



**Universität für Bodenkultur Wien**  
Department Bautechnik und Naturgefahren  
Institut für Alpine Naturgefahren (IAN)  
Peter Jordan Str. 82      Tel.: #43-1-47654-4350  
A-1190 WIEN      Fax: #43-1-47654-4390



## **IAN REPORT 100 Modul 1** Sicherheitsstudie Feuersanglawine

Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung und  
Wirksamkeitsbeurteilung der Verbauungsmaßnahmen



Im Auftrag:

**Österreichische Bundesbahnen**  
**GB Fahrweg Regionalleitung Villach**



Wien, Oktober 2006

**Report 100: Sicherheitsstudie Feuersanglawine**  
**Modul 1: Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung  
und Wirksamkeitsbeurteilung der Verbauungsmaßnahmen**

Im Auftrag von: Österreichische Bundesbahnen, GB Fahrweg Regionalleitung Villach

GZ: BV5/4300020979 (19.12.2003)

Projektleitung: Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hübl Johannes<sup>1</sup>

Wissenschaftliche Leitung: Dipl.-Ing. Dr. Karl Kleemayr<sup>2</sup>

Ausarbeitung: Dipl.-Ing. Chiari Michael<sup>1</sup>

Dipl.-Ing. Bacher Michael<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Universität für Bodenkultur

Department Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren

Peter Jordan Str. 82  
A – 1190 Wien

Tel.: #43-1-47654-4350  
Fax: #43-1-47654-4390

<sup>2)</sup> Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum

für Wald, Naturgefahren und Landschaft

A- 6020 Innsbruck, Rennweg 1

Tel.: #43-0512-573933 5101

Referenz (Literaturzitat): HÜBL, J., KLEEMAYR, K., CHIARI, M., BACHER, M. (2006):  
Sicherheitsstudie Feuersanglawine, Modul 1: Ermittlung der flächigen Schneehöhenverteilung  
und Wirksamkeitsbeurteilung der Verbauungsmaßnahmen; IAN Report 100 Modul 1, Institut  
für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur - Wien (unveröffentlicht)

Wien, im Oktober 2006



<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>ZIELSETZUNG</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>GEBIETSBESCHREIBUNG - PROBLEMBESCHREIBUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>DATENGRUNDLAGEN</b> .....	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Meteorologische Daten</b> .....	<b>11</b>
4.1.1	ZAMG Daten der Station Badgastein .....	11
4.1.2	Daten der ÖBB Messstationen .....	11
4.1.2.1	Daten der Station Feuersang .....	11
4.1.2.2	Daten der Station Thomaseck.....	12
4.1.3	Daten aus dem Hydrographischen Jahrbüchern .....	13
<b>4.2</b>	<b>Ereignisdaten - Chronik</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3</b>	<b>Geländedaten</b> .....	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>METHODIK</b> .....	<b>15</b>
<b>5.1</b>	<b>Wirksamkeit von Schneestützwerten – Grundlagen</b> .....	<b>15</b>
5.1.1	Beurteilung von Lawinenschutzmaßnahmen.....	15
5.1.2	Wirkungsanalyse.....	16
5.1.3	Restrisiko .....	19
<b>5.2</b>	<b>Statistische Grundlagen</b> .....	<b>21</b>
5.2.1	Statistische Analyse von Extremereignissen.....	21
5.2.2	Vorgehensweise .....	24
5.2.2.1	Jährlichkeit von Extremereignissen.....	26
<b>5.3</b>	<b>Geostatistische Grundlagen</b> .....	<b>30</b>
5.3.1	Die Variogrammwolke.....	31
5.3.2	Das experimentelle Variogramm .....	32
5.3.3	Das regionale Variogramm .....	33
5.3.4	Das theoretische Variogramm .....	34
5.3.5	Anisotropie .....	36
5.3.6	Ordinary Kriging .....	37
5.3.7	Kreuz-Validierung .....	38
<b>5.4</b>	<b>Windmessung mit Gill Wind Sonic</b> .....	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>FELDDATENERHEBUNG</b> .....	<b>41</b>
<b>6.1</b>	<b>Übersicht der Aufnahmen im Gebiet der Feuersanglawine</b> .....	<b>41</b>
<b>6.2</b>	<b>Schneehöhenablotung entlang von Profilen</b> .....	<b>43</b>



6.2.1	Entwicklung der Schneehöhen über den Winter am Profil 1 .....	43
6.2.2	Entwicklung der Schneehöhen über den Winter am Profil 2 .....	46
<b>6.3</b>	<b>Windmessung entlang der abgeloteten Profile .....</b>	<b>48</b>
6.3.1	Situation bei Wind aus nördlicher Richtung .....	49
6.3.2	Situation bei Südföhn .....	53
<b>6.4</b>	<b>Vergleich des Windfeldes im Stützverbau mit dem Windfeld auf der Freifläche.....</b>	<b>56</b>
<b>6.5</b>	<b>Schneeprofile .....</b>	<b>58</b>
6.5.1	Entwicklung der Schneedecke im Profil 1 .....	59
6.5.2	Entwicklung der Schneedecke im Profil 2 .....	64
<b>7</b>	<b>ANALYSE .....</b>	<b>67</b>
<b>7.1</b>	<b>Analyse der meteorologischen Daten .....</b>	<b>67</b>
7.1.1	Auswertung der Station Badgastein .....	67
7.1.1.1	Auswertung nach der Regressionsmethode .....	69
7.1.1.2	Auswertung nach der Momentenmethode .....	70
7.1.2	Zusammenhang der Schneehöhen der Station Badgastein mit der Station Feuersang .....	70
7.1.3	Zusammenhang der Schneehöhen der Station Badgastein mit der Station Thomaseck .....	71
7.1.4	Auswertung Hydrographisches Jahrbuch .....	71
7.1.5	Bestimmung des Flächenmittels der extremen Schneehöhe nach den Schweizer Richtlinien .....	79
7.1.6	Quantifizierung des Restrisikos aufgrund zu großer Schneehöhe .....	79
<b>7.2</b>	<b>Erstellung einer flächigen Schneemächtigkeitsverteilung für die Winter 2004 und 2005 mittels Geostatistik .....</b>	<b>80</b>
7.2.1	Entwicklung der Schneemächtigkeit .....	80
7.2.1.1	Auswertung mit dem Programm Surfer .....	81
7.2.1.2	Auswertung mit ArcGis Geostatistical Analyst: .....	84
7.2.2	Geostatistische Auswertung des Baufeldes 3 .....	86
7.2.2.1	Auswertung mit dem Programm Surfer .....	87
7.2.2.2	Auswertung mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	88
7.2.3	Beziehung der Station Feuersang mit den Aufnahmepunkten .....	88
<b>8</b>	<b>INTERPRETATION DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>91</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>95</b>
<b>10</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>96</b>
10.1	Abbildungsverzeichnis .....	96
10.2	Tabellenverzeichnis .....	101
10.3	Literaturverzeichnis .....	102
<b>11</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>106</b>



<b>11.1</b>	<b>Schneehöhenablotungen.....</b>	<b>106</b>
11.1.1	Schneehöhenablotung entlang Profil 1.....	106
11.1.2	Schneehöhenablotung entlang Profil 2.....	111
<b>11.2</b>	<b>Darstellung der Windverteilungen.....</b>	<b>115</b>
<b>11.3</b>	<b>Geostatistische Auswertung.....</b>	<b>120</b>
11.3.1	Geostatistische Auswertung mit dem Programm Surfer.....	120
11.3.2	Geostatistische Auswertung mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst.....	135
<b>11.4</b>	<b>Schneeprofile.....</b>	<b>144</b>
11.4.1	Schneeprofil 1 .....	144
11.4.2	Schneeprofil 2.....	153



# 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit stellt den ersten Teil der „Sicherheitsstudie Feuersanglawine“ dar. Diese Studie wurde von den Österreichischen Bundesbahnen an das Institut für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien in Auftrag gegeben. Die Studie geht über drei Jahre und hat zum Ziel, den erreichten Sicherheitsgrad am Bahnhofsareal Böckstein zu quantifizieren und ein Entscheidungsmodell zur Unterstützung der Verantwortlichen in Lawinengefahren-situationen, zu entwickeln. Die Beurteilung des erreichten Sicherheitsgrades ist aus der Sicht der ÖBB interessant, da trotz des hohen technischen Aufwandes durch die Exponiertheit und Muldenform des Abbruchgebietes die Möglichkeit gegeben ist, dass Teile der Verbauung durch zusätzliche Schneeverwehungen an Wirksamkeit verlieren.

Die Feuersanglawine wird seit der Eröffnung der Mallnitz Tauernschleuse intensiv durch Lawinenschutzmaßnahmen gesichert. Das aktuelle Verbauungsprojekt (Ausführung Dipl.-Ing. K. Rothuber/Dipl.-Ing. H. Prax) sieht eine Komplettierung und Restaurierung der Verbauungen vor und wird zurzeit umgesetzt.



## 2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es den erreichten Sicherheitsgrad des Gebietes der Feuersanglawine zu quantifizieren.

Durch eine geostatistische Auswertung der flächigen Verteilung der Schneemächtigkeiten sollen Bereiche aufgezeigt werden, die besonders gefährdet sind, durch zusätzliche Schneeverwehungen oder eine unzureichende Bauwerkshöhe an Wirksamkeit zu verlieren. Dadurch soll auch gezeigt werden, welche Situationen kritisch sein können und welche Flächen in der Gefahrensituation besonders zu beobachten sind, um gegebenenfalls rechtzeitig und effizient temporäre Maßnahmen in die Wege leiten zu können.

Aussagen über die Verfrachtung von Schnee sollen durch Windmessungen und Schnee-höhenablotungen belegt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen als Grundlage für eine darauf folgende Risikoanalyse dienen.



### 3 Gebietsbeschreibung - Problembeschreibung

Das Gebiet der Feuersanglawine liegt im Gemeindegebiet von Badgastein im Land Salzburg, östlich der Ortschaft Bockstein. Der gesamte Bereich liegt im Zentralgneis, der in Form von Augengneis in Erscheinung tritt und erstreckt sich von 1170 m Seehöhe bis 2330 m Seehöhe.

Das Hauptanbruchgebiet des Hohen Stuhls liegt im nördlichen Teil zwischen 1900 und 2330 m Seehöhe und ist Südwest bis West orientiert. Es liegt im Lee eines ausgeprägten Grates, der sich vom Hohen Stuhl in westlicher Richtung bis zu einer Baustraße in 1900 m Seehöhe hinunterzieht. Dieser Grat begünstigt bei Winden aus nördlicher Richtung massive Einwehungen. Die durchschnittliche Neigung des Abbruchgebietes beträgt  $38^\circ$ , ist jedoch lokal wesentlich steiler und felsdurchsetzt. Die durchschnittliche Breite beträgt 200 bis 250 m.

Südlich des Hauptanbruchgebietes existiert ein kleineres Abbruchgebiet. Es erstreckt sich bis etwa 2200 m Seehöhe und liegt ebenfalls im Lee einer Hangrippe. Im Weiteren wird dieses Abbruchgebiet als Baufeld 3 bezeichnet.

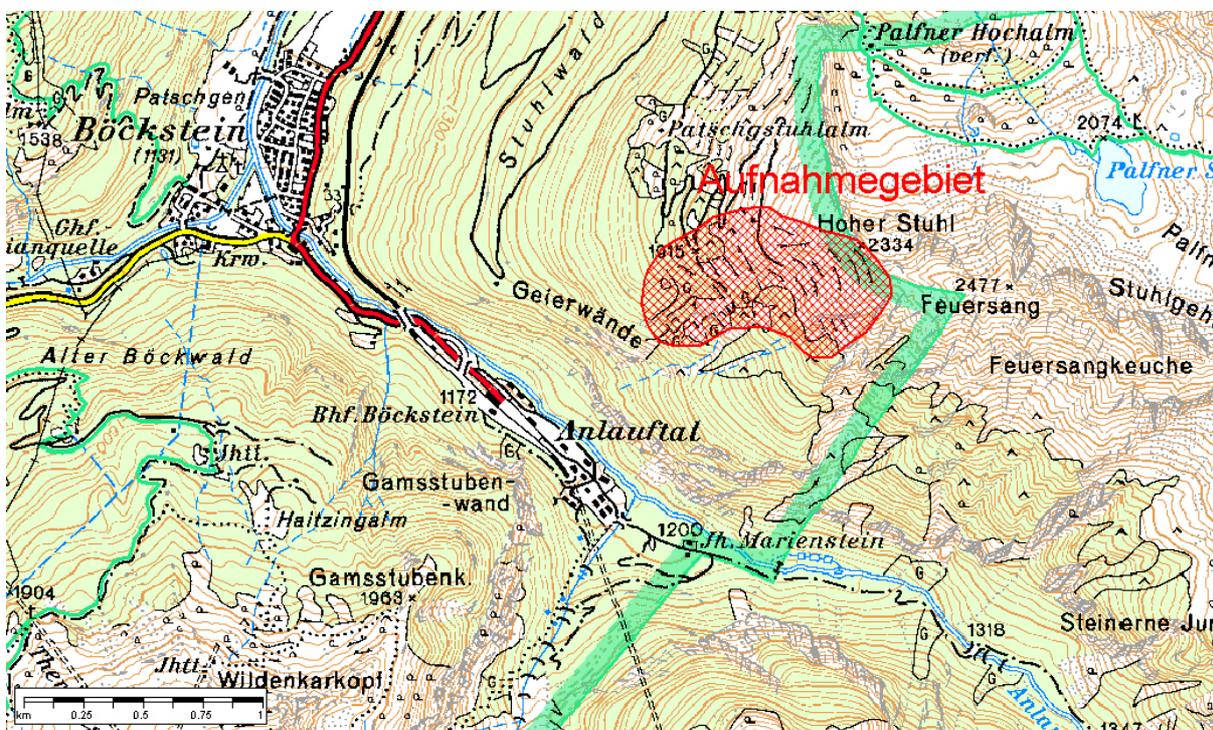


Abbildung 1: Übersicht des Aufnahmegebietes (Kartenausschnitt aus Amap 3D, Bundesamt für Eich und Vermessungswesen)



Abbildung 2: Foto des Aufnahmegebietes

Das in der oberen Abbildung dargestellte Gebiet kann in mehrere Teilgebiete unterteilt werden.

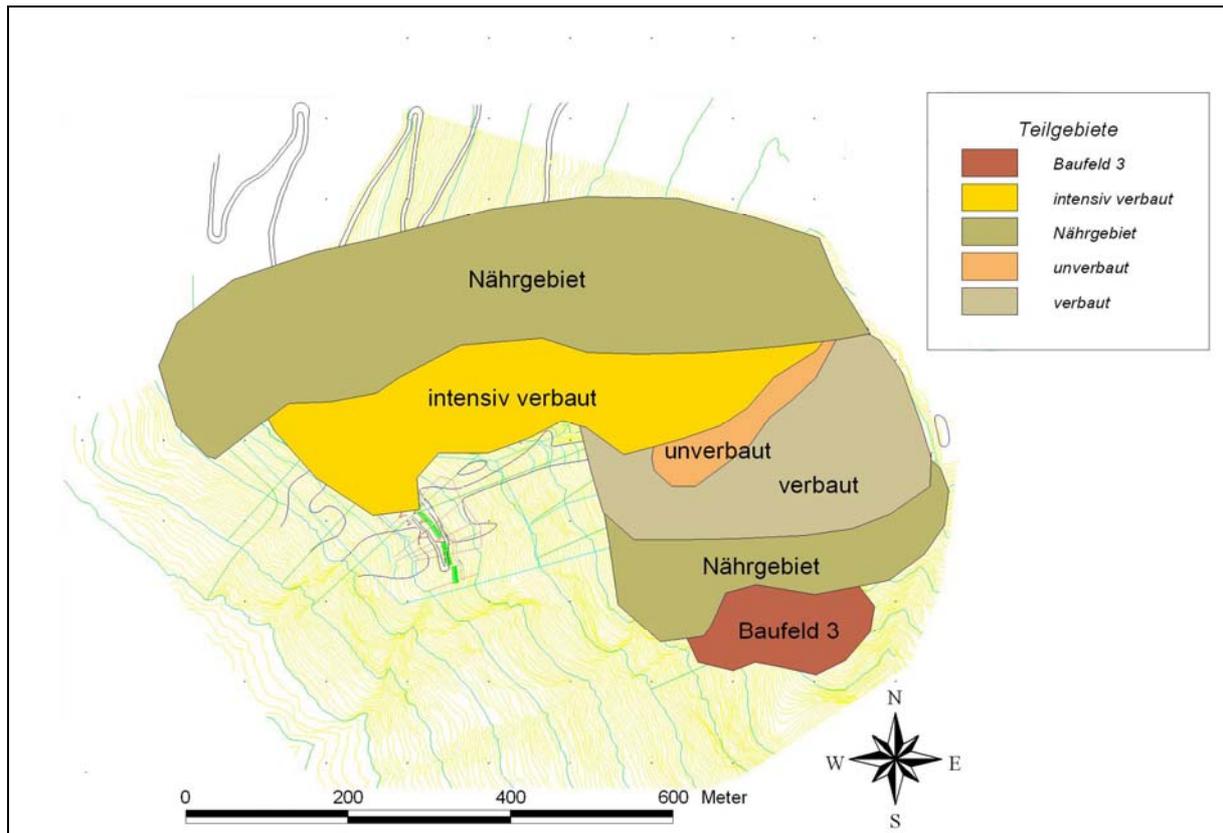


Abbildung 3: Übersicht der Teilflächen

**Das Nährgebiet:** Vor allem bei Winden aus den nördlichen Richtungen ist mit einer mittleren bis starken Einwehung aus diesen Bereichen zu rechnen. Dieser Bereich ist meist ganz abgeblasen.

**Der intensiv verbaute Bereich:** In diesem Bereich stehen die meisten der alten Bauwerke die im Zuge des aktuellen Verbauungsprojektes erneuert wurden und werden.

**Der verbaute Bereich:** Das ist der Bereich der neuen Schutzmaßnahmen. Dieser etwas flachere Bereich wird durch das aktuelle Verbauungsprojekt gegen Schneebrettlawinen geschützt.

**Der unverbaute Bereich:** Dieser Bereich ist unverbaut und wird auch nicht im aktuellen Verbauungsprojekt berücksichtigt.

**Das Baufeld 3:** Dieser Bereich ist mit alten Schneenetzen gesichert. Er ist nicht gut einsichtig und wird durch Aufnahmen aus dem Hubschrauber berücksichtigt.



## **4 Datengrundlagen**

### **4.1 Meteorologische Daten**

#### **4.1.1 ZAMG Daten der Station Badgastein**

Es liegen Messwerte der Messstation Badgastein für den Zeitraum zwischen 01.01.1948 und

30.04.2004 (jeweils Dezember bis April) vor.

Der Datensatz umfasst Tagessätze, die sich aus dem Tagesmittel der Lufttemperatur, der Tagessumme des Niederschlages, der mittleren Tageswindgeschwindigkeit sowie Terminwerten der Windrichtungen zusammensetzen. Weiters sind die Gesamtschneehöhe und die Neuschneehöhe beinhaltet. Leider liegen die Werte für die Neuschneehöhe erst ab Oktober 1981 vor.

#### **4.1.2 Daten der ÖBB Messstationen**

##### **4.1.2.1 Daten der Station Feuersang**

Die automatische Messstation der ÖBB liegt auf 2070 m Seehöhe. Die Station erfasst die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Schneehöhe, den Niederschlag, die Strahlung (oben/unten) und die Temperaturen in der Schneedecke in den Höhen 0 cm, 25 cm, 50 cm und 75 cm. Die Niederschlags- und Schneehöhenmessung sind von der Windmessung räumlich getrennt. Die Windmessung erfolgt am Grat, während die Schneehöhe und der Niederschlag im verbauten Bereich gemessen werden.

Für die Auswertungen stehen Datensätze von November 2002 bis Mai 2004 zur Verfügung.

Leider ist die Messstelle für die Schneehöhe stark vom Wind beeinflusst und liefert daher keine zuverlässigen Daten für die Schneehöhe vor Ort.



Abbildung 4: Station Feuersang: Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung

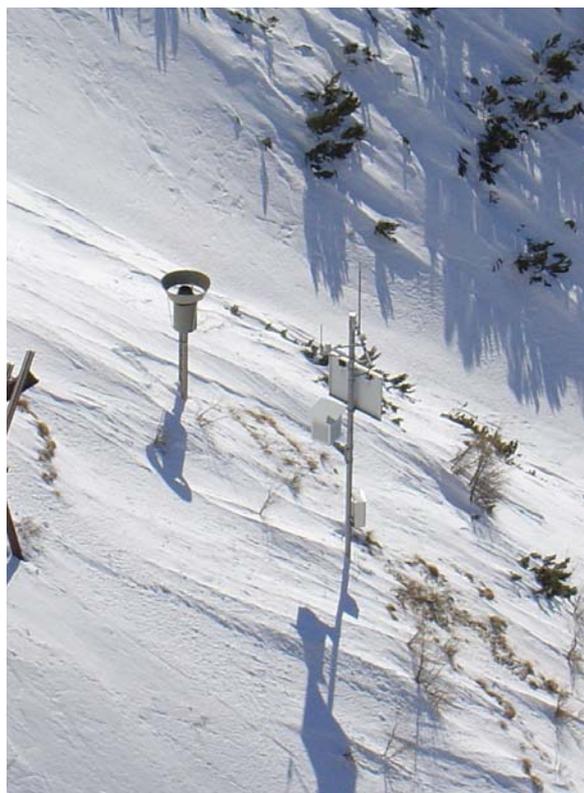


Abbildung 5: Station Feuersang: Messung von Niederschlag und Schneehöhe

#### 4.1.2.2 Daten der Station Thomaseck

Die automatische Messstation der ÖBB liegt am Nordhang des Thomasecks. Fallweise kann der Wind von Süden her abgeschattet sein. „Die Schneehöhe wird für die nähere Umgebung sehr gut erfasst“ (ZAMG-Salzburg 2004). Von der Station werden die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung, die Schneehöhe, die Strahlung (oben/unten) und die Temperaturen in der Schneedecke in den Höhen 0 cm, 20 cm und 40 cm erfasst. Für Analysen stehen Datensätze von November 1996 bis Mai 2005 zur Verfügung.



### 4.1.3 Daten aus dem Hydrographischen Jahrbüchern

Für weitergehende Analysen wurden Daten aus den Hydrographischen Jahrbüchern von 1951 bis 2001 herangezogen. Dabei fanden die Maximalen Jährlichen Schneehöhen von 11 Klimastationen verschiedener Seehöhe der Umgebung Anwendung.

Station	Seehöhe [m]
Klammstein	795
Neukirchen	857
Großarl	890
Hüttschlag	1010
Krimml	1082
Badgastein	1100
Bucheben	1140
Böckstein	1140
Moserboden	2036
Rudolfshütte	2304
Sonnblick	3105

Tabelle 1: Übersicht der Stationen und deren Seehöhe aus dem Hydrographischen Jahrbuch

## 4.2 Ereignisdaten - Chronik

**Frühjahr 1909:** Staublawine vom Feuersang

Es gab keine Schäden an den Bahnanlagen.

**09.01.1922:** Große Staublawine vom Hochstuhl

Eine Gruppe mehrerer Güterwagens, die in der Nähe der Brückenwaage standen wurden durch den Luftdruck aus dem Gleis 1 geworfen.

**23.02.1970:** Große Staublawine vom Feuersang

Durch den Luftdruck entstanden schwerste Schäden bei den Wohnhäusern 104 und 110, beim Bahnmeistermagazin, bei der Schlosserwerkstätte der Bahnmeisterei und beim Fahrleitungsmeistergebäude. Die meisten Gebäude waren so beschädigt, dass sie abgetragen werden mussten. Des Weiteren wurden 15 Wagons des Autoüberstellungszuges Böckstein –



Mallnitz umgestürzt und auf das Nachbargleis geschleudert. Es gab keine Personenschäden.

**Spätwinter 1975:** Zwei Nassschneelawinen zerstörten einen Großteil der Verbauungen im Anbruchgebiet. Sie erreichten zwar das Tal, aber richteten dort keinen Schaden an.

### 4.3 Geländedaten

Aus der zur Verfügung stehenden Karte mit 5 bzw. 2,5 Meter Höhengichtlinien wurde mit dem Programm ArcGis ein Geländemodell erstellt.

Digitales Geländehöhenmodell Feuersang

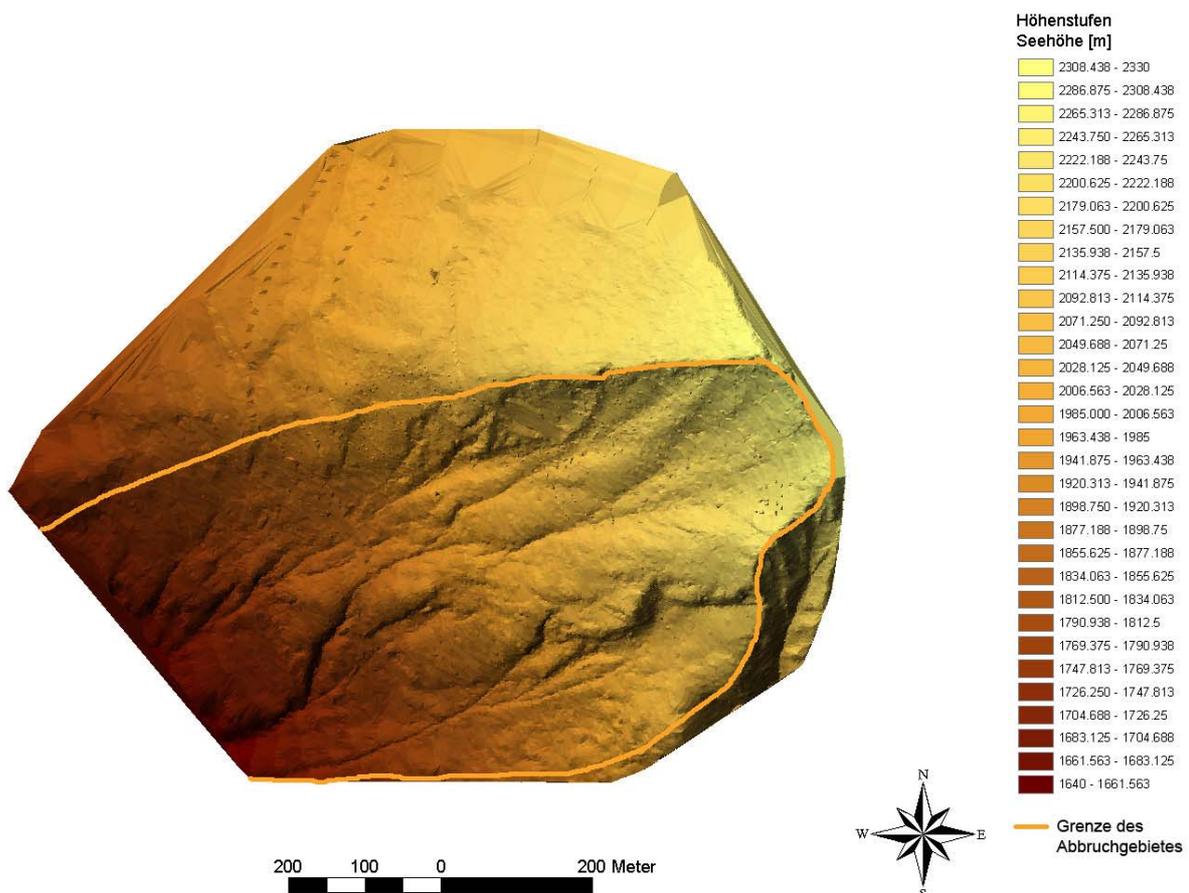


Abbildung 6: Geländemodell Feuersang



## 5 Methodik

### 5.1 Wirksamkeit von Schneestützwerten – Grundlagen

Trotz der intensiven Sicherung durch Lawinenschutzmaßnahmen gibt es erstaunlicherweise erst wenige Arbeiten, die sich mit der Sicherheit von Verbauungen auseinandersetzen.

#### 5.1.1 Beurteilung von Lawinenschutzmaßnahmen

„Lawinenschutzmaßnahmen werden nach ihrer Wirkung auf die Risikoverminderung beschrieben, erfasst und charakterisiert. Massnahmen mit kurz- oder langfristigen Wirkungszeitraum und aktiver oder passiver Eingriffsart sind Inhalt von Schutzstrategien, die Risiko grundsätzlich nach drei Prinzipien verhindern. Die damit angesprochene Einschränkung der Gefährdung, Verminderung der Objektpräsenz und Abwehr der Schädigung kann sodann mit den Faktoren des Risikobegriffes erfasst und quantifiziert werden. Mit den Faktoren des Risikobegriffes lässt sich analysieren, ob mit einer bestimmten Massnahme die Schadenwahrscheinlichkeit oder das Schadensausmass separat, oder beide in Kombination vermindert werden. Von diesen drei Ansätzen der Risikoverminderung werden in den meisten Fällen das Schadensausmass und die Schadenwahrscheinlichkeit beeinflusst. Typische Beispiele dazu sind der Stützverbau oder die Kombination verschiedener Maßnahmen. Diese generelle Wirkungsanalyse von Schutzmaßnahmen ist die Grundlage, auf die sich eine systematische Erfassung des Lawinenschutzes nach Risikokriterien stützen kann“ (Wilhelm, C. 1997).

Bei der Beurteilung von Lawinenschutzmaßnahmen muss man die vorher gesetzten Ziele beachten. Das Zielsystem beinhaltet implizit maßgebende Wertungen. Zur Strukturierung kann ein Zielsystem mit Oberzielen und Teilzielen mit quantifizierbaren Beurteilungskriterien und operationalen Indikatoren herangezogen werden. Ein mögliches Zielsystem ist in Abbildung 7 dargestellt.

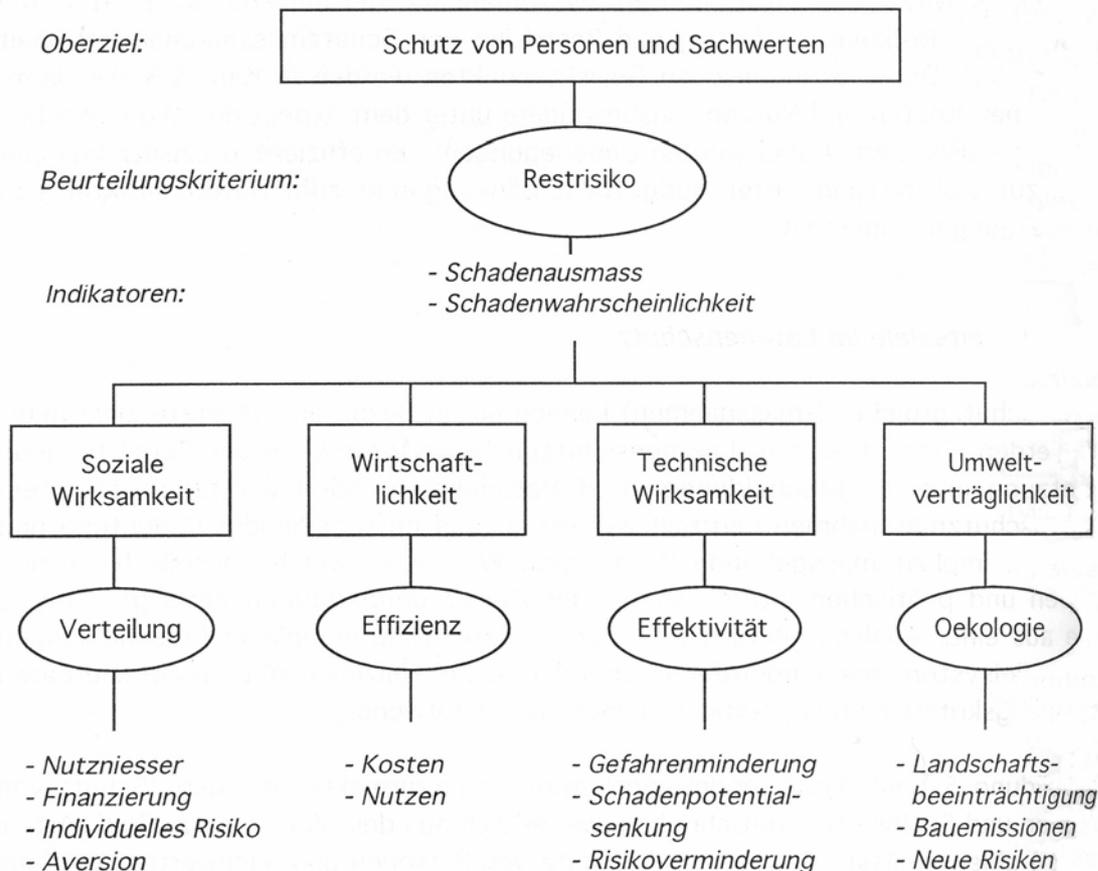


Abbildung 7: Ein mögliches Zielsystem zur Beurteilung von Lawinenschutzprojekten (aus Wilhelm, C. 1997, S 118)

### 5.1.2 Wirkungsanalyse

Werden in gefährdeten Gebieten Schutzmaßnahmen getätigt, so ergeben sich Wirkungen und es verbleiben Restrisiken. Die Maßnahmen können als Risikoverminderung identifiziert und erfasst werden. Die Beurteilung und Quantifizierung der Auswirkungen in der menschlichen Raumnutzung betreffen das sozioökonomische System. Der Wirkungsanalyse folgt schließlich die ökonomische Bewertung. Dies kann im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgen. Die Wirkungsanalyse kann als Schnittstelle zwischen der technischen Risikoanalyse und der ökonomischen Bewertung (Wirtschaftlichkeitsanalyse) verstanden werden.

„Bei der Identifizierung der Wirkung von Lawinenverbauungsmaßnahmen können sich erhebliche Schwierigkeiten ergeben“ (Wilhelm, C. 1997). Als primäre Wirkung von Lawinenverbauungsmaßnahmen ist die Verringerung der Lawinengefahr zu verstehen. Diese wird durch die Stauwirkung der Stützflächen und den damit zusammenhängenden aufgebauten hangparallelen Druckspannungen erreicht. „Diese werden von der Stützfläche aufgenommen, wodurch die im Staubereich



liegenden vor der Abstützung vorhandenen schneebrettbildenden Scher- und eventuell Zugspannungen vermindert werden“ (Richtlinien BUWAL; WLS 1990). Kommt es trotz Stützverbauung zu einem Lawinenanriss wird das Lawinenausmaß durch die verminderte Anrissmächtigkeit, die begrenzte Scherrissfortpflanzung und schließlich die Bremswirkung und das Auffangvermögen der Stützwerte reduziert.

Die Festlegung des Schutzzumfanges in Mengengrößen stellt das Ergebnis der Wirkungsanalyse dar, In der untenstehenden Abbildung bilden die gestrichelten Felder der nachfolgenden ökonomischen Bewertung und der vorgelagerten Risikoanalyse den Rahmen der Wirkungsanalyse von Maßnahmen.

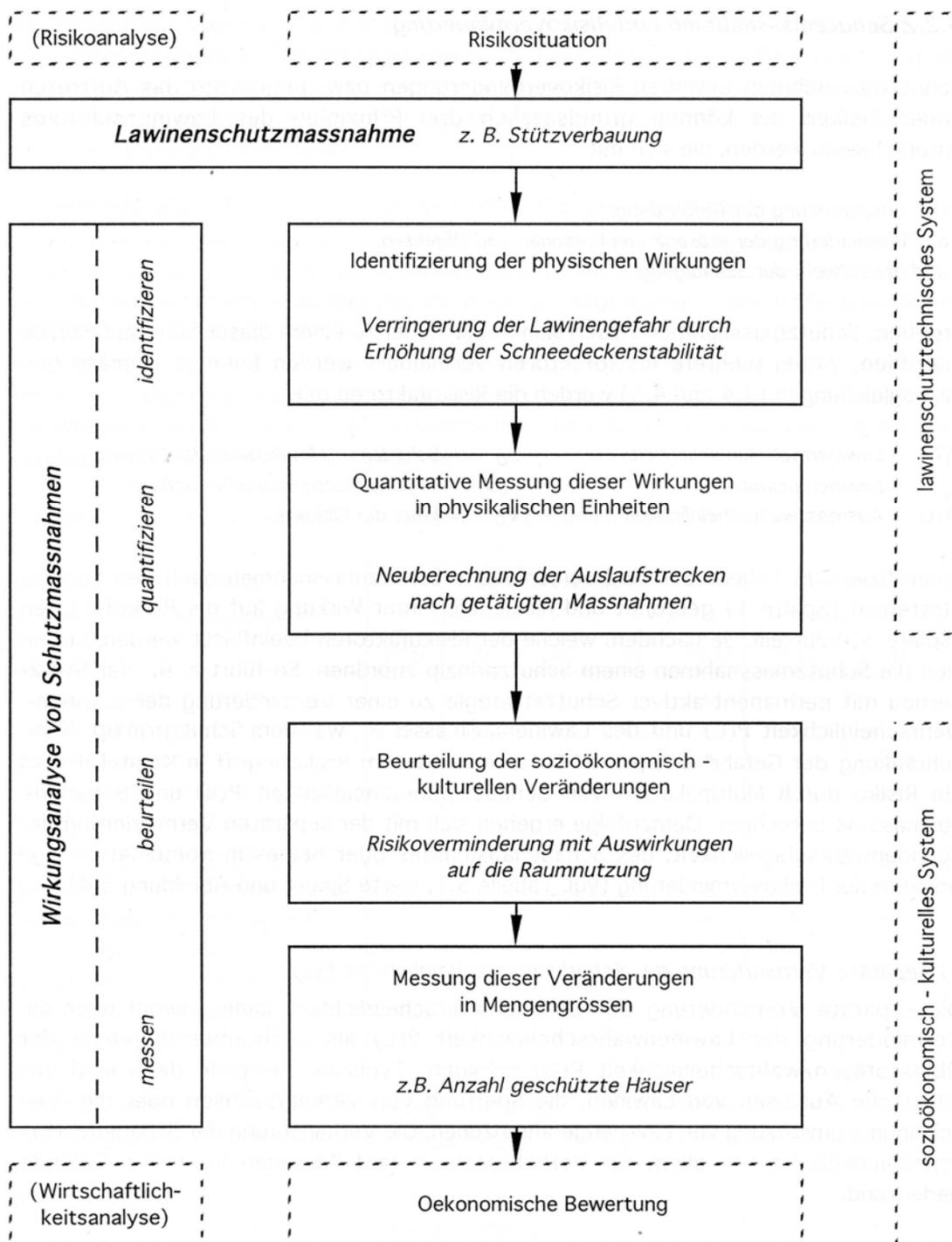


Abbildung 8: Modell zur analytischen Beurteilung von Lawinenschutzmaßnahmen (aus Wilhelm, C. 1997, S 123)



### 5.1.3 Restrisiko

Als Restrisiko versteht man in technischer Hinsicht einen Risikorest nach erfolgten Maßnahmen. Für die Erfassung des Risikorestes gilt die Risikodefinition nach Wahrscheinlichkeit und Ausmaß.

Eine Stützverbauung bewirkt sowohl eine Verminderung der Lawinewahrscheinlichkeit als auch des Lawinenausmaßes. Die Restgefahr kann aus einem Lawinenabgang aus unverbauten Flächen, aber auch aus verbauten Flächen bestehen. Kohäsionsloser Schnee oder zu geringe Bauwerkshöhen können ein Anbrechen von Lawinen aus verbauten Bereichen begünstigen. Eine Überfüllung von Stützwerken in Kammnähe infolge von Einwehungen könnte zu lokalen Lawinenanrissen über der Verbauung führen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit extremer Schneehöhen, die größer als die Dimensionierungsschneehöhe der Stützwerke ist. Nach den Schweizer Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet werden Stützwerke auf eine Wiederkehrsdauer von 100 Jahren dimensioniert.

Nach Wilhelm (1997) lassen sich bei genügender Datengrundlage Wahrscheinlichkeiten für Schneehöhen über der Dimensionierungsschneehöhe berechnen. Aus einer Serie von  $n$ -Ereignissen (Extremwerte) einer Station ergibt sich im Mittel eine Anzahl  $n'$  von Maximalwerten, die eine gewisse Schwelle mit entsprechender Wiederkehrsdauer  $T_s$  erreichen oder überschreiten:

$$n' = \frac{n}{T_s} = n * p \quad \text{Formel 1}$$

Wobei  $p = 1/T_s$  der jährlichen Wahrscheinlichkeit des Schwellenereignisses entspricht. In einer rangierten Serie von Ereignissen hat das höchste beobachtete  $H_{max}$  die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p = 1/n$ , das zweithöchste  $p=2/n$ , usw. wenn die California Auftrags Position mit  $T = n/m$  verwendet wird.  $m$  entspricht dabei dem Rang innerhalb einer geordneten Serie von Ereignissen, angefangen mit dem höchsten als  $m=1$ . Die mittlere Wahrscheinlichkeit  $p'$  der  $n'$  Ereignisse mit  $T > 100$  Jahre Entspricht nun:



$$p' = \frac{\left(\frac{1}{n} + \frac{2}{n} + \dots + \frac{n'}{n}\right)}{n'}$$

Formel 2

Und umgeformt:

$$p' = \frac{1+2+\dots+n'}{n * n'}$$

Formel 3

Nach Umformung und einsetzen ergibt sich für  $p'$ :

$$p' = \frac{[n(n+T_s)]/2T_s^2}{n(n/T_s)} = \frac{(n+T_s)}{2T_s * n}$$

Formel 4

$p'$  lässt sich auch schreiben als:

$$p' = \frac{1}{2T_s} + \frac{1}{2n'}$$

Formel 5

Und falls  $n$  gegen unendlich strebt, ergibt sich der Grenzwert von  $p'$  zu:

$$\lim p' = \frac{1}{2T_s}$$

Formel 6

So beträgt zum Beispiel die mittlere Wahrscheinlichkeit  $p'$  der extremen Schneehöhen mit

$T > 100$  Jahren entsprechend  $p' = 1/(2*100) = 0,005$  pro Jahr.



## 5.2 Statistische Grundlagen

### 5.2.1 Statistische Analyse von Extremereignissen

Üblicherweise sind bei der Datenauswertung folgende Schritte notwendig:

- Datenerfassung und Plausibilitätsprüfung,
- Auswahl und Bewertung der Stichprobe,
- Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion,
- Anpassung der Stichprobe an die Verteilungsfunktion,
- Bewertung der Anpassung,
- Ermittlung der Konfidenzbereiche und
- Extrapolation der Daten auf die gewünschte Eintrittswahrscheinlichkeit.

Hierfür werden Methoden der deskriptiven und der schließenden Statistik benötigt.

Die deskriptive Statistik befasst sich im Wesentlichen mit der Parameterbestimmung für Datensätze. Als die wichtigsten charakteristischen Parameter einer Stichprobe können definiert werden:

Arithmetisches Mittel:

Das arithmetische Mittel einer Stichprobe ist die Maßzahl für das Zentrale Verhalten einer Stichprobe:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Formel 7}$$

Wenn bereits nach Klassen geordnete Daten vorliegen lässt sich der Mittelwert aus der relativen Häufigkeit jeder Klasse und den Klassenmittelwerten ermitteln.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k h_j X_j \quad \text{Formel 8}$$



Varianz einer Verteilung:

Die Varianz ist ein Maß wie dafür, wie stark die Beobachtungen von arithmetischen Mittel abweichen.

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Formel 9}$$

Standardabweichung einer Verteilung:

Die Standardabweichung ist die positive Wurzel der Varianz.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Formel 10}$$

Schiefe einer Verteilung:

Die Schiefe ist ein Maß für die Symmetrie einer Verteilung. Dieser Parameter ist wichtig bei Extremwerten wo das Verhalten in Randbereichen betrachtet wird. Ist eine Verteilung symmetrisch ist die Schiefe Null. Eine Verteilung mit einem langsam fallenden Ast an der rechten Seite weist eine positive Schiefe auf, bzw. wird als linksschief bezeichnet.

$$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)} * \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s_x^3} \quad \text{Formel 11}$$

Wölbung einer Verteilung (Kurtosis):

Die Wölbung ist ein Maß für die Konzentration der Stichprobenelemente um den Mittelwert. Sie weist bei einer schmalen und spitzen Verteilung einen geringeren Wert auf als bei einer breiten und flachen Verteilung.

$$C_k = \frac{n}{(n-1)(n-2)} * \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{s_x^4} \quad \text{Formel 12}$$



Um auf Eigenschaften der Grundgesamtheit aus Stichproben schließen zu können bedient man sich der schließenden Statistik, die auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung basiert. Dabei werden in den meisten Fällen Stichproben herangezogen.

An die Schätzwerte von Grundgesamtheitsparametern werden folgende Forderungen gestellt:

- Erwartungstreu: Die Schätzfunktion sollte einen möglichst geringen systematischen Fehler aufweisen.
- Effizient: Die Abweichung des Schätzwertes von den Einzelwerten sollte minimal sein.
- Konsistent: Die Schätzfunktion sollte einen möglichst kleinen zufälligen Fehler für große Stichprobenumfänge aufweisen.
- Robust: Eine Änderung der Stichprobe sollte nur eine geringe Änderung des Schätzwertes ergeben, das heißt, sie sollte unempfindlich gegen Ausreißer sein.
- Suffizient: Es sollte maximale Informationsausschöpfung erreicht werden.

Plausibilitätsprüfung:

Die Plausibilitätsprüfung muss ergeben, dass die aufgezeichneten Messdaten korrekt, ohne messtechnische Ausreißer und ohne systematische Abweichungen erhoben wurden.

Arten von Stichproben:

Man kann zwischen folgenden Datenreihen unterscheiden:

Vollständige Serie: Die Wahl der Gesamtheit der verfügbaren Daten als Stichprobe ist im statistischen Sinn nicht korrekt, da hierbei Daten aus der Grundgesamtheit der extremen Ereignisse mit Daten aus anderen Grundgesamtheiten vermischt werden. Weiters besteht das Problem, dass die Daten einer Gesamtstichprobe im Allgemeinen nicht untereinander unabhängig sind.

Jährliche Serie: Sie ist eine Sonderform der Extremwert-Serie und wird in der Frequenzanalyse am häufigsten eingesetzt. Sie beinhaltet genau einen Wert pro Jahr – den höchsten oder den geringsten. Die abgeleiteten Häufigkeitsaussagen gelten exakt nur für Jahresextremwerte.



Partielle Serie: Sie repräsentiert jenen Teil der vollständigen Serie, der alle Ereignisse größer einem definierten Schwellenwert berücksichtigt.

Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion:

Zur Untersuchung von Eintrittswahrscheinlichkeiten bedarf es einer entsprechenden Verteilungsfunktion. Im Allgemeinen erfolgt die Analyse und Bewertung auf der Grundlage von Extremwertverteilungen.

### 5.2.2 Vorgehensweise

Zur Ermittlung von Verteilungsfunktionen werden die Daten der Stichprobe der Größe nach in absteigender Reihenfolge geordnet und in Klassen eingeteilt. Die absolute Häufigkeit wird durch Auszählen ermittelt. In ein Diagramm aufgetragen ergibt sich hieraus die absolute Klassenhäufigkeitsfunktion. Nach Division durch die Gesamtzahl der Stichprobe erhält man die relative Klassenhäufigkeitsfunktion. Eine kontinuierliche Häufigkeitsfunktion entsteht durch wenn man die Treppenfunktion durch eine Kurve ausgleicht.

Ermittlung der Klassenzahl:

Zur Schätzung der notwendigen Klassenzahl liegen mehrere empirische Formeln vor.

Struges (1926):  $K = 1 + (3,32 + \lg n)$  Formel 13

Strauch (1956):  $K = 1 + \frac{\lg n}{\lg 2}$  Formel 14

Panofsky & Brier (1958):  $K = 5 * \lg n$  Formel 15

Nach Anwendung der oben genannten Beziehungen ist die Klassenzahl auf ganze Zahlenwerte abzurunden. Die Formeln nach Struges (1926) und Strauch (1956) sind vorsichtige Schätzformeln und sollten für Stichproben kleineren Umfangs ( $n < 100$ ) verwendet werden.



Theoretische Verteilungsfunktionen werden durch ihre Dichtefunktion  $f(x)$  und ihre Verteilungsfunktion  $F(x)$  beschrieben.

$$F_{(x)} := P(X < x) = P_u(X) \quad \text{Formel 16}$$

$P$ : Wahrscheinlichkeitsfunktion

$P_u$ : Unterschreitungswahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit selbst wird im Allgemeinen als Grenzprozess der relativen Häufigkeit definiert.

$$P(x_i < X) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_x}{n} = P_u(X) \quad \text{Formel 17}$$

$P$ : Wahrscheinlichkeitsfunktion

$P_u$ : Unterschreitungswahrscheinlichkeit

$n_x$ : Ordnungszahl des Wertes  $x$

$n$ : Gesamtzahl der Werte

Die Dichtefunktion für stetige Verteilungen:

$$f_{(x)} = \frac{dF_{(x)}}{dx} \quad \text{Formel 18}$$

Häufig verwendete Verteilungsfunktionen:

- Gumbel (Extremal I Verteilung)
- Pearson III
- Logarithmische Pearson III
- Gamma Verteilung
- Logarithmische Gammaverteilung

Die Gumbel-Verteilung ist eine der am häufigsten verwendeten Verteilungsfunktionen im Extremwertbereich und eignet sich besonders gut für hydrografische Analysen.



Sie ist eine zweiparametrische Verteilungsfunktion  $(\alpha, \beta)$  mit einem festen Schiefekoeffizienten ( $C_s=1,14$ ).

Wahrscheinlichkeitsdichte:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\beta} * \exp\left\{\frac{x-\alpha}{\beta} - \exp\left[-\frac{x-\alpha}{\beta}\right]\right\} \quad \text{Formel 19}$$

Verteilungsfunktion:

$$F_{(x)} = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right] \quad \text{Formel 20}$$

$x$ : Merkmalswert

$\alpha$ : charakteristisch größter Wert der Extremwertserie

$\beta$ : Maß für die Konzentration der Extremwerte um den größten Wert

Zur Standardisierung der Merkmale wird eine Z-Transformation durchgeführt. Dadurch erhält man die parameterfreie Verteilungsfunktion:

$$F_{(x)} = e^{-e^{-yT}} \quad \text{Formel 21}$$

Die reduzierte Variable  $yT$  kann als Funktion der Jährlichkeit ausgedrückt werden.

$$yT = -\ln\left[\ln\left(\frac{T_r}{T_r-1}\right)\right] \quad \text{Formel 22}$$

### 5.2.2.1 Jährlichkeit von Extremereignissen

Mit der Jährlichkeit  $T$  eines Ereignisses ist jene Zeitspanne gemeint, in welcher ein Ereignis statistisch betrachtet genau einmal auftritt. Man geht also davon aus, dass z.B. in einem Zeitraum von 100 Jahren zehn Ereignisse mit einer Jährlichkeit 10 auftreten oder ein Ereignis mit der Jährlichkeit 100. Man spricht auch vom Wiederkehrintervall eines Ereignisses. Das bedeutet natürlich nicht, dass dieses



Ereignis tatsächlich auftreten wird, sondern geht immer nur von der Wahrscheinlichkeit aus dass es passieren wird.

Die Ermittlung dieser Jährlichkeit erfolgt durch statistische und Wahrscheinlichkeitstheoretische Analysen der in der Vergangenheit beobachteten Ereignisse.

Durch die Anpassung von theoretischen Verteilungsfunktionen wird es möglich auch über den durch Beobachtungen belegten Zeitraum hinaus zu extrapolieren und die Wahrscheinlichkeit großer (seltener) Ereignisse anzugeben. Die Extrapolation wird umso unsicherer je mehr sich die Anzahl der beobachteten Werte von der extrapolierten Jährlichkeit unterscheidet.

Anpassen von Verteilungsfunktionen:

- Graphische Methode
- Regressionsmethode
- Methode der Momente
- Maximum-Likelihood-Methode

Ziel der Parameterschätzung ist die Auswahl eines erwartungstreuen Schätzverfahrens mit einer möglichst geringen Fehlervarianz.

Plotting Position:

Zur Zuordnung der Eintrittswahrscheinlichkeit jedes einzelnen Datensatzes dient die Plotting Position. Dazu werden die Datensätze einer Stichprobe der Größe  $n$  nach geordnet (beginnend mit dem größten Wert). Jeder Datensatz erhält einen Rang  $m$ . Der Größte Wert erhält den Rang  $m=1$ , der kleinste  $m=n$ )

Überschreitungswahrscheinlichkeit:

$$p_m = P(X > x_m) \quad \text{Formel 23}$$

Unterschreitungswahrscheinlichkeit:

$$p_u = 1 - p_m \quad \text{Formel 24}$$



Jährlichkeit:

$$T_n = \frac{1}{p_m} \quad \text{Formel 25}$$

Für die Gumbel Verteilung wird die Plotting Position nach Gringorton (1963) empfohlen.

$$p_m = \frac{m - 0,44}{n + 0,12} \quad \text{Formel 26}$$

$m$ : Rangzahl

$n$ : Gesamtzahl der Datensätze

In den weiteren Ausführungen wird nur auf die verwendeten Methoden eingegangen:

Momenten Methode:

Bei der Momenten Methode werden die Verteilungsparameter aus dem Mittelwert und der Standardabweichung des Stichprobenkollektives bestimmt.

Viele Frequenzfunktionen in der Hydrologie besitzen die allgemeine Form:

$$h_{N(Tn)} = \bar{x} + k_{T_r} * s_x \quad \text{Formel 27}$$

$\bar{x}$ : Mittelwert der Stichprobe

$s_x$ : Standardabweichung der Stichprobe

$k_{T_r}$ : Frequency factor

In der Gumbel Verteilung berechnet sich  $k_{T_r}$  durch die Beziehung:

$$k_{T_r} = \frac{y_{T_r} - \bar{y}_n}{s_n} \quad \text{Formel 28}$$



$y_{T_r}$ : reduzierte Variable

$\bar{y}_n$ : reduzierter Mittelwert

$s_n$ : reduzierte Standardabweichung

Der reduzierte Mittelwert und die reduzierte Standardabweichung sind Funktionen der Stichprobe. Die reduzierte Variable hängt von der Wiederkehrsdauer ab und berechnet sich für unendlich große Stichproben aus:

$$k_{T_r} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[ 0,5772 + \ln \left( \ln \left( \frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right) \right] \quad \text{Formel 29}$$

wobei der Faktor 0,5772 der Euler-Zahl entspricht.

Vertrauensbereiche (Konfidenzintervalle):

Die Parameterschätzung ist mit Unsicherheiten behaftet. Vertrauensbereiche dienen als Maß für die Streubreit einer Verteilungsfunktion. Sie besagen, dass die gesuchte Größe mit einer definierten, vorher festgelegten Wahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) innerhalb der Grenzen des Konfidenzintervalles liegt.

Aus diesem Grund wird zu jeder Lösung der Frequenzanalyse auch deren obere und untere Intervallgrenze angegeben.

$$h_{NT_r} \pm t(\alpha) s_e \quad \text{Formel 30}$$

Vertrauensbereich $\alpha$ %	$t(\alpha)$
99,7	3,000
99	2,576
98	2,326
95	1,960
90	1,645
80	1,282
68	1,000
50	0,674

Tabelle 2: t-Werte für verschiedene Vertrauensbereiche



Der Standardfehler der Schätzung berechnet sich aus der Beziehung:

$$s_e = \beta_{Tr} * \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad \text{Formel 31}$$

wobei sich  $\beta_{Tr}$  für die Gumbel Verteilung aus der folgenden Beziehung berechnet:

$$\beta_{Tr} = \sqrt{1 + 1,14 * k_{Tr} + 1,10 * k_{Tr}^2} \quad \text{Formel 32}$$

### 5.3 Geostatistische Grundlagen

Statistik basiert auf der Existenz von Zufallsvariablen. Dies meint, dass die einzelnen Datenwerte einer solchen Zufallsvariable tatsächlich zufällig, also gänzlich unabhängig voneinander, zustande kommen.

In Hinblick auf die räumliche Verteilung von Datenpunkten bedeutet dies, dass die verschiedenen Werte einer Variablen unabhängig von ihrer räumlichen Position zustande kommen. Erscheinungen wie die Distanz der Werte zueinander, Nachbarschaft, Nähe, Richtung und dergleichen haben also keinen Einfluss auf den Wert eines bzw. aller Datenwerte. Dies würde beispielsweise für flächige Verteilung der Schneehöhen bedeuten, dass ihrer räumlichen Verteilung kein erkennbares Muster zugrunde läge.

Hohe, niedrige und mittlere Schneehöhen wären ohne erkennbaren räumlichen Zusammenhang über die Fläche verteilt. Das entspricht aber nicht der Beobachtung in der Natur, wo es sehr wohl Zonen mit Schneeerosion und Akkumulationszonen, also Flächen mit geringer Schneehöhe und Flächen mit größerer Schneehöhe gibt.

Statistische Ansätze, die auf das Verständnis und die Modellierung von im Raum variierender

Phänomene abzielen, werden unter dem Begriff „Geostatistik“ subsumiert. Geostatistik als Untersuchung von Erscheinungen, die in Raum und/oder Zeit variieren, umspannt ein sehr weites Feld von Daten. Im Speziellen bezieht sie sich auf Daten, die gerade wegen der expliziten Einbeziehung räumlicher Attribute wie Distanz, Richtung, Nachbarschaft etc. im eigentlichen Sinne als geographisch anzusehen sind.



Geostatistik orientiert sich an einem von der allgemeinen Statistik wesentlich differierenden Ansatz. Sie basiert auf dem Konzept der so genannten regionalisierten Variablen oder Zufallsfunktion, deren Eigenschaften zwischen jenen einer Zufallsvariable und einer vollkommen deterministischen Variable liegen. Bei einer vollkommen deterministischen Variablen lässt sich jede ihrer möglichen Realisierungen exakt vorausberechnen. Im Allgemeinen sind aber die wenigsten Erscheinungen, die in der Natur beobachtet werden können, streng deterministisch. Ebenso sind sie oftmals nicht zufällig über den Raum gestreut. Ihre Verteilung bzw. die Variabilität ihrer Werte folgt einer Art Funktion. Diese wird, in Abgrenzung zum deterministischen Modell und probabilistischen Modell, als Zufallsfunktion bezeichnet. Geostatistik geht also davon aus, dass die Werte innerhalb eines bestimmten Gebietes einander ähnlich sind, und dass mit zunehmender Distanz die Ähnlichkeit zwischen den Werten abnimmt.

Waldo Tobler (1970) formuliert dieses Phänomen als

„... first law of geography: everything is related to everything, but near things are more related than distant things.“

In der Geostatistik wird vorausgesetzt, dass ein Phänomen ohne ausdrückliche Berücksichtigung räumlicher Eigenschaften von Werten nicht oder nur unzureichend erklärt werden kann.

### 5.3.1 Die Variogrammwolke

Die Variabilität einer regionalisierten Variablen  $z(x)$  in unterschiedlichen Maßstäben wird gemessen, indem man paarweise die Verschiedenheit der zu untersuchenden Daten (z.B.  $x_a$  und  $x_b$ ) an den Stellen  $x_a$  und  $x_b$  in  $D$  berechnet:

$$\gamma_{\alpha\beta}^* := \frac{(z_{\alpha} - z_{\beta})^2}{2} \quad \text{Formel 33}$$

Es existiert ein Vektor  $h_{\alpha\beta}$ . Wir betrachten die Verschiedenheit  $\gamma_{\alpha\beta}^*$  in Abhängigkeit von  $h_{\alpha\beta}$ .



$$\gamma^*(h_{\alpha\beta}) = \frac{1}{2} (z(x_\alpha + h) - z(x_\alpha))^2$$

Formel 34

Die grafische Repräsentation von  $\gamma$  in Abhängigkeit vom Betrag von  $h$  wird als Variogrammwolke bezeichnet.

Die Variogrammwolke an sich ist schon ein mächtiges Hilfsmittel um die Verteilung der Daten im Raum zu analysieren. Anomalien und Inhomogenitäten können durch den Blick auf große Unterschiede bei kleinen Distanzen identifiziert werden.

### 5.3.2 Das experimentelle Variogramm

Für eine gegebene Klasse  $H$  von Vektoren  $h$  kann ein Mittel der Variabilität gebildet werden, indem man alle Punktpaare  $n_k$  betrachtet, die mit Vektoren  $h$  verbunden werden können, deren Länge in einem spezifischen Intervall liegt und deren Richtung bis auf einen bestimmten Toleranzwinkel gleich ist. Im Allgemeinen werden sich nicht überlappende Vektorklassen  $H$  gewählt. In der Praxis sind für die Erstellung eines Semivariogramms für eine bestimmte Richtung die Angabe des Richtungswinkels, des Halbwinkels und der maximalen Bandbreite nötig. Diese Begriffe werden in folgender Darstellung erklärt:

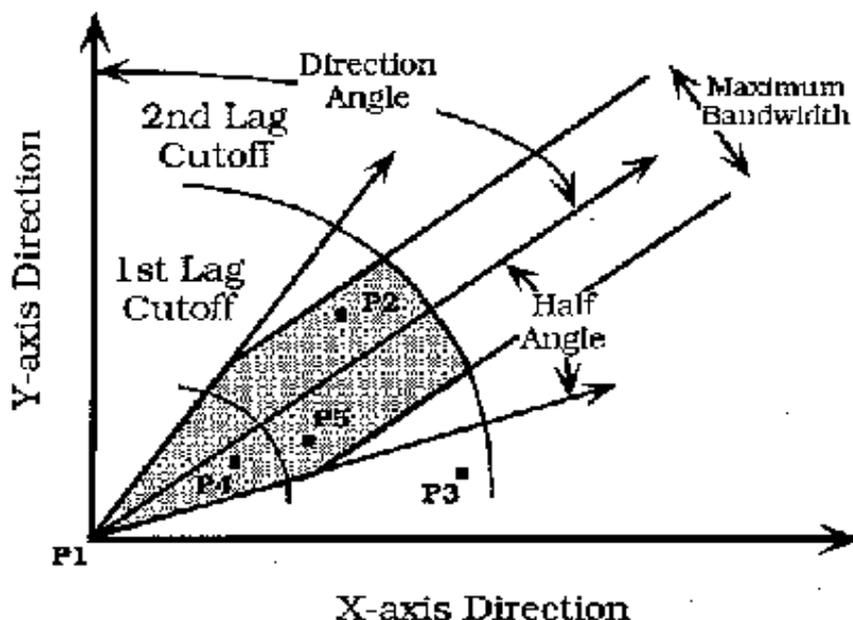


Abbildung 9: Darstellung zur Erklärung der Begriffe (aus Waldow 1998 nach England and Sparks 1988)

Hier wird aber zunächst nur auf omnidirektionale Semivariogramme eingegangen, d.h. die Vektorklasse  $H$  zur Berechnung eines Semivariogrammwertes besteht aus



Vektoren aller Richtungen mit einer Länge in einem bestimmten Intervall. Semivariogramme für bestimmte Richtungen werden beim Thema Anisotropie von Bedeutung sein. Die durchschnittliche Verschiedenheit der Werte an Messpunkten, die  $|h|$  auseinander liegt ist ein Wert des experimentellen Variogramms. Das experimentelle Variogramm wird auch als Sample Variogramm oder Semivariogramm bezeichnet.

$$\gamma^*(H_K) = \frac{1}{2n_k} \sum_{\alpha=1}^{n_k} (z(x_{\alpha} + h_{\alpha\beta}) - z(x_{\alpha}))^2 \quad \text{mit} \quad h_{\alpha\beta} \in H_K \quad \text{Formel 35}$$

In der Praxis wird das experimentelle Variogramm aus Vektoren  $h_{\alpha\beta}$  berechnet, die eine Länge kleiner als der halbe Durchmesser des betrachteten Gebietes haben, weil bei größeren Abständen Punktpaare betrachtet werden würden, die nur am Rande des Gebietes liegen und somit nicht repräsentativ für den gesamten Datensatz sind. Normalerweise kann man beobachten, dass die durchschnittliche Verschiedenheit zwischen Punkten mit der Entfernung der Punkte zueinander zunimmt. Oft nähert sich das experimentelle Variogramm einer oberen Schwelle, die gleich der Varianz der Daten ist. Das Verhalten des experimentellen Variogramms liefert Informationen über die Varianz der Daten auf einen bestimmten Maßstab bezogen: Wechselt z.B. die Steigung plötzlich an einer bestimmten Stelle  $h_0$ , so deutet dies auf das Erreichen eines Zwischenlevels der Varianz in diesem Maßstab (für Punkte, die höchstens  $h_0$  auseinander liegen) hin.

Das Verhalten des experimentellen Variogramms in der Nähe des Ursprungs gibt Hinweise auf die Art der Stetigkeit der regionalisierten Variablen. Diese kann differenzierbar, stetig aber nicht differenzierbar oder unstetig sein. Der letzte Fall deutet auf den so genannten nugget-effect hin, d.h. die Werte der Variable wechseln sehr plötzlich in sehr kleinem Maßstab, wie etwa der Goldgehalt, wenn in einigen Proben Nuggets vorkommen.

Wenn die durchschnittliche Verschiedenheit der Werte für alle Abstände  $h$  gleich ist, so gibt es keine räumliche Struktur in den Daten.

### 5.3.3 Das regionale Variogramm

Das experimentelle Variogramm der Daten  $z_{(x_a)}$  ist die Reihe der Mittelwerte von Variogrammwerten für verschiedene Distanzklassen  $H_k$ . Wären Daten für das gesamte Gebiet  $D$  vorhanden, so könnte das Variogramm für jedes mögliche



Punktpaar im Gebiet berechnet werden. Wir definieren  $D_{(h)}$  als den Schnitt von  $D$  mit der Verschiebung um  $-h$  von sich selbst,  $D_{(h)}$  beschreibt also alle Punkte  $x \in D$ , die ein Gegenstück  $x+h$  in  $D$  haben. Das regionale Variogramm  $G_{R(h)}$  ist:

$$G_R(h) = \frac{1}{2|D(h)|} \int_{D(h)} (Z(x+h) - Z(x))^2 \quad \text{Formel 36}$$

Der Erwartungswert von  $G_{R(h)}$  definiert das theoretische Variogramm  $\gamma_{(h)}$  des Zufallsfunktionenmodells  $Z_{(x)}$  über dem Gebiet  $D$ .

$$\gamma(h) = E[G_R(h)] \quad \text{Formel 37}$$

#### 5.3.4 Das theoretische Variogramm

Das experimentelle Variogramm wird in der Praxis durch eine Menge theoretischer Variogrammfunktionen ersetzt. Das passiert, um dem Variogrammmodell einen physikalischen Sinn zu verleihen: Es sollte eine Zufallsfunktion mit dem gegebenen Typ Variogramm existieren. Außerdem garantiert das theoretische Variogramm, dass sich für jede Linearkombination von Messwerten eine positive Varianz ergibt, was nicht der Fall sein muss, wenn man die Werte des experimentellen Variogramms benutzt.

Eine Menge theoretischer Variogrammfunktionen wird der Reihe der durchschnittlichen Verschiedenheiten angepasst. Das beinhaltet eine Interpretation sowohl des Verhaltens im Ursprung als auch bei großen Abständen, außerhalb des Wertebereichs des experimentellen Variogramms. Die Anpassung geschieht üblicherweise per explorativer Datenanalyse. Es ist nicht so wichtig, wie gut die Variogrammfunktion die Reihe der Punkte annähert. Wesentlich ist der Typ der Stetigkeit, der für die regionalisierte Variable angenommen wird und die Stationaritäts-Hypothese die der Zufallsfunktion zugeordnet wird. Diese Annahmen sind entscheidend für die Wahl der richtigen Variogrammfunktion. Die Anpassung des Variogrammmodells ist Erfahrungssache. Auch wenn einige Programme Algorithmen anbieten, die die Anpassung automatisch erledigen sollen, so wird meist darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse mit einer manuellen Nachbearbeitung verbessert werden können. In jedem Fall sollte das Ergebnis einer automatischen Anpassung auf Plausibilität überprüft werden.

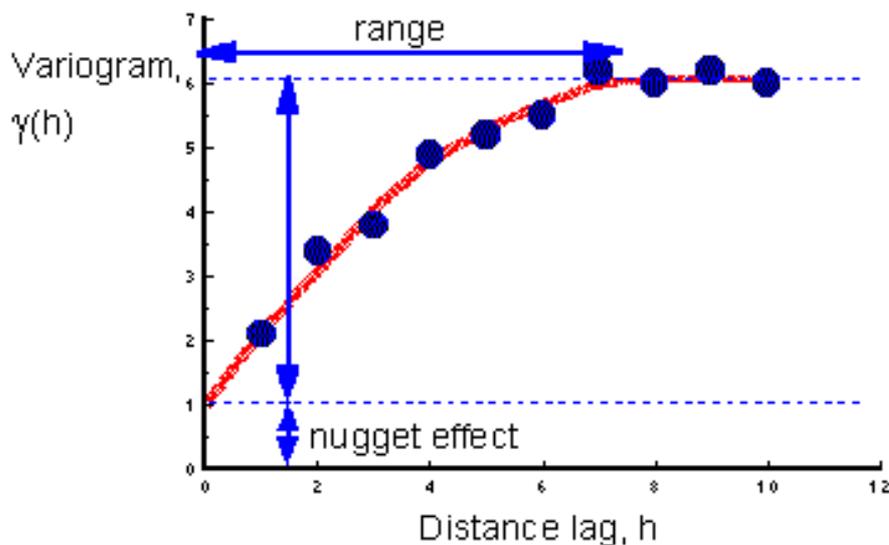


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Semivariogramms (modifiziert nach Waldow 1998)

Die Variation einer Zufallsfunktion  $Z_{(x)}$  im Raum kann durch die Inkremente  $Z_{(x+h)} - Z_{(x)}$  beschrieben werden. Das theoretische Variogramm  $\gamma_{(h)}$  wird durch die „*intrinsic hypothesis*“ definiert. Das ist eine Annahme über die Art der Stationarität der zugrunde liegenden Zufallsfunktion, die durch zwei Annahmen über die Inkremente ausgedrückt werden kann:

Das Mittel  $m_{(h)}$  der Inkremente, auch Drift genannt, ist konstant gleich 0 für alle Positionen eines gegebenen Vektors  $h$  im Gebiet  $D$ :

$$m(h) = E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad \text{für alle } x, x+h \text{ aus } D \quad \text{Formel 38}$$

Die Varianz der Inkremente hat den endlichen Wert  $2 * \gamma_{(h)}$ , der nur von der Länge und Orientierung von  $h$  abhängig ist:

$$\text{var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad \text{für alle } x, x+h \text{ aus } D \quad \text{Formel 39}$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad \text{Formel 40}$$

Folgende Eigenschaften des theoretischen Variogramms sind unmittelbar einsichtig:



Der Wert im Ursprung ist Null:

$$\gamma(0) = 0 \quad \text{Formel 41}$$

Die Werte des Variogramms sind positiv:

$$\gamma(h) \geq 0 \quad \text{Formel 42}$$

Das Variogramm ist eine gerade Funktion:

$$\gamma(h) = \gamma(-h) \quad \text{Formel 43}$$

Das Variogramm wächst für  $|h|$  gegen unendlich langsamer als  $|h|^2$ , denn sonst wäre  $m_{(h)}$  ungleich Null.

Die Existenz der ersten zwei Momente für die Inkremente impliziert nicht die Existenz dieser Momente für die Zufallsfunktion  $Z(x)$  selbst. Eine der „*intrinsic hypothesis*“ genügende Zufallsfunktion kann durchaus eine unendliche Varianz, eine nicht konstante Varianz oder ein nicht konstantes Mittel haben.

### 5.3.5 Anisotropie

Bisher wurden nur omnidirektionale experimentelle Variogramme betrachtet, d.h. auf der Abszisse wurde  $|h|$  abgetragen und alle Vektoren  $h$  dieses Betrages unabhängig von deren Richtung herangezogen, um den Wert des experimentellen Variogramms an dieser Stelle zu berechnen. Tatsächlich kommt es aber vor, dass die experimentellen Variogramme für verschiedene Richtungen ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Man nennt dies anisotropes Verhalten.



### 5.3.6 Ordinary Kriging

Ordinary Kriging ist das Verfahren das üblicherweise gemeint ist, wenn man von "Kriging" spricht. Es liefert einen BLUE (Best Linear Unbiased Estimator)  $Z^*(x)$  für die Zufallsfunktion  $Z(x)$ .  $Z(x)$  soll lediglich die „*intrinsic hypothesis*“ erfüllen. Damit existiert ein Variogramm  $\gamma_{(h)}$  für  $Z_{(x)}$ , was zur Berechnung benutzt wird. Analog zum vorherigen Abschnitt wird

$$Z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} Z(x_{\alpha}) \quad \text{Formel 44}$$

gesetzt. Ebenfalls analog zu oben ergibt sich aus der Forderung der Erwartungstreue die Bedingung an die Gewichte:

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} = 1 \quad \text{Formel 45}$$

Wie oben wird nun die Schätzfehlervarianz  $\sigma^2_E = E\left[\left(Z^*(x_0) - Z(x_0)\right)^2\right]$  unter Berücksichtigung der Bedingung an die Gewichte unter Einführung eines Lagrange - Parameters minimiert. So erhält man das Ordinary Kriging System.

$$\sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta\gamma} (x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu = \gamma(x_{\alpha} - x_0) \quad \text{für alle } \alpha = 1, \dots, n \quad \text{Formel 46}$$

$$\sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta} = 1 \quad \text{Formel 47}$$

Die Schätzvarianz des Ordinary Kriging beträgt:

$$\sigma^2 = -\mu - \gamma(x_0 - x_0) + 2 \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha\gamma} (x_{\alpha} - x_0) \quad \text{Formel 48}$$

Kriging ist ein exakter Interpolator ist. Das heißt es gilt  $Z^*(x_0) = Z_{(a)}$  für  $x_0 = x_a$ .



### **5.3.7 Kreuz-Validierung**

Diese Technik ermöglicht es, grobe Fehler im Modell zu erkennen. Dabei ist auf die Richtigkeit des theoretischen Variogramms oder auf Ausreißer zu achten. Dazu wird jeder Datenpunkt unter Auslassung eben seiner Daten gekrigt, und das Ergebnis mit dem tatsächlichen Wert verglichen.



## 5.4 Windmessung mit Gill Wind Sonic

Bei der verwendeten Windmesssonde handelt es sich um eine Ultraschallsonde mit zweidimensionaler Auflösung der Windgeschwindigkeit. Durch die Software der Firma Kroneis werden die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung im Sekundentakt aufgezeichnet. Zur korrekten Wiedergabe der Windrichtung wird das Gerät mit einem Kompass nach Norden ausgerichtet.



Abbildung 11: Messkopf (aus Gill user manual)

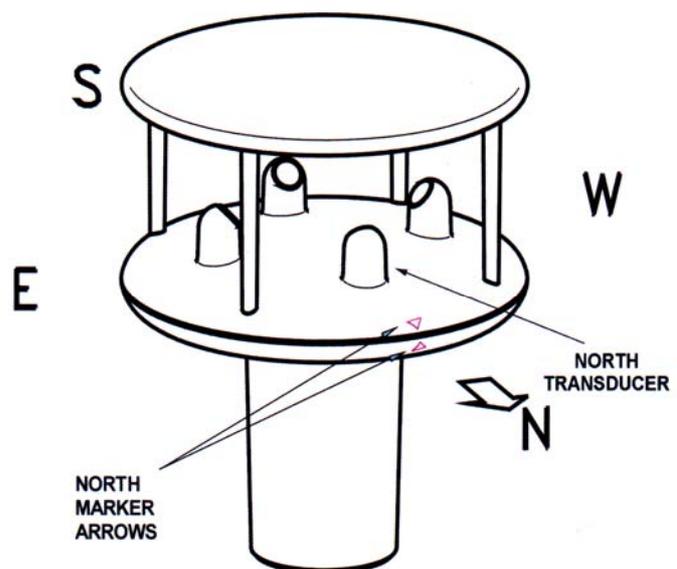


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Messkopfes (aus Gill user manual)

Funktionsprinzip:

Die Windmesssonde misst die Zeit die ein Ultraschallimpuls benötigt um vom Nord-Empfänger zum Süd-Empfänger zu gelangen und vergleicht die Impulslaufzeit von Süd nach Nord. In gleicher Weise werden die Laufzeiten zwischen West-Ost und Ost-West Empfänger verglichen.

Wenn z.B. ein Nordwind weht, dann benötigt der Impuls um vom Nord-Empfänger zum Süd-Empfänger zu gelangen geringere Zeit als von Süd nach Nord, während die West-Ost Laufzeit gleich der Ost-West Laufzeit ist. Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung wird aus den unterschiedlichen Signallaufzeiten der Achsenrichtungen berechnet. Diese Berechnung ist unabhängig von Faktoren wie der Temperatur.



## BASIC TIME-OF-FLIGHT THEORY

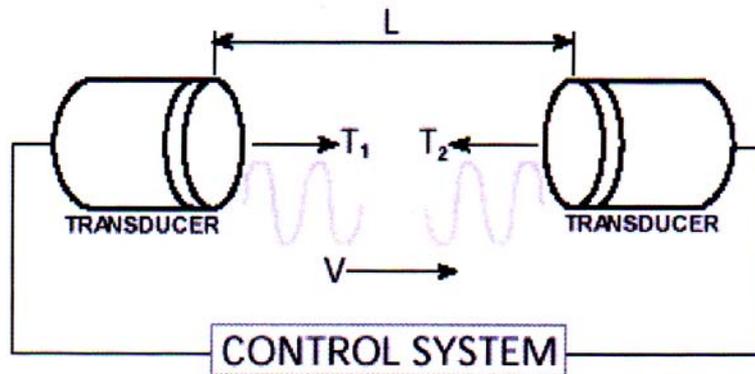


Abbildung 13: Funktionsprinzip der Ultraschallmessung (aus Gill user manual Seite 5)

$$T_1 = \frac{L}{C + V} \quad \text{Formel 49}$$

und

$$T_2 = \frac{L}{C - V} \quad \text{Formel 50}$$

daraus folgt

$$V = \frac{L}{2} \left\{ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right\} \quad \text{Formel 51}$$

$$C = \frac{L}{2} \left\{ \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right\} \quad \text{Formel 52}$$

$L$ : Distanz zwischen den Empfängern

$C$ : Schallgeschwindigkeit

$V$ : Geschwindigkeit

$T_1$ : Laufzeit des Ultraschalls

$T_2$ : Laufzeit des Ultraschalls



## 6 Felddatenerhebung

### 6.1 Übersicht der Aufnahmen im Gebiet der Feuersanglawine

Im Aufnahmewinter 2003/04 wurden zwischen November 2003 und Mai 2004 Geländeaufnahmen durchgeführt. Dabei wurde der Abbruchbereich zehn Mal begangen und zwei Mal überflogen. Im Aufnahmewinter 2004/2005 wurden zwischen Februar und April 2005 Geländeaufnahmen durchgeführt und einmal befliegen. Im Rahmen der Aufnahmen wurden Schneehöhenablotungen und Windmessungen entlang von Profilen durchgeführt. Die flächige Schneemächtigkeit wurde durch ein Aufnahmepunktenetz dokumentiert. Des Weiteren wurde die Schneedeckenentwicklung durch Schneeprofile in verschiedenen Expositionen über den Winter untersucht.

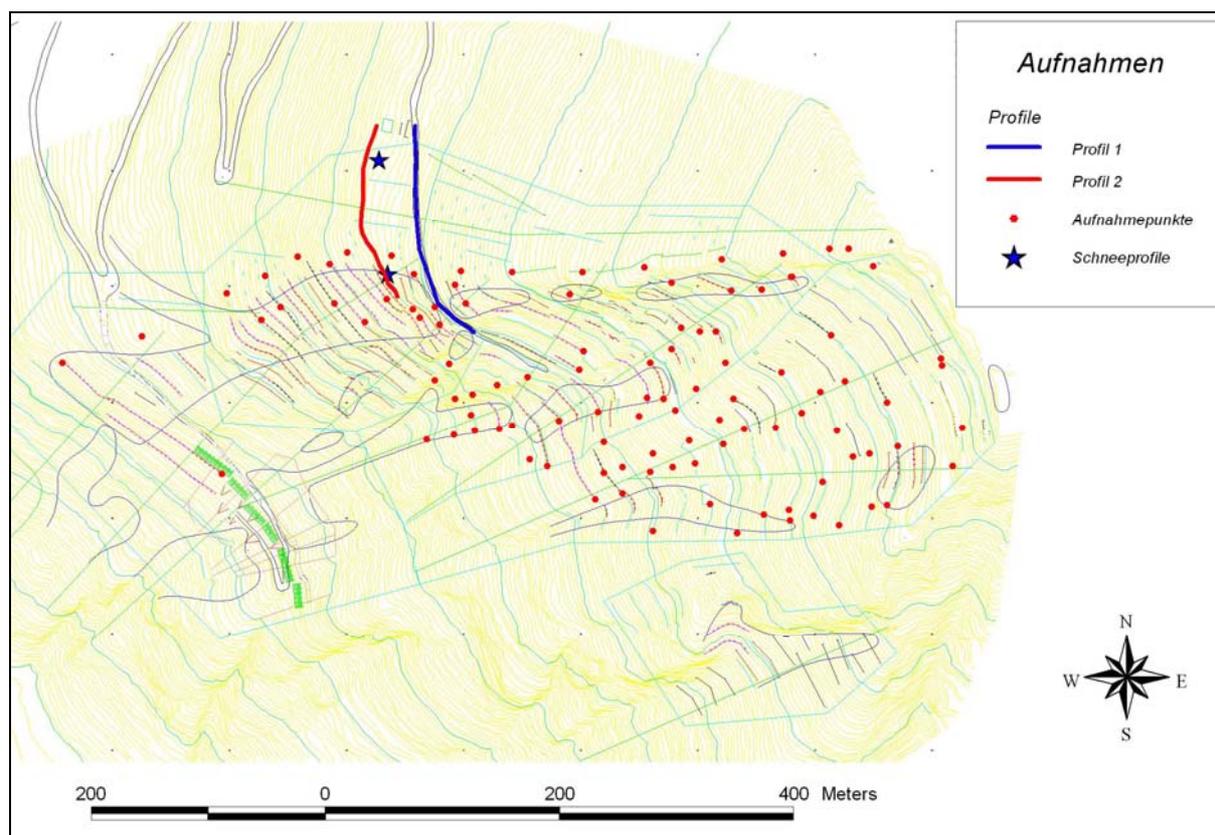


Abbildung 14: Übersicht der Winteraufnahmen 2004 mit eingezeichneter Lage der Profile

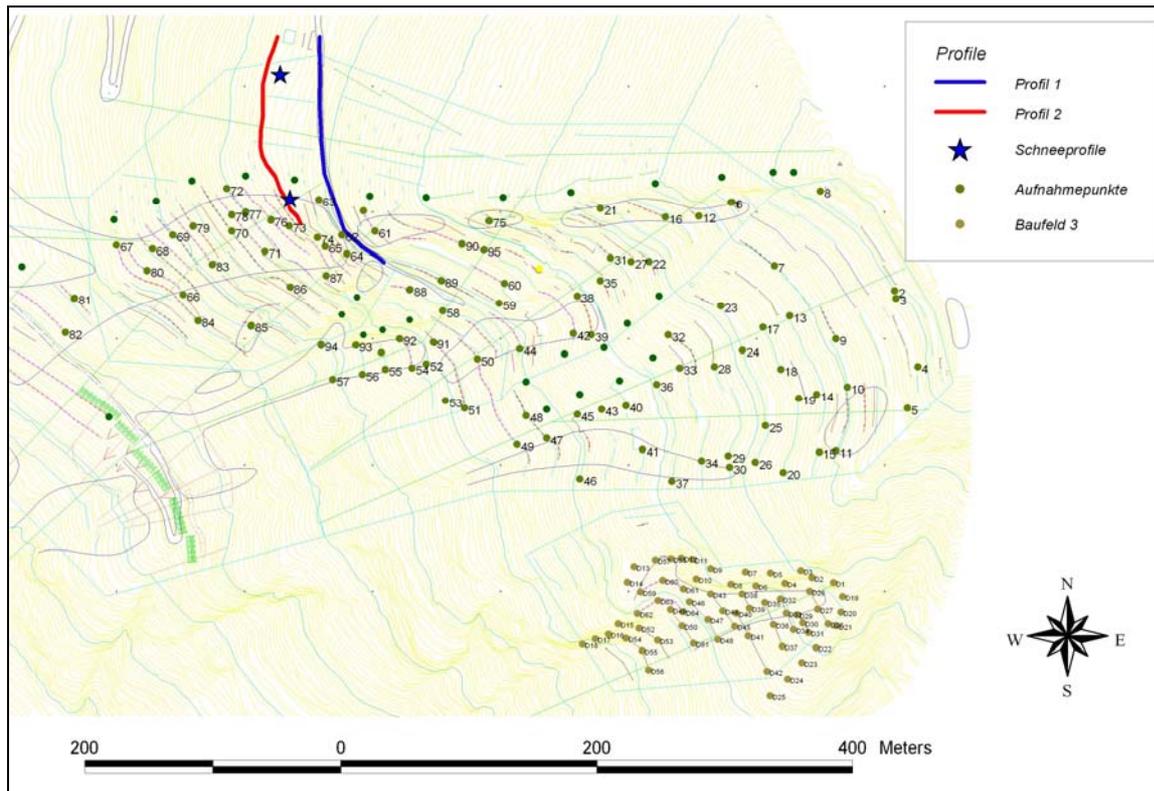


Abbildung 15: Übersicht der Winteraufnahmen 2005 mit eingezeichneter Lage der Profile und Aufnahmepunkte



## 6.2 Schneehöhenablotung entlang von Profilen

Entlang von 2 Profilen wird alle 5 Schritte (ca. alle 4 m) die Gesamtschneehöhe mit einer Sonde abgelotet, wobei die Neuschneehöhe extra gemessen wird.

Das Profil 1 verläuft entlang der Straße, die oberhalb der Feuersanghütte in das Verbauungsfeld führt und endet am Ende der Straße. Die Profillänge beträgt ungefähr 230 m.

Das Profil 2 verläuft von der Talseite der Feuersanghütte entlang einer Höhenschichtlinie in das Baufeld (über Stützwerk 105 und das daran anschließende Stützwerk). Die Profillänge beträgt ungefähr 160 m.

Beide Profile erfassen sowohl den Erosionsbereich als auch den Akkumulationsbereich.

### 6.2.1 Entwicklung der Schneehöhen über den Winter am Profil 1

Bei der ersten Ablotung am 03.01.2004 wurden nur sehr geringe Schneehöhen vorgefunden, aber im Laufe des Jäners nahmen die Schneehöhen zu und es ließen sich die Bereiche der Schneeerosion und die Schneeakkumulationsbereiche feststellen. Im Laufe des Winters nahmen die absoluten Schneehöhen in den Einwehungsbereichen zwar zu, aber die Stelle des Maximums im Profil blieb weitgehend die gleiche. Die größten maximalen Schneehöhen wurden im März gemessen und betragen 420 cm. Zu dieser Zeit konnten auch Schneehöhen von bis zu 150 cm am Anfang des Profils gemessen werden, während der Mittelbereich über den gesamten Beobachtungszeitraum beinahe schneefrei war. Erst im April begannen die Schneehöhen wieder langsam abzunehmen. Bei der letzten Aufnahme am 11.05.2004 konnte noch ein Schneehöhenmaximum von 315 cm festgestellt werden.

Im Winter 2005 wurden noch von Februar bis April noch drei Ablotungen entlang des Profil 1 vorgenommen. Die maximale Schneehöhe wurde dabei am 22. April 2005 gemessen (450cm). Zu diesem Zeitpunkt war die Schneehöhe entlang des Profils immer höher als während der vorangegangenen Messungen (Februar, März 2005).

Einen Überblick über das Verbauungsgebiet Feuersanglawine mit den eingezeichneten Profilen siehe Abbildung 14.

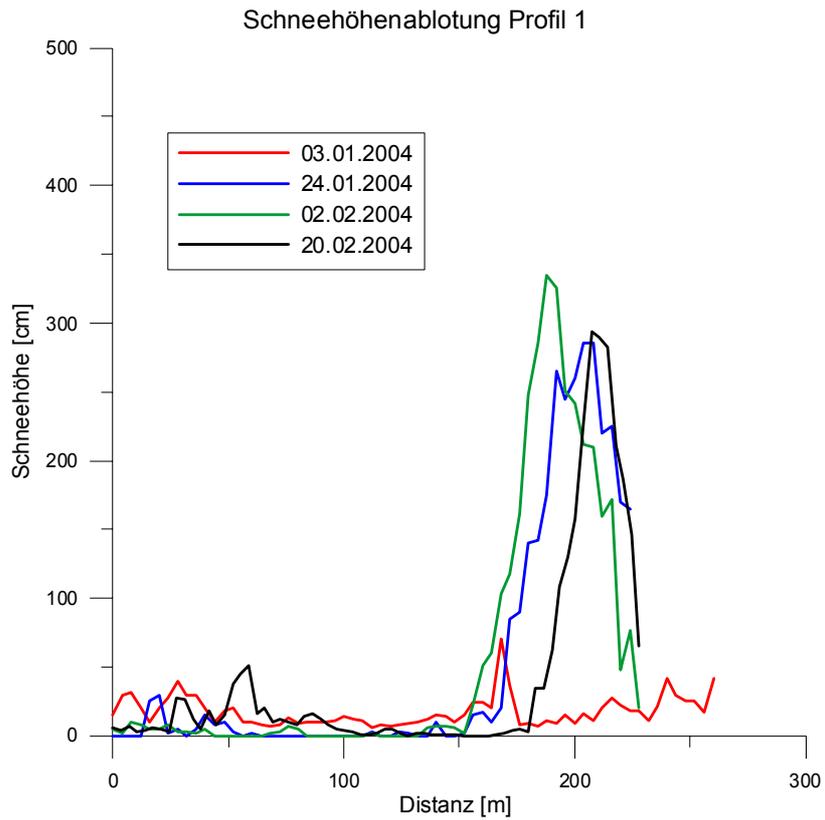


Abbildung 16: Schneehöhenablotung Profil 1 am 03.01.2004, 24.01.2004, 02.02.2004 und am 20.02.2004

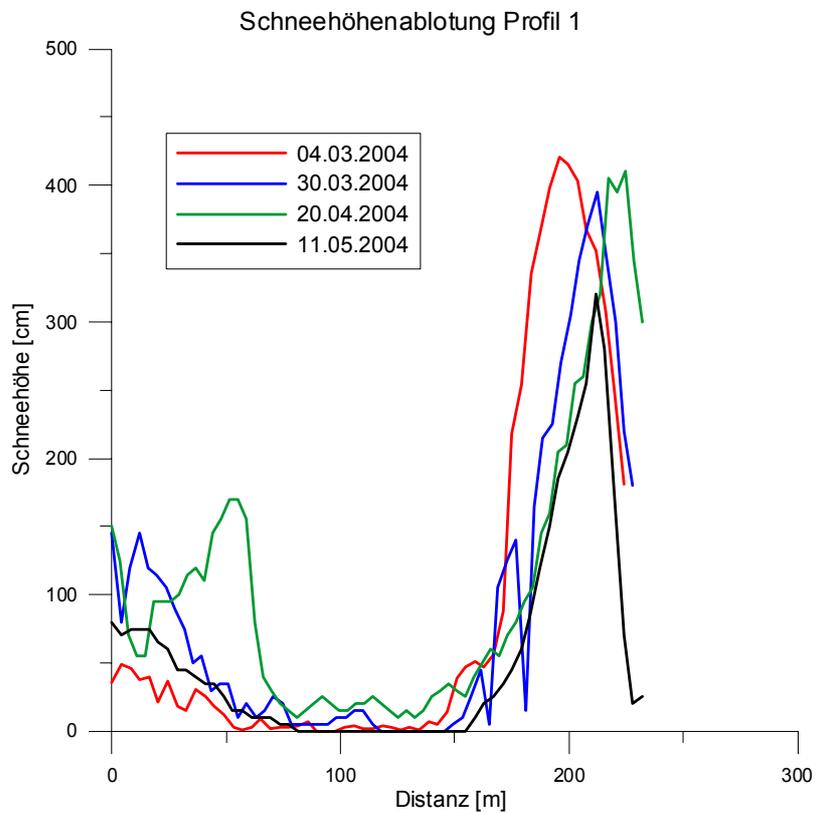


Abbildung 17: Schneehöhenablotung Profil 1 am 04.03.2004, 30.03.2004, 20.04.2004 und am 11.05.2004

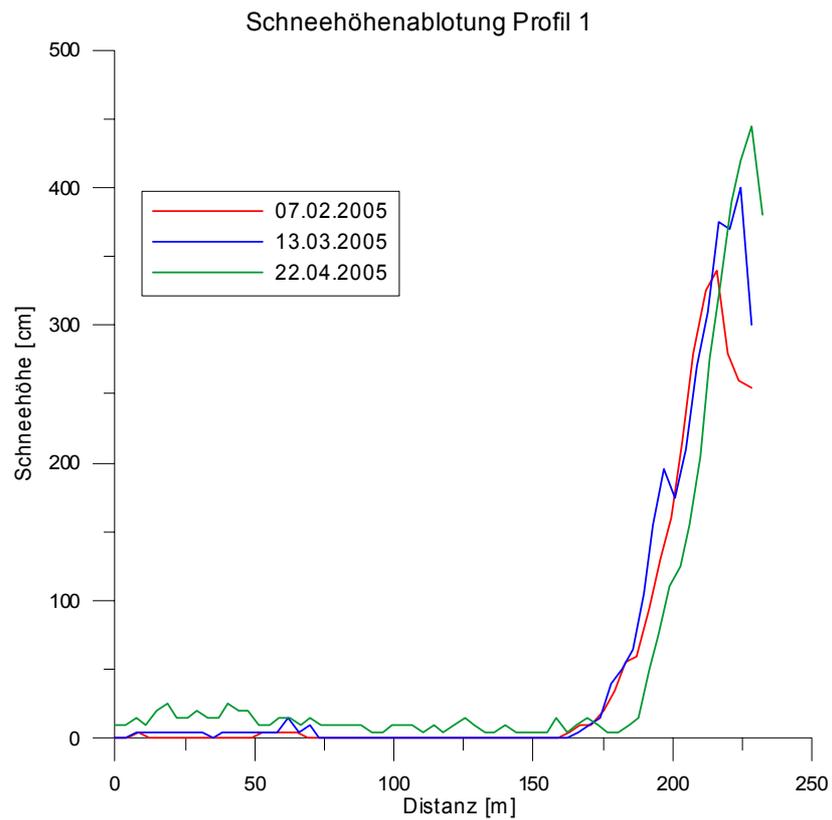


Abbildung 18: Schneehöhenablotung Profil 2 am 07.02.2005, 13.03.2005, 22.04.2005



Abbildung 19: Der Einwehungsbereich von Profil 1 nach oben betrachtet



## 6.2.2 Entwicklung der Schneehöhen über den Winter am Profil 2

Trotz geringer Schneehöhen zu Beginn der Untersuchungen konnte man schon sehr gut die Bereiche der Schneeakkumulation und der Schneeerosion erkennen. Die Einwehungsbereiche blieben über den gesamten Beobachtungszeitraum erhalten, nur die Absolutwerte schwankten über den Winter und erreichten bei der Aufnahme am 20.02.2004 ein erstes Maximum von 495 cm. Im März wurden ca. 50 cm geringere Schneehöhen im Einwehungsbereich abgelotet. Das absolute Maximum wurde bei diesem Profil erst am 20.04.2004 beobachtet und betrug 525 cm. Im Mai konnten nur noch geringere Schneehöhen festgestellt werden.

Im Winter 2005 wurden noch drei Ablotungen vorgenommen. In allen drei Monaten (Februar, März, April 2005) konnte dabei eine annähernd konstante Schneehöhe auf den ersten 100m des Profil 2 beobachtet werden. Die maximale Schneehöhe wurde am 7. Februar 2005 gemessen (750cm, siehe Abb.21)

Einen Überblick über das Verbauungsgebiet Feuersanglawine mit den eingezeichneten Profilen siehe Abbildung 14.

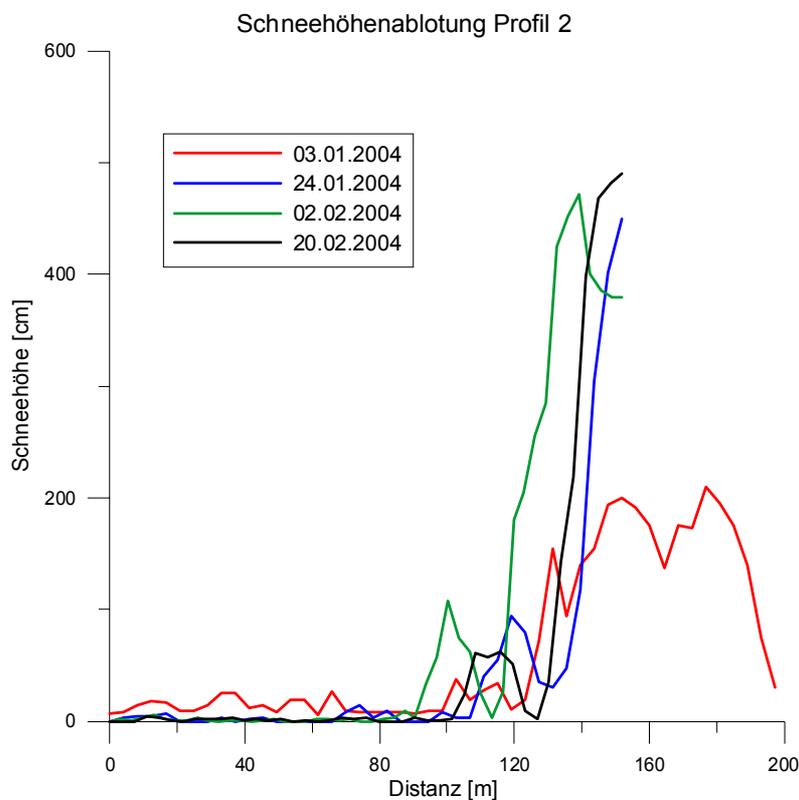


Abbildung 20: Schneehöhenablotung Profil 2 am 03.01.2004, 24.01.2004, 02.02.2004 und am 20.02.2004

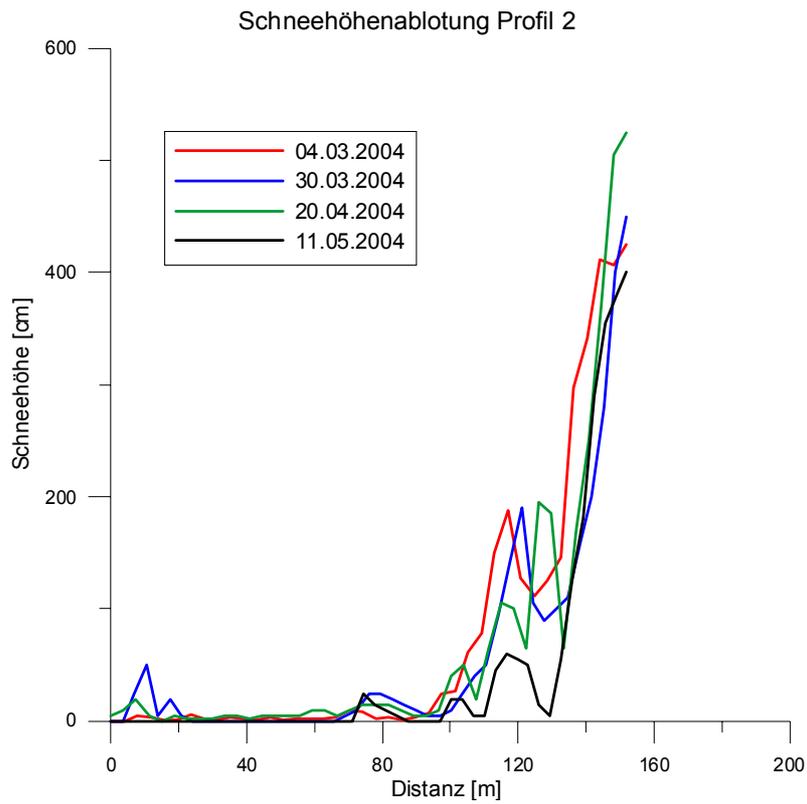


Abbildung 21: Schneehöhenablotung Profil 2 am 04.03.2004, 30.03.2004, 20.04.2004 und am 11.05.2004

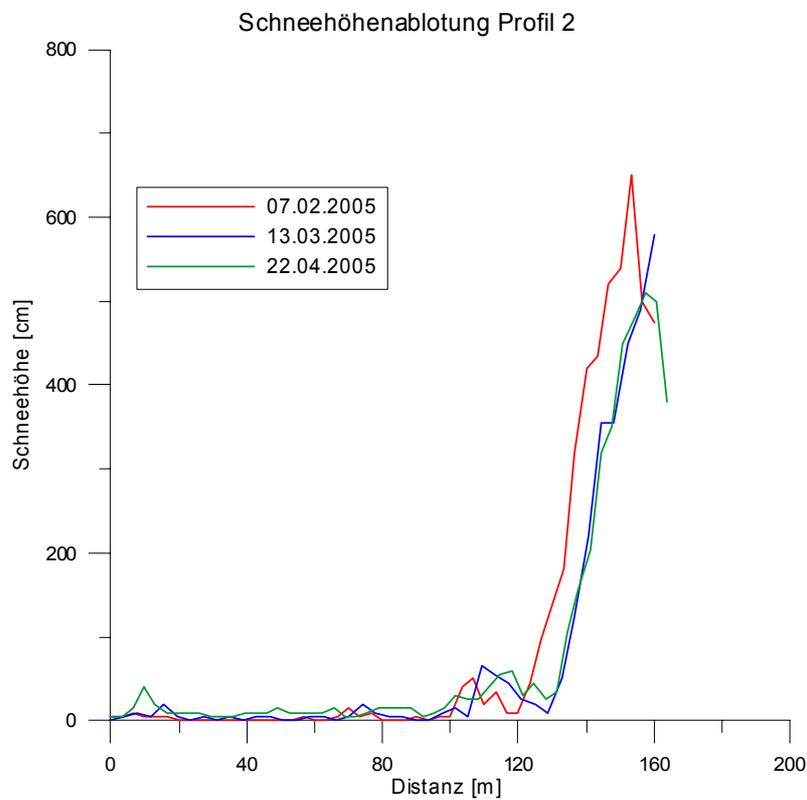


Abbildung 22: Schneehöhenablotung Profil 2 am 07.02.2005, 13.03.2005, 22.04.2005



Abbildung 23: Blick vom Ende des Profils 2 hinunter zum Bahnhof Böckstein am 20.04.2004

### 6.3 Windmessung entlang der abgeloteten Profile

Alle 30m wird die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 0,7m über der Schneedecke gemessen. Die einzelnen Messungen umfassen eine Zeitspanne von 6 Minuten. Während der Messung werden im Sekundentakt die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung gespeichert.

Dabei wurde versucht die vorherrschenden Windsituationen abzubilden. Aus der Analyse der Wetterdaten geht hervor, dass zwei Windsituationen von besonderer Bedeutung für die Feuersanglawine sind. Für die Einwehung sind vor allen Winde aus nördlicher Richtung entscheidend. Die Zweite Hauptwindsituation wird durch den Südföhn bestimmt.



Abbildung 24: Messen der Windgeschwindigkeit am Profil 2 Punkt 5



Abbildung 25: Messen des Windprofiles in 2 m Höhe auf der Freifläche (Kopf um 90° geneigt)

### 6.3.1 Situation bei Wind aus nördlicher Richtung

Die Windgeschwindigkeiten stehen im direkten Zusammenhang mit den Schneehöhen, die entlang der abgeloteten Profile vorgefunden wurden. Sehr schön kann man dabei sehen, dass im Erosionsbereich die Windgeschwindigkeit um ein vielfaches höher ist als im Akkumulationsbereich.

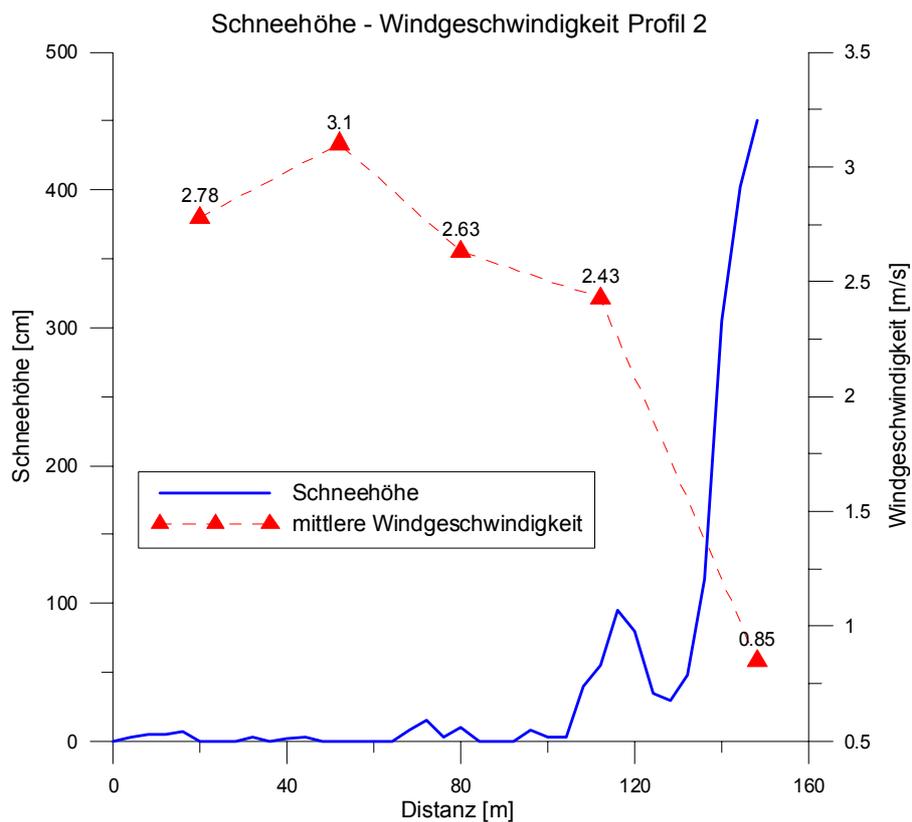


Abbildung 26: Windsituation am 24.01.2004 mit Schneehöhenablotung entlang Profil 2

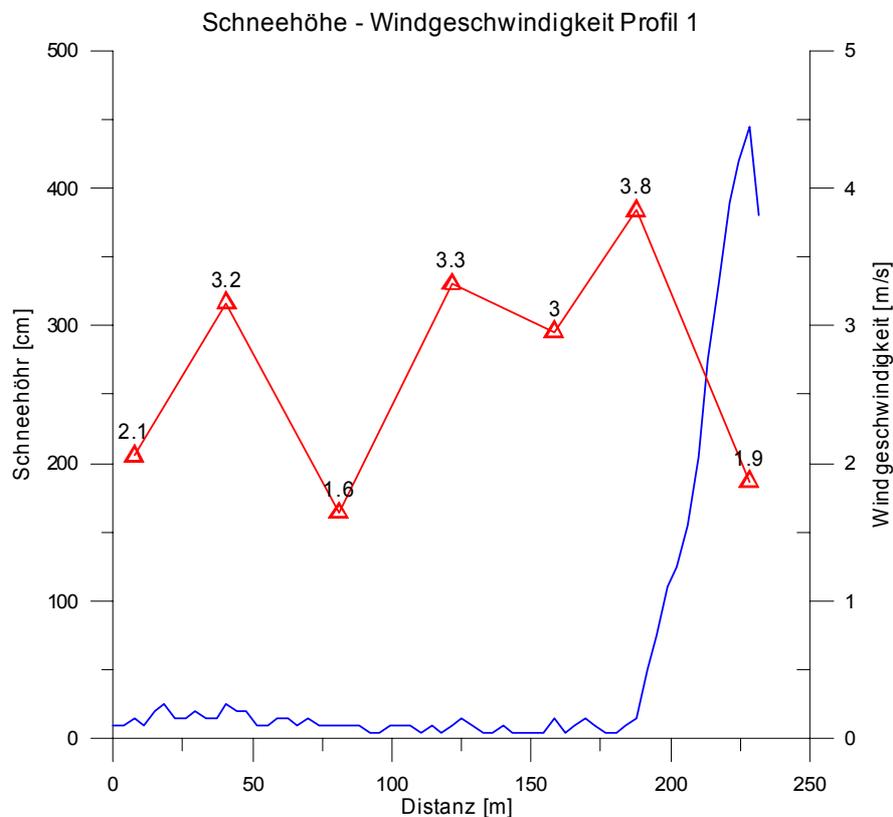


Abbildung 27: Schneehöhenablotung mit Windmessung Profil 1 vom 22.04.2005

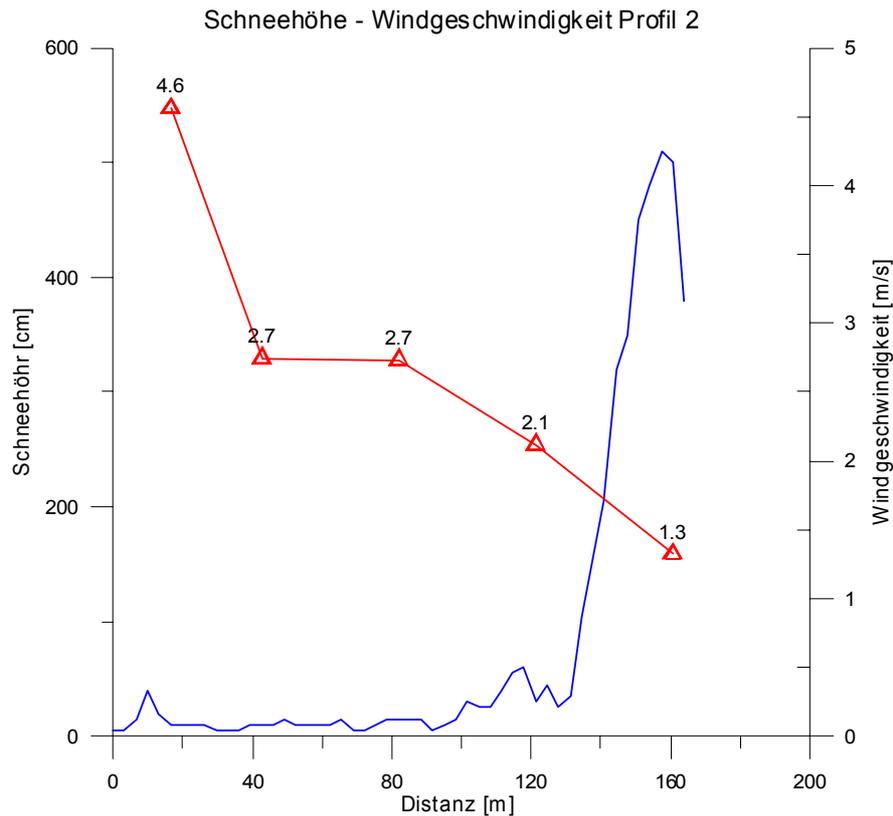


Abbildung 28: Schneehöhenablotung mit Windmessung Profil 2 vom 22.04.2005

Das Windfeld wird hier sehr stark durch das Relief bestimmt. Daraus erklären sich auch die hohen Schneehöhen im Akkumulationsbereich sowie die Schneeerosion im vorderen Bereich.

Die reliefbedingte Veränderung des Windfeldes ist in der untenstehenden Abbildung gezeigt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Windrichtungen im Akkumulationsbereich stark streuen, was auf ein „Abreißen des Stromfadens“ hinweist und zur Ablagerung des Schnees führt.

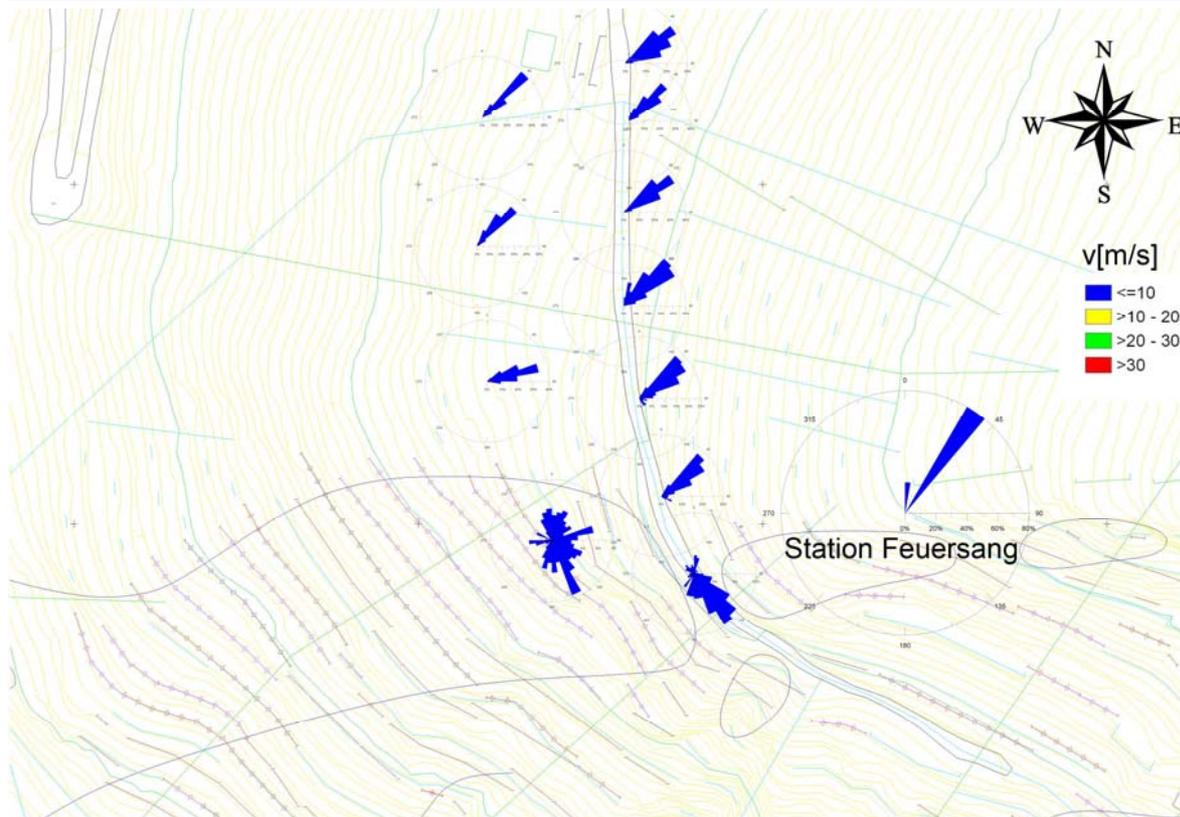


Abbildung 29: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 24. 01. 2004

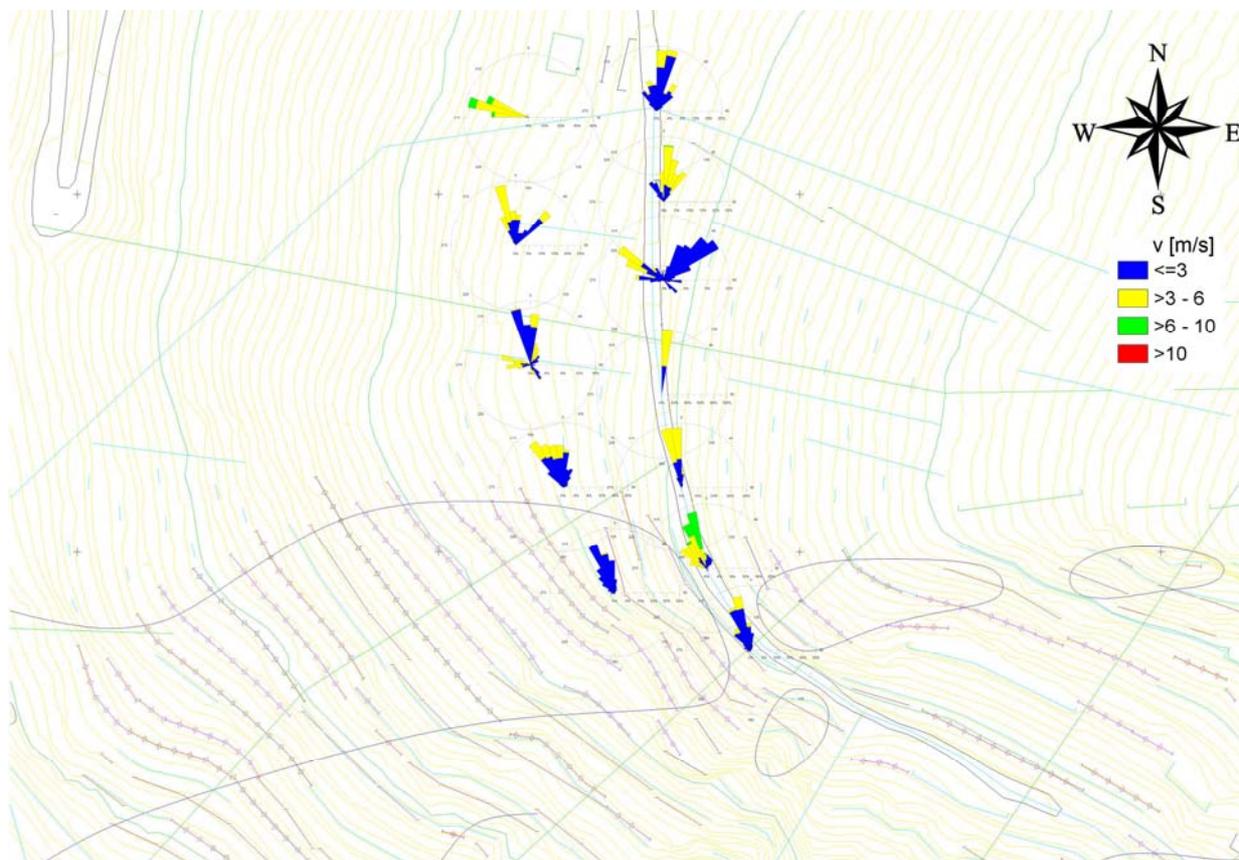


Abbildung 30: Auswertung der Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit vom 22.04.2005 aus 6 Minuten langen Messungen

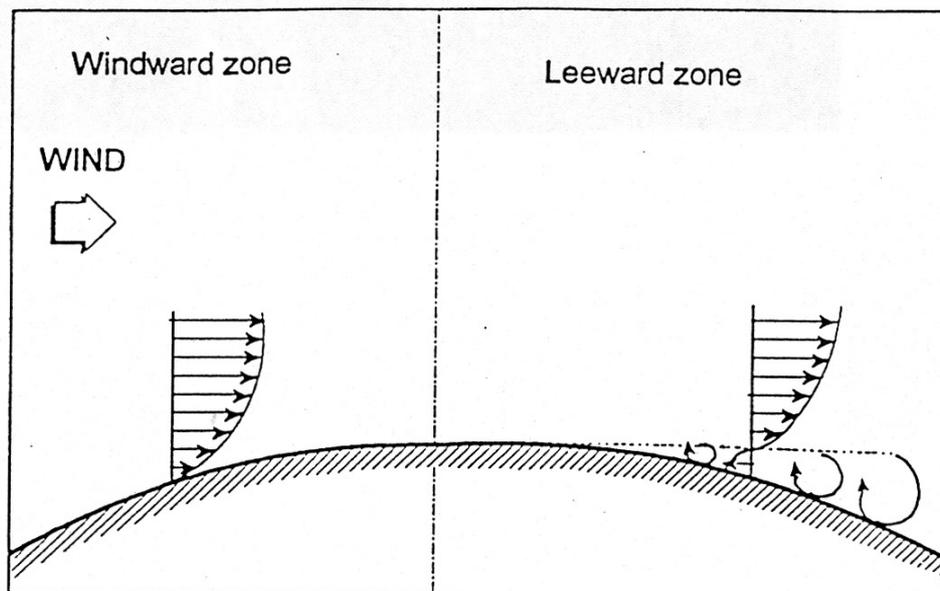


Abbildung 31: Veränderung des Windfeldes durch das Relief (aus Font i Coveny 1999, S 20; modifiziert nach Naaim and Brugnot, 1992)

### 6.3.2 Situation bei Südföhn

Bei Südföhn wird Schnee aus der Verbauung ausgeblasen. Dabei sind die Mengen des verfrachteten Schnees eher gering, da die Schneedecke im Bereich der Einwehungen meist sehr stark verfestigt ist (Windharsch). Dennoch können turbulente Schneeverfrachtungen bis ca. 30 m Höhe beobachtet werden. Dies ist am untenstehenden Foto recht gut zu erkennen.



Abbildung 32: Schneeverfrachtung bei Südföhn. (Windgeschwindigkeit ca. 20 m/s mit Böen bis ca. 30 m/s) am 17.01.2004

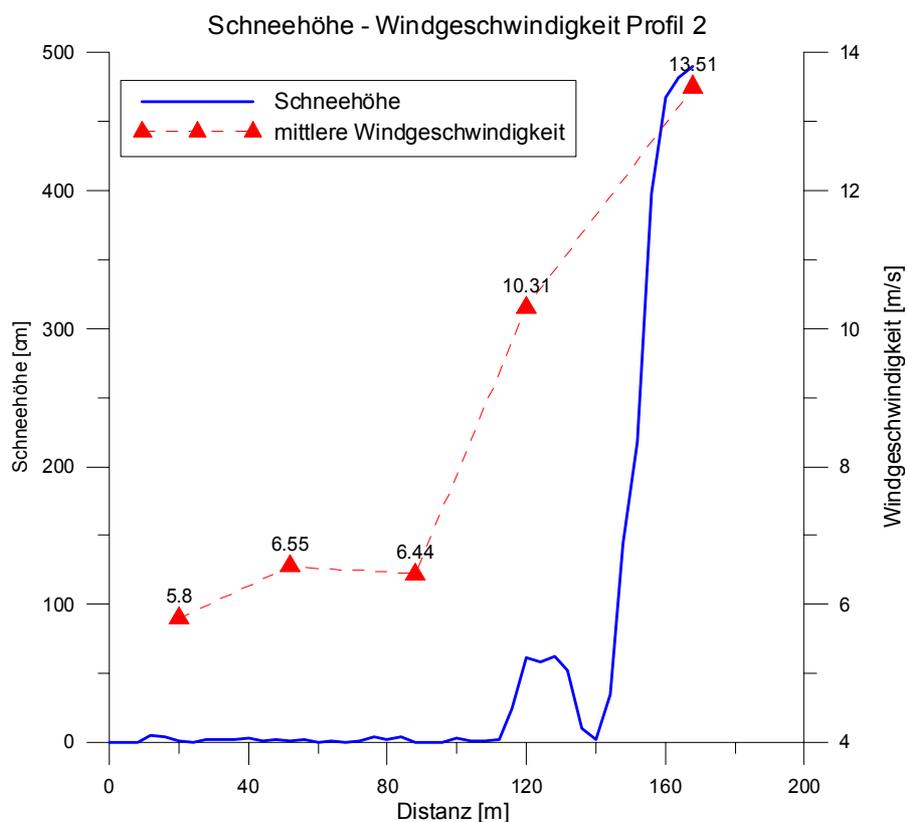


Abbildung 33: Windsituation am 20.02.2004 mit Schneehöhenablotung entlang Profil 2



Die reliefbedingte Veränderung des Windfeldes ist in der untenstehenden Abbildung gezeigt.

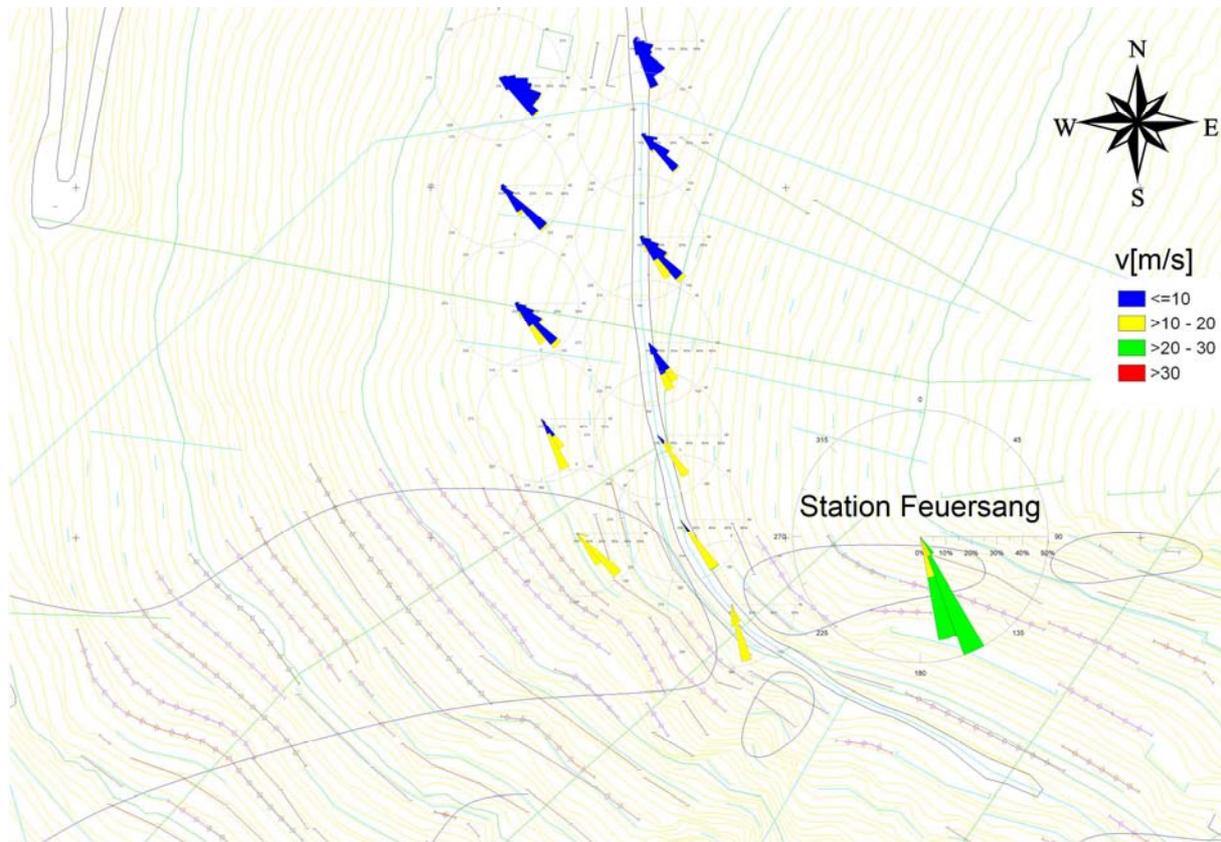


Abbildung 34: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 20.02. 2004

Weitere Windverteilungskarten vom Winter 2004 sowie 2005 sind im Anhang dargestellt.



## 6.4 Vergleich des Windfeldes im Stützverbau mit dem Windfeld auf der Freifläche

Um den Einfluss der Stützverbauung auf das Windfeld zu dokumentieren wurden Windprofile über die Höhe im Stützverbau und auf der Freifläche erstellt. Um auf Turbulenzen schließen zu können wurde die Windmesssonde um 90 Grad geknickt. Die Messungen erfolgten in 50 cm Abständen und wurden bis in 3 m Höhe fortgeführt. Die einzelnen Messpunkte sind 3 Minuten Mittelwerte der Windgeschwindigkeit. Es wurden derart kurze Messungen durchgeführt, da nur eine Windmesssonde zur Verfügung stand und der Zeitabstand zwischen der ersten und der letzten Messung so gering wie möglich gehalten werden sollte. Bei der Auswertung wurde die Windgeschwindigkeit am Boden mit 0,0 m/s angenommen.

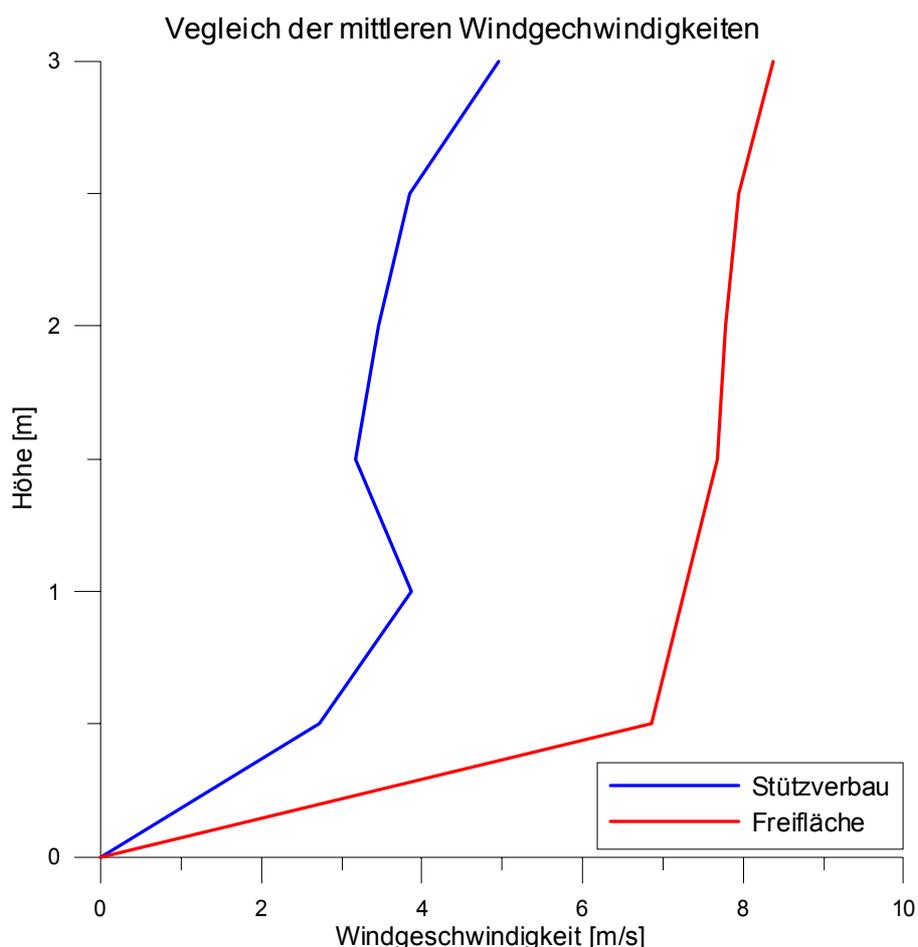


Abbildung 35: Vergleich des Windfeldes auf der Freifläche mit dem Windfeld im Stützverbau am 03.02.2004 (3 min Mittelwerte)

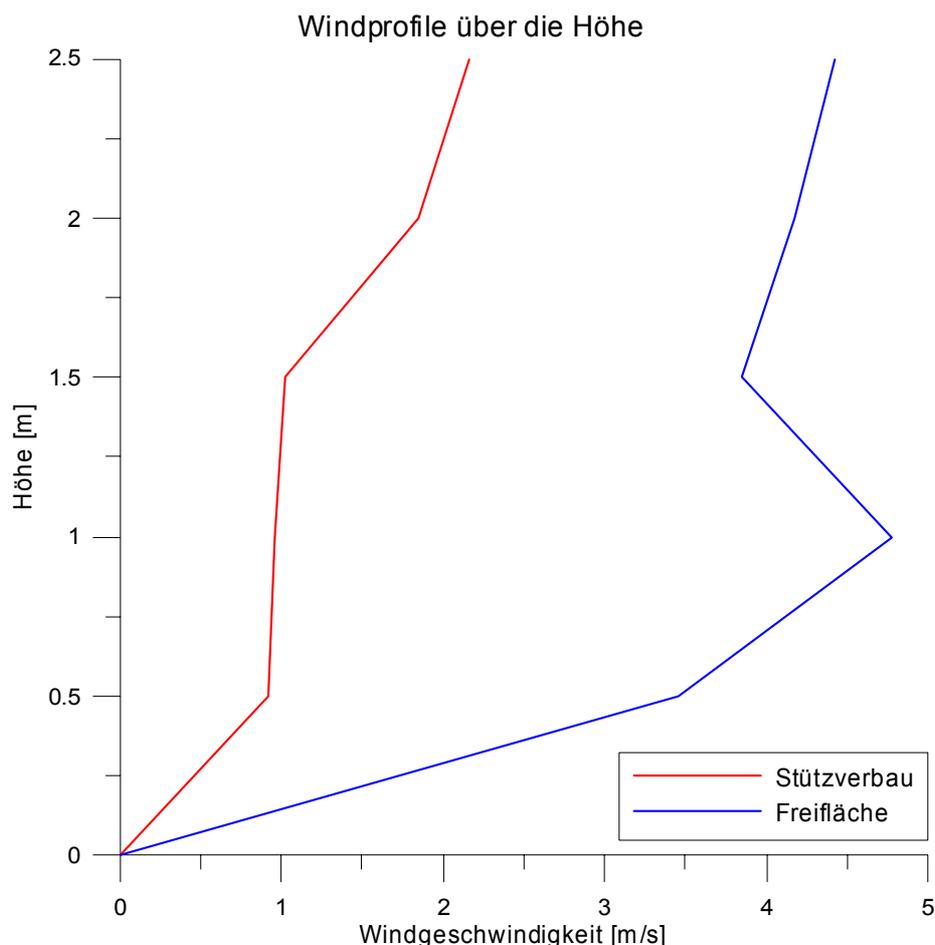


Abbildung 36: Vergleich des Windfeldes im Stützverbau mit der Freifläche vom 22.04.2005 (aus 5 Minuten Mittelwerten)

Wie man der oben stehenden Abbildung entnehmen kann ist die Windgeschwindigkeit im verbauten Bereich deutlich unter der Windgeschwindigkeit im unverbauten Bereich. Das heißt, dass die Verbauungen wie ein Verwehungsverbau (Schneezaun) wirken und bestätigen die Beobachtungen aus der Praxis, dass die Schneehöhen im zu sichernden Bereich nach einer Verbauung oft größer sind als davor.

„Der Verwehungsverbau entzieht der Strömung Impuls. Dadurch wird die Windgeschwindigkeit reduziert und der Trieb Schnee lagert sich ab“ (Vögeli, 1996).

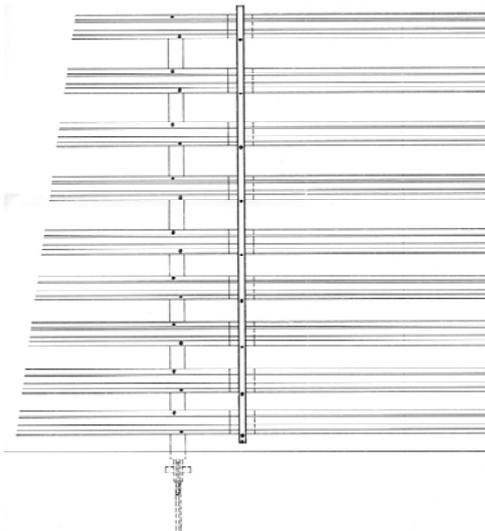


Abbildung 37: Hangparallele Ansicht einer Stahlschneebrücke des Typs D = 4,0 m (modifiziert nach Rothuber 1995)

Die in der nebenstehenden Abbildung dargestellte Stahlschneebrücke entspricht der Bautype an der die Windmessungen über die Höhe durchgeführt wurden.

Betrachtet man diese als Schneezaun, so entspricht sie einem Verwehungsverbau mit einem Füllungsgrad von 49% und einem Bodenspalt von 10 cm. Der Füllungsgrad wurde unter Berücksichtigung des Bodenspalts berechnet.

Für die Ablagerungslänge und deren Form sind der Füllungsgrad, sowie die Größe des Bodenspalts entscheidend.

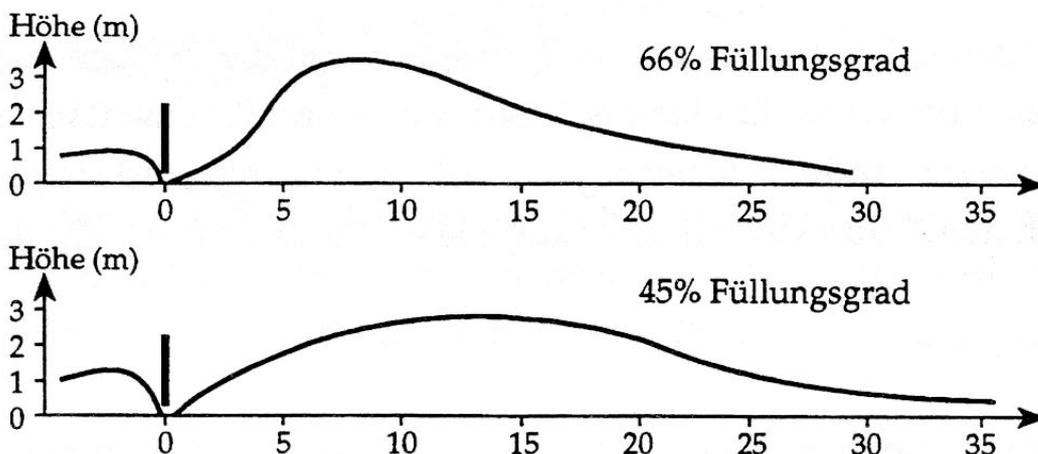


Abbildung 38: Einfluss des Füllungsgrades auf die Ablagerungsform (modifiziert nach Vögeli, 1996). Zaun mit 20 cm Bodenspalt. Der Füllungsgrad beinhaltet den Bodenspalt.

## 6.5 Schneeprofile

Zur Dokumentation der Entwicklungen der Schneedecke über den Winter 2004 und 2005 wurden Schneeprofile in zwei Expositionen gegraben. Insgesamt wurden 16 Schneeprofile gegraben.

Das erste Profil liegt auf 2050 m und ist nach Westen exponiert. Es liegt im Schneerosionsbereich. Bei diesem Profil ist von einer Windbeeinflussung durch die



Feuersanghütte zu rechnen, da der Schnee in diesem Bereich nie vollständig vom Wind wegerodiert war.

Das zweite Profil liegt ebenfalls auf 2050 m und hat eine Süd-West Ausrichtung. Dieses Profil liegt im Akkumulationsbereich. Dieser Bereich ist durch Stahlschneebrücken gesichert.

Bei beiden Profilen wurde folgendes untersucht:

- Schichtfolge
- Höhe der einzelnen Schichten
- Kristallform (nach der internationalen Klassifikation für saisonalen Schnee auf dem Boden ICSI und IGS, 1990. Übersetzt und bearbeitet von H. U. Gubler, Davos)
- Größe der Schneekristalle
- Härte der einzelnen Schichten (Faust, 4 Finger, 1 Finger, Bleistift, Messer)
- Dichte der einzelnen Schichten (Stechzylinder + Federwaage)
- Feuchte der Schichten
- Temperaturprofil über die Höhe

Die Lufttemperatur, der Bewölkungsgrad Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden ebenfalls notiert.

### **6.5.1 Entwicklung der Schneedecke im Profil 1**

Durch die Windexponiertheit des Profils war die Schneehöhe immer sehr gering. Die maximale Schneehöhe betrug nur 103 cm. Der aus der geringen Höhe resultierende starke Temperaturgradient hatte eine intensive aufbauende Metamorphose in den Bodennahen Schichten zur Folge, die über den ganzen Winter anhielt. Dabei wurden kantige Formen sowie Becherkristalle vorgefunden. Die Becherkristalle erreichten eine Größe von bis zu 4 mm. Die vorgefundenen Dichten in den Schichten mit aufbauender Metamorphose waren viel geringer als in den darüber liegenden Schichten, wo abbauende Prozesse dominierten. In diesen Schichten wurden hauptsächlich runde Kornformen festgestellt. Erst gegen Ende des Winters überwiegen abbauende Prozesse, bis letztendlich die Schmelzmetamorphose im Mai einsetzte.



Beispielhaft sind unten 2 Schneeprofile angeführt. Alle Schneeprofile sind im Anhang dargestellt.

Das erste Profil 2004 wurde am 20.01.2004 erstellt und ist ein für diese Lage typisches Winterprofil mit geringer Schneehöhe und einem starken Temperaturgradienten. Daraus resultiert eine starke aufbauende Metamorphose, die sich in der untersten Schicht in 3 mm großen Becherkristallen ausdrückt. Die Dichte sowie die Härte ist in dieser Schichten viel geringer als in der darüber liegenden Schicht wo kantige Formen dominieren, die eine Größe von 2 mm erreichen. In den oberen Schichten kann rundkörniger Schnee mit nach oben hin abnehmender Dichte und Korngröße festgestellt werden.

Das zweite Profil 2004 wurde am 11.05.2004 erstellt und repräsentiert die Schneedecke im Frühjahr. Es herrscht beinahe Homothermie, d. h. die Temperatur ist über das gesamt Profil konstant und nahe dem Schmelzpunkt. Die Kornformen sind von der Schmelzmetamorphose geprägt. In den unteren Schichten dominieren gerundete Polykristalle mit einem Durchmesser von 3 mm. Diese Schichten haben sehr hohe Dichten. In den obersten Schichten wird filziger Schnee vorgefunden der am Übergang zu Schmelzformen ist.



Ort: **Feuersang 1**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

**Handprofil**  
24.01.2004/13:00

Beobachter: Chiari

Exposition: W

Bewölkung: sonnig (0/8)

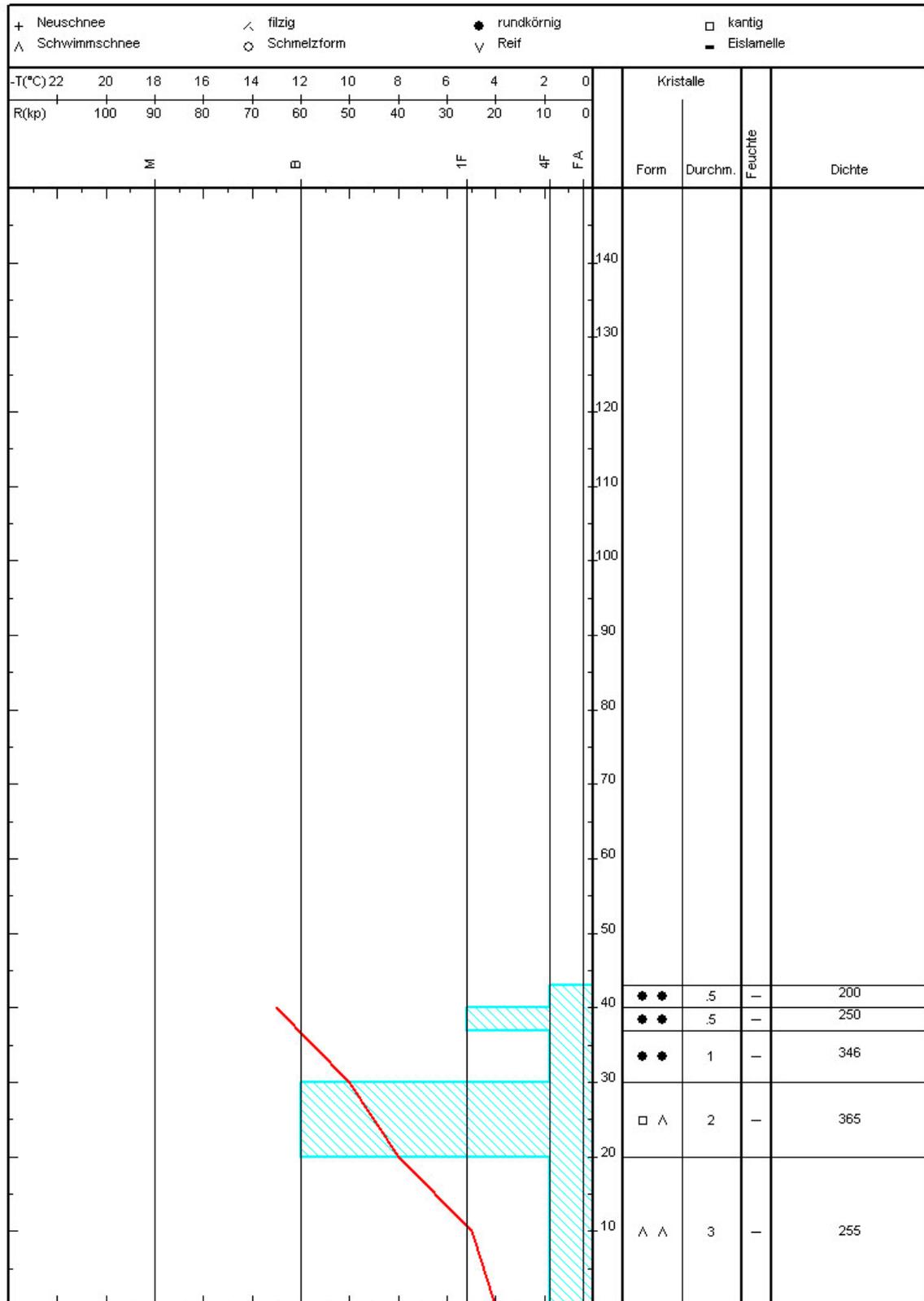
Niederschlag:

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 0 km/h -richtg: 0 Grad

Temp.: -10.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 39: Schneeprofil 1 vom 24.01.2004





Ort: **Feuersang 1**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

**Handprofil**  
**11.05.2004/11:52**

Beobachter: Chiari

Exposition: W

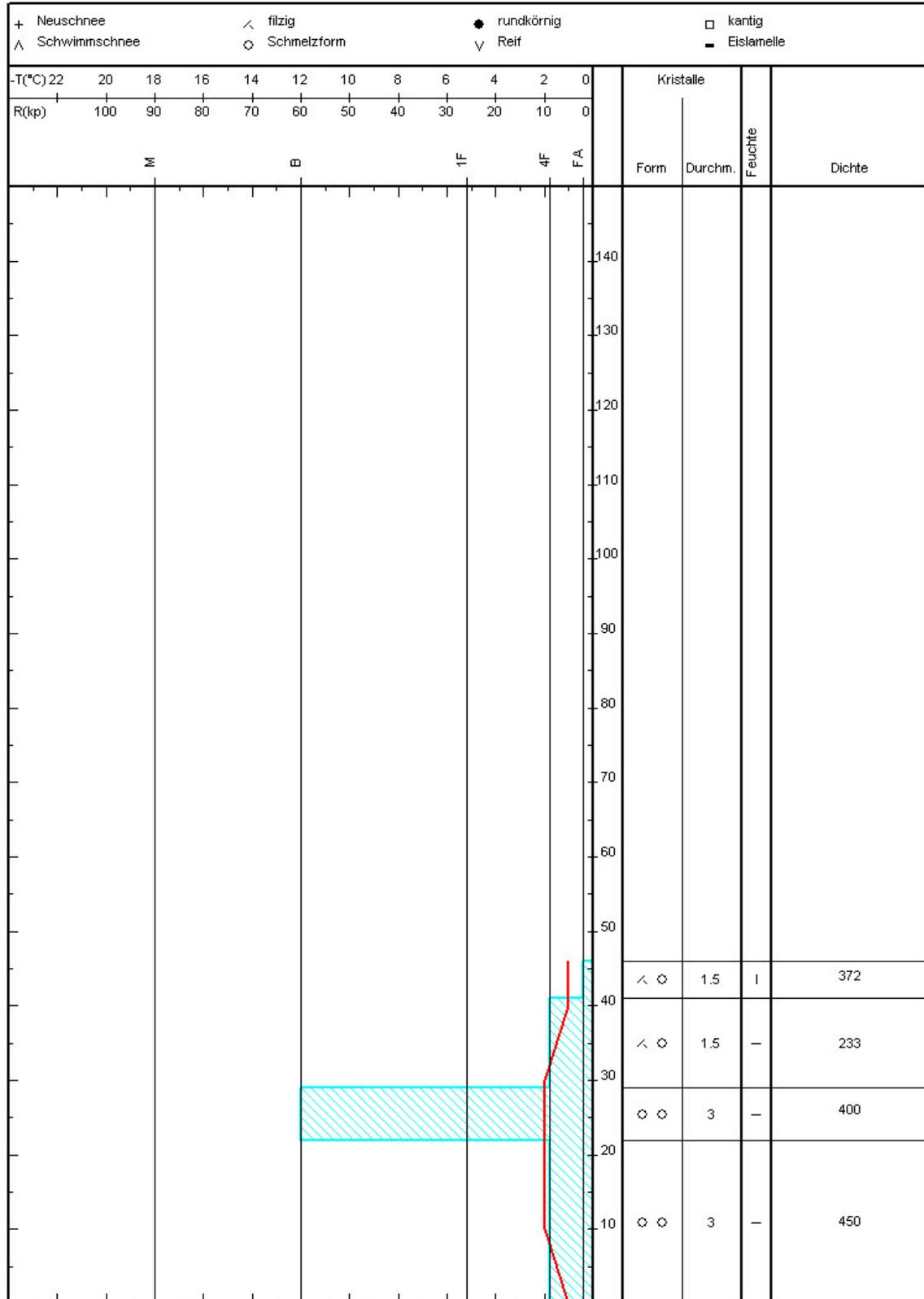
Bewölkung: stark bewölkt (6/8) Niederschlag: 0

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 3 km/h -richtg: 0 Grad

Temp.: 2.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 40: Schneeprofil 1 vom 11.05.2004



## 6.5.2 Entwicklung der Schneedecke im Profil 2

Da dieses Schneeprofil im Akkumulationsbereich liegt waren die vorgefundenen Schneehöhen stets größer als im 1. Schneeprofil. Die Schneehöhen erreichten bis zu 1,5 m. Daraus resultierte ein schwächerer Temperaturgradient in der Schneedecke, der auch nur eine schwache aufbauende Metamorphose, die sich in kantigen Formen äußert, zur Folge hatte. Runde Kornformen dominierten, bis im Mai die Schmelzmetamorphose einsetzte.

Beispielhaft sind unten 2 Schneeprofile angeführt. Alle Schneeprofile sind im Anhang dargestellt.

Das erste wurde am 20.01.2004 erstellt. In den unteren zwei Schichten werden kantige Formen festgestellt, die 1,5 mm groß sind. Die unterste Schicht hat eine um eine Stufe geringere Härte als die darüber liegende Schicht. Die über der zweiten liegenden Schichten sind von runden Kornformen geprägt. Die Dichte nimmt über das gesamte Profil nach unten hin zu. Knapp unter der Schneeoberfläche befindet sich eine Schicht mit großer Härte (Bleistift). Darunter liegt viel weicherer Schnee (4 Finger).

Das zweite Profil wurde am 11.05.2004 erstellt und repräsentiert die Schneedecke im Frühjahr. Es herrscht beinahe Homothermie, d. h. die Temperatur ist über das gesamte Profil konstant und nahe dem Schmelzpunkt. Die Kornformen sind von der Schmelzmetamorphose geprägt. Gerundete Polykristalle herrschen vor. In der obersten Schicht befindet sich filziger Schnee, der am Übergang zu Schmelzformen ist. Die Dichte ist über das gesamte Profil sehr hoch.







## 7 Analyse

### 7.1 Analyse der meteorologischen Daten

#### 7.1.1 Auswertung der Station Badgastein

Nach Formel 13 (Struges, 1926) ergeben sich 6 Klassen für die maximale jährliche Schneehöhe.

Klasse	Von [cm]	Bis [cm]	Anzahl [Jahre]
1	25	39	7
2	40	53	11
3	54	68	17
4	69	82	14
5	83	96	2
6	97	110	4

Tabelle 3 : Klasseneinteilung der maximalen jährlichen Schneehöhen

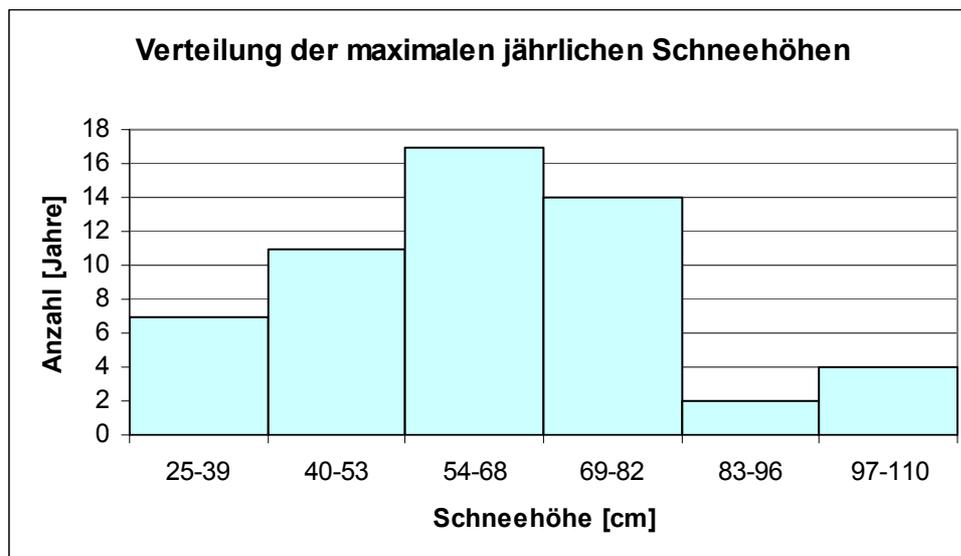


Abbildung 43: Häufigkeit der maximalen jährlichen Schneehöhen

Extremwertstatistische Auswertung der maximalen jährlichen Schneehöhen:



Daten:		Daten geordnet:					
Jahr	S [cm]	S [cm]	Rangzahl:	Pm (Gringorton)	P <sub>u</sub>	T <sub>n</sub>	Y <sub>t</sub>
1948	62	110	1	0,010	0,990	100,214	4,602
1949	43	108	2	0,028	0,972	35,974	3,569
1950	72	105	3	0,046	0,954	21,922	3,064
1951	104	104	4	0,063	0,937	15,764	2,725
1952	108	95	5	0,081	0,919	12,307	2,468
1953	56	89	6	0,099	0,901	10,094	2,260
1954	69	80	7	0,117	0,883	8,555	2,085
1955	67	80	8	0,135	0,865	7,423	1,933
1956	67	80	9	0,153	0,847	6,556	1,799
1957	47	80	10	0,170	0,830	5,870	1,678
1958	80	77	11	0,188	0,812	5,314	1,568
1959	55	75	12	0,206	0,794	4,855	1,467
1960	80	75	13	0,224	0,776	4,468	1,373
1961	80	73	14	0,242	0,758	4,139	1,285
1962	54	73	15	0,259	0,741	3,854	1,203
1963	42	72	16	0,277	0,723	3,607	1,125
1964	60	70	17	0,295	0,705	3,389	1,051
1965	70	70	18	0,313	0,687	3,196	0,980
1966	47	70	19	0,331	0,669	3,024	0,912
1967	63	69	20	0,349	0,651	2,869	0,847
1968	77	67	21	0,366	0,634	2,730	0,785
1969	35	67	22	0,384	0,616	2,603	0,724
1970	36	65	23	0,402	0,598	2,488	0,665
1971	25	65	24	0,420	0,580	2,382	0,608
1972	26	64	25	0,438	0,562	2,285	0,552
1973	65	63	26	0,455	0,545	2,196	0,498
1974	52	63	27	0,473	0,527	2,113	0,445
1975	75	62	28	0,491	0,509	2,036	0,392
1977	59	62	30	0,527	0,473	1,899	0,290
1978	62	62	31	0,545	0,455	1,836	0,240
1979	38	60	32	0,562	0,438	1,778	0,191
1980	63	59	33	0,580	0,420	1,724	0,142
1981	89	56	34	0,598	0,402	1,672	0,093
1982	110	56	35	0,616	0,384	1,624	0,044
1983	70	55	36	0,634	0,366	1,578	-0,004
1984	64	55	37	0,651	0,349	1,535	-0,053
1985	52	54	38	0,669	0,331	1,494	-0,101



1986	105	52	39	0,687	0,313	1,455	-0,150
1987	73	52	40	0,705	0,295	1,419	-0,199
1988	62	50	41	0,723	0,277	1,384	-0,249
1989	38	47	42	0,741	0,259	1,350	-0,300
1990	42	47	43	0,758	0,242	1,319	-0,351
1991	75	45	44	0,776	0,224	1,288	-0,403
1992	80	43	45	0,794	0,206	1,259	-0,457
1993	45	43	46	0,812	0,188	1,232	-0,513
1994	50	42	47	0,830	0,170	1,205	-0,571
1995	65	42	48	0,847	0,153	1,180	-0,631
1996	38	40	49	0,865	0,135	1,156	-0,695
1997	56	38	50	0,883	0,117	1,132	-0,764
1998	40	38	51	0,901	0,099	1,110	-0,838
1999	95	38	52	0,919	0,081	1,088	-0,920
2000	70	36	53	0,937	0,063	1,068	-1,014
2001	73	35	54	0,954	0,046	1,048	-1,127
2002	43	26	55	0,972	0,028	1,029	-1,276
2003	55	25	56	0,990	0,010	1,010	-1,528

Tabelle 4: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit

## 7.1.1.1 Auswertung nach der Regressionsmethode

Achsenabschnitt: 53,43

Steigung 15,56

<b>T<sub>r</sub></b>	<b>Y<sub>t</sub></b>	<b>S [cm]</b>
<b>1,05</b>	-1,113	<b>36</b>
<b>2</b>	0,367	<b>59</b>
<b>5</b>	1,500	<b>77</b>
<b>10</b>	2,250	<b>88</b>
<b>25</b>	3,199	<b>103</b>
<b>50</b>	3,902	<b>114</b>
<b>100</b>	4,600	<b>125</b>
<b>150</b>	5,007	<b>131</b>
<b>200</b>	5,296	<b>136</b>
<b>300</b>	5,702	<b>142</b>

Tabelle 5: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit nach der Regressionsmethode



## 7.1.1.2 Auswertung nach der Momentenmethode

Mittelwert: 62,34

Standardabweichung: 19,95

$T_r$	$Y_t$	$K_{tr}$	S [cm]	Vertrauensbereich		$\beta_{Tr}$	$s_e$
1,05	-1,113	-1,318	36	28,71	43,39	1,187	3,744
2	0,367	-0,164	59	53,39	64,74	0,918	2,895
5	1,500	0,719	77	67,14	86,26	1,546	4,876
10	2,250	1,305	88	75,46	101,28	2,088	6,586
25	3,199	2,044	103	85,72	120,53	2,815	8,880
50	3,902	2,592	114	93,24	134,89	3,369	10,626
100	4,600	3,137	125	100,66	149,19	3,924	12,379
150	5,007	3,454	131	104,98	157,54	4,250	13,407
200	5,296	3,679	136	108,04	163,46	4,481	14,137
300	5,702	3,996	142	112,34	171,80	4,808	15,168

Tabelle 6: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit nach der Momentenmethode

Die Auswertung nach der Momentenmethode liefert die gleichen Ergebnisse wie nach der Regressionsmethode. Der Vorteil der Momentenmethode liegt jedoch darin, dass ein Vertrauensbereich angegeben werden kann.

## 7.1.2 Zusammenhang der Schneehöhen der Station Badgastein mit der Station Feuersang

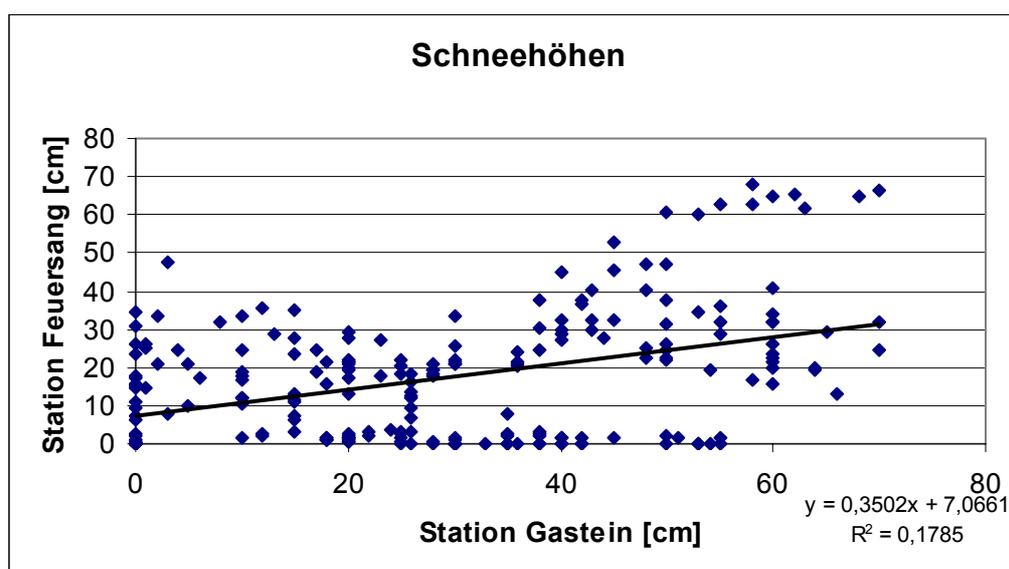


Abbildung 44: Zusammenhang der Schneehöhen der Wetterstationen Badgastein und Feuersang



Durch den starken Windeinfluss der Station kann kein gesicherter Zusammenhang der Station Badgastein mit der Station Feuersang gefunden werden.

### 7.1.3 Zusammenhang der Schneehöhen der Station Badgastein mit der Station Thomaseck

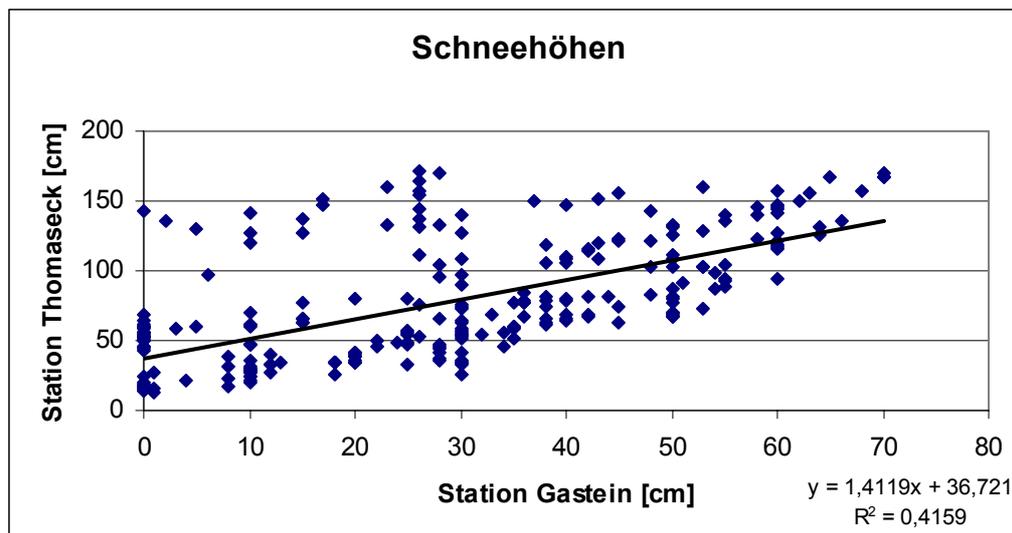


Abbildung 45: Zusammenhang der Schneehöhen der Wetterstationen Badgastein und Thomaseck

Auch für die Station Thomaseck kann kein guter Zusammenhang der Schneehöhen mit der Station im Tal gefunden werden.

### 7.1.4 Auswertung Hydrographisches Jahrbuch

Da zwischen den Klimastationen vor Ort und der ZAMG Station Badgastein kein gesicherter Zusammenhang gefunden werden konnte wurden 11 Klimastationen, die die maximale Jährliche Schneehöhe aufzeichnen ausgewertet. Als Datengrundlage dienten die Hydrographischen Jahrbücher von 1951 bis 2001. Dabei wurde versucht umliegende Stationen in Verschiedenen Höhenlagen auszuwerten. Ziel dieser Auswertung ist es eine Schneehöhe bestimmter Jährlichkeit für die Seehöhe 2000 m zu errechnen, da die Station vor Ort am Feuersang zu sehr unter dem Einfluss des Windes steht.



Station	Seehöhe [m]
Klammstein	795
Neukirchen	857
Großarl	890
Hüttschlag	1010
Krimml	1082
Badgastein	1100
Bucheoben	1140
Böckstein	1140
Moserboden	2036
Rudolfshütte	2304
Sonnblick	3105

Tabelle 7: Übersicht der Stationen und deren Seehöhe aus dem Hydrographischen Jahrbuch

Die untenstehenden Tabellen zeigen die maximalen jährlichen Schneehöhen in cm.

Jahr	Krimml	Neukirchen	Rudolfshütte	Moserboden	Sonnblick	Bucheoben
1951	65	-	-	205	750	109
1952	80	-	-	-	-	120
1953	48	-	-	189	620	69
1954	100	-	-	168	610	60
1955	60	-	-	-	514	95
1956	42	-	-	170	475	96
1957	65	-	-	183	630	90
1958	41	-	-	110	670	95
1959	30	-	-	120	495	30
1960	64	-	-	105	870	80
1961	68	-	-	135	710	83
1962	67	-	-	205	800	90
1963	58	-	-	190	590	70
1964	23	-	-	122	270	30
1965	48	-	-	230	430	76
1966	57	-	-	138	360	75
1967	55	-	-	137	685	70
1968	83	-	-	110	280	95
1969	59	-	-	114	420	41
1970	56	-	-	128	380	90
1971	68	-	-	96	290	38
1972	34	-	-	143	510	33
1973	64	-	-	196	360	69
1974	50	54	-	190	440	65
1975	100	55	-	330	710	104
1976	48	48	-	170	390	50
1977	62	66	-	240	730	78



1978	67	54	-	145	710	72
1979	36	36	-	190	600	45
1980	55	58	-	156	830	86
1981	105	86	-	136	560	109
1982	63	55	-	-	610	75
1983	51	58	-	-	510	82
1984	90	80	280	-	590	65
1985	30	22	260	122	460	33
1986	60	63	280	-	535	102
1987	57	49	370	-	600	95
1988	85	-	328	-	585	90
1989	176	92	324	-	430	53
1990	25	52	244	-	475	-
1991	50	-	340	-	810	68
1992	60	50	352	-	390	40
1993	70	50	320	230	560	57
1994	40	60	271	165	610	77
1995	60	65	310	255	390	77
1996	25	30	208	167	290	62
1997	40	30	380	270	530	35
1998	25	15	255	214	440	47
1999	80	80	385	239	530	112
2000	70	65	420	-	535	120
2001	50	48	350	-	720	90

Tabelle 8: Maximale jährliche Schneehöhen in cm der umliegenden Klimastationen aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1951 bis 2001 Teil1

Jahr	Böckstein	Badgastein	Klammstein	Hüttschlag	Großarl
1951	107	65	-	86	82
1952	126	108	-	122	106
1953	70	56	-	55	57
1954	75	69	-	116	100
1955	95	67	-	61	80
1956	78	67	-	69	60
1957	105	75	-	84	41
1958	85	80	-	73	52
1959	49	30	-	35	55
1960	98	80	-	82	87
1961	95	80	-	78	64
1962	120	54	-	100	86
1963	74	46	-	60	65
1964	58	40	-	42	40
1965	95	70	-	100	81



1966	85	61	-	80	65
1967	90	63	-	85	84
1968	135	77	-	105	93
1969	61	35	-	60	43
1970	118	-	-	90	56
1971	65	25	-	50	44
1972	50	26	30	40	31
1973	90	65	35	70	50
1974	100	60	50	75	67
1975	138	75	55	85	68
1976	69	109	27	70	43
1977	75	59	39	55	57
1978	78	62	40	65	55
1979	60	38	39	35	35
1980	70	45	35	90	54
1981	140	89	98	100	110
1982	110	95	70	95	79
1983	100	70	35	80	55
1984	90	64	65	86	74
1985	46	30	18	30	25
1986	130	105	69	95	87
1987	128	73	65	70	79
1988	85	62	50	80	91
1989	38	18	25	40	26
1990	48	42	48	60	80
1991	85	70	25	58	33
1992	123	80	109	85	82
1993	80	45	20	50	40
1994	70	50	45	60	56
1995	90	65	60	90	77
1996	48	38	20	44	85
1997	28	25	20	35	40
1998	62	56	20	55	28
1999	85	95	65	70	92
2000	98	70	31	85	74
2001	85	73	40	70	77

Tabelle 9: Maximale jährliche Schneehöhen in cm der umliegenden Klimastationen aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1951 bis 2001 Teil 2

Der Zusammenhang zwischen der mittleren maximalen Schneehöhe und der Seehöhe ist im untenstehenden Diagramm dargestellt.

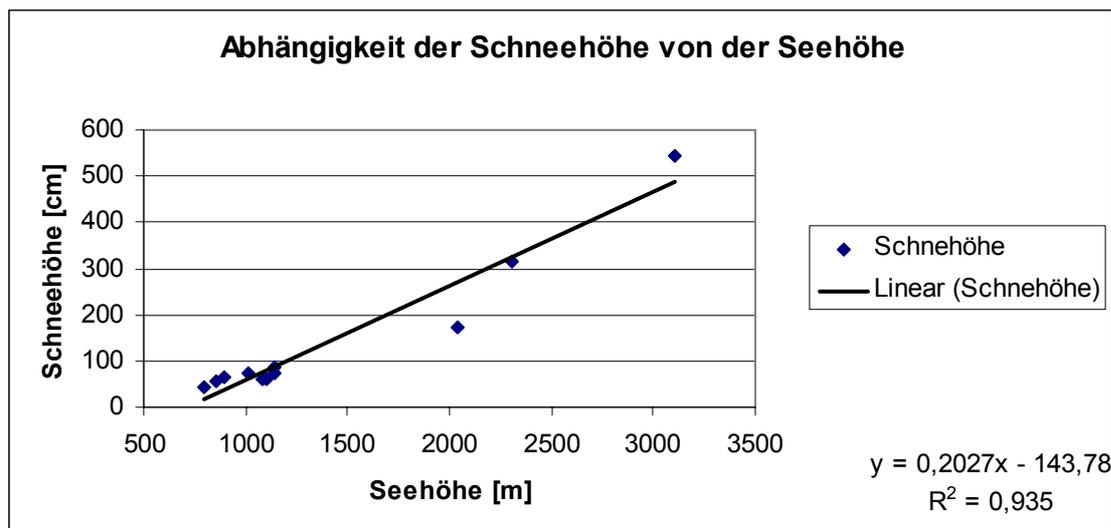


Abbildung 46: Abhängigkeit der mittleren maximalen jährlichen Schneehöhe von der Seehöhe

Um Aussagen über Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit für die gesuchte Seehöhe treffen zu können wurden die Stationen Krimml, Rudolfshütte, Moserboden, Sonnblick, Böckstein, Badgastein, Hüttschlag und Großarl nach der oben beschriebenen Momentenmethode ausgewertet. Weiters wurde für jede Jährlichkeit der Schneehöhe der Zusammenhang mit der Seehöhe hergestellt. Die Schneehöhen in cm für die einzelnen Stationen und Jährlichkeiten sind in der untenstehenden Tabelle angeführt.

Jährl.	Krimml	Rudolfshütte	Moserboden	Sonnblick	Böckstein	Badgastein	Hüttschlag	Großarl
<b>10</b>	93	389	242	743	121	88	114	93
<b>25</b>	112	431	282	854	141	103	135	109
<b>50</b>	126	462	311	937	156	114	151	121
<b>100</b>	140	492	340	1019	171	125	167	133
<b>150</b>	148	510	356	1067	180	131	176	140
<b>200</b>	154	523	368	1101	186	136	182	145

Tabelle 10: Schneehöhen in cm für bestimmte Jährlichkeiten

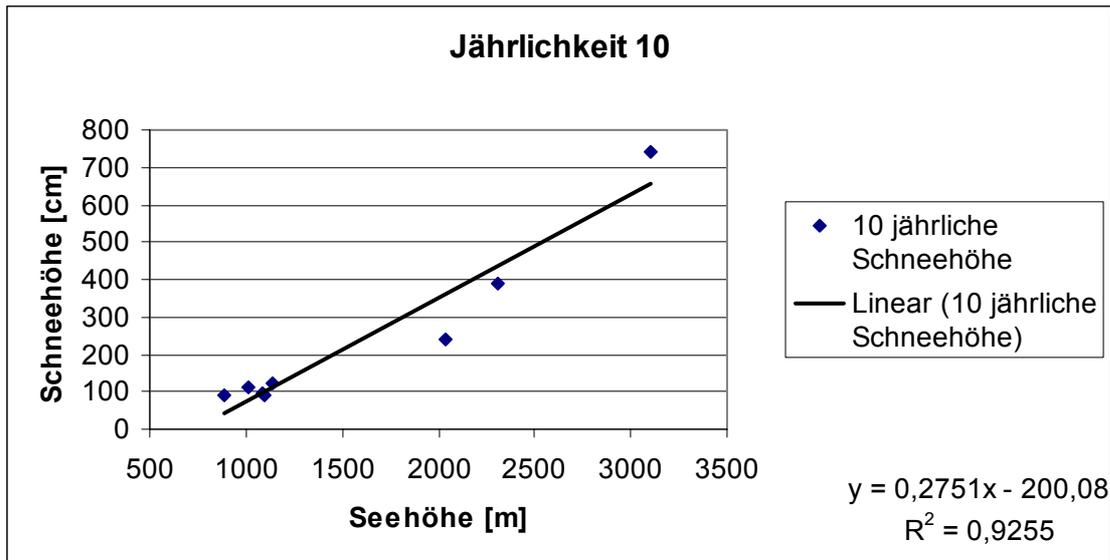


Abbildung 47: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 10

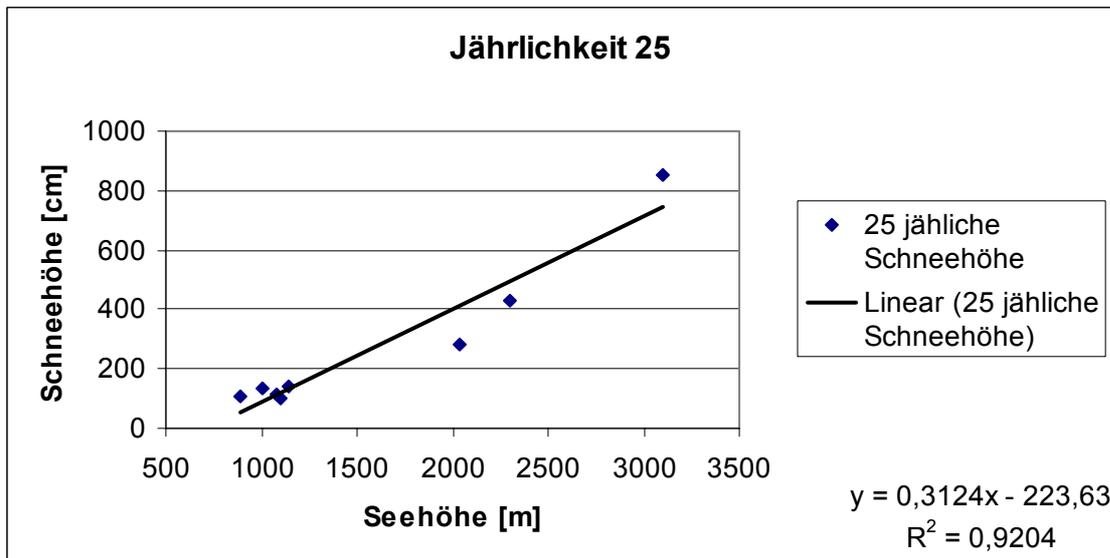


Abbildung 48: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 25

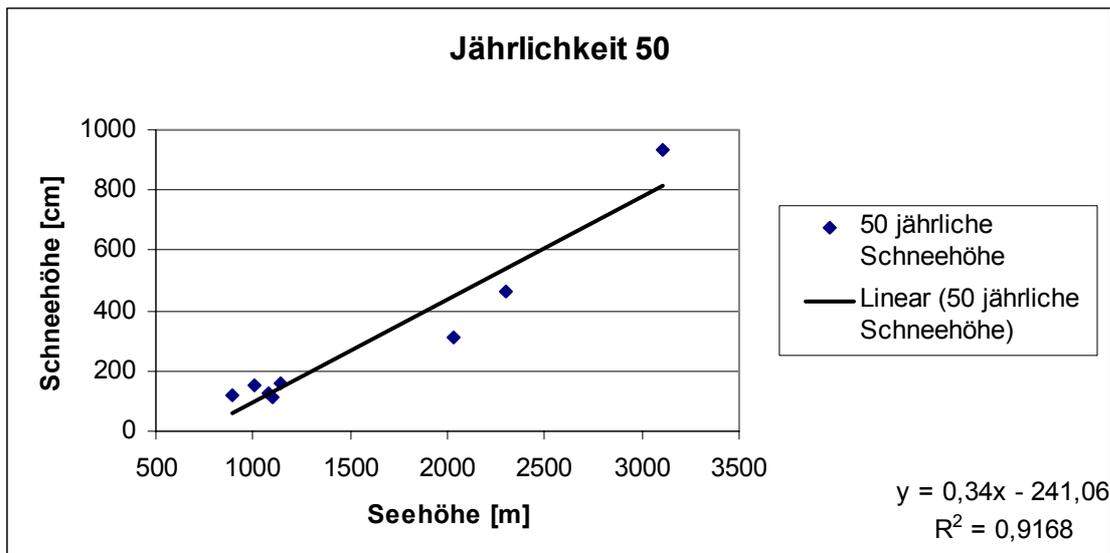


Abbildung 49: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 50

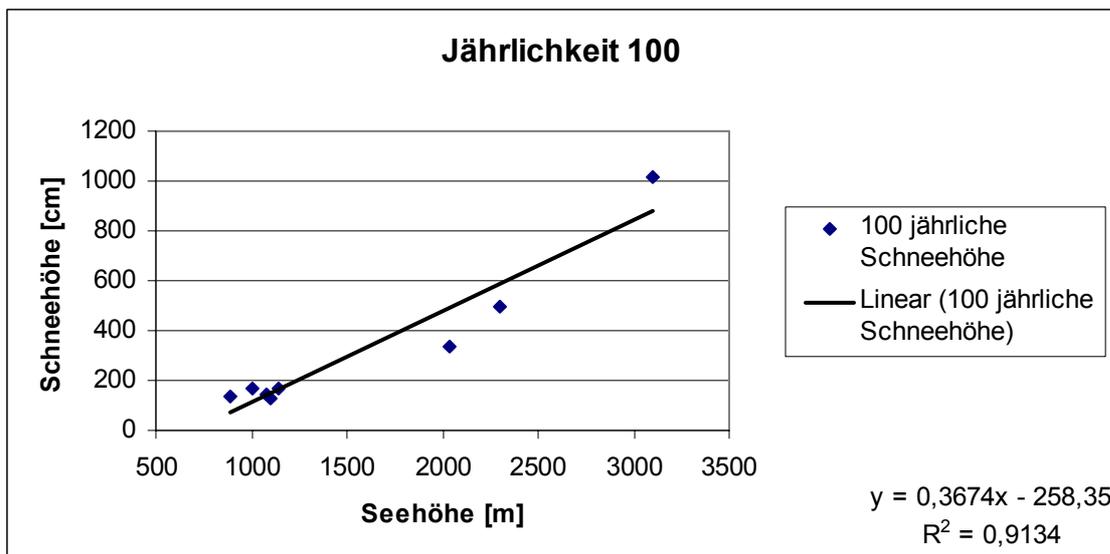


Abbildung 50: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 100

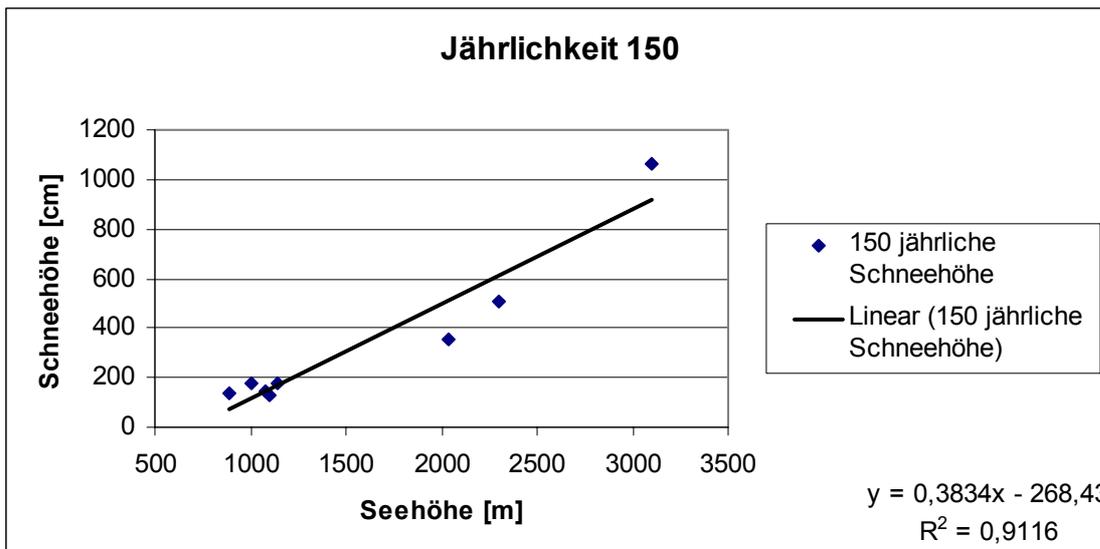


Abbildung 51: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 150

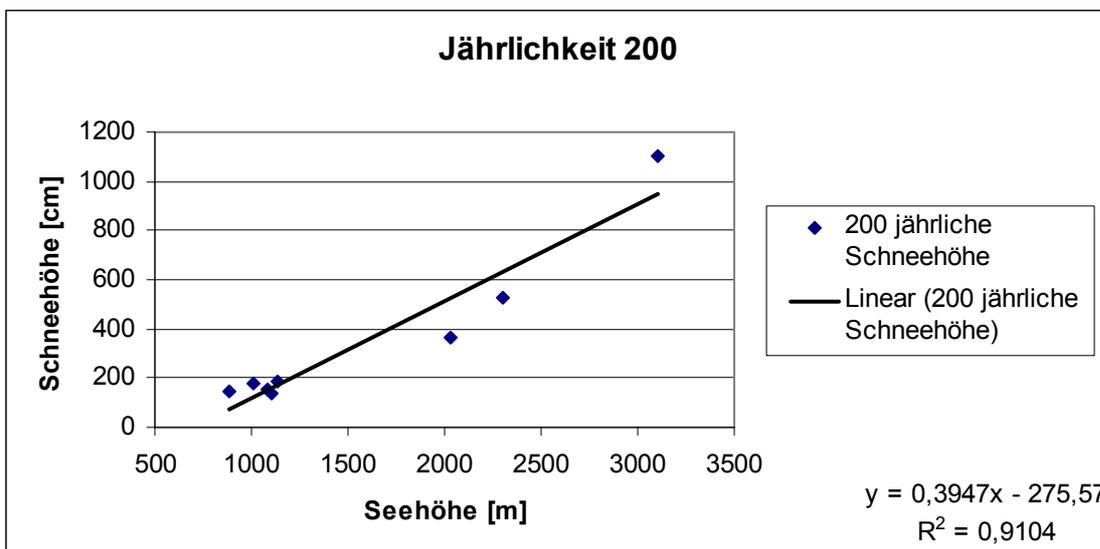


Abbildung 52: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 200

Aus den dargestellten Regressionen wurden die Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit für die Seehöhe 2000 m errechnet. Die Ergebnisse sind in der unten angeführten Tabelle dargestellt.

Jährlichkeit	Schneehöhe für 2000 m Seehöhe
10	350 cm
25	401cm
50	439 cm
100	476 cm
150	498 cm
200	514 cm

Tabelle 11: Schneehöhen in cm für bestimmte Jährlichkeiten auf 2000 m Seehöhe



### 7.1.5 Bestimmung des Flächenmittels der extremen Schneehöhe nach den Schweizer Richtlinien

Nach den Schweizer Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet wird für die entsprechenden Zonen mit folgenden maximalen mittleren Schneehöhen für die Jährlichkeit 100 ausgegangen:

Zone 1:	$\bar{H}_{ext} = 1,00 * (0,15 * Z - 20)$	Formel 53
Zone 2:	$\bar{H}_{ext} = 1,30 * (0,15 * Z - 20)$	Formel 54
Zone 3:	$\bar{H}_{ext} = 1,65 * (0,15 * Z - 20)$	Formel 55
Zone 4:	$\bar{H}_{ext} = 2,00 * (0,15 * Z - 20)$	Formel 56

Tabelle 12: Meereshöhenabhängigkeit des Flächenmittels der extremen Schneehöhen in Abhängigkeit von der Zone (aus BUWAL, 1990, S20)

$\bar{H}_{ext}$ :	Flächenmittel der extremen Schneehöhen in [cm]
Z:	Meereshöhe in [m.ü.M.]

Im Gebiet der Feuersanglawine wird von Zone 3 (inneralpiner Raum; Formel 55) ausgegangen.

$$\bar{H}_{ext} = 1,65 * (0,15 * 2000 - 20) = 462cm$$

Diese Schätzung stimmt mit der Auswertung der umliegenden Stationen sehr gut überein. Für die Jährlichkeit 100 wurde eine Schneehöhe von 476cm errechnet.

### 7.1.6 Quantifizierung des Restrisikos aufgrund zu großer Schneehöhe

Da für die Station Feuersang zu wenig Daten vorliegen wurde eine Auswertung nach der im Kapitel 5.1.2 Restrisiko beschriebenen Methode mit dem Datensatz der ZAMG-Station Badgastein versucht. Da aber im Untersuchungszeitraum keine Schneehöhen, die größer als das 100 jährliche Ereignis aufgezeichnet wurden konnte die Analyse nicht durchgeführt werden. Des Weiteren ist die Umrechnung der maximalen Schneehöhen von Badgastein auf das Verbauungsgebiet der Feuersanglawine durch den starken Windeinfluss mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.



## **7.2 Erstellung einer flächigen Schneemächtigkeitsverteilung für die Winter 2004 und 2005 mittels Geostatistik**

Die Erfassung der Schneehöhen erfolgt mittels Fernglas (10-fache Vergrößerung). Als Schneepegel dienen die vorhandenen Stahlschneebrücken. Wobei an den ausgewählten Punkten die Anzahl der aus der Schneedecke ragenden Querbalken auf halbe Balken genau abgezählt werden. Weiters wird die Schneemächtigkeit am Grat berücksichtigt. Im unverbauten Mittelbereich wird die Schneemächtigkeit anhand der Vegetation bzw. anhand von Gamsfährten geschätzt. Dieser Bereich ist meist offensichtlich abgeblasen. Wenn das Gebiet Überflogen wird erfolgt die Auswertung aufgrund von Fotos, die aus dem Hubschrauber gemacht werden. In diesem Fall kann das Aufnahmepunktenetz durch ansonsten nicht einsichtige Flächen ergänzt werden. Das Baufeld 3 kann nur so berücksichtigt werden, da es sonst nicht einsichtig ist.

Der Aufnahmestandpunkt 1 liegt am Grat des Hohen Stuhls in 2170 m Seehöhe und ermöglicht einen guten Überblick über den oberen Verbauungsbereich. Von dort werden 61 Punkte aufgenommen.

Der untere Verbauungsbereich ist leider nicht so gut einsichtig. Er wird durch Ablesungen vom BW 102-4 durch 36 Punkte erfasst. Da dieser Bereich von besonderer Bedeutung für die Einwehung ist wurde er im Winter 2005 genauer betrachtet als im Winter 2004. Das Punktenetz wurde hier um 20 weitere Punkt verdichtet. Von dort aus ist auch der Bereich unter dem Felsgrat einsichtig, der vom Aufnahmestandpunkt 1 nicht erfasst wird. Von dort aus ist auch der Bereich unter dem Felsgrat einsichtig, der vom Aufnahmestandpunkt 1 nicht erfasst wird.

### **7.2.1 Entwicklung der Schneemächtigkeit**

Die Entwicklung wurde durch 8 Aufnahmen im Zeitraum vom 03.01.2004 bis zum 11.05.2004 dokumentiert.

Bei den Aufnahmen im Jänner konnten trotz geringer Schneehöhen schon die ersten Einwehungsmuster beobachtet werden. Der unverbaute Mittelbereich war komplett abgeblasen. Im Haupteinwehungsbereich direkt nach der Geländekante wurden schon Schneemächtigkeiten bis 2 m festgestellt. Im Laufe des Jäners baute sich eine etwas stärkere Schneedecke auf. Die Einwehungen waren schon so stark, dass einige Bauwerke nach der Geländekante schon komplett verfüllt waren. Das



entspricht einer Schneemächtigkeit von 4 m. Der unverbaute Mittelbereich war abgeblasen. Im Laufe des März baute sich eine mächtigere Schneedecke auf, die im zweiten Drittel des März ihr Maximum erreichte. Zu dieser Zeit wurden lokale Schneemächtigkeiten von ca. 5 Metern in den Haupteinwehungsbereichen geschätzt. Da die Bauwerkshöhen in diesem Bereich 4,0 m betragen, konnte bei der Ablesung mittels Fernglas nur festgestellt werden, dass keine Balken aus dem Schnee ragen. Außer bei den Aufnahmen am 30.03.2004 war der unverbaute Mittelbereich fast immer vollständig abgeblasen war. An diesem Tag konnte eine Schneemächtigkeit von ca. 0,3 m geschätzt werden, da gerade ein Gams durch diesen Bereich zog. Mit Ende März begann die Schneedecke wieder an Mächtigkeit zu verlieren, die Verteilungsmuster blieben aber weitgehend die gleichen.

#### 7.2.1.1 Auswertung mit dem Programm Surfer

Bei der Datenauswertung wurde eine Anisotropie festgestellt, die der Einwehung in West – Ost Richtung entspricht. Bei der Kartenerstellung wurde die Methode des Ordinary Krigings verwendet. Dabei gingen Daten im Umkreis von 110 m pro Punkt in die Auswertung ein.

Die Auswertungen der flächigen Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 und vom 30.04.2004 sind im Folgenden dargestellt.

Alle Auswertungen sind im Anhang abgebildet.

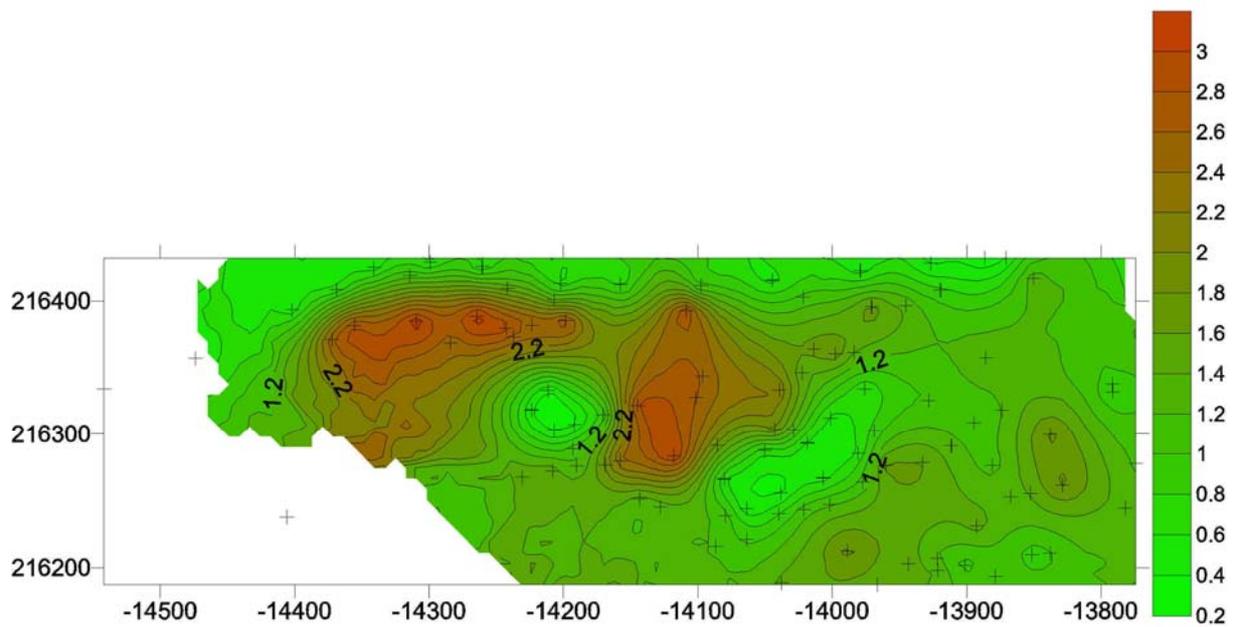
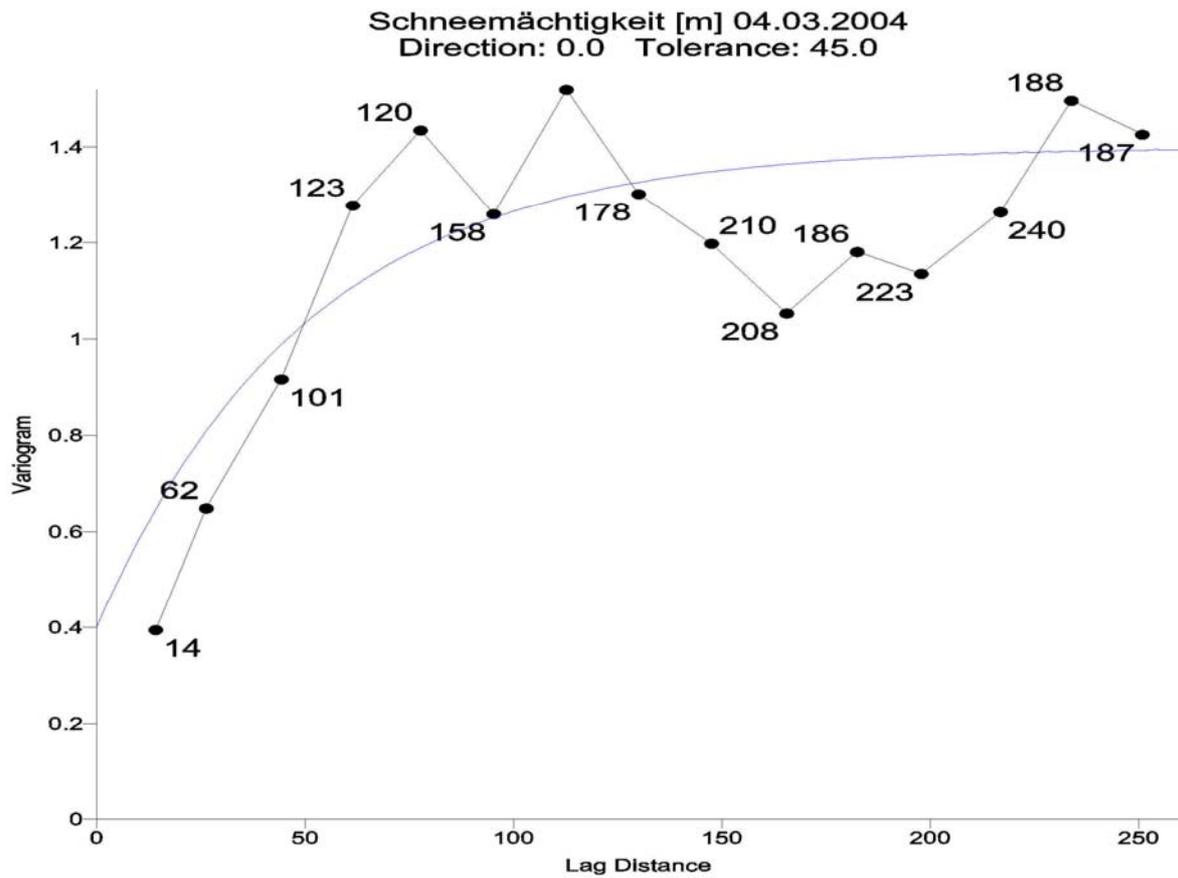


Abbildung 53: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm Surfer

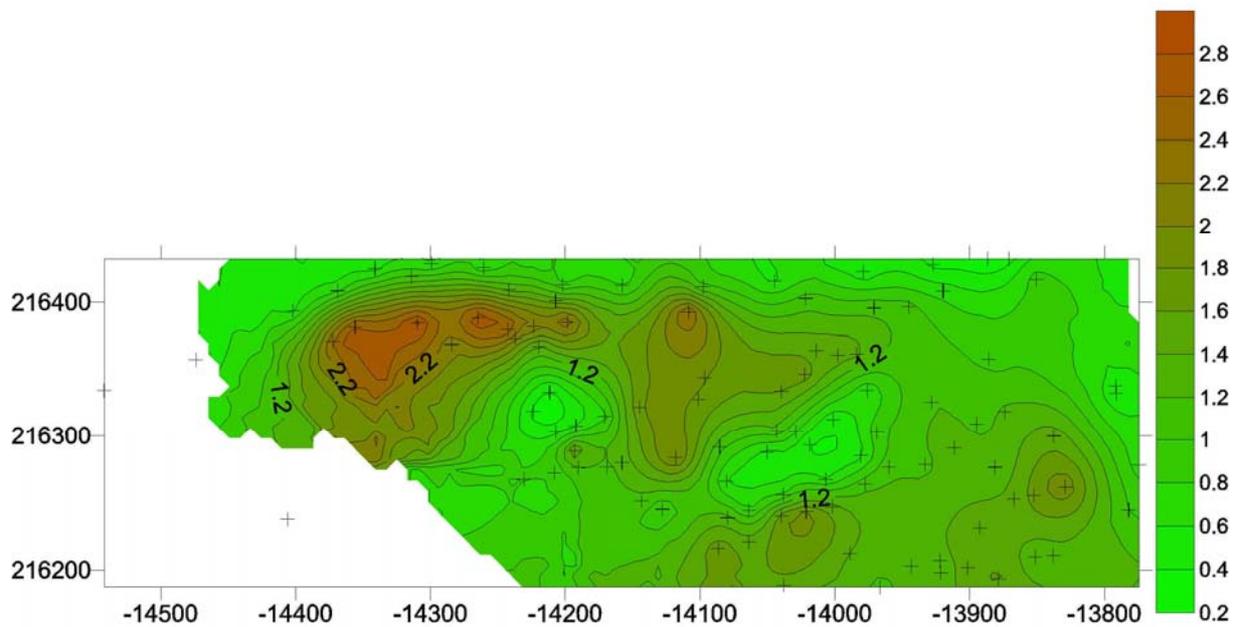
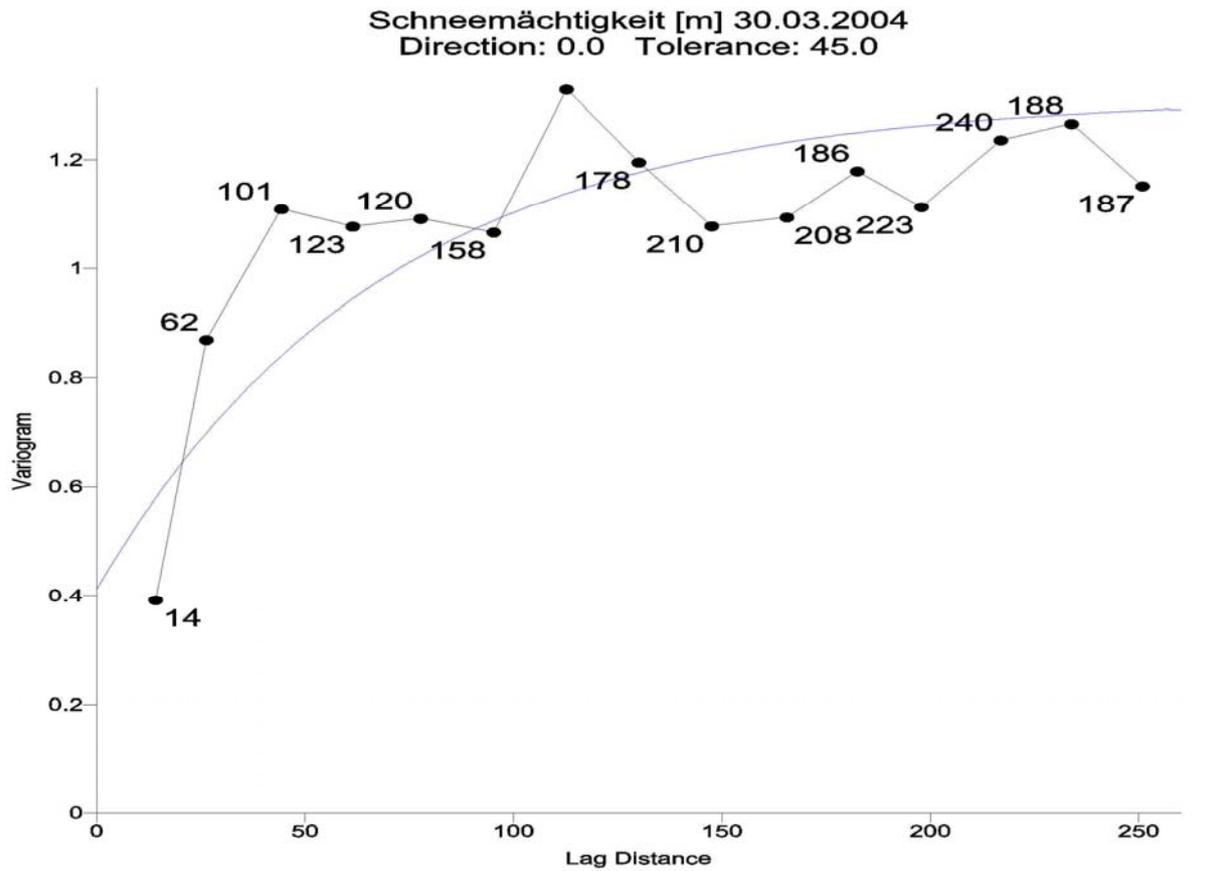


Abbildung 54: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm Surfer



## 7.2.1.2 Auswertung mit ArcGis Geostatistical Analyst:

Auch hier wurde eine Anisotropie in West – Ost Richtung festgestellt.

Die Auswertungen der flächigen Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 und vom 30.04.2004 sind im Folgenden dargestellt.

Alle Auswertungen sind im Anhang abgebildet.

## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004

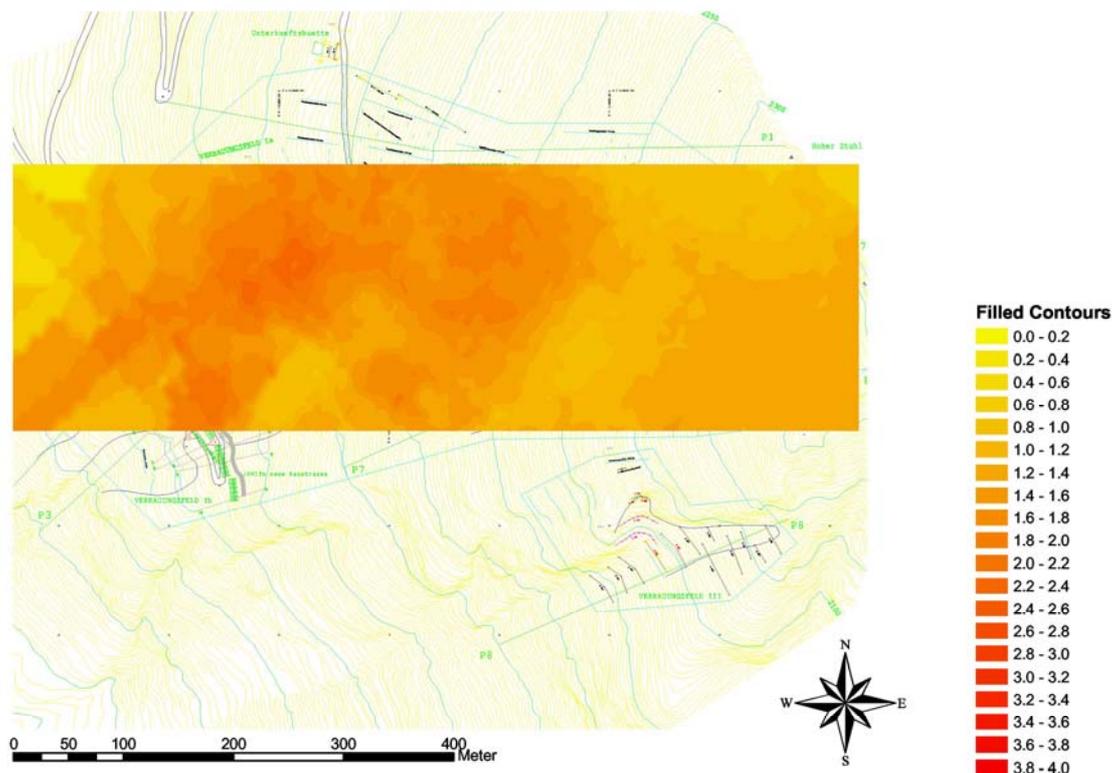


Abbildung 55: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004

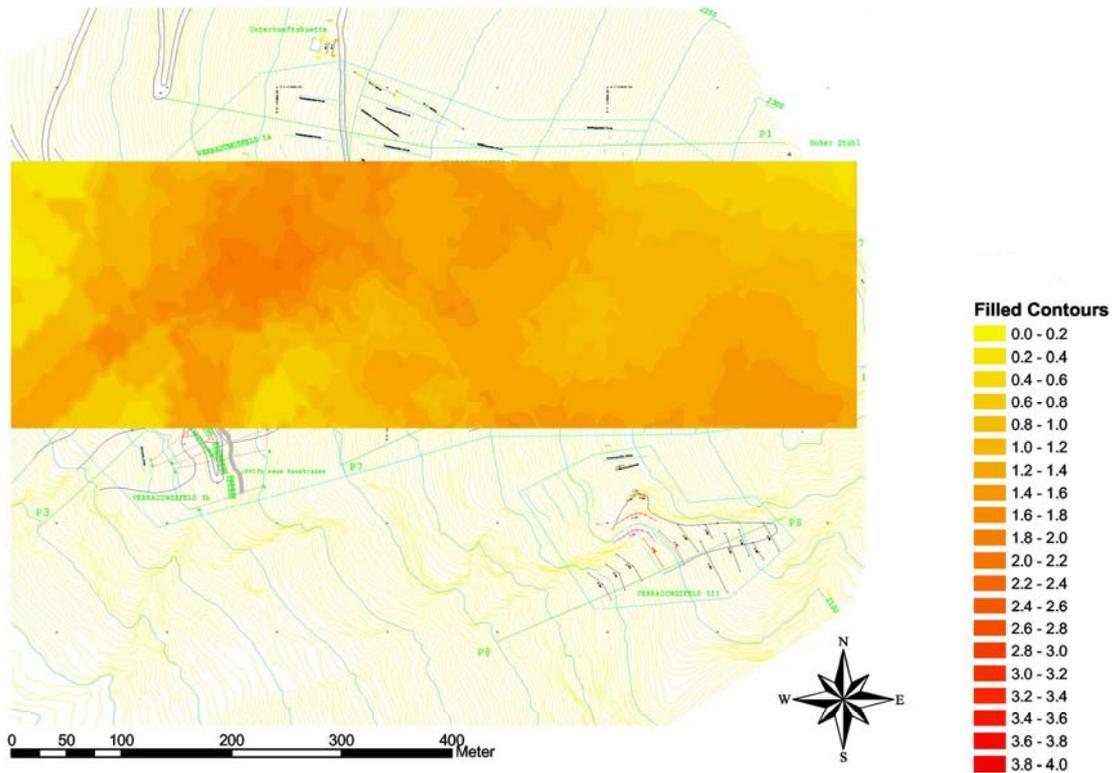


Abbildung 56: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



### 7.2.2 Geostatistische Auswertung des Baufeldes 3

Aufgrund der Lage des Baufeldes hinter einer Felsrippe ist es vom Hauptaufnahmegebiet aus nicht einsichtig. Das Baufeld 3 wurde am 17.03.2004 mit einem Helikopter überflogen. Dabei war zu sehen, dass eine kleine Lawine aus dem mit Schneenetzen verbauten Bereich abgegangen war. Die Mächtigkeit des abgerutschten Schnees betrug ca. 20 cm. Der Schnee wurde von den darunter liegenden Netzen aufgefangen, aber die Energie reichte aus um den Schnee unter dem Netz zum Abrutschen zu bringen. Dieser Bereich wurde im Sommer 2004 mit Stahlschneebrücken gesichert.



Abbildung 57: Lawinenabgang aus dem verbauten Bereich im Baufeld 3 (aufgenommen bei der Befliegung am 17.03.2004)



7.2.2.1 Auswertung mit dem Programm Surfer

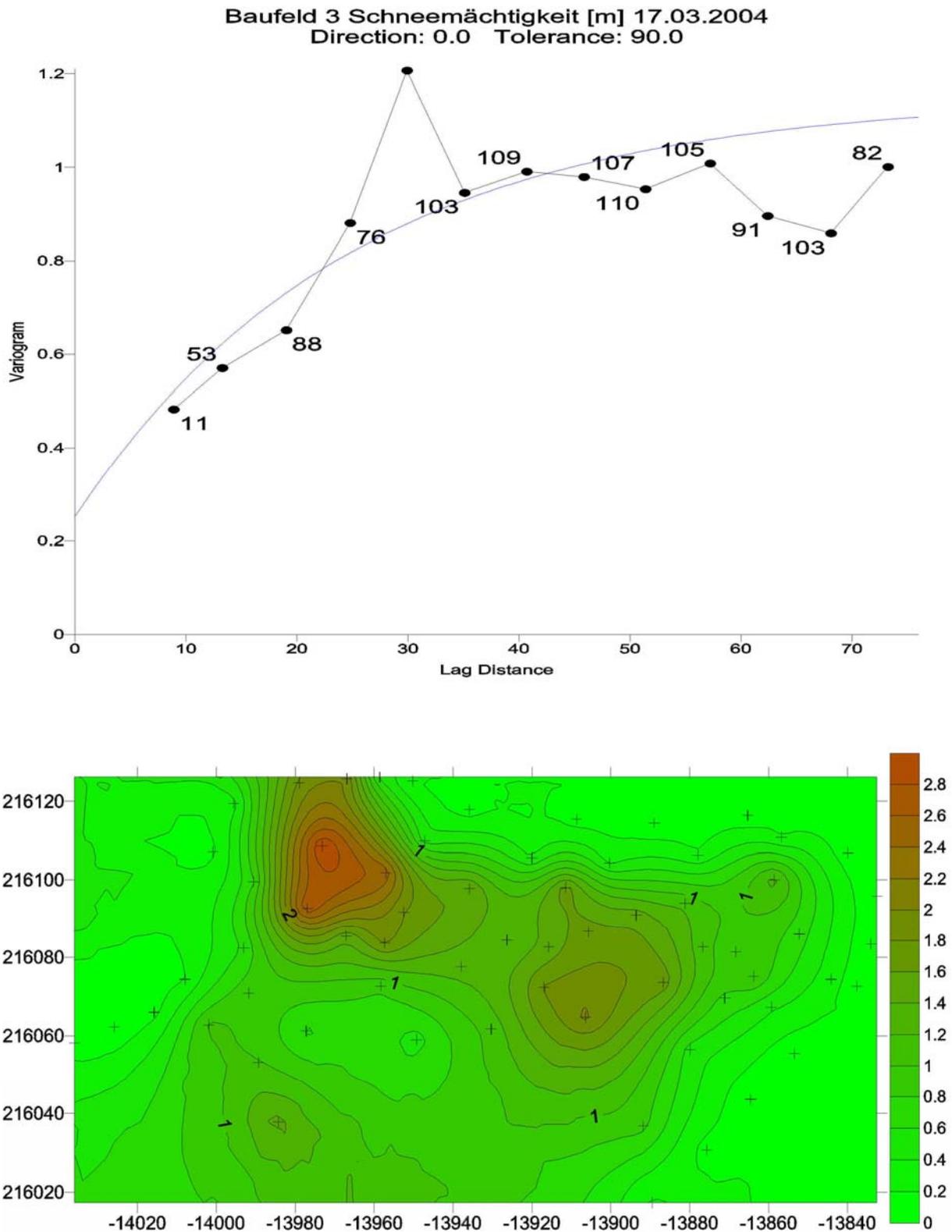


Abbildung 58: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer



## 7.2.2.2 Auswertung mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst

## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004

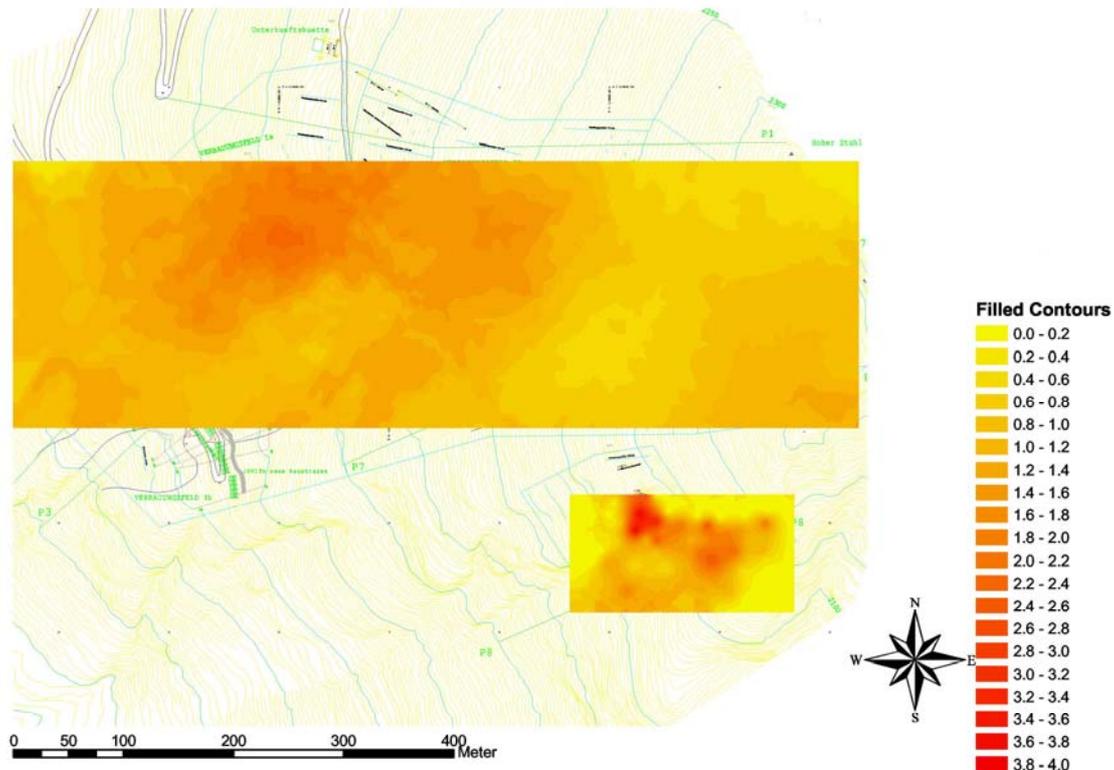


Abbildung 59: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst

### 7.2.3 Beziehung der Station Feuersang mit den Aufnahmepunkten

Aufgrund der wenigen vorliegenden Daten konnte nur für wenige Punkte ein statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen der Station Feuersang und den Aufnahmepunkten auf der Fläche gefunden werden. Die Winteraufnahmen zeigten aber eindeutige Muster der Schneeverteilung. Die absoluten Schneemächtigkeiten schwankten zwar über den Beobachtungszeitraum, aber die Verteilungsmuster waren immer sehr ähnlich.

Durch die Bildung von Gruppen und deren mittlere Schneemächtigkeit konnten erheblich bessere Zusammenhänge gefunden werden. Den Verteilungsmustern entsprechend wurden 6

Gruppen gebildet. Danach wurde das Gruppenmittel berechnet und ein Zusammenhang mittels linearer Regression zwischen dem Tagesmittelwert der Schneehöhe der Station Feuersang und den einzelnen Flächenmittelwerten



hergestellt. Zur Analyse wurden Szenarien mit verschiedenen Schneehöhen dargestellt. Für die unten dargestellten Szenarien wurden Schneehöhen der Station Feuersang von 0,5 m bis 2,0 m in 0,5 m Schritten verwendet.

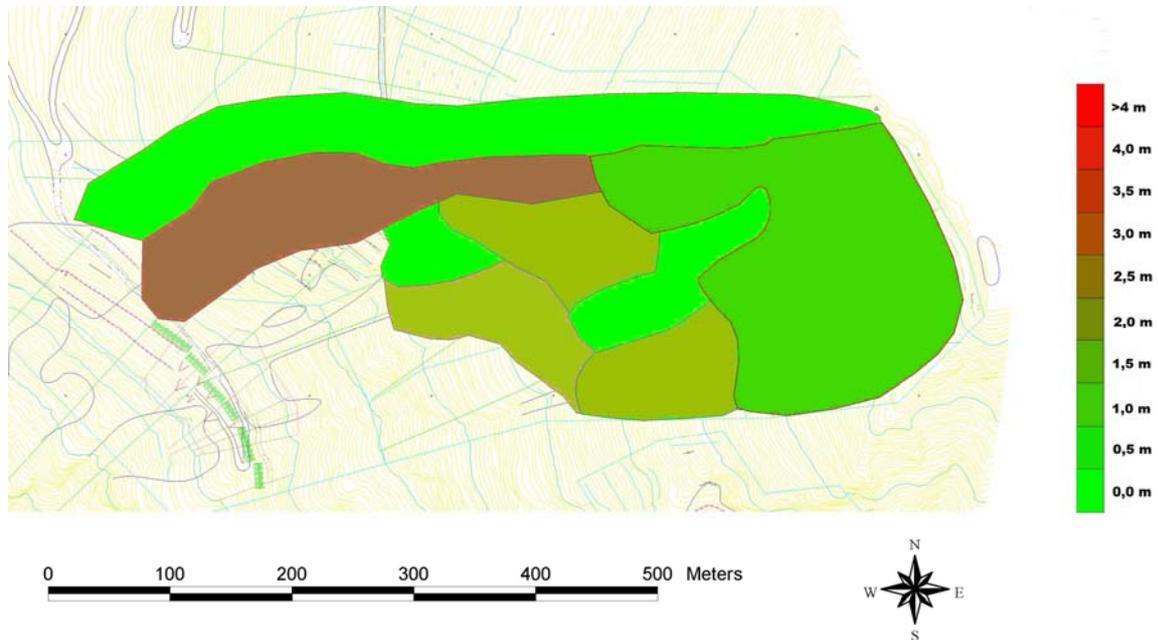


Abbildung 60: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 0,5 m

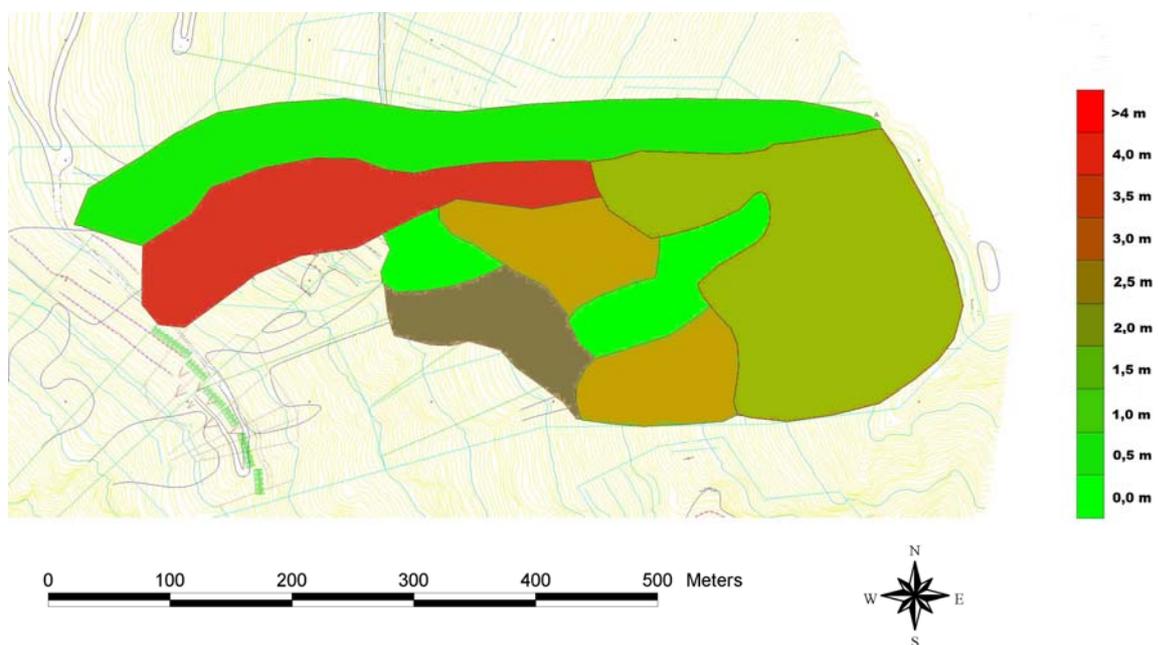


Abbildung 61: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 1,0 m

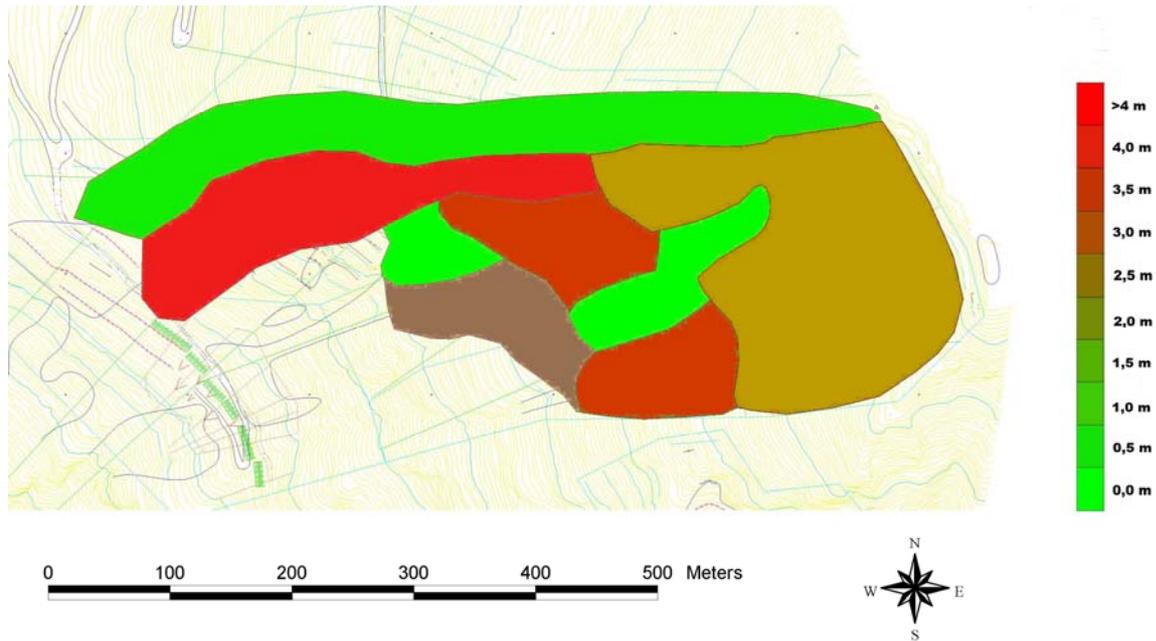


Abbildung 62: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 1,5 m

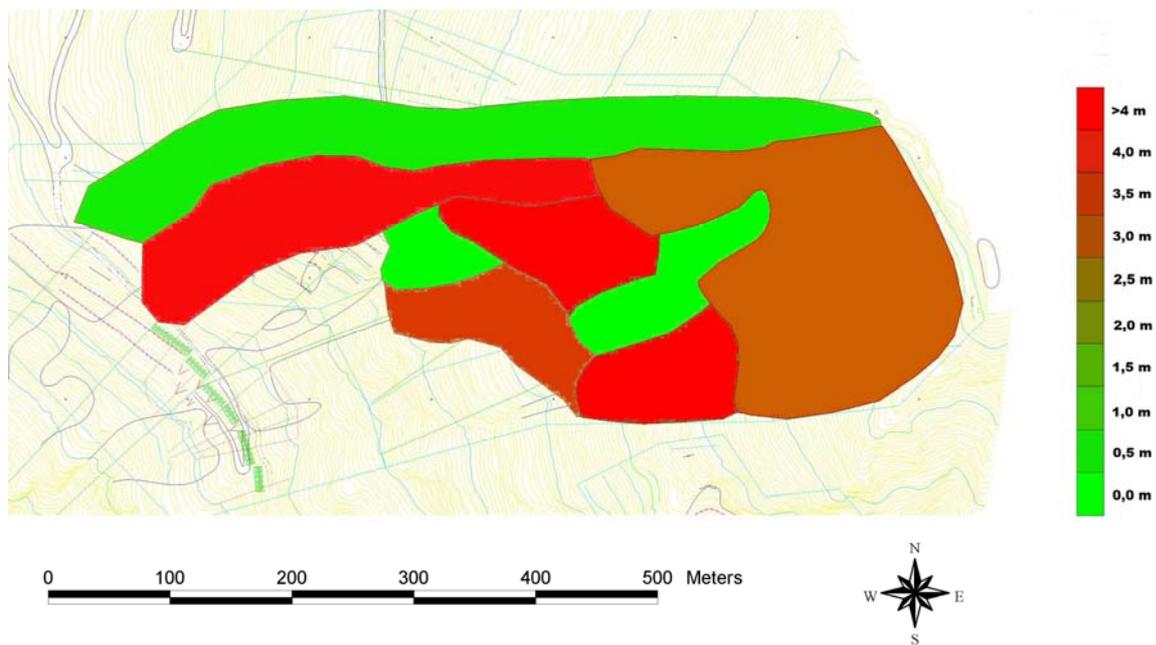


Abbildung 63: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 2,0 m



## 8 Interpretation der Ergebnisse

Bei den Winteraufnahmen im Jahr 2004 konnte festgestellt werden, dass das Verbauungsgebiet der Feuersaglawine sehr stark vom Wind beeinflusst ist, bzw. das Windfeld ist von der Form des Abbruchgebietes geprägt. Damit einhergehend sind die Schneeablagerung auf der Fläche sowie die Schneerosion im Gebiet. Die Analyse der Wetterdaten der Station Feuersang zeigt zwei vorherrschende Windrichtungen. Die Hauptwindrichtung kann mit Nord angegeben werden. Diese Windrichtung resultiert aus dem Relief des Tales sowie des Hohen Stuhls an dessen Rücken die Station Feuersang platziert ist. Die zweite vorherrschende Windrichtung ist der Südfohn, bei dem die größten Windgeschwindigkeiten auftreten.

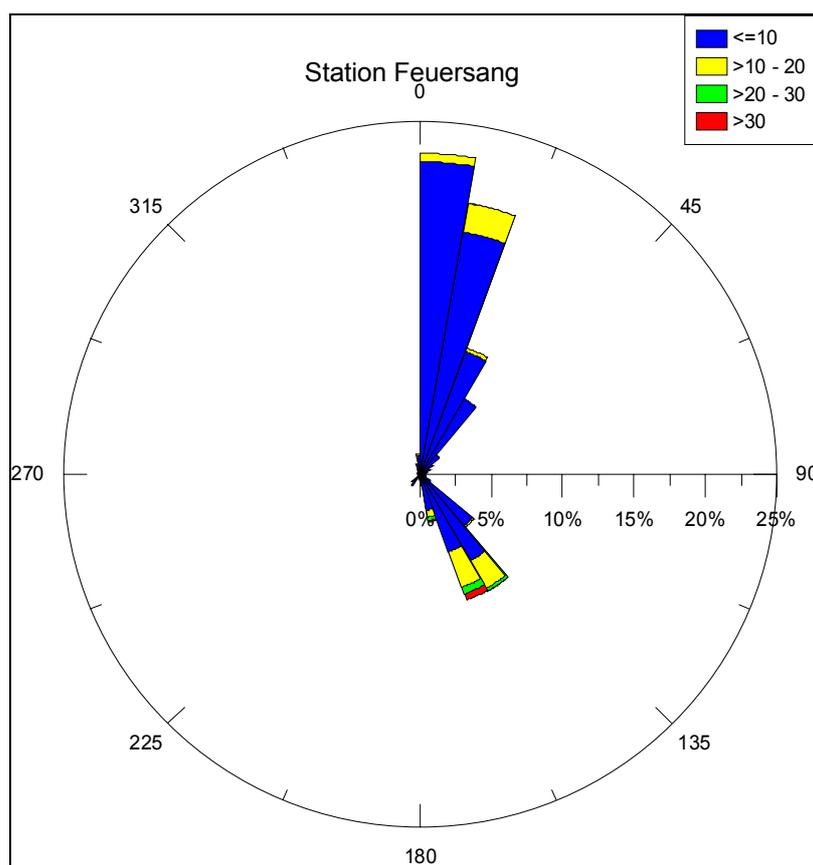


Abbildung 64: Auswertung der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten der Station Feuersang. Die verschiedenen Farben stellen die Windgeschwindigkeit in m/s dar. Die Auswertung basiert auf 10 Minuten Mittelwerte



Bei Wind aus dem Sektor Nord ist mit massiven Schneeverfrachtungen zu rechnen. (Auch eine Nord-West Wetterlage wirkt sich am Feuersang als Nordwind aus.) Die Bereiche der Schneeerosion sind dabei meist vollständig abgeblasen, während nach Geländekuppen sowie in Mulden starke Einwehungen beobachtet wurden. Die Verteilung des Schnees auf der Fläche lässt eindeutige Muster erkennen, die über den gesamten Beobachtungszeitraum sehr ähnlich waren. Die Absolutwerte der Schneehöhen schwanken selbstverständlich über den Winter, aber es sind immer die gleichen Bereiche, wo besonders viel oder besonders wenig Schnee abgelagert wird. Das bestätigen die Schneehöhenablotungen entlang der Profile und die flächige Auswertung der Schneemächtigkeit sehr gut.

Der Haupteinwehungsbereich ist in der untenstehenden Abbildung rot dargestellt. Dort wurden die größten Schneemächtigkeiten festgestellt. Der dunkelgrün dargestellte Kambereich war während des Beobachtungszeitraums immer komplett abgeblasen. Der unverbaute Mittelbereich (in der untenstehenden Abbildung hellgrün dargestellt) war während der Aufnahmen fast immer abgeblasen. Nur bei einer Aufnahme nach einem Schneefall wurde eine Schneemächtigkeit von 30 cm festgestellt. Im oberen Verbauungsbereich (violett) wurden keine extremen Schneemächtigkeiten vorgefunden. Der mittlere Bereich (blau) kann als Bereich mit moderaten Einwehungen interpretiert werden. Stärkere Einwehungen wurden im unteren Verbauungsbereich (orange) beobachtet. Durch die Muldenform und des im Norden angrenzenden felsdurchsetzten Geländes waren die Bauwerke teilweise komplett verfüllt.

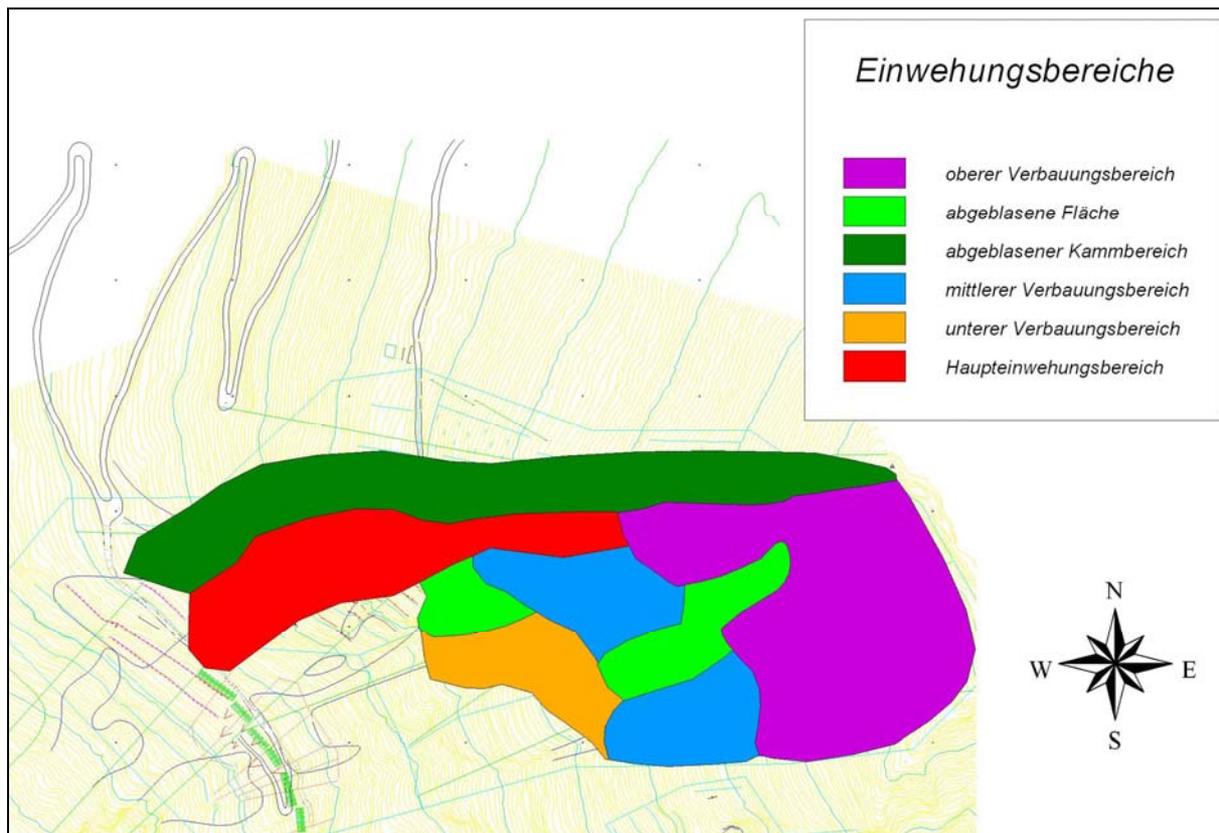


Abbildung 65: Übersicht der Einwehungs- und Erosionsbereiche

Die Windmessungen entlang der abgeloteten Profile zeigen den Zusammenhang zwischen dem Relief und der mittleren Windgeschwindigkeit sehr anschaulich. In Bereiche mit hohen Windgeschwindigkeiten ist die Schneedecke erodiert, wo hingegen geringere Windgeschwindigkeiten vorgefunden wurden lagert sich der Schnee ab. Die Auswertungen der Windrichtungen zeigen wie das Windfeld vom Relief geformt wird.

Bei der zweiten vorherrschenden Windsituation, dem Südfohn, wird Schnee aus Teilbereichen des Verbauungsgebietes ausgeblasen. Die Mengen sind meist gering, da der eingewehte Schnee durch den Wind sehr stark verfestigt ist und oft als Windharsch in Erscheinung tritt.

Die Windmessungen über die Höhe im mit Stahlschneebrücken gesicherten Bereich und der Vergleich mit der Freifläche zeigen den Einfluss der Verbauungen auf das Windfeld sehr anschaulich. Im Verbauten Bereich wurden geringere Windgeschwindigkeiten gemessen als auf der Freifläche daneben. Die Stahlschneebrücken wirken wie ein Verwehungsverbau und bewirken zusätzliche Schneeablagerungen.



Solange Schneefall mit Wind stattfindet, wie es meist der Fall ist lässt sich die Verteilung der Schneemächtigkeit auf der Fläche prognostizieren. Schneit es jedoch ohne Wind, was eine gleichmäßige Verteilung des Schnees auf der Fläche zufolge hat, wird die Situation im Falle einer Vorverfüllung der Stahlschneebrücken besonders kritisch. In den Haupteinwehungsbereichen, wo schon bei geringen mittleren Schneehöhen auf der Fläche komplett verfüllte Teile des Stützverbaus beobachtet wurden, ist dann mit einer Überschneidung dieser Bauwerke zu rechnen, was Lawinenabgänge aus dem verbauten Bereich zu Folge haben kann. Bei dieser Wettersituation ist auch im Besonderen der unverbauten Mittelbereich zu beobachten, von dem auch Lawinen abgehen können. Aufgrund der kurzen und teilweise auch lückenhaften Aufzeichnungen der Wetterstation Feuersang (der Mast mit der Windmess- und Sendeeinheit wurde bei einem Sturm im Jahr 2003 abgeschert und danach verstärkt wieder aufgestellt) lassen sich keine konkreten Wahrscheinlichkeiten für die oben beschriebenen Fälle berechnen, dennoch sind genau diese Situationen besonders zu beachten.



## 9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit umfasst alle Punkte des Modul I des Projektes ‚Sicherheitsstudie Feuersanglawine‘, das von der ÖBB an das Institut für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien in Auftrag gegeben wurde. Die Feuersanglawine wird seit der Eröffnung der Mallnitz Tauernschleuse intensiv durch Lawinenschutzmaßnahmen gesichert. Ziel der Sicherheitsstudie Feuersanglawine ist es, den erreichten Sicherheitsgrad zu quantifizieren und ein Entscheidungsmodell zur Unterstützung der Verantwortlichen in Lawinengefahrensituationen, zu entwickeln. Die Beurteilung des erreichten Sicherheitsgrades ist aus der Sicht der ÖBB interessant, da trotz des hohen technischen Aufwandes durch die Exponiertheit und Muldenform des Abbruchgebietes die Möglichkeit gegeben ist, dass Teile der Verbauung durch zusätzliche Schneesverwehungen an Wirksamkeit verlieren. Das Modul I zeigt auf, welche Bereiche davon im Besonderen betroffen sind. Dadurch kann gezeigt werden, wann die Situation kritisch wird und welche Flächen in der Gefahrensituation besonders zu beobachten sind, um gegebenenfalls rechtzeitig und effizient temporäre Maßnahmen in die Wege zu leiten. Um diese Fragen beantworten zu können wurden im Winter 2004 und 2005 Schneehöhenablotungen entlang von Profilen durchgeführt, die den Schneerosions- sowie den Schneeakkumulationsbereich erfassen. Des Weiteren wurden Windmessungen entlang dieser Profile, sowie Höhenprofile der Windgeschwindigkeit im durch Stahlschneebrücken gesicherten Bereich und auf der Freifläche vorgenommen. Die flächige Verteilung der Schneemächtigkeit und deren Entwicklung über den Winter wurden geostatistisch ausgewertet. Zur Auswertung der flächigen Schneemächtigkeiten kamen die Computerprogramme ArcGis Geostatistical Analyst sowie das Programm Surfer 8.0 zum Einsatz. Interessanterweise konnten in den Wintern sich wiederholende Schneeverteilungsmuster beobachtet werden. Diese Verteilungsmuster spiegeln sich auch in den Auswertungen der Windmessungen wieder. Zur Dokumentation der Entwicklung in der Schneedecke wurden Schneeprofile in verschiedenen Expositionen gegraben.



## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Aufnahmegebietes (Kartenausschnitt aus Amap 3D, Bundesamt für Eich und Vermessungswesen) .....	8
Abbildung 2: Foto des Aufnahmegebietes .....	9
Abbildung 3: Übersicht der Teilflächen.....	10
Abbildung 4: Station Feuersang: Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung.....	12
Abbildung 5: Station Feuersang: Messung von Niederschlag und Schneehöhe .....	12
Abbildung 6: Geländemodell Feuersang .....	14
Abbildung 7: Ein mögliches Zielsystem zur Beurteilung von Lawinenschutzprojekten (aus Wilhelm, C. 1997, S 118) .....	16
Abbildung 8: Modell zur analytischen Beurteilung von Lawinenschutzmaßnahmen (aus Wilhelm, C. 1997, S 123) .....	18
Abbildung 9: Darstellung zur Erklärung der Begriffe (aus Waldow 1998 nach England and Sparks 1988).....	32
Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Semivariogramms (modifiziert nach Waldow 1998) .....	35
Abbildung 11: Messkopf (aus Gill user manual).....	39
Abbildung 12: Schematische Darstellung des Messkopfes (aus Gill user manual) .....	39
Abbildung 13: Funktionsprinzip der Ultraschallmessung (aus Gill user manual Seite 5) .....	40
Abbildung 14: Übersicht der Winteraufnahmen 2004 mit eingezeichneter Lage der Profile ..	41
Abbildung 15: Übersicht der Winteraufnahmen 2005 mit eingezeichneter Lage der Profile und Aufnahmepunkte .....	42
Abbildung 16: Schneehöhenablotung Profil 1 am 03.01.2004, 24.01.2004, 02.02.2004 und am 20.02.2004 .....	44
Abbildung 17: Schneehöhenablotung Profil 1 am 04.03.2004, 30.03.2004, 20.04.2004 und am 11.05.2004 .....	44
Abbildung 18: Schneehöhenablotung Profil 2 am 07.02.2005, 13.03.2005, 22.04.2005 .....	45
Abbildung 19: Der Einwehungsbereich von Profil 1 nach oben betrachtet .....	45
Abbildung 20: Schneehöhenablotung Profil 2 am 03.01.2004, 24.01.2004, 02.02.2004 und am 20.02.2004 .....	46
Abbildung 21: Schneehöhenablotung Profil 2 am 04.03.2004, 30.03.2004, 20.04.2004 und am 11.05.2004 .....	47
Abbildung 22: Schneehöhenablotung Profil 2 am 07.02.2005, 13.03.2005, 22.04.2005 .....	47
Abbildung 23: Blick vom Ende des Profils 2 hinunter zum Bahnhof Böckstein am 20.04.2004 .....	48
Abbildung 24: Messen der Windgeschwindigkeit am Profil 2 Punkt 5 .....	49
Abbildung 25: Messen des Windprofiles in 2 m Höhe auf der Freifläche (Kopf um 90° geneigt) .....	49



Abbildung 26: Windsituation am 24.01.2004 mit Schneehöhenablotung entlang Profil 2 .....	50
Abbildung 27: Schneehöhenablotung mit Windmessung Profil 1 vom 22.04.2005 .....	50
Abbildung 28: Schneehöhenablotung mit Windmessung Profil 2 vom 22.04.2005 .....	51
Abbildung 29: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 24. 01. 2004 .....	52
Abbildung 30: Auswertung der Windrichtungsverteilung und Windgeschwindigkeit vom 22.04.2005 aus 6 Minuten langen Messungen .....	52
Abbildung 31: Veränderung des Windfeldes durch das Relief (aus Font i Coveny 1999, S 20; modifiziert nach Naaim and Brugnot, 1992) .....	53
Abbildung 32: Schneeverfrachtung bei Südföhn. (Windgeschwindigkeit ca. 20 m/s mit Böhen bis ca. 30 m/s) am 17.01.2004 .....	54
Abbildung 33: Windsituation am 20.02.2004 mit Schneehöhenablotung entlang Profil 2 .....	54
Abbildung 34: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 20.02. 2004 .....	55
Abbildung 35: Vergleich des Windfeldes auf der Freifläche mit dem Windfeld im Stützverbau am 03.02.2004 (3 min Mittelwerte) .....	56
Abbildung 36: Vergleich des Windfeldes im Stützverbau mit der Freifläche vom 22.04.2005 (aus 5 Minuten Mittelwerten) .....	57
Abbildung 37: Hangparallele Ansicht einer Stahlschneebrücke des Typs D = 4,0 m (modifiziert nach Rothuber 1995) .....	58
Abbildung 38: Einfluss des Füllungsgrades auf die Ablagerungsform (modifiziert nach Vögeli, 1996). Zaun mit 20 cm Bodenspalt. Der Füllungsgrad beinhaltet den Bodenspalt. ....	58
Abbildung 39: Schneeprofil 1 vom 24.01.2004 .....	61
Abbildung 40: Schneeprofil 1 vom 11.05.2004 .....	63
Abbildung 41: Schneeprofil 2 vom 24.01.2004 .....	65
Abbildung 42: Schneeprofil 2 vom 11.05.2004 .....	66
Abbildung 43: Häufigkeit der maximalen jährlichen Schneehöhen .....	67
Abbildung 44: Zusammenhang der Schneehöhen der Wetterstationen Badgastein und Feuersang .....	70
Abbildung 45: Zusammenhang der Schneehöhen der Wetterstationen Badgastein und Thomaseck .....	71
Abbildung 46: Abhängigkeit der mittleren maximalen jährlichen Schneehöhe von der Seehöhe .....	75
Abbildung 47: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 10 .....	76
Abbildung 48: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 25 .....	76
Abbildung 49: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 50 .....	77
Abbildung 50: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 100 .....	77
Abbildung 51: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 150 .....	78
Abbildung 52: Abhängigkeit der Schneehöhe von der Seehöhe für die Jährlichkeit 200 .....	78
Abbildung 53: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm Surfer .....	82



Abbildung 54: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	83
Abbildung 55: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	84
Abbildung 56: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	85
Abbildung 57: Lawinenabgang aus dem verbauten Bereich im Baufeld 3 (aufgenommen bei der Befliegung am 17.03.2004).....	86
Abbildung 58: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	87
Abbildung 59: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	88
Abbildung 60: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 0,5 m .....	89
Abbildung 61: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 1,0 m .....	89
Abbildung 62: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 1,5 m .....	90
Abbildung 63: Flächige Schneemächtigkeitsverteilung für Schneehöhe Station Feuersang = 2,0 m .....	90
Abbildung 64: Auswertung der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten der Station Feuersang. Die verschiedenen Farben stellen die Windgeschwindigkeit in m/s dar. Die Auswertung basiert auf 10 Minuten Mittelwerte.....	91
Abbildung 65: Übersicht der Einwehungs- und Erosionsbereiche .....	93
Abbildung 66: Ablotung Profil 1 am 03.01.2004 .....	106
Abbildung 67: Ablotung Profil 1 am 24.01.2004 .....	107
Abbildung 68: Ablotung Profil 1 am 02.02.2004 .....	108
Abbildung 69: Ablotung Profil 1 am 20.02.2004 .....	108
Abbildung 70: Ablotung Profil 1 am 04.03.2004 .....	109
Abbildung 71: Ablotung Profil 1 am 30.03.2004 .....	109
Abbildung 72: Ablotung Profil 1 am 20.04.2004 .....	110
Abbildung 73: Ablotung Profil 1 am 11.05.2004 .....	110
Abbildung 74: Ablotung Profil 2 am 03.01.2004 .....	111
Abbildung 75: Ablotung Profil 2 am 24.01.2004 .....	111
Abbildung 76: Ablotung Profil 2 am 02.02.2004 .....	112
Abbildung 77: Ablotung Profil 2 am 20.02.2004 .....	112
Abbildung 78: Ablotung Profil 2 am 04.03.2004 .....	113
Abbildung 79: Ablotung Profil 2 am 30.03.2004 .....	113
Abbildung 80: Ablotung Profil 2 am 20.04.2004 .....	114
Abbildung 81: Ablotung Profil 2 am 11.05.2004 .....	114
Abbildung 82: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 24. 01. 2004 .....	116



Abbildung 83: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 03. 02. 2004 .....	117
Abbildung 84: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 20. 02. 2004 .....	118
Abbildung 85: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 04. 03. 2004 .....	119
Abbildung 86: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 24.01.2004 mit dem Programm Surfer.....	120
Abbildung 87: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 02.02.2004 mit dem Programm Surfer.....	121
Abbildung 88: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.02.2004 mit dem Programm Surfer.....	122
Abbildung 89: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	123
Abbildung 90: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	124
Abbildung 91: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	125
Abbildung 92: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.04.2004 mit dem Programm Surfer. Anmerkung: Obersten 30 Punkte wegen Nebel nicht einsehbar. ....	126
Abbildung 93: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 11.05.2004 mit dem Programm Surfer.....	127
Abbildung 94: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer.....	128
Abbildung 95: Schneemächtigkeit in Meter vom 07.02.2005 .....	129
Abbildung 96: Schneemächtigkeit in Meter vom 13.03.2005 .....	130
Abbildung 97: Schneemächtigkeit in Meter vom 21.03.2005 .....	131
Abbildung 98: Schneemächtigkeit in Meter vom 22.04.2005 .....	132
Abbildung 99: Schneemächtigkeit in Meter vom 07.02.2005 Baufeld 3 .....	133
Abbildung 100: Schneemächtigkeit in Meter vom 21.03.2005 Baufeld 3 .....	134
Abbildung 101: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 24.01.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	136
Abbildung 102: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 02.02.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	137
Abbildung 103: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.02.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	138
Abbildung 104: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	139
Abbildung 105: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	140
Abbildung 106: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	141
Abbildung 107: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.04.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	142



Abbildung 108: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 11.05.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst .....	143
Abbildung 109: Schneeprofil 1 vom 03.01.2004.....	145
Abbildung 110: Schneeprofil 1 vom 24.01.2004.....	146
Abbildung 111: Schneeprofil 1 vom 02.02.2004.....	147
Abbildung 112: Schneeprofil 1 vom 04.03.2004.....	148
Abbildung 113: Schneeprofil 1 vom 30.03.2004.....	149
Abbildung 114: Schneeprofil 1 vom 20.04.2004.....	150
Abbildung 115: Schneeprofil 1 vom 11.05.2004.....	151
Abbildung 116: Schneeprofil 1 vom 23.04.2005.....	152
Abbildung 117: Schneeprofil 2 vom 03.01.2004.....	154
Abbildung 118: Schneeprofil 2 vom 24.01.2004.....	155
Abbildung 119: Schneeprofil 2 vom 02.02.2004.....	157
Abbildung 120: Schneeprofil 2 vom 05.03.2004.....	158
Abbildung 121: Schneeprofil 2 vom 30.03.2004.....	159
Abbildung 122: Schneeprofil 2 vom 20.04.2004.....	163
Abbildung 123: Schneeprofil 2 vom 11.05.2004.....	164
Abbildung 124: Schneeprofil 2 vom 23.04.2005.....	165



## 10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Stationen und deren Seehöhe aus dem Hydrographischen Jahrbuch .....	13
Tabelle 2: t-Werte für verschiedene Vertrauensbereiche .....	29
Tabelle 3 : Klasseneinteilung der maximalen jährlichen Schneehöhen .....	67
Tabelle 4: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit.....	69
Tabelle 5: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit nach der Regressionsmethode .....	69
Tabelle 6: Ermittlung von Schneehöhen bestimmter Jährlichkeit nach der Momentenmethode .....	70
Tabelle 7: Übersicht der Stationen und deren Seehöhe aus dem Hydrographischen Jahrbuch .....	72
Tabelle 8: Maximale jährliche Schneehöhen in cm der umliegenden Klimastationen aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1951 bis 2001 Teil1.....	73
Tabelle 9: Maximale jährliche Schneehöhen in cm der umliegenden Klimastationen aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1951 bis 2001 Teil 2.....	74
Tabelle 10: Schneehöhen in cm für bestimmte Jährlichkeiten .....	75
Tabelle 11: Schneehöhen in cm für bestimmte Jährlichkeiten auf 2000 m Seehöhe.....	78
Tabelle 12: Meereshöhenabhängigkeit des Flächenmittels der extremen Schneehöhen in Abhängigkeit von der Zone (aus BUWAL, 1990, S20).....	79



### 10.3 Literaturverzeichnis

- Armstrong, M. (1998): Basic Linear Geostatistics; Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Bauer, F. K. et al. (1980): Der geologische Aufbau Österreichs; Herausgegeben von der Geologischen Bundesanstalt; Springer-Verlag, Wien
- BUWAL, WLS (1990): Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet; Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), Bern
- Dumfarth, E. & Lorup, E. (1999): Geostatistik I: Theorie und Praxis (WS 99/00), Studienunterlagen Universität Salzburg; <http://www.geo.sbg.ac.at/staff/lorup/lv/geostats2000/>, vom 20.05.2004
- Durand, Y., et al. (2001): Numerical experiments of wind transport over a mountainous instrumented site; I. Regional Scale; Annals of Glaciology 32
- Font i Coveny, D. (1999): Drifting Snow: Processes and Effects on the Snow Cover; Dissertation an der Universität von Barcelona am Departament de Geodinàmica I Geofísica
- Gabl, K.; Lackinger, B.; et al. (1996): Lawinenhandbuch; Tyrolia Verlag, Innsbruck
- Gill, Wind Sonic (2003): User Manual, issue 08, 2003
- Granig, M. (2003): Snowdrift around avalanche defence structures – Physical modelling in a wind channel; Diplomarbeit am Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur Wien



- Gubler, H. (1995): Risikoanalyse und Sicherheitsplanung ÖBB-Ausbaustrasse Bockstein; im Auftrag der Österreichischen Bundesbahnen Generaldirektion Bau- und E-Technik
- Hakonardottir K., et al. (2001): A laboratory study of the retarding effect of breaking mounds in 3, 6 and 9 m long chutes;
- Hydrographischer Dienst (1953 bis 2003): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich für die Jahre 1951 bis 2001; Hydrographisches Zentralbüro im Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- Isaaks. E.H.; Srivastava, R.M. (1989): An Introduction to Applied Geostatistics; Oxford University Press, Inc, New York
- Iversen, J.D. (1981): Drifting Snow Similitude – Drift – Deposit Rate Correlation; Iowa State University, Ames, Iowa
- Krainer, K.(1994): Die Geologie der Hohen Tauern; Universitätsverlag Carinthia, Klagenfurt
- Looser, R. (2003): Statistische Messdatenauswertung; Franzis Verlag GmbH, 85586 Poing
- McClung, D.; Schaerer, P. (1993): The Avalanche Handbook; The Mountaineers, Seattle
- Mellor, M. (1965): Blowing Snow; Cold Regions Science and Engineering Part III, Section A3c; Hanover, New Hampshire
- Nachtnebel, H.P.(2003): Hydrologie Studienblätter WS2003/04; Studienunterlagen Institut für Wasserwirtschaft und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien



- Pichler, A. (2002): Alpine Naturgefahrenkunde Übungen WS2002/03; Studienunterlagen Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
- Pomeroy, J. W. (1990): Saltation of Snow; Water Resources Research, Vol. 26, No 7, Pages 1583 – 1594
- Rachoy, C. (2001): Tauernautobahn-Lawinenschutz, Gefahren im Alpenen Raum; Österreichischen Bundesbahnen Geschäftsbereich Fahrweg Wildbach und Lawinenschutz
- Rothuber, K. (1994): Auffangdamm Feuersanglawine; im Auftrag der Österreichischen Bundesbahnen Geschäftsbereich Fahrweg – Regionalleitung Villach
- Rothuber, K. (1995): Integrales Verbauungsprojekt Feuersanglawine – Böckstein, Überarbeitung 1997; im Auftrag der Österreichischen Bundesbahnen Geschäftsbereich Fahrweg – Regionalleitung Villach
- Schafmeister, M.-Th. (1999): Geostatistik für die hydrogeologische Praxis; Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Thordarson, S. (2002): Wind Tunnel Experiments and Numerical Simulation of Snow Drifting around an Avalanche Protection Dam; Environmental Fluid Mechanics 2, 265-289; Kluwer Academic Publishers. Netherlands
- Vögeli, T. P. (1996): Erkenntnisse aus Freilandmodellversuchen für den Einsatz von Tribschneezäunen im Gebirge; vdf Hochschulverlag AG, Zürich
- Waldow v., H. (1998): Einführung in die Geostatistik; <http://www.geog.fu-berlin.de/~jkrywkwow/harald/geostatistik/>, vom 20.05.2004
- Wilhelm, C. (1997): Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen mittels quantitativer



Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung; Mitt. Eidgenöss. Inst.  
Schnee. Lawinenforsch. 54

Wilhelm, C. (1997): Zur Entwicklung des Lawinenrisikos in der Schweiz; Beitrag zum  
Tagungsband zum Symposium: „Risikobewertung und  
Naturraumprävention von Wildbächen und Lawineneinzugsgebiete,  
S112-127; Universität für Bodenkultur Wien

ZAMG-Salzburg (2004): Wetterdaten der meteorologischen Station Badgastein;  
Bearbeiter Alexander Ohms



## 11 Anhang

### 11.1 Schneehöhenablotungen

#### 11.1.1 Schneehöhenablotung entlang Profil 1

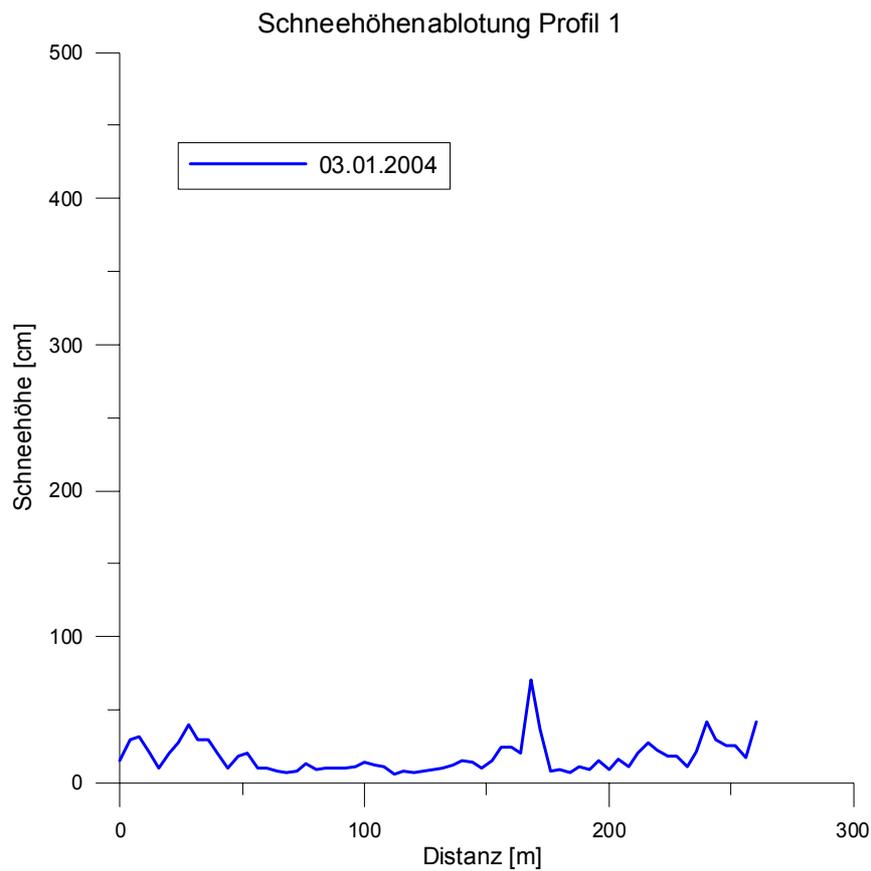


Abbildung 66: Ablotung Profil 1 am 03.01.2004

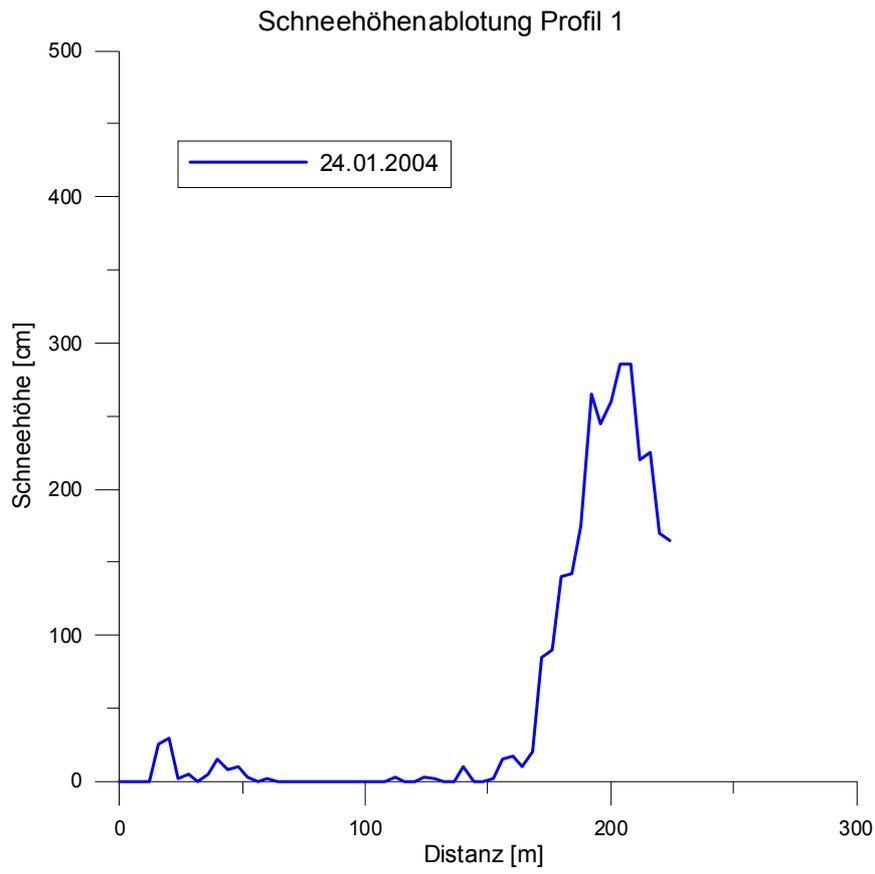


Abbildung 67: Ablotung Profil 1 am 24.01.2004

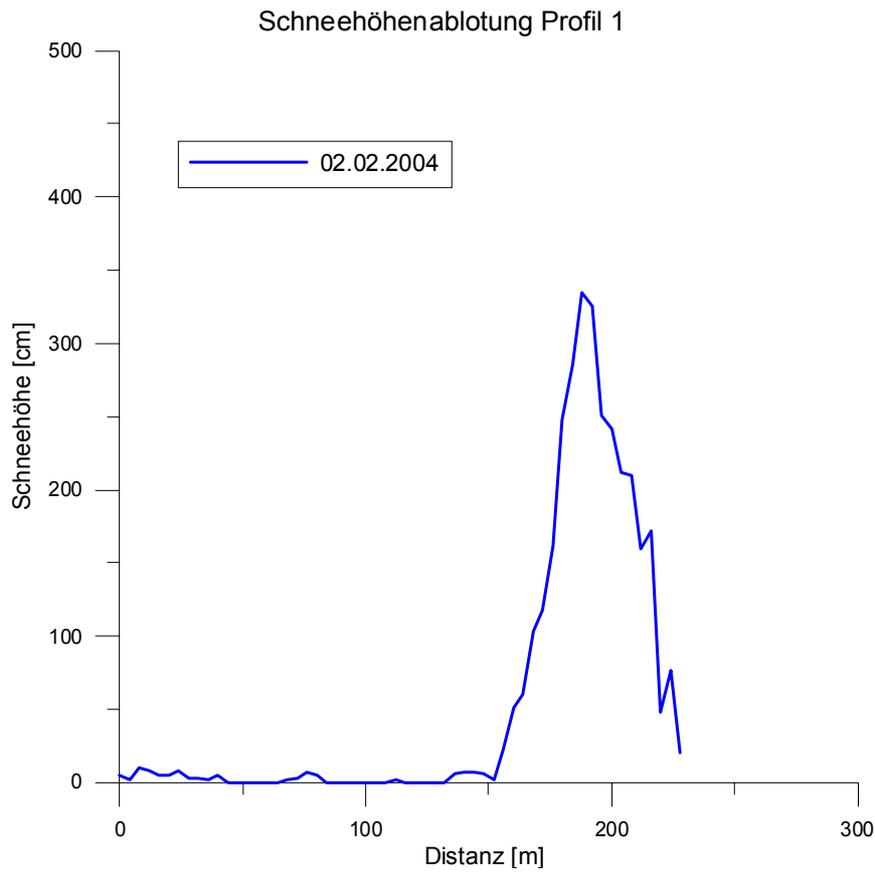


Abbildung 68: Ablotung Profil 1 am 02.02.2004  
Schneehöhenablotung Profil 1

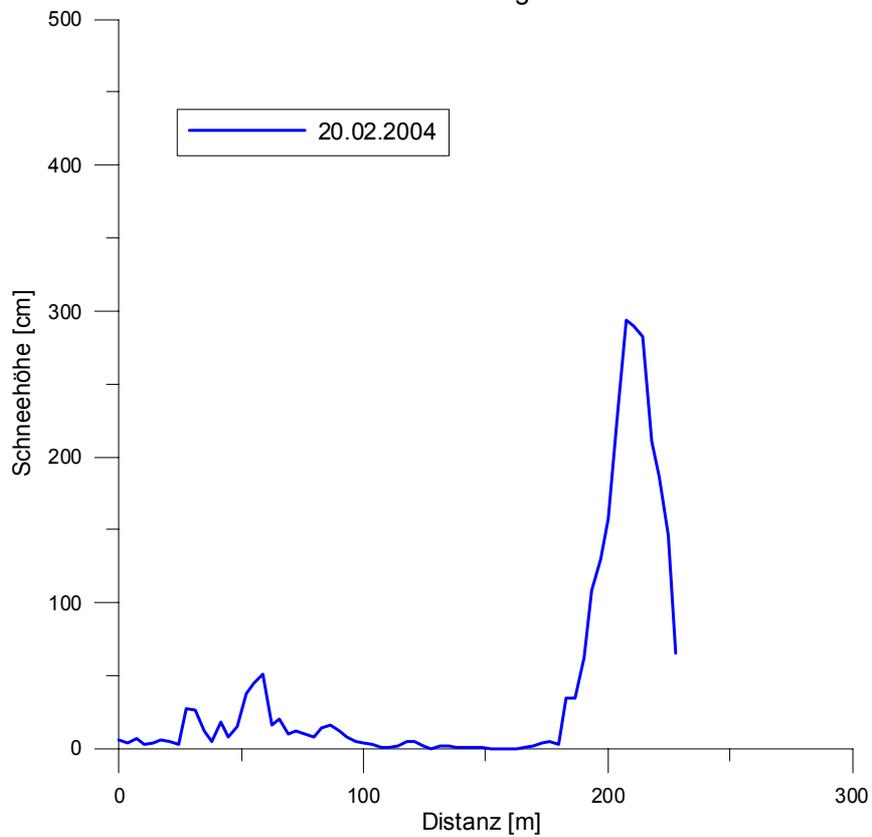


Abbildung 69: Ablotung Profil 1 am 20.02.2004

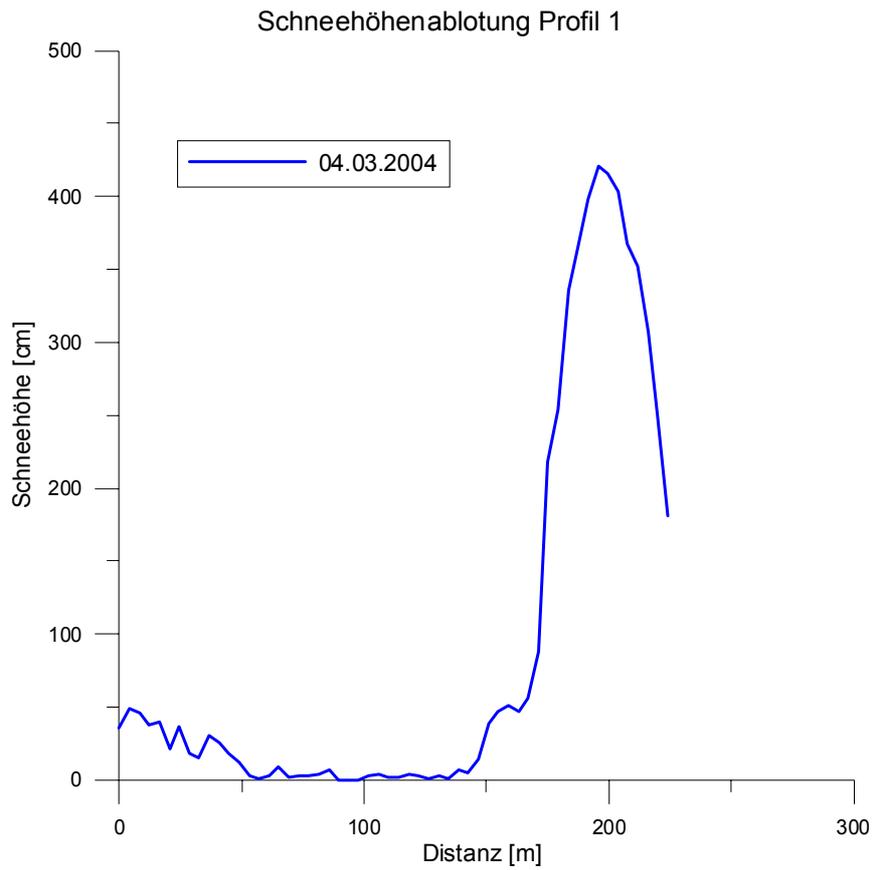


Abbildung 70: Ablotung Profil 1 am 04.03.2004  
Schneehöhenablotung Profil 1

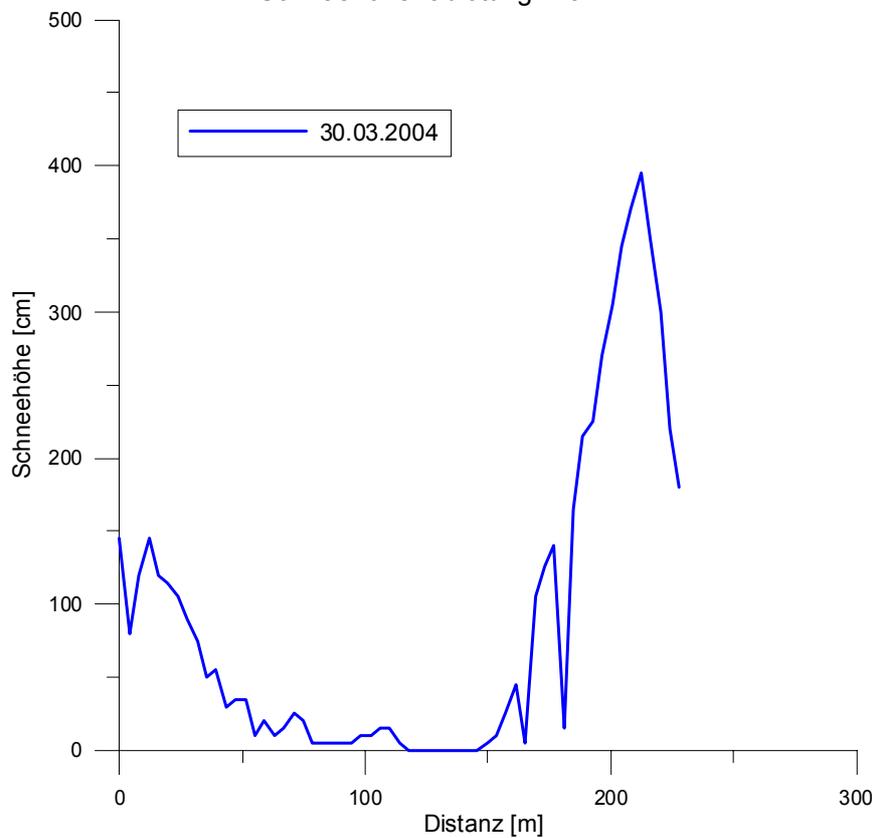


Abbildung 71: Ablotung Profil 1 am 30.03.2004

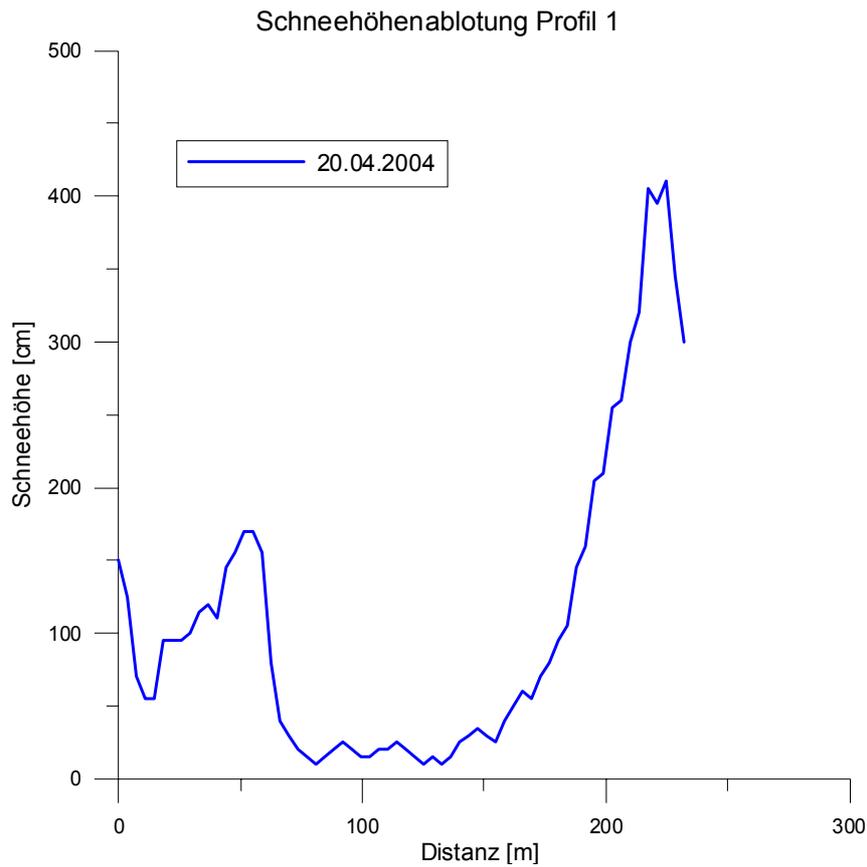


Abbildung 72: Ablotung Profil 1 am 20.04.2004

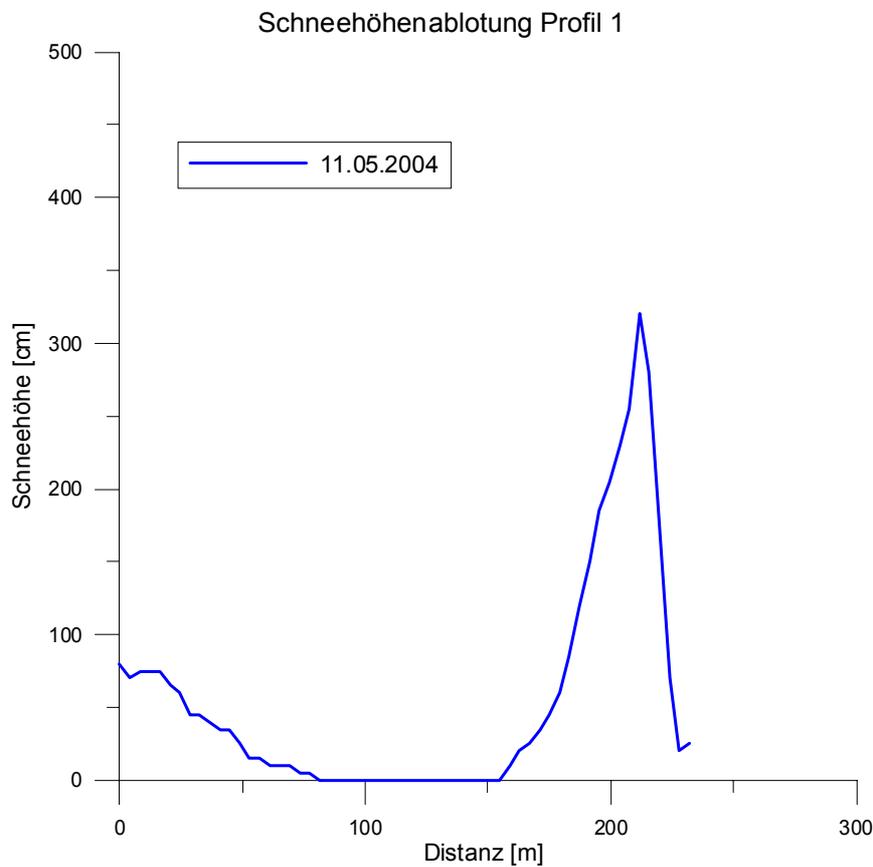


Abbildung 73: Ablotung Profil 1 am 11.05.2004



### 11.1.2 Schneehöhenablotung entlang Profil 2

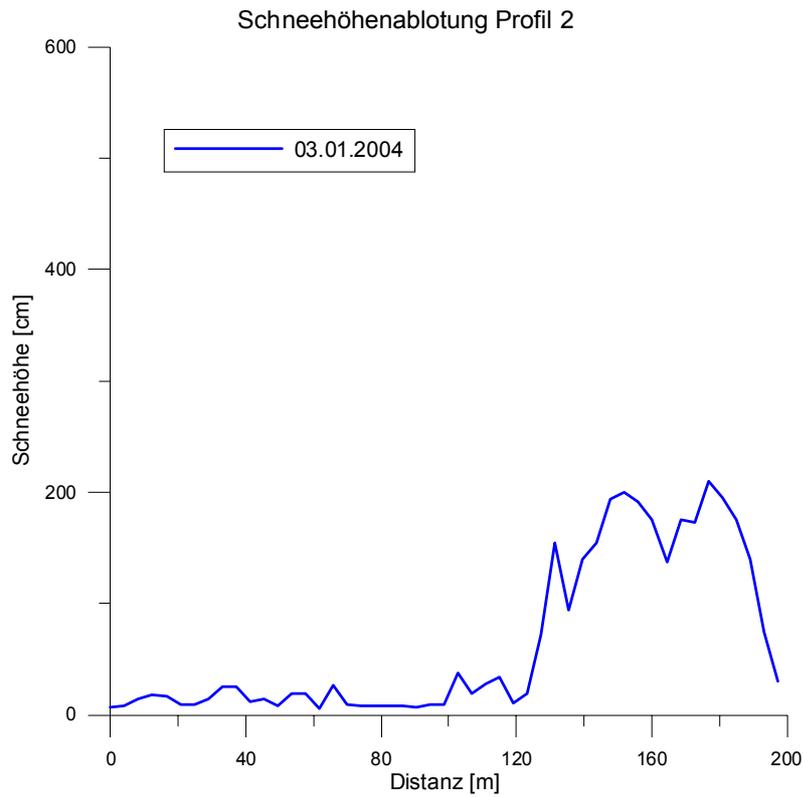


Abbildung 74: Ablotung Profil 2 am 03.01.2004

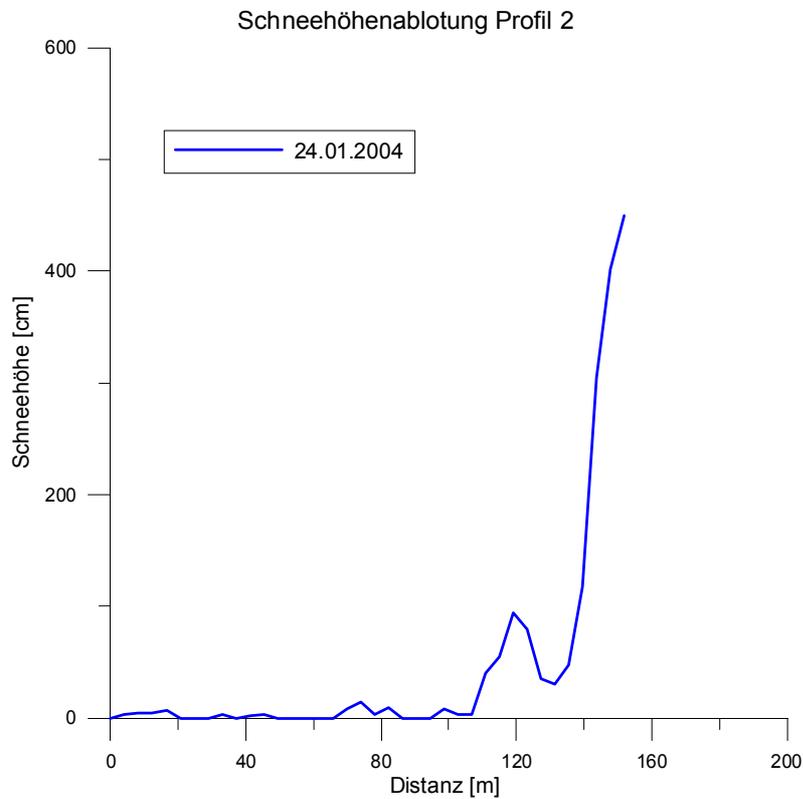


Abbildung 75: Ablotung Profil 2 am 24.01.2004

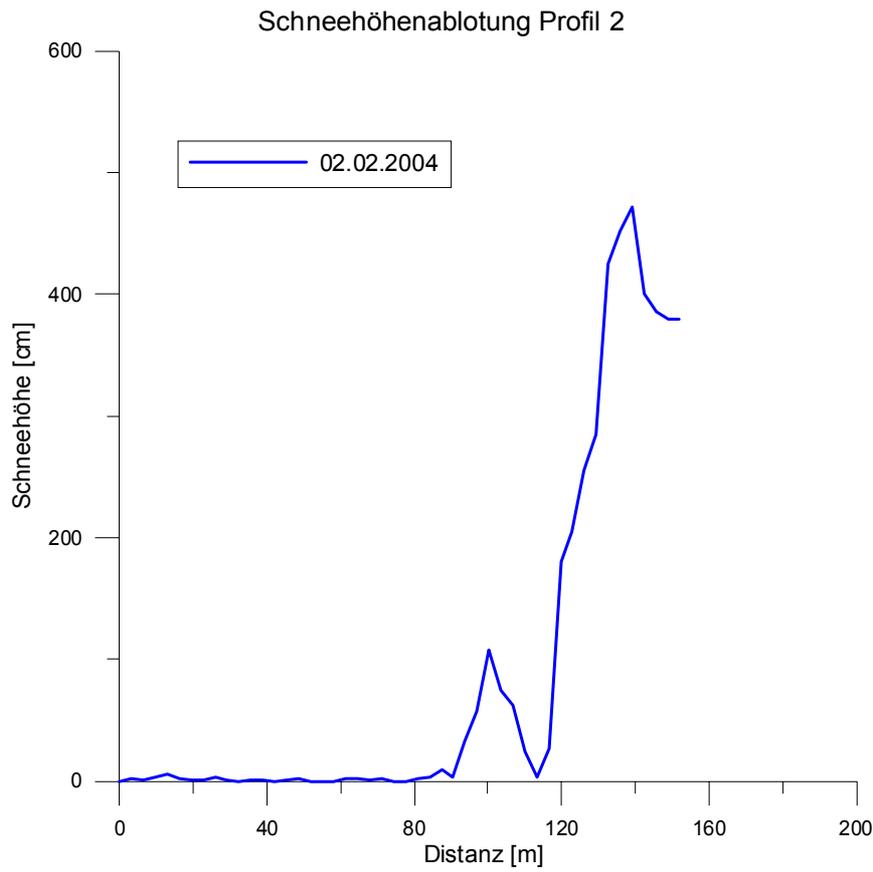


Abbildung 76: Ablotung Profil 2 am 02.02.2004  
Schneehöhenablotung Profil 2

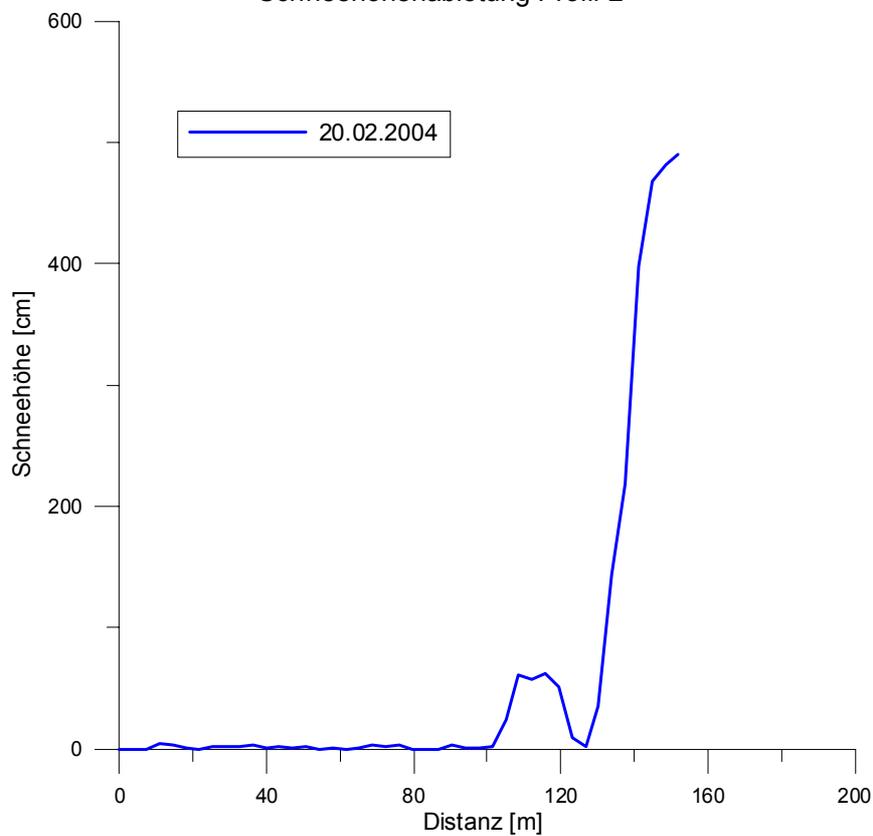


Abbildung 77: Ablotung Profil 2 am 20.02.2004

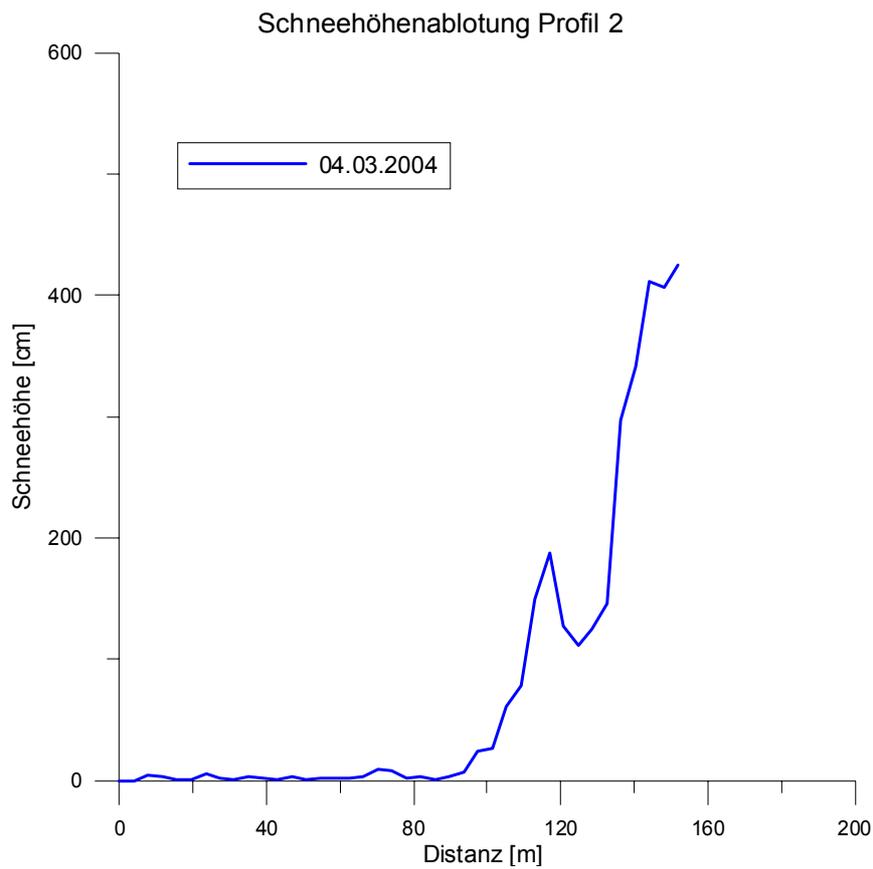


Abbildung 78: Ablotung Profil 2 am 04.03.2004  
Schneehöhenablotung Profil 2

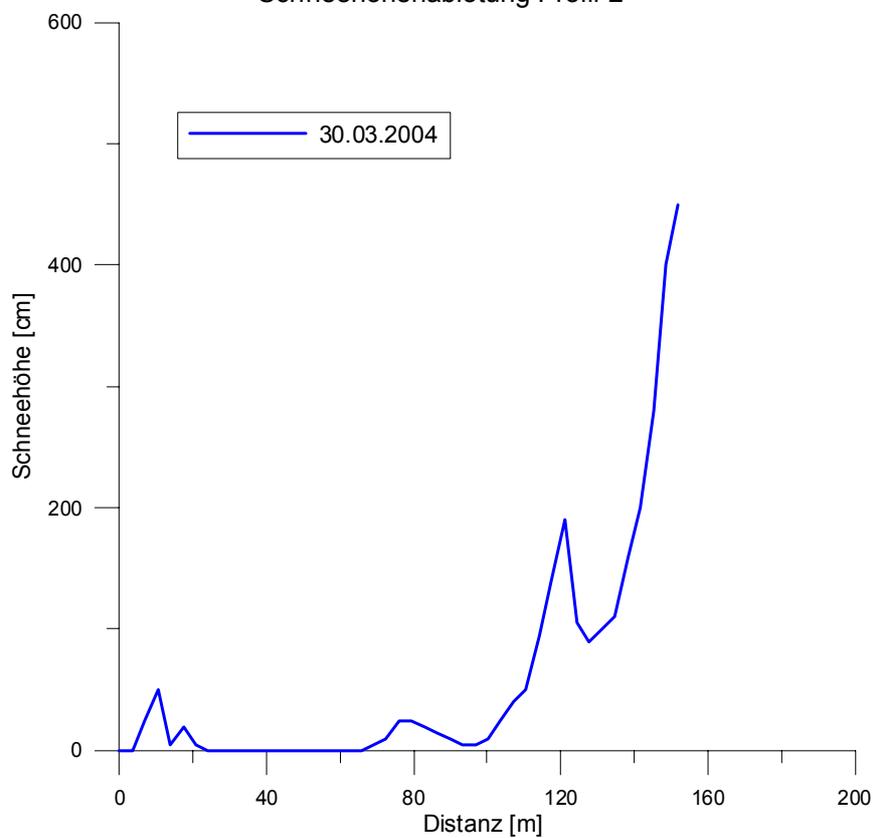


Abbildung 79: Ablotung Profil 2 am 30.03.2004

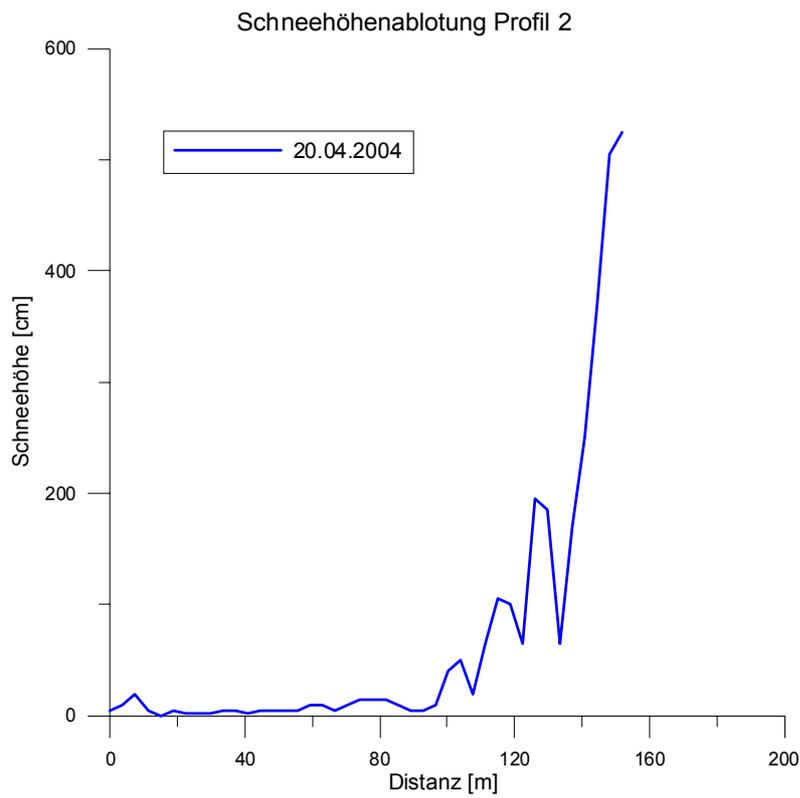


Abbildung 80: Ablotung Profil 2 am 20.04.2004

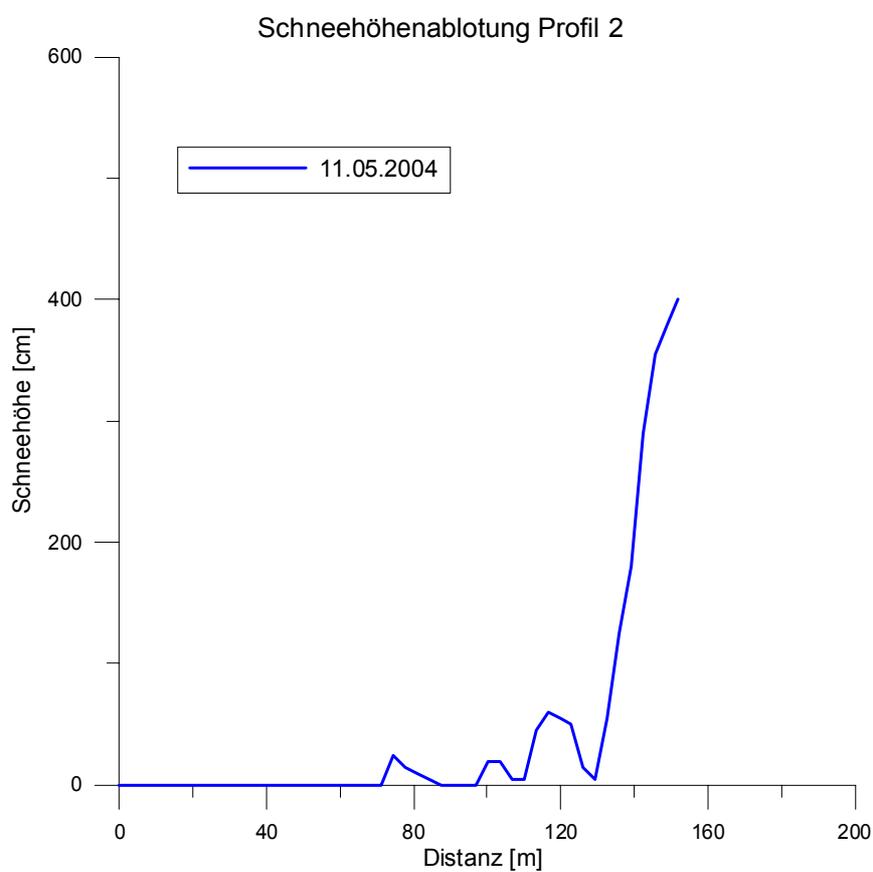


Abbildung 81: Ablotung Profil 2 am 11.05.2004



## 11.2 Darstellung der Windverteilungen

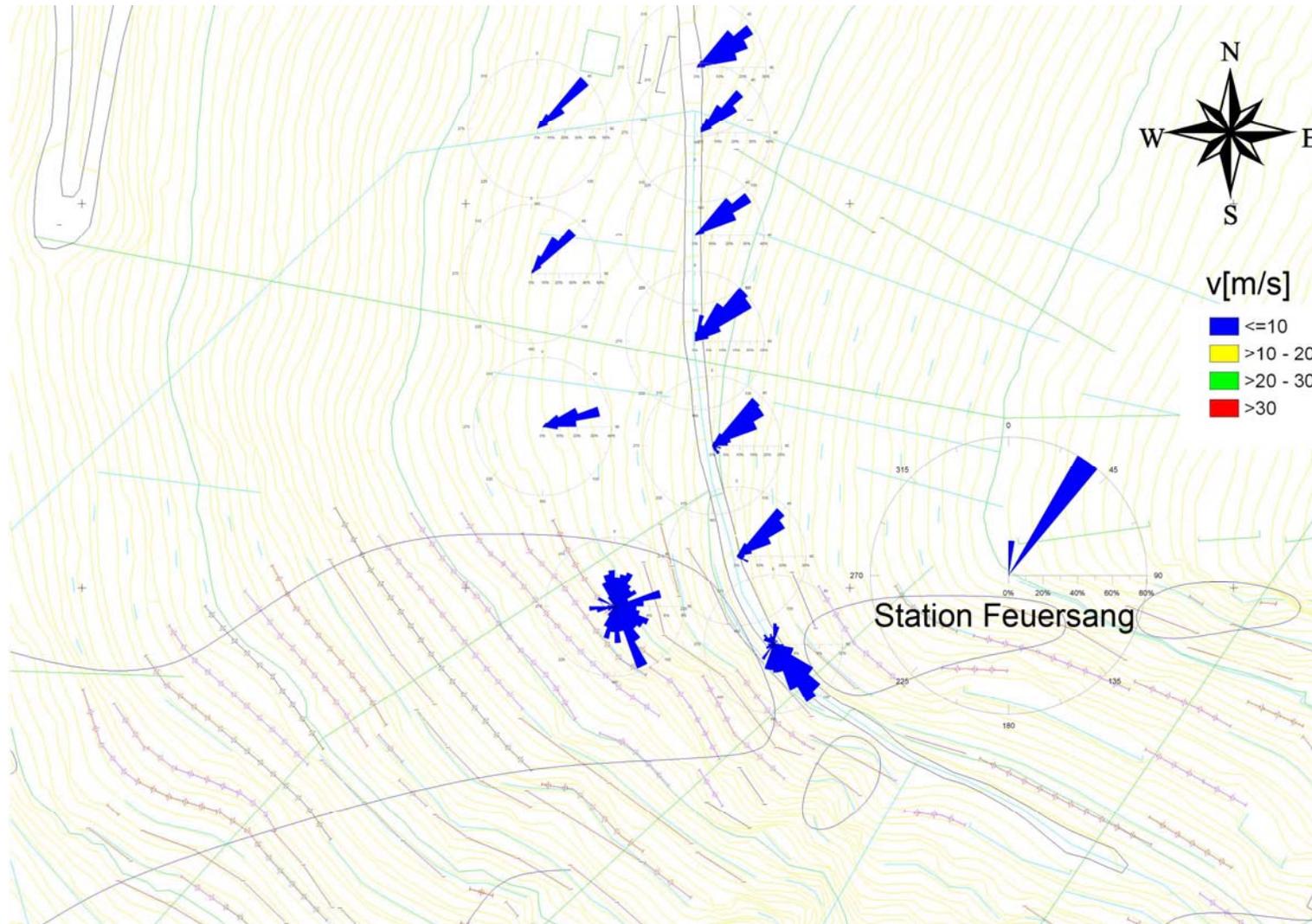


Abbildung 82: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 24. 01. 2004

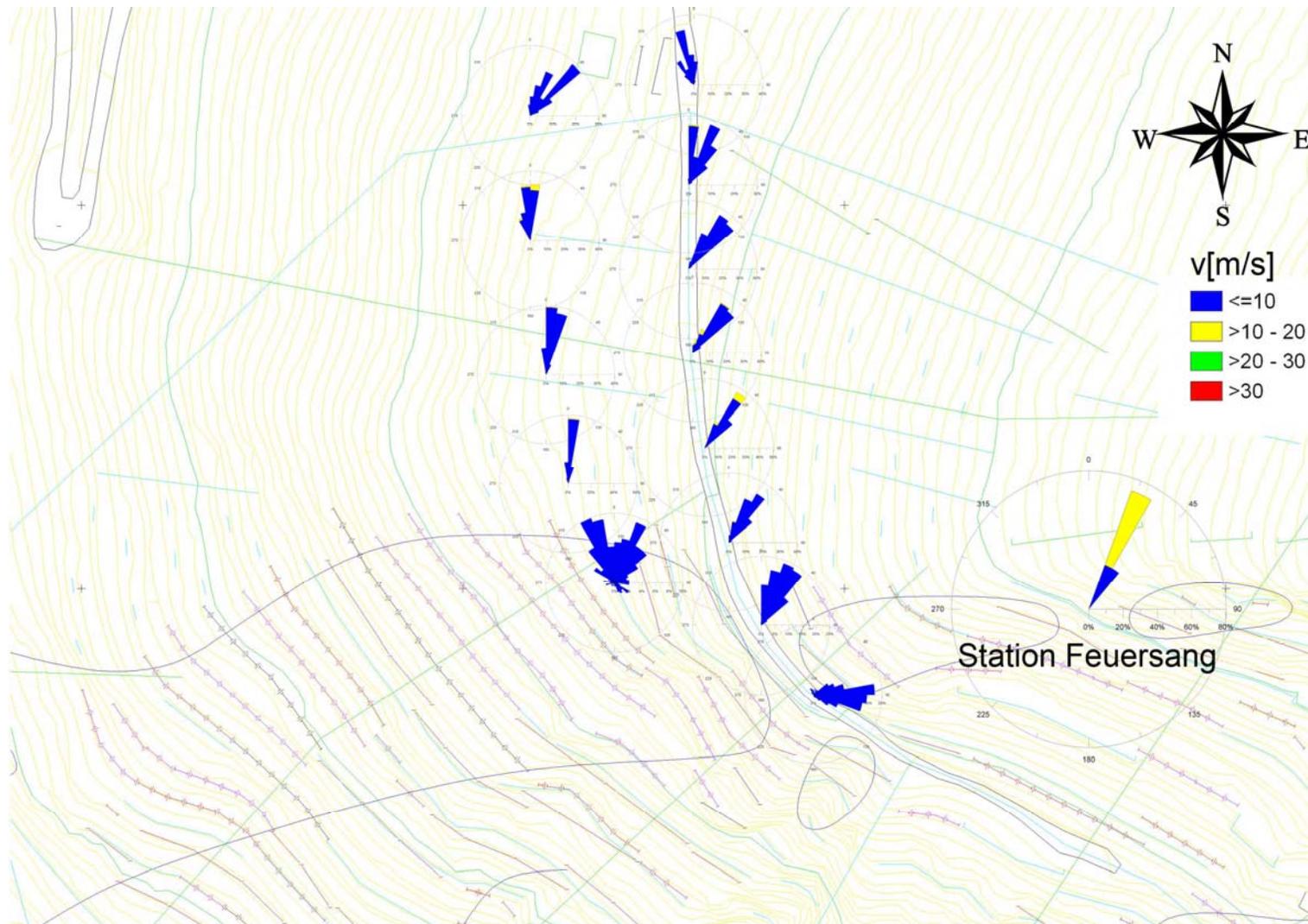


Abbildung 83: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 03. 02. 2004

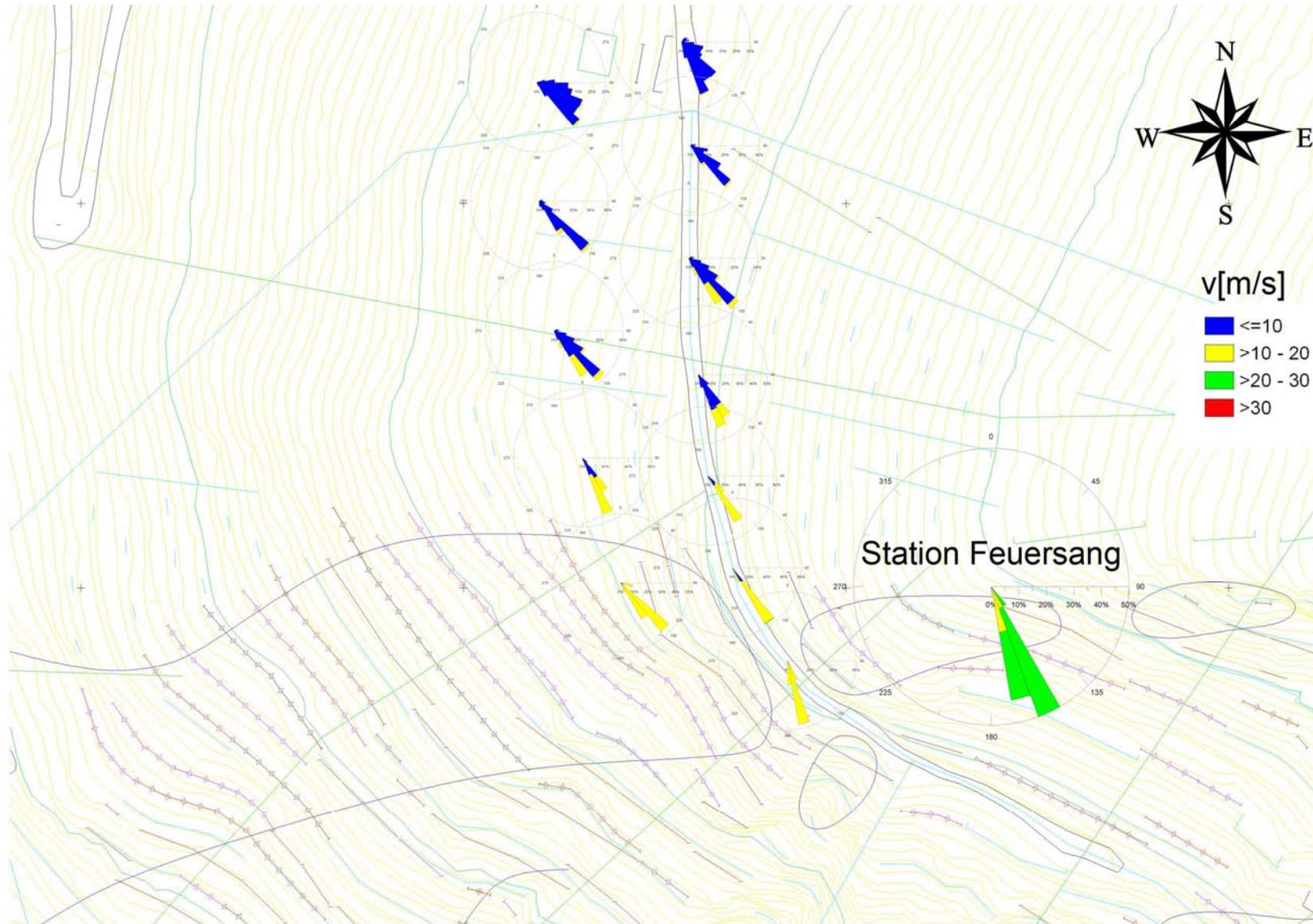


Abbildung 84: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 20. 02. 2004

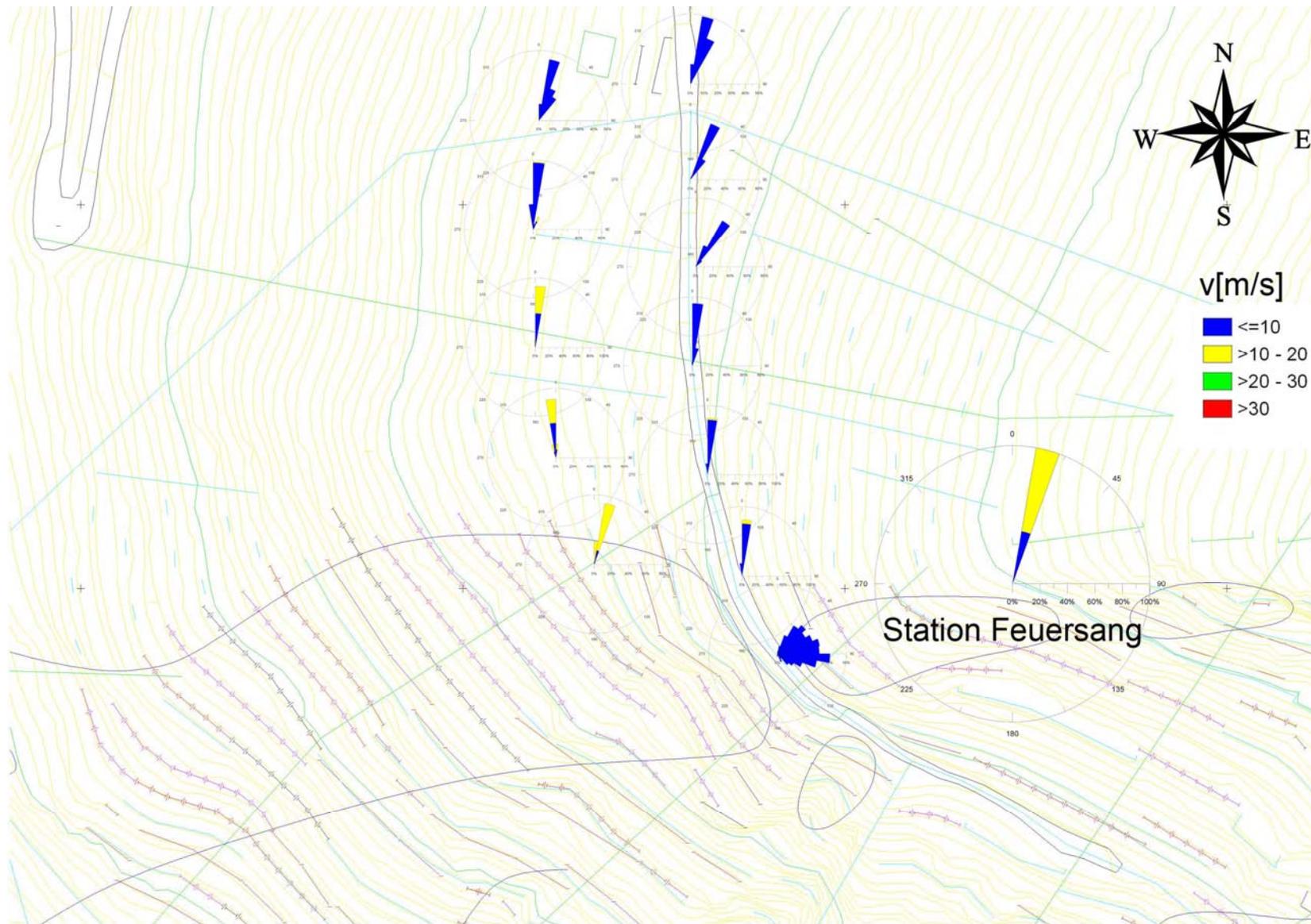


Abbildung 85: Verteilung der Windrichtungen der einzelnen Messpunkte und der Station Feuersang am 04. 03. 2004



## 11.3 Geostatistische Auswertung

### 11.3.1 Geostatistische Auswertung mit dem Programm Surfer

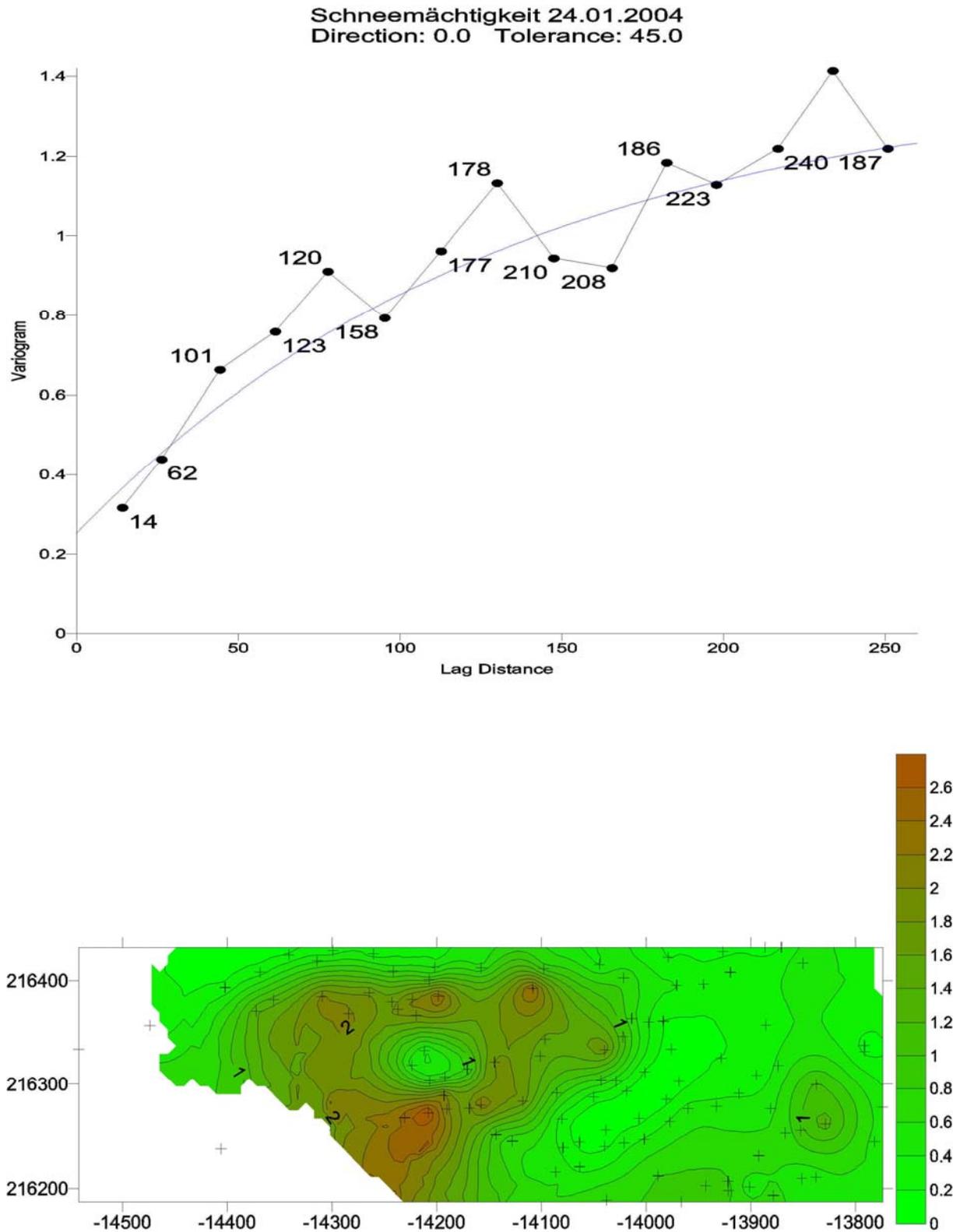


Abbildung 86: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 24.01.2004 mit dem Programm Surfer



Schneemächtigkeit [m] 02.02.2004  
 Direction: 0.0 Tolerance: 45.0

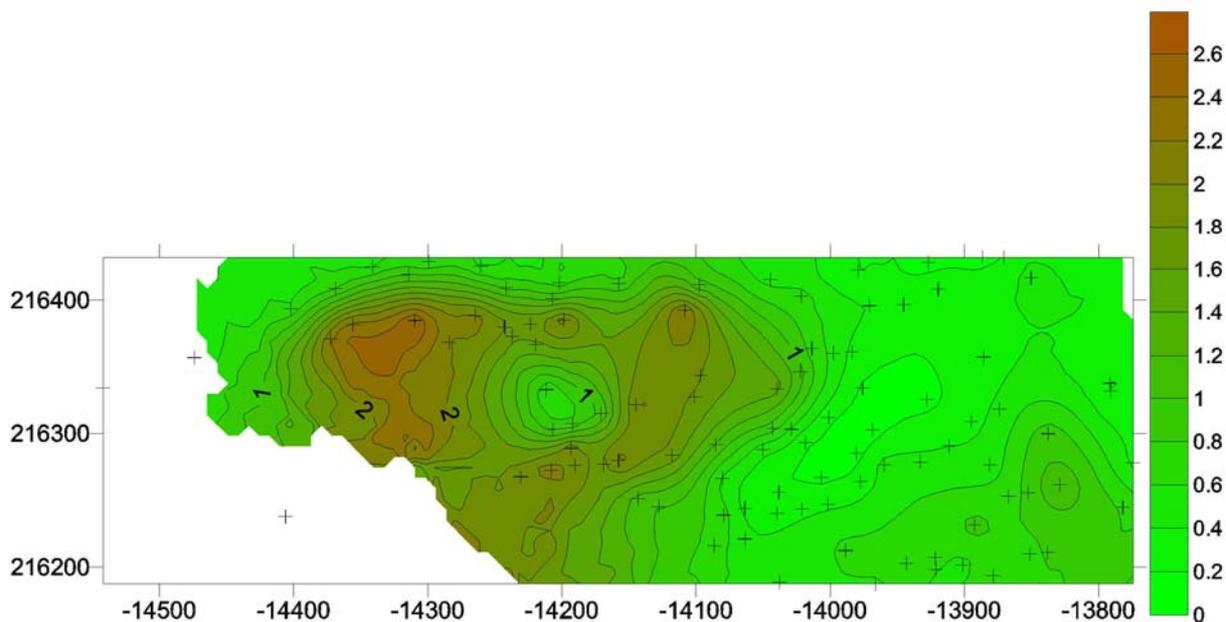
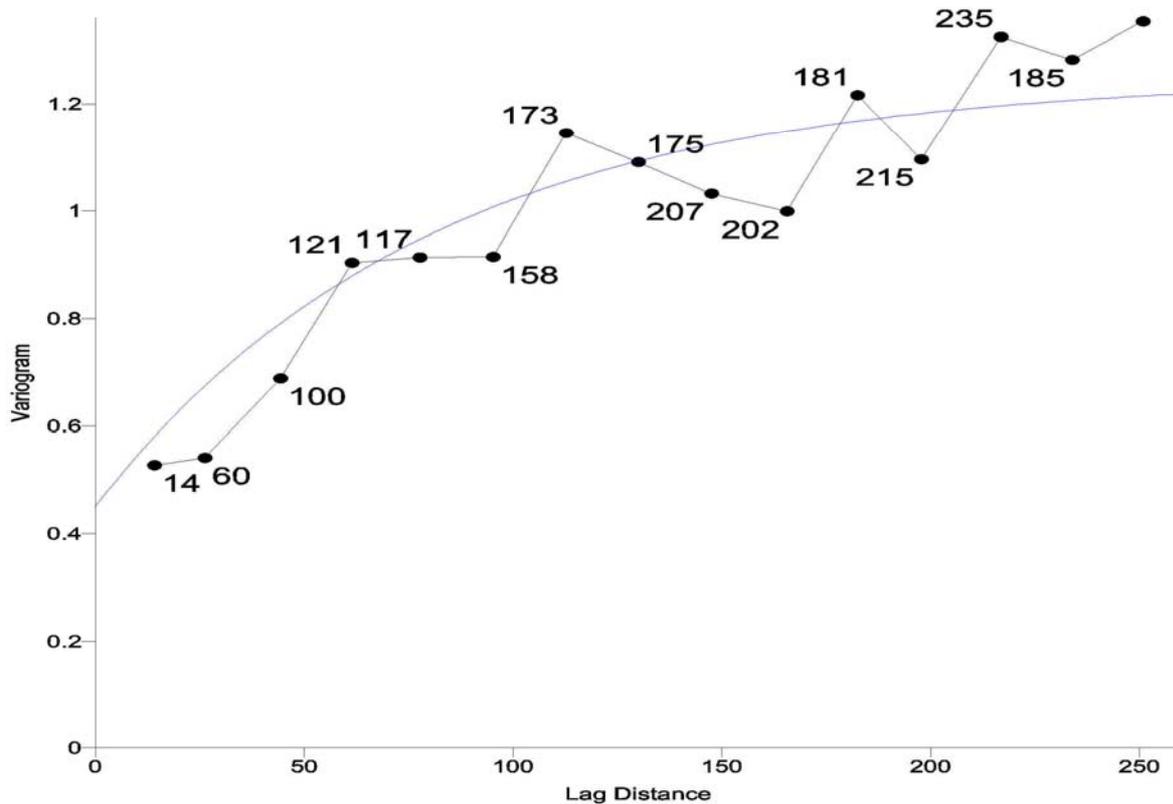


Abbildung 87: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 02.02.2004 mit dem Programm Surfer

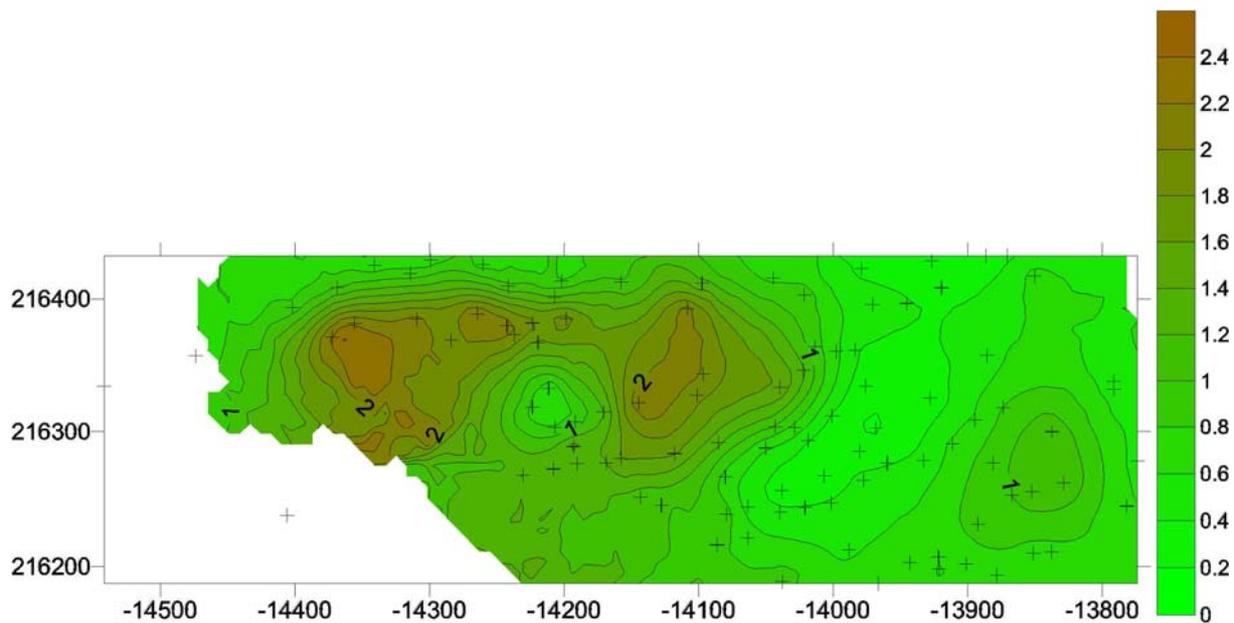
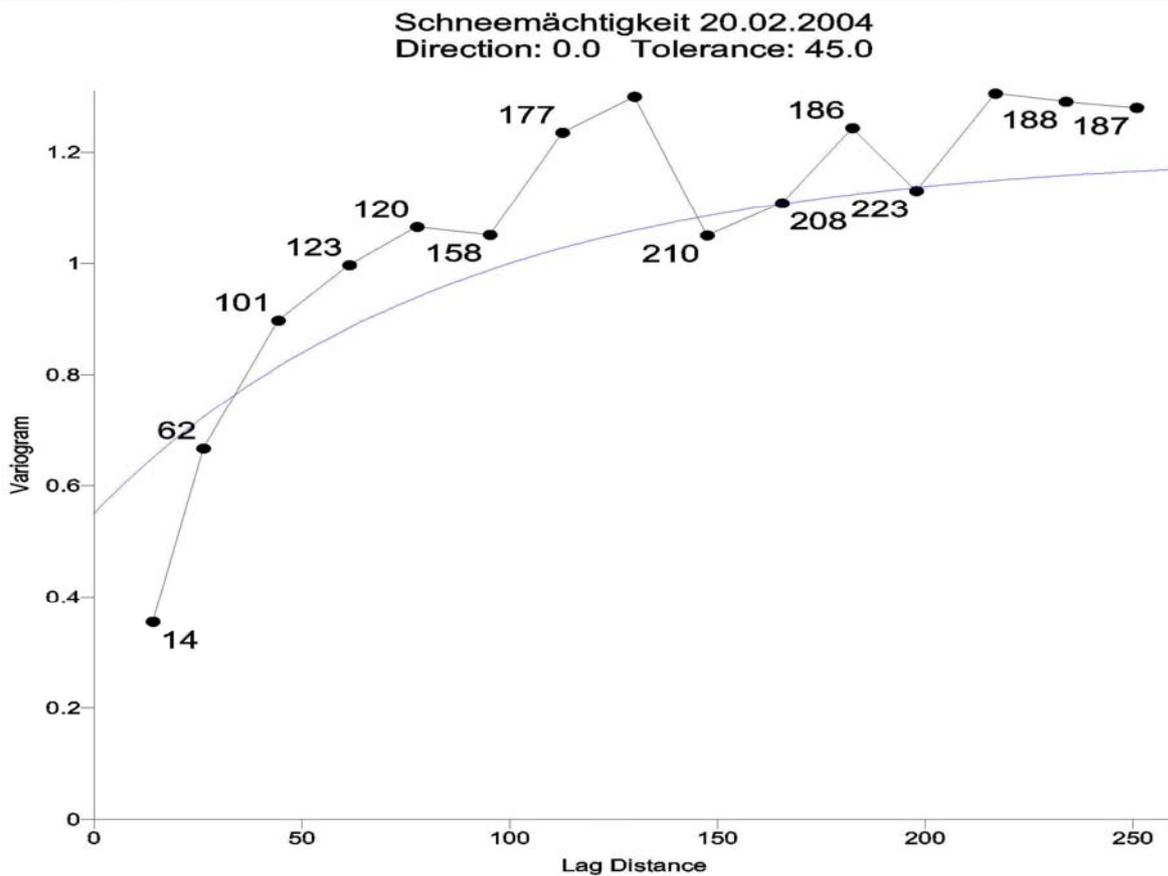


Abbildung 88: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.02.2004 mit dem Programm Surfer

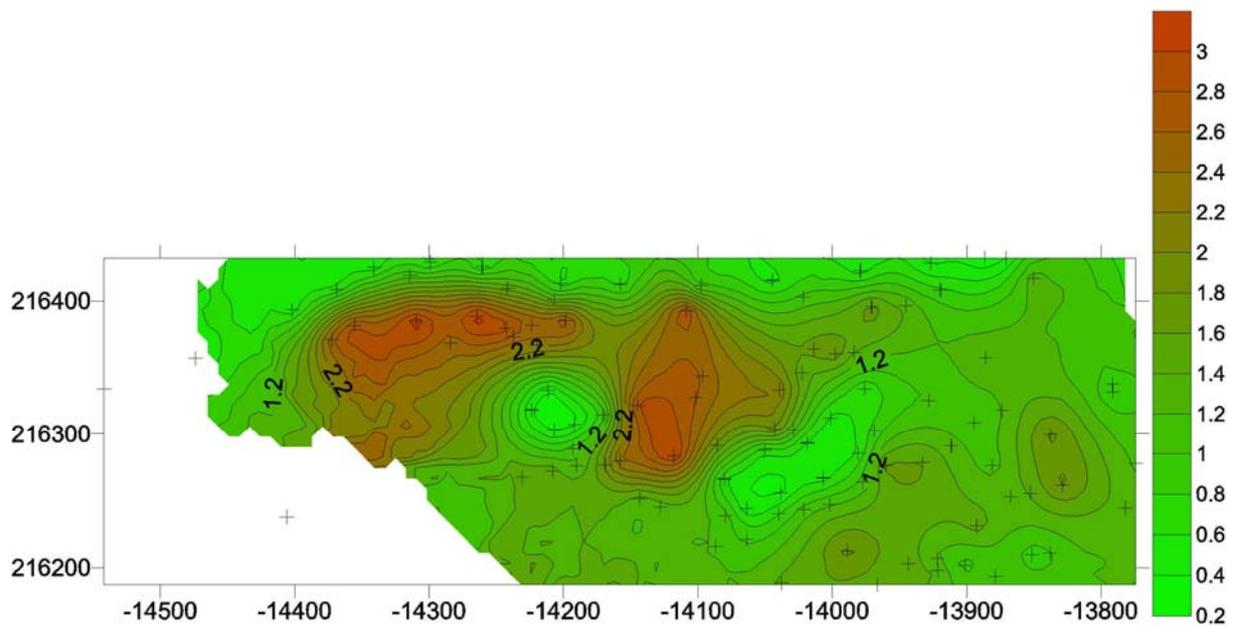
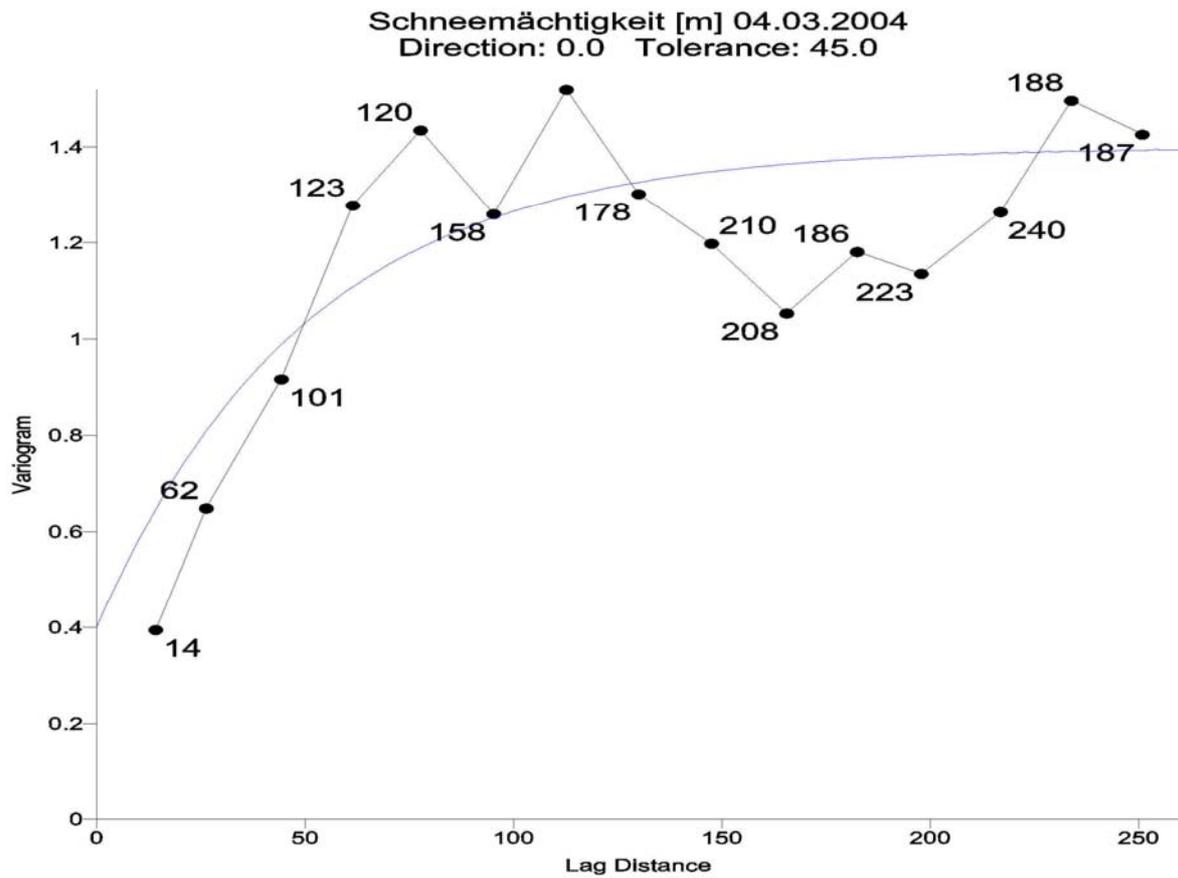


Abbildung 89: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm Surfer

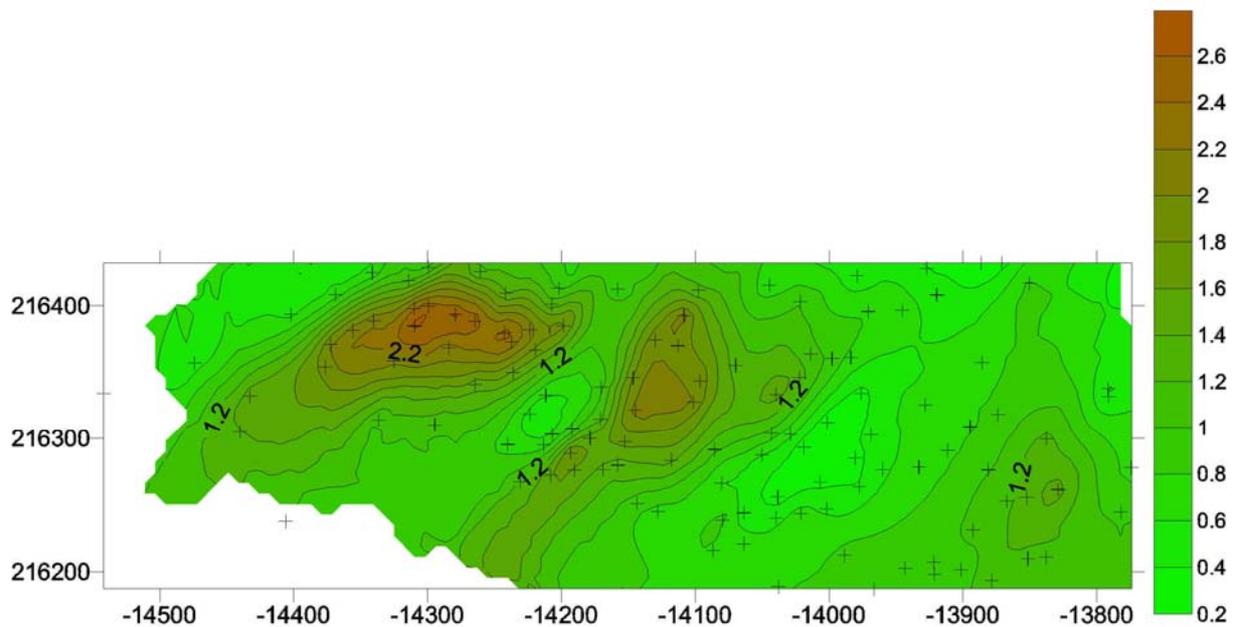
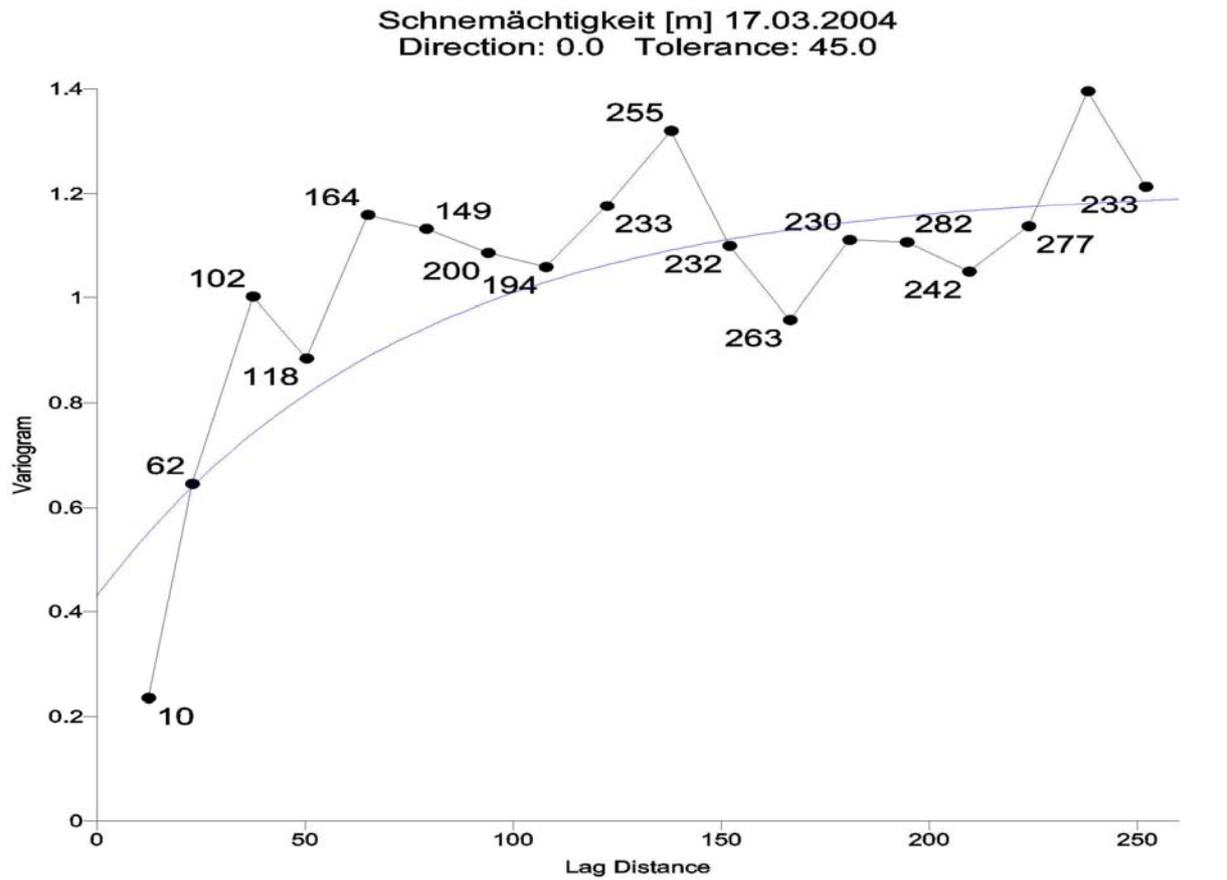


Abbildung 90: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer

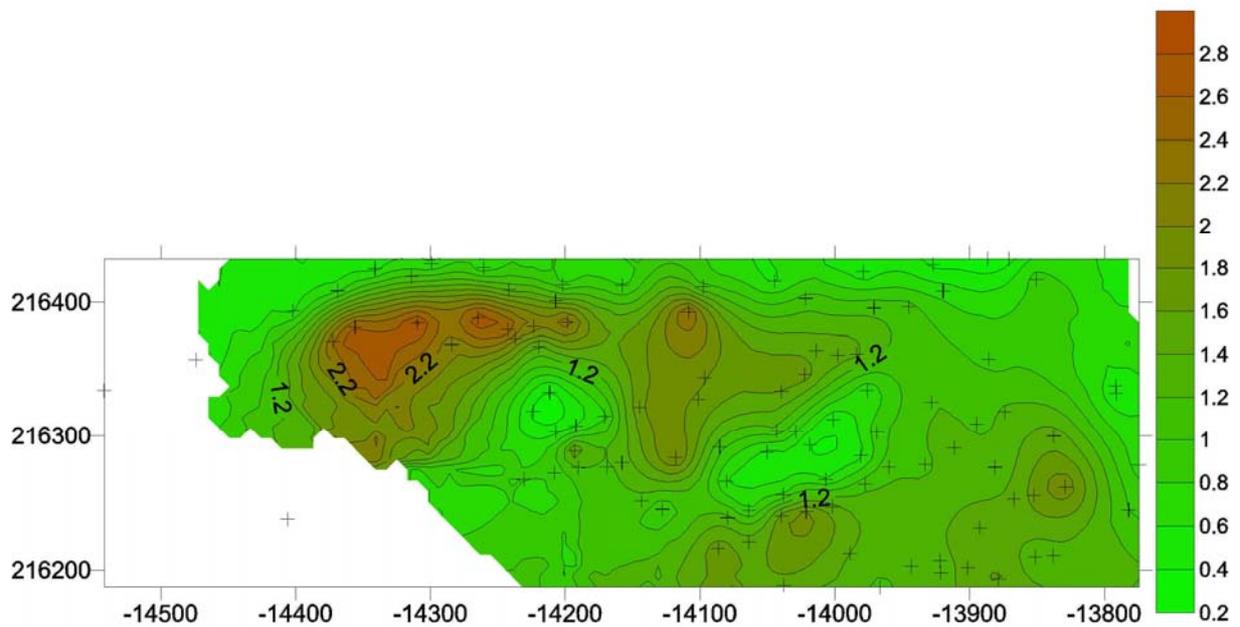
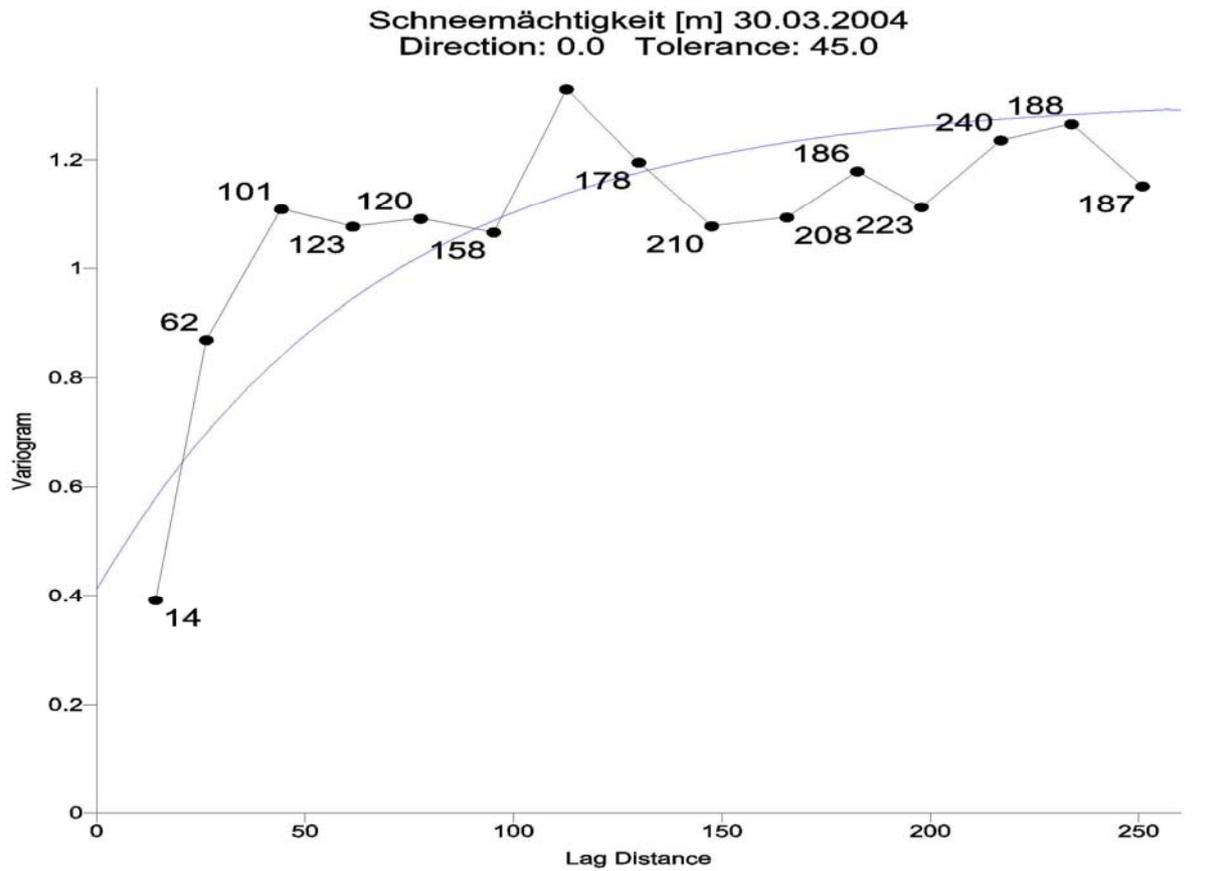


Abbildung 91: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm Surfer

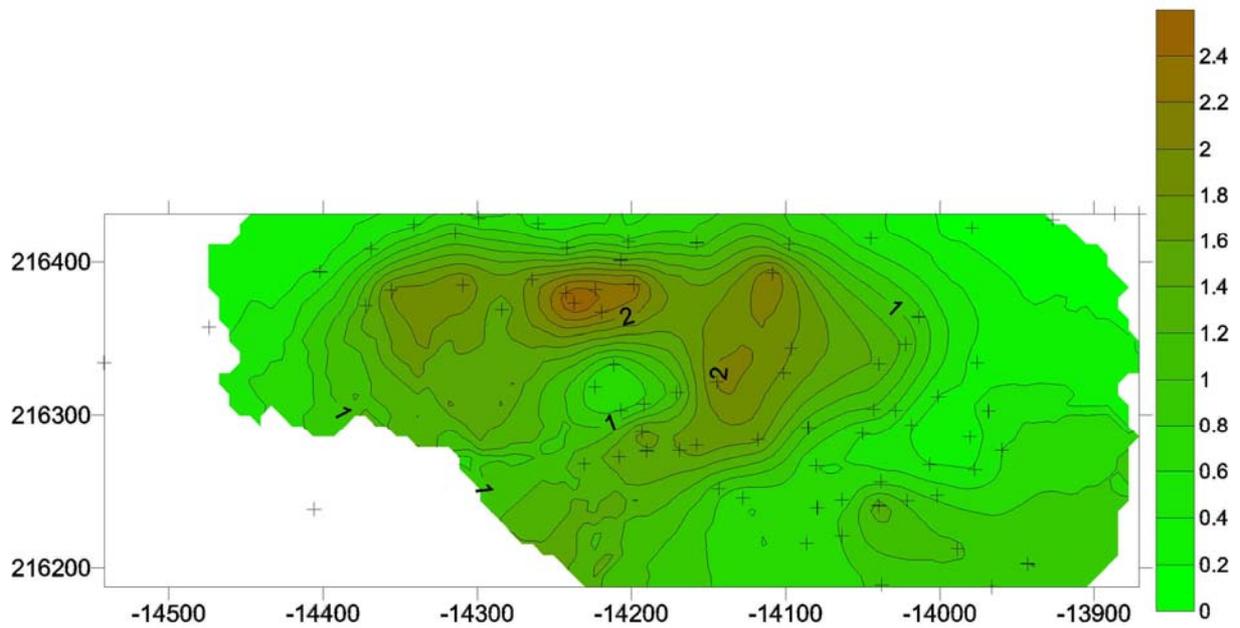
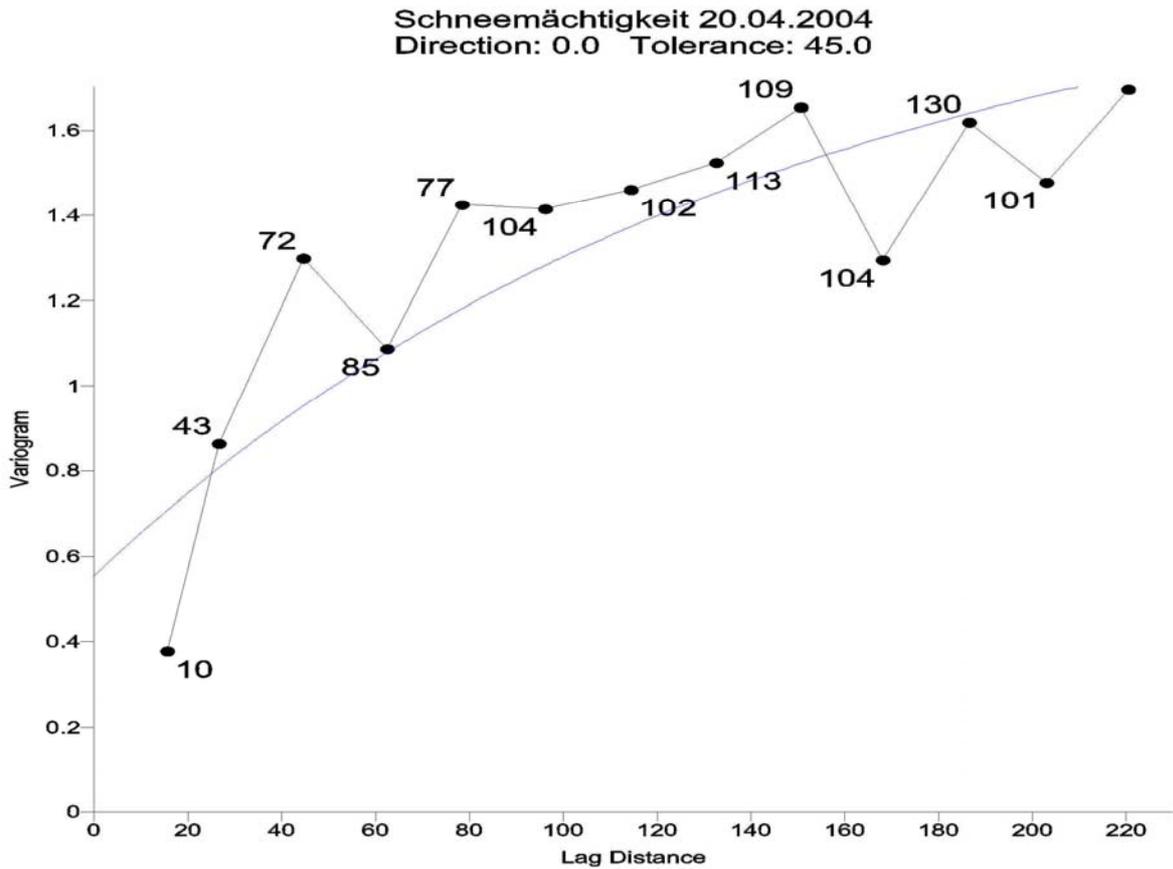


Abbildung 92: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.04.2004 mit dem Programm Surfer. Anmerkung: Obersten 30 Punkte wegen Nebel nicht einsehbar.



Schneemächtigkeit [m] 11.05.2004  
 Direction: 0.0 Tolerance: 45.0

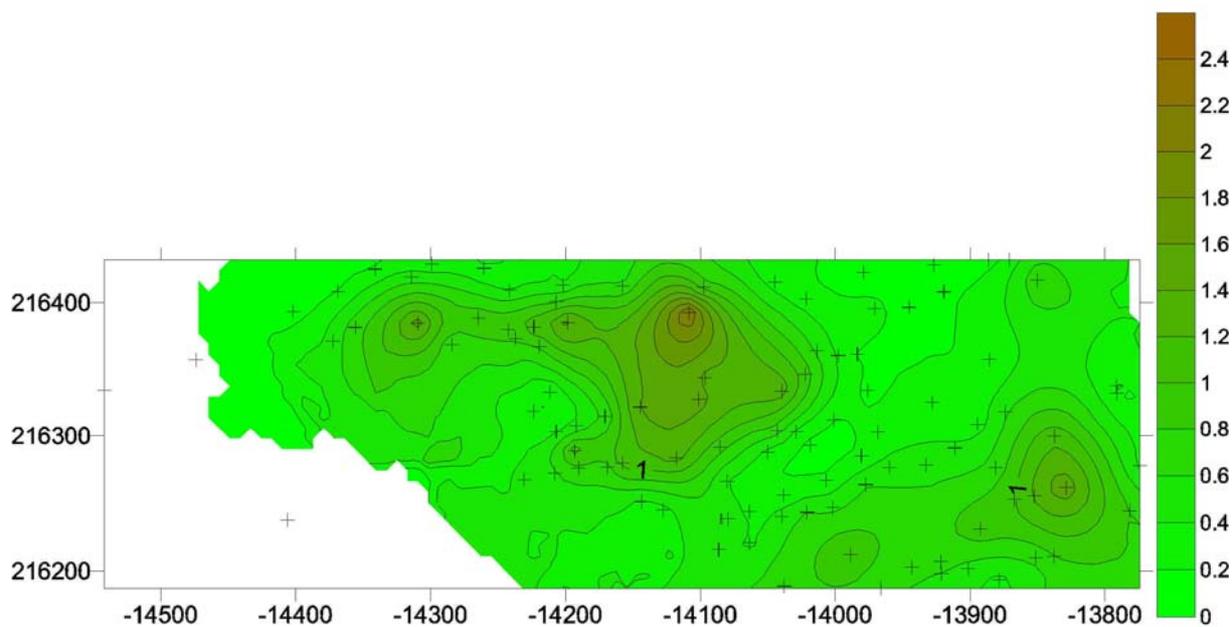
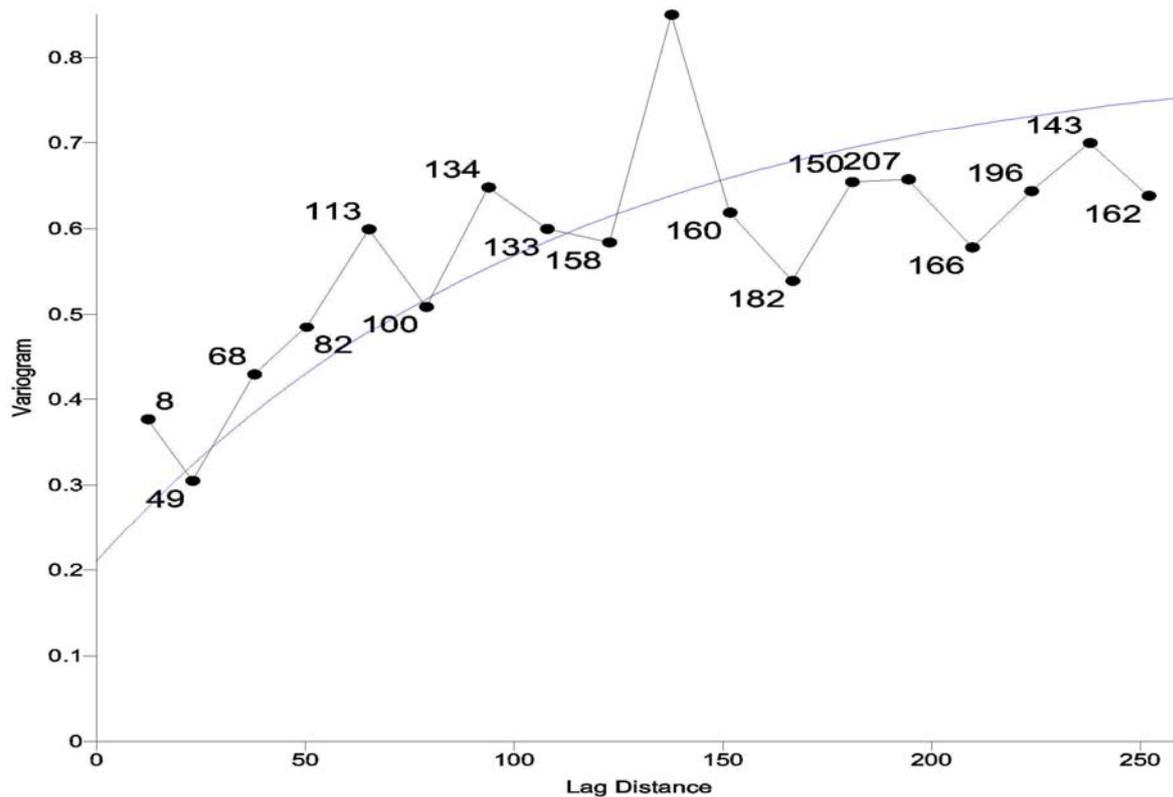


Abbildung 93: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 11.05.2004 mit dem Programm Surfer



Geostatistische Auswertung Baufeld 3

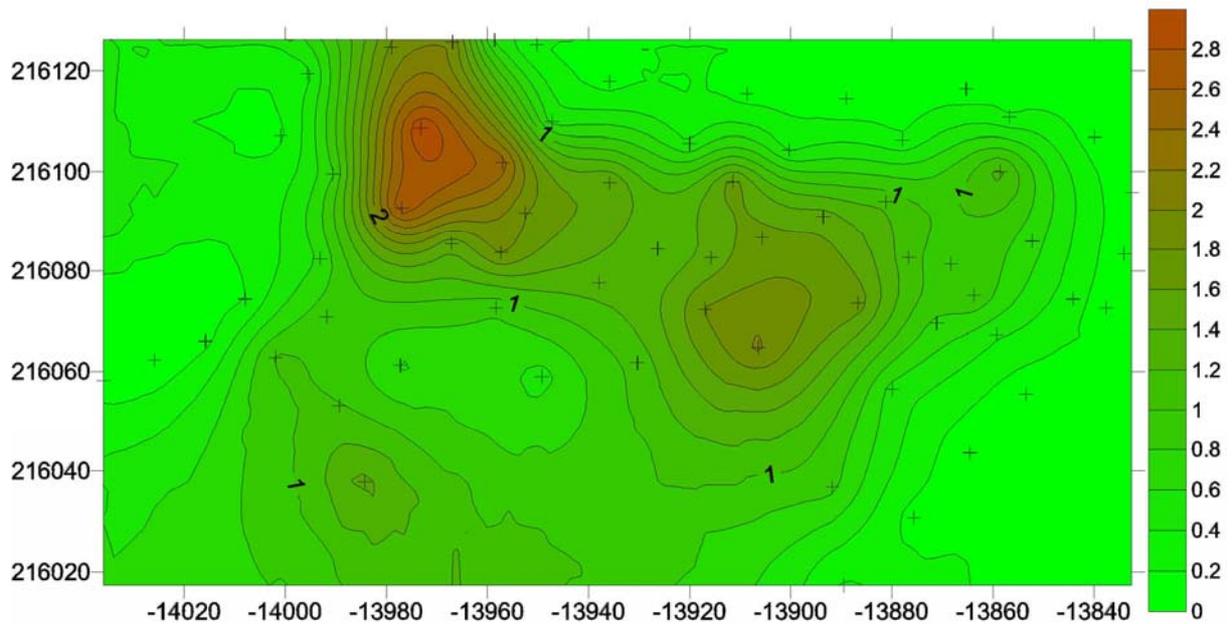
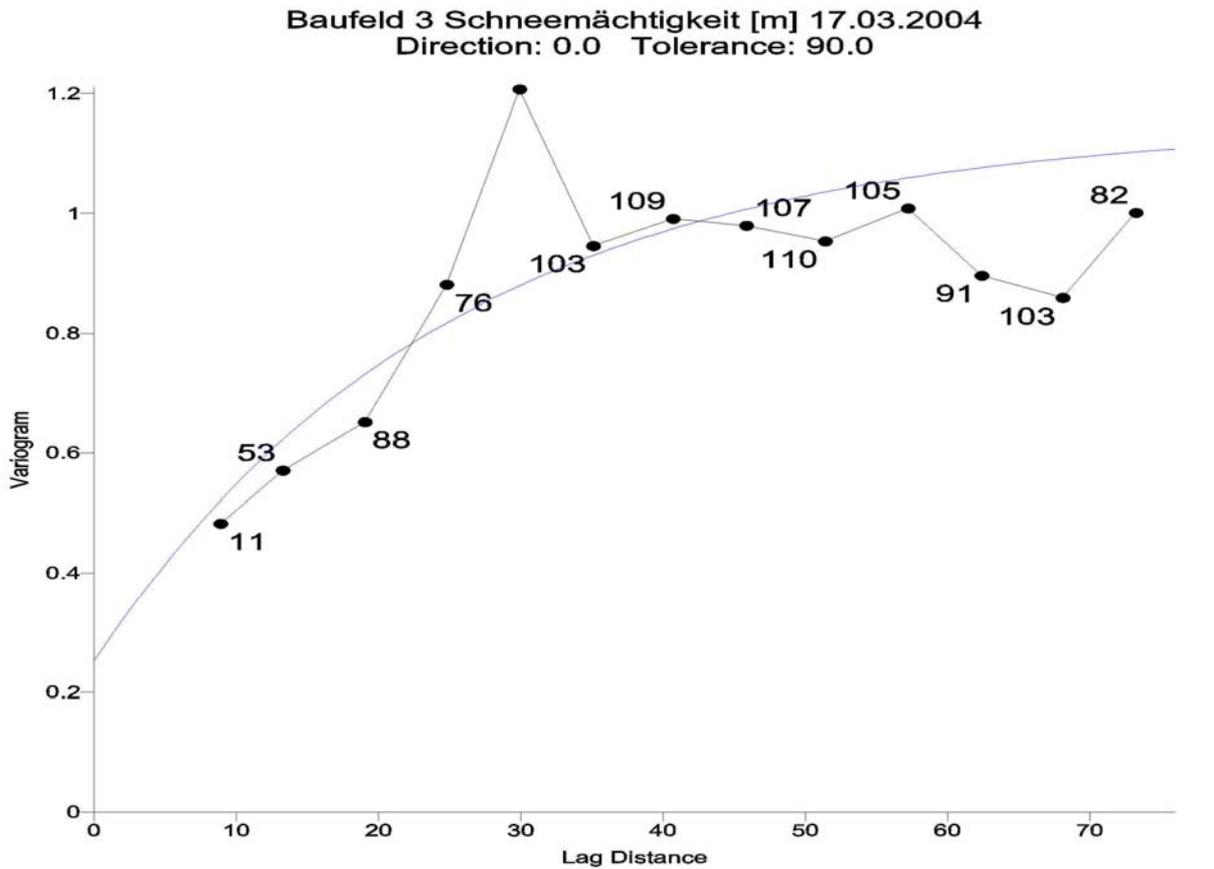


Abbildung 94: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit am Baufeld 3 vom 17.03.2004 mit dem Programm Surfer



Auswertung der Aufnahmen vom Winter 2005:

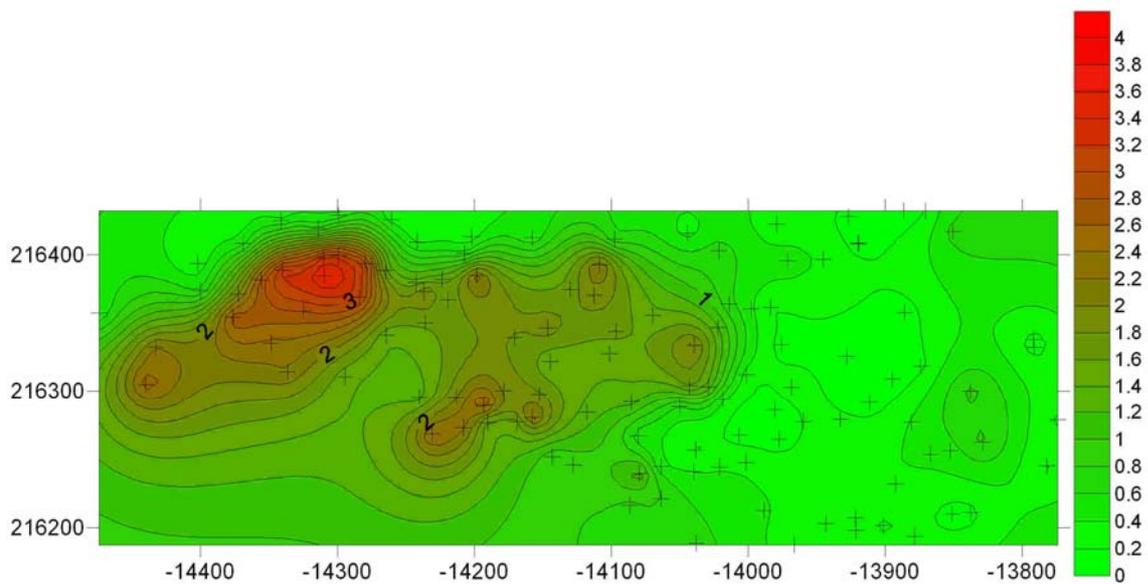
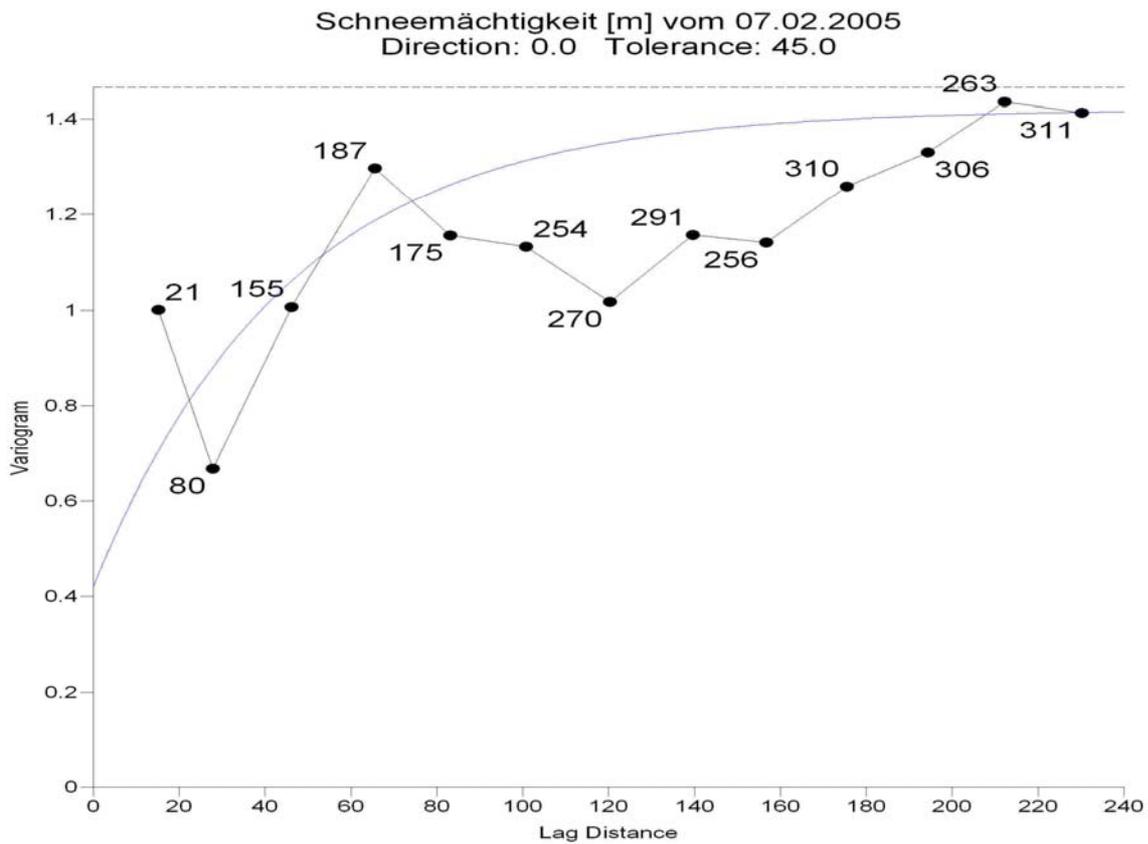


Abbildung 95: Schneemächtigkeit in Meter vom 07.02.2005



Schneemächtigkeit [m] vom 13.03.2005  
 Direction: 0.0 Tolerance: 45.0

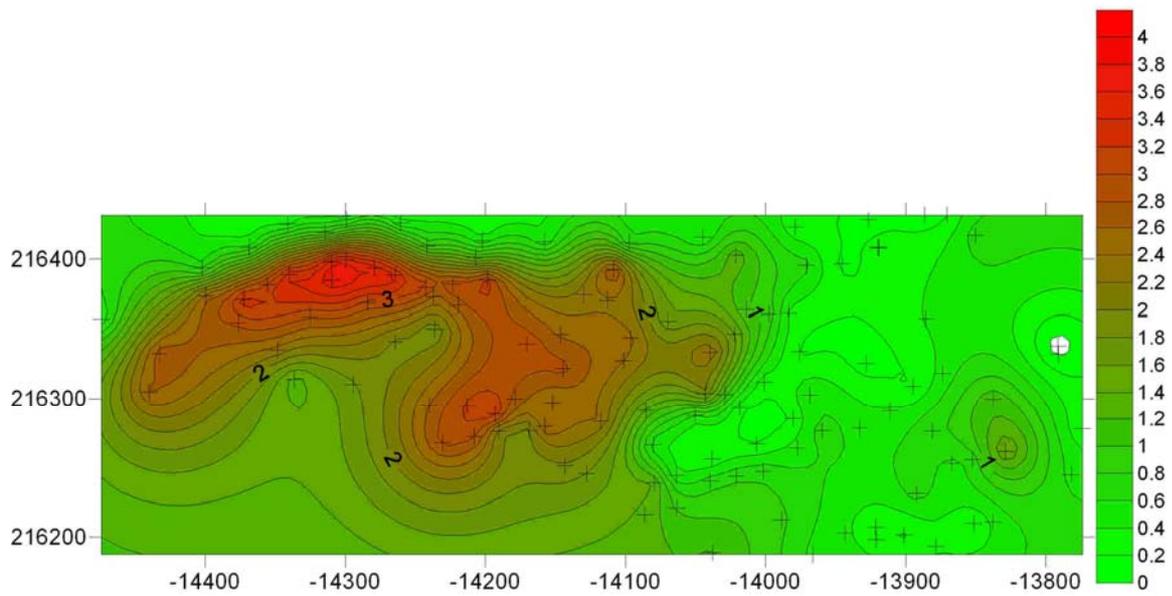
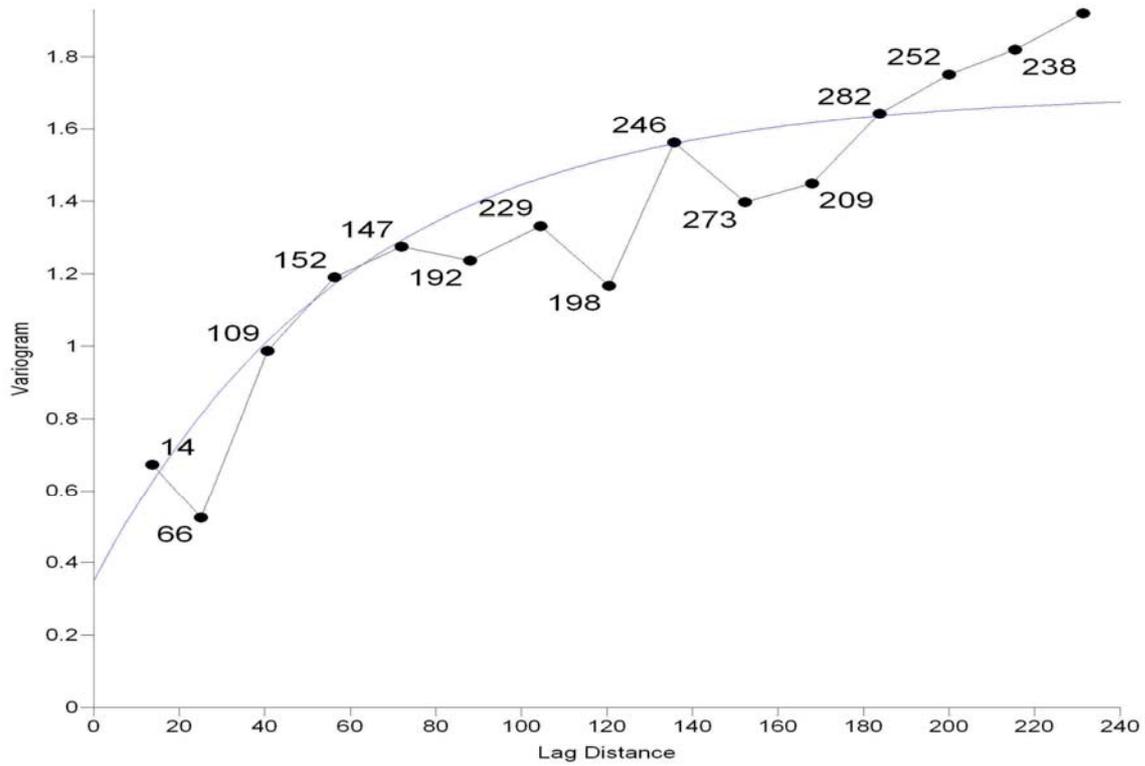


Abbildung 96: Schneemächtigkeit in Meter vom 13.03.2005



Schneemächtigkeit vom 21.03.2005  
 Direction: 0.0 Tolerance: 45.0

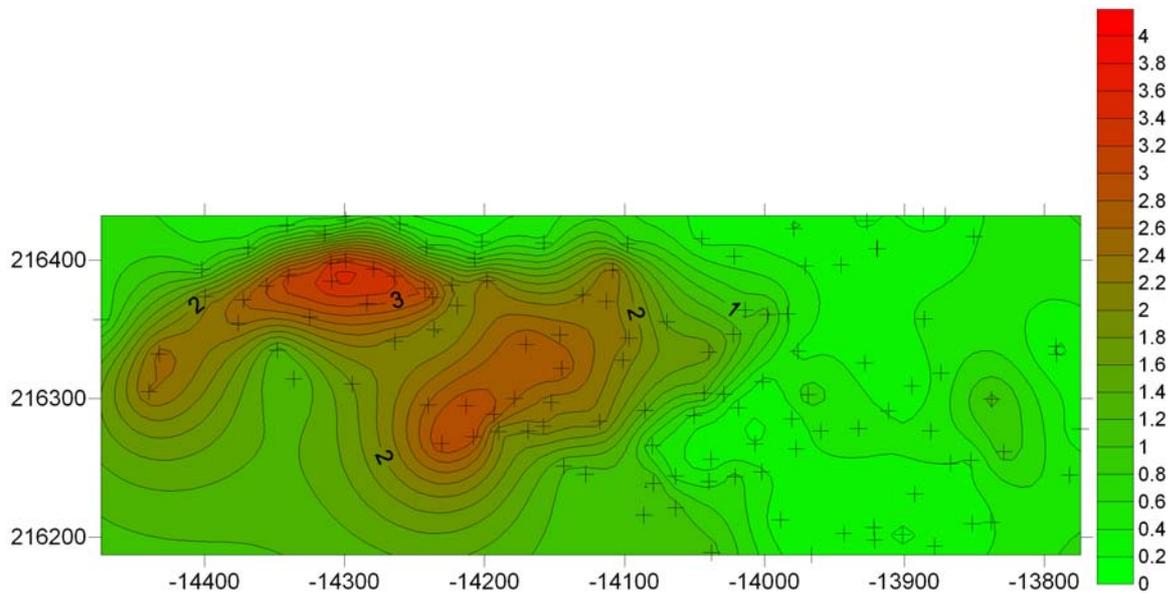
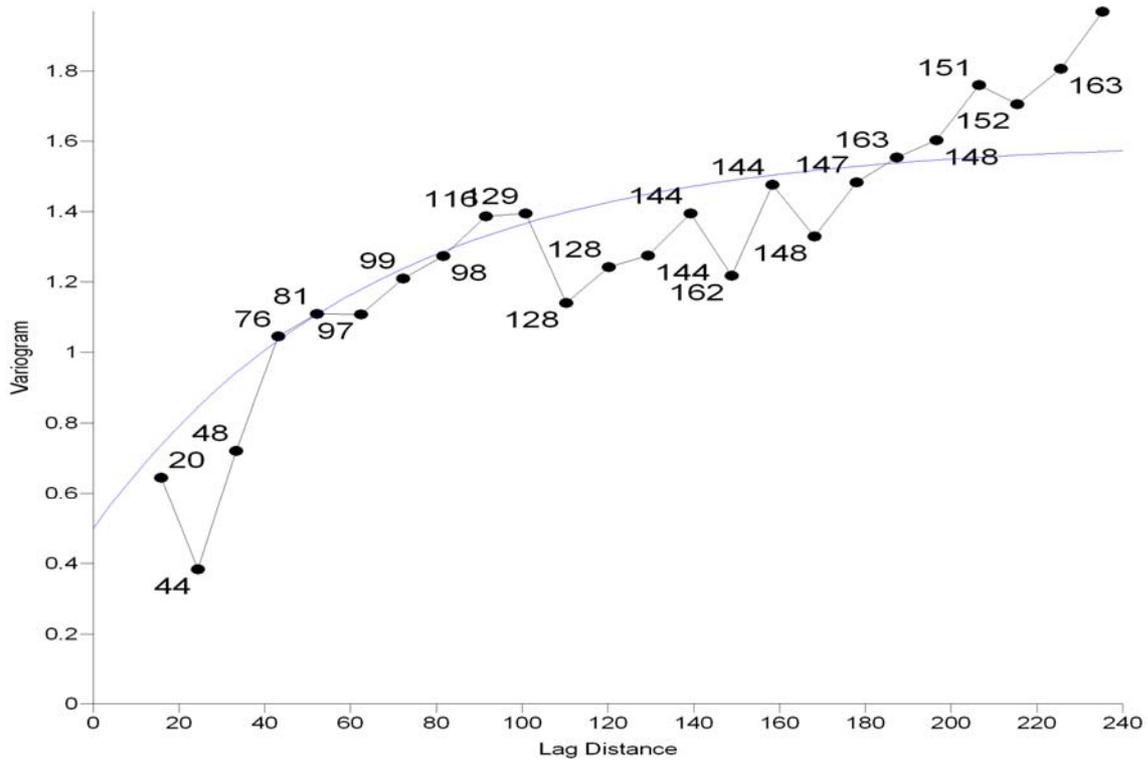


Abbildung 97: Schneemächtigkeit in Meter vom 21.03.2005



Schneemächtigkeit [m] vom 22.04.2005  
 Direction: 0.0 Tolerance: 45.0

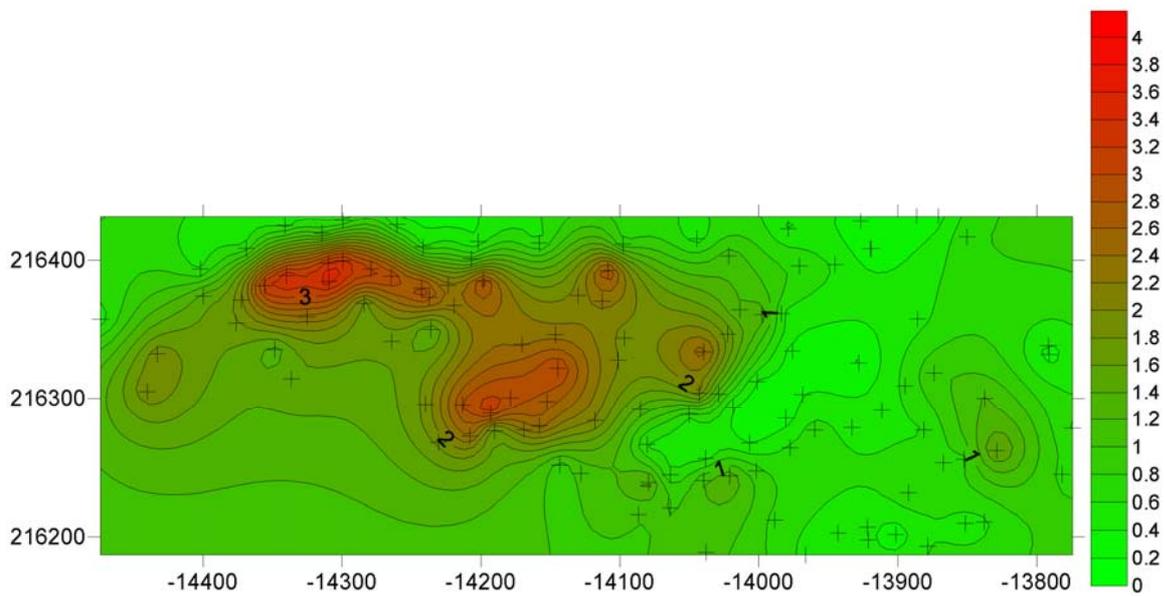
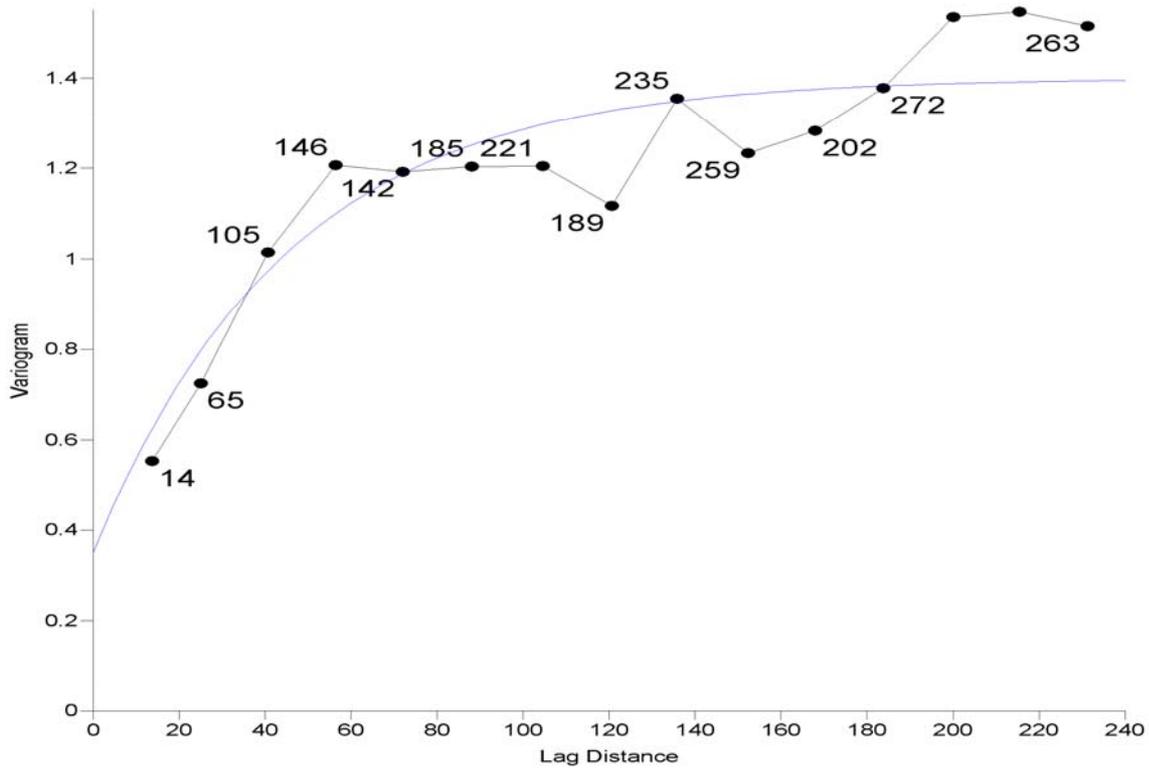


Abbildung 98: Schneemächtigkeit in Meter vom 22.04.2005



Schneemächtigkeit [m] vom 07.02.2005 Baufeld 3  
 Direction: -90.0 Tolerance: 90.0

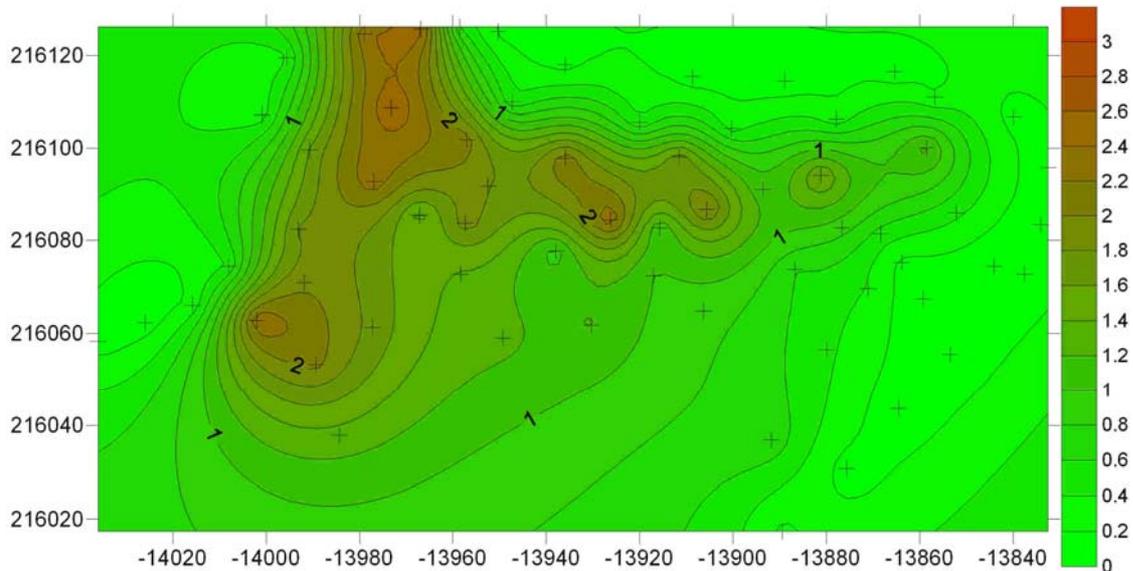
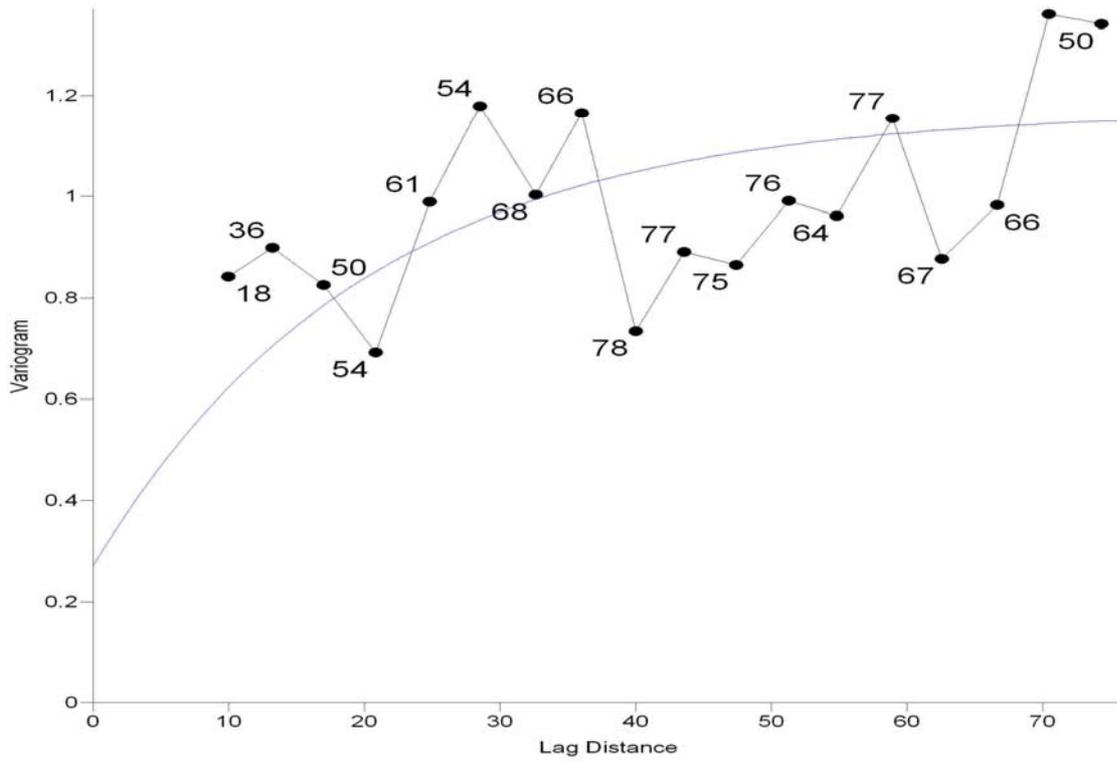


Abbildung 99: Schneemächtigkeit in Meter vom 07.02.2005 Baufeld 3



Schneemächtigkeit 21.03.2005 Baufeld 3  
 Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

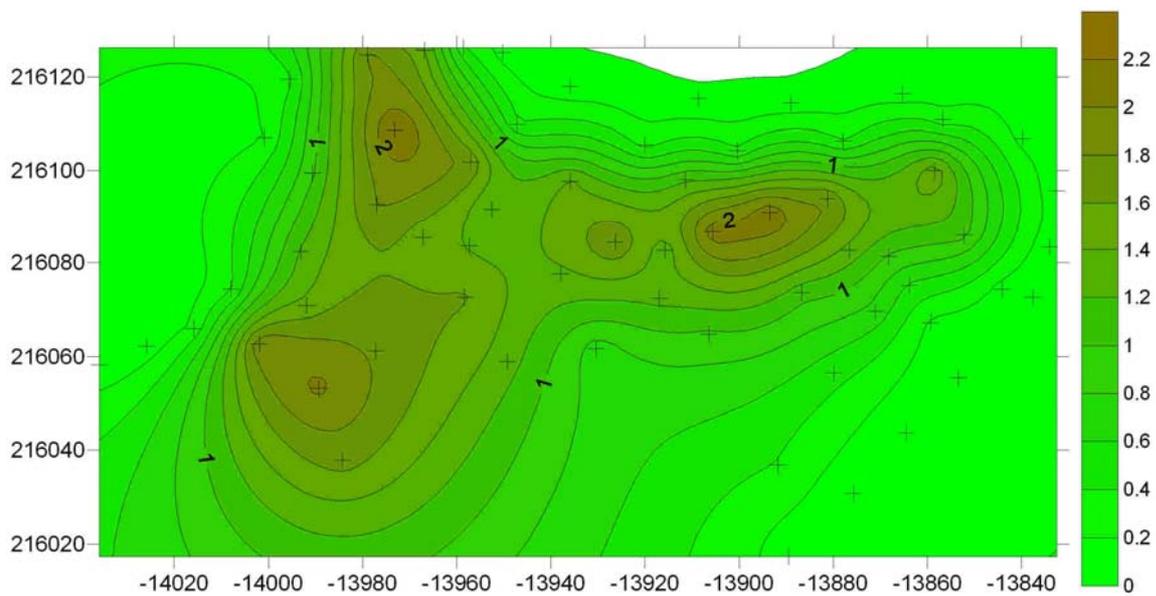
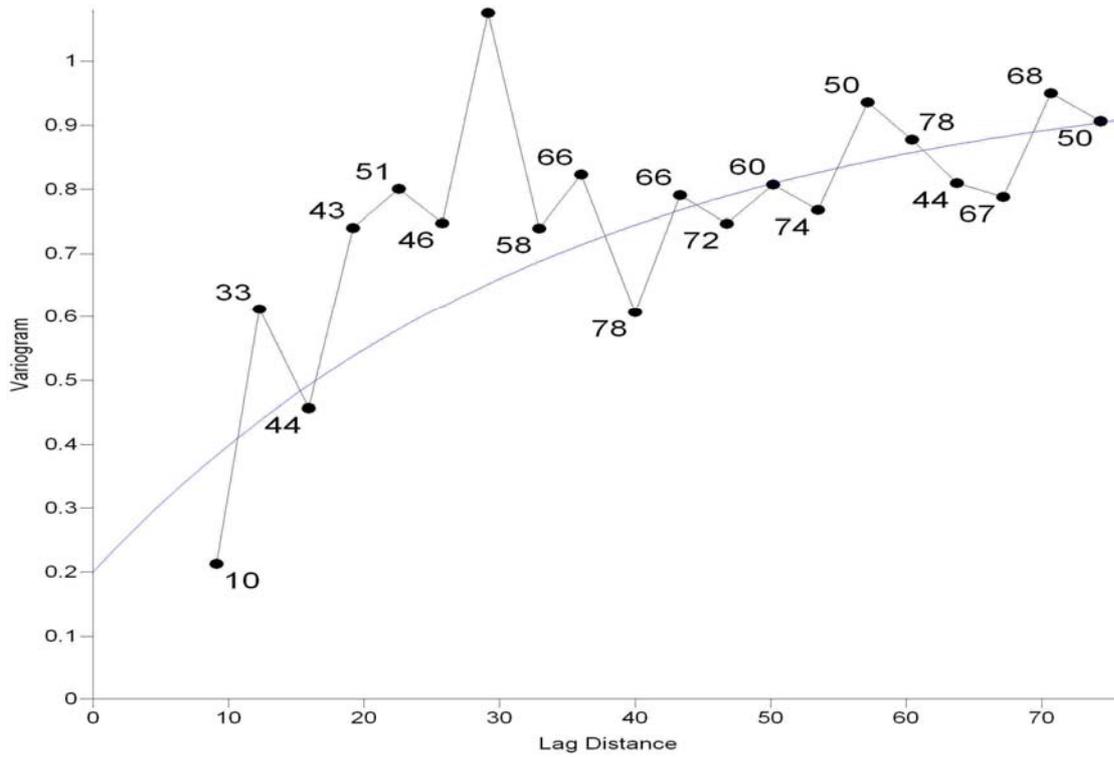


Abbildung 100: Schneemächtigkeit in Meter vom 21.03.2005 Baufeld 3



### **11.3.2 Geostatistische Auswertung mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst**



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 24.01.2004

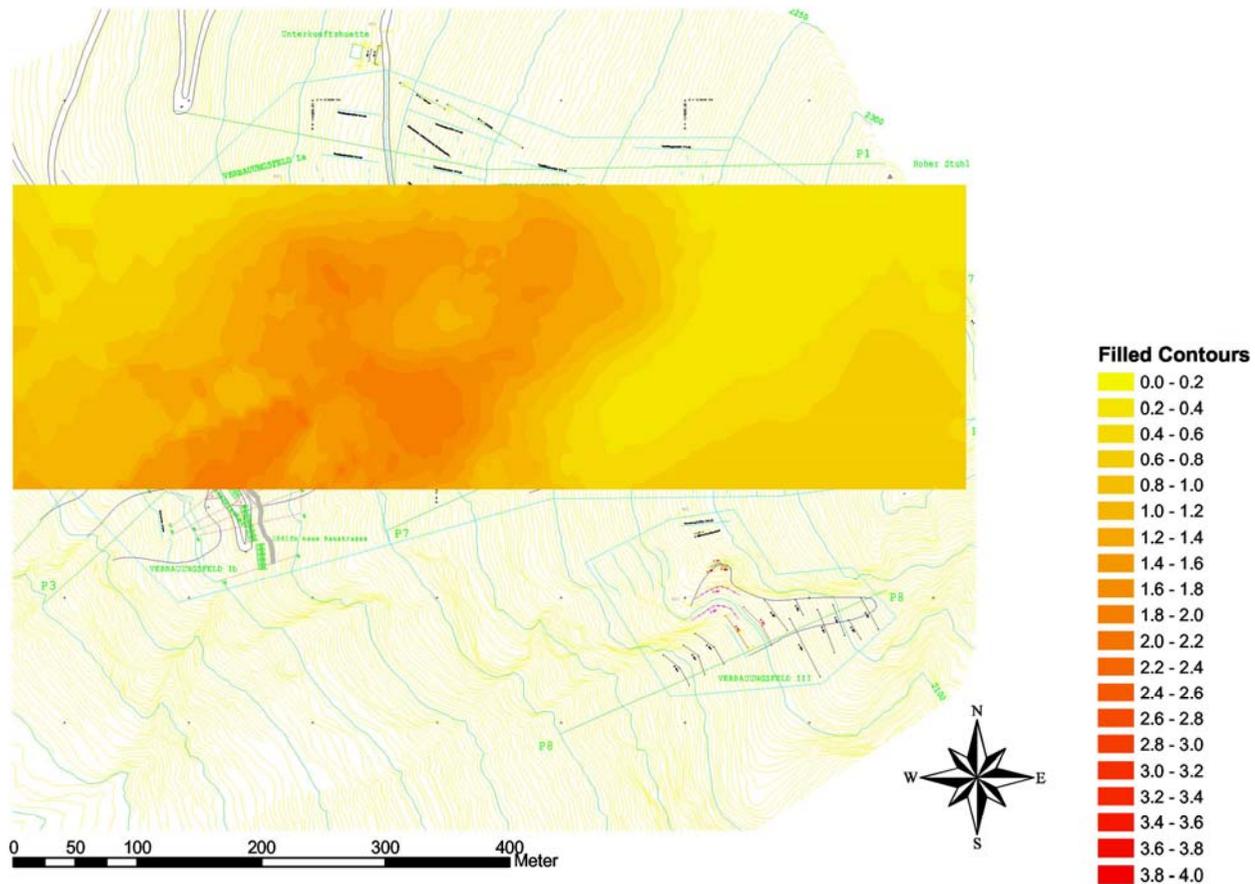


Abbildung 101: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 24.01.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 02.02.2004

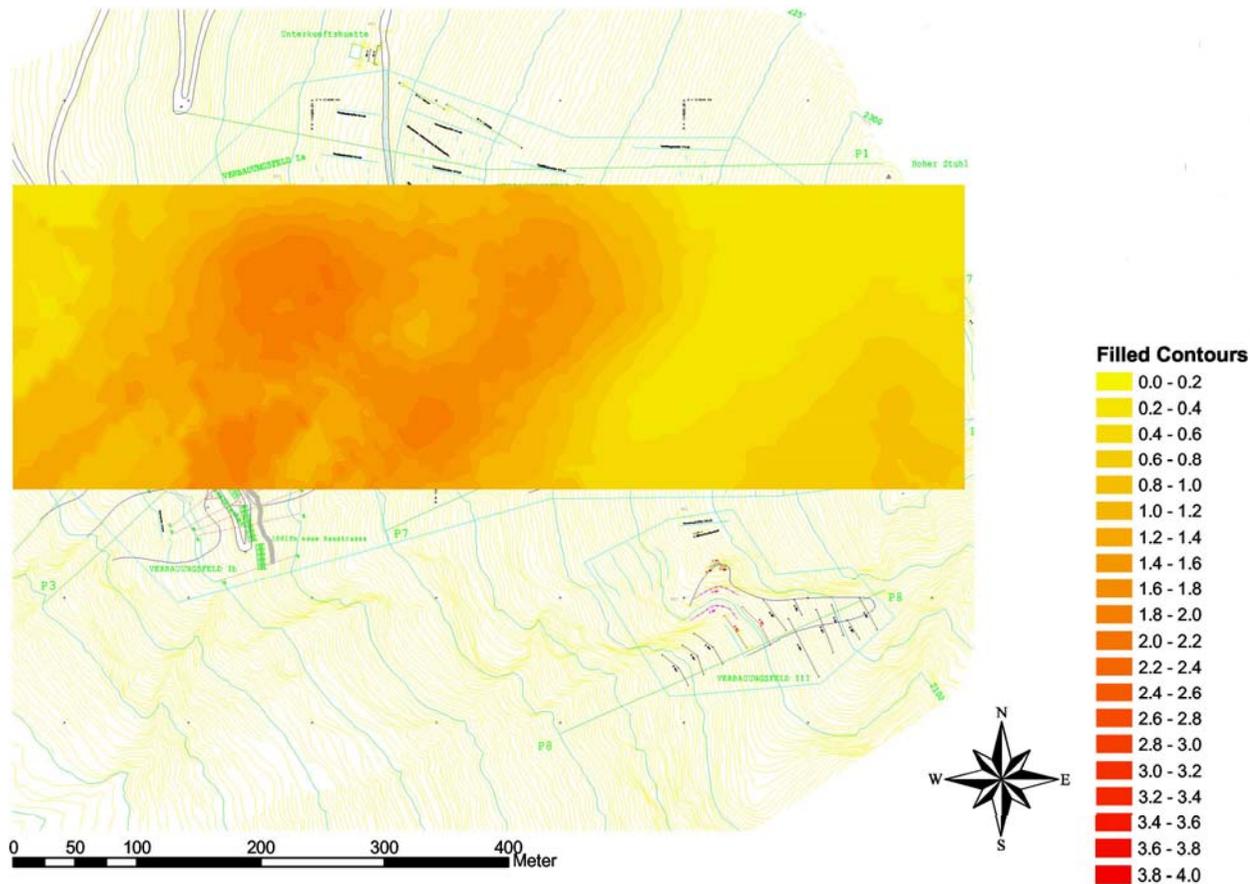


Abbildung 102: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 02.02.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.02.2004

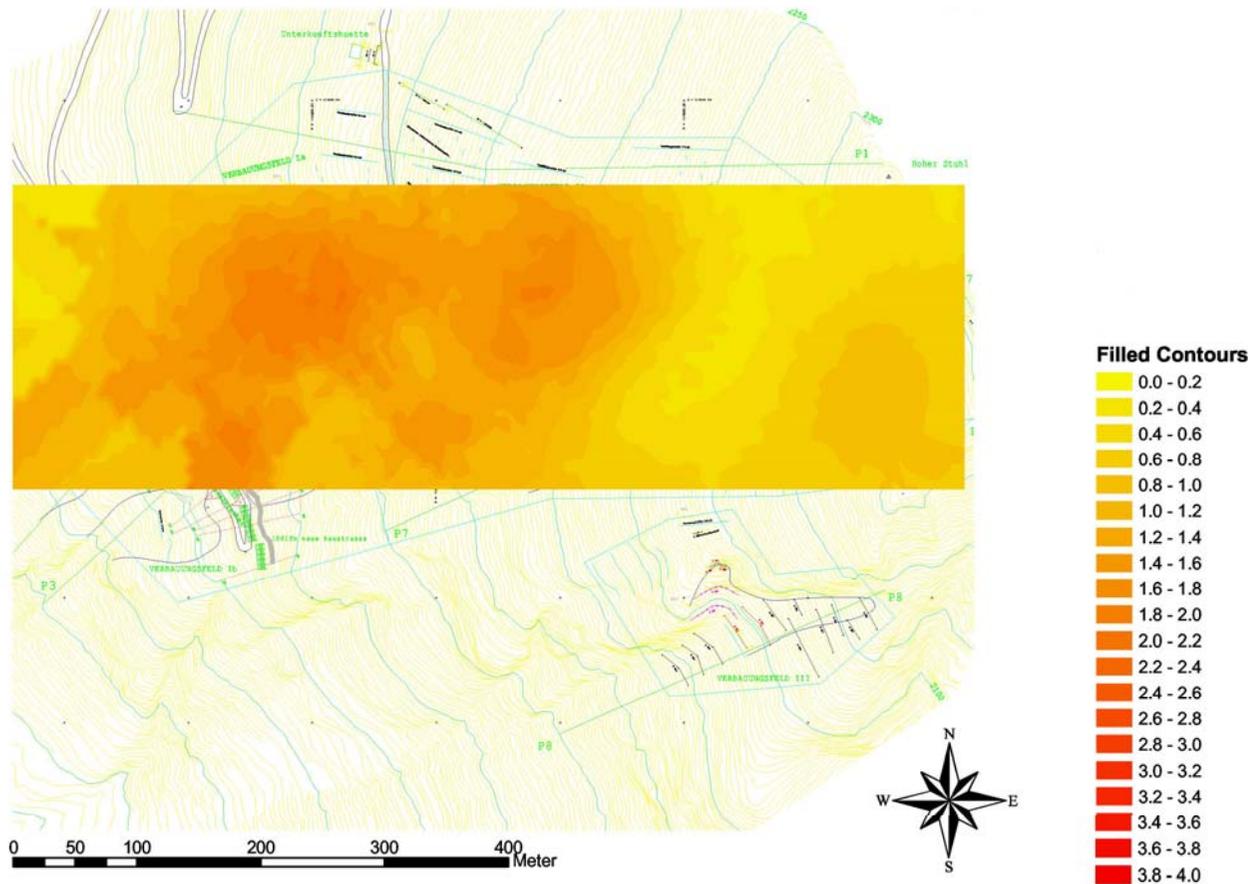


Abbildung 103: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.02.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004

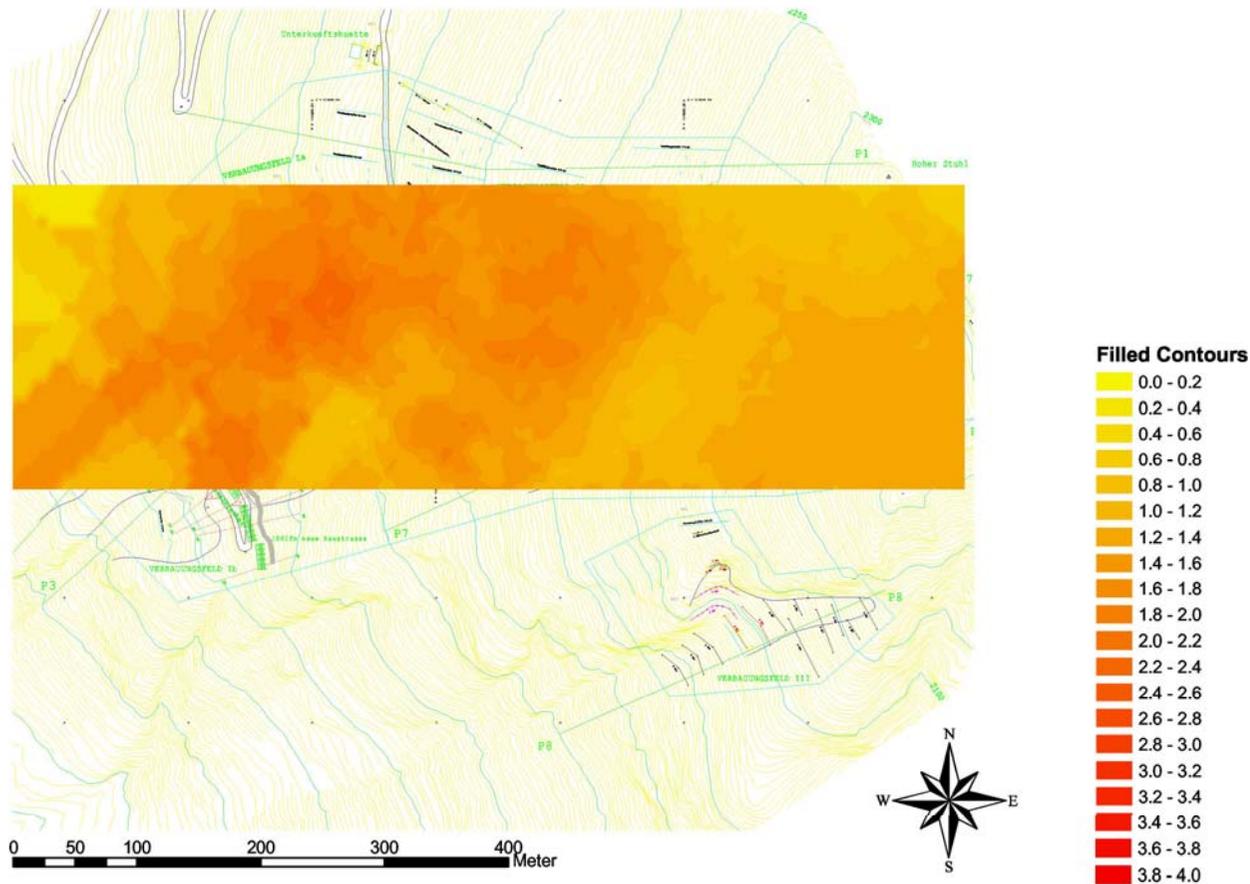


Abbildung 104: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 04.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004

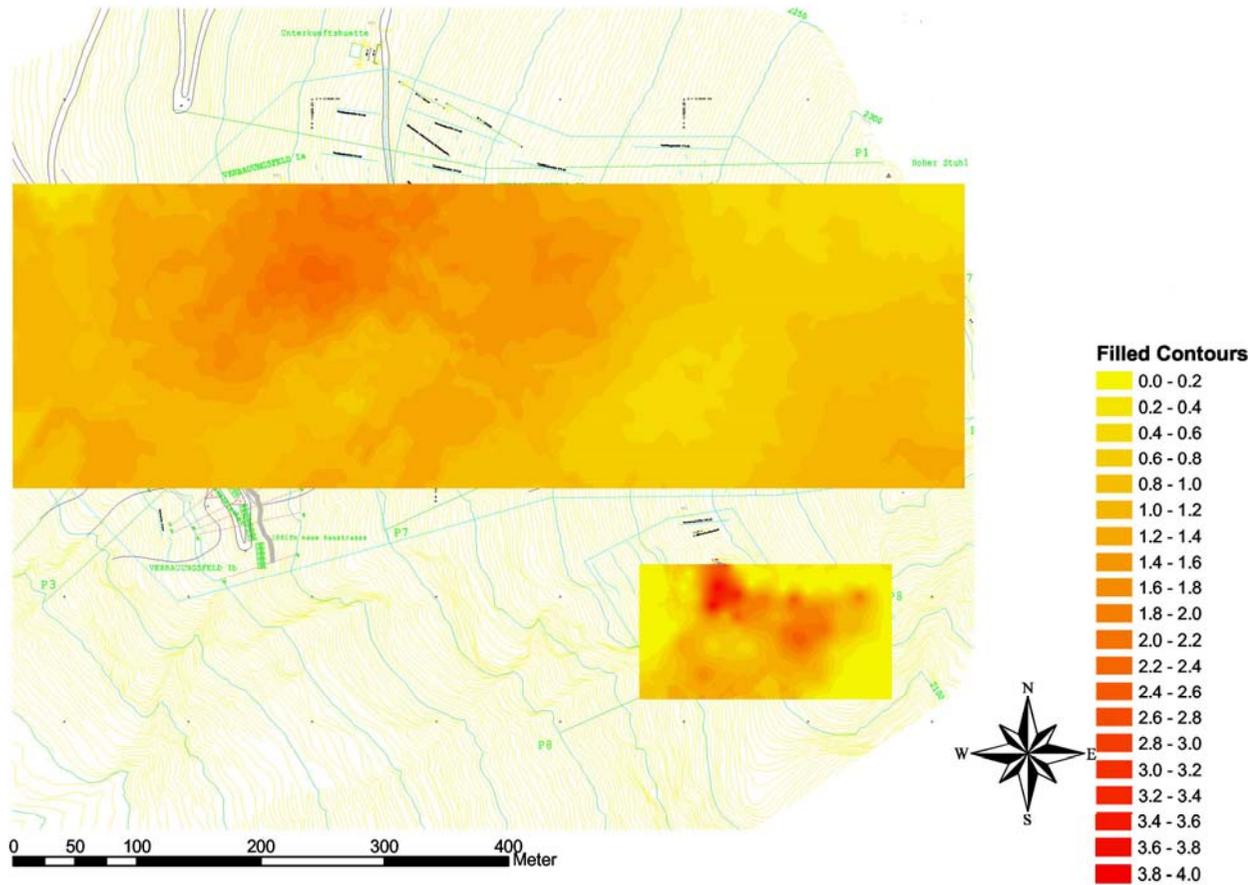


Abbildung 105: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 17.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004

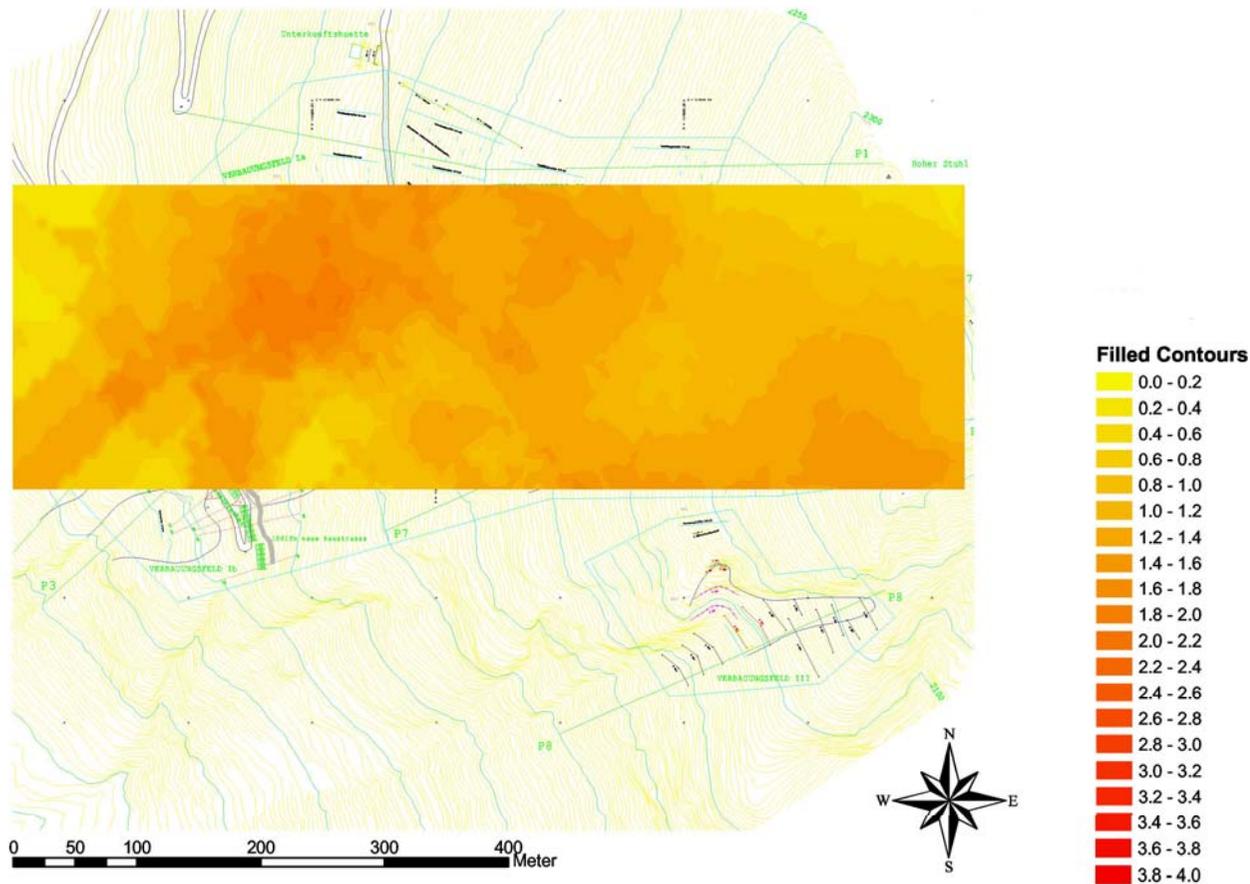


Abbildung 106: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 30.03.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.04.2004

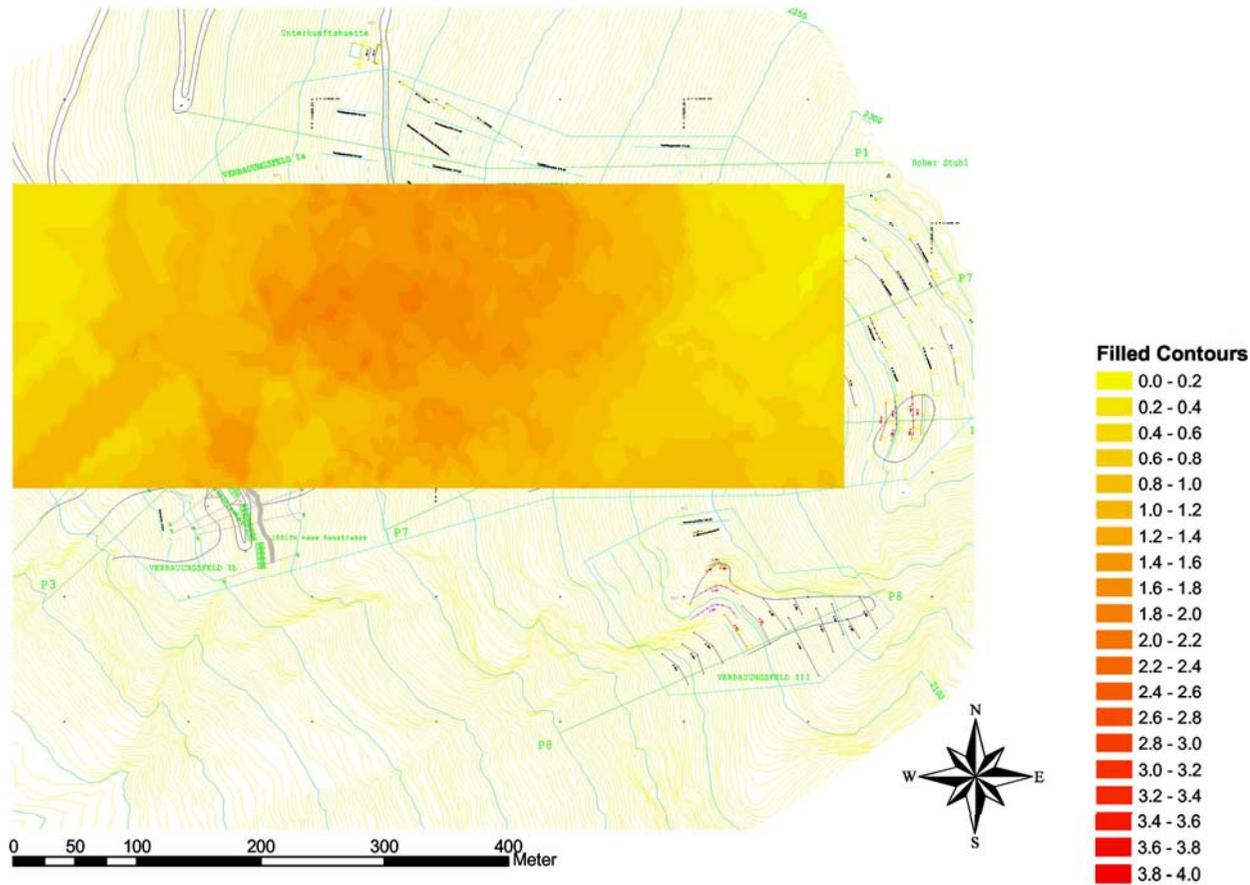


Abbildung 107: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 20.04.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 11.05.2004

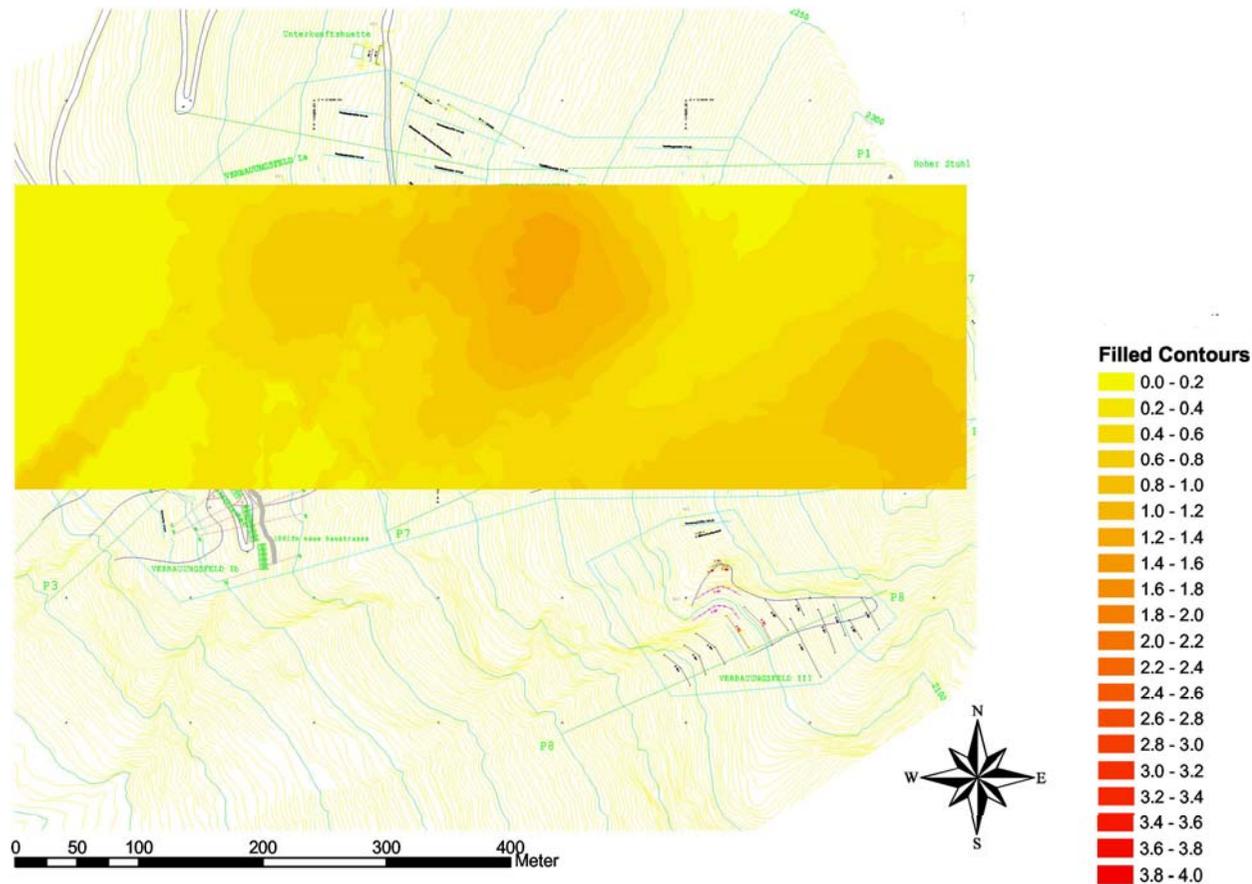


Abbildung 108: Geostatistische Auswertung der Schneemächtigkeit vom 11.05.2004 mit dem Programm ArcGis Geostatistical Analyst



## **11.4 Schneeprofile**

### **11.4.1 Schneeprofil 1**



Ort: **Feuersang 1**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

Beobachter: Chiari

Exposition: W

Bewölkung: heiter (1/8)

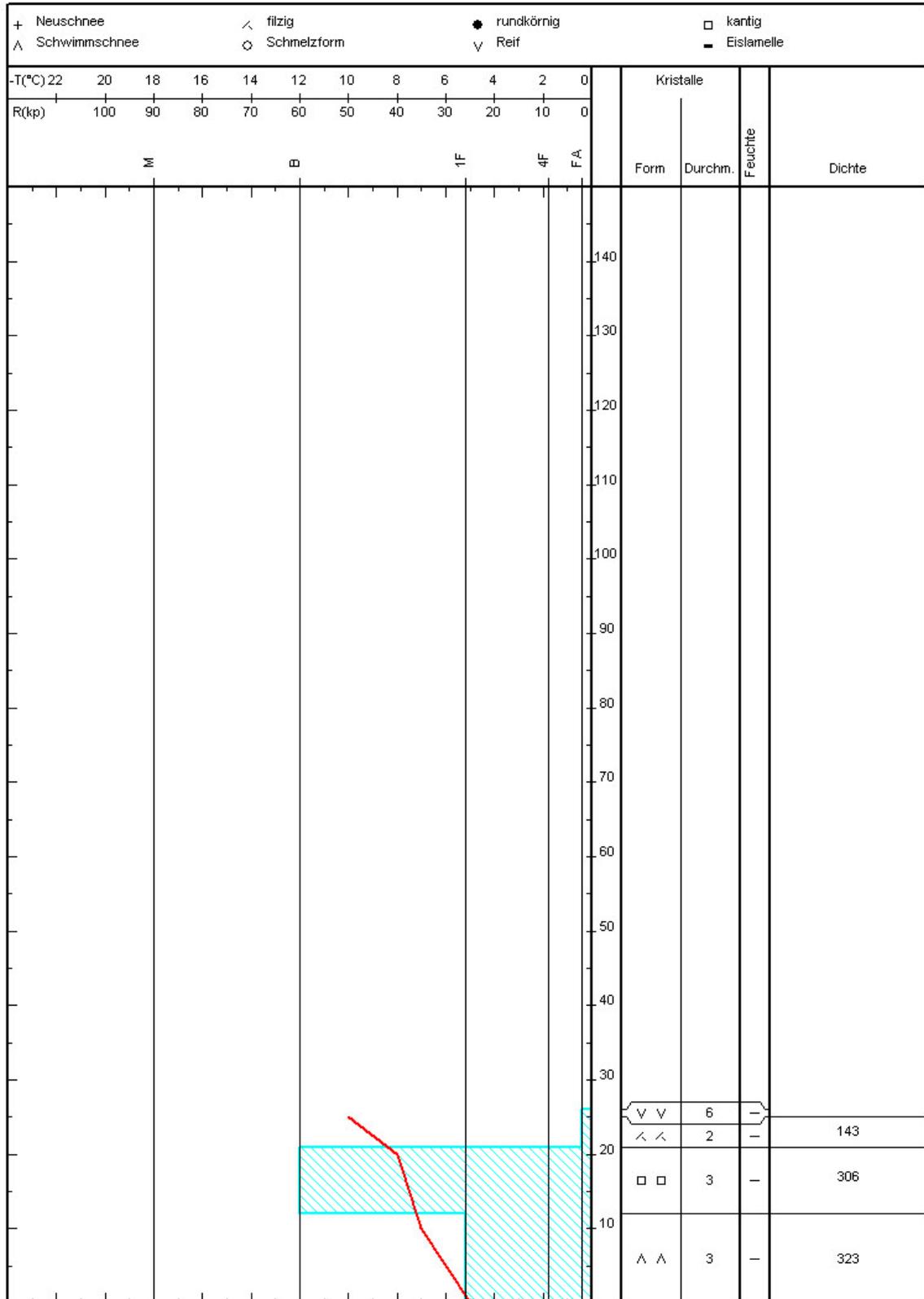
Niederschlag:

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 0 km/h -richtg: 0 Grad

Temp.: -12.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 109: Schneeprofil 1 vom 03.01.2004



Ort: **Feuersang 1**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

**Handprofil**  
24.01.2004/13:00

Beobachter: Chiari

Exposition: W

Bewölkung: sonnig (0/8)

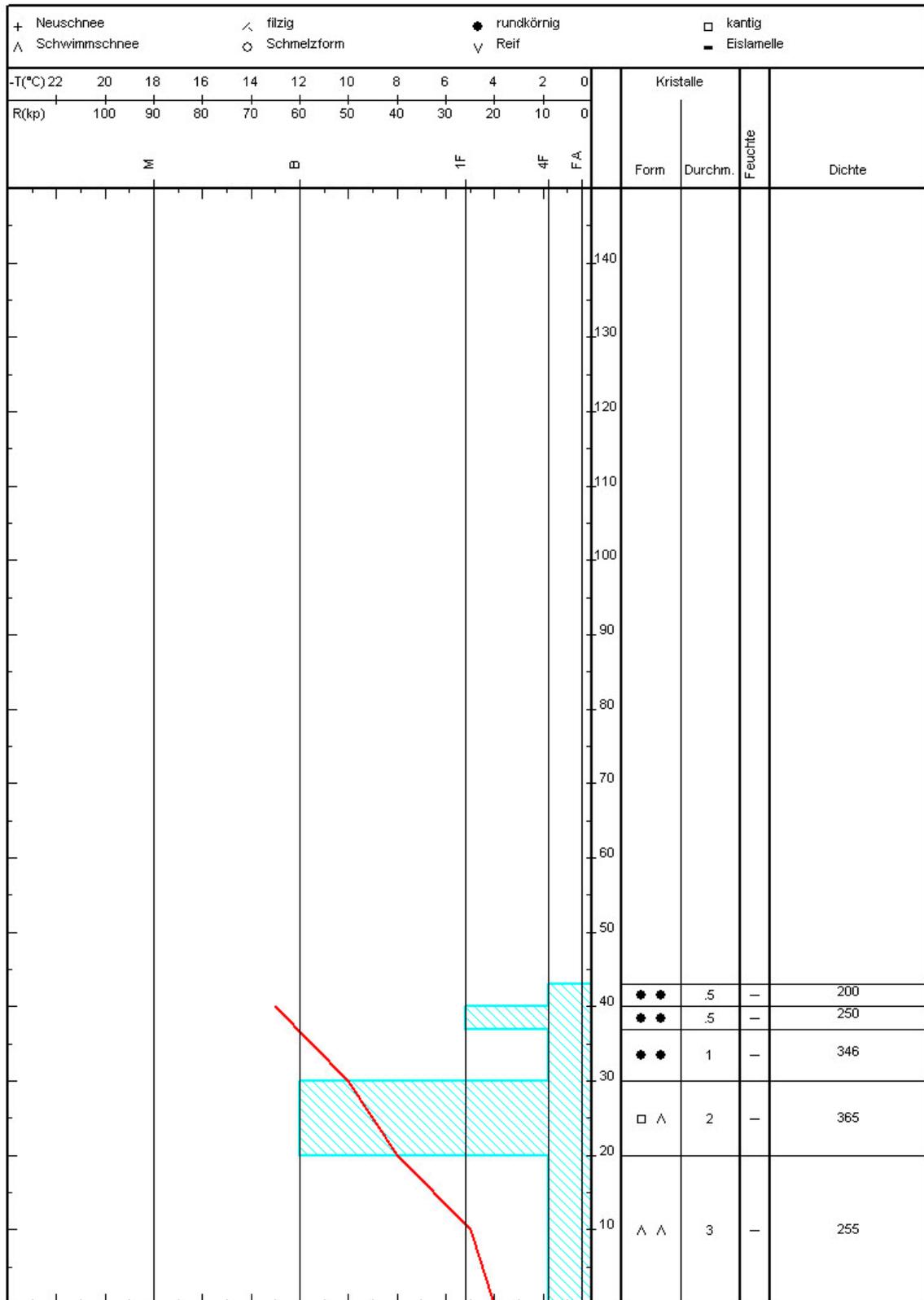
Niederschlag:

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 0 km/h -richtg: 0 Grad

Temp.: -10.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 110: Schneeprofil 1 vom 24.01.2004



Ort: **Feuersang 1**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

**Handprofil**  
02.02.2004/15:30

Beobachter: Chiari

Exposition: W

Bewölkung: heiter (1/8)

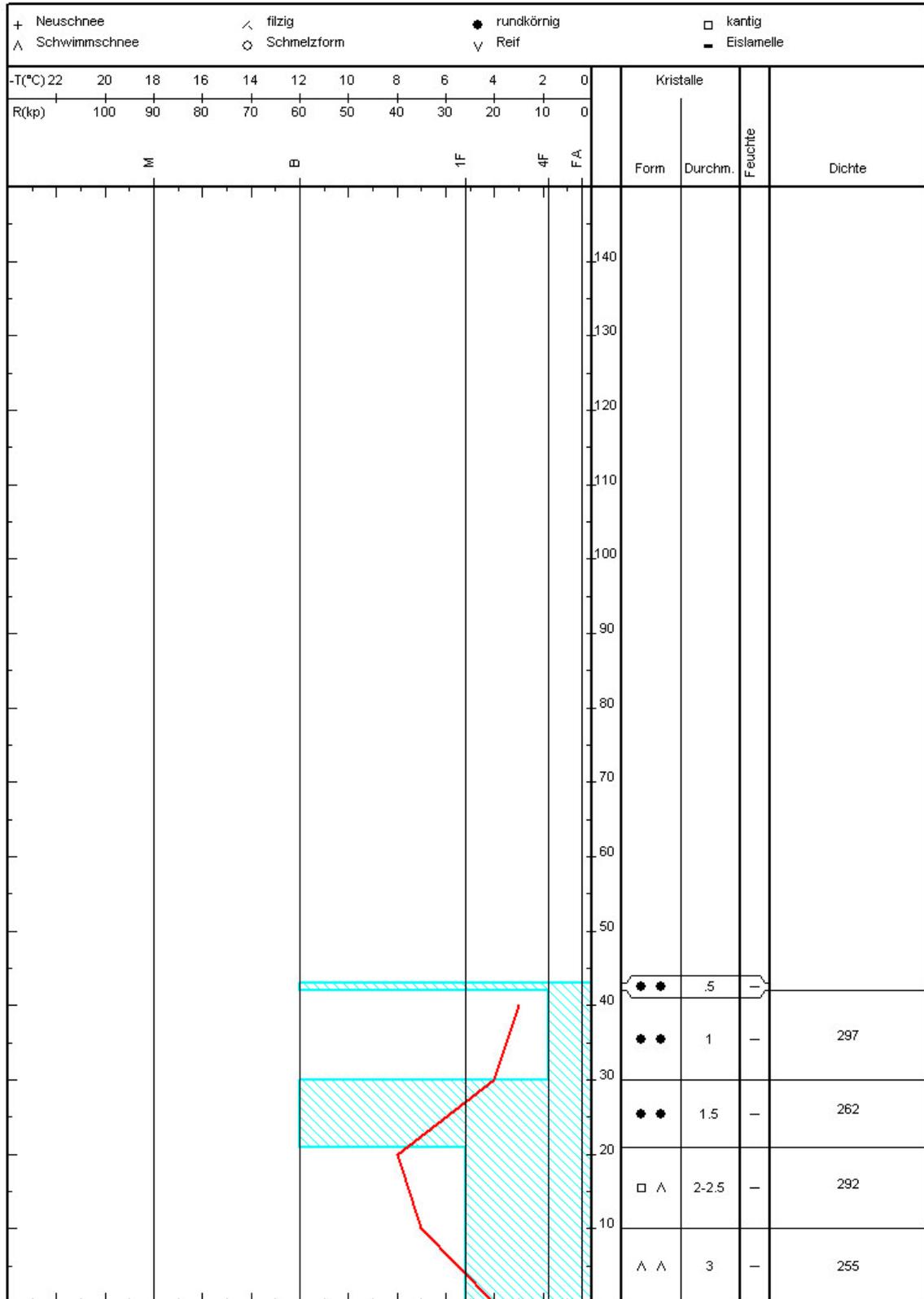
Niederschlag: 0

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 35 km/h -richtg: 350 Grad

Temp.: 0.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 111: Schneeprofil 1 vom 02.02.2004













---

## **11.4.2 Schneeprofil 2**





Ort: **Feuersang 2**

Höhe: **2050 m**

Datum/Zeit:

**Handprofil**  
24.01.2004/12:06

Beobachter: Chiari

Exposition: SW

Bewölkung: sonnig (0/8)

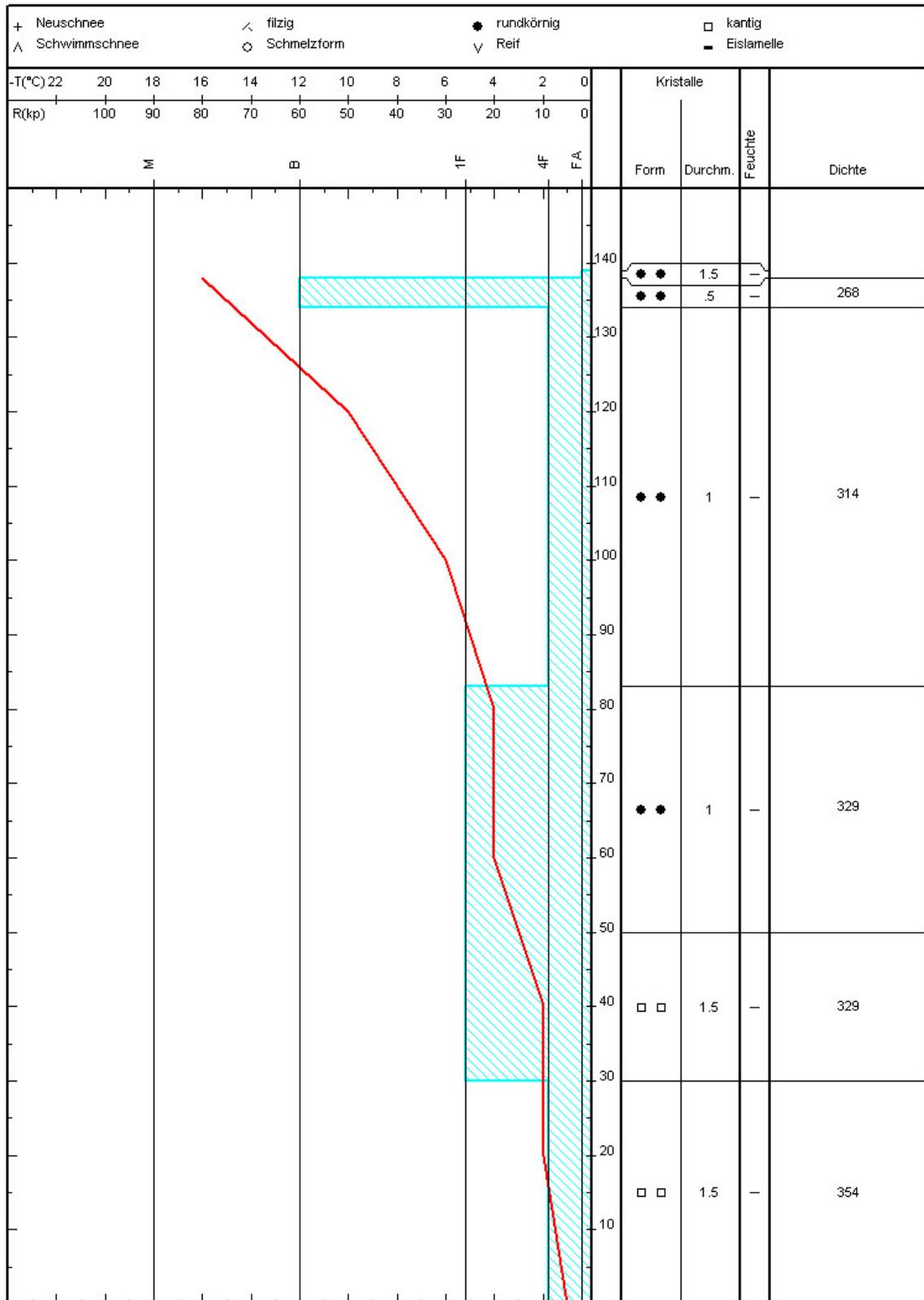
Niederschlag:

Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad

Windst: 0 km/h -richtg: 0 Grad

Temp.: -10.0 °C

Sonstiges:



SPP Version 2.0.1.15 (c) Sommer Mess-Systemtechnik, A-6842 Koblach

Universität f. Bodenkultur

Abbildung 118: Schneeprofil 2 vom 24.01.2004





Ort: **Feuersang 2**  
 Beobachter: Chiari  
 Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad  
 Sonstiges:

Höhe: **2050 m**  
 Exposition: SW  
 Windst: 35 km/h -richtg: 350 Grad

**Handprofil**  
 02.02.2004/14:30

Bewölkung: heiter (1/8)  
 Niederschlag: 0  
 Temp.: 0.0 °C

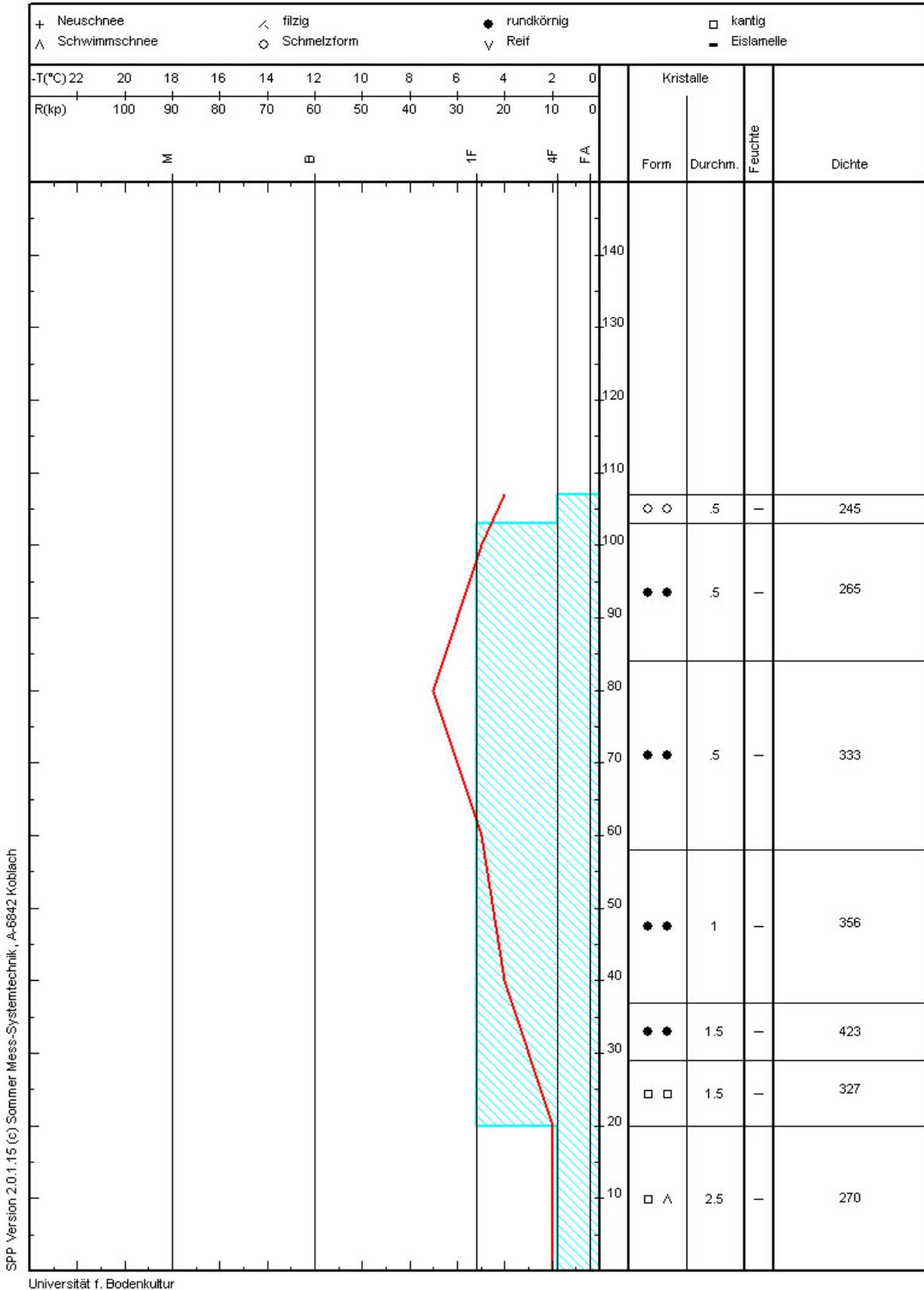


Abbildung 119: Schneeprofil 2 vom 02.02.2004







Ort: **Feuersang 2**  
 Beobachter: Chiari  
 Lage Gleitschicht: --- cm --- Grad  
 Sonstiges:

Höhe: **2050 m**  
 Exposition: SW  
 Windst: 5 km/h -richtg: 0 Grad

Datum/Zeit: **20.04.2004/14:00**  
 Handprofil  
 Bewölkung: Nebel (9/8) Niederschlag: 0  
 Temp.: 2.0 °C

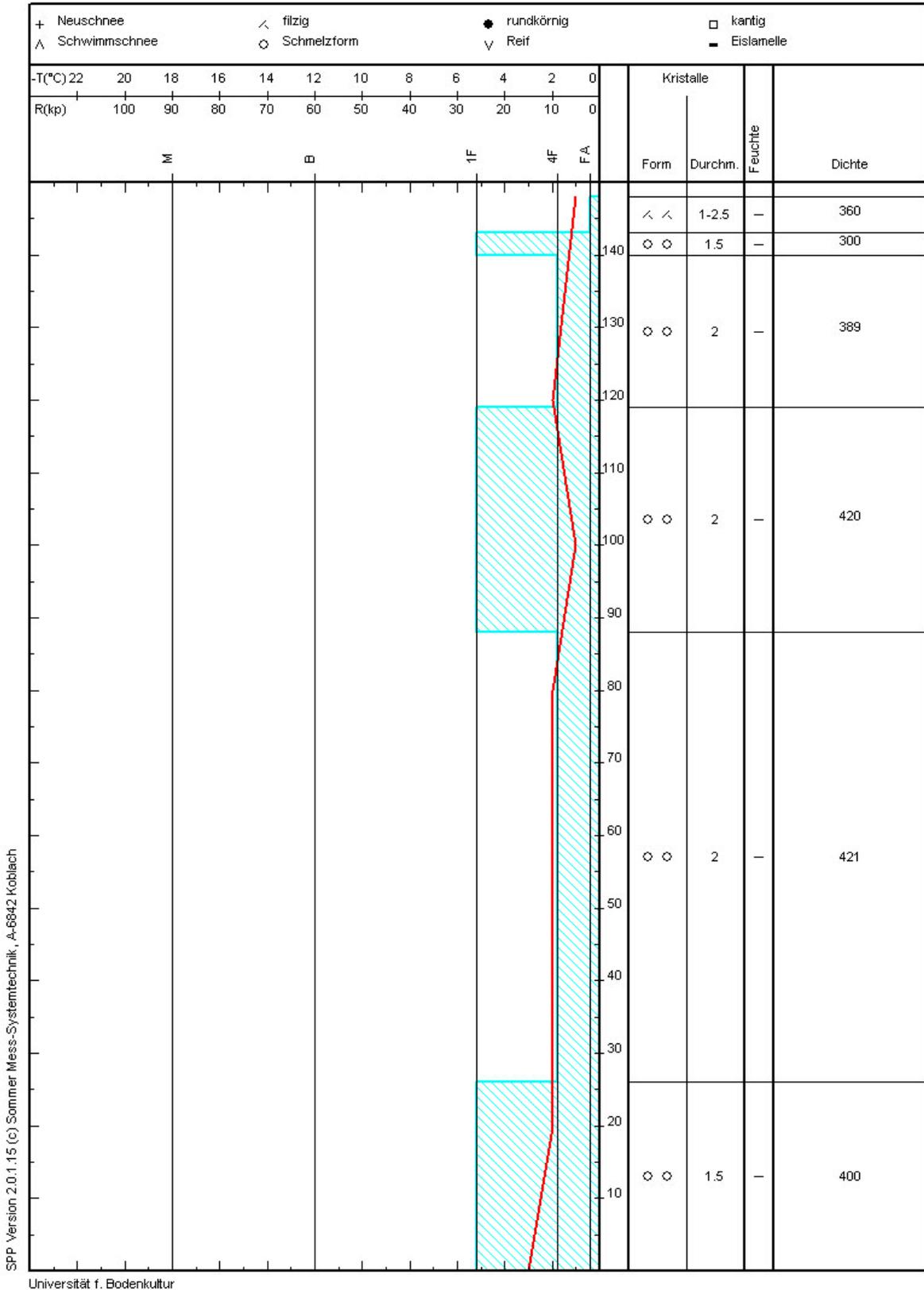


Abbildung 122: Schneeprofil 2 vom 20.04.2004

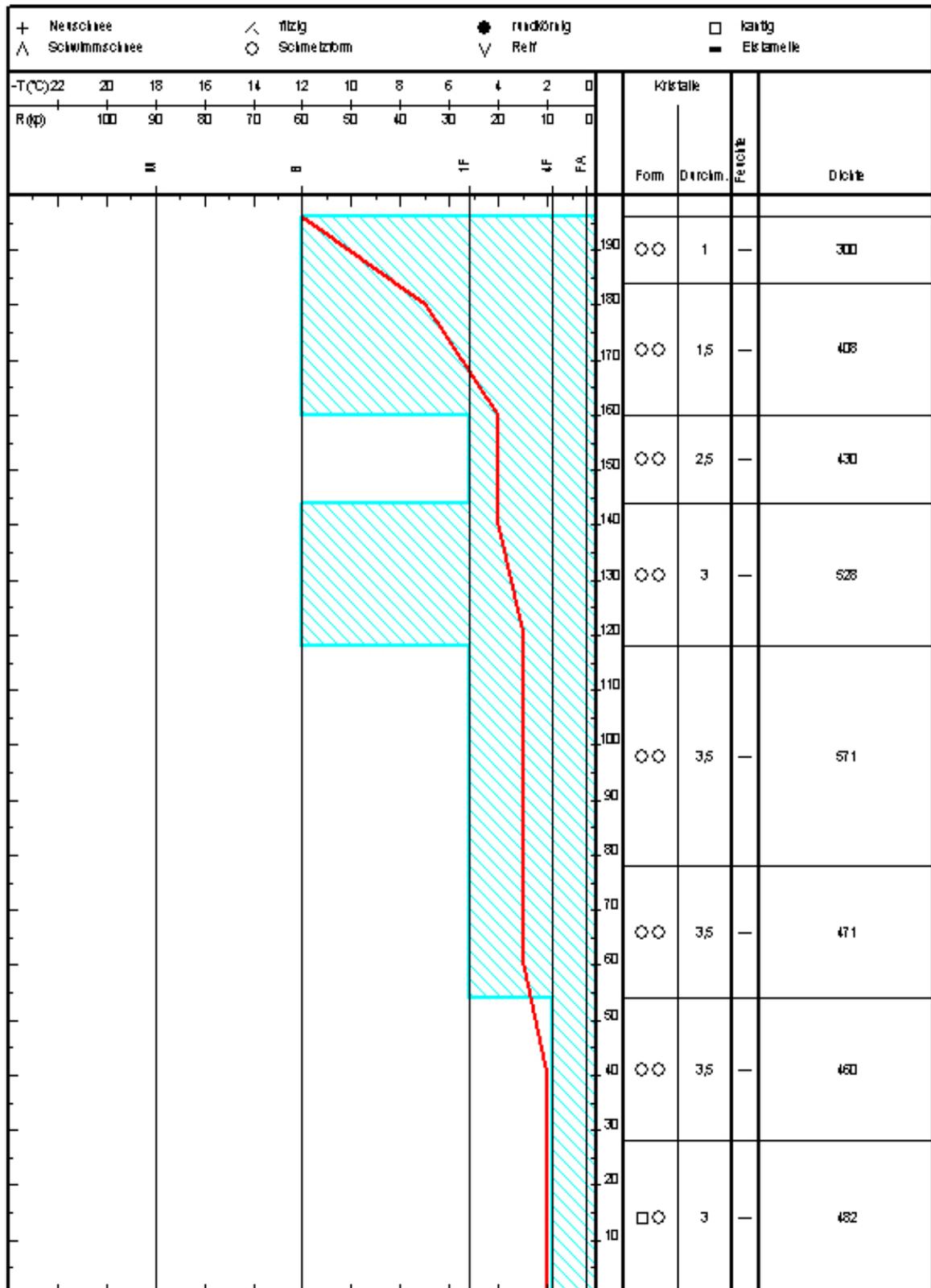




Ort: Feuersang 2  
 Beobachter: Chlari  
 Lage Gleichzeit: — cm — Grad  
 Sonstiges:

Höhe: 2050 m  
 Exposition: SW  
 Windst: 2 km/h -richtung: 0 Grad

Handprofil  
 Datum/Zeit: 22.04.2005/09:00  
 Niederschlag: 0  
 Temp.: -12,0 °C



SPP Version 2.0.1.15 © Sommer Mess-System Technik, A-6542 Köbberl

U. Wiersing, Bodekriter



Abbildung 124: Schneeprofil 2 vom 23.04.2005Q Abbildung \\* ARABIC |122}: Schneeprofil 2 vom 20.04.2004





Ort: Feuersang 2  
 Beobachter: Ch. Hartl  
 Lage: Gleitschicht — cm — Grad  
 Sonstiges:

Höhe: 2050 m  
 Exposition: SW  
 Windst: 2 km/h -richtung: 0 Grad

Handprofil  
 Datum/Zeit: 22.04.2005/09:00  
 Niederschlag: 0  
 Temp.: -12,0 °C

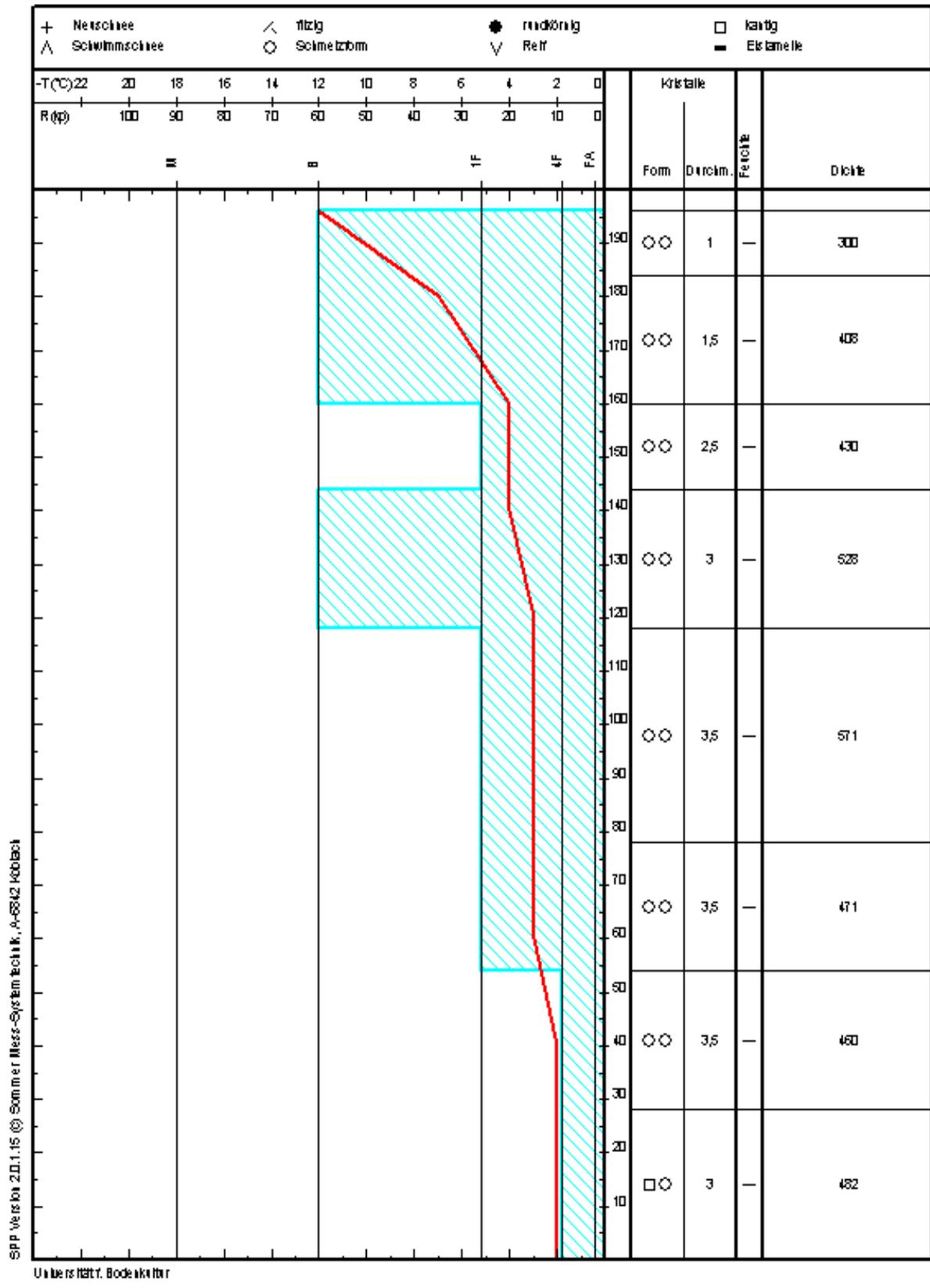


Abbildung 126: Schneeprofil 2 vom 23.04.2005