-Excess = -126.3 + 0.00424 * H\ddot{o}he + 1.065 * Diff + 0.942 * HA - 0.0603 * HN + 1.4 * WB - 0.939 * LO + 2.2.97 * LA Gl. 4-19$$

Die größte erklärende Signifikanz in dieser Gleichung beschreibt der Parameter Höhe. Wie aus Abbildung 4-34 ersichtlich wird, weisen auch die Parameter Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung und Längengrad eine sehr hohe Signifikanz auf. Die geringste Signifikanz in dieser Gleichung hat der Parameter Waldbedeckung.

### Begehung 1 und 2

Für die Berechnung der schrittweisen MLR der ersten und zweiten Begehungen stehen 128 Probepunkte zur Verfügung. Für die Zielgröße Deuterium-Excess stellen sich dabei die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, Tag des Jahres, Breitengrad und Längengrad als signifikant heraus. Die mit diesen Parametern ermittelte Gleichung hat ein  $R_a^2$  von 0.61 und lautet:

$$Deuterium-Excess = -265.2 + 0.00371 * H\ddot{o}he + 0.915 * Diff + 0.883 * HA$$
$$- 0.0472 * DOY - 1.33 * LO + 6.11 * LA \qquad Gl. 4-20$$

In dieser Gleichung hat der Parameter Höhe die größte erklärende Signifikanz. Den geringsten erklärenden Einfluss auf die Zielgröße Deuterium-Excess besitzen hier die Parameter Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O werden in der schrittweisen MLR diesselben Parameter ermittelt. Dies sind die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, vertikale Hangkonvexität, Tag des Jahres, Gipfelparameter, Waldbedeckung, Breiten- und Längengrad. Somit sind die einzigen nicht verwendeten Parameter in diesen MLR Gleichungen die Parameter Hangneigung und horizontale Hangkonvexität. Für die Zielgröße  $\delta^{2}$ H ergibt die ermittelte MLR Gleichung ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.54 und lautet:

$$\delta^{2}H = -1924 + 0.00214 * H\ddot{o}he - 5.34 * Diff + 1.68 * HA + 1.85 * K_{vert} + 6.87 * WB$$
  
- 9.36 \* G + 0.409 \* DOY - 11.63 \* LO + 39.6 \* LA Gl. 4-21



Abbildung 4-35: Signifikanz der verwendeten Parameter in den MLR Gleichungen für alle Begehungen in den verschiedenen Einzugsgebieten.

Für die Zielgröße  $\delta^{18}$ O ergibt die ermittelte MLR Gleichung ebenso ein  $R^2_a$  von 0.54 und lautet:

$$\delta^{18}O = -208.5 - 0.0002 * H\ddot{o}he - 0.785 * Diff + 0.0985 * HA + 0.233 * K_{vert} + 0.806 * WB - 1.22 * G + 0.0563 * DOY - 0.1.29 * LO + 0.0563 * LA Gl. 4-22$$

Die größte erklärende Signifikanz wird in diesen beiden Gleichungen durch die Parameter Tag des Jahres und Längengrad beschrieben und wird in Abbildung 4-35 deutlich. Eine hohe Signifikanz besitzen hier auch die Parameter Breitengrad und Differenz der Schneetiefe, sowie der Gipfelparameter. Den geringsten Einfluss auf die jeweilige Zielgröße haben die Parameter Höhe und Hangausrichtung.

### 4.3.7 Fazit

Insgesamt ist festzustellen, dass sich auf die Einzugsgebiete nur die Zielgröße Deuterium-Excess gut modellieren lässt. Für diese Zielgröße wird mit den Proben der ersten Begehungen in allen Einzugsgebieten ein  $R_a^2$  erreicht, das größer als 0.76 ist. Dabei erweisen sich jedes Mal die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und die Hangausrichtung als signifikant. Je nach Einzugsgebiet war zusätzlich einer der Waldbedeckung, Gipfelparameter oder horizontale Parameter Hangneigung, Hangkonvexität relevant. Für die Regressionen, die mit beiden Begehungen auf Einzugsgebietsebene durchgeführt wurden, stellte sich zusätzlich der Parameter Tag des Jahres als signifikant heraus. Dabei ergab sich für die Zielgröße Deuterium-Excess ein  $R_a^2$  zwischen 0.65 und 0.81. Die Zielgrößen  $\delta^{-2}H$  und  $\delta^{-18}O$  konnten aufgrund der geringen Korrelationen mit den einzelnen Parametern in den ersten Begehungen nicht modelliert werden. Lediglich im Dischma-Einzugsgebiet ergab sich für die erste Begehung ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> größer als 0.5. Hier waren die entscheidenden Parameter die Höhe, die Differenz der Schneetiefe und die Hangausrichtung. Nach Einbeziehung aller in dem jeweiligen Einzugsgebiet entnommenen Proben und mit dem zusätzlichen Parameter Tag des Jahres, konnte in allen Einzugsgebieten ein  $R_a^2$  größer als 0.5 erreicht werden. Hierbei waren in allen Einzugsgebieten die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Tag des Jahres relevant. Im Taschinasbach-Einzugsgebiet stellten sich zusätzlich die Parameter Hangneigung und horizontale Hangkonvexität, im Engstligen-Einzugsgebiet die Parameter Hangausrichtung und vertikale Hangkonvexität und im LaschaduraEinzugsgebiet die Parameter Hangneigung, vertikale Hangkonvexität, Waldbedeckung und der Gipfelparameter als signifikant heraus. Nach Einbeziehung der Proben aller Einzugsgebiete in eine Grundgesamtheit ergab sich, für die ersten Begehungen und die Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O ein  $R^2_a$  von 0.28 und die Modelle wurden verworfen. Für die Zielgröße Deuterium-Excess ergab sich mit den Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, Hangneigung und Waldbedeckung, sowie mit den Parametern Breiten- und Längengrad ein  $R^2_a$  von 0.74. Unter Einbeziehung aller Begehungen und dem Parameter Tag des Jahres ergab sich ein  $R^2_a$  von 0.61. Zusätzlich entfielen die Parameter Hangneigung und Waldbedeckung. Mit derselben Grundgesamtheit wurde, für die beiden Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O, ein  $R^2_a$  von 0.54 erreicht. Dabei waren die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung, vertikale Hangkonvexität, Waldbedeckung, Tag des Jahres und der Gipfelparameter, sowie die Parameter Breiten- und Längengrad relevant.

## 5 Diskussion

### 5.1 Schneeprofile

In Kapitel 4.3 wurde über drei verschiedene Methoden der mittlere  $\delta^{2}$ H Wert der Schneeprofile berechnet. Bei einem Vergleich dieses berechneten mittleren Isotopengehaltes der Schneeprofile mit den direkt daneben entnommenen Höhenproben, zeigte sich bei allen drei Methoden eine Standardabweichung von ca. 7 ‰. Auffallend war dabei, dass die berechneten  $\delta^{2}H$  Werte in den Schneeprofilen aus der ersten Begehung im Nordhang, eine gute Übereinstimmung mit der entsprechenden Höhenprobe zeigten. Je nach Berechnungsmethode lag die Standardabweichung hier zwischen 1.9 und 4.1 ‰ und die maximale Differenz zwischen 3.3 und 7 ‰. In den Schneeprofilen im Südhang und der zweiten Begehungen im Nordhang ergaben sich abhängig von der Berechnungsmethode maximale Differenzen zwischen 18.5 und 19 ‰. Die großen Differenzen sind dabei jeweils auf einen niedrigen  $\delta^{2}$ H Wert durch die Berechnung und einen hohen  $\delta^{2}H$  Wert der entsprechenden Höhenprobe zurückzuführen. Dies lässt auf einen systematischen Fehler, entweder in der Berechnung des mittleren  $\delta^2$ H Wertes in den Schneeprofilen oder bei der Probenentnahme schließen. In der Probenentnahme kann dieser Fehler sowohl bei der Entnahme der einzelnen Schichtproben, als auch bei der Entnahme der Höhenproben entstanden sein. Da aber die Nordhangprofile aus den ersten Begehungen eine gute Übereinstimmung mit der jeweiligen Höhenprobe zeigen und die Probenentnahme stets nach dem gleichen Prinzip erfolgte, lässt sich hier nicht klären, wodurch dieser systematische Fehler verursacht wird. Für eine akkurate Berechnung des mittleren Isotopengehaltes in einem Schneeprofil ist zudem eine Messung des Schneewasseräquivalentes vor Ort unerlässlich (TECHEL & PIELMEIER, 2010). Die geringste Standardabweichung für den mittleren  $\delta^2 H$ Wert der Schneeprofile ergab sich mit 6.8 ‰ bei der Methode, in der die einzelnen Schneeschichten nur nach der Höhe gewichtet wurden. Aufgrund des Mangels an anderen Möglichkeiten wird daher für den Vergleich der Schneeprofile untereinander, dieser berechnete Mittelwert genutzt.

Die in Kapitel 4.1 dargestellten Schneeprofile zeigten alle eine deutliche Anreicherung von der ersten zur zweiten Begehung. Die, nach dem oben beschriebenen Prinzip Berechnung ergibt dabei im Nordhang durchgeführte, des Taschinasbach-Einzugsgebietes eine durchschnittliche Anreicherung an  $\delta^2$ H von 4 ‰ zwischen der ersten und zweiten Begehung. Im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes ist eine Anreicherung von 21 ‰ festzustellen, im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes eine Anreicherung von 18 ‰ und im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes eine Anreicherung von 4 ‰. Im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes ergibt sich zusätzlich eine Anreicherung an  $\delta^{2}$ H von 39 ‰ zwischen der zweiten und dritten Begehung. In den Südhängen lassen sich nur die beiden Begehungen aus dem Dischma-Einzugsgebiet vergleichen. Die durchschnittliche Anreicherung an  $\delta^{2}$ H beträgt hier 21 ‰. Die zeitliche Differenz zwischen den beiden Begehungen liegt in allen Einzugsgebieten zwischen 32 und 37 Tagen. Lediglich im Engstligen-Einzugsgebiet beträgt die Differenz zwischen der ersten und zweiten Begehung 23 Tage. Die geringere Anreicherung an <sup>2</sup>H im Taschinasbach- und im Engstligen-Einzugsgebiet, kann auf die Gesamttiefe dieser Schneeprofile zurückgeführt werden, sowie auf die früheren Begehungstermine in diesen beiden Einzugsgebieten. Zudem ist die zeitliche Differenz zwischen der ersten und zweiten Begehung im Engstligen-Einzugsgebiet erheblich Im Taschinasbachund im Engstligen-Einzugsgebiet liegen geringer. die Schneeprofiltiefen der ersten Begehung bei 2.45 und 2.4 m und in der zweiten Begehung bei 1.9 und 1.75 m. Im Gegensatz dazu sind die Schneeprofile der ersten Begehung im Dischma- und im Laschadura-Einzugsgebiet 1.8 und 1.74 m tief und die der zweiten Begehung 1.25 und 1.2 m tief. Die Abnahme der Tiefe ist mit 54 bis 65 cm in allen Einzugsgebieten sehr ähnlich, allerdings ist die Beeinflussung durch, an der Oberfläche ablaufende, Fraktionierungsprozesse bei größerer Gesamttiefe deutlich geringer. Insgesamt kann die in MOSER & RAUERT (1980) beschriebene Anreicherung der mittleren  $\delta^2$ H Werte in den Schneeprofilen eindeutig bestätigt werden, lässt sich aber nur schwer quantifizieren.

Sowohl vor den ersten Begehungen als auch vor den zweiten Begehungen, waren in den meisten Einzugsgebieten in den Tagen davor Niederschläge gefallen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass im April und Mai 2010 viele Niederschlagsereignisse stattfanden und die Schönwetterperioden dazwischen für die Probenentnahmen ausgenutzt wurden. In der zweiten Begehung war zudem in allen Einzugsgebieten festzustellen, dass die oberste Schneeschicht isotopisch sehr angereichert ist, sich jedoch über der GMWL befindet. Diese Schicht ist somit auf isotopisch angereicherte Niederschläge zwischen den Begehungen zurückzuführen. Für den Vergleich der Variabilität des Isotopengehaltes in den einzelnen Schneeprofilen wird die oberste Schicht aus diesem Grund nicht miteinbezogen. Verschiedene Autoren belegen, dass während der Ablationsperiode eine Annäherung des Isotopengehaltes zwischen den einzelnen Schichten stattfindet (AMBACH ET AL, 1972; ARNASON ET AL, 1972; MARTINEC ET AL, 1977). Diese Abnahme der Variabilität kann in allen Einzugsgebieten beobachtet werden. Im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes z.B. liegt die Variabilität der  $\delta^{2}$ H Werte in der ersten Begehung bei 115 ‰, in der zweiten Begehung bei 73 ‰ und in der dritten Begehung nur noch bei 16 ‰. Eine Abnahme in der Variabilität der  $\delta^2$ H Werte ist in allen Einzugsgebieten auch zwischen Nord- und Südhang festzustellen und ist auf die in den Südhängen schon weiter fortgeschrittenen Ablationsprozesse zurückzuführen. Eine geringe Homogenisierung zwischen den einzelnen Schichten findet durch Diffusion in der Schneedecke schon während der Akkumulationsperiode statt (SINCLAIR & MARSHALL, 2008). Diese ist aufgrund der erst am Ende der Akkumulationsperiode erhobenen Daten in der vorliegenden Untersuchung nicht nachzuweisen. Die hauptsächlich durch eindringendes Schmelzwasser verursachte Homogenisierung des Schneeprofils während der Ablationsperiode kann jedoch in allen Einzugsgebieten bestätigt werden. Da vor Ort nicht die Temperatur der einzelnen Schneeschichten gemessen wurde, kann nicht exakt identifiziert werden in welchen Profilen die 0° C Isotherme schon erreicht wurde bzw. wie weit dieser Prozess schon fortgeschritten ist. Eine starke Homogenisierung der Schneeprofile findet ab dem Erreichen der Isothermie durch schnelle Sickerraten, die durch Piston-Flow-Prozesse beschleunigt werden, statt (UNNIKRISHNA ET AL, 2002). Deutlich wird dies bei dem am 05.06.2010 aufgenommenen Schneeprofil im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes. In diesem Schneeprofil war die 0° Isotherme mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erreicht, da alle Schichten feucht bzw. nass waren. Dieses Schneeprofil der dritten Begehung weist nur noch eine Variabilität an  $\delta^2 H$ von 16 ‰ auf im Gegensatz zu dem Profil aus der ersten Begehung, das mit 115 ‰ die

größte Variabilität aller Schneeprofile besitzt. Zudem hat das Profil aus der dritten Begehung den höchsten mittleren  $\delta^2$ H Wert aller beprobten Schneeprofile.

Bei einer genaueren Betrachtung der Schneeprofile fällt auf, dass die jeweils unterste Schicht der zweiten Begehung isotopisch leichter ist als die entsprechende Schicht aus der ersten Begehung. Dies ist im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes, im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes, im Südhang des Dischma-Einzugsgebietes und im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes der Fall. Die von O'NEIL (1968) beschriebene Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Eis und Wasser, führt zu einer Abreicherung des  $\delta^{2}$ H Wertes von ca. 16 ‰ in der flüssigen Phase. In isotopisch leichten Schichten führt dies dazu, dass der verbleibende Schnee sich isotopisch anreichert. In darunter liegenden isotopisch deutlich schwereren Schichten kann diese Gleichgewichtsfraktionierung allerdings auch zu einer Abreicherung an schweren Isotopen führen. Deutlich zu beobachten ist dieser Prozess in den Nordprofilen des Taschinasbach-Einzugsgebietes, die in Abbildung 4-1 dargestellt sind. Hier hat die Schicht TNP6 in der ersten Begehung einen  $\delta^{2}$ H Wert von -175 ‰, die entsprechende angereicherte Schicht aus der zweiten Begehung einen  $\delta^{2}$ H Wert von -156 ‰. Die jeweils darunter liegenden Schichten besitzen  $\delta^2$ H Werte von -131 ‰ und -132 ‰. Die noch tiefer liegenden Schichten  $\delta^{2}$ H Werte von -97 ‰ und -111 ‰. Somit führt die Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Eis und Wasser bei der Perkolation von Schmelzwasser dazu, dass sich isotopisch leichte Schichten an <sup>2</sup>H anreichern während sich darunter liegende istopisch deutlich schwerere Schichten isotopisch abreichern. Das ist somit ein weiterer Grund für die in den Schneeprofilen stattfindenden Homogenisierung der Isotopengehalte. Ab Erreichen der Isothermie und der damit verbundenen schnellen Sickerraten, wird dieser Prozess durch das Eindringen von isotopisch sehr angereichertem Schmelzwasser aus den oberflächennahen Schichten überlagert. Weiterhin ist aus den Abbildungen in Kapitel 4.1 zu erkennen, dass die oberen Schichten isotopisch angereichert sind, was bei der jeweils obersten Schicht auf isotopisch angereicherte Niederschläge zurückzuführen ist. Die zweiten Schichten weisen ebenfalls hohe  $\delta^{2}$ H Werte auf, liegen aber im Gegensatz zu den obersten Schichten meist eindeutig unter der GMWL. STICHLER ET AL (2001) weisen auf einem Andengletscher nach, dass die isotopische Anreicherung durch Sublimation mit einer Abnahme des Deuterium-Excess einhergeht. Somit ist in den beschriebenen Schichten

die Anreicherung auf Fraktionierungsprozesse bei der Verdunstung bzw. Sublimation zurückzuführen.

### 5.1.1 Fazit

Insgesamt lässt sich innerhalb des Monats zwischen erster und zweiter Begehung eine Anreicherung des mittleren Isotopengehaltes feststellen. Diese liegt in den untersuchten Einzugsgebieten für  $\delta^2$ H zwischen 4 und 21 ‰. Diese Zahlen sind jedoch aufgrund des systematischen Fehlers, dessen Ursprung sich nicht ermitteln ließ mit Vorsicht zu betrachten. Festgestellt wurde auch eine sehr hohe Variabilität des Isotopengehaltes zwischen den einzelnen Schichten, welche die Variabilität der Isotopengehalte in den Winterniederschlägen widerspiegelt (MOSER & STICHLER, 1974; SINCLAIR & MARSHALL, 2008). In allen Einzugsgebieten zeigte sich eine deutliche Abnahme der Variabilität im  $\delta^{2}$ H Wert zwischen der ersten und zweiten Begehung. Dies ist vor allem auf die Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Wasser und Eis zurückzuführen, die dazu führt, dass sich durch perkolierendes Schmelzwasser isotopisch leichte Schichten anreichern und sich darunter liegende, isotopisch deutlich schwerere Schichten, isotopisch abreichern. Durch die dritte Begehung im Engstligen-Einzugsgebiet konnte zudem gezeigt werden, dass die Homogenisierung der Schneeprofile sich nach Erreichen der Isothermie erheblich beschleunigt, und dass ab diesem Zeitpunkt schneller fließendes Sickerwasser zu einer deutlichen Anreicherung der schweren Isotope im gesamten Schneeprofil führt.

### 5.2 Höhenproben

In Kapitel 5.1 ist die stratigraphische Schichtung der Isotopengehalte in der Schneedecke beschrieben, welche die Variabilität der winterlichen Niederschläge widerspiegelt. Diese Variabilität in einem Schneeprofil ist größer als die Variabilität der mittleren Isotopengehalte der Schneedecke in einem Hang mit 1000 m vertikaler Differenz. Die zudem den Isotopengehalt beeinflussenden Prozesse, wie die Verlagerung des Schnees durch Winddrift und die Anreicherung der schweren Isotope in den oberen Schichten der Schneedecke durch Sublimation, Verdunstung und die Diffusion von Wasserdampf in die Firnporen, führen dazu, dass ein Höheneffekt in der gesamten Schneedecke nur bedingt vorhanden ist (MOSER & STICHLER, 1974). In der vorliegenden Arbeit konnte ein

signifikanter Höheneffekt für  $\delta^2$ H nur in drei der 16 Begehungen festgestellt werden. Dies waren die jeweils ersten Begehungen drei verschiedener Nordhänge. Im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes wurde für  $\delta^2$ H ein Höhengradient von -2.6 ‰ / 100 m mit einem  $R^2$  von 0.6 gefunden, im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes liegt der Gradient bei -0.72 % / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.5 und im unteren Nordhang des Engstligen-Einzugsgebiet bei -1.6 % / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.6. Für die anderen beprobten Hängen war der Höheneffekt nicht signifikant und es ergaben sich teilweise inverse Gradienten, wie z.B. bei der zweiten Begehung im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes. Hier liegt der ermittelte Gradient bei +3.1 % / 100 m mit einem R<sup>2</sup> von 0.5. Ein Höhengradient für  $\delta^2$ H in der gesamten Schneedecke kann höchstens in den Nordhängen festgestellt werden, in denen während der Akkumulationsperiode kaum Isotopenfraktionierungen durch Ablationsprozesse stattfinden. Die Beeinflussung durch Ablationsprozesse zeigt sich auch dadurch, dass in den jeweils zweiten Begehungen der Höhengradient weniger stark ausgeprägt war. Am signifikantesten war der Höhengradient im Taschinasbach-Einzugsgebiet, das sich am Alpenrand befindet. Hier ist eine orographische Hebung der anströmenden Luftmassen ausgeprägter als in den mehr in den Zentralalpen liegenden Einzugsgebieten Dischma und Engstligen. Im Laschadura-Einzugsgebiet wurde ein inverser Gradient gefunden. Dieses Einzugsgebiet liegt in den Südalpen und ist durch andere Wetterlagen geprägt.

Ein deutlicher Unterschied im Isotopengehalt zwischen der ersten und zweiten Begehung konnte in allen Einzugsgebieten festgestellt werde. Dabei war eine deutliche Anreicherung an <sup>2</sup>H zu beobachten. Je nach Einzugsgebiet variierte die durchschnittliche Anreicherung an <sup>2</sup>H der einzelnen Probenpunkte zwischen 10 und 20 ‰. In allen Einzugsgebieten bis auf das Engstligen-Einzugsgebiet, war dabei an allen Probenpunkten eine Anreicherung festzustellen, die zwischen 3 und 35 ‰ lag. Im Engstligen-Einzugsgebiet ergaben sich, aufgrund der in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Probleme, Lage- und Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Probepunkten. Zudem liegt der hier untersuchte Hang im Tourengebiet des Steghorns und ist im Winter ein viel befahrener Hang. Dies führt natürlich zu Verfrachtungen des Schnees und dürfte ein weiterer Grund für die in Abbildung 4-15 dargestellte, diffus erscheinende, Verteilung der Isotopengehalte zwischen den einzelnen Begehungen sein. Die Anreicherung mit <sup>2</sup>H ist hauptsächlich auf an der Oberfläche stattfindende Verdunstungs- und Sublimations-

prozesse zurückzuführen. STICHLER ET AL (2001) zeigten, dass die Anreicherung mit schweren Isotopen durch Sublimation mit einer Abnahme des Deuterium-Excess einhergeht. Die Anreicherung schwerer Isotope durch Verdunstung führt ebenso zu einer Abnahme des Deuterium-Excess (CLARK & FRITZ, 1997; LEIBUNDGUT ET AL, 2009). Dieser Effekt wurde in Kapitel 4.2 durch eine Darstellung der Proben im  $\delta$  <sup>18</sup>O -  $\delta$  <sup>2</sup>H Diagramm und dem Vergleich mit der GMWL verdeutlicht. Dabei zeigt sich, dass die Proben aus den Südhängen und die Proben aus der zweiten Begehung in den Nordhängen meist deutlich durch die Fraktionierungsprozesse bei Sublimation und Verdunstung beeinflusst sind. Am deutlichsten wird dies in Abbildung 4-20 und Abbildung 4-24, also in den Nordhängen des Laschadura- und des Dischma-Einzugsgebietes.

### 5.2.1 Fazit

Insgesamt ist festzustellen, dass ein Höhengradient für den mittleren Isotopengehalt der Schneedecke nicht deutlich ist. In den 16 Begehungen, konnte in drei der ersten Begehungen im Nordhang, ein signifikanter Höhengradient ermittelt werden. Der Höhengradient für δ<sup>2</sup>H liegt dabei zwischen -0.7 und -2.6 ‰ mit einem R<sup>2</sup> zwischen 0.5 und 0.6. In den Südhängen, sowie im Laufe der Ablationsperiode wird dieser Gradient durch Fraktionierungsprozesse während der Schneeschmelze überlagert. Deutlich dagegen wird an allen Probepunkten, bis auf drei Ausnahmen im Engstligen-Einzugsgebiet, eine Anreicherung an <sup>2</sup>H zwischen der ersten und zweiten Begehung, die zwischen 3 und 35 ‰ liegt. Die Begehungen fanden dabei in einem Abstand zwischen 32 und 37 Tagen statt. Auf Einzugsgebietsebene ist eine durchschnittliche Anreicherung in dieser Periode zwischen 10 und 20 ‰ festzustellen. Diese Anreicherung ist zum Einen auf den Einfluss der Verdunstung und der Sublimation und zum Anderen auf die in Kapitel 5.1 beschriebenen isotopisch schweren Niederschläge zwischen der ersten und der zweiten Begehung zurückzuführen.

### 5.3 Multiple Lineare Regression

Die schrittweise MLR wurde auf Einzugsgebietsebene jeweils für die ersten Begehungen und anschließend unter Einbeziehung des Parameters Tag des Jahres für alle Begehungen durchgeführt. Mit den Proben aus den ersten Begehungen, konnte für die Zielgrößen  $\delta^2 H$  und  $\delta^{18}$ O in allen Einzugsgebieten, bis auf das Dischma-Einzugsgebiet, kein R<sup>2</sup><sub>a</sub> größer

als 0.5 erreicht werden. Diese Modelle wurden daher verworfen. Im Dischma-Einzugsgebiet konnte mit den drei Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung für  $\delta^2$ H ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.58 und für  $\delta^{18}$ O ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.72 erreicht werden. Hierbei stellte sich vor allem der Parameter Höhe als signifikant heraus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Dischma-Einzugsgebiet, sowohl im Südhang als auch im Nordhang eine Abnahme der schweren Isotope mit der Höhe zu erkennen ist (siehe Kapitel 4.2.3). Im Taschinasbach- und im Engstligen-Einzugsgebiet dagegen wird der Höhengradient aus dem Nordhang durch gegenteilige Gradienten in den Südhängen annulliert.

Auffällig ist, dass sich in den ersten Begehungen die Zielgröße Deuterium-Excess gut modellieren lässt. In den einzelnen Einzugsgebieten wird hier ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> zwischen 0.76 und 0.81 erreicht und für alle Einzugsgebiete zusammen liegt das  $R_a^2$  bei 0.74. Als signifikanteste Parameter stellen sich dabei jeweils die Höhe, die Differenz der Schneetiefe und die Hangausrichtung heraus. Somit scheint für den Deuterium-Excess ein Zusammenhang mit der Höhe zu bestehen, der sich zudem durch die Schneetiefe in Abhängigkeit von der Höhe und der Hangexposition bestimmen lässt. Bei Betrachtung aller Proben, also unter Einbeziehung der zweiten und dritten Begehungen, ergibt sich ein ähnliches Bild. Auf Einzugsgebietsebene weist die jeweils aussagekräftigste Gleichung ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> zwischen 0.65 und 0.81 auf. Die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung erweisen sich auch hier als signifikant. Der Parameter Tag des Jahres wurde eingeführt um die Anreicherung an schweren Isotopen zwischen der ersten und der zweiten Begehung zu beschreiben. Dieser Parameter stellte sich auch für den Deuterium-Excess in allen Einzugsgebieten als signifikant heraus und beschreibt die Abnahme des Deuterium-Excess in der Ablationsperiode durch Verdunstung und Sublimation. Des Weiteren ergeben sich in den einzelnen Einzugsgebieten verschiedene zusätzlich signifikante Parameter. Im Taschinasbach-Einzugsgebiet erweisen sich zusätzlich die Hangneigung, die horizontale Hangkonvexität und der Gipfelparameter als signifikant, im Engstligen-Einzugsgebiet die Parameter horizontale und vertikale Hangkonvexität und im Laschadura-Einzugsgebiet der Parameter Hangneigung und der Gipfelparameter. Lediglich im Dischma-Einzugsgebiet ergibt sich das höchste angepasste Bestimmtheitsmaß ohne zusätzliche Parameter. Die für die einzelnen Einzugsgebiete beschriebenen zusätzlichen Parameter weisen allgemein eine geringere

Signifikanz auf und beschreiben somit eher einzelne stark abweichende Proben, insbesondere der Gipfelparameter. Dies zeigt sich auch wenn die schrittweise MLR für alle Einzugsgebiete durchgeführt wird. Dabei ergibt sich ein  $R_a^2$  von 0.61 und außer den Parametern Höhe, Differenz der Schneetiefe, Hangausrichtung und Tag des Jahres sind nur die zusätzlichen Parameter Breiten- und Längengrad signifikant. Insgesamt lässt sich der Deuterium-Excess damit in allen Einzugsgebieten und unabhängig von der Zahl der Begehungen mit einem  $R_a^2$  größer als 0.65 beschreiben. Durch die Parameter Breitenund Längengrad kann zudem eine MLR Gleichung für die Gesamtzahl der Proben ermittelt werden, deren  $R_a^2$  0.61 beträgt.

Für die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O führte in der schrittweisen MLR, außer im Dischma-Einzugsgebiet, nur die Einbeziehung aller Begehungen und des Parameters Tag des Jahres zu einem  $R_a^2$  größer als 0.5. Der Parameter Tag des Jahres quantifiziert dabei, wie oben beschrieben, die Anreicherung an schweren Isotopen von der ersten zur zweiten Begehung in den jeweiligen Hängen. In allen ermittelten MLR Gleichungen, in denen der Tag des Jahres verwendet wurde, hat dieser Parameter einen positiven Einfluss auf die Zielgrößen  $\delta^{2}$ H und  $\delta^{18}$ O und beschreibt somit den Effekt der Anreicherung. Zugleich ist der Tag des Jahres jeweils der signifikanteste Parameter. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass eine Anreicherung an schweren Isotopen von der ersten zur zweiten Begehung in allen Einzugsgebieten belegt werden konnte. Des Weiteren stellte sich der Parameter Höhe als wenig signifikant heraus und ist damit eher ungeeignet, die eigentliche Funktion als Ausgangsgröße für den Isotopengehalt zu erfüllen. Wie oben beschrieben ist dies hauptsächlich auf gegenläufige Gradienten in den Südhängen zurückzuführen und wird vor allem in der MLR Gleichung für alle Einzugsgebiete deutlich. In dieser Gleichung ist der Einfluss der Höhe positiv und bewirkt somit eine Anreicherung an schweren Isotopen mit der Höhe. Allerdings ist die Höhe hier auch der Parameter mit der geringsten Signifikanz. Nach dem Tag des Jahres ist für die Zielgrößen  $\delta$   $^2H$  und  $\delta$   $^{18}O$  in den meisten Einzugsgebieten der Parameter Differenz der Schneetiefe am signifikantesten. Dieser Parameter wurde, wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, über eine lineare Regression zwischen der Höhe und der Schneetiefe berechnet, nachdem sich die Schneetiefe als nicht signifikant herausstellte. Die Differenz der Schneetiefe erklärt somit die Schneetiefe in Abhängigkeit von der Höhe. Da dieser Parameter in den Regressionsgleichungen zusammen mit der Höhe verwendet wurde war eine

Multikollinearität zwischen diesen beiden Parametern zu vermuten. Dies wurde über den Varianzinflationsfaktor überprüft und lässt sich nicht bestätigen. Eine Multikollinearität ergab sich nur wenn zusätzlich die Schneetiefe an sich miteinbezogen wurde. Neben den Parametern Tag des Jahres, Differenz der Schneetiefe und Höhe ergaben sich für die Zielgrößen  $\delta^{-2}$ H und  $\delta^{-18}$ O je nach Einzugsgebiet verschiedene andere signifikante Parameter. Auf diese wird hier nicht näher eingegangen, erwähnt sei nur, dass die Hangausrichtung, im Gegensatz zur Zielgröße Deuterium-Excess, lediglich im Engstligen-Einzugsgebiet einen signifikanten Einfluss beschreibt.



Abbildung 5-1: Boxplot der entnommen Proben in den einzelnen Einzugsgebieten

In den MLR Gleichungen, die alle Einzugsgebiete miteinbezogen, ergab sich für die Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O ein  $R_a^2$  von 0.54. Dabei wurden alle Parameter, bis auf die vertikale Hangkonvexität und die Hangneigung verwendet. Den signifikantesten Einfluss hat hier der Tag des Jahres zusammen mit dem Längengrad. Der Längengrad wurde ursprünglich miteinbezogen, um den Einfluss des Kontinentaleffektes auf den Isotopengehalt zu beschreiben. In Abbildung 5-1 ist der  $\delta^2$ H Wert der entnommenen Proben im Boxplot-Diagramm dargestellt. Die entnommenen Proben sind dabei nach Einzugsgebieten geordnet, die nach dem Längengrad von Osten (links) nach Westen (rechts) geordnet sind. Zu beachten ist, dass die Differenz im Längengrad zwischen den Einzugsgebieten Taschinasbach, Dischma und Laschadura sehr gering ist. Ein Einfluss der Kontinentalität ist hier nur bedingt zu erkennen. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Lage der Einzugsgebiete in den Alpen nicht verwunderlich. Am

weitesten in den Zentralalpen liegt das Dischma-Einzugsgebiet und ist im Median isotopisch am leichtesten. SIEGENTHALER & OESCHGER (1980) belegen, dass Niederschläge in tiefer in den Alpen liegenden Isotopenmessstationen an schweren Isotopen abgereichert sind und führen dies darauf zurück, dass das Kondensationsniveau durch die davor liegenden Berge höher ist als an Isotopenmessstationen auf vergleichbarer Höhe in den Voralpen. Darauf könnten die isotopisch leichteren Werte des Dischma-Einzugsgebietes zurückzuführen sein. Da sich die Alpen in der Schweiz ungefähr von Osten nach Westen erstrecken, wurde der Parameter Breitengrad mit in die MLR Gleichungen miteinbezogen. Dieser soll damit die Lage der Einzugsgebiete in den Alpen charakterisieren und erwies sich in den MLR Gleichungen für alle Einzugsgebiete als signifikant. Den nächst größeren Einfluss auf die Zielgrößen δ<sup>2</sup>H und δ<sup>18</sup>O hat in den MLR Gleichungen für alle Einzugsgebiete der Parameter Differenz der Schneetiefe, gefolgt von dem Gipfelparameter. Den geringsten erklärenden Einfluss beschreiben hier die Parameter Höhe und Hangausrichtung. Insgesamt lässt sich somit der Isotopengehalt aller erhobenen Probepunkte zu über 50 % mit den vorgestellten Parametern erklären.

### 5.3.1 Fazit

In der durchgeführten schrittweisen MLR ergaben sich für die Zielgrößen  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O in den meisten Einzugsgebieten dieselben signifikanten Parameter. In den für die ersten Begehungen durchgeführten Regressionen war das angepasste Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup><sub>a</sub>, außer in einem Einzugsgebiet, geringer als 0.5. Dies ist hauptsächlich auf die gefundenen gegenläufigen Höhengradienten des Isotopengehaltes in Nord- und Südhang zurückzuführen. Eine deutlich höhere Korrelation mit diesen beiden Zielgrößen ergab sich für alle Begehungen unter Einbeziehung des Parameters Tag des Jahres, der die isotopische Anreicherung zwischen der ersten und der zweiten Begehung beschreibt. Dadurch wurde in allen Einzugsgebieten ein R<sup>2</sup><sub>a</sub> größer als 0.5 erreicht. Einen großen erklärenden Einfluss hatte dabei vor allem der Parameter Differenz der Schneetiefe. Über die zusätzlichen Parameter Längen- und Breitengrad ließ sich zudem für den Isotopengehalt aller entnommenen Proben eine MLR Gleichung mit einem R<sup>2</sup><sub>a</sub> von 0.54 finden. Wesentlich besser konnte der Deuterium-Excess modelliert werden. Für diese Zielgröße kristallisierten sich in allen Einzugsgebieten die Parameter Höhe, Differenz der Schneetiefe und Hangausrichtung als signifikant heraus. Die aussagekräftigsten MLR Gleichungen hatten dabei ein  $R_a^2$  zwischen 0.65 und 0.81.

# Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Überprüfung des Höhengradienten und die Modellierung des mittleren Isotopengehaltes der Schneedecke an einem Punkt, sowie die Quantifizierung der Fraktionierungsprozesse während der Ablationsperiode. Ursprünglich sollte zudem ermittelt werden, ob sich die gemessenen Isotopengehalte in Niederschlägen, des Schweizer Isotopenmessnetzes (NISOT), in der Schneedecke am Ende der Akkumulationsperiode widerspiegeln. Da sich kurzfristig herausstellte, dass die dafür notwendigen Daten erst ab Januar 2011 zur Verfügung stehen, war dies leider nicht möglich. Alternativ verwendete Ansätze führten nicht zu einem befriedigenden Ergebnis und werden daher in dieser Arbeit nicht beschrieben.

In der durchgeführten schrittweisen Multiplen Linearen Regression zeigte sich, dass sich der mittlere Isotopengehalt der Schneedecke, auf Einzugsgebietsebene und für die ersten Begehungen, mit den verwendeten Parametern nicht befriedigend modellieren lässt. Verbessert werden konnte dieses Ergebnis unter Einbeziehung der zweiten Begehung und der Verwendung des Parameters Tag des Jahres, der die Anreicherung an schweren Isotopen in der Ablationsperiode beschreibt. Auf Einzugsgebietsebene konnte hierdurch ein  $R^2_a$  zwischen 0.5 und 0.76 erreicht werden. Zudem konnte mit den zusätzlichen Parametern Breiten- und Längengrad eine MLR Gleichung gefunden werden, welche die Gesamtzahl der Proben beschreibt und deren  $R^2_a$  0.54 beträgt. Deutlich besser als  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O ließ sich der Deuterium-Excess der Schneedecke modellieren. Für diese Zielgröße ergab sich auf Einzugsgebietsebene ein  $R^2_a$  zwischen 0.65 und 0.81. Die entscheidenden Parameter waren dabei die Höhe, die Differenz der Schneetiefe und die Hangausrichtung.

Bei der Betrachtung der Höhenproben stellte sich heraus, dass ein Höhengradient für den mittleren Isotopengehalt der Schneedecke nur bedingt vorhanden ist. In den 16 durchgeführten Begehungen, konnte für  $\delta^2$ H nur in drei Begehungen ein signifikanter

Höhengradient zwischen -0.7 ‰ und -2.6 ‰ festgestellt werden. Dies waren jeweils die ersten Begehungen in Nordhängen. In den Südhängen, sowie im Laschadura-Einzugsgebiet war ein gegenläufiger Gradient zu erkennen. Deutlich wurde dagegen die Anreicherung an schweren Isotopen während des Monats zwischen der ersten und der zweiten Begehung. Diese lag für  $\delta$  <sup>2</sup>H bei alle entnommenen Proben zwischen 3 ‰ und 35 ‰. Wie aus der MLR ersichtlich wird ist die Dimension dieser Anreicherung hauptsächlich eine Funktion der Schneetiefe in Abhängigkeit von der Höhe.

In den Schneeprofilen zeigte sich die Anreicherung an schweren Isotopen durch Sublimation und Verdunstung in den oberen Schichten und die Beeinflussung der darunter liegenden Schichten durch perkolierendes Schmelzwasser. Hierbei konnte belegt werden, dass die Gleichgewichtsfraktionierung zwischen Wasser und Eis auf der einen Seite zur Anreicherung an schweren Isotopen in isotopisch leichten Schneeschichten führt, auf der anderen Seite darunter liegende isotopisch deutlich schwerere Schneeschichten sich durch denselben Prozess isotopisch abreichern. Dieser Effekt führt zu einer deutlichen Homogenisierung des Isotopengehaltes in einem Schneeprofil. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Homogenisierung der Schneeprofile sich nach Erreichen der Isothermie erheblich beschleunigt und dass ab diesem Zeitpunkt schneller fließendes Sickerwasser zu einer deutlichen Anreicherung der schweren Isotope im gesamten Schneeprofil führt. Für eine genauere Analyse der Schneeprofile wäre es zudem nötig gewesen vor Ort die Temperatur und das Schneewasseräquivalent der einzelnen Schichten zu messen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass eine Menge an Daten erhoben wurde, für deren genauere Analyse der Umfang dieser Arbeit nicht ausreichend war. So wurden alle Ergebnisse nur für den  $\delta^2$ H Wert beschrieben, für den  $\delta^{18}$ O Wert befinden sich lediglich Abbildungen im Anhang. Zudem konnte nicht überprüft werden weshalb sich der Deuterium-Excess wesentlich besser modellieren lässt als  $\delta^2$ H und  $\delta^{18}$ O, bzw. weshalb sich für den Deuterium-Excess eine signifikantere Höhenabhängigkeit ergibt. Aufgrund der Vielzahl an Regressionen war es auch nicht möglich eine genauere Sensitivitätsanalyse oder eine Kreuzvalidierung der einzelnen Modelle durchzuführen. Dennoch liefert diese Arbeit eine gute Datengrundlage für weitere Analysen.

# Literaturverzeichnis

- AIZEN V, AIZEN E, MELACK J, MARTMA T, 1996: Isotopic measurements of precipitation on central Asian glaciers (Southeastern Tibet, northern Himalayas, central Tien Shan). *Journal of Geophysical Research*, 101, 9185-9198
- AMBACH W, DANSGAARD W, EISNER H, MÖLLER J, 1967: The altitude effect on the isotopic composition of precipitation and glacier ice in the alps. *Tellus*, 20, 595-600
- AMBACH W, EISNER H, PESSL K, 1972: Isotopic oxygen composition of firn, old snow and precipitation in alpine regions. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 8, 125-135
- ARNASON B, BUASON TH, MARTINEC J, THEODÔRSSON P, 1972: Movement of water through a snowpack traced by deuterium and tritium. Role of Snow and Ice in Hydrology (Proceedings of the Banff Symposium, Canada, September 1972), IAHS, 107, 299-312
- BAERTSCHI P, 1976: Absolute <sup>18</sup>O content of Standard Mean Ocean Water. *Earth and Planetary Science Letters*, 31, 341–344
- BRAND WA, GEILMANN H, CROSSON ER, RELLA CW, 2009: Cavity ring-down spectroscopy versus high-temperature conversion isotope ratio mass spectrometry; a case study on  $\delta^2$ H and  $\delta^{18}$ O of pure water samples and alcohol/water mixtures. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23, 1879-1884
- CLARK ID, FRITZ P, 1997: Environmental isotopes in hydrogeology. CRC Press, New York
- CRAIG H, 1961: Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702-1708
- CRAIG H, BOATO G, WHITE DE, 1956: Isotopic geochemistry of thermal waters. National Academy of Science, Nuclear Science Series, 19, 29-36
- COOPER LW, 1998: Isotopic Fractionation in Snow Cover. In: KENDALL C, MCDONNELL JJ, (EDS.): Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, 87-118
- DANSGAARD W, 1953: The abundance of <sup>18</sup>O in atmospheric water and water vapour. *Tellus*, 6, 461-469

- DANSGAARD W, 1954: The <sup>18</sup>O abundance in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6, 241-260.
- DANSGAARD W, 1964: Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16, 436-468
- DE WIT JC, VAN DER STRAATEN CM, MOOK WG, 1980: Determination of the absolute D/H ratio of VSMOW and SLAP. *Geostandards Newsletters*, 4, 33-36
- DEUTSCH S, AMBACH W, EISNER H, 1966: Oxygen Isotope Study of Snow and Firn on an Alpine glacier. *Earth and Planetary Science Letters*, 1, 197-201
- DINGMAN SL, 2002: Physical Hydrology. Prentice Hall, New Jersey, 541
- EPSTEIN S, MAYEDA T, 1953: Variation of <sup>18</sup>O content of waters from natural sources. Geochimica et Cosmochimica Acta, 4, 213-224
- FRIEDMAN I, 1953: Deuterium content of natural water and other substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 89–103
- FRIEDMAN I, MACHTA L, SOLLER R, 1962: Water vapour exchange between a water droplet and its environment. *Journal of Geophysical Research*, 67, 2761–2766
- FRIEDMAN I, SMITH G, 1970: Deuterium content of snow cores from Sierra Nevada area. Science, 169, 467-470
- GAT JR, 1996: Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth* and Planetary Sciences, 24, 225–262
- GILFILLAN E, 1934: The isotopic composition of sea water. Journal of the American Chemical Society, 56, 406-408
- GONFIANTINI R, 1970: Discussion. ISOTOPE HYDROLOGY, IAEA, Vienna, 56
- GONFIANTINI R, 1978: Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271, 534-536
- GUNDEL A, 2010: Groundwater vulnerability of mountainous catchments under drought conditions in Switzerland. PhD-Projektbeschreibung, IHF, Freiburg i. Br., unveröffentlicht
- GURNEY SD, LAWRENCE DSL, 2004: Seasonal trends in the stable isotopic composition of snow and meltwater runoff in a subarctic catchment at Okstindan, Norway. *Nordic Hydrology*, 35(2), 119–137

- HELSEL D, HIRSCH R, 2002: Statistical Methods in Water Resources. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Hydrologic Analysis and Interpretation, 4
- HÖLTING B, 1996: Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, Enke-Verlag, Stuttgart
- INGRAHAM N, 1998: Isotopic Variations in Precipitation. In: KENDALL C, MCDONNELL JJ, (EDS.): Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, 87-118
- JUDY C, MEIMAN JR, FRIEDMAN I, 1970: Deuterium variations in an annual snowpack. Water Resources Research, 6, 125-129
- KÖNIGER P, 2003: Tracerhydrologische Ansätze zur Bestimmung der Grundwasserneubildung. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 16, IHF, Freiburg i. Br.
- KÖNIGER P, HUBBART JA, LINK T, MARSHALL JD (2008): Isotopic variation of snow cover and streamflow in response to changes in canopy structure in a snow-dominated mountain catchment. *Hydrological Processes*, 22, 557-566
- KROUSE RM, SMITH JL, 1972: O18/O16 abundance Variations in Sierra Nevada seasonal snowpacks and their use in hydrological research. Role of Snow and Ice in Hydrology (Proceedings of the Banff Symposium, Canada, September 1972), IAHS, 107, 24-38
- LEIBUNDGUT C, MALOSZWSKI P, KÜLLS C, 2009: Tracers in Hydrology. Wiley-Blackwell
- LIEBMINGER A, HABERHAUER G, PAPESCH W, HEISS G, 2006: Correlation of the isotopic composition in precipitation with local conditions in alpine regions. *Journal of Geophysical Research*, 111
- MARTINEC J, MOSER H, DE QUERVAIN MR, RAUERT W, STICHLER W, 1977: Assessment of processes in the snowpack by parallel deuterium, tritium and oxygen-18 sampling. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice* (Proceedings of the Grenoble Symposium, Switzerland, September 1972), IAHS, 118, 220–231
- MAST MA, KENDALL C, CAMPBELL DH, CLOW DW, BACK J, 1995: Determination of hydrologic pathways in an alpine-subalpine basin using isotopic and chemical tracers, Loch Vale Watershed, Colorado, USA. *Biogeochemistry of Seasonally Snow-covered Catchments* (Proceedings of a Boulder Symposium, USA, Juli 1995), IAHS, 228, 263– 270.

- MOOK WG, 2000: Environmental Isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications. *IHP-V Technical Documents in Hydrology*, 39(I), UNESCO, Paris
- MORAN TA, MARSHALL SJ, EVAN EC, SINCLAIR KE, 2007: Altitudinal gradients of stable isotopes in lee-slope precipitation in the Canadian Rocky Mountains. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39(3), 455–467
- MOSER H, RAUERT W, 1980: Isotopenmethoden in der Hydrologie Lehrbuch der Hydrogeologie (8). Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart
- MOSER H, STICHLER W, 1970: Deuterium measurements on snow samples from the Alps. Isotope Hydrology, IAEA, Vienna, 43-57
- MOSER H, STICHLER W, 1971: Die Verwendung des Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalts bei hydrologischen Untersuchungen. *Geolocica Bavarica*, 64, 7-35
- MOSER H, STICHLER W, 1974: Deuterium and oxygen-18 contents as an index of the properties of snow covers. *Snow Mechanics* (Proceedings of the Grindelwald Symposium, Switzerland April 1974), IAHS, 114, 122–135
- NIEWODNICZANSKI J, GRABCZAK J, BARANSKI L, RZEPKA J, 1981: The altitude effect on the isotopic composition of snow in high mountains. *Journal of glaciology*, 95(27),1981
- O'NEIL JR, 1968: Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water, *Journal* of *Physical Chemistry*, 72, 3683-3684
- RABEN P, THEAKSTONE WH, 1994: Isotopic and ionic changes in a snow cover at different altitudes: observations at Austre Okstindbreen in 1991. *Annuals of glaciology*, 19, 85-91
- RENAUD A, 1969: Etudes physiques et chimiques sur la glace de l'indlandsis du Groenland 1959. In: DANSGAARD W, MERLIVAT L, ROTH E: Section 3.1, *Medd. Grønl.*, 177, 62-76
- RODHE A, 1998: Snowmelt-dominated systems. In: KENDALL C, MCDONNELL JJ (Eds.): Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam, 391-433
- SACHS L, HEDDERICH J, 2006: Angewandte Statistik-Methodensammlung mit R. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- SCHÖNWIESE CD, 2006: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart

- SENEVIRATNE S, 2009: Early recognition of critical drought and low-flow conditions in Switzerland - coping with shortages in soil moisture, groundwater and runoff (DROUGHT-CH), ETH Zürich, WSL, IHF, Universität Zürich
- SIEGENTHALER U, OESCHGER H, 1980: Correaltion of <sup>18</sup>O in precipitation with temperature and altitude. *Nature*, 285, 314-317
- SINCLAIR KE, MARSHALL JS, (2008): Post-depositional modification of stable water isotopes in winter snowpacks in the Canadian Rocky Mountains. *Annals of Glaciology* 1(49), 96– 106
- SINCLAIR KE, MARSHALL JS, (2009): Temperature and vapour-trajectory controls on the stable-isotope signal in Canadian Rocky Mountain snowpacks. *Journal of Glaciology*, 191(55), 485–498
- STAHEL WA, (2007): Statistische Datenanalyse: Eine Einführung für Naturwissenschaftler.5. Aufl., Vieweg, Wiesbaden
- STICHLER W, SCHOTTERER U, FRÖHLICH K, GINOT P, KULL C, GÄGGELER H, POUYAUD B, 2001: "Influence of sublimation on stable isotope records recovered from highaltitude glaciers in the tropical Andes." *Journal of Geophysical Research*, 19(106), 22613– 22620
- TAYLOR S, FENG X, KIRCHNER JW, OSTERHUBER R, KLAUE B, RENSHAW CE, 2001: Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt. Water Resources Research, 3(37), 759–769.
- TECHEL F, PIELMEIER C, 2010: Point observations of liquid water content in natural snow investigating methodical, spatial and temporal aspects. *The Cryosphere Discussions*, 4, 1967-2011
- UNNIKRISHNA PV, MCDONNELL JJ, KENDALL C, 2002: Isotope variations in a Sierra Nevada snowpack and their relation to meltwater, *Journal of Hydrology*, 1-4(260), 38-57

Anhang A

# Tabellarische Übersicht der Höhenproben und Schneeprofile

Tabelle A 1: Übersicht der entnommenen Höhenproben und der dazugehörigen Parameter

| treiten- Längen- | rad [°] grad [°]<br>(LA) (LO) | 7.00156 9.63221 | 7.00523 9.63360 | 7.00851 9.63511 | 7.00849 9.63500 | 7.01014 9.63005 | 7.01082 9.62782 | 7.01106 9.62261 | 7.01072 9.61676 | 7.01074 9.61678 | 7.01076 9.60836 | 7.01260 9.60397 | 7.01125 9.62376 |            | 7.01104 9.61879 | 7.011049.618797.010129.61307 | 7.01104         9.61879           7.01012         9.61307           7.01075         9.60735 | 7.01104         9.61879           7.01012         9.61307           7.01075         9.60735           7.01260         9.60397 | 7.01104         9.61879           7.01012         9.61307           7.01075         9.60735           7.01260         9.60397           7.03469         9.64042 | 7.01104         9.61879           7.01012         9.61307           7.01075         9.60735           7.01260         9.60397           7.03469         9.64042           7.03336         9.633451 |
|------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|------------------------------|---|---|---|--|
|                  | 0 X 8                         | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 93 4            | 129 4           |            | 129 4           | 129 4<br>129 4               | 129 4<br>129 4<br>129 4   | 129 4<br>129 4<br>129 4<br>129 4  | 129 4<br>129 4<br>129 4<br>129 4<br>101 4   | <ul> <li>129</li> <li>4</li> <li>129</li> <li>4</li> <li>129</li> <li>4</li> <li>101</li> <li>4</li> <li>101</li> <li>4</li> </ul>   |
|                  | C D                           | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               |            | 0               | 0 0                          | 0 0 0   | - 0 0 0   | 0 0 0 - 0   | 0 0 0 1 0 0  |
|                  | WB                            | -               | 1               | 0               | 1               | 0.5             | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0.5             | ¢          | 0               | 0 0                          | 0 0 0   |   |   | - 0 0 0 0 -  |
|                  | Kvert                         | -1.07           | -0.18           | -0.34           | -0.34           | 0.20            | 0.53            | 0.65            | 0.64            | 0.64            | 2.32            | -0.33           | 0.36            | 1 87       | 1.0.1           | -0.02                        | -0.02<br>-0.09  | -0.02<br>-0.09<br>-0.33   | -0.02<br>-0.09<br>-0.33<br>1.22   | -0.02<br>-0.02<br>-0.33<br>1.22<br>-0.25   |
|                  | Khori                         | 0.44            | 0.29            | 0.66            | 0.66            | -0.14           | -0.48           | -1.27           | -0.21           | -0.21           | -0.69           | -0.04           | -0.13           | -0.11      |                 | 0.03                         | 0.03<br>0.07  | 0.03<br>0.07<br>-0.04   | 0.03<br>0.07<br>-0.04<br>-0.94  | 0.03<br>0.07<br>-0.04<br>-0.94<br>0.13   |
|                  | HA (cos)                      | -0.64           | -1.00           | -0.26           | -0.27           | -0.01           | -0.53           | -0.63           | -0.52           | -0.52           | -0.02           | -0.70           | 0.82            | 0.01       |                 | -0.73                        | -0.73<br>-0.98  | -0.73<br>-0.98<br>-0.70   | -0.73<br>-0.98<br>-0.70<br>0.82   | -0.73<br>-0.98<br>-0.70<br>0.82<br>0.88  |
| Hangaus-         | richtung<br>[°]               | 130             | 175             | 105             | 105             | 91              | 122             | 129             | 121             | 121             | 91              | 134             | 35              | 89         |                 | 137                          | 137<br>168  | 137<br>168<br>134   | 137<br>168<br>134<br>35   | 137<br>168<br>134<br>35<br>28  |
| Hangnei-         | gung                          | 25              | 26              | 19              | 19              | 23              | 17              | 12              | 21              | 21              | 17              | 32              | 23              | 17         |                 | 32                           | 32<br>24  | 32<br>24<br>32  | 32<br>24<br>32<br>11  | 32<br>24<br>32<br>11   |
|                  | Diff<br>[ m ]                 | 0.28            | 0.31            | -0.08           | 0.37            | -0.10           | 0.32            | 0.13            | -0.36           | 1.04            | -0.28           | -0.54           | -0.33           | -0.35      |                 | -0.16                        | -0.16<br>-0.37  | -0.16<br>-0.37<br>-0.87   | -0.16<br>-0.37<br>-0.87<br>0.29   | -0.16<br>-0.37<br>-0.87<br>0.29<br>0.41  |
| Schnee-          | tiefe<br>[ m ]                | 0.11            | 0.25            | 0.07            | 0.60            | 0.30            | 0.85            | 0.80            | 0.50            | 2.00            | 0.85            | 0.70            | 0.30            | 0.40       |                 | 0.80                         | 0.80<br>0.75  | 0.80<br>0.75<br>0.40  | 0.80<br>0.75<br>0.40<br>0.14  | 0.80<br>0.75<br>0.40<br>0.14<br>0.14   |
| Hone             | ü. NN<br>[ m ]                | 1326            | 1410            | 1555            | 1616            | 1734            | 1830            | 1928            | 2059            | 2136            | 2251            | 2334            | 1901            | 1986       |                 | 2132                         | 2132<br>2247  | 2132<br>2247<br>2352  | 2132<br>2247<br>2352<br>1340  | 2132<br>2247<br>2352<br>1340<br>1442   |
|                  | a<br>[%0]                     | 11.3            | 11.0            | 10.4            | 10.3            | 8.5             | 10.2            | 10.1            | 9.6             | 12.5            | 11.3            | 9.7             | 13.6            | 12.9       |                 | 17.1                         | 12.1  | 12.1<br>12.8<br>12.4  | 12.8<br>12.8<br>12.4<br>11.7  | 12.1<br>12.8<br>12.4<br>11.7<br>12.0   |
|                  | [º%]<br>H- Q                  | -133.3          | -125.8          | -145.8          | -134.5          | -127.9          | -124.9          | -126.4          | -125.9          | -132.7          | -129.7          | -124.1          | -115.4          | -112.2     | -106.8          | 0.001                        | -120.9  | -120.9<br>-120.9  | -120.9<br>-120.9<br>-116.0  | -120.9<br>-120.9<br>-116.0<br>-120.5   |
| c 18 c           | 0or 8                         | -18.1           | -17.1           | -19.5           | -18.1           | -17.1           | -16.9           | -17.1           | -16.9           | -18.2           | -17.6           | -16.7           | -16.1           | -15.6      | -14.9           |                              | -16.7   | -16.7<br>-16.7  | -16.7<br>-16.7<br>-16.0   | -16.7<br>-16.7<br>-16.0<br>-16.6   |
|                  | Datum                         | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 03.04.2010      | 09.05.2010      | 09.05.2010 | 09.05.2010      |                              | 09.05.2010  | 09.05.2010<br>09.05.2010  | 09.05.2010<br>09.05.2010<br>11.04.2010  | 09.05.2010<br>09.05.2010<br>11.04.2010<br>11.04.2010   |
|                  | Name                          | TS1             | TS2             | TS3             | TS4             | TS5             | TS6             | TS7             | TS8             | TS9             | TS10            | TS11            | TS27            | TS28       | TS29            |                              | TS30  | TS30<br>TS31  | TS30<br>TS31<br>TN1   | TS30<br>TS31<br>TN1<br>TN2   |

- 114 -

| V      |  |
|--------|--|
| Anhang |  |

|      |            | <sup>18</sup> 0 | <mark>А <sup>2</sup>н</mark> | P    | Höhe           | Schnee-        | Diff  | Hangnei- | Hangaus-        |          |       |       |     |        |     | Breiten-         | Längen-           |
|------|------------|-----------------|------------------------------|------|----------------|----------------|-------|----------|-----------------|----------|-------|-------|-----|--------|-----|------------------|-------------------|
| Name | Datum      | [%]             | [%]                          | [%0] | ü. NN<br>[ m ] | tiefe<br>[ m ] | [m]   | [°]      | richtung<br>[°] | HA (cos) | Khori | Kvert | WB  | с<br>С | YOC | grad [°]<br>(LA) | grad [ °]<br>(LO) |
| TN4  | 11.04.2010 | -16.9           | -123.1                       | 11.9 | 1649           | 0.95           | 0.67  | 15       | 29              | 0.87     | 0.28  | -0.91 | 0.5 | 0      | 101 | 47.02943         | 9.62685           |
| TN5  | 11.04.2010 | -18.4           | -133.5                       | 14.0 | 1757           | 1.40           | 0.97  | 16       | 30              | 0.87     | -0.33 | 0.56  | 0   | 0      | 101 | 47.02705         | 9.62202           |
| 1N6  | 11.04.2010 | -18.3           | -133.6                       | 12.6 | 1843           | 1.15           | 0.60  | 22       | 18              | 0.95     | -0.42 | -0.09 | 0   | 0      | 101 | 47.02527         | 9.61953           |
| TN7  | 11.04.2010 | -16.7           | -121.5                       | 11.8 | 1955           | 0.70           | -0.01 | 18       | 351             | 0.99     | -0.56 | 0.78  | 0   | 0      | 101 | 47.02320         | 9.61516           |
| TN8  | 11.04.2010 | -18.2           | -131.9                       | 13.7 | 2070           | 2.20           | 1.33  | 20       | 341             | 0.94     | -0.49 | 1.16  | 0   | 0      | 101 | 47.02138         | 9.61491           |
| 6NL  | 11.04.2010 | -18.4           | -132.6                       | 14.6 | 2197           | 3.00           | 1.95  | 22       | 41              | 0.75     | 0.34  | 2.43  | 0   | 0      | 101 | 47.01780         | 9.61290           |
| TN10 | 11.04.2010 | -18.3           | -133.0                       | 13.2 | 2265           | 1.40           | 0.25  | 18       | 356             | 1.00     | -1.19 | 1.57  | 0   | 0      | 101 | 47.01630         | 9.60913           |
| TN11 | 11.04.2010 | -21.7           | -158.8                       | 14.5 | 2365           | 0.65           | -0.64 | 10       | С               | 1.00     | -0.95 | 0.29  | 0   | 1      | 101 | 47.01269         | 9.60315           |
| TN24 | 18.05.2010 | -14.5           | -104.9                       | 11.4 | 1678           | 0.35           | 0.03  | 23       | 10              | 0.98     | -2.06 | 1.50  | 0   | 0      | 138 | 47.02869         | 9.62490           |
| TN25 | 18.05.2010 | -15.8           | -113.4                       | 13.0 | 1737           | 09.0           | 0.20  | 16       | 30              | 0.87     | -0.33 | 0.56  | 0   | 0      | 138 | 47.02697         | 9.62203           |
| TN26 | 18.05.2010 | -14.9           | -106.7                       | 12.3 | 1839           | 0.42           | -0.13 | 19       | 17              | 0.96     | 0.02  | -0.14 | 0   | 0      | 138 | 47.02508         | 9.61947           |
| TN27 | 18.05.2010 | -15.8           | -114.5                       | 11.8 | 1940           | 1.05           | 0.36  | 22       | 4               | 1.00     | -0.11 | -0.30 | 0   | 0      | 138 | 47.02332         | 9.61541           |
| TN28 | 18.05.2010 | -17.2           | -122.9                       | 14.4 | 2041           | 1.60           | 0.77  | 20       | 341             | 0.94     | -0.49 | 1.16  | 0   | 0      | 138 | 47.02137         | 9.61485           |
| TN29 | 18.05.2010 | -16.5           | -117.3                       | 14.3 | 2179           | 2.05           | 1.03  | 22       | 41              | 0.75     | -0.14 | -1.29 | 0   | 0      | 138 | 47.01786         | 9.61294           |
| TN30 | 18.05.2010 | -15.1           | -109.1                       | 11.7 | 2275           | 0.50           | -0.66 | 34       | 17              | 0.96     | -0.16 | 0.07  | 0   | 0      | 138 | 47.01389         | 9.66584           |
| TN31 | 18.05.2010 | -17.3           | -122.5                       | 15.6 | 2346           | 1.60           | 0.34  | 19       | 39              | 0.78     | -0.53 | 1.08  | 0   | 1      | 138 | 47.01302         | 9.60384           |
| ES1  | 07.04.2010 | -16.1           | -115.6                       | 13.5 | 2334           | 0.65           | -0.59 | 20       | 29              | 0.87     | -2.69 | -0.45 | 0   | 1      | 76  | 46.53421         | 7.63989           |
| ES2  | 07.04.2010 | -17.5           | -127.6                       | 12.7 | 2279           | 0.65           | -0.52 | 7        | 216             | -0.81    | -0.63 | 1.69  | 0   | 0      | 76  | 46.53229         | 7.63813           |
| ES3  | 07.04.2010 | -20.0           | -147.8                       | 12.4 | 2191           | 0.65           | -0.39 | 20       | 171             | -0.99    | 0.07  | -0.03 | 0   | 0      | 76  | 46.52865         | 7.63650           |
| ES4  | 07.04.2010 | -17.3           | -128.2                       | 10.5 | 2100           | 0.55           | -0.36 | 21       | 171             | -0.99    | -0.26 | 0.14  | 0   | 0      | 97  | 46.52606         | 7.63518           |
| ES5  | 07.04.2010 | -18.2           | -133.2                       | 12.7 | 2000           | 0.70           | -0.07 | 18       | 243             | -0.45    | 0.07  | -0.20 | 0   | 0      | 97  | 46.52309         | 7.63357           |
| ES6  | 07.04.2010 | -17.9           | -132.0                       | 11.5 | 1899           | 0.70           | 0.07  | 13       | 201             | -0.93    | 0.14  | 0.07  | 0   | 0      | 97  | 46.52086         | 7.63083           |
| ES7  | 07.04.2010 | -16.7           | -123.7                       | 9.7  | 1822           | 0.40           | -0.12 | 12       | 214             | -0.83    | 0.48  | -0.23 | 0   | 0      | 76  | 46.51938         | 7.62756           |
| ES8  | 07.04.2010 | -17.6           | -132.1                       | 8.8  | 1700           | 0.20           | -0.15 | 30       | 237             | -0.54    | 0.26  | 0.29  | 1   | 0      | 76  | 46.52688         | 7.62028           |
| ES9  | 07.04.2010 | -17.5           | -127.2                       | 12.6 | 1615           | 0.15           | -0.08 | 17       | 242             | -0.46    | -1.20 | 0.44  | 1   | 0      | 97  | 46.52962         | 7.61583           |

| Schnee  |
|---------|
| im      |
| Isotope |
| Stabile |

| Name | Datum      | δ <sup>18</sup> Ο<br>Γ <sup>02</sup> -1 | 8 <sup>2</sup> H | <i>q</i> | Höhe<br>ü. NN | Schnee-<br>tiefe | Diff  | Hangnei-<br>gung | Hangaus-<br>richtung | HA (cos) | Khori | Kvert | WB  | U I | 0V  | Breiten-<br>grad [ ° ] | Längen-<br>grad [ °] |
|------|------------|---|------------------|----------|---------------|------------------|-------|------------------|----------------------|----------|-------|-------|-----|-----|-----|------------------------|----------------------|
|      |            | 00%                                     | 00/              | 00%      | [ m ]         | [ m ]            |       | [。]              | [。]                  |          |       |       |     |     |     | (FA)                   | (TO)                 |
| EN1  | 06.04.2010 | -19.1                                   | -136.6           | 16.2     | 2880          | 1.40             | -0.61 | 18               | 0                    | 1.00     | -0.20 | -0.27 | 0   |     | 96  | 46.41769               | 7.55064              |
| EN2  | 06.04.2010 | -18.1                                   | -129.4           | 15.4     | 2780          | 2.70             | 0.83  | 21               | 8                    | 0.99     | 0.16  | -0.49 | 0   | 0   | 96  | 46.41863               | 7.55298              |
| EN3  | 06.04.2010 | -19.5                                   | -140.7           | 15.2     | 2683          | 1.10             | -0.63 | 32               | 281                  | 0.19     | -0.81 | 1.12  | 0   | 0   | 96  | 46.42129               | 7.55210              |
| EN4  | 06.04.2010 | -18.5                                   | -132.3           | 15.5     | 2603          | 2.70             | 1.08  | 35               | 15                   | 0.97     | -0.26 | -0.26 | 0   | 0   | 96  | 46.42228               | 7.55194              |
| EN5  | 06.04.2010 | -18.7                                   | -133.9           | 15.4     | 2542          | 2.40             | 0.87  | 30               | 13                   | 0.97     | 0.38  | 0.74  | 0   | 0   | 96  | 46.42313               | 7.55263              |
| EN6  | 06.04.2010 | -15.7                                   | -110.6           | 14.7     | 2429          | 1.20             | -0.18 | 19               | 355                  | 1.00     | 0.23  | 0.75  | 0   | 0   | 96  | 46.42493               | 7.55383              |
| EN8  | 06.04.2010 | -16.2                                   | -115.6           | 13.9     | 2206          | 1.20             | 0.14  | 24               | 17                   | 0.96     | 0.13  | -0.48 | 0   | 0   | 96  | 46.42741               | 7.55760              |
| EN9  | 06.04.2010 | -18.9                                   | -139.5           | 11.6     | 1988          | 0.40             | -0.36 | 25               | 19                   | 0.95     | 0.13  | -0.48 | 0   | 0   | 96  | 46.42738               | 7.55767              |
| EN21 | 07.04.2010 | -17.5                                   | -128.4           | 11.8     | 1965          | 0.70             | -0.02 | 20               | 323                  | 0.80     | -0.31 | -0.69 | 0   | 0   | 70  | 46.47222               | 7.51807              |
| EN22 | 07.04.2010 | -17.2                                   | -126.7           | 11.1     | 1864          | 0.50             | -0.08 | 18               | 350                  | 0.99     | 0.31  | -0.07 | 0   | 0   | 70  | 46.47500               | 7.51802              |
| EN23 | 07.04.2010 | -17.8                                   | -130.3           | 12.0     | 1751          | 1.10             | 0.68  | 22               | 16                   | 0.96     | -0.48 | 0.47  | 0   | 0   | 70  | 46.47840               | 7.51852              |
| EN24 | 07.04.2010 | -17.4                                   | -127.0           | 11.9     | 1646          | 0.70             | 0.42  | 18               | 347                  | 0.97     | 0.80  | -0.80 | 0.5 | 0   | 70  | 46.48127               | 7.51956              |
| EN25 | 07.04.2010 | -16.8                                   | -123.1           | 11.2     | 1553          | 0.75             | 0.61  | 19               | 336                  | 0.91     | 0.11  | 0.04  | 0.5 | 0   | 70  | 46.48351               | 7.52016              |
| EN26 | 07.04.2010 | -16.2                                   | -118.0           | 11.3     | 1492          | 0.45             | 0.39  | 10               | 212                  | -0.85    | 0.00  | -0.05 | 0.5 | 0   | 70  | 46.48900               | 7.52631              |
| EN27 | 07.04.2010 | -16.1                                   | -121.3           | 7.5      | 1349          | 0.30             | 0.44  | 6                | 138                  | -0.75    | 0.62  | -0.67 | 0.5 | 0   | 76  | 46.48365               | 7.54335              |
| EN31 | 29.04.2010 | -14.9                                   | -102.5           | 16.3     | 2885          | 1.28             | -0.74 | 19               | 348                  | 0.98     | -0.88 | 3.04  | 0   | 1   | 119 | 46.41762               | 7.55075              |
| EN32 | 29.04.2010 | -17.4                                   | -122.7           | 16.3     | 2800          | 2.20             | 0.30  | 20               | 8                    | 0.99     | -0.22 | -0.05 | 0   | 0   | 119 | 46.41847               | 7.55304              |
| EN33 | 29.04.2010 | -15.0                                   | -105.7           | 13.9     | 2680          | 0.95             | -0.78 | 36               | 8                    | 0.99     | -0.01 | 0.16  | 0   | 0   | 119 | 46.42135               | 7.55214              |
| EN34 | 29.04.2010 | -19.1                                   | -136.9           | 16.3     | 2599          | 2.60             | 0.99  | 37               | 12                   | 0.98     | -0.10 | -0.31 | 0   | 0   | 119 | 46.42262               | 7.55193              |
| EN35 | 29.04.2010 | -15.7                                   | -110.0           | 15.4     | 2553          | 1.70             | 0.15  | 30               | 13                   | 0.97     | 0.38  | 0.74  | 0   | 0   | 119 | 46.42317               | 7.55276              |
| EN37 | 29.04.2010 | -11.7                                   | -79.2            | 14.3     | 2351          | 06.0             | -0.37 | 32               | 8                    | 66.0     | 0.51  | 2.24  | 0   | 0   | 119 | 46.42564               | 7.55622              |
| EN38 | 29.04.2010 | -18.8                                   | -136.0           | 14.7     | 2217          | 3.00             | 1.92  | 22               | 11                   | 0.98     | 0.08  | -0.20 | 0   | 0   | 119 | 46.42724               | 7.55783              |
| EN39 | 29.04.2010 | -19.0                                   | -140.3           | 11.5     | 2012          | 0.80             | 0.01  | ٢                | 23                   | 0.92     | 0.01  | 0.06  | 0   | 0   | 119 | 46.43511               | 7.56400              |
| EN42 | 05.06.2010 | -16.5                                   | -118.4           | 13.2     | 2742          | 3.20             | 1.38  | 17               | 1                    | 1.00     | -0.24 | 0.15  | 0   | 0   | 156 | 46.41971               | 7.55398              |
| EN43 | 05.06.2010 | -12.8                                   | -92.9            | 9.1      | 2638          | 1.05             | -0.62 | 32               | 357                  | 1.00     | -0.01 | 0.16  | 0   | 0   | 156 | 46.42131               | 7.55215              |

| $\triangleleft$         |
|-------------------------|
| pt                      |
| ų                       |
| Ja                      |
| D1                      |
| $\overline{\mathbf{A}}$ |

| Name | Datum      | δ <sup>18</sup> Ο | δ <sup>2</sup> Η | q         | Höhe<br>ü. NN | Schnee-<br>tiefe | Diff  | Hangnei-<br>gung | Hangaus-<br>richtung | HA (cos) | Khori | Kvert | WB  | C | DOY | Breiten-<br>grad [ ° ] | Längen-<br>grad [ °] |
|------|------------|-------------------|------------------|-----------|---------------|------------------|-------|------------------|----------------------|----------|-------|-------|-----|---|-----|------------------------|----------------------|
|      |            | 00%               | 00%              | <b>00</b> | [ m ]         | [ m ]            | m     | [。]              | [。]                  |          |       |       |     |   |     | ( <b>L</b> A)          | (TO)                 |
| EN44 | 05.06.2010 | -11.9             | -85.4            | 10.1      | 2579          | 0.65             | -0.94 | 34               | 16                   | 0.96     | -0.41 | 1.01  | 0   | 0 | 156 | 46.42267               | 7.55247              |
| EN45 | 05.06.2010 | -12.9             | -92.5            | 10.6      | 2544          | 1.06             | -0.48 | 33               | 18                   | 0.95     | -0.02 | 0.94  | 0   | 0 | 156 | 46.42309               | 7.55274              |
| EN46 | 05.06.2010 | -13.3             | -94.8            | 11.6      | 2414          | 0.50             | -0.86 | 22               | 48                   | 0.67     | -0.79 | 0.71  | 0   | 0 | 156 | 46.42496               | 7.55394              |
| EN47 | 05.06.2010 | -15.8             | -115.7           | 10.9      | 2319          | 0.60             | -0.62 | 32               | 8                    | 0.99     | 0.51  | 2.24  | 0   | 0 | 156 | 46.42579               | 7.55632              |
| EN48 | 05.06.2010 | -14.4             | -107.9           | 7.1       | 2163          | 0.45             | -0.55 | 20               | 359                  | 1.00     | -0.01 | -0.13 | 0   | 0 | 156 | 46.42808               | 7.55841              |
| DS1  | 16.04.2010 | -17.6             | -132.0           | 8.9       | 1993          | 0.31             | -0.45 | 18               | 209                  | -0.87    | 0.10  | -0.45 | 0   | 0 | 106 | 46.71173               | 9.86346              |
| DS2  | 16.04.2010 | -19.2             | -143.2           | 10.4      | 2110          | 0.85             | -0.08 | 28               | 205                  | -0.91    | -0.49 | 0.62  | 0   | 0 | 106 | 46.71277               | 9.86621              |
| DS3  | 16.04.2010 | -18.7             | -139.5           | 10.0      | 2205          | 0.41             | -0.65 | 24               | 212                  | -0.85    | -0.40 | 1.17  | 0   | 0 | 106 | 46.71401               | 9.86755              |
| DS4  | 16.04.2010 | -18.4             | -139.5           | 7.9       | 2308          | 0.43             | -0.78 | 30               | 193                  | -0.97    | 0.11  | 0.87  | 0   | 0 | 106 | 46.71558               | 9.87098              |
| DS5  | 16.04.2010 | -18.8             | -142.1           | 8.3       | 2408          | 0.60             | -0.75 | 29               | 178                  | -1.00    | 0.21  | -0.01 | 0   | 0 | 106 | 46.71736               | 9.87098              |
| DS6  | 16.04.2010 | -19.5             | -145.4           | 10.6      | 2512          | 0.43             | -1.06 | 36               | 175                  | -1.00    | 0.58  | 0.02  | 0   | 0 | 106 | 46.71885               | 9.87269              |
| DS7  | 16.04.2010 | -18.1             | -135.7           | 8.9       | 2604          | 0.35             | -1.27 | 39               | 177                  | -1.00    | 0.11  | 0.28  | 0   | 0 | 106 | 46.72017               | 9.87305              |
| DS8  | 16.04.2010 | -19.2             | -144.4           | 8.9       | 2714          | 0.45             | -1.33 | 31               | 163                  | -0.96    | -0.67 | 0.40  | 0   | 0 | 106 | 46.72129               | 9.87340              |
| DS9  | 16.04.2010 | -19.7             | -144.7           | 12.7      | 2744          | 1.90             | 0.08  | 16               | 130                  | -0.64    | -0.98 | 3.25  | 0   | 1 | 106 | 46.72166               | 9.87357              |
| DS27 | 23.05.2010 | -17.4             | -129.0           | 10.5      | 2595          | 0.35             | -1.26 | 37               | 174                  | -1.00    | 0.38  | -0.47 | 0   | 0 | 143 | 46.72005               | 9.87288              |
| DS28 | 23.05.2010 | -15.7             | -117.7           | 8.1       | 2681          | 0.25             | -1.48 | 38               | 190                  | -0.99    | 0.28  | -1.67 | 0   | 0 | 143 | 46.72134               | 9.87292              |
| DS29 | 23.05.2010 | -18.7             | -140.3           | 9.1       | 2737          | 2.25             | 0.44  | 16               | 130                  | -0.64    | -0.98 | 3.25  | 0   | 1 | 143 | 46.72162               | 9.87350              |
| DNI  | 17.04.2010 | -19.8             | -147.8           | 10.5      | 1693          | 0.65             | 0.31  | 13               | 56                   | 0.55     | 1.25  | -0.11 | 0   | 0 | 107 | 46.76727               | 9.88460              |
| DN2  | 17.04.2010 | -19.4             | -145.8           | 9.4       | 1798          | 1.00             | 0.51  | 39               | 50                   | 0.65     | -0.26 | 0.53  | 0.5 | 0 | 107 | 46.76344               | 9.88453              |
| DN3  | 17.04.2010 | -19.0             | -142.5           | 9.7       | 1899          | 1.05             | 0.42  | 31               | 52                   | 0.62     | -0.67 | 0.29  | 0.5 | 0 | 107 | 46.76144               | 9.88414              |
| DN4  | 17.04.2010 | -19.1             | -143.8           | 9.3       | 2001          | 0.95             | 0.18  | 20               | 7                    | 0.99     | 0.83  | -1.25 | 0   | 0 | 107 | 46.76047               | 9.88180              |
| DN5  | 17.04.2010 | -20.1             | -149.2           | 11.2      | 2105          | 1.25             | 0.33  | 22               | 341                  | 0.95     | -0.38 | -0.01 | 0   | 0 | 107 | 46.75863               | 9.88140              |
| DN6  | 17.04.2010 | -19.6             | -143.9           | 12.7      | 2215          | 1.55             | 0.47  | 18               | 4                    | 1.00     | -0.03 | -0.01 | 0   | 0 | 107 | 46.75555               | 9.87830              |
| DN7  | 17.04.2010 | -20.0             | -146.6           | 13.2      | 2345          | 1.60             | 0.34  | 15               | 14                   | 0.97     | -0.15 | 0.01  | 0   | 0 | 107 | 46.74581               | 9.87614              |
| DN8  | 17.04.2010 | -20.9             | -153.3           | 13.7      | 2456          | 2.00             | 0.59  | 13               | 339                  | 0.93     | 0.25  | 0.30  | 0   | 0 | 107 | 46.74164               | 9.87486              |

| Schnee  |
|---------|
| e im    |
| Isotope |
| Stabile |

| Name        | Datum      | δ <sup>18</sup> Ο<br>Γ%οΙ | گ <sup>2</sup> H<br>ا‰ا | <i>d</i><br>[%] | Höhe<br>ü. NN | Schnee-<br>tiefe | Diff  | Hangnei-<br>gung | Hangaus-<br>richtung | HA (cos) | Khori | Kvert | WB  | л<br>С | 00  | Breiten-<br>grad [ ° ] | Längen-<br>grad [ °] |
|-------------|------------|---------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------------|-------|------------------|----------------------|----------|-------|-------|-----|--------|-----|------------------------|----------------------|
|             |            | [00/]                     | [00/]                   | 00/             | [ m ]         | [ m ]            | [ m ] | [。]              | [。]                  |          |       |       |     |        |     | (FA)                   | (D)                  |
| DN9         | 17.04.2010 | -20.7                     | -150.8                  | 14.6            | 2552          | 1.50             | -0.05 | 25               | 356                  | 1.00     | 1.29  | -0.38 | 0   | 0      | 107 | 46.73779               | 9.87440              |
| DN10        | 17.04.2010 | -20.9                     | -152.2                  | 15.0            | 2686          | 2.40             | 0.66  | 36               | 350                  | 0.99     | 0.65  | -2.14 | 0   | 0      | 107 | 46.73530               | 9.87645              |
| DN11        | 17.04.2010 | -20.7                     | -151.9                  | 13.8            | 2800          | 1.70             | -0.20 | 22               | 283                  | 0.23     | -2.42 | 1.25  | 0   | 1      | 107 | 46.73438               | 9.87748              |
| DN24        | 22.05.2010 | -18.7                     | -140.6                  | 9.3             | 2021          | 0.58             | -0.22 | 26               | 351                  | 0.99     | 0.26  | -0.84 | 0   | 0      | 142 | 46.76035               | 9.88171              |
| DN25        | 22.05.2010 | -18.0                     | -135.3                  | 8.3             | 2120          | 0.90             | -0.04 | 23               | 341                  | 0.94     | -0.04 | -0.31 | 0   | 0      | 142 | 46.75882               | 9.88103              |
| DN26        | 22.05.2010 | -16.4                     | -121.8                  | 9.2             | 2225          | 1.10             | 0.01  | 21               | 5                    | 1.00     | -0.41 | 0.22  | 0   | 0      | 142 | 46.75576               | 9.87823              |
| DN27        | 22.05.2010 | -14.9                     | -111.3                  | 8.2             | 2368          | 1.25             | -0.04 | 17               | 18                   | 0.95     | -0.15 | 0.01  | 0   | 0      | 142 | 46.74582               | 9.87605              |
| DN28        | 22.05.2010 | -18.2                     | -135.0                  | 10.5            | 2484          | 2.20             | 0.75  | 13               | 340                  | 0.94     | 0.25  | 0.30  | 0   | 0      | 142 | 46.74152               | 9.87491              |
| DN29        | 22.05.2010 | -19.7                     | -146.6                  | 11.4            | 2571          | 1.95             | 0.37  | 16               | 18                   | 0.95     | -0.20 | 0.31  | 0   | 0      | 142 | 46.73793               | 9.87442              |
| DN30        | 22.05.2010 | -19.1                     | -140.4                  | 12.0            | 2673          | 2.00             | 0.28  | 41               | 16                   | 0.96     | 1.25  | -1.18 | 0   | 0      | 142 | 46.73535               | 9.87619              |
| DN31        | 22.05.2010 | -19.1                     | -141.9                  | 10.5            | 2808          | 1.95             | 0.04  | 22               | 283                  | 0.23     | -2.42 | 1.25  | 0   | 1      | 142 | 46.73433               | 9.87749              |
| $\Gamma SO$ | 25.04.2010 | -19.8                     | -148.1                  | 10.7            | 2002          | 0.15             | -0.63 | 25               | 130                  | -0.65    | -1.41 | 0.85  | 0   | 0      | 115 | 46.70098               | 10.14932             |
| LS1         | 25.04.2010 | -16.9                     | -127.0                  | 8.0             | 2086          | 0.50             | -0.39 | 19               | 180                  | -1.00    | -0.15 | 0.16  | 0   | 0      | 115 | 46.70549               | 10.15497             |
| LS2         | 25.04.2010 | -18.9                     | -141.6                  | 9.3             | 2202          | 0.50             | -0.56 | 22               | 151                  | -0.88    | -0.12 | 0.44  | 0   | 0      | 115 | 46.70774               | 10.15530             |
| LS3         | 25.04.2010 | -18.9                     | -142.7                  | 8.8             | 2307          | 0.50             | -0.71 | 30               | 155                  | -0.91    | 0.17  | 0.37  | 0   | 0      | 115 | 46.70994               | 10.15448             |
| LS4         | 25.04.2010 | -19.5                     | -146.7                  | 9.4             | 2442          | 0.60             | -0.79 | 36               | 159                  | -0.94    | 0.08  | 1.14  | 0   | 0      | 115 | 46.71197               | 10.15355             |
| LS5         | 25.04.2010 | -17.1                     | -126.2                  | 10.9            | 2605          | 1.40             | -0.22 | 28               | 158                  | -0.92    | -0.96 | 1.63  | 0   | 0      | 115 | 46.71357               | 10.15148             |
| LS6         | 25.04.2010 | -16.0                     | -118.3                  | 9.9             | 2754          | 0.85             | -0.98 | 25               | 152                  | -0.88    | -0.03 | 0.32  | 0   | 0      | 115 | 46.71535               | 10.14950             |
| LN0         | 25.04.2010 | -17.6                     | -130.5                  | 10.2            | 1858          | 0.40             | -0.17 | 21               | 287                  | 0.29     | 0.10  | 0.91  | 0.5 | 0      | 115 | 46.69758               | 10.14408             |
| <b>LN1</b>  | 24.04.2010 | -20.4                     | -150.6                  | 12.5            | 2110          | 1.40             | 0.47  | 6                | 239                  | -0.52    | 0.86  | -2.34 | 0   | 0      | 114 | 46.70528               | 10.15555             |
| LN2         | 24.04.2010 | -20.3                     | -149.6                  | 12.7            | 2220          | 1.60             | 0.52  | 15               | 295                  | 0.42     | 0.08  | -0.15 | 0   | 0      | 114 | 46.70849               | 10.16314             |
| LN3         | 24.04.2010 | -18.1                     | -132.1                  | 12.5            | 2328          | 1.90             | 0.67  | 14               | 296                  | 0.43     | 0.77  | -0.97 | 0   | 0      | 114 | 46.70898               | 10.16919             |
| LN4         | 24.04.2010 | -19.7                     | -145.2                  | 12.3            | 2413          | 2.50             | 1.15  | 25               | 329                  | 0.86     | -0.18 | -0.15 | 0   | 0      | 114 | 46.70762               | 10.17349             |
| LN5         | 24.04.2010 | -18.6                     | -135.9                  | 12.7            | 2510          | 1.70             | 0.21  | 28               | 352                  | 0.99     | -0.49 | 0.10  | 0   | 0      | 114 | 46.70601               | 10.17592             |
| 5N6         | 24.04.2010 | -18.3                     | -131.2                  | 15.3            | 2613          | 3.00             | 1.37  | 19               | 345                  | 0.97     | 1.11  | -0.23 | 0   | 0      | 114 | 46.70328               | 10.18327             |

| A      |  |
|--------|--|
| Anhang |  |

|      |            | A 18  | 8 <sup>2</sup> 11 | μ         | Höhe  | Schnee- | Diff  | Hangnei- | Hangaus- |          |       |       |    |        | Breit          | en- L  | ängen-        |
|------|------------|-------|-------------------|-----------|-------|---------|-------|----------|----------|----------|-------|-------|----|--------|----------------|--------|---------------|
| Name | Datum      |       |                   | 3         | ü. NN | tiefe   |       | gung     | richtung | HA (cos) | Khori | Kvert | WB | ق<br>ل | <b>OY</b> grad | [°]    | rad [°]       |
|      |            | 00    | 200               | <b>00</b> | [ m ] | [ m ]   | m     | [。]      | [。]      |          |       |       |    |        | (LA            |        | ( <b>T</b> 0) |
| LN7  | 24.04.2010 | -18.4 | -133.3            | 13.8      | 2717  | 2.15    | 0.37  | 24       | 327      | 0.84     | 0.29  | -0.54 | 0  | 0 1    | 14 46.70       | 155 10 | 0.18849       |
| LN9  | 24.04.2010 | -19.1 | -139.1            | 13.6      | 2893  | 1.10    | -0.93 | 28       | 277      | 0.12     | 0.06  | 1.18  | 0  | 1      | 14 46.69       | 946 1( | 0.19057       |
| LN21 | 26.05.2010 | -16.5 | -123.7            | 8.2       | 2114  | 0.27    | -0.66 | 12       | 283      | 0.22     | 0.25  | -1.59 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 528 10 | 0.15579       |
| LN22 | 26.05.2010 | -18.2 | -137.5            | 8.3       | 2210  | 1.50    | 0.43  | 21       | 309      | 0.62     | 0.67  | -0.16 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 824 10 | 0.16322       |
| LN23 | 26.05.2010 | -16.2 | -120.1            | 9.5       | 2346  | 1.36    | 0.10  | 20       | 322      | 0.79     | 0.17  | -0.08 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 836 10 | 0.16929       |
| LN24 | 26.05.2010 | -17.2 | -128.9            | 8.5       | 2413  | 2.60    | 1.25  | 23       | 354      | 0.99     | 0.39  | -0.48 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 764 10 | 0.17286       |
| LN25 | 26.05.2010 | -15.1 | -111.9            | 9.0       | 2529  | 1.20    | -0.32 | 20       | 355      | 1.00     | -0.66 | -0.34 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 584 1( | 0.17604       |
| LN26 | 26.05.2010 | -16.8 | -122.7            | 11.9      | 2633  | 3.00    | 1.34  | 19       | 345      | 0.97     | 1.11  | -0.23 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 328 10 | 0.18327       |
| LN27 | 26.05.2010 | -14.8 | -107.6            | 10.7      | 2726  | 1.50    | -0.29 | 21       | 311      | 0.65     | 0.11  | -0.46 | 0  | 0 1    | 46 46.70       | 175 10 | ).18856       |
|      |            |       |                   |           |       |         |       |          |          |          |       |       |    |        |                |        |               |

Stabile Isotope im Schnee

|             |            |            |       | - 10  | ,<br>, |      |           |             |                        |                   |
|-------------|------------|------------|-------|-------|--------|------|-----------|-------------|------------------------|-------------------|
| Name        | Datum      | Höhe ü. NN | Tiefe | 0 0   | Η- Q   | q    | Härte     | Korngröße   | Schneeart              | Feuchte           |
|             |            | [ m ]      |       | [00]  | [%0]   | [%0] |           |             |                        |                   |
| TSP1        | 03.04.2010 | 1975       | 0.22  | -17.9 | -133.3 | 9.7  | Faust     | fein        | Neuschnee              | trocken           |
| TSP2        |            |            | 0.18  | -16.5 | -122.8 | 9.2  | 2 Finger  | fein        | verfestigter Neuschnee | leicht feucht     |
| TSP3        |            |            | 0.02  | -18.1 | -131.7 | 13.3 | Bleistift | grob        | Harschschicht          | trocken           |
| TSP4        |            |            | 0.5   |       |        |      | 1 Finger  | mittel      | Altschnee              | feucht            |
| TSP5        |            |            | 0.2   |       |        |      | 2 Finger  | mittel      | Altschnee              | feucht            |
| TSP21       | 09.05.2010 | 1970       | 0.03  | -15.0 | -107.3 | 12.9 | Faust     | fein        | Neuschnee              | leicht feucht     |
| TSP22       |            |            | 0.12  | -15.5 | -112.2 | 11.5 | 2 Finger  | grob        | harschiger Neuschnee   | leicht feucht     |
| TSP23       |            |            | 0.2   | -17.7 | -130.1 | 11.5 | Faust     | mittel      | Altschnee              | feucht            |
| TSP24       |            |            | 0.25  | -19.6 | -145.2 | 11.6 | 2 Finger  | grob        | Altschnee              | feucht            |
| TNP1        | 11.04.2010 | 2070       | 0.16  | -15.5 | -108.5 | 15.6 | 2 Finger  | grob        | Neuschnee              | trocken           |
| TNP2        |            |            | 0.23  | -16.3 | -122.6 | 7.9  | 1 Finger  | fein        | älterer Neuschnee      | trocken           |
| TNP3        |            |            | 0.23  | -18.1 | -126.9 | 18.2 | 1 Finger  | fein        | Altschnee              | trocken           |
| TNP4        |            |            | 0.3   | -20.1 | -145.7 | 14.9 | 2 Finger  | mittel      | Altschnee              | sehr trocken      |
| TNP5        |            |            | 0.27  | -18.4 | -133.7 | 13.6 | Faust     | mittel-grob | Altschnee              | trocken           |
| TNP6        |            |            | 0.51  | -23.4 | -174.1 | 13.2 | 1Finger   | mittel      | Altschnee              | trocken           |
| <b>TNP7</b> |            |            | 0.3   | -18.0 | -130.5 | 13.3 | 2 Finger  | grob        | Altschnee              | trocken           |
| TNP8        |            |            | 0.32  | -14.4 | -97.0  | 18.1 | 2 Finger  | grob        | Altschnee              | ganz unten feucht |
| TNP21       | 18.05.2010 | 2041       | 0.2   | -15.6 | -110.7 | 14.2 | Faust     | fein        | Neuschnee              | trocken           |
| TNP22       |            |            | 0.1   | -16.6 | -121.3 | 11.3 | Bleistift | mittel      | Altschnee              | gefroren          |
| TNP23       |            |            | 0.2   | -17.8 | -127.6 | 14.9 | 2 Finger  | mittel      | Altschnee              | trocken           |
| TNP24       |            |            | 0.3   | -17.0 | -122.7 | 13.2 | 2 Finger  | mittel      | Altschnee              | trocken           |
| TNP25       |            |            | 0.5   | -21.1 | -155.8 | 12.7 | 1 Finger  | mittel      | Altschnee              | trocken           |
| TNP26       |            |            | 0.3   | -18.0 | -131.5 | 12.1 | 2 Finger  | mittel      | Altschnee              | trocken           |
| TNP27       |            |            | 0.2   | -15.9 | -111.0 | 15.9 | 1 Finger  | grob        | Altschnee              | trocken           |

Tabelle A 2: Übersicht der entnommenen Schneeprofile und Eigenschaften der einzelnen Schneeschichten

| 0 |  |
|---|--|
| Ā |  |
| - |  |
|   |  |

|       |            |                     |       | - 16 -       | , ,    |           |                    |                 |                         |                 |
|-------|------------|---------------------|-------|--------------|--------|-----------|--------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| Name  | Datum      | Höhe ü. NN<br>[ m ] | Tiefe | ٥., ٥<br>[%] | [•%]   | d<br>[%0] | Härte              | Korngröße       | Schneeart               | Feuchte         |
| ESP1  | 07.04.2010 | 2191                | 0.07  | -17.8        | -130.5 | 11.6      | 2 Finger           | mittel          | geschmolzener Neuschnee | leicht feucht   |
| ESP2  |            |                     | 0.22  | -17.8        | -130.5 | 11.6      | Bleistift-Messer   | grob            | Altschnee               | feucht          |
| ESP3  |            |                     | 0.23  | -20.1        | -148.8 | 11.7      | 1 Finger-Bleistift | grob            | Altschnee               | feucht          |
| ESP4  |            |                     | 0.13  | -19.2        | -141.3 | 12.4      | Faust              | sehr grob       | Altschnee               | sehr feucht/naß |
| ENP1  | 06.04.2010 | 2591                | 0.2   | -18.2        | -127.7 | 17.8      | Faust              | fein            | Neuschnee               | trocken         |
| ENP2  |            |                     | 0.02  | -22.7        | -163.9 | 18.0      | Bleistift          | mittel          | Harsch                  | trocken         |
| ENP3  |            |                     | 0.25  | -15.1        | -103.6 | 17.2      | 2 Finger           | mittel          | verfestigter Neuschnee  | trocken         |
| ENP4  |            |                     | 0.65  | -14.6        | -102.0 | 14.9      | 2 Finger           | fein            | Altschnee               | leicht feucht   |
| ENP5  |            |                     | 0.75  | -27.0        | -199.1 | 17.0      | 1 Finger           | grob            | Altschnee               | feucht          |
| ENP6  |            |                     | 0.45  | -13.1        | -84.6  | 20.3      | Bleistift          | mittel          | Altschnee               | feucht          |
| ENP21 | 29.04.2010 | 2553                | 0.1   | -8.8         | -56.0  | 14.4      | Faust              | grob            | Sulz                    | feucht          |
| ENP22 |            |                     | 0.3   | -15.7        | -111.8 | 13.4      | 3 Finger           | fein            | Altschnee               | leicht feucht   |
| ENP23 |            |                     | 0.4   | -19.7        | -141.4 | 16.5      | 2 Finger           | mittel          | Altschnee               | leicht feucht   |
| ENP24 |            |                     | 0.4   | -24.9        | -185.1 | 13.7      | 2 Finger           | grob            | Altschnee               | trocken         |
| ENP25 |            |                     | 0.2   | -14.7        | -104.2 | 13.6      | 1-2 Finger         | grob            | Altschnee               | trocken         |
| ENP26 |            |                     | 0.25  | -13.9        | -94.3  | 16.6      | Bleistift          | mittel          | Altschnee               | feucht          |
| ENP27 |            |                     | 0.05  | -13.2        | -95.9  | 6.6       | Messer             | sehr grob       | Eis                     | gefroren        |
| ENP31 | 05.06.2010 | 2579                | 0.05  | -13.3        | -101.7 | 4.9       | weicher als Faust  | mittel          | Sulz                    | feucht          |
| ENP32 |            |                     | 0.1   | -11.4        | -85.7  | 5.8       | Faust              | mittel bis grob | Altschnee               | feucht          |
| ENP33 |            |                     | 0.2   | -11.7        | -85.9  | 7.3       | weicher als Faust  | grob            | Altschnee               | feucht          |
| ENP34 |            |                     | 0.2   | -12.7        | -93.0  | 8.5       | Faust              | sehr grob       | Altschnee               | nass            |
| ENP35 |            |                     | 0.01  | -13.1        | -95.2  | 9.7       | Eis                | mittel          | Eis-Wasser-Granulat     | feucht          |

Anhang A

Stabile Isotope im Schnee

| :     |            | Höhe ü. NN | i     | δ <sup>18</sup> Ο | δ <sup>2</sup> Η | р    |                   |                 |                     |               |
|-------|------------|------------|-------|-------------------|------------------|------|-------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| Name  | Datum      | [ m ]      | liefe | [00]              | [%0]             | [00] | Härte             | Korngröße       | Schneeart           | Feuchte       |
| DSP1  | 16.04.2010 | 2710       | 0.05  | -17.6             | -131.6           | 8.8  | Faust             | grob            | Firn                | feucht        |
| DSP2  |            |            | 0.35  | -19.2             | -144.4           | 8.9  | Faust             | sehr grob       | Altschnee           | leicht feucht |
| DSP3  |            |            | 0.05  | -16.7             | -124.7           | 9.1  | Messer            |                 | Eis                 | gefroren      |
| DSP21 | 23.05.2010 | 2681       | 0.03  | -12.0             | -87.4            | 8.5  | weicher als Faust | sehr grob       | nass                | nass          |
| DSP22 |            |            | 0.2   | -16.6             | -123.5           | 9.5  | Faust             | sehr grob       | Altschnee           | nass          |
| DSP23 |            |            | 0.03  | -16.5             | -125.8           | 5.9  | Bleistift         | grob            | Eis-Wasser-Granulat | gefroren      |
| DNP1  | 17.04.2010 | 2345       | 0.05  | -14.0             | -101.1           | 11.2 | Faust             | grob            | Sulz                | feucht        |
| DNP2  |            |            | 0.25  | -17.5             | -131.2           | 8.5  | Faust-2 Finger    | fein            | Altschnee           | leicht feucht |
| DNP4  |            |            | 0.05  | -21.5             | -159.7           | 12.5 | 1 Finger          | mittel          | Harsch              | trocken       |
| DNP3  |            |            | 0.25  | -19.2             | -140.8           | 12.6 | 2 Finger          | fein            | Altschnee           | trocken       |
| DNP5  |            |            | 0.25  | -22.8             | -166.2           | 16.5 | 2 Finger          | mittel          | Altschnee           | leicht feucht |
| DNP6  |            |            | 0.2   | -20.2             | -149.6           | 11.7 | Faust             | grob            | Altschnee           | trocken       |
| DNP7  |            |            | 0.05  | -19.5             | -139.6           | 16.7 | Bleistift-Messer  | mittel          | Harsch              | trocken       |
| DNP8  |            |            | 0.3   | -24.0             | -178.5           | 13.6 | Faust-2 Finger    | mittel          | Altschnee           | trocken       |
| DNP9  |            |            | 0.1   | -19.7             | -144.5           | 13.2 | Bleistift         | mittel          | Altschnee           | leicht feucht |
| DNP10 |            |            | 0.3   | -18.8             | -135.7           | 14.7 | Faust             | sehr grob       | Altschnee           | feucht        |
| DNP21 | 22.05.2010 | 2345       | 0.02  | -8.3              | -52.5            | 13.7 | Faust             | mittel          | Sulz                | Sulz          |
| DNP22 |            |            | 0.08  | -13.6             | -98.4            | 10.0 | 2 Finger          | mittel          | Harschschicht       | trocken       |
| DNP23 |            |            | 0.1   | -14.3             | -104.7           | 9.4  | Faust             | mittel          | Altschnee           | feucht        |
| DNP24 |            |            | 0.3   | -19.9             | -144.1           | 15.0 | 2 Finger          | mittel          | Altschnee           | leicht feucht |
| DNP25 |            |            | 0.3   | -17.0             | -123.8           | 12.3 | 3 Finger          | mittel          | Altschnee           | trocken       |
| DNP26 |            |            | 0.25  | -19.7             | -141.7           | 16.1 | 2 Finger          | fein            | Altschnee           | leicht feucht |
| DNP27 |            |            | 0.2   | -17.6             | -125.4           | 15.3 | Faust             | mittel bis grob | Altschnee           | feucht        |
|       |            |            |       |                   |                  |      |                   |                 |                     |               |

| Vame Dati<br>SP1 25.04.<br>SP2<br>SP3<br>SP3<br>SP4<br>SP5<br>SP6<br>SP6<br>NP1 24.04. | <b>um</b><br>.2010 | Höhe ü. NN<br>[ m l | Tiefe | 0     | H O    | а    |                   |                 |                             |                     |
|--|--------------------|---------------------|-------|-------|--------|------|-------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------|
| SP1 25.04.<br>SP2 25.04.<br>SP3 SP4 SP5 SP5 SP6 NP1 24.04.                             | .2010              | []                  |       | [%0]  | [%0]   | [00] | Härte             | Korngröße       | Schneeart                   | Feuchte             |
|  |                    | 2529                | 0.02  | -13.6 | -101.8 | 7.3  | Faust             | mittel bis grob | Sulz                        | nass                |
| LSP3<br>LSP4<br>LSP5<br>LSP6<br>LSP6<br>LSP1 24.04.                                    |                    |                     | 0.05  | -13.6 | -101.8 | 7.3  | 2 Finger          | sehr grob       | Harschschicht               | feucht              |
| LSP4<br>LSP5<br>LSP6<br>LSP6<br>LNP1 24.04.  |                    |                     | 0.45  | -15.7 | -117.6 | 8.2  | weicher als Faust | sehr grob       | Altschnee                   | feucht              |
| LSP5<br>LSP6<br>LNP1 24.04.  |                    |                     | 0.3   | -19.4 | -143.6 | 11.8 | Faust             | weniger grob    | Altschnee                   | leicht feucht       |
| LSP6<br>LNP1 24.04.  |                    |                     | 0.25  | -18.2 | -131.8 | 13.4 | 3 Finger          | sehr grob       | Altschnee                   | nass                |
| LNP1 24.04.  |                    |                     | 0.01  | -17.2 | -121.9 | 15.7 | Messer            | ı               | Eis                         | gefroren            |
|  | 2010               | 2510                | 0.1   | -18.8 | -137.3 | 13.5 | Faust             | mittel          | sulzige Neuschneeschicht    | leicht feucht       |
| LNP2   |                    |                     | 0.3   | -15.9 | -115.7 | 11.4 | 2 Finger          | fein            | kompakter älterer Neuschnee | trocken             |
| LNP3   |                    |                     | 0.33  | -23.1 | -170.9 | 14.0 | weicher als Faust | mittel bis grob | Altschnee                   | leicht feucht       |
| LNP4   |                    |                     | 0.2   | -19.0 | -142.6 | 9.2  | Faust             | sehr grob       | Altschnee                   | leicht feucht       |
| LNP5   |                    |                     | 0.3   | -20.7 | -153.3 | 12.1 | 3 Finger          | grob            | Altschnee                   | leicht feucht       |
| LNP6   |                    |                     | 0.22  | -16.8 | -120.3 | 14.0 | 2 Finger          | mittel          | Altschnee                   | leicht feucht       |
| LNP7   |                    |                     | 0.28  | -15.3 | -108.1 | 14.7 | Faust             | sehr sehr grob  | Altschnee                   | feucht bis gefroren |
| NP21 26.05.  | .2010              | 2529                | 0.1   | -13.3 | -96.5  | 10.1 | weicher als Faust | mittel          | Sulz                        | nass                |
| NP22   |                    |                     | 0.3   | -15.8 | -117.3 | 8.9  | Faust             | mittel          | Altschnee                   | nass                |
| NP23   |                    |                     | 0.2   | -18.3 | -137.8 | 8.2  | weicher als Faust | mittel bis grob | Altschnee                   | sehr feucht         |
| NP24   |                    |                     | 0.3   | -15.7 | -115.0 | 10.2 | Faust             | grob            | Altschnee                   | sehr feucht         |
| NP25   |                    |                     | 0.2   | -15.9 | -117.1 | 10.2 | Faust             | sehr grob       | Altschnee                   | nass                |
|  |                    |                     |       |       |        |      | 1                 | 0               |                             |                     |

Anhang A
# Anhang B

## $\delta^{18}O$ Werte in den Schneeprofilen



Abbildung A-B 1: δ<sup>18</sup>O Werte in den Schneeprofilen des Taschinasbach-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 2: δ<sup>18</sup>O Werte in den Schneeprofilen des Engstligen-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 3: δ<sup>18</sup>O Werte in den Schneeprofilen des Dischma-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 4: δ<sup>18</sup>O Werte in den Schneeprofilen des Laschadura-Einzugsgebietes.





Abbildung A-B 5: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Nordhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 6: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Südhang des Taschinasbach-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 7: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Nordhang des Engstligen-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 8: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke der ersten Begehungen im Engstligen-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 9: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Nordhang des Dischma-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 10: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Südhang des Dischma-

#### Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 11: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Nordhang des Laschadura-Einzugsgebietes.



Abbildung A-B 12: Darstellung der δ<sup>18</sup>O Werte der Schneedecke im Südhang des Laschadura-Einzugsgebietes.

# Anhang C

#### Abkürzungsverzeichnis

| DGM               | Digitales Gelände Modell               |     |
|-------------------|--|-----|
| Diff              | Differenz der Schneetiefe              | [m] |
| DN                | Dischma-Einzugsgebiet Nordhang         |     |
| DNP               | Schneeprofil Dischma -Einzugsgebiet    |     |
|                   | Nordhang                               |     |
| DOY               | Tag des Jahres                         |     |
| DS                | Dischma -Einzugsgebiet Südhang         |     |
| DCD               | Schneeprofil Dischma -Einzugsgebiet    |     |
| DSP               | Südhang                                |     |
| EN                | Engstligen-Einzugsgebiet Nordhang      |     |
|                   | Schneeprofil Engstligen -Einzugsgebiet |     |
| ENP               | Nordhang                               |     |
| ES                | Engstligen -Einzugsgebiet Südhang      |     |
| ECD               | Schneeprofil Engstligen -Einzugsgebiet |     |
| ESP               | Südhang                                |     |
| G                 | Gipfelparameter                        |     |
| GISP              | Greenland Ice Sheet Precipitation      |     |
| GMWL              | Global Meteoric Water Line             |     |
| HA                | Hangausrichtung                        |     |
| HN                | Hangneigung                            |     |
| IAEA              | International Atomic Energy Agency     |     |
| K <sub>hori</sub> | Horizontale Hangkonvexität             |     |
| Kvert             | Vertikale Hangkonvexität               |     |
| LA                | Breitengrad                            | [°] |
| LMWL              | Local Meteoric Water Line              |     |

| LN      | Laschadura-Einzugsgebiet Nordhang        |     |
|---------|--|-----|
| IND     | Schneeprofil Laschadura -Einzugsgebiet   |     |
| LNP     | Nordhang                                 |     |
| LO      | Längengrad                               | [°] |
| LS      | Laschadura -Einzugsgebiet Südhang        |     |
| LCD     | Schneeprofil Laschadura -Einzugsgebiet   |     |
| LSP     | Südhang                                  |     |
| MLR     | Multiple Lineare Regression              |     |
| m ü. NN | Meter über Normalnull                    | [m] |
| NISOT   | Nationales Isotopenmessnetz der Schweiz  |     |
| SLAP    | Standard Light Antarctic Precipitation   |     |
| SIE     | Schnee- und Lawinenforschungsinstitut,   |     |
| SLF     | Davos, Schweiz                           |     |
| TN      | Taschinasbach-Einzugsgebiet Nordhang     |     |
| TND     | Schneeprofil Taschinasbach-Einzugsgebiet |     |
| 1111    | Nordhang                                 |     |
| TS      | Taschinasbach-Einzugsgebiet Südhang      |     |
| тер     | Schneeprofil Taschinasbach-Einzugsgebiet |     |
| 151     | Südhang                                  |     |
| VIF     | Varianzinflationsfaktor                  |     |
| V-SMOW  | Vienna Mean Ocean Standard Water         |     |
| WB      | Waldbedeckung                            |     |
| WGS 84  | World Geodetic System 1984               |     |

## Symbolverzeichnis

|   | α                           | Fraktionierungsfaktor                       |                            |
|---|-----------------------------|---|----------------------------|
|   | β                           | Regressionskoeffizienten                    |                            |
|   | Δ                           | Absoluter Fehler                            |                            |
|   | δ                           | Delta-Wert                                  | [ ‰ ]                      |
|   | d                           | Deuterium-Excess                            | [ ‰ ]                      |
|   | ε                           | Residuen                                    |                            |
|   | $^{1}\mathrm{H}$            | Protium                                     |                            |
|   | <sup>2</sup> H              | Deuterium                                   |                            |
|   | <sup>3</sup> H              | Tritium                                     |                            |
|   | i                           | i-ter Wert                                  |                            |
|   | k                           | Boltzmann-Konstante                         | $\left[\frac{J}{K}\right]$ |
|   | m                           | Relative Molekülmasse                       |                            |
|   | <sup>18</sup> O             | Isotop Sauerstoff-18                        |                            |
| R | D                           | Verhältnis des selteneren Isotops zu dem am |                            |
|   | K                           | häufigsten vorkommenden Isotop              |                            |
|   | $R^2$                       | Bestimmtheitsmaß                            |                            |
|   | R <sup>2</sup> <sub>a</sub> | Angepasstes Bestimmtheitsmaß                |                            |
|   | σ                           | Standardabweichung                          |                            |
|   | Т                           | Absolute Temperatur                         | [K]                        |
|   | ν                           | Diffusionsgeschwindigkeit                   | $\left[\frac{m}{s}\right]$ |
|   | x                           | Erklärende Variablen                        |                            |
|   | γ                           | Zielgröße                                   |                            |
|   |                             |   |                            |

### Danksagung

Hiermit möchte ich mich zuerst bei allen bedanken die mich während den alpinen Probetouren für diese Arbeit durch Ihre Begleitung unterstützten. Ein besonderer Dank gilt dabei Christoph Schaab und Jonas Zimmermann ohne deren Hilfe die ersten Touren mit Gipsarm nicht möglich gewesen wären.

Zudem danke ich Prof. Dr. Markus Weiler für die Vergabe dieses interessanten Themas und die Unterstützung bei der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Ein weiterer Dank gilt Barbara Herbstritt für die großartige Hilfe bei der Laboranalyse.

Für die Organisation externer Klimadaten und ständige Erreichbarkeit bei diesbezüglich auftauchenden Fragen danke ich Anita Gundel.

Annabel Diebel, Florian Altenburger und Daniel Baur danke ich für das Korrektur lesen dieser Arbeit.

Ein sonniger Gruß geht an Frau Effenberger.

Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Karl-Heinz Dietermann und Isolde Hauser für die Ermöglichung dieses Studiums.

# Ehrenwörtliche Erklärung

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

Ort, Datum

Unterschrift