

Auftraggeber **Amt für Umwelt Graubünden**
Gürtelstraße 89
CH-7001 Chur

**Erstellen eines flächendeckenden Screening-
Modells zur Ermittlung der Geruchsausbreitung
in Kaltluftabflüssen für die Ostschweiz
– Machbarkeitsstudie –**

Projekt-Nr.: **02-11_05-FR**
Umfang: **59 Seiten**
Datum: **22. März 2007**
Bearbeiter: **Dr. Rainer Röckle, Diplom-Meteorologe**
Claus-Jürgen Richter, Diplom-Meteorologe

iMA
Eisenbahnstraße 43
D-79098 Freiburg
Tel. 0049 (0)761/ 202 1661
Fax 0049 (0)761/ 202 1671
Email: info@ima-umwelt.de

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	3
2	KONZEPT.....	3
2.1	FRAGESTELLUNGEN IN DER PRAXIS	3
2.2	KALTLUFTABFLUSSMODELLIERUNG	4
3	GRUNDLAGEN KALTLUFTABFLÜSSE	5
3.1	STAND DER FORSCHUNG	5
3.2	ENTSTEHUNG VON KALTLUFTABFLÜSSEN	7
3.3	INTENSITÄT DER KALTLUFTABFLÜSSE	7
3.4	VERTIKALE ERSTRECKUNG DER KALTLUFTABFLÜSSE	8
3.5	ZEITLICHER VERLAUF DER KALTLUFTABFLÜSSE	9
3.6	HÄUFIGKEIT VON KALTLUFTABFLÜSSEN	9
4	KALTLUFTABFLUSSSIMULATIONEN.....	10
4.1	EINGANGSDATEN FÜR DIE BERECHNUNGEN	10
4.2	STRÖMUNGSBERECHNUNGEN.....	12
5	VERGLEICH MIT MESSUNGEN.....	14
5.1	PLAUSIBILISIERUNG ANHAND DER PROFILMESSUNG	15
5.2	VERGLEICH MIT BODENNAHEN MESSWERTEN.....	17
5.2.1	<i>Chur-A13, Chur-Kantonsspital, Rothenbrunnen</i>	18
5.2.2	<i>Neuhausen a.Rhf. - Galgenbuck</i>	23
5.2.3	<i>St. Gallen-Stuelegg, St. Gallen-MeteoSchweiz</i>	26
5.2.4	<i>Zürich-MeteoSchweiz, Wallisellen, Kloten</i>	29
5.2.5	<i>Wädenswil</i>	33
5.2.6	<i>Tänikon</i>	35
5.2.7	<i>Hoechst-Friedhof, Lustenau-Wiesenrain, Dornbirn-ARA2</i>	37
5.2.8	<i>Bludenz, Bleiche</i>	42
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	44
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	45
8	ANHANG A.....	46
8.1	MODELLBESCHREIBUNG	46
8.2	AUSGANGSGLEICHUNGEN	47
8.3	SYMBOLVERZEICHNIS	49
9	ANHANG B.....	50

1 Einleitung

In der Ostschweiz soll für das Gebiet der Ostluft¹ ein Screening-Modell entwickelt werden, das es erlaubt, die Ausbreitung von Gerüchen während nächtlicher Kaltluftabflüsse abzuschätzen. Ein vergleichbares Modell ist bei den Ämtern in Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen im Einsatz.

Das in der Ostschweiz zu untersuchende Gebiet ist aufgrund seiner Topographie mit Mittelgebirgslandschaften Süddeutschlands vergleichbar, so dass wir davon ausgehen, dass das Modell plausible Ergebnisse liefert. Allerdings grenzt es im Süden an die Alpen an, wodurch ggf. gesonderte überregionale Windsysteme entstehen, die die Ausbildung lokaler Kaltluftabflüsse beeinflussen.

Aus diesem Grund wird zunächst eine so genannte Machbarkeitsstudie angefertigt. Diese soll zeigen, ob das Strömungsmodell die wesentlichen Kaltluftabflussbedingungen realistisch erfasst. Dazu werden die Kaltluftabfluss-Simulationen a) ohne Berücksichtigung und b) mit Berücksichtigung der Alpen durchgeführt. Der Vergleich der Simulationen zeigt, wie das Modell den Einfluss der Alpen auf die nächtliche Kaltluftabflusssituation erfasst.

Die Simulationsergebnisse werden mit Messwerten von meteorologischen Messstationen verglichen und auf Plausibilität geprüft.

Die Ergebnisse der Studie sind im folgenden Bericht zusammengefasst.

Überleitend soll an dieser Stelle noch auf das Gesamtkonzept eingegangen werden, damit erkennbar wird, wo und wie die Strömungssimulationsergebnisse in das weitere Vorgehen einfließen.

2 Konzept

2.1 Fragestellungen in der Praxis

Bei der Ausbreitung von Gerüchen nimmt der Bereich „Kaltluftabflüsse“ eine herausragende Stellung ein. Kaltluftabflüsse bilden sich in strukturiertem Gelände (Hänge, Täler) aus und folgen – analog zu Wasser – dem Hanggefälle oder der Talachse. Falls sich eine Geruchsquelle (z.B. ein landwirtschaftlicher Betrieb) innerhalb eines Kaltluftabflusses befindet, werden die entstehenden Geruchsemissionen nur wenig verdünnt und breiten sich schlierenförmig, oft über mehrere Kilometer hinweg, aus.

¹ OSTLUFT ist ein Gemeinschaftsprodukt der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Dazu gehören die Kantone Appenzell Ausserrhoden, Appenzell Innerrhoden, Glarus, Schaffhausen, St.Gallen, Thurgau und Zürich sowie – in Teilbereichen – auch Graubünden.

Kaltluftabflüsse besitzen folgende Eigenschaften:

- Die Strömung ist stabil geschichtet und befindet sich im Übergangsbereich laminar – turbulent: Demzufolge
 - ⇒ verdünnen sich die Gerüche nur wenig
 - ⇒ treten hohe Geruchsstoffkonzentrationen noch in großen Entfernungen auf.
- Die Strömung folgt, je nach Mächtigkeit, den Geländeformen unterschiedlich stark
 - ⇒ Dies bedingt komplizierte Ausbreitungspfade, die eine Zuordnung zwischen Emittent und Einwirkungsort in der Planungsphase oft nur schwer vorhersagen lassen.

Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Ist im zu beurteilenden Fall mit Kaltluftabflüssen zu rechnen
- Ist es möglich / wahrscheinlich, dass Gerüche durch Kaltluftabflüsse vom Emittenten zum Rezeptor ins Beurteilungsgebiet gelangen
- Welche Geruchsintensitäten sind am Einwirkungsort zu erwarten
- Ist der zu beurteilende Standort für emittierende Anlagen gut / weniger gut / nicht geeignet

2.2 Kaltluftabflussmodellierung

Kaltluft bildet sich in windschwachen wolkenarmen Nächten durch Abkühlung der bodennahen Luft an den Oberflächen. In ebenem Gelände bleibt diese bodennahe Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände setzt sie sich infolge der horizontalen Dichteunterschiede hangabwärts in Bewegung. In Geländeeinschnitten fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Talabwind (=Bergwind) entstehen. Die vertikale Mächtigkeit der abfließenden Kaltluft und die Geschwindigkeit des Abflusses hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebiets, der Kaltluftproduktionsrate, dem Talgefälle und den Rauigkeiten im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Als Leitlinien des Kaltluftabflusses treten talwärts führende Einsenkungen des Geländes wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen in Erscheinung.

Zur Berücksichtigung dieses instationären Prozesses werden Simulationen mit einem Modell durchgeführt, das die Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen berechnet. Dieses Screening-Modell wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg für das gesamte Gebiet von Baden-Württemberg angewandt und liefert eine gute Übereinstimmung mit Beobachtungen und Messungen. Es ermöglicht den Genehmigungs- und Überwachungsbehörden, Konflikte, die sich aufgrund geruchsemittierender Betriebe in Hang- und Tallagen ergeben, im Vorfeld von Planungen zu erkennen und deren Relevanz einzuschätzen. Ebenso können vorhandene Beschwerden im Hinblick auf ihre Plausibilität überprüft werden.

Für die Simulationen werden zwei Zeitpunkte betrachtet:

Zeitpunkt 1: Zu Beginn der Kaltluftabflüsse

Kurz vor Sonnenuntergang bilden sich Hangabwinde aus. In Tälern werden diese im weiteren Verlauf von stärkeren Talabwinden überlagert.

Zeitpunkt 2: Im weiteren Verlauf der Nacht

Einige Zeit nach dem Einsetzen der Hangabwinde entwickeln sich die intensiveren Bergwinde (Talabwinde), die in Tälern die Hangabwinde überlagern. Diese Strömungen können auch mehrere Kilometer in die den Tälern vorgelagerten Ebenen hineinreichen.

Um die Ausbreitung effektiv berechnen zu können, wird für diese beiden Termine eine Datenbank angelegt. Die Datenbank enthält für jeden Gitterpunkt Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit und Höhe der fließenden Kaltluft. Das Ausbreitungsmodell berechnet auf der Basis dieser Strömungen die jeweilige Immissionssituation.

3 Grundlagen Kaltluftabflüsse

Die in den Tagstunden auftretenden Hangauf- bzw. Talwinde sind meist sehr turbulent, so dass die Verdünnungsfähigkeit der Atmosphäre hoch ist. Die in den Abend- und Nachtstunden auftretenden Kaltluftströme (Hangab- bzw. Bergwinde) sind jedoch mit stabiler thermischer Schichtung verbunden, so dass sich freigesetzte Luftbeimengungen nur sehr wenig verdünnen.

Kaltluftabflüsse sind deshalb in der Lage, Gerüche über größere Distanzen relativ unverdünnt zu verfrachten.

3.1 *Stand der Forschung*

Kaltluftabflüsse sind seit langem Gegenstand der Forschung. Erste Veröffentlichungen findet man bereits 1919 (Barschall) oder 1932 (Wagner). Eine Zusammenstellung früher deutscher und österreichischer Untersuchungen zu Kaltluftabflüssen findet sich bei Defant (1951). Im Vordergrund solcher Untersuchungen stehen häufig lokalklimatische Phänomene wie z.B. Frostgefährdung in Kaltluftstaubereichen (King, 1973), Frischluftzufuhr in Siedlungsgebiete durch Kaltluftströme usw..

In den Jahren 1979 bis 1995 wurden in den Vereinigten Staaten zahlreiche Projekte durchgeführt, die sich mit Kaltluftabflüssen und der Ausbreitung in strukturiertem Gelände befassen. Die unter dem Oberbegriff ASCOT („Atmospheric Studies in COmplex Terrain“) erarbeiteten Studien befassten sich mit Messungen in Tälern, Modellentwicklungen und deren Anwendungen. Beschreibungen von Tracerexperimenten in Kaltluftabflüssen finden sich z.B. in

Gudiksen et. al. (1984) und Banta et. al. (1996). Tracerexperimente und anschließende Ausbreitungsmodellierungen wurden von Poulos et. al. (1995) durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen ging es hauptsächlich um die Ausbreitung kontinuierlich in unterschiedlichen Höhen freigesetzter Spurenstoffe. Gemessen wurden zeitliche Mittelwerte der Konzentration an mehreren Bögen im Umkreis der Quelle. Zusätzlich wurden teils umfangreiche meteorologische Messungen durchgeführt. Die Messungen zeigen, dass die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse vor allem an der Mündung mehrerer Täler in die Ebene sehr komplex sein können.

Messungen von Kaltluftabflüssen in neuerer Zeit wurden in Deutschland überwiegend im Rahmen von stadtklimatologischen Begutachtungen durchgeführt. Hier standen die Durchlüftungsverhältnisse von Siedlungen im Vordergrund.

Spezielle Traceruntersuchungen zur Dokumentation von Ausbreitungspfaden und Verdünnungsverhältnissen wurden sporadisch im Rahmen von Geruchsgutachten an Standorten mit Kaltluftabflüssen, vorzugsweise Deponien, angestellt (Kleiser et. al. 1994; Kuttler 1996; Röckle, et. al., 1998, Röckle et.al., 2003). Hier wurde am Standort der geplanten Anlage zu Zeiten mit Kaltluftabfluss ein inertes Gas (meist SF₆) freigesetzt. Mittels Gasmäusen oder mobiler Messapparaturen wurde die Konzentration an mehreren Punkten im Wirkungsbereich des Kaltluftabflusses gemessen. Aus der räumlichen Verteilung und der Höhe der Konzentrationen konnte auf die Ausbreitungsverhältnisse geschlossen werden.

Bei existierenden Anlagen, die z.B. erweitert werden sollen, kann auch durch Begehungen in wolkenarmen Nächten festgestellt werden, wo Belastungsschwerpunkte liegen und wie weit die Geruchsfahne in betroffene Gebiete eindringt (Steinheider et. al., 1998).

Die numerische Modellierung von Kaltluftabflüssen erfordert, dass die Thermo- und Strömungsdynamik von Kaltluftsystemen in realistischer Weise simuliert wird. Die Genauigkeit der Modellergebnisse hängt von den Eingabedaten, insbesondere der Geländestruktur und der Flächennutzung, ab. Ein Beispiel für 3dimensionale Strömungsberechnungen findet sich z.B. bei Groß (1989). Für kleinräumige Fragestellungen werden häufig vertikal integrierte Modelle eingesetzt, da sie bei hoher horizontaler Auflösung große Gebiete behandeln können. Für Ausbreitungsfragen wird diesen Strömungsmodellen ein entsprechendes Ausbreitungsmodul nachgeschaltet. Bevorzugt werden hierfür Partikelmodelle eingesetzt, da sie zum einen keine numerische Diffusion aufweisen und zum anderen geeignet sind, die komplexen Strömungsverhältnisse zu berücksichtigen.

Spezielle Arbeiten zur Ausbreitung von Gerüchen in Kaltluftabflüssen sind nicht bekannt. Es gibt jedoch Untersuchungen zu Gerüchen aus Tierhaltungsbetrieben, in denen auf die Problematik der Ausbreitung in Kaltluftabflüssen hingewiesen wird. Dies sind die „Österreichische Abstands-Richtlinie“ (Piringer und Schauburger, 1998) und die „Schweizer Verordnung“ (Richner und Schmidlin, 1995).

3.2 Entstehung von Kaltluftabflüssen

In klaren windschwachen Nächten ist die Energieabgabe der Boden- und Pflanzenoberflächen aufgrund der langwelligen Ausstrahlung größer als die Gegenstrahlung der Luft. Dieser Energieverlust verursacht eine Abkühlung der Boden- und Pflanzenoberfläche unter die Lufttemperatur. Durch molekularen und turbulenten Wärmeaustausch zwischen Pflanze und Umgebungsluft bildet sich somit eine bodennahe Kaltluftschicht. Diese ist umso ausgeprägter je negativer die Strahlungsbilanz, je geringer die Wärmezufuhr aus dem Boden und je schwächer der Massenaustausch mit der darüber liegenden Luftschicht ist.

In ebenem Gelände bleibt diese bodennahe Kaltluft an Ort und Stelle liegen. In geneigtem Gelände setzt sie sich infolge der horizontalen Dichteunterschiede hangabwärts in Bewegung. Dieser Prozess ist von der Hangneigung und dem Dichteunterschied abhängig. Die hangparallel wirkende Reibungskraft bremst die abfließende Luft. Die beschriebenen Vorgänge sind in der Regel instationär, d.h. es kommt zu "pulsierenden" Kaltluftabflüssen.

In Geländeeinschnitten fließen die Hangabwinde zusammen und es kann ein mehr oder weniger mächtiger Talabwind (=Bergwind) entstehen. Die vertikale Mächtigkeit der abfließenden Kaltluft und die Geschwindigkeit des Abflusses hängen im Wesentlichen von der Fläche des Einzugsgebiets, der Kaltluftproduktionsrate, dem Talgefälle und den Rauigkeiten im Talbereich ab. Die Fließrichtung wird durch die Geländeform bestimmt. Als Leitlinien des Kaltluftabflusses treten talwärts führende Einsenkungen des Geländes wie z.B. Seitentäler, Schluchten und Rinnen in Erscheinung.

In tiefer gelegenen konkaven Geländeformen wie z.B. in Tälern, Talkesseln, Schluchten und Mulden sammelt sich die Kaltluft und bildet einen Kaltluftsee. In dieser stagnierenden Kaltluft können sich intensive Inversionen ausbilden, die den vertikalen Luftaustausch deutlich reduzieren.

Kaltluftentstehung und -abfluss hängen somit von folgenden Faktoren ab:

- meteorologische Verhältnisse
- Flächennutzung
- Geländeform und -exposition

3.3 Intensität der Kaltluftabflüsse

Da es sich bei Kaltluftströmungen um Dichteströme handelt, unterscheidet sich das vertikale Windprofil deutlich von der Vertikalstruktur der Strömungen, die tagsüber auftreten. Bei letzteren nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu (vgl. Abbildung 3-1 rechts). In Kaltluftströmungen stellt sich dagegen im Bereich zwischen einem Viertel bis zur Hälfte der Kaltlufterhöhe ein Maximum der Windgeschwindigkeit ein (Abbildung 3-1 links).

Bei Hängen mit geringer Rauigkeit und großem Gefälle liegt die Kaltluftmächtigkeit meist unter 10 m. Das Windgeschwindigkeitsmaximum befindet sich im unteren Drittel. Die Windgeschwindigkeiten können dort recht hoch sein (>3 m/s). Ist der Hang bewachsen, mit Gebäuden bestanden oder durch inhomogene Geländestrukturen gekennzeichnet, so führt dies zu größeren Kaltluftmächtigkeiten. Das Windgeschwindigkeitsmaximum verschiebt sich in diesem Fall zur Mitte der Kaltluftschicht. Die Windgeschwindigkeiten sind in diesem Fall allerdings deutlich geringer (Gygax, 1985).

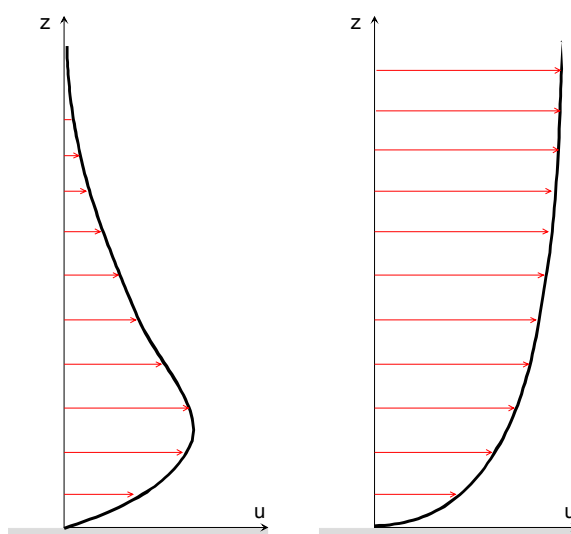


Abbildung 3-1: Typische vertikale Strömungsprofile. links – in einem Kaltluftabfluss, rechts – sonstige Grenzschichtströmungen

Die maximalen Windgeschwindigkeiten bei Hangabwinden (Kaltluftabflüssen am Hang) hängen von zahlreichen topographischen Parametern ab. Bei kleinen horizontalen und vertikalen Erstreckungen liegen die Windgeschwindigkeiten unter 1 m/s. Bei ausgedehnten Hängen können auch höhere Windgeschwindigkeiten auftreten.

Die Windgeschwindigkeiten in Bergwinden (Definition siehe Kapitel 3.1) sind deutlich höher. Abhängig vom Talgefälle und der Größe des Kaltlufteinzugsgebietes können im Maximum Werte bis über 10 m/s auftreten.

Abhängig von der vertikalen Mächtigkeit der Kaltluft, der Fließgeschwindigkeit und der Rauigkeit des Untergrunds setzt sich die Strömung auch in den hang- bzw. talfolgenden Ebenen fort. Die Reichweite liegt je nach Intensität der Strömung zwischen wenigen Metern bei kleinen Hängen und mehreren Kilometern bei größeren Talausgängen.

3.4 Vertikale Erstreckung der Kaltluftabflüsse

Die am Hang abfließende Kaltluft wächst durch Einmischung von Luft aus darüber liegenden Schichten an. Die vertikale Mächtigkeit dieser Strömung kann mit ca. 5% der zurückgelegten Höhendifferenz eines Luftpakets bis zum betrachteten Punkt abgeschätzt werden. Weist ein

Hang eine Höhendifferenz von 200 m auf, so beträgt die vertikale Mächtigkeit des Kaltluftabflusses im Bereich des Hangfußes etwa 10 m.

In Tälern sammelt sich die Kaltluft und fließt entsprechend dem Talgefälle ab. Hier liegen die vertikalen Höhen des Kaltluftflusses, falls kein übergeordneter Wind vorhanden ist, im Niveau der Randhöhen. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit des übergeordneten Windes geht die Kaltluftmächtigkeit zurück.

3.5 Zeitlicher Verlauf der Kaltluftabflüsse

Hangabwinde setzen ein, wenn die Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche negativ wird. Dies ist, abhängig von der Exposition des Hanges, in den Nachmittags- und Abendstunden der Fall. An westexponierten Hängen setzen die Hangabwinde ca. ½ Stunde vor Sonnenuntergang ein. Sie dauern die Nacht über an, sofern sie nicht von einem stärkeren Bergwind überlagert werden. Wenn der Hang am Morgen wieder besonnt bzw. die Strahlungsbilanz positiv wird, endet der Hangabwind. An westexponierten Hängen ist dies ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenaufgang der Fall.

Bergwinde setzen gegenüber den Hangabwinden etwas später ein. Sie beginnen meist erst nach Sonnenuntergang. In den Morgenstunden dauern sie länger an.

3.6 Häufigkeit von Kaltluftabflüssen

Kaltluftabflüsse treten bei windschwachen und gleichzeitig wolkenarmen Wetterlagen auf, da in diesen Fällen gute Ausstrahlungsbedingungen vorliegen und die bodennah gebildete Kaltluftschicht nicht durch Turbulenzen aufgelöst wird.

In großen Tälern bilden sich Kaltluftabflüsse auch bei Wetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten und Bedeckungsgraden aus. Zum Beispiel tritt der Höllentäler (Freiburger Bergwind) auch dann noch auf, wenn die Windgeschwindigkeiten im Feldbergniveau (1500 m) bis ca. 7 m/s betragen. Bei höheren Windgeschwindigkeiten kann der Höllentäler nicht mehr entstehen, da die Höhenströmung bis zum Boden durchgreift. Basierend auf diesen Randbedingungen kann abgeschätzt werden, dass in ca. 60% der Nächte mit diesem Wind zu rechnen ist.

Die geringmächtigeren Hangabwinde reagieren wesentlich empfindlicher auf übergeordnete Strömungen. In windgeschützten Lagen (z.B. Waldschneisen) bilden sich Kaltluftabflüsse häufig aus, während in exponierten Lagen nur bei ausgesprochen schwachwindigen Strahlungswetterlagen ein ausgeprägter Abfluss auftritt. Heldt und Höschele (1989) geben an, dass bei Windgeschwindigkeiten, die in 50 m über Grund mehr als 5 m/s betragen, praktisch nur noch in geschützten Tälern Hangwinde auftreten, während bei weniger als 3 m/s die Hangwind-Wahrscheinlichkeit auf überdurchschnittliche Werte ansteigt. Auch mit dem Tagesgang der Temperatur fanden die Autoren eine hohe Korrelation. Falls die Differenz der

Maximal- und Minimaltemperatur innerhalb eines Tages mehr als 10 K beträgt, ist die Auftretswahrscheinlichkeit von Hangabwinden überdurchschnittlich hoch.

Dieser Befund wird auch durch den Jahresgang der Auftretswahrscheinlichkeit bestätigt. Das Maximum von Kaltluftabflüssen wird im Spätsommer/Frühherbst beobachtet. In den Wintermonaten ist die Wahrscheinlichkeit am geringsten.

4 Kaltluftabflusssimulationen

4.1 Eingangsdaten für die Berechnungen

Die Berechnungen mit dem Kaltluftabflussmodell DFM werden auf der Basis des Digitalen Höhenmodells der Schweiz, das im 50 m Raster vorlag, vorgenommen. Als Bezugssystem werden die Schweizer Landeskoordinaten verwendet. An den Landesgrenzen wird das Höhenmodell mit Daten des GlobDEM50-Datensatzes² ergänzt, so dass auch Kaltluftabflüsse aus benachbarten Ländern (Vorarlberg, Deutschland) berücksichtigt werden können.

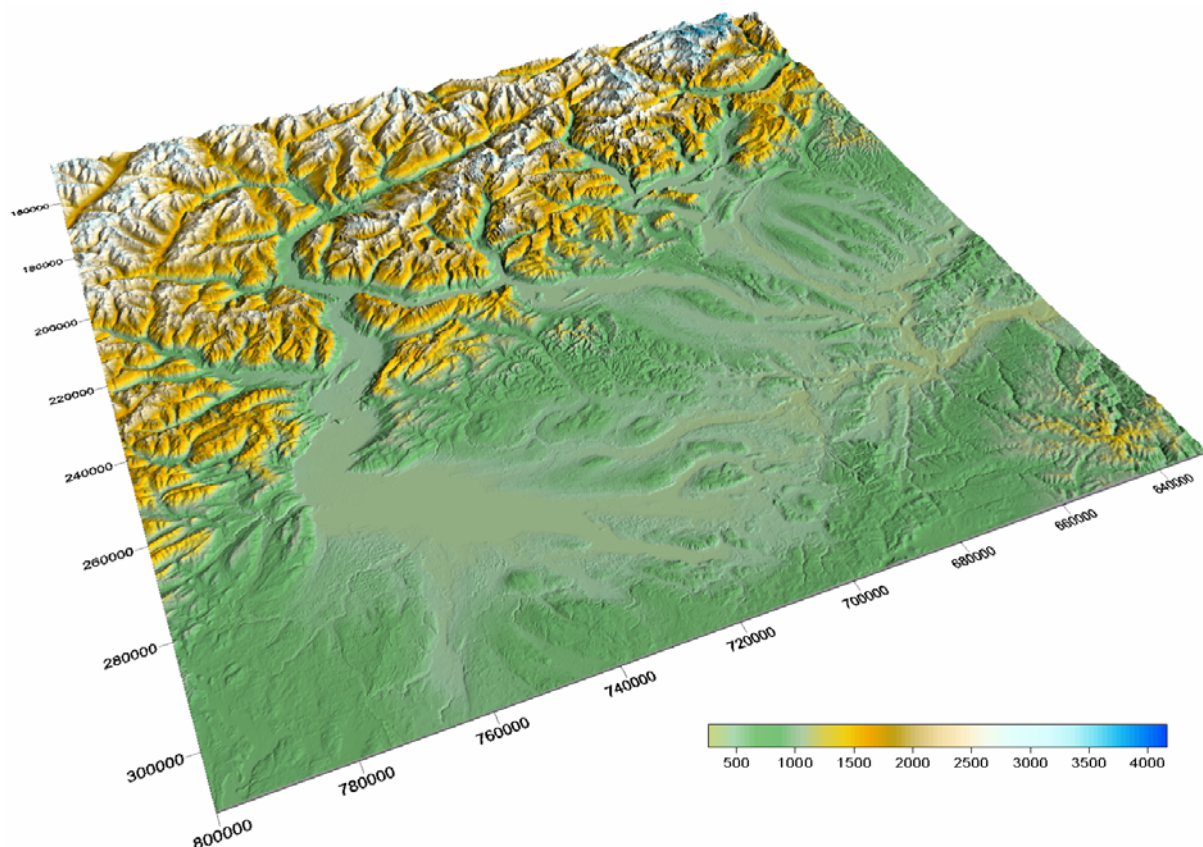


Abbildung 4-1: Perspektivische Ansicht des Simulationsgebietes mit Blick aus Nordost. Gelände 1,5fach überhöht

² Aus den Rohdaten der Shuttle Radar Topography Mission aus dem Jahr 2000 und neueren SRTM-Daten aufbereitetes Digitales Höhenmodell

Die Kaltluftentstehung und der Kaltluftabfluss hängen von der Landnutzung ab. Diese wird auf der Basis des VECTOR200-Datensatzes der swisstopo für die in Abbildung 4-2 aufgeführte Nutzungen generiert. Dabei werden 8 Nutzungsklassen unterschieden (Tabelle 4-1).

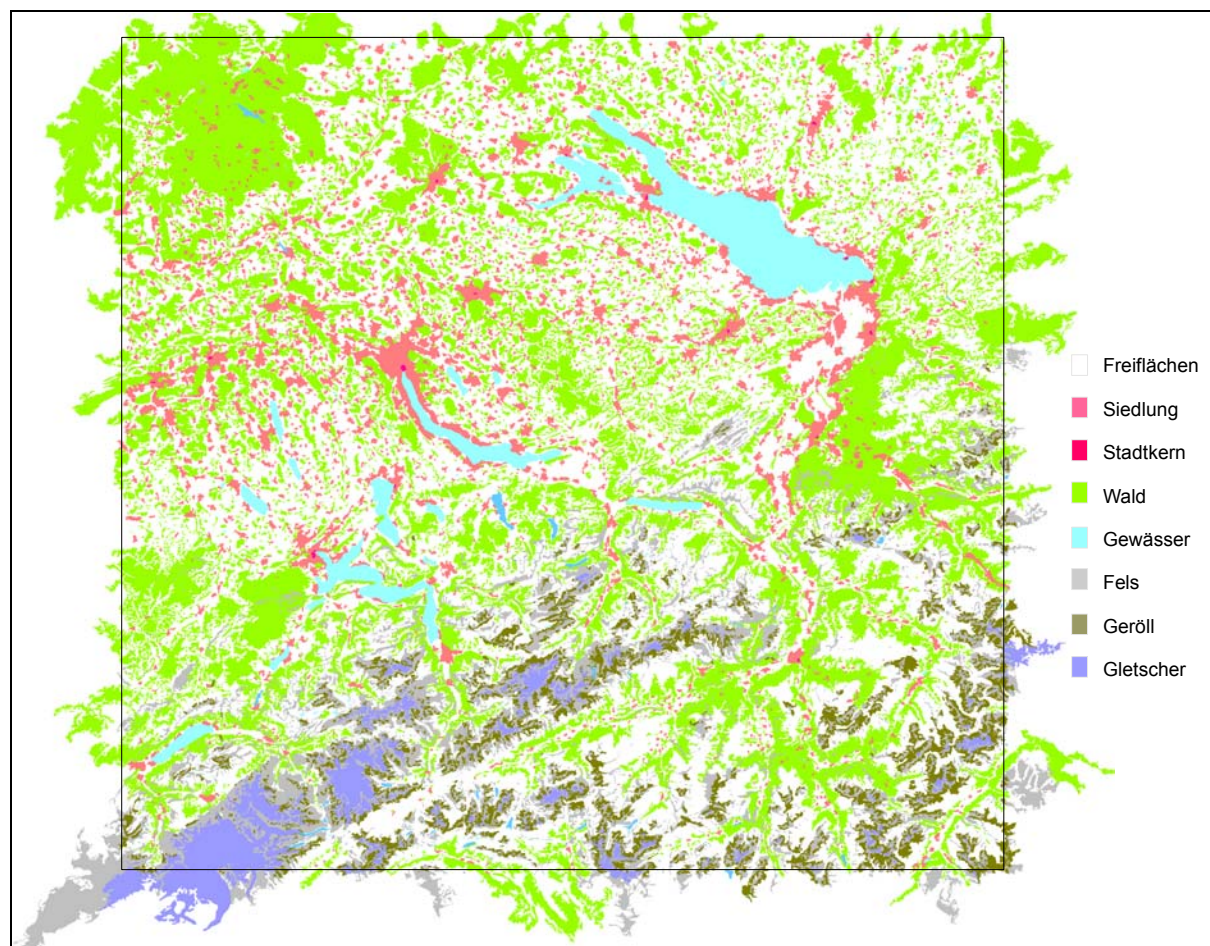


Abbildung 4-2: Landnutzungen aus dem VECTOR200-Datensatz (swisstopo)

Tabelle 4-1: Für die Simulationen verwendete Nutzungsklassen

Klasse	Nutzung	Beispiele
0	Freiflächen	Ackerflächen, Brachflächen, unversiegelte Freiflächen
1	Siedlung	Dörfer, Städte
2	Stadtkern	Verdichtete Innenstadtbereiche
3	Wald	Laubwald, Nadelwald
4	Gewässer	Seen, Flüsse
5	Fels	Vegetationslose Freiflächen
6	Geröll	Geröllhalden, Anteil Fels, Geröll > 80%
7	Gletscher	Vegetationslose Freiflächen mit Eis-/Schneebedeckung

In Tabelle 4-2 sind die nutzungsspezifischen Maße, die in die Modellrechnungen eingehen, aufgeführt. Der Reibungsbeiwert ist ein Maß für die Rauigkeit des Untergrunds. Gewässer sind beispielsweise aerodynamisch glatt, während Siedlungsbereiche der Strömung mehr Reibungskräfte entgegensetzen. Der potentielle Temperaturgradient in der Kaltluft ist ein Maß für den Antrieb der Kaltluft in geneigtem Gelände. Über Kaltluft-produzierenden Flächen ist die Schichtung stabiler als über Siedlungen oder Gewässern.

Tabelle 4-2: Angesetzte Maße für die Simulationen

Klasse	Reibungsbeiwert	pot. Temperaturgradient	Nutzung
0	0.010	-1.30	Freiflächen
1	0.040	-0.20	Siedlung
2	0.060	-0.10	Stadtkern
3	0.040	-1.30	Wald
4	0.003	-0.22	Gewässer
5	0.025	-0.70	Fels
6	0.020	-1.00	Geröll
7	0.005	-2.00	Gletscher

Die gewählten Maße entsprechen meteorologischen Bedingungen, bei denen sich ausgeprägte Kaltluftabflüsse ausbilden können. Dies ist der Fall, wenn der Bedeckungsgrad gering ist und kein übergeordneter Wind herrscht. Abhängig von der Jahreszeit und den großräumigen meteorologischen Bedingungen können sich aber auch schwächere oder intensivere Kaltluftabflüsse einstellen.

4.2 Strömungsberechnungen

Das Simulationsgebiet als geschummertes Höhenmodell ist in Abbildung A-1 (im Anhang B) dargestellt. Die räumliche Auflösung für die Machbarkeitsstudie beträgt 250 m. In Ost-West-Richtung erstreckt sich das Gebiet über 170 km von etwa Solothurn im Westen bis zum Arlberg (A) im Osten. Die Nord-Süd-Ausdehnung beträgt 160 km. Der Ausschnitt beginnt etwa bei Andermatt im Süden und reicht bis Stockach (D) im Norden. In Schweizer Landeskoordinaten liegen die Ecken des Ausschnitts bei (630.000/150.000) und (800.000/310.000).

Um den Einfluss der Alpen zu untersuchen, wurden bei einer weiteren Simulation die südlichsten 70 km abgeschnitten, so dass der Kaltluftzufluss aus dem alpinen Raum deutlich reduziert ist.

In den Abbildungen A-2 bis A-4 sind die berechneten Volumenstromdichten eine Stunde bis 5 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse dargestellt. Das obere Bild zeigt den gesamten Ausschnitt, das untere nur den Nordteil ohne die alpinen Bereiche.

Die „Volumenstromdichte“ ist das Luftvolumen, das durch eine gedachte Fläche mit 1 m Breite und der Höhe der fließenden Kaltluft pro Sekunde hindurchfließt. Der Volumenstrom ist ein Maß für das Durchlüftungspotenzial einer Kaltluftströmung, d.h. ein großer Volumenstrom wird durch Hindernisse (wie Bebauung) zwar bodennah abgebremst und etwas in die Höhe abgedrängt, überstreicht aber Rauigkeitsinseln ohne weiteres. Ströme mit geringem Luftdurchsatz werden dagegen durch Rauigkeiten massiv gestört.

Eine Stunde nach Sonnenuntergang dominieren im Wesentlichen Hangabwinde, die bei geringer Kaltluftmächtigkeit nur schwache Volumenströme bewirken. Durch Sammlung der Kaltluft in den alpinen Tälern ergeben sich dort schon relativ intensive talabwärts gerichtet Ströme.

Die Unterschiede mit bzw. ohne Berücksichtigung des alpinen Raums sind im Mittelland zunächst gering, nehmen aber im Lauf der Nacht zu. Vor allem die großen, ins Mittelland mündenden Täler bewirken in den vorgelagerten Zonen eine deutliche Zunahme der Kaltluftströme gegenüber dem Fall ohne Berücksichtigung der Alpen.

In den Abbildungen A-5 bis A-7 sind die entsprechenden Kaltfluthöhen dargestellt. Analog zur Zunahme der Volumenströme nimmt auch die Höhe der fließenden Kaltluft mit der Zeit zu. Nach 5 Stunden findet man Kaltfluthöhen über 1100 m im Vorderrheintal westlich von Chur, im Rheintal bis Thusis und im Reuss-Tal südlich von Altdorf.

Eine große Kaltluftmächtigkeit ist nicht immer mit hohen Volumenströmen verbunden. So findet man im Seeztal Kaltluftmächtigkeiten von 1000 m, wobei dort kaum ein Transport stattfindet. Der Hauptteil des Kaltluftstroms des oberen Rheintals folgt bei Sargans dem Verlauf des Rheins.

In den Abbildungen A-8 bis A-10 sind die vertikal gemittelten Geschwindigkeiten zu 3 Zeitpunkten nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse dargestellt. Legt man ein zumindest für Hangbereiche typisches Vertikalprofil entsprechend Abbildung 3-1 (linkes Profil) zugrunde, so findet man das Geschwindigkeitsmaximum in $1/3$ der Kaltfluthöhe. Das Maximum liegt ca. um den Faktor 1,5 bis 2 höher als der vertikal gemittelte Betrag. Zum Boden hin nimmt die Geschwindigkeit entsprechend der vorgelagerten Rauigkeit ab. Beispielsweise findet man bei einer 100 m mächtigen Strömung, die im Mittel 1 m/s aufweist, das Maximum mit ca. 1,8 m/s in etwa 30 m über Grund.

Während im Mittelland zumindest in der ersten Nachthälfte kaum Windgeschwindigkeiten über 1 m/s auftreten, findet man entsprechende Zonen an den Hängen und in den Tälern im

alpinen Raum verbreitet. Im weiteren Verlauf der Nacht sind es vor allem die großen Täler, die vertikal gemittelte Windgeschwindigkeiten über 2,5 m/s aufweisen.

5 Vergleich mit Messungen

Die in den Abbildungen dargestellten Kaltluftverhältnisse sind qualitativ plausibel. Um die Güte der Simulationen auch quantitativ zu erfassen, werden Vergleiche mit Messungen an 15 Stationen durchgeführt. Die Stationen, deren Lage und der jeweilige Messzeitraum sind in Tabelle 5-1 aufgeführt.

Abbildung 5-1 zeigt deren Lage im Simulationsgebiet. Dort ist auch der Standort bei Rankweil verzeichnet (blaues Symbol), an dem Vertikalsondierungen während MAP (Mesoscale Alpine Programme) vom September bis November 1999 durchgeführt wurden.

Tabelle 5-1: Lage der ausgewerteten Messstationen in Schweizer Landeskoordinaten sowie ausgewerteter Messzeitraum

		Lage der Messstationen			
		X	Y	Höhe	Messzeitraum
	Stationen Ostluft			[m]	
1	Chur, A13	757725	191375	565	01.01.2004 – 31.12.2005
2	Chur, Kantonsspital	760290	192370	655	01.01.2004 – 31.12.2005
3	Rothenbrunnen	751520	181100	623	01.01.2004 – 31.12.2005
4	Neuhausen a. Rhf., Galgenbuck	688300	282800	512	01.01.2004 – 31.12.2005
5	St. Gallen, Stuelegg	747600	252530	920	01.12.2004 – 31.12.2005
6	Wallisellen, Dietlikonerstrasse	688070	252880	470	01.12.2004 – 31.12.2005
Stationen MeteoSchweiz					
7	Zürich, MeteoSchweiz	685125	248090	556	01.01.2004 – 31.12.2005
8	St. Gallen	747940	254600	779	01.01.2004 – 31.12.2005
9	Wädenswil	693770	230780	463	01.01.2004 – 31.12.2005
10	Tänikon	710500	259820	536	01.01.2004 – 31.12.2005
11	Kloten	682720	259340	436	01.01.2004 – 31.12.2005
Stationen Vorarlberg ³					
12	Höchst, Friedhof	765971	258617	410	01.01.2004 – 31.12.2005
13	Lustenau, Wiesenrain	767091	253468	410	01.01.2004 – 07.09.2005
14	Dornbirn, ARA2	772599	253626	410	01.01.2004 – 25.11.2004
15	Bludenz, Bleiche	781112	225550	580	01.01.2004 – 17.06.2005

³ Die Daten aus Vorarlberg wurden freundlicherweise von Herrn Dr. Werner, Institut für Umwelt und Lebensmittelsicherheit des Landes Vorarlberg, Bregenz, zur Verfügung gestellt.

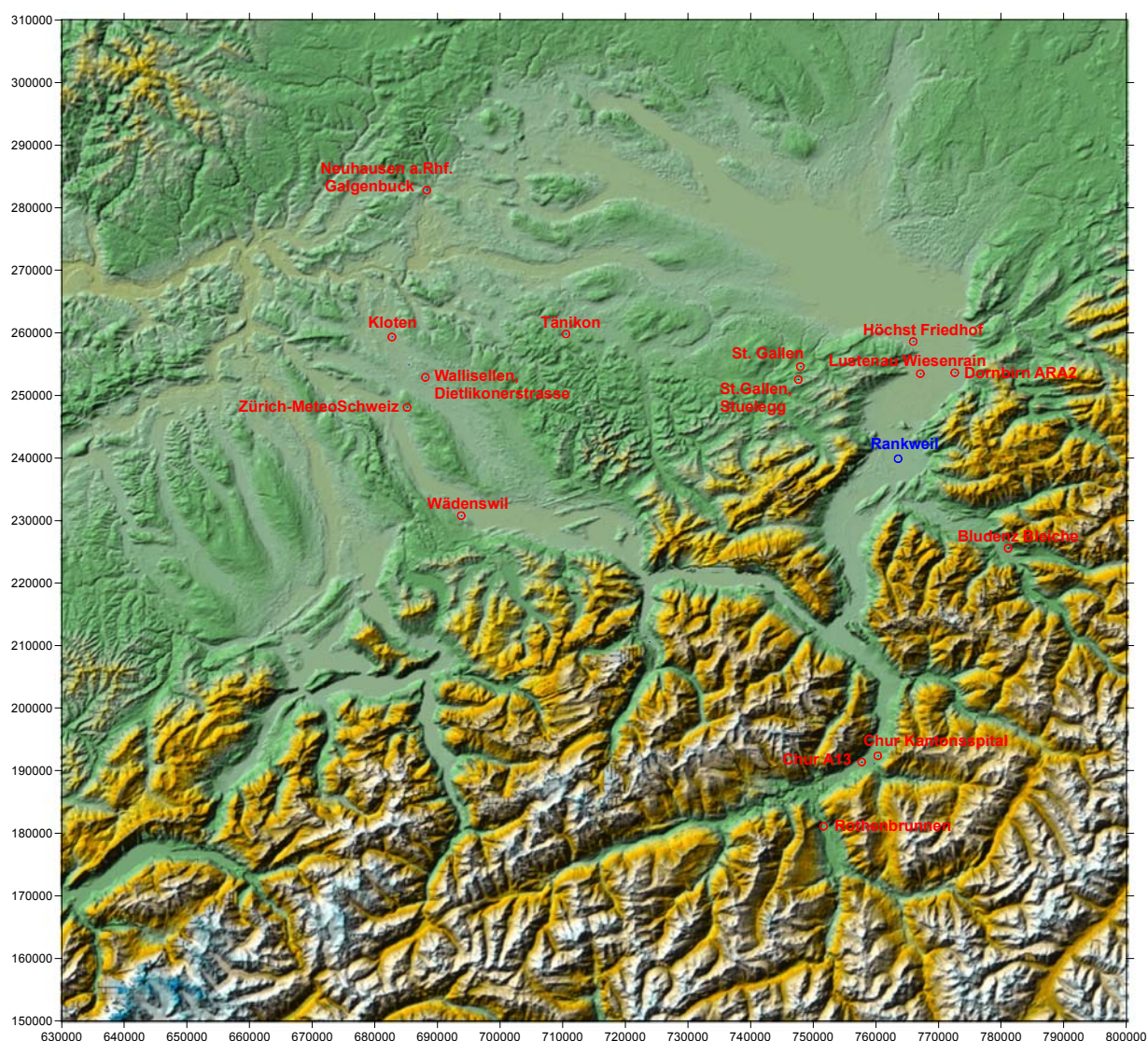


Abbildung 5-1: Lage der Messstationen (rot) und des SODAR bei Rankweil (blau)

5.1 Plausibilisierung anhand der Profilmessung

In einem Unterprogramm namens FORM (Foehn in the Rhine Valley during MAP) wurden umfangreiche Untersuchungen der meteorologischen Verhältnisse im Rheintal aufgenommen. Unter anderem wurden Vertikalprofile der Windgeschwindigkeiten mittels SODAR / RASS-Systemen bei Rankweil gemessen (Vogt et al., 2005).

In Abbildung 5-2 sind die gemessenen Strömungsverhältnisse vom 8. bis 14. September 1999 zwischen 420 m und 1800 m ü.NN bei Rankweil dargestellt. Die Pfeile geben die Windrichtung an. Ein Pfeil nach oben steht für Südwind, also einen Bergwind – ein Pfeil nach unten für Nordwind, also einen Wind, der das Rheintal hoch weht (Talwind).

Während in den Tagstunden ein deutlicher Talwind bläst, findet man in den Nachtstunden bis in Höhen von 1300 m bis 1800 m eine talabwärts gerichtete Strömung. Dies entspricht einer vertikalen Mächtigkeit der Strömung zwischen ca. 900 m und 1400 m. Die Modellsimulationen weisen an dieser Stelle 5 Stunden nach Sonnenuntergang Kaltluftmächtigkeiten von knapp über 700 m auf.

In Abbildung 5-3 sind in einem Zeit-/Höhendiagramm die Nord-Südkomponenten der Strömung dargestellt. 100 m über dem Rheintalboden (unterhalb liegen systembedingt keine Messwerte vor) schlägt die Strömung gegen 18:30 UTC (19:30 MEZ) von der talaufwärts gerichteten Strömung in den Bergwind um. Dieser entwickelt sich rasch. Bereits 2 Stunden später wird eine Mächtigkeit von ca. 600 m gemessen. Das Maximum mit über 4,5 m/s wird zwischen 22:00 und 23:00 Uhr UTC in 200 m bis 300 m über Grund gemessen. Im weiteren Verlauf der Nacht steigt die Höhe des Maximums an. Bodennah geht die Strömungsgeschwindigkeit zurück.

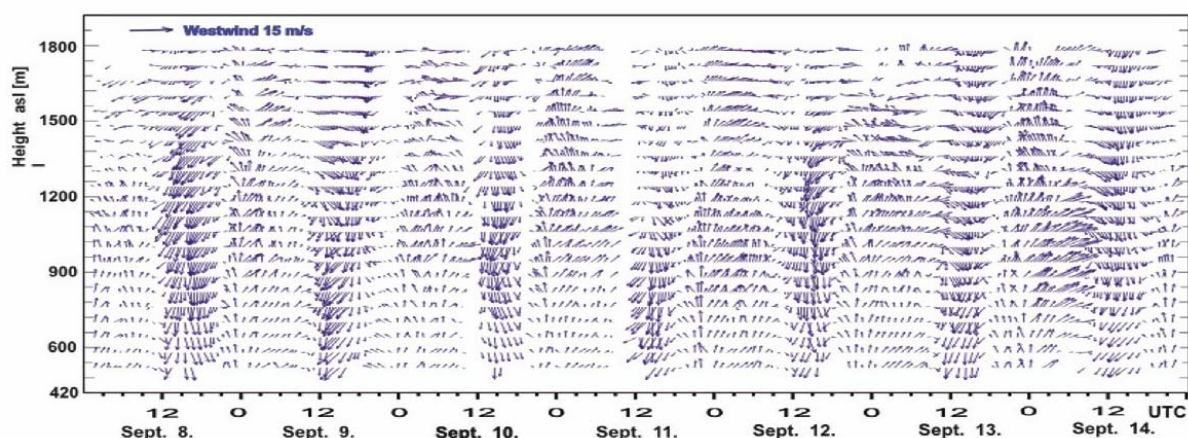


Abbildung 5-2: Bei Rankweil gemessene Vertikalprofile. Die Pfeile geben die Richtung des Windes an; Pfeile nach oben – Südwind, nach unten – Nordwind. (aus Vogt, 2005)

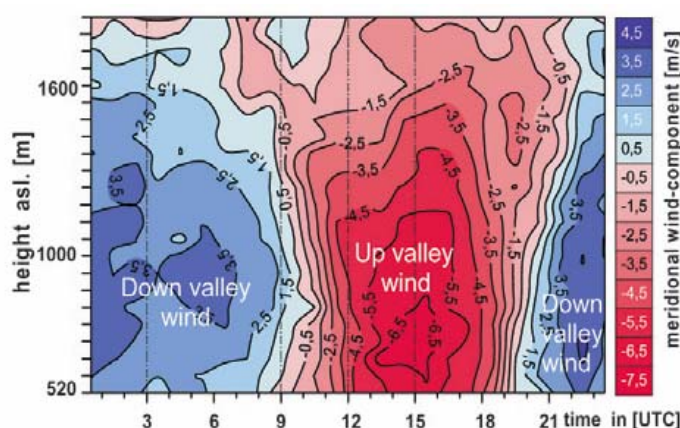


Abbildung 5-3: Darstellung der talparallelen Windgeschwindigkeit. Blau – Bergwind; rot – Talwind. (aus Vogt, 2005)

Die modellierte, vertikal über die Kaltluflhöhe gemittelte Geschwindigkeit wird mit knapp 3 m/s vom Modell gut getroffen. Die Mächtigkeit der Strömung wird dagegen etwas zu gering prognostiziert. Ebenso verläuft die zeitliche Entwicklung rascher als im Modell. Inwiefern die meteorologischen Randbedingungen (Föhnlage) bei diesen Parametern eine Rolle spielt, kann zur Zeit nicht abgeschätzt werden.

5.2 Vergleich mit bodennahen Messwerten

An den in Tabelle 4-1 aufgeführten Messstationen werden überwiegend die Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchte und Globalstrahlung meist in Form von Halbstundenmitteln aufgezeichnet. Für die Auswertung werden die Jahre 2004 und 2005 herangezogen. Bei den Stationen St. Gallen-Stuelegg, Wallisellen, Lustenau-Wiesenrain, Dornbirn-ARA2 und Bludenz-Bleiche liegen kürzere Zeiträume vor.

Da Kaltluftabflüsse ein Phänomen wolkenarmer und windschwacher Nächte sind, werden für den Vergleich nur die Nachtzeiträume von 21:00 bis 08:00 Uhr herangezogen. Die Auswahl der Strahlungswetterlagen erfolgt auf der Basis der am Flughafen Kloten 3-stündig bestimmten Bedeckungsgrade. Diese werden in den Zwischenzeiträumen linear interpoliert. Ausgewertet werden nur Termine mit einem Gesamtbedeckungsgrad unter 3/8.

Zu den Messstellen gibt es eine Darstellung von Windrosen für Strahlungsnächte. Die Abbildung zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für die Nachtstunden bei Bedeckungsgraden unter 3/8. Die Anteile der Calmen, d.h. Windgeschwindigkeiten unter 0,5 m/s, sind ebenfalls ausgewiesen.

Die simulierten Kaltluftströme sind in Form von Vektoren mit hinterlegter geschummerter Karte dargestellt. Betrachtet wird der Zeitraum zu Beginn der Kaltluftabflüsse, da hier die größten Effekte auftreten. Die grünen Pfeile zeigen die Fließrichtung der Kaltluft eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftbildung. Die roten Pfeile geben die Fließrichtung 2 Stunden und die blauen 3 Stunden nach dem Start der Simulation wieder. Die blauen Pfeile sind in der Regel für den weiteren Verlauf der Nacht maßgebend. Die Länge der Pfeile ist ein Maß für den Volumenstrom. Es wird in jeder Raumrichtung nur jeder zweite Pfeil dargestellt (Abstand 500 m).

Für Strahlungswetterlagen (Gesamtbedeckungsgrad < 3/8) werden ferner zwei Diagramme erstellt, die es erlauben, die Streubreite der Messwerte abzuschätzen. Das erste Diagramm zeigt in einem Zeit-/Windrichtungsdiagramm die Häufigkeit der jeweiligen Klassen mittels ausgefüllter Kreise. Das zweite Diagramm zeigt an, wie häufig bei welchen Windrichtungsklassen welche Windgeschwindigkeitsklassen auftreten.

Anschließend werden die Simulationsergebnisse an den entsprechenden Aufpunkten dargestellt. Zu diesem Zweck wird bei konstanten Kaltluftproduktionsbedingungen 10 Stunden in die Zeit gerechnet. An jedem Aufpunkt, d.h. der Zelle von 250 m x 250 m, in der die Messsta-

tion liegt, werden minutenfein die Modellparameter Windrichtung (DD), vertikal gemittelte Windgeschwindigkeit $F(HK)$, auf 10 m über Grund interpolierte Windgeschwindigkeit $F(10m)$ und Kaltlufthöhe (HK) protokolliert, so dass die zeitliche Entwicklung der Kaltluftverhältnisse dargestellt werden kann.

Die Interpolation der Windgeschwindigkeit auf 10 m über Grund basiert auf der Annahme eines typischen Kaltluftabflussprofils (vgl. Abbildung 3-1 links). Das Maximum der Strömung liegt etwa bei 1/3 der Kaltlufthöhe. Solche Profile findet man an Hängen und kleineren Tälern. In der Ebene oder in großen Tälern kann das Profil von diesem „Idealprofil“ abweichen. Hier kann sich beispielsweise bei großer Kaltluftmächtigkeit (>100 m) und geringer Fließgeschwindigkeit die bodennahe Strömung von der Höhenströmung entkoppeln, so dass man in den unteren Schichten stagnierende Verhältnisse beobachtet. In diesen Fällen wird die Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund mit dieser Profilannahme überschätzt.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für jeden Standort dargestellt.

5.2.1 Chur-A13, Chur-Kantonsspital, Rothenbrunnen

Die Messstellen in Chur und Rothenbrunnen liegen in dem von hohen Bergen flankierten Rheintal. Entsprechend gibt es eine starke Bündelung der Windrichtungen parallel zum Talverlauf, der im Bereich Chur von Südwest nach Nordost, im Bereich Rothenbrunnen von Süd nach Nord führt.

In den wolkenarmen Nachtstunden dominieren Bergwinde. Es finden sich jedoch auch einige Nordost-Komponenten. Dies kann u.a. darauf zurückzuführen sein, dass die Bedeckungsverhältnisse von Klotten nicht immer auf den Raum Chur übertragbar sind.

Die Verhältnisse 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse (blaue Pfeile) passen gut zu den Beobachtungen. Da diese Strömungsverhältnisse auch im weiteren Verlauf der Nacht auftreten, passen Richtung und beobachtet Häufigkeiten gut zusammen. Das „Einschwingen“ (Hangabwinde und Sammeln in den Talgründen) in den ersten zweieinhalb Stunden findet man in den Häufigkeitsverteilungen weniger. Diese Einschwingvorgänge sind jedoch nur von kurzer Dauer, was die simulierten Zeitreihen zeigen.

Bei Rothenbrunnen wird die bodennahe Führung des Geländes, die zu einer Südsüdwestströmung führt, nicht genau wiedergegeben. Hier werden eher Süd und Südsüdostkomponenten simuliert.

Die Zeit-Windrichtungsdiagramme zeigen, dass im Raum Chur auch bei Strahlungswetterlagen Talwinde (Nordostwinde) möglich sind. Das ausgeprägteste Berg-Talwindssystem findet man an der Station Rothenbrunnen.

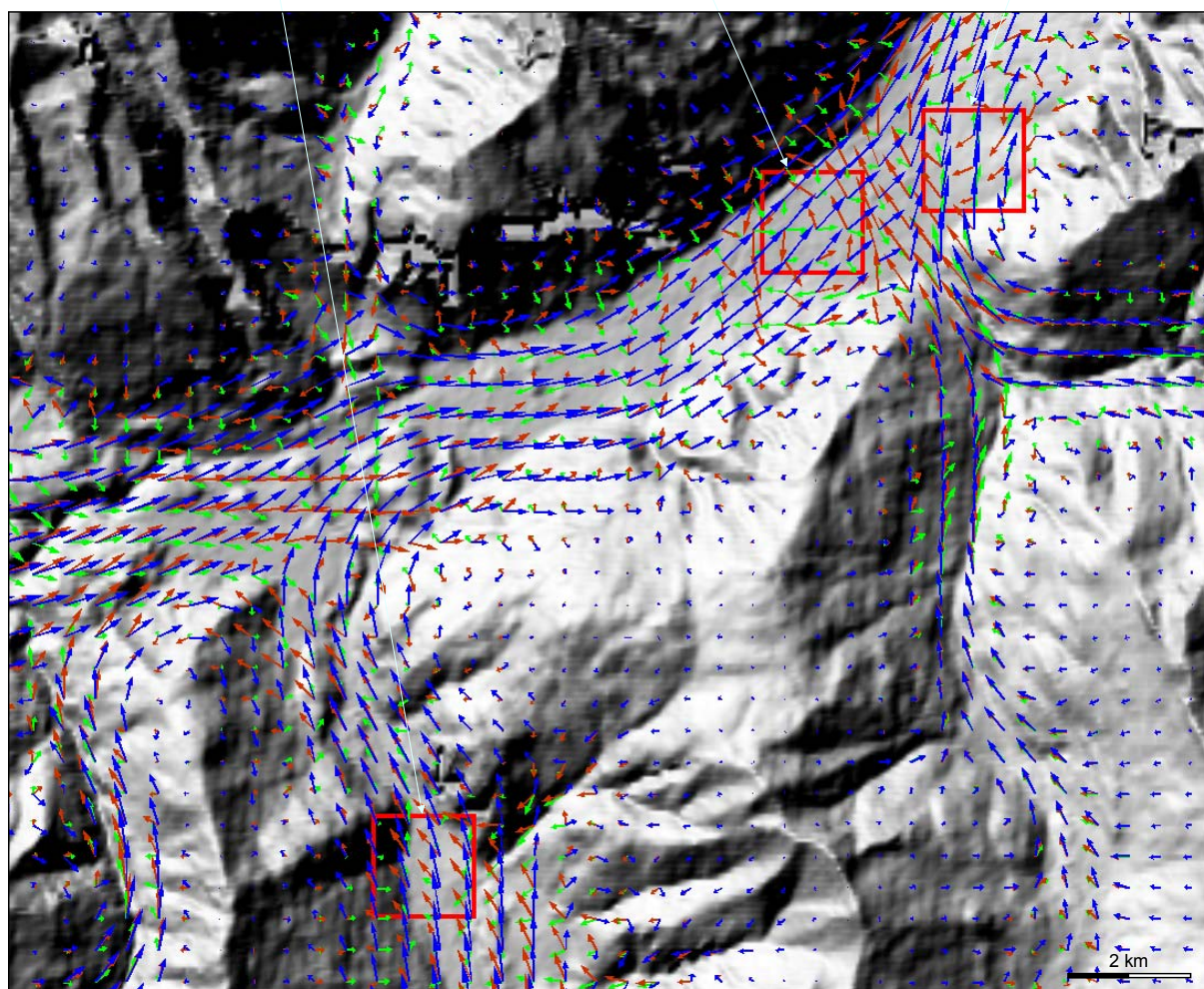
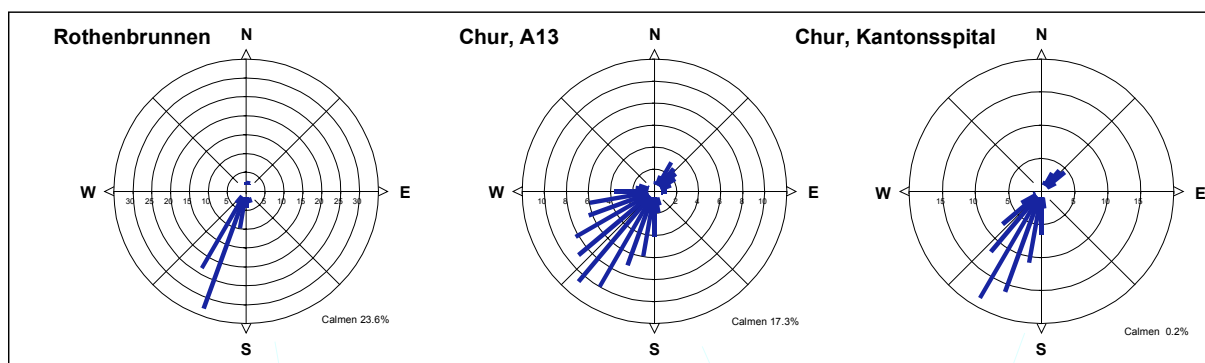
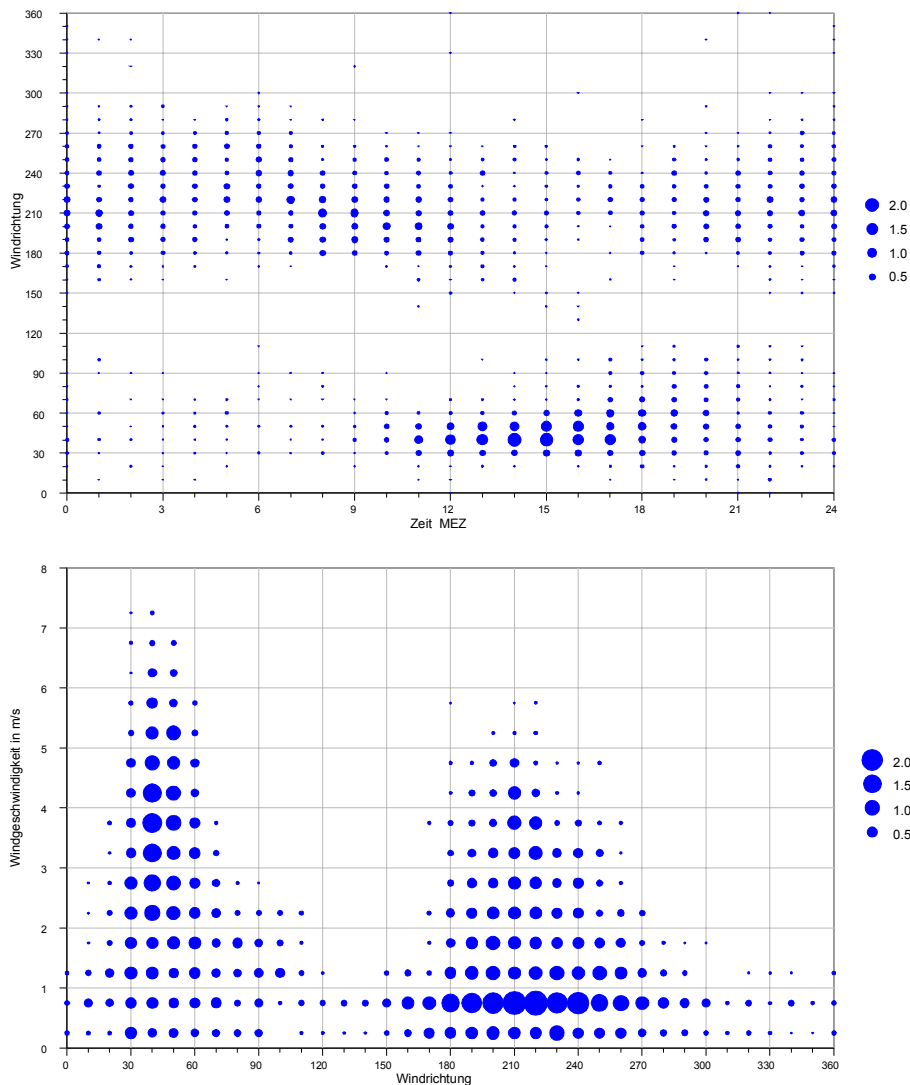
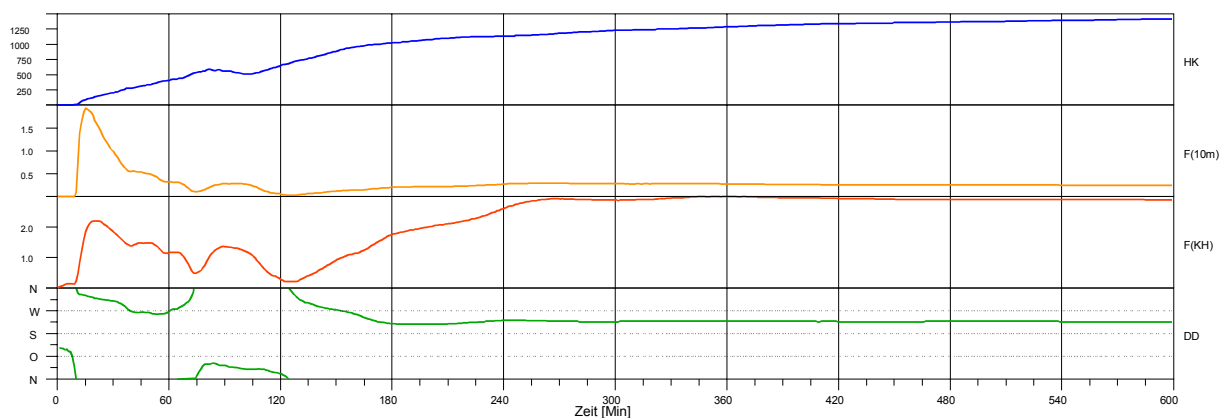


Abbildung 5-4: Strömungsverhältnisse im Raum Chur

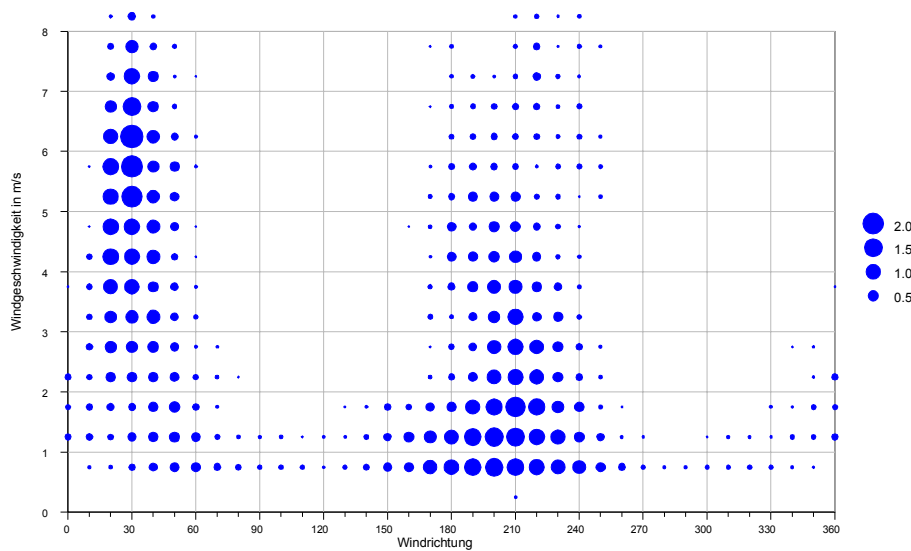
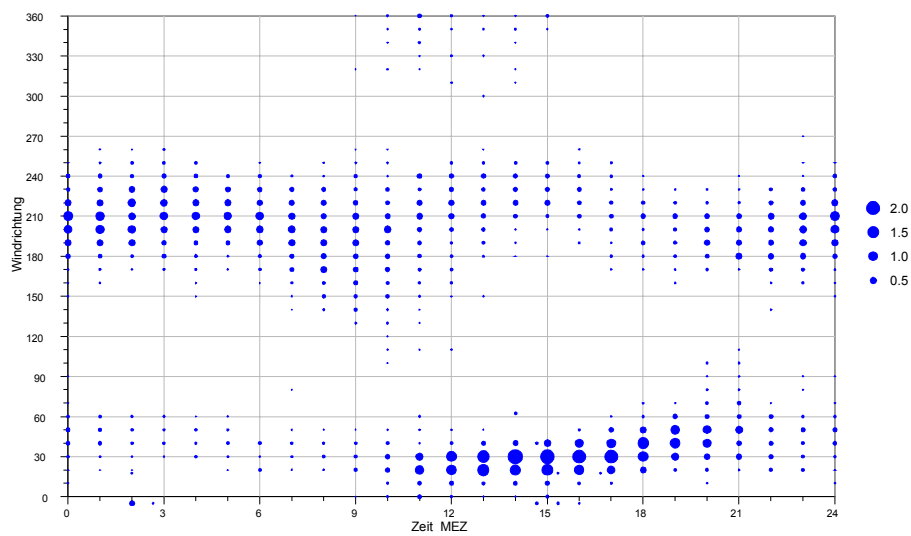
Bergwinde im Raum Chur können relativ hohe Windgeschwindigkeiten aufweisen. In Rothenbrunnen liegen die Windgeschwindigkeiten jedoch meist unter 1,5 m/s.



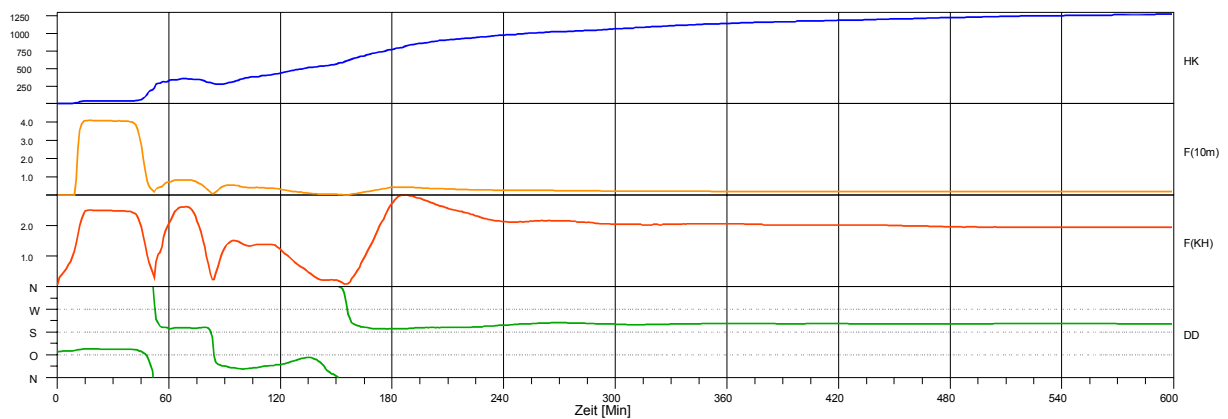
Chur, A13: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



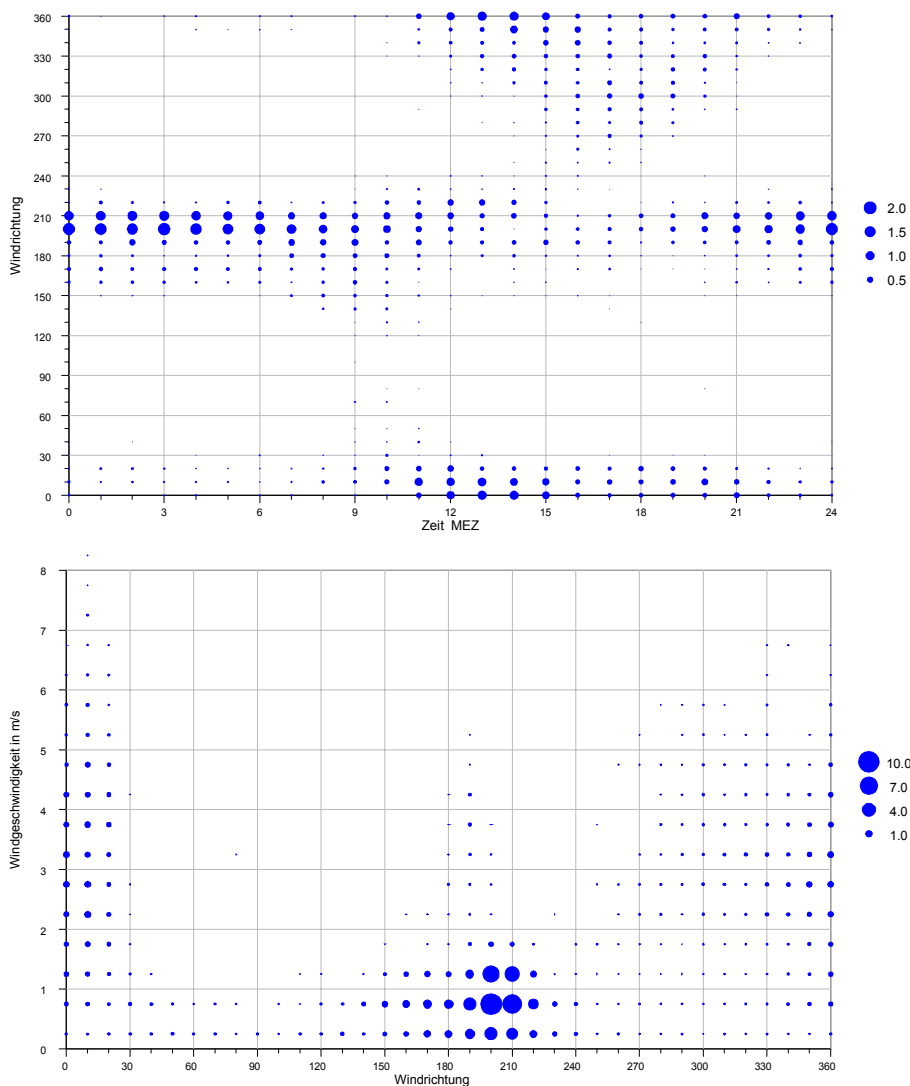
Chur-A13: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



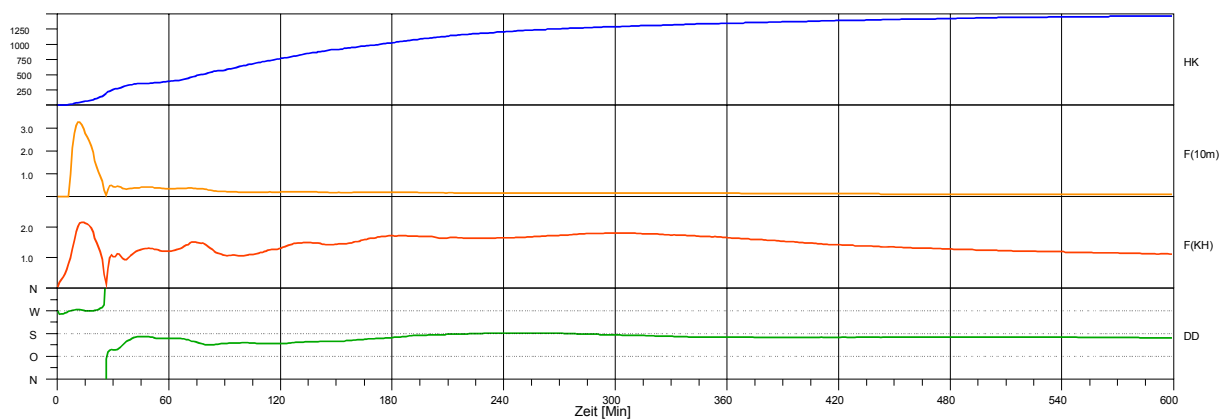
Chur-Kantonsspital: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterl.



Chur-Kantonsspital: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



Rothenbrunnen: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Rothenbrunnen: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltflughöhe in m

5.2.2 Neuhausen a.Rhf. - Galgenbuck

Die am nördlichsten gelegene Vergleichsstation liegt in wesentlich weniger bewegtem Gelände. Trotzdem treten auch hier Kaltluftabflüsse auf, die jedoch weniger intensiv sind. Bei den eher geringen Kaltlufthöhen können sich übergeordnete Strömungen leichter durchsetzen als dies in Tälern der Fall ist. Eventuell sind die bei Strahlungswetterlagen häufig beobachteten Ostwinde auf die bei Hochdruckwetterlagen vorherrschenden östlichen Winde zurückzuführen.

Das Zeit/Windrichtungsdiagramm zeigt keine ausgeprägte thermische Zirkulation. Sowohl die Westnordwestwinde wie auch die Ostnordostwinde treten sowohl in den Nacht- wie auch in den Tagstunden auf.

Im Kaltluftentwicklungsdiagramm sind auch die Verläufe „ohne Berücksichtigung der Alpen“ eingetragen. Die Kaltluft aus dem alpinen Raum braucht bei den eingestellten Kaltluftproduktivitäten demnach ca. 9 Stunden, bis sie Neuhausen erreicht. Die mit dem Kaltluftanstieg verbundene Winddrehung auf Süd wird nicht beobachtet.

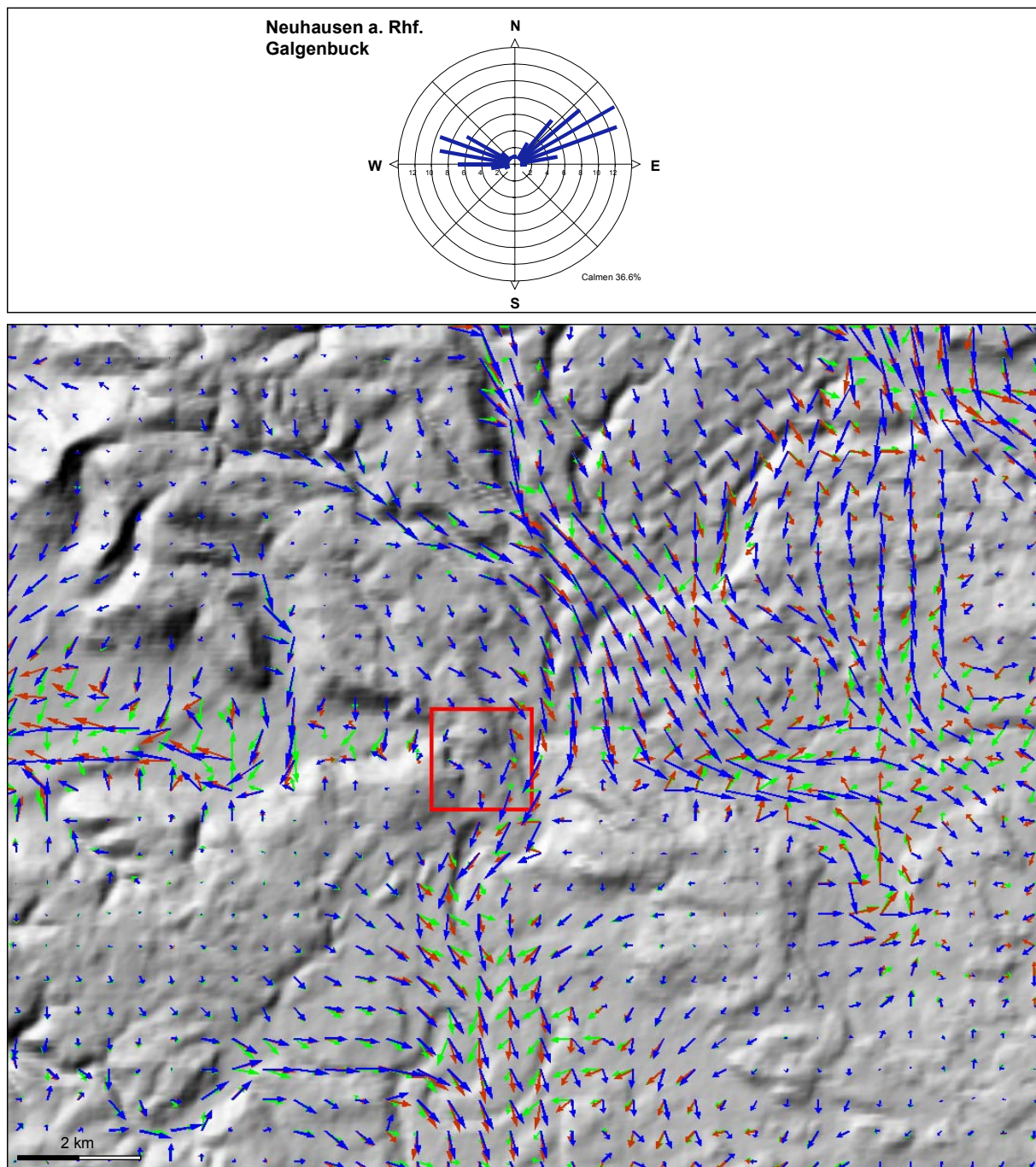
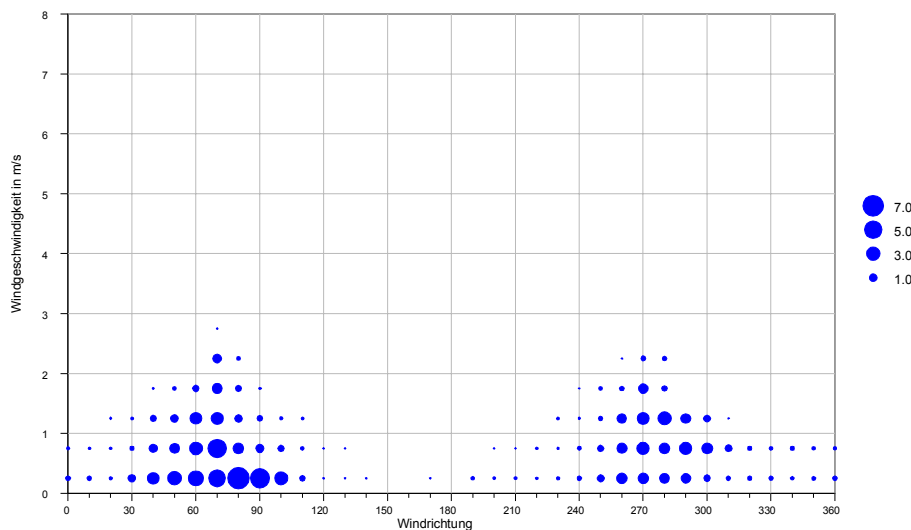
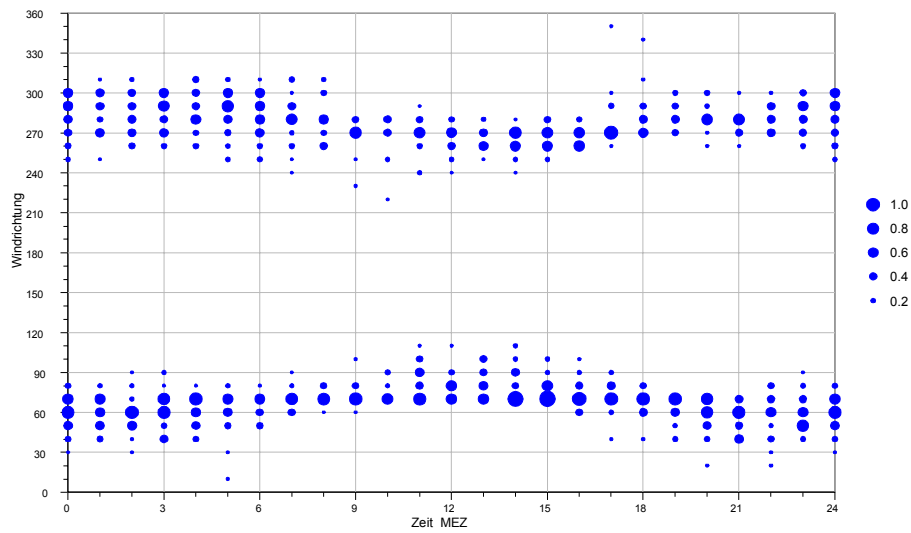
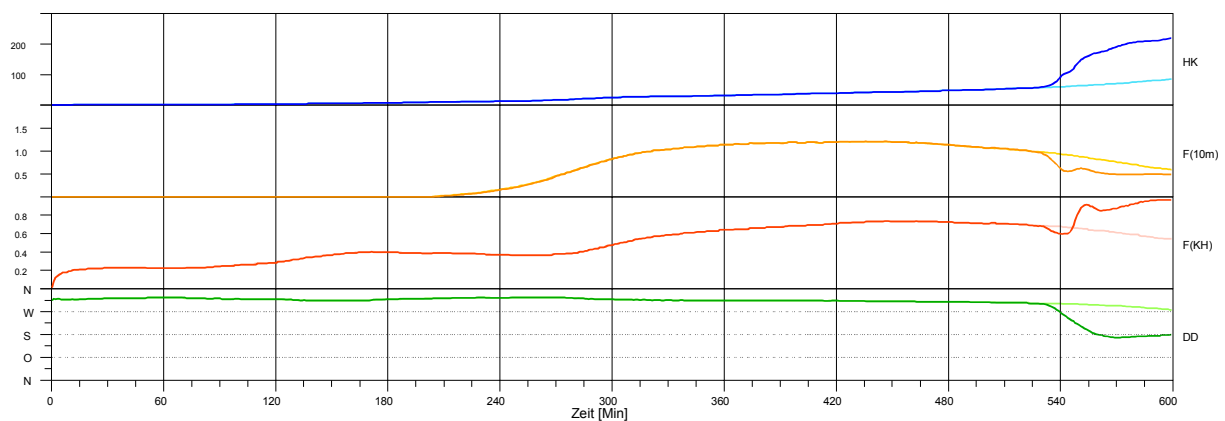


Abbildung 5-5: Strömungsverhältnisse im Raum Neuhausen a. Rhf.



Neuhausen a. Rhf.: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterl.



Neuhausen a. Rhf.: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

5.2.3 St. Gallen-Stuelegg, St. Gallen-MeteoSchiweiz

Im Raum St. Gallen stellen sich bei Strahlungswetterlagen in den Nachtstunden südliche Strömungen ein. Dies wird von den Modellrechnungen wiedergegeben. Zu Beginn der Nacht bis ca. 4 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse sind die Kaltluftmächtigkeiten gering. Erst danach nimmt die Kaltluflhöhe spürbar zu.

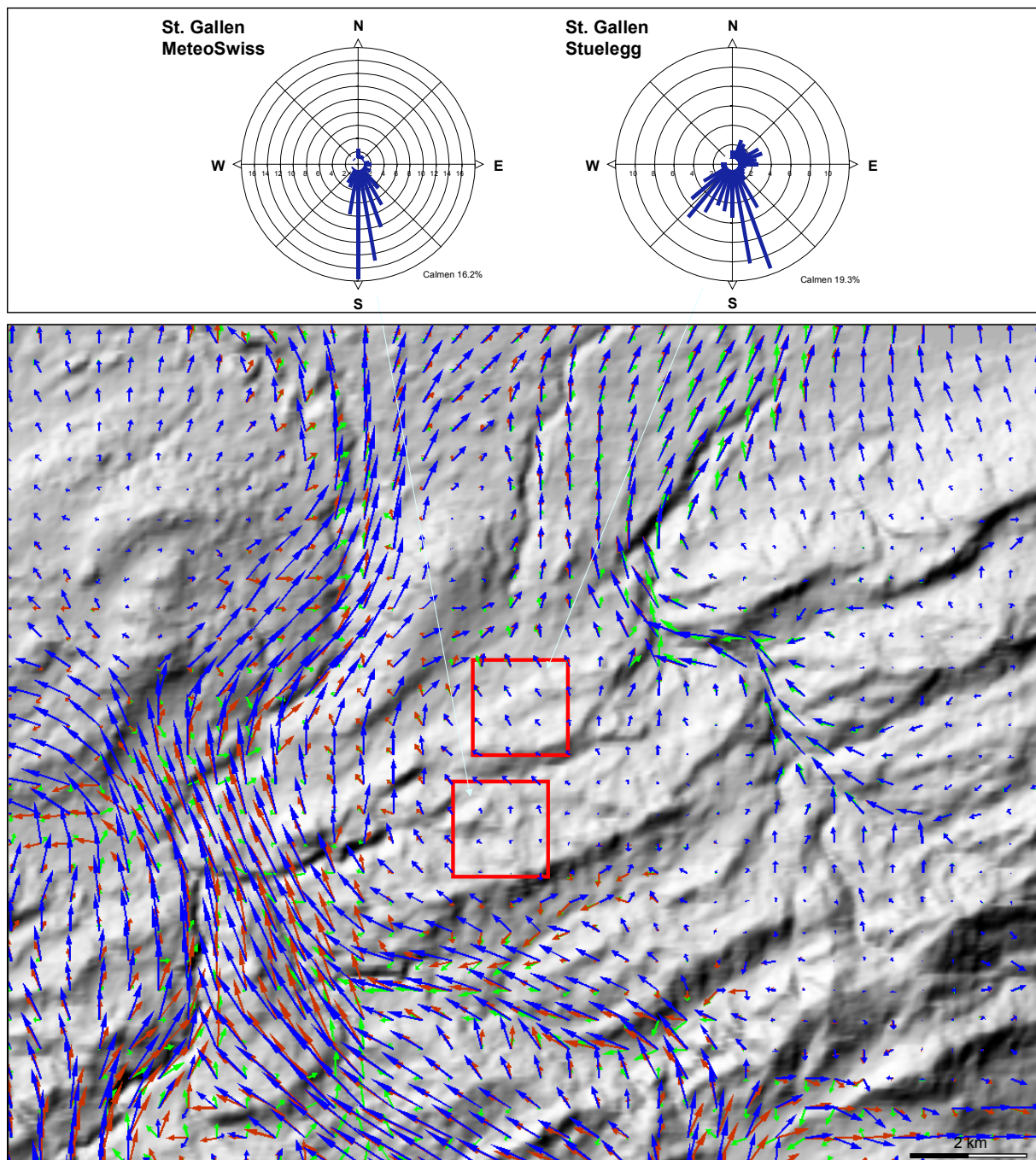
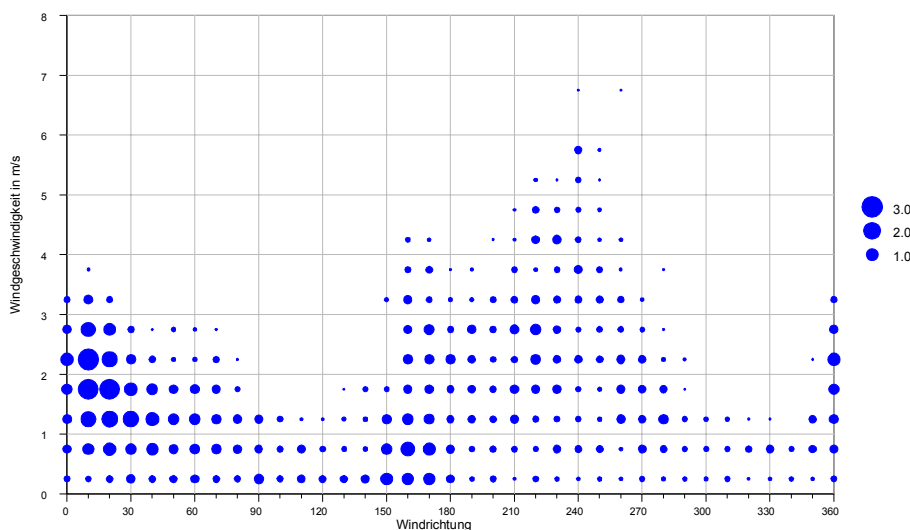
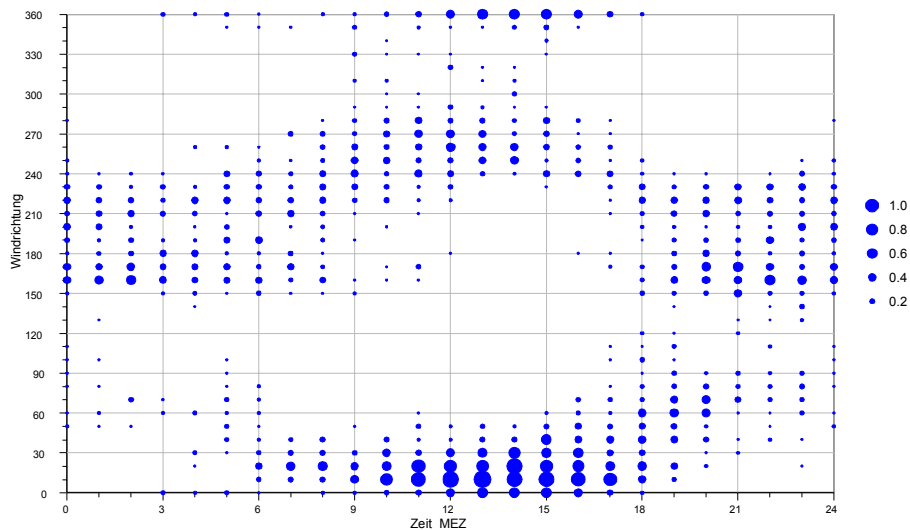
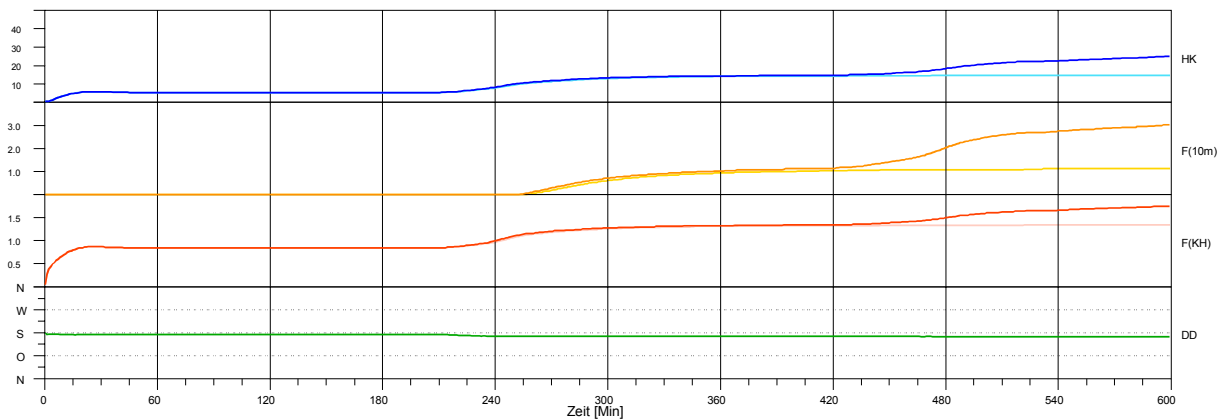


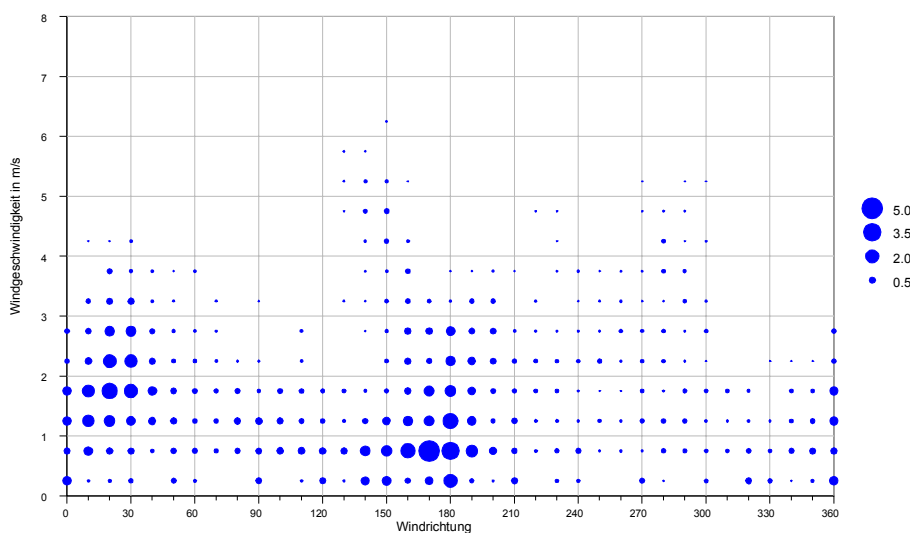
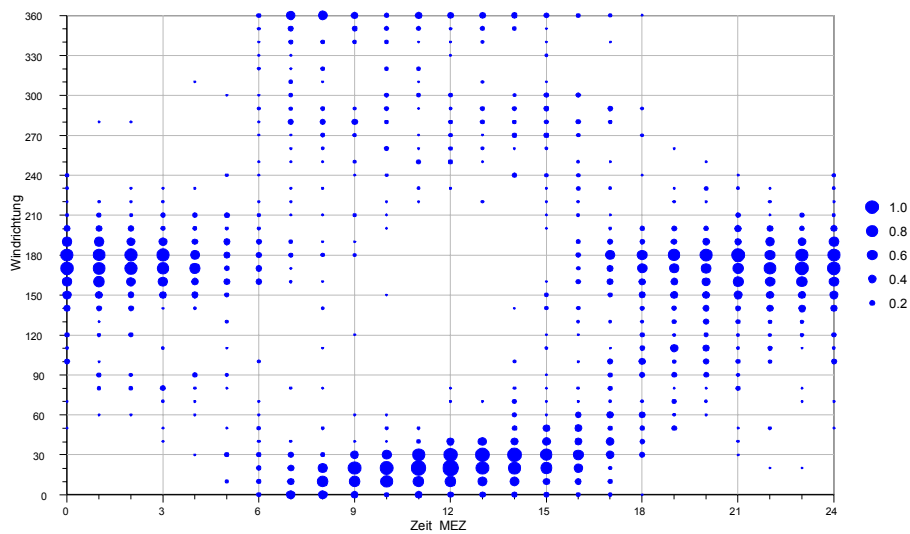
Abbildung 5-6: Strömungsverhältnisse im Raum Str. Gallen



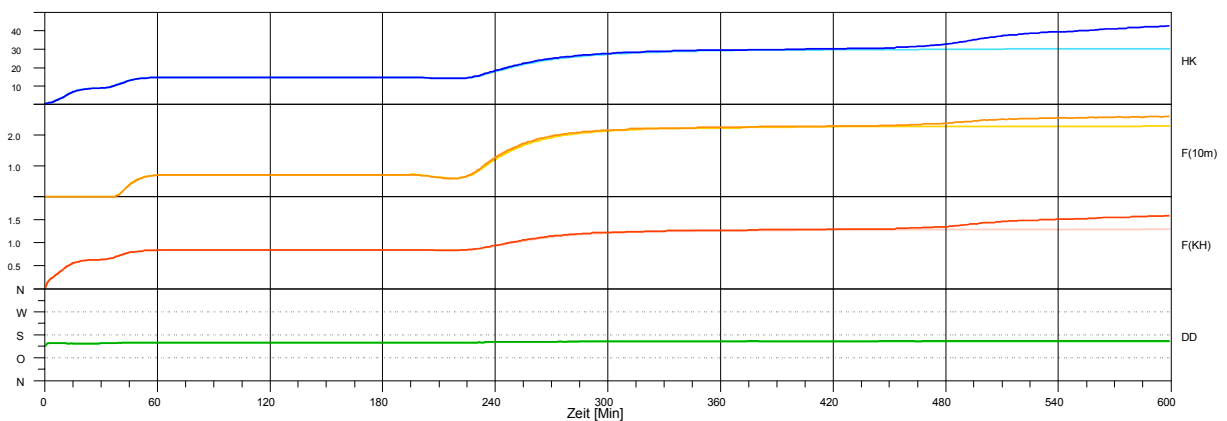
St. Gallen-Stuelegg: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterl.



St. Gallen-Stuelegg: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



St. Gallen-MeteoSchweiz.: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungsw.



St. Gallen-MeteoSchweiz: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

5.2.4 Zürich-MeteoSchweiz, Wallisellen, Kloten

Im reliefarmen Raum zwischen Zürich und Kloten findet man nur bedingt tagesperiodische Windsysteme. In Kloten und Wallisellen können unterschiedliche Windrichtungen auftreten. An der MeteoSchweiz-Station Zürich dominieren aufgrund der Lage in einem Einschnitt nord-östliche Winde.

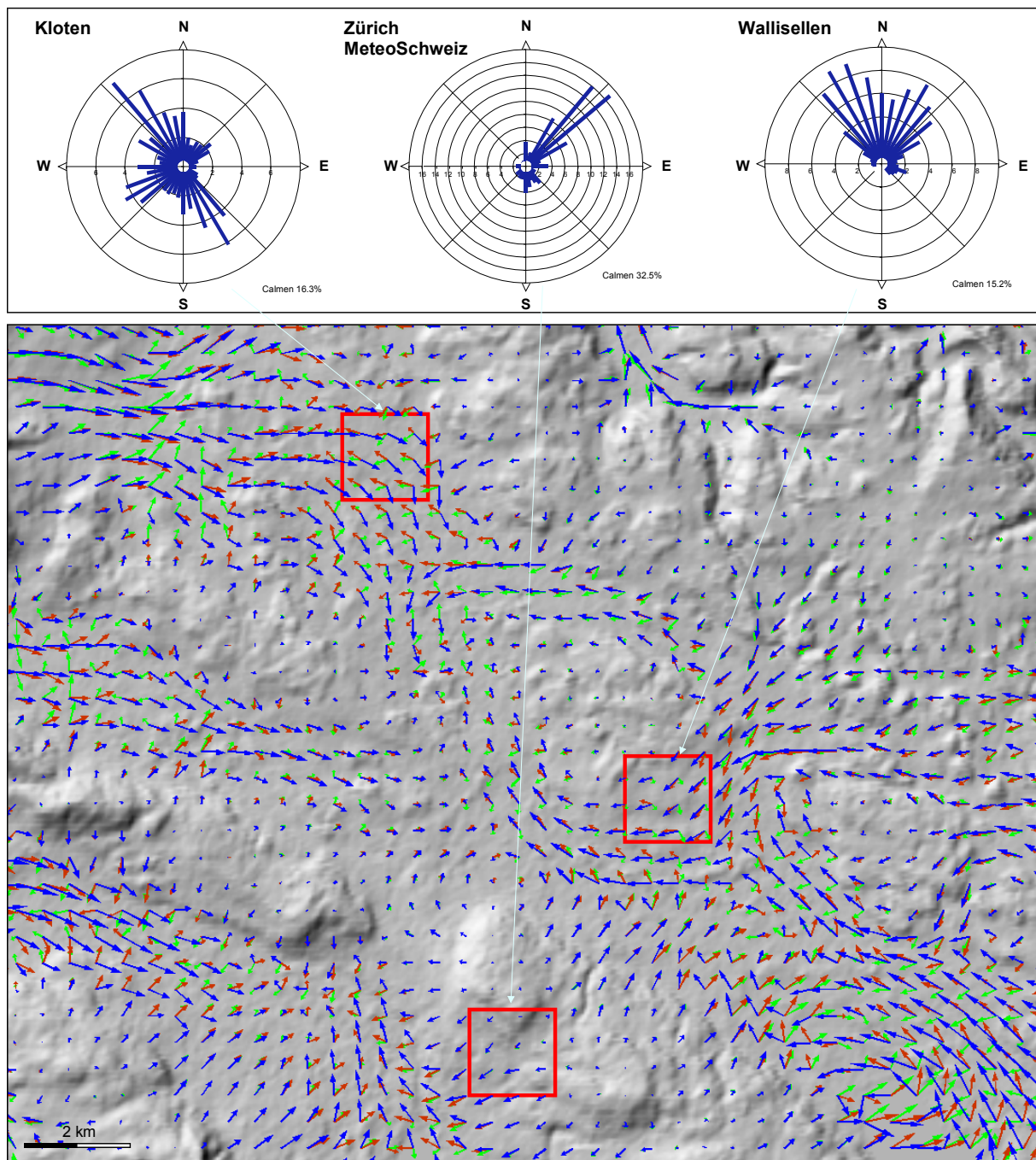
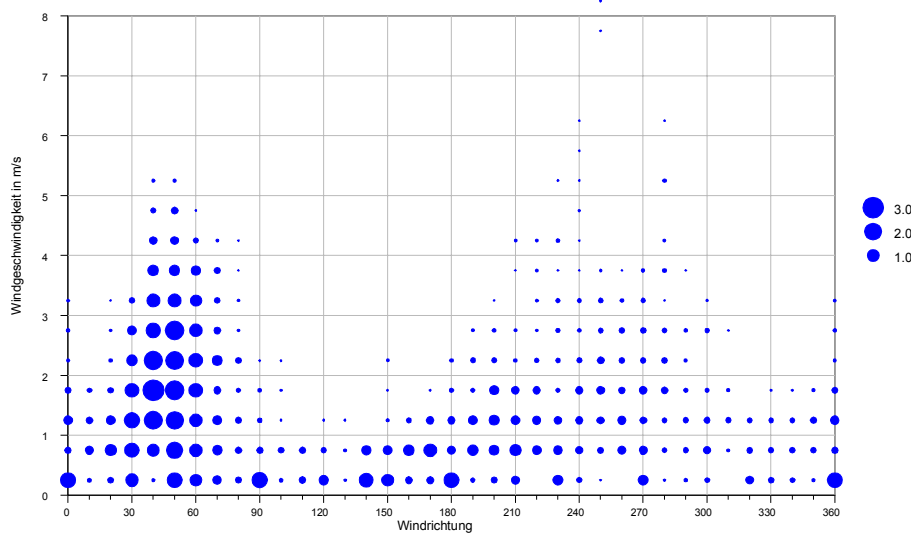
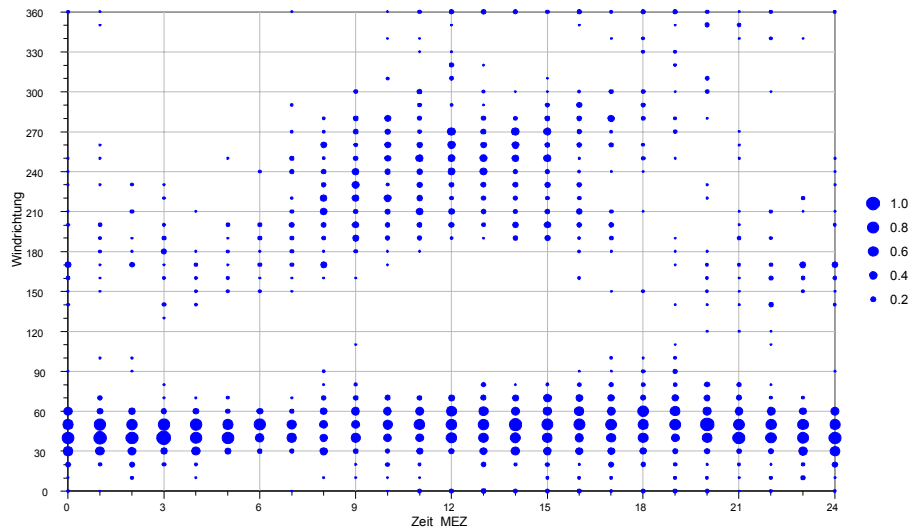
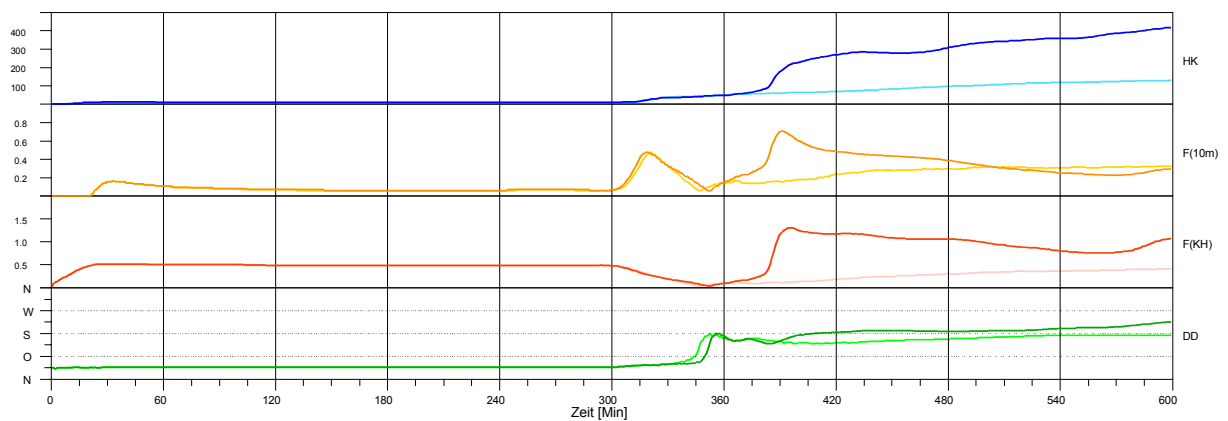


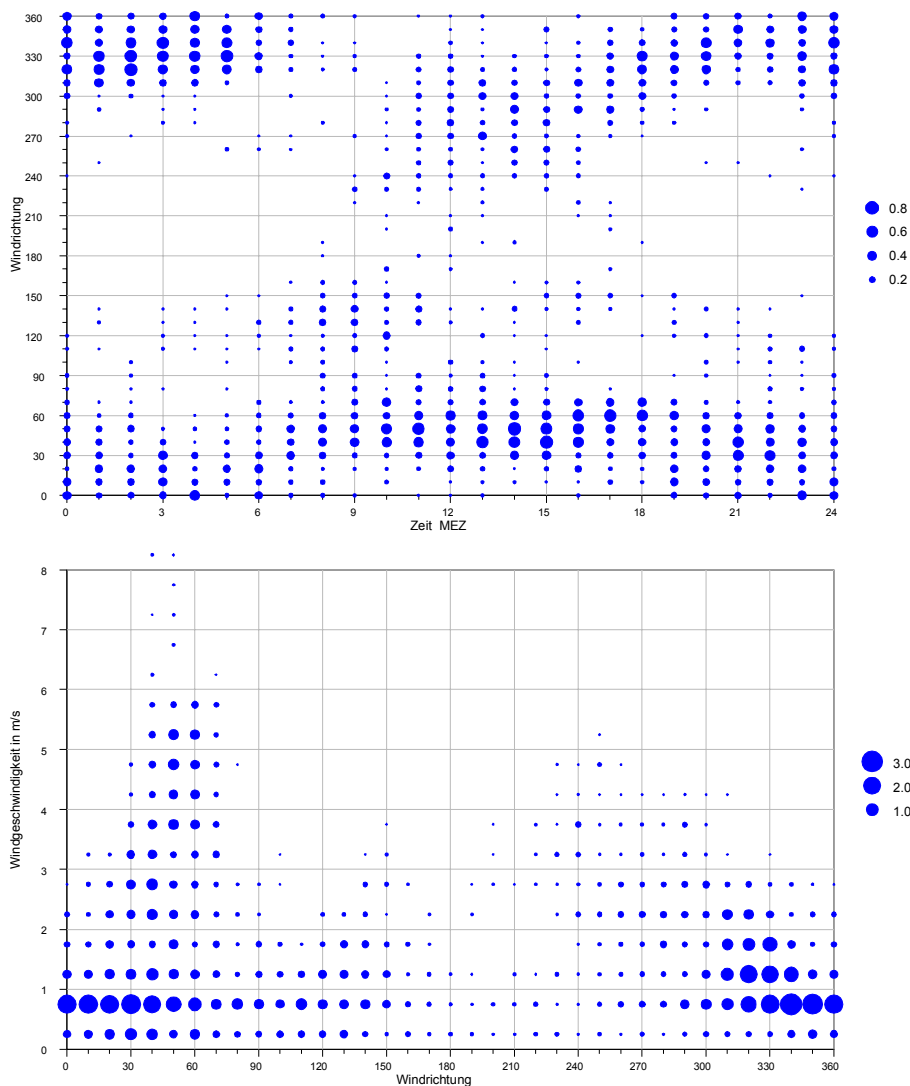
Abbildung 5-7: Strömungsverhältnisse im Raum Zürich



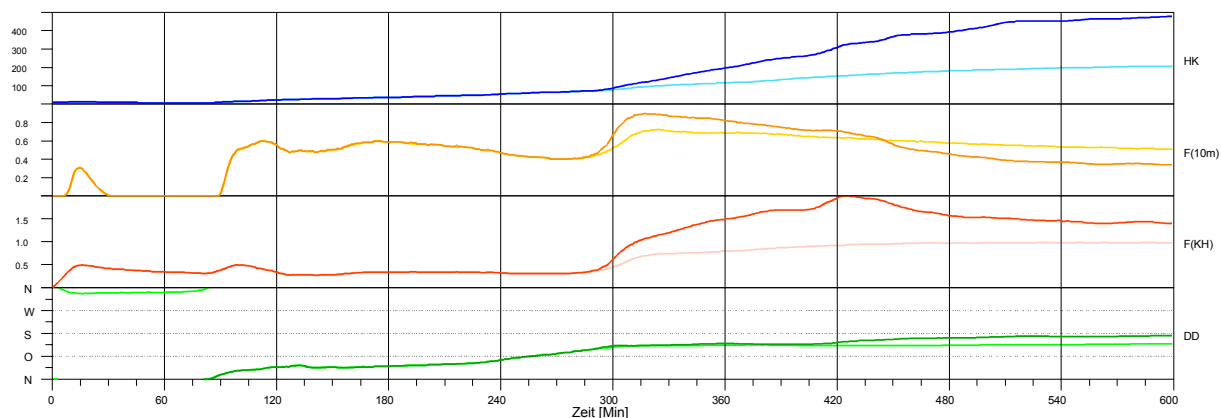
Zürich-MeteoSchweiz: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungsw.



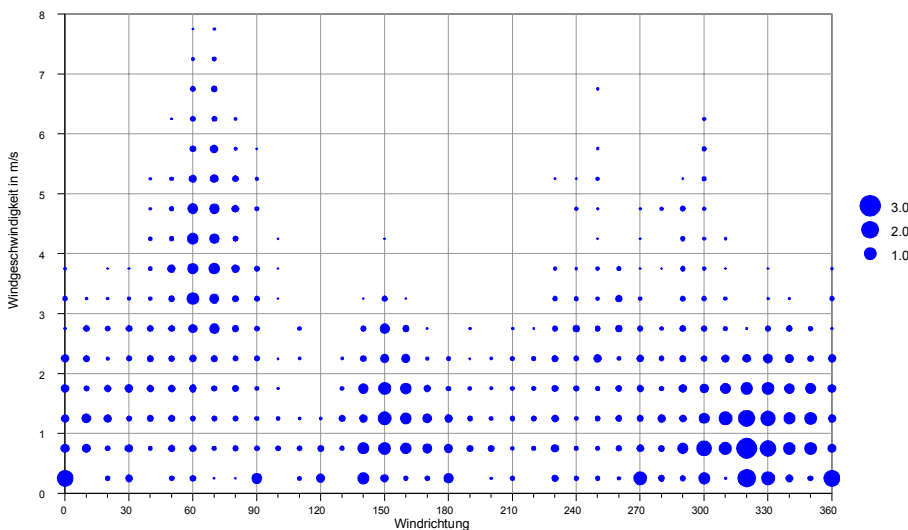
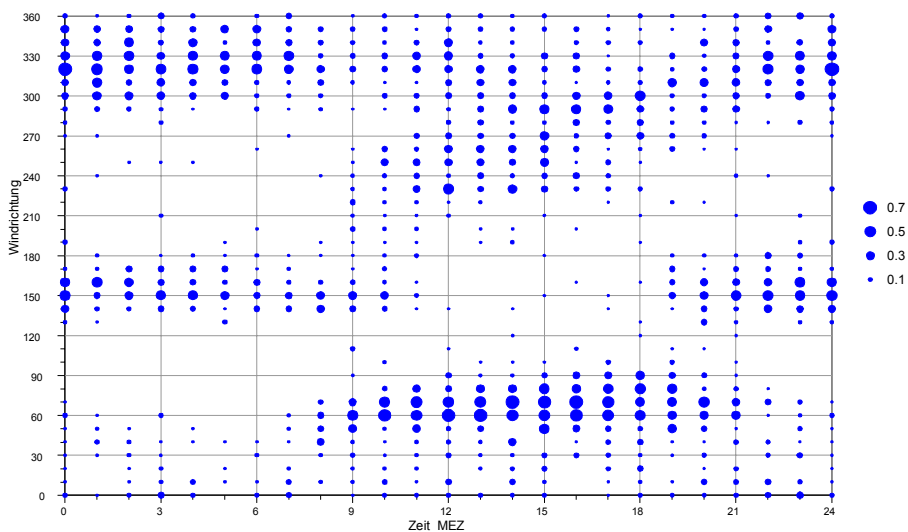
Zürich-MeteoSchweiz: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



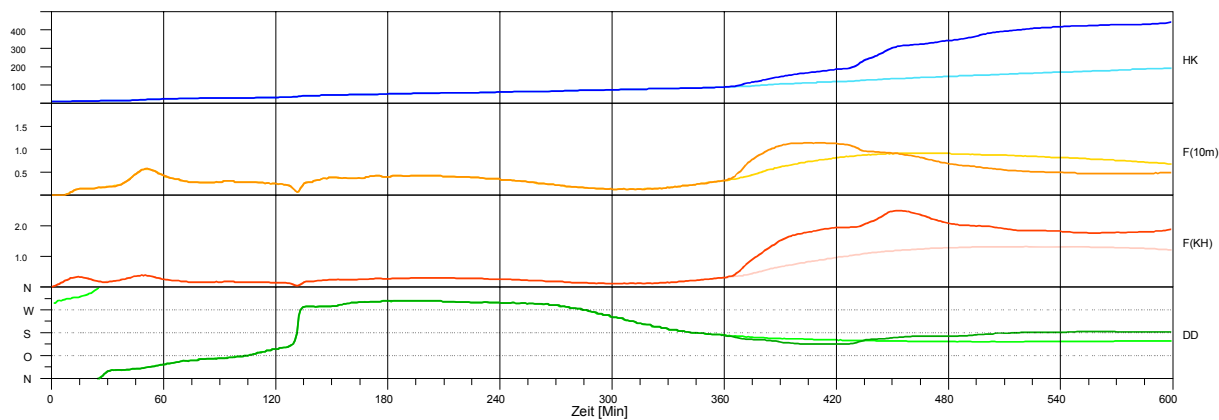
Wallisellen: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Wallisellen: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



Kloten: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Kloten: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltluflhöhe in m

5.2.5 Wädenswil

In Wädenswil werden vom Modell südwestliche Winde in den ersten 3 Stunden berechnet. Danach findet man auch südliche Winde am Standort. Der Einfluss der Alpen ist hier aufgrund der Alpennähe stärker vorhanden und macht sich bereits nach 4 Stunden in geänderten Strömungsverhältnissen bemerkbar.

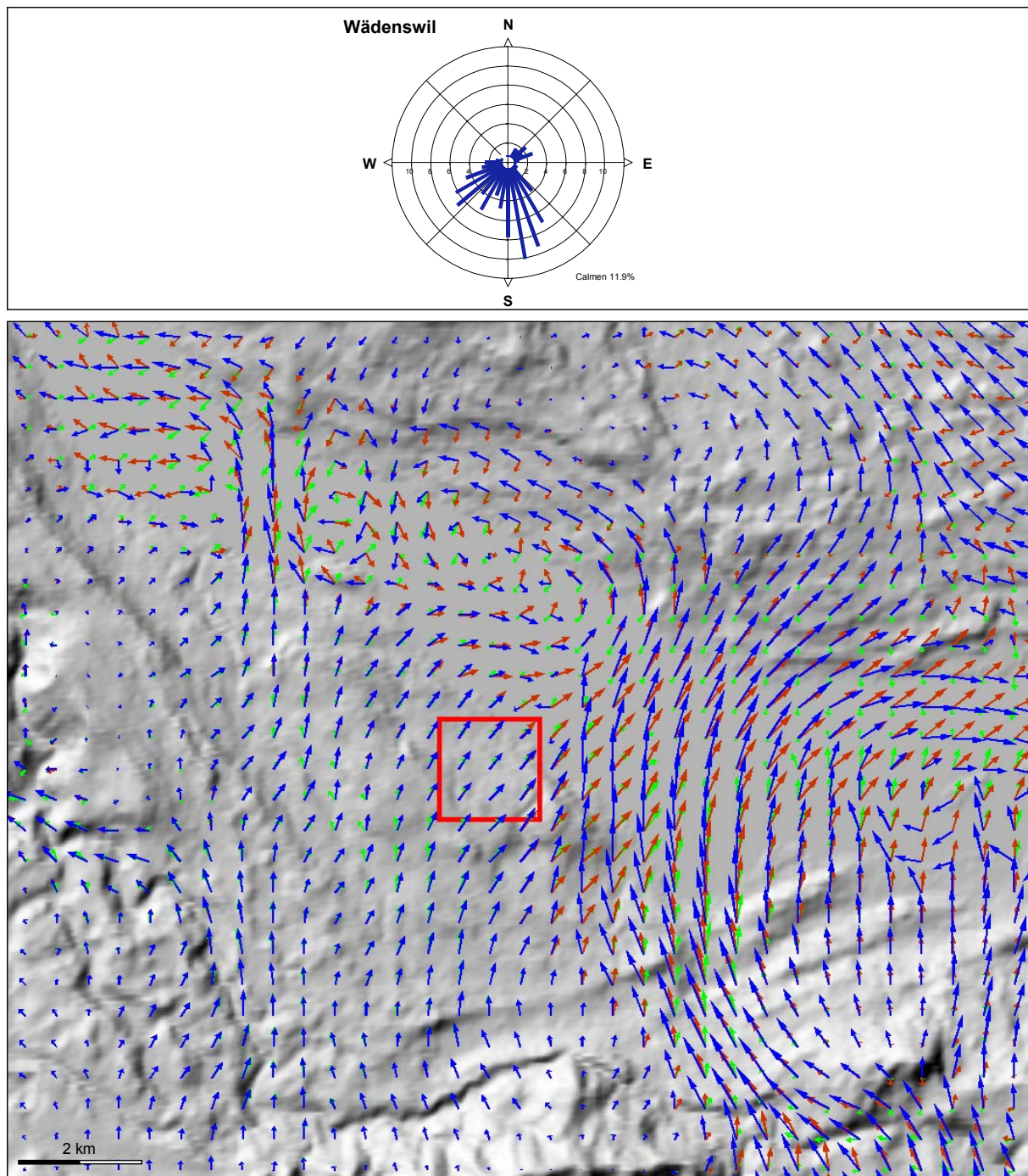
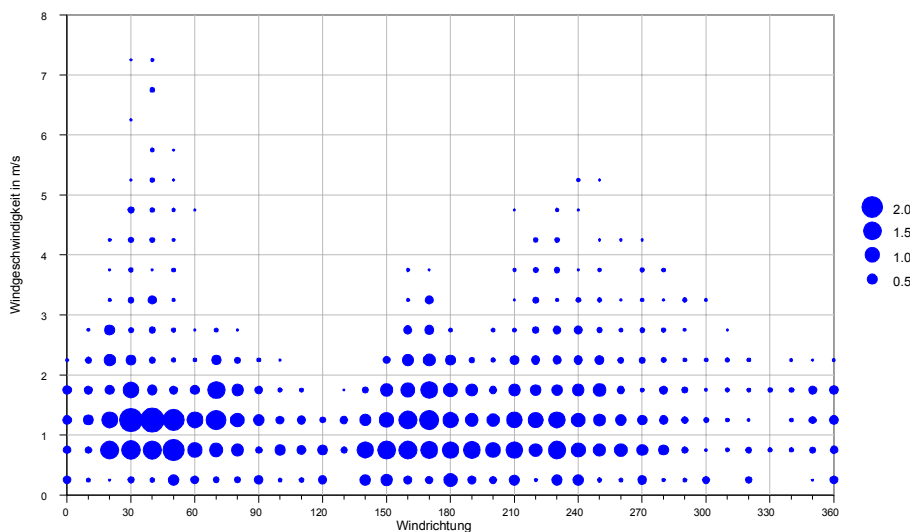
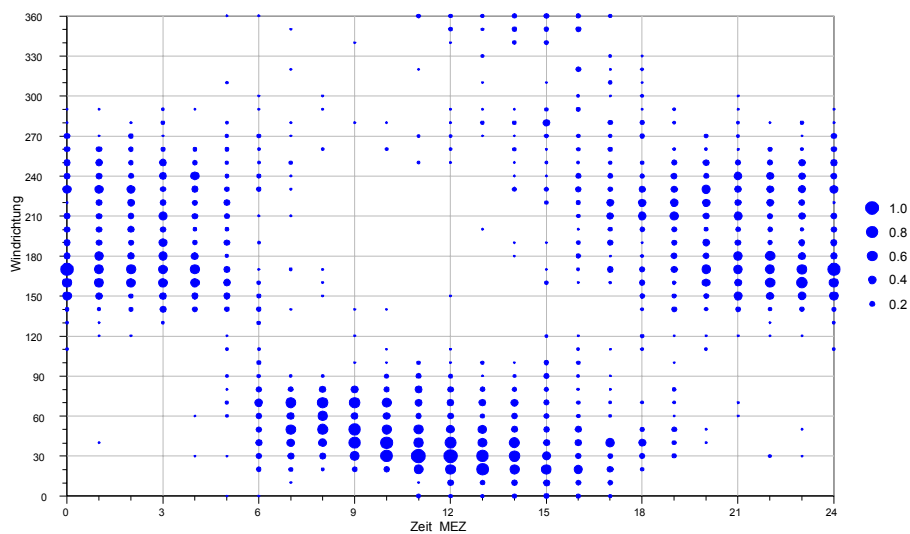
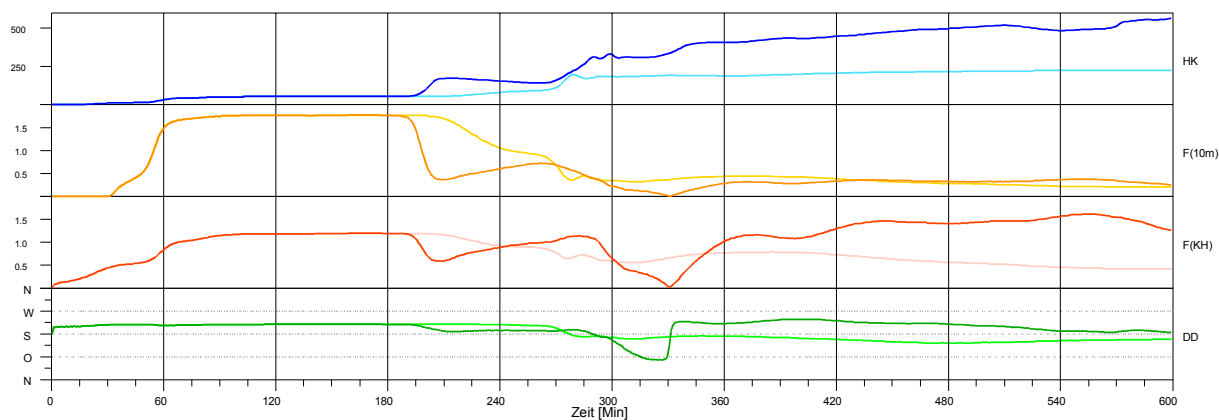


Abbildung 5-8: Strömungsverhältnisse im Raum Wädenswil



Wädenswil: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Wädenswil: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

5.2.6 Tänikon

An der Messstelle Tänikon werden vom Modell südwestliche bis südliche Winde berechnet. Die Messungen weisen häufiger Süd- bis Südsüdostwinde auf.

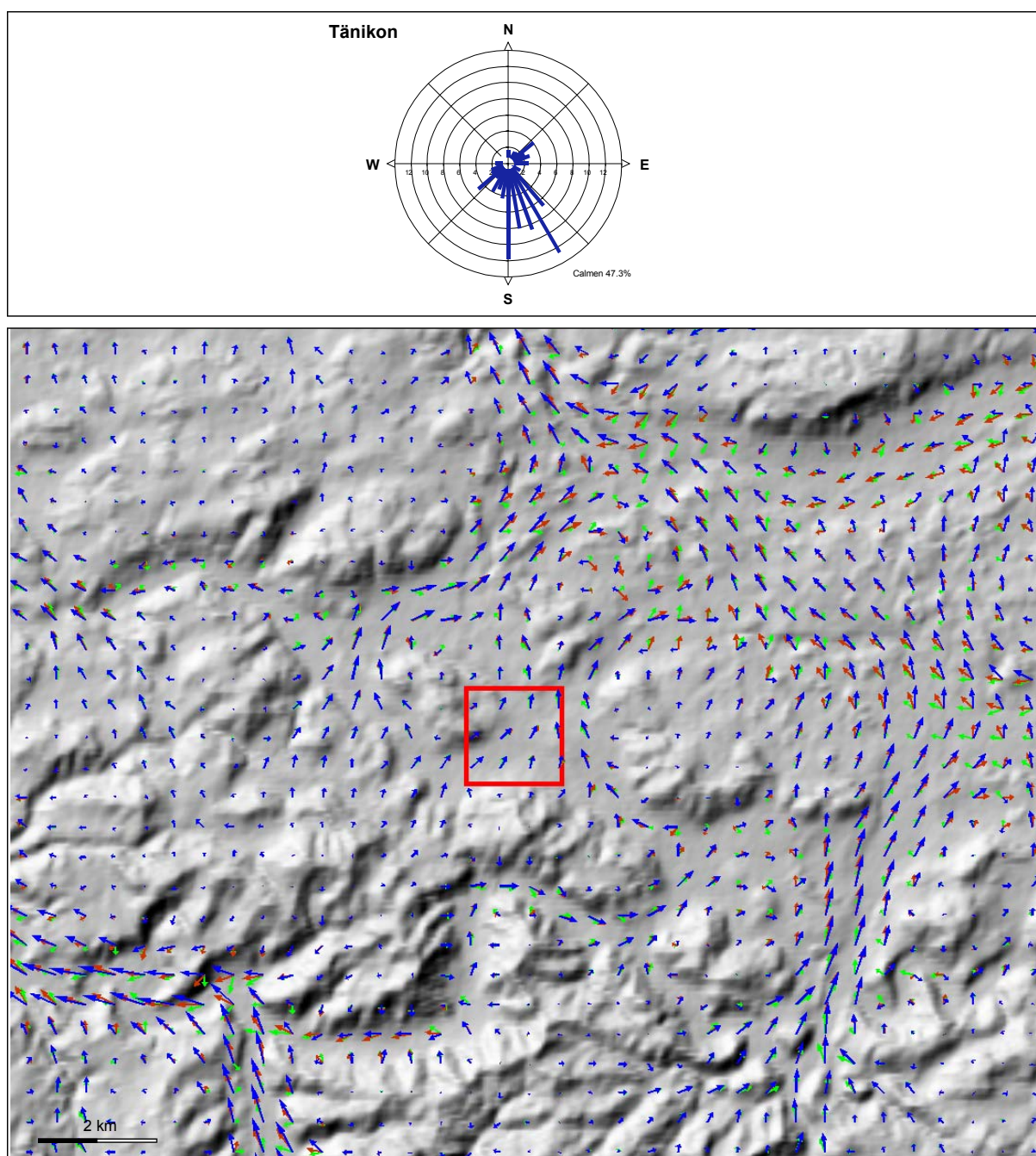
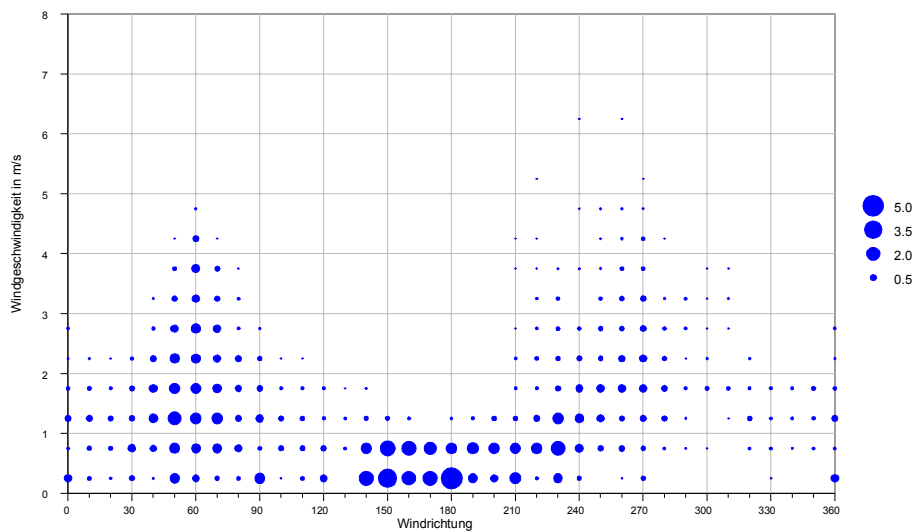
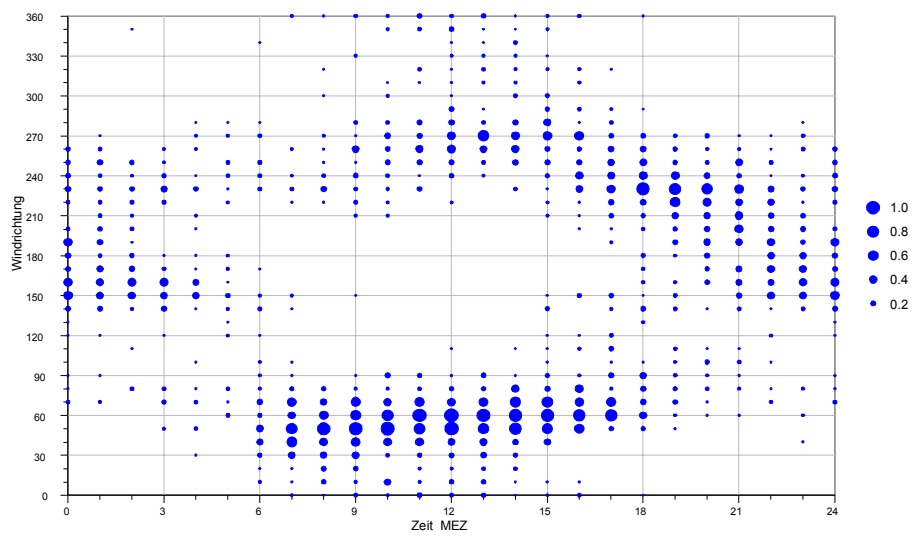
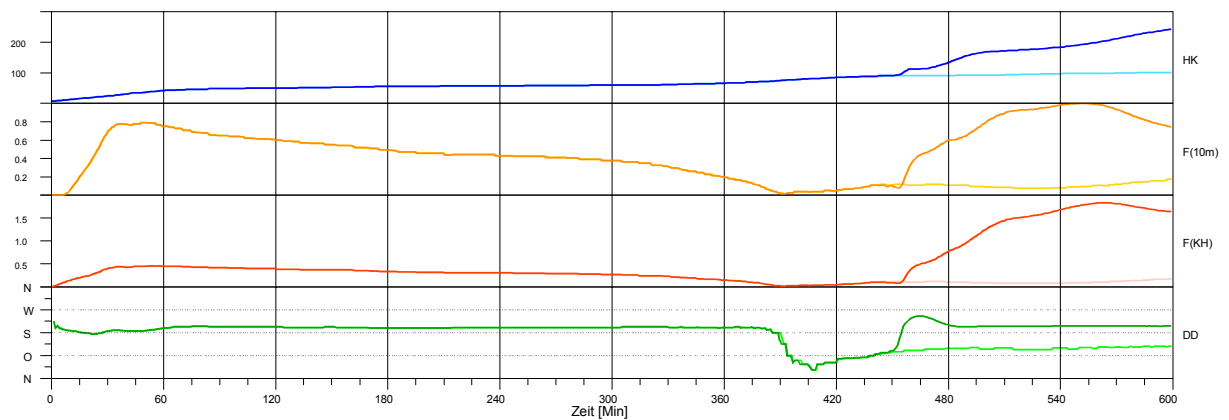


Abbildung 5-9: Strömungsverhältnisse im Raum Tänikon



Tänikon: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Tänikon: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

5.2.7 Hoechst-Friedhof, Lustenau-Wiesenrain, Dornbirn-ARA2

Die Kaltluftabflussverhältnisse im Raum Dornbirn-Lustenau variieren zu Beginn der Nacht stark, da hier noch die Zuflüsse von Seitentälern einen merklichen Einfluss ausüben. Im weiteren Verlauf der Nacht setzt sich dann am Rhein im Bereich Lustenau eine südsüdwestliche Strömung durch.

In Hoechst wird die Strömung bodennah auf südwestliche Richtungen gedreht. Diese Drehung zeigt das Modell nur tendenziell.

An der ARA in Dornbirn scheint sich die Strömung bodennah von der Höhenströmung zu entkoppeln. Darauf deutet auch die Zahl der Calmen hin, die dort in 2/3 der Strahlungsnächte auftreten. Hier findet man keine ausgeprägte Kaltluftfließrichtung.

Der Einfluss der Alpen macht sich hauptsächlich in einer größeren Kaltfluthöhe bemerkbar. Die Strömungsrichtung ändert sich dadurch kaum.

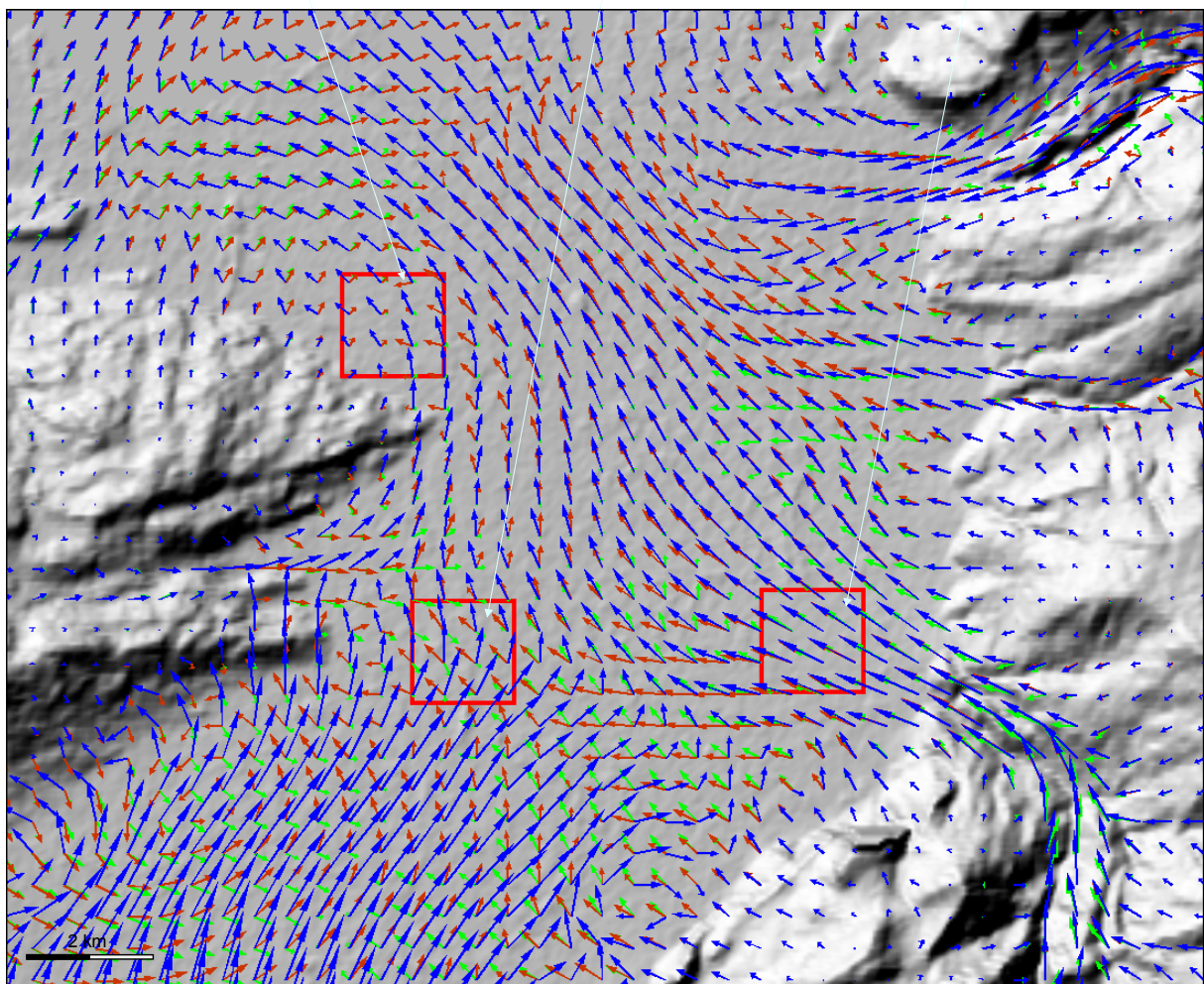
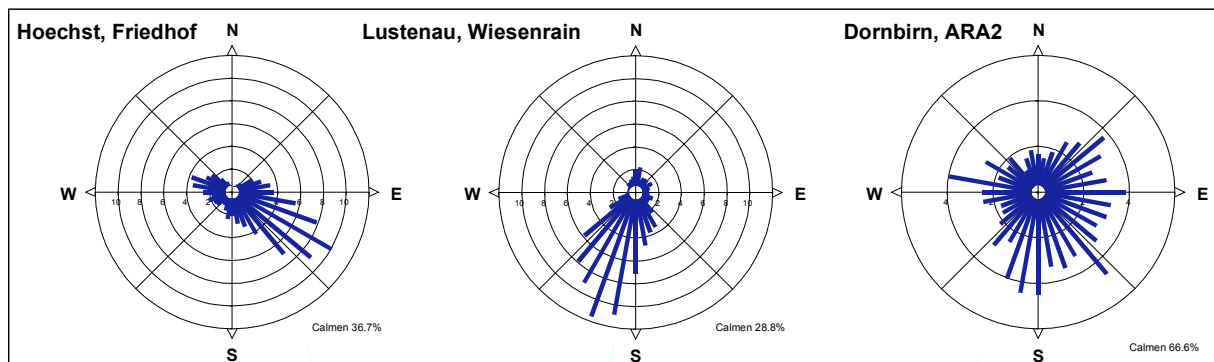
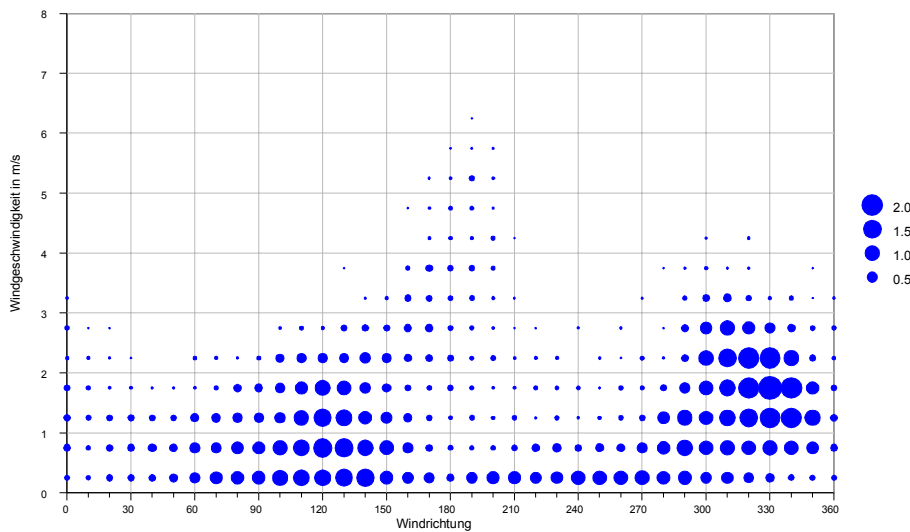
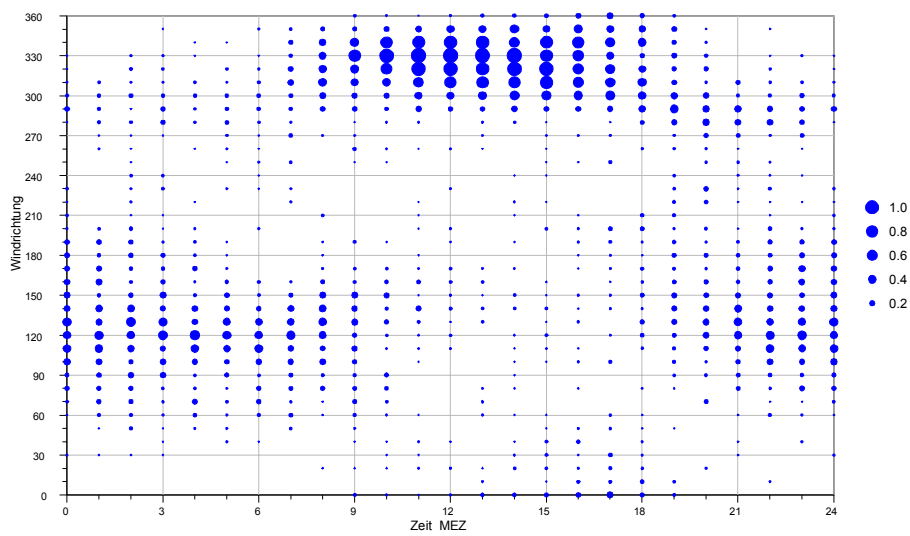
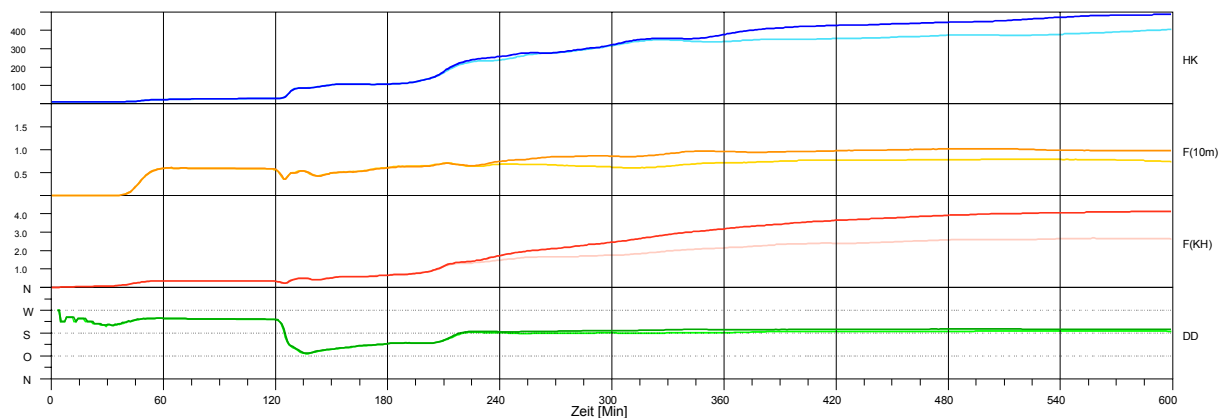


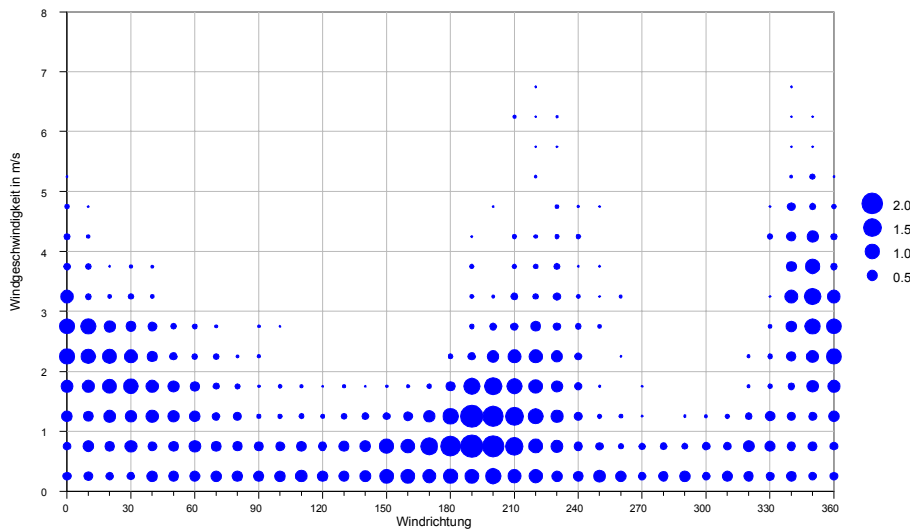
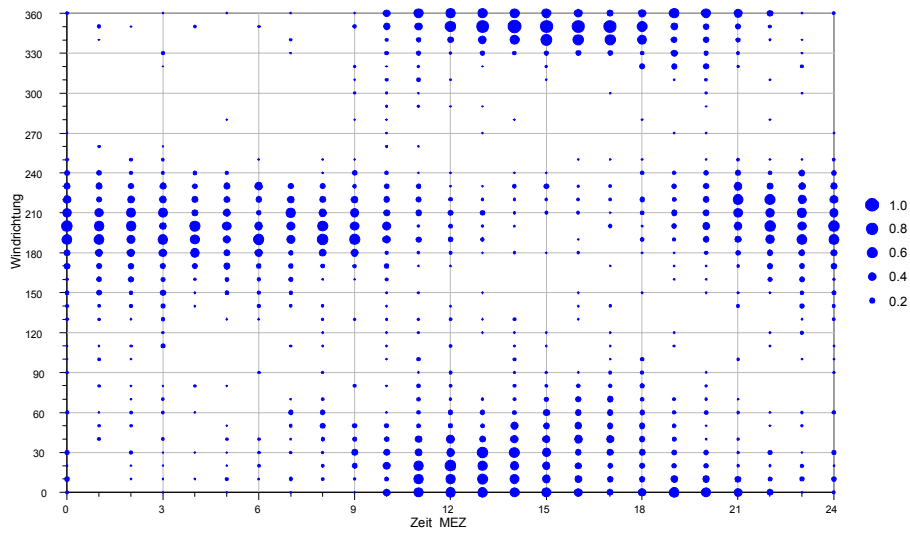
Abbildung 5-10: Strömungsverhältnisse im Raum Lustenau – Dornbirn



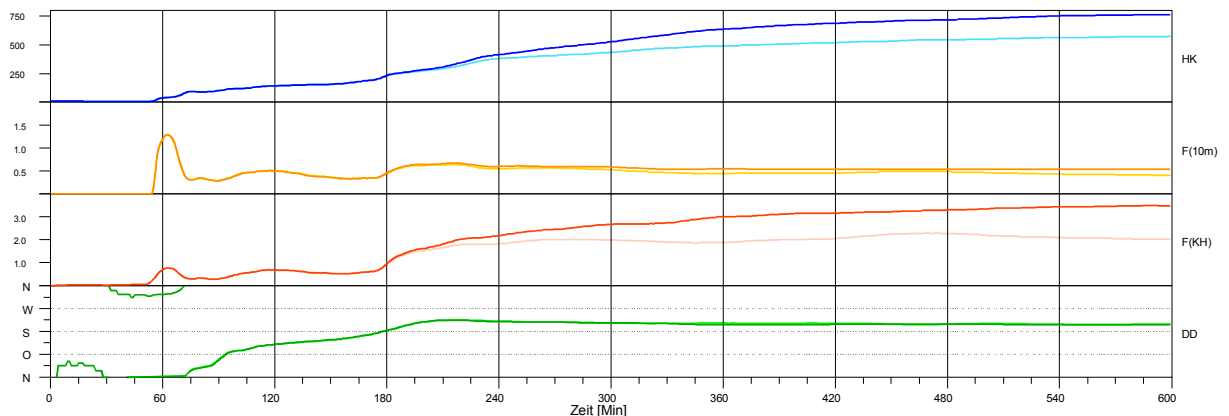
Höchst: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



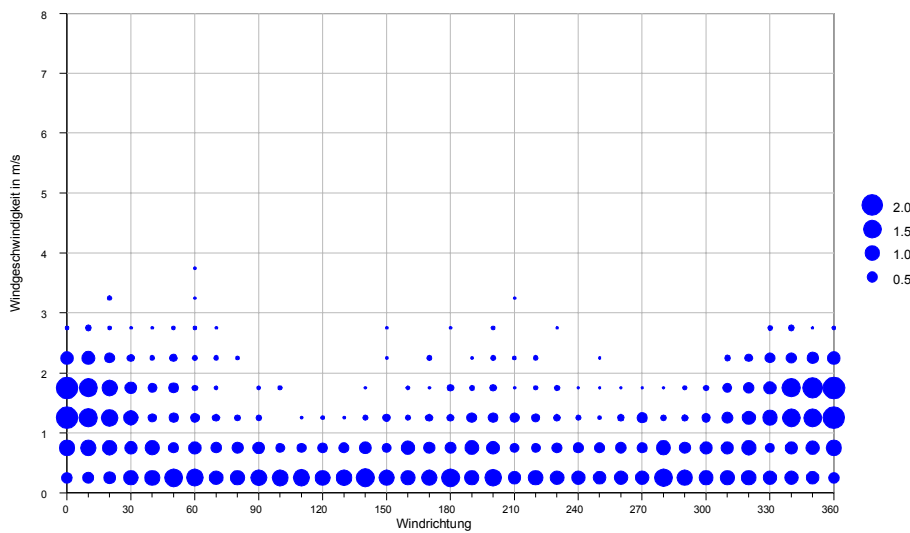
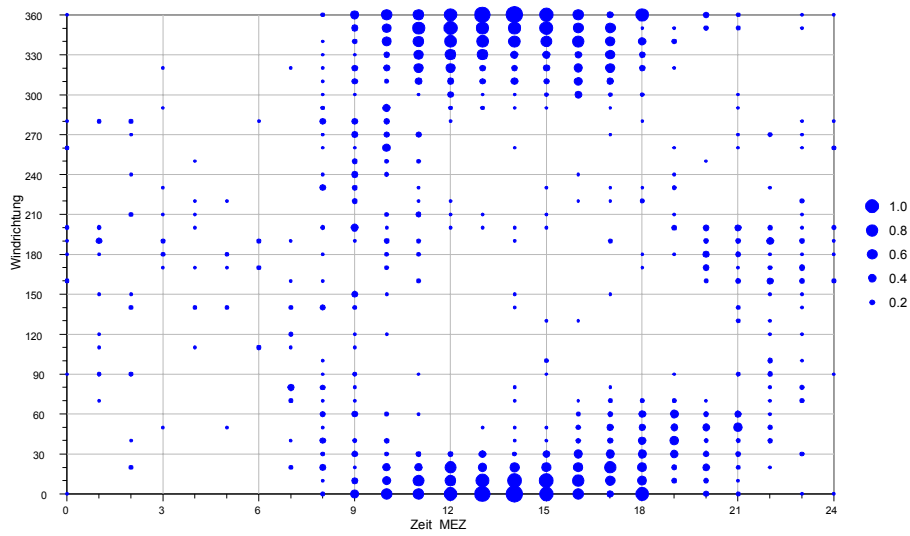
Höchst: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



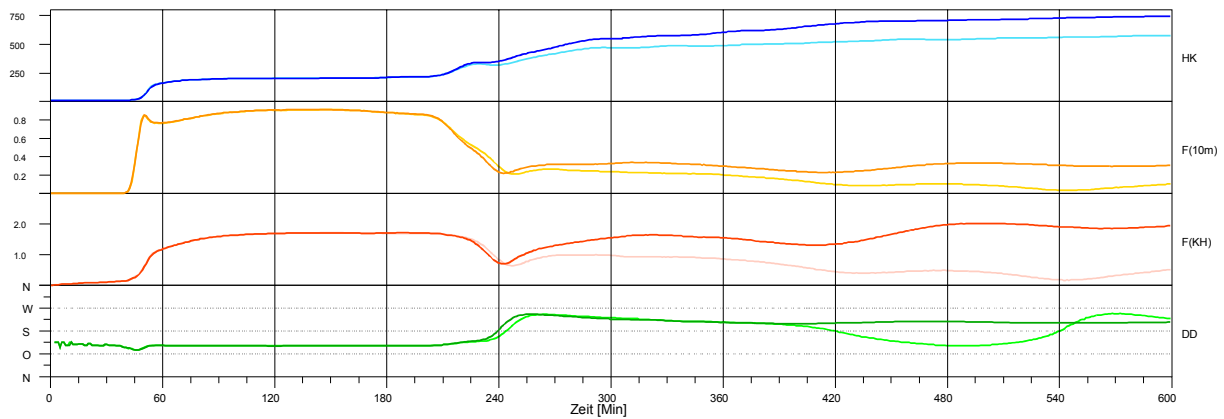
Lustenau: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Lustenau: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m



Dornbirn-ARA2: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Dornbirn-ARA2: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

5.2.8 Bludenz, Bleiche

Bludenz ist vergleichbar mit den alpinen Standorten bei Chur. Die Strömung bei Strahlungswetterlagen folgt dem Talverlauf. Mit Ausnahme der Zeit kurz nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse wird dies vom Modell gut wiedergegeben.

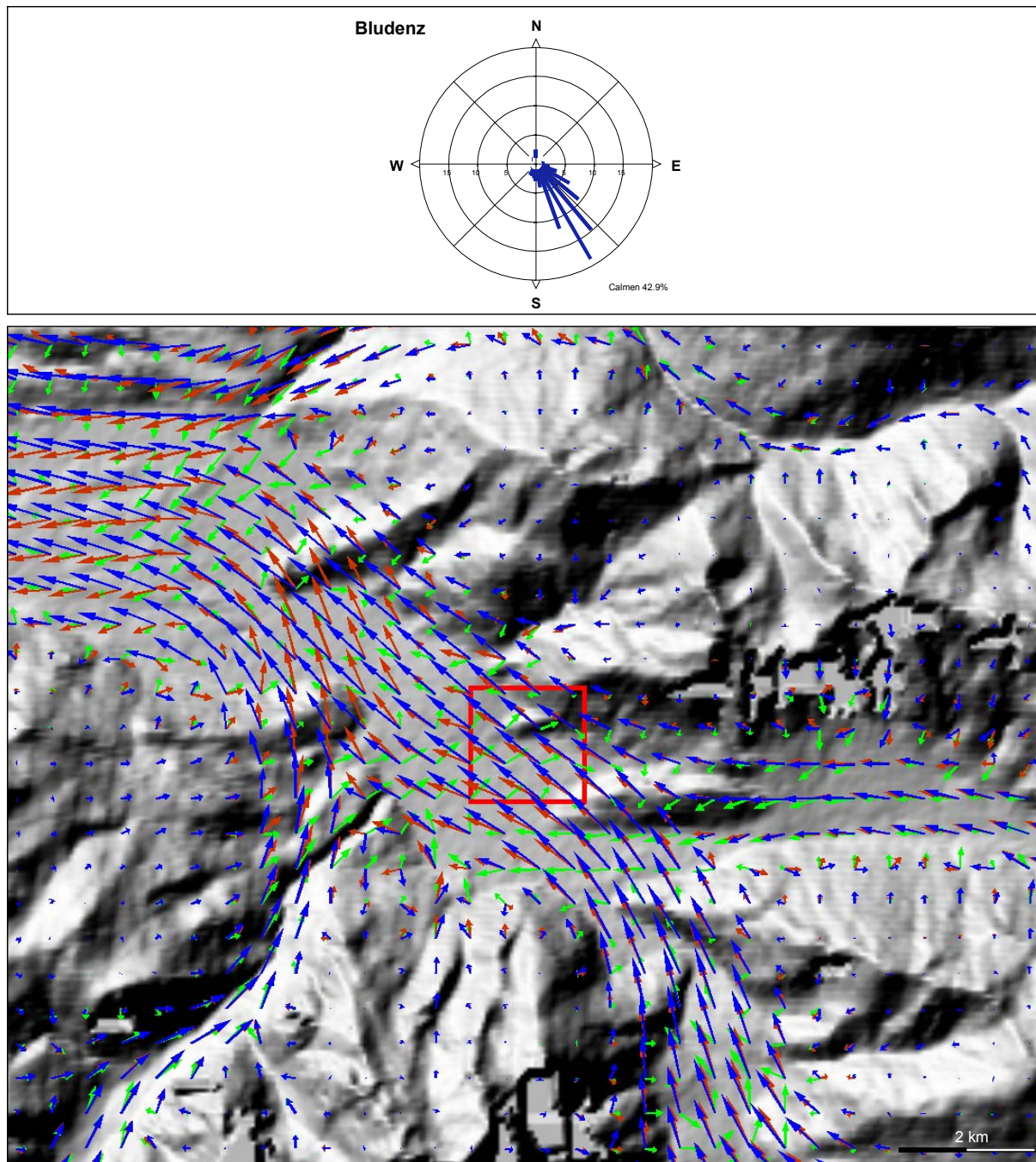
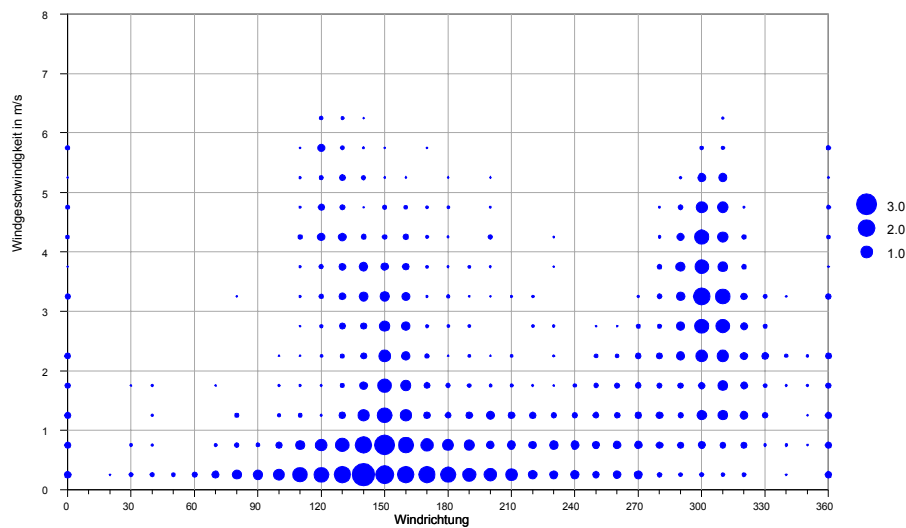
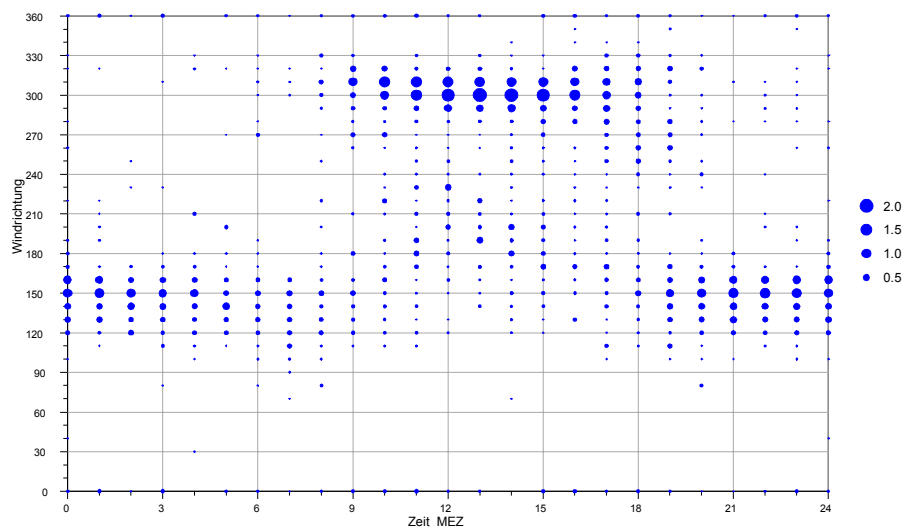
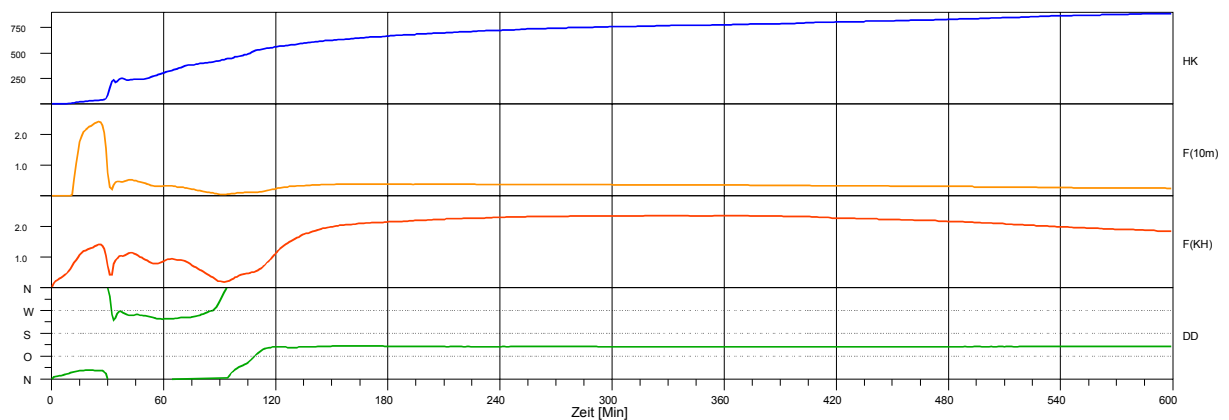


Abbildung 5-11: Strömungsverhältnisse im Raum Bludenz



Bludenz: Zeit/Windrichtung und Windrichtung/Windgeschwindigkeit bei Strahlungswetterlagen



Bludenz: Simulierte Entwicklung der Kaltluftverhältnisse: DD - Windrichtung, F- Windgeschwindigkeiten in m/s, HK – Kaltfluthöhe in m

6 Zusammenfassung und Ausblick

In die Ostschweiz wurden flächendeckend auf einem 250 m-Raster die typische Kaltluftabflussverhältnisse – wie sie bei windschwachen und wolkenarmen Wetterlagen in den Nachtstunden auftreten – mit einem numerischen Modell berechnet. Ziel war es, nachzuweisen, dass das Modell realistische Strömungsverhältnisse ausweist. Zudem musste geklärt werden, wie sich das Modell im alpinen Raum verhält.

Dazu wurden Simulationen mit und ohne Alpenraum durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Kaltluftabflüsse aus dem alpinen Raum hauptsächlich an den Talausgängen bemerkbar machen. Die dort „angelieferte“ Luft überstreicht im weiteren Verlauf der Nacht auch die vorgelagerten Zonen (Mittelland). Mit zunehmendem Abstand zu den Alpen gehen die Einflüsse stark zurück. Eine Änderung macht sich dann im Wesentlichen nur noch in der Zunahme der Kaltfluthöhe bemerkbar.

Um die Qualität der berechneten Strömungsfelder zu prüfen, wurden Vergleiche mit zahlreichen meteorologischen Messstationen durchgeführt. Die Simulationen zeigen meist gute Übereinstimmungen mit den Messungen.

Als Schwachpunkt muss die Interpolation auf die bodennahen Windgeschwindigkeiten angesehen werden. Das hier zugrunde gelegte Kaltluftabflussprofil ist für Bereiche mit großer Kaltfluthöhe und langsamen Fließgeschwindigkeiten nur bedingt geeignet, um die bodennahen Windgeschwindigkeitsverhältnisse abzuschätzen. Hier wird eine Verbesserung auf der Basis der berechneten Kaltfluthöhe, der berechneten mittleren Geschwindigkeit und der Landnutzung angestrebt.

Mängel, die eine Anwendung wie in Baden-Württemberg oder Nordrhein-Westfalen, ausschließen würden, konnten nicht festgestellt werden.

Freiburg, 22. März 2007

Dr. Rainer Röckle
Dipl.-Meteorologe

Claus-Jürgen Richter
Dipl.-Meteorologe

7 Literaturverzeichnis

Arya, S.P.: Modeling and Parameterization of Near-Source Diffusion in Weak Winds. Journal Appl. Met. Vol. 34, 1995, 1112-1122.

Banta, R.M., Oliver, L.D., Gudiksen, P.H., Lange, R.: Implications of Small-Scale Flow Features to Modelling Dispersion over Complex Terrain. Journal Appl. Met. Vol. 35, 1996, 330-342.

Barschall, H.: Über die Gebirgswinde in den Mittleren Vogesen. Met. Zeitschrift 36, 1919, 137-142.

Poulus, G.S., Bossert, J.E.: An Observational and Prognostic Numerical Investigation of Complex Terrain Dispersion. Journal Appl. Met. Vol. 34, 1995, 650-669.

CEN/TC264/WG2: European CEN Standard: Odour concentration measurement by dynamic olfactometry. CEN Secretariat. Delft, The Netherlands.

Defant, F.: Local Winds. Compendium of Meteorology. Amer. Met. Society, 1951, 655-675

Gygax, H.A.: Evidence for Mechanical Induced Downslope Wind in the Lee of Gentle Sloped Hills. Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. A34, 1985, 167-177.

Heldt, K., Hörschle, K.: Hang- und Bergwinde am Rheintalrand bei Karlsruhe. Meteorologische Rundschau 41, 1989, 104-110.

King, E.: Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Forstgefährdung durch Straßenbauten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 130, Bd. 17, Offenbach.

Röckle, R., Richter, C.-J.: Ausbreitung von Geruchsstoffen in Kaltluftabflüssen – Messungen und Modellrechnungen. VDI Berichte 1373 - Gerüche in der Umwelt. VDI-Verlag Düsseldorf, 1998, 249-259

VDI 3787/5: Umweltmeteorologie – Kaltluft

Vogt, S., Werner, R., Zängl, G.: Valley-wind characteristics in the Alpine Rhine Valley: Measurements with a wind-temperature-profiler and numerical simulations. Poster at ICAM 2005

Wagner, A.: Hangwind – Ausgleichsströmung – Berg- und Talwinde. Meteorol. Zeitschrift 1932, 209.

8 Anhang A

8.1 Modellbeschreibung

Das Modell DFM beruht auf Gleichungen, die von Garrett und Smith (1984)⁴ hergeleitet wurden. Es beschreibt ein vertikal integriertes Kaltluftabflussmodell.

In einem geländefolgenden Koordinatensystem werden die Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse numerisch gelöst. Die Gleichungen enthalten Terme für Advektion, Schwerebeschleunigung, Reibung an der Erdoberfläche, Einmischen von Luft (Entrainment) am oberen Rand der Kaltluft, mesoskalige und großräumige Druckgradienten, Antrieb durch übergeordnete Strömungen, Coriolis-Effekte und horizontale Diffusion.

Die entsprechenden Gleichungen und Parametrisierungen sind in Kapitel 8.2 dargestellt.

Eingangsgrößen sind die Geländeoberfläche z_g , geostrophischer Wind (u_g, v_g) , übergeordneter Wind (u_a, v_a) , die Simulationszeit (t) und landnutzungsabhängige Größen wie der Reibungsbeiwert (C_D), potentieller Temperaturgradient der Kaltluft (θ_D) und ein Höhenzuschlag zur Orographie.

Ausgabegrößen sind die vertikal gemittelten Horizontalkomponenten und die Höhe der fließenden Kaltluft. Daraus lässt sich der lokale Volumenstrom (Produkt aus Kaltluflhöhe und Horizontalgeschwindigkeit) und unter Annahme eines typischen Kaltluftströmungsprofils auch Geschwindigkeiten in vorgegebenen Höhen ableiten.

Folgende Punkte wurden gegenüber dem ursprünglichen Modell von Garrett und Smith verbessert bzw. ergänzt:

1. Die Größen Reibungsbeiwert, potentieller Temperaturgradient der Kaltluft und der Höhenzuschlag wurden von der Landnutzungsklasse abhängig gemacht.
2. Der Ansatz zur Berechnung der horizontalen Diffusion bei der Berechnung der Kaltluflhöhe wurde verbessert, so dass keine Diffusion entgegen den Gradienten auftreten kann.
3. Die Bestimmung des Zeitschritts erfolgt nach jeder Iteration neu, so dass die Effizienz gesteigert werden konnte.
4. Die Randbedingungen an den Einströmrändern lassen sich vorgeben (z.B. aus genestetem Lauf mit geringerer Auflösung), so dass z.T. auch außerhalb des Untersuchungsgebiets produzierte Kaltluft ins Rechengebiet einströmen kann.

⁴ Garrett, A.J., Smith, F.G.: Two-Dimensional Simulations of Drainage Winds and Diffusion Compared to Observations. Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol.23, 1984.

8.2 Ausgangsgleichungen

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1) \text{ Massenerhaltung}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\rho u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho v \frac{\partial u}{\partial y} - \rho w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f v - \rho g \frac{\partial z_g}{\partial x} \quad (2) \text{ Impulserhaltung}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho u \frac{\partial v}{\partial x} - \rho v \frac{\partial v}{\partial y} - \rho w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho f u - \rho g \frac{\partial z_g}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4) \text{ Statische Grundgleichung}$$

$$\text{Koordinatentransformation } z = z_r - z_g \quad (5)$$

Das Modell soll Dichteströmungen beschreiben, also für kleine Strömungsgeschwindigkeiten in thermisch geschichteter Atmosphäre maßgebend sein. Hier ist die hydrostatische Approximation gültig. Ferner kann die Vertikalkomponente w in den Coriolistermen vernachlässigt werden ($w \ll u, v$).

Die Aufspaltung der Komponenten in Mittelwert und Abweichung (Reynolds-Theorem), Integration über die Kaltluftschicht und weiteren plausiblen Annahmen ergibt z.B. für die x-Komponente

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\overline{u'w'}}{h} \Big|_h + \frac{\overline{u'w'}}{h} \Big|_0 - f(v_g - \bar{v}) + \frac{\theta_D}{\theta_R} g \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{\theta_D}{\theta_R} g \frac{\partial z_g}{\partial x} \quad (6)$$

Die turbulenten Terme werden folgendermaßen parametrisiert:

$$\text{Gradientansatz für } \overline{u'u'} = -K_H \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (7)$$

$$\text{Reibungsansatz Untergrund: } \overline{u'w'} \Big|_0 = -C_d \bar{u} |\bar{u}| \quad (8)$$

Einmischung am oberen Rand der Kaltluft:

$$\overline{u'w'} \Big|_h = (\bar{u} - u_a) |\bar{u} - u_a| E \quad (9)$$

$$\text{wobei der Entrainmentansatz } E = A_1 / (S_1 Ri + A_2) \quad (10)$$

mit den Konstanten $A_1 = 2 \cdot 10^{-3}$, $A_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ und dem Profilmfaktor $S_1 = 0.5$ angesetzt wird.

$$\text{Die Richardsonzahl } Ri \text{ ist definiert zu } Ri = -\frac{g \theta_D \bar{h}}{\theta_R U^2} \quad (11)$$

wobei der Betrag der Geschwindigkeit gegeben ist mit $U = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$

Nach den getroffenen Umformungen und Annahmen erhält man Gleichung (12) und (13)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + K_H \nabla_H^2 \bar{u} - \frac{C_D \bar{u} |\bar{u}|}{\bar{h}} - \frac{(\bar{u} - u_a) |\bar{u} - u_a| E}{\bar{h}} - f(v_g - \bar{v}) + \frac{\theta_D}{\theta_R} g \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{\partial z_g}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + K_H \nabla_H^2 \bar{v} - \frac{C_D \bar{v} |\bar{v}|}{\bar{h}} - \frac{(\bar{v} - v_a) |\bar{v} - v_a| E}{\bar{h}} - f(\bar{u} - u_g) + \frac{\theta_D}{\theta_R} g \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial y} + \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \quad (13)$$

Zur Berechnung der Höhe der fließenden Kaltluft wird die Kontinuitätsgleichung umgeformt.

Aus der Massenerhaltung (1) folgt

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \bar{h}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} \bar{h}}{\partial y} + \overline{u' \frac{\partial h'}{\partial x}} + \overline{v' \frac{\partial h'}{\partial y}} + \frac{\overline{\rho' w'}|_h}{\bar{\rho}} = 0 \quad (14)$$

Die turbulenten Korrelationsterme werden als Diffusionsterme behandelt, d.h.

$$\overline{u' \frac{\partial h'}{\partial x}} + \overline{v' \frac{\partial h'}{\partial y}} = K_H \nabla_H^2 \bar{h} \quad (15)$$

und für den Massenfluss wird ein Entrainmentansatz gewählt:

$$\frac{\overline{\rho' w'}|_h}{\bar{\rho}} = |U - U_a| E \quad (16)$$

mit $U = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ und der Windgeschwindigkeit der übergeordneten Strömung

Der horizontale Austauschkoeffizient wird aus den horizontalen Windscherungen berechnet

$$K_H = \frac{1}{2} \kappa^2 (2\Delta x)^2 \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

Man erhält dann die Gleichung für die zeitliche Änderung der Kaltfluthöhe

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{u} \bar{h}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v} \bar{h}}{\partial y} + K_H \nabla_H^2 \bar{h} + |U - U_a| E = 0 \quad (18)$$

Die Gleichungen (10), (12), (13) und (18) stellen ein geschlossenes Gleichungssystem für $\bar{u}, \bar{v}, \bar{h}$ und E dar.

Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt auf einem gestagerten kartesischen Gitter. Die Advektionsterme sind upstream-diskretisiert. Der Zeitschritt wird nach jedem Iterations-

schritt neu angepasst und zwar so, dass die Flüsse aus einer Zelle maximal einen Ausgleich der Kaltluflthöhe mit der benachbarten Zelle bewirken können.

Beim Start wird von einer ruhenden Atmosphäre ausgegangen, wobei die anfängliche Kaltluflthöhe überall 0.5 m beträgt.

8.3 Symbolverzeichnis

C_D	Reibungsbeiwert, abhängig von der Landnutzung [-]
E	Entrainmentparameter [-]
f	Coriolisparameter [s^{-1}]
g	Schwerebeschleunigung [m/s^2]
h	Dicke der fließenden Kaltluft
K	Konstante für den Entrainmentansatz
K_H	horizontale Austauschkoefizienten [m^2/s]
P	von Karman Konstante [0.4]
p	Luftdruck [N/m^2]
Ri	Richardsonzahl
S_l	Profilfaktor für Entrainmentansatz
u	Strömungskomponente in x-Richtung [m/s]
u_g	Komponente des geostrophischen Windes in x-Richtung
U	Windgeschwindigkeit [m/s]
v	Strömungskomponente in y-Richtung [m/s]
v_g	Komponente des geostrophischen Windes in y-Richtung
w	Vertikalkomponente [m/s]
x,y	horizontale Koordinaten [m]
z	vertikale geländefolgende Koordinate [m]
z_g	Höhe des Geländes über NN [m]
z_r	Höhenkoordinate in einem rechtwinkligen Koordinatensystem [m]
Π	potentielle Temperatur [K]
Ψ	Dichte der Luft [kgm/m^3]
∇_H^2	horizontaler Laplace Operator [$1/m^2$]

Tief- und hochgestellte Indizes

a

D dynamische Komponente einer atmosphärischen Variable

R Komponente für ruhende Atmosphäre

9 Anhang B

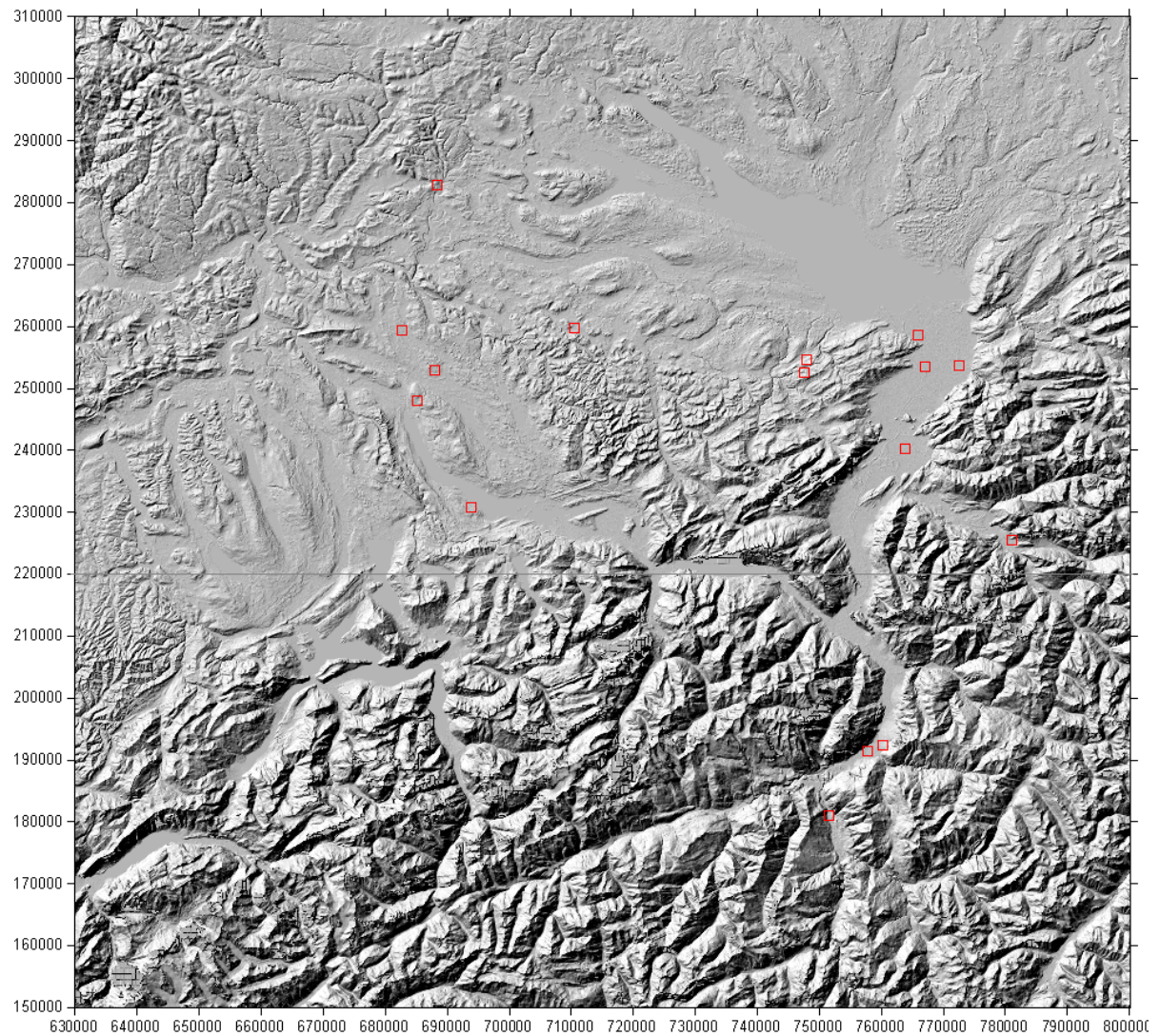


Abbildung A-1: Geschummerte Ansicht des Simulationsgebiets

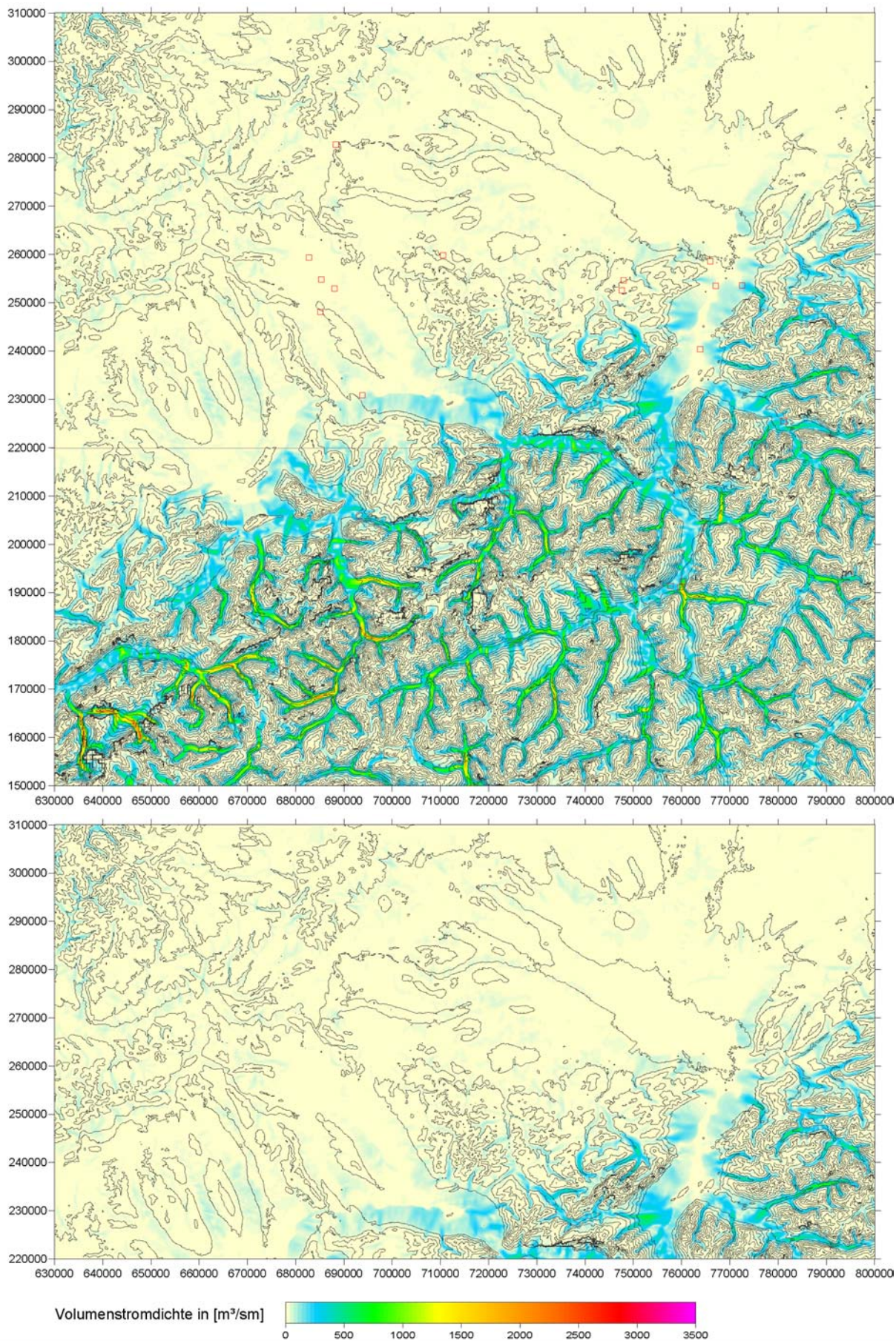


Abbildung A-2: Volumenstromdichte eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

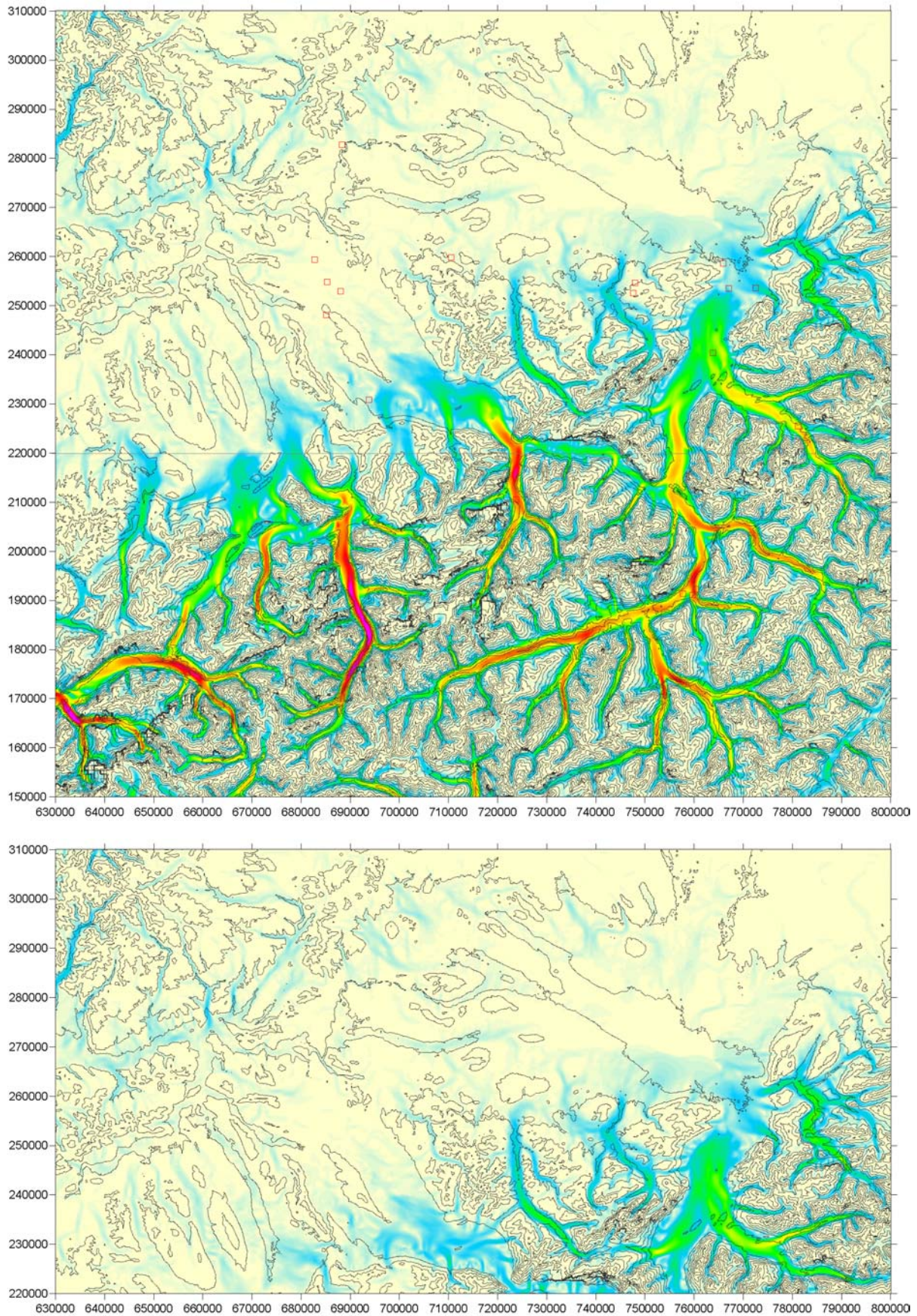


Abbildung A-3: Volumenströmdichte 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

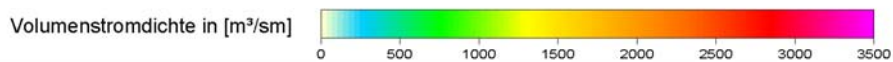
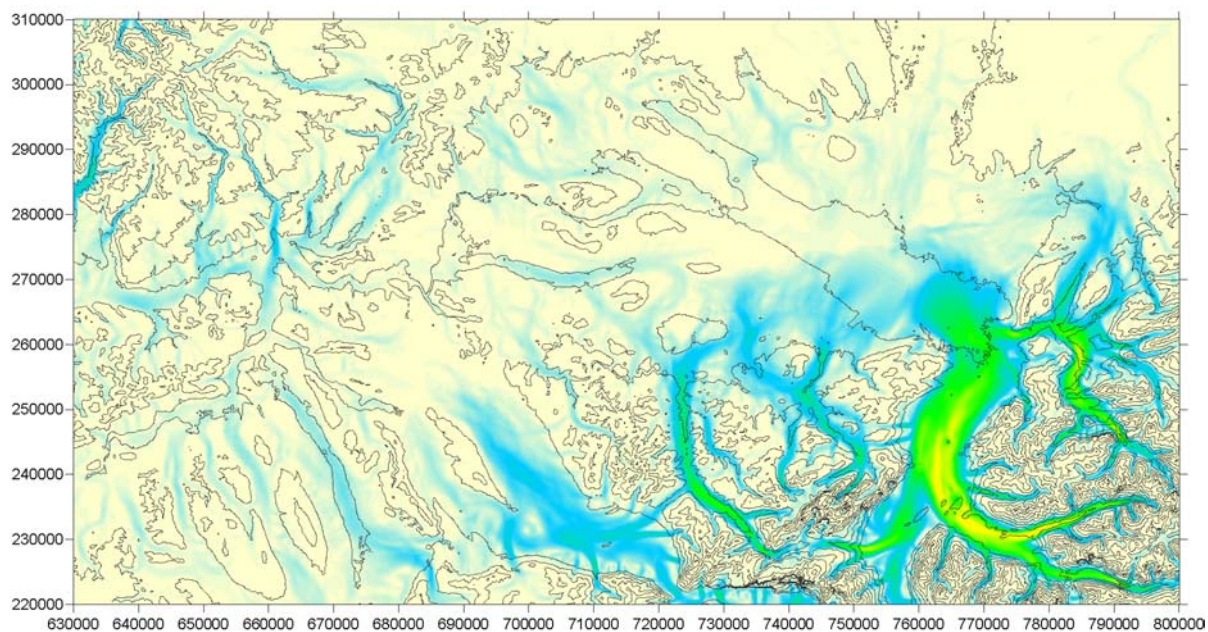
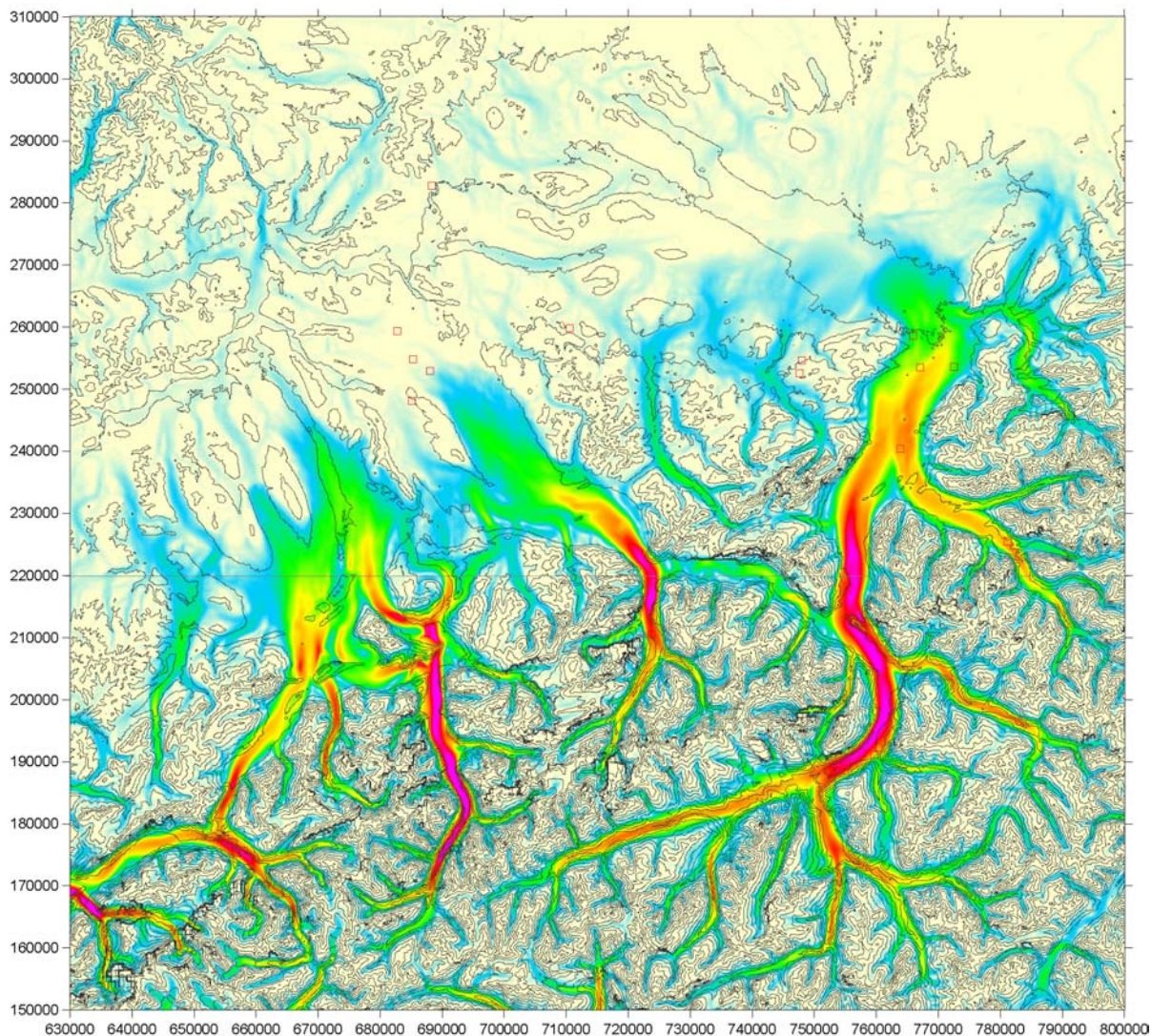


Abbildung A-4: Volumenstromdichte 5 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

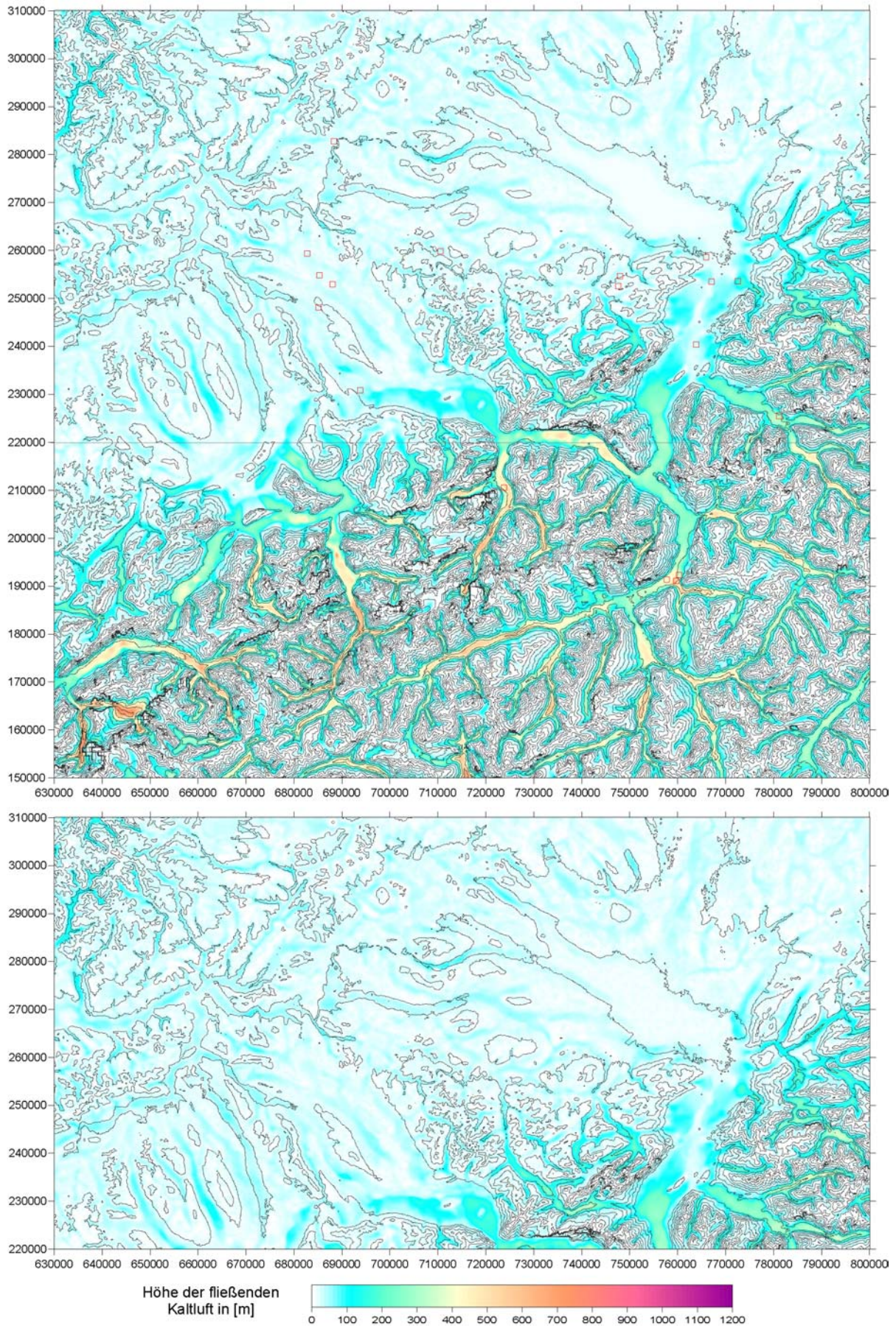


Abbildung A-5: Höhe der fließenden Kaltluft eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

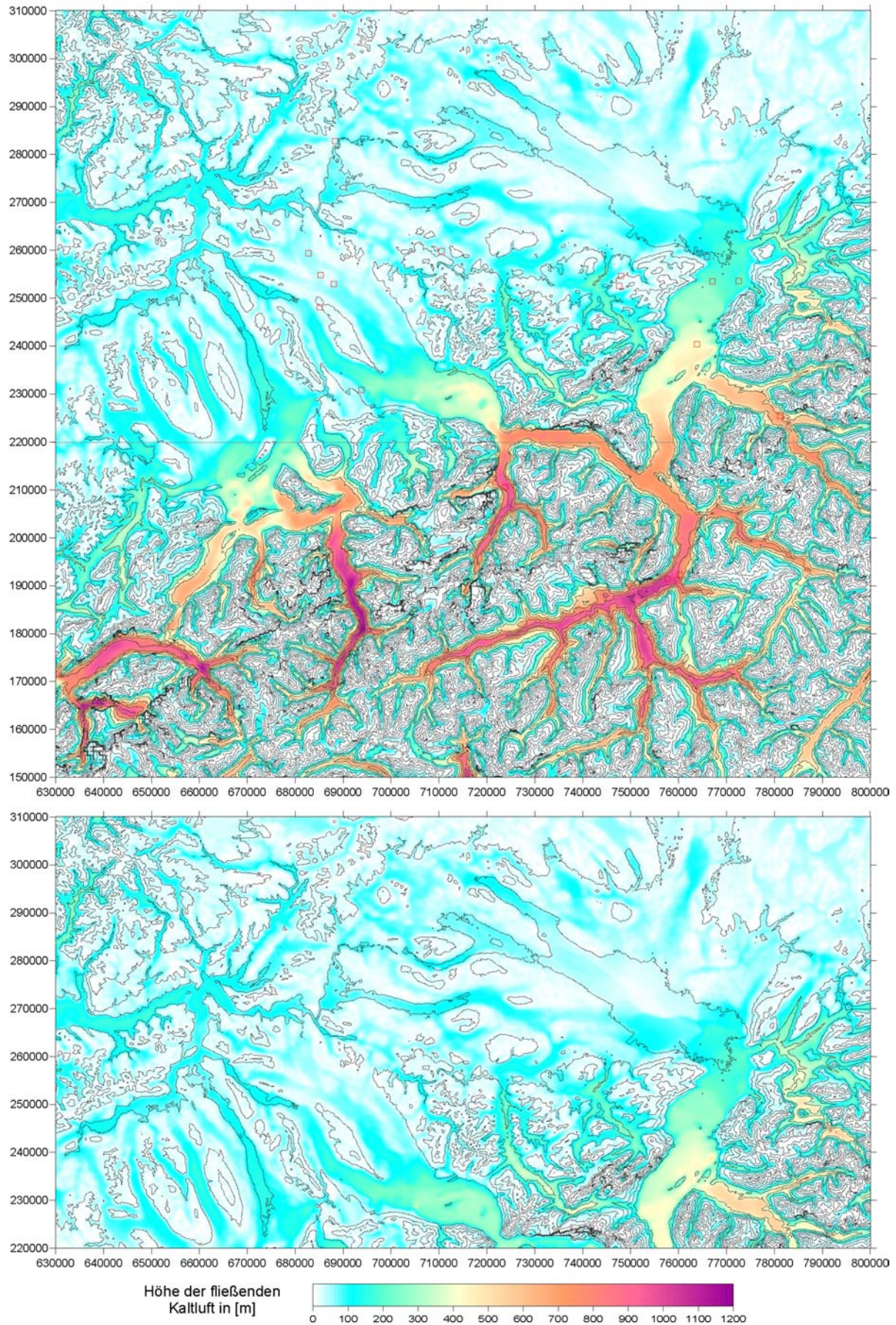


Abbildung A-6: Höhe der fließenden Kaltluft 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

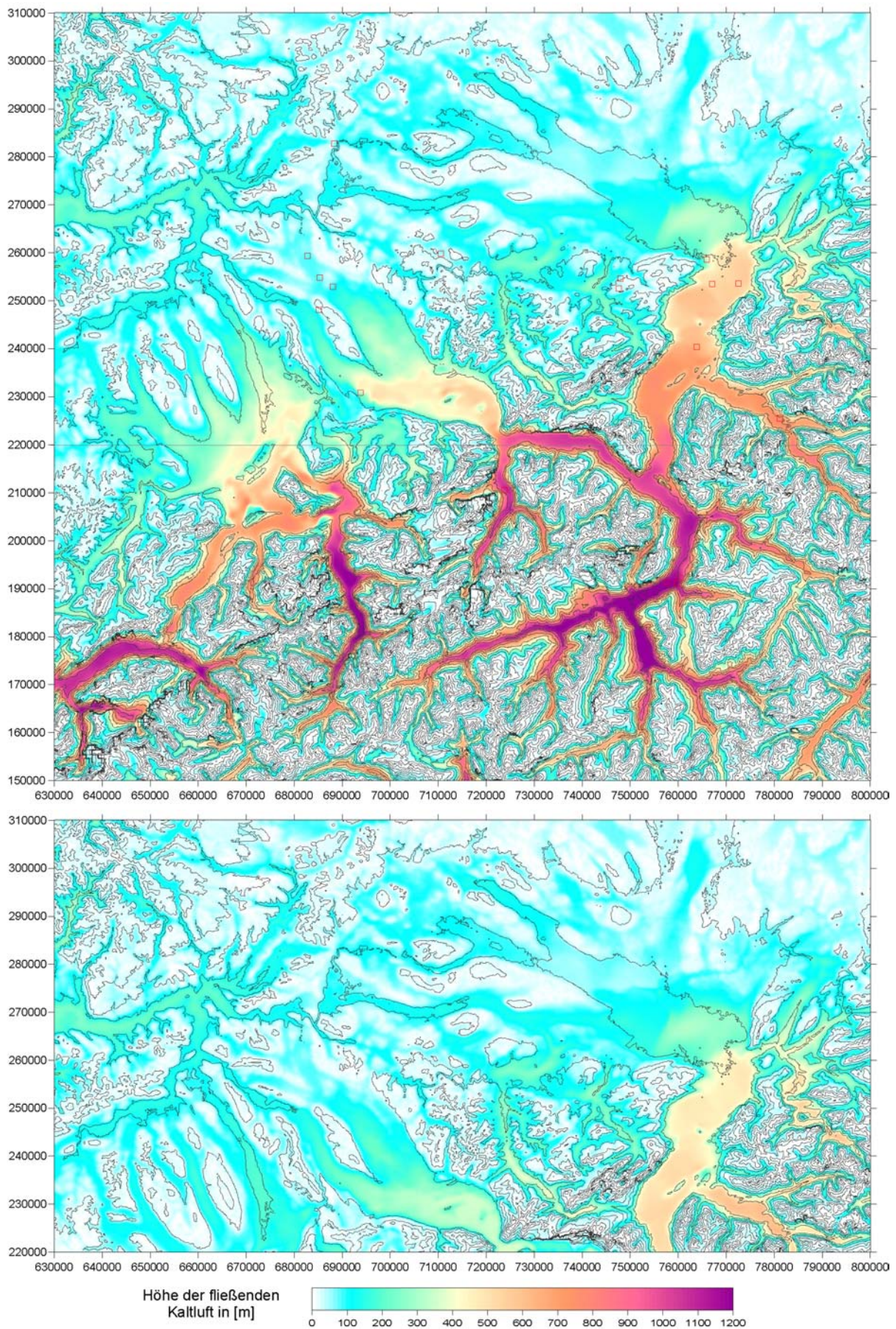


Abbildung A-7: Höhe der fließenden Kaltluft 5 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

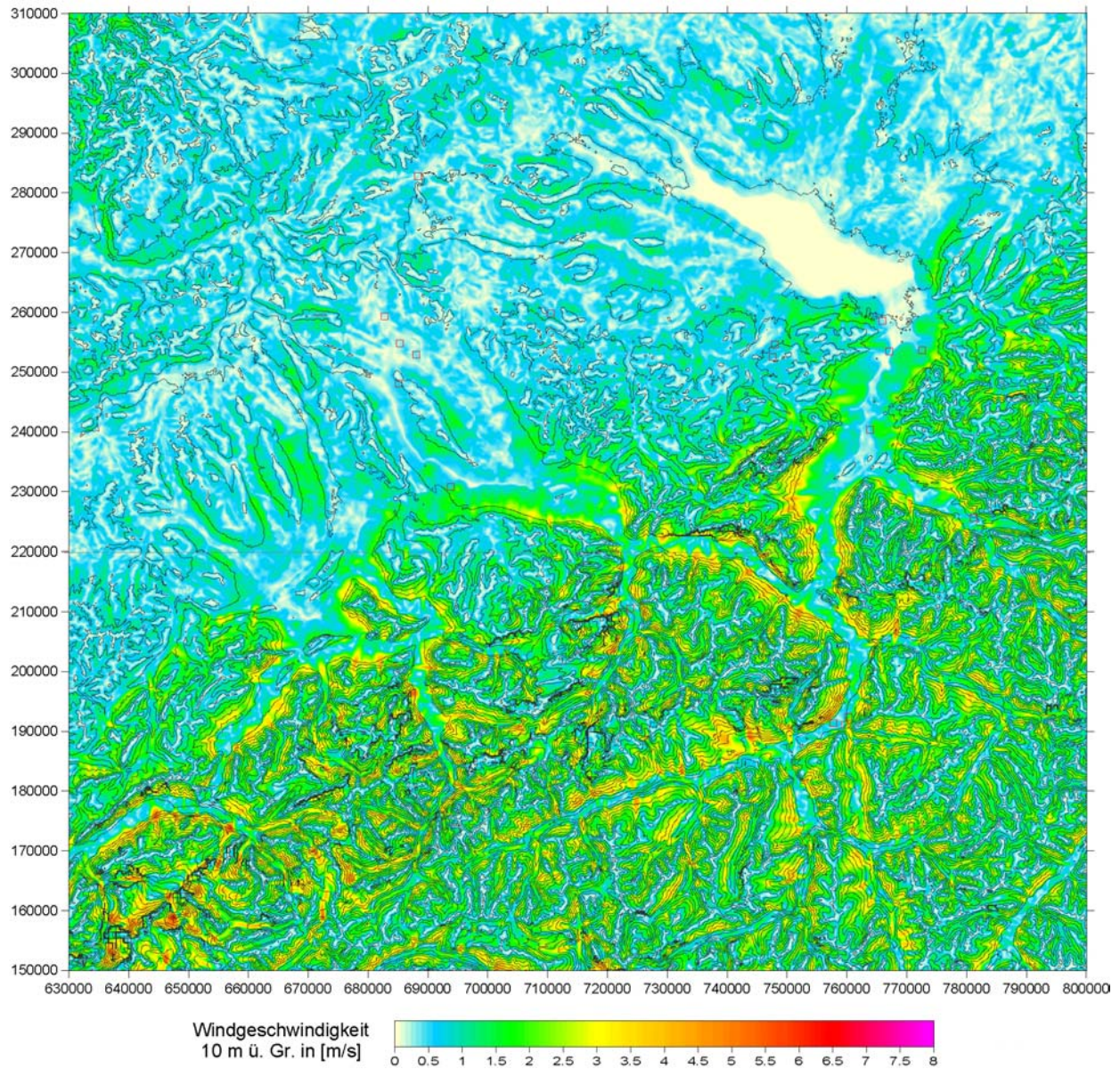


Abbildung A-8: Gemittelte Windgeschwindigkeit eine Stunde nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

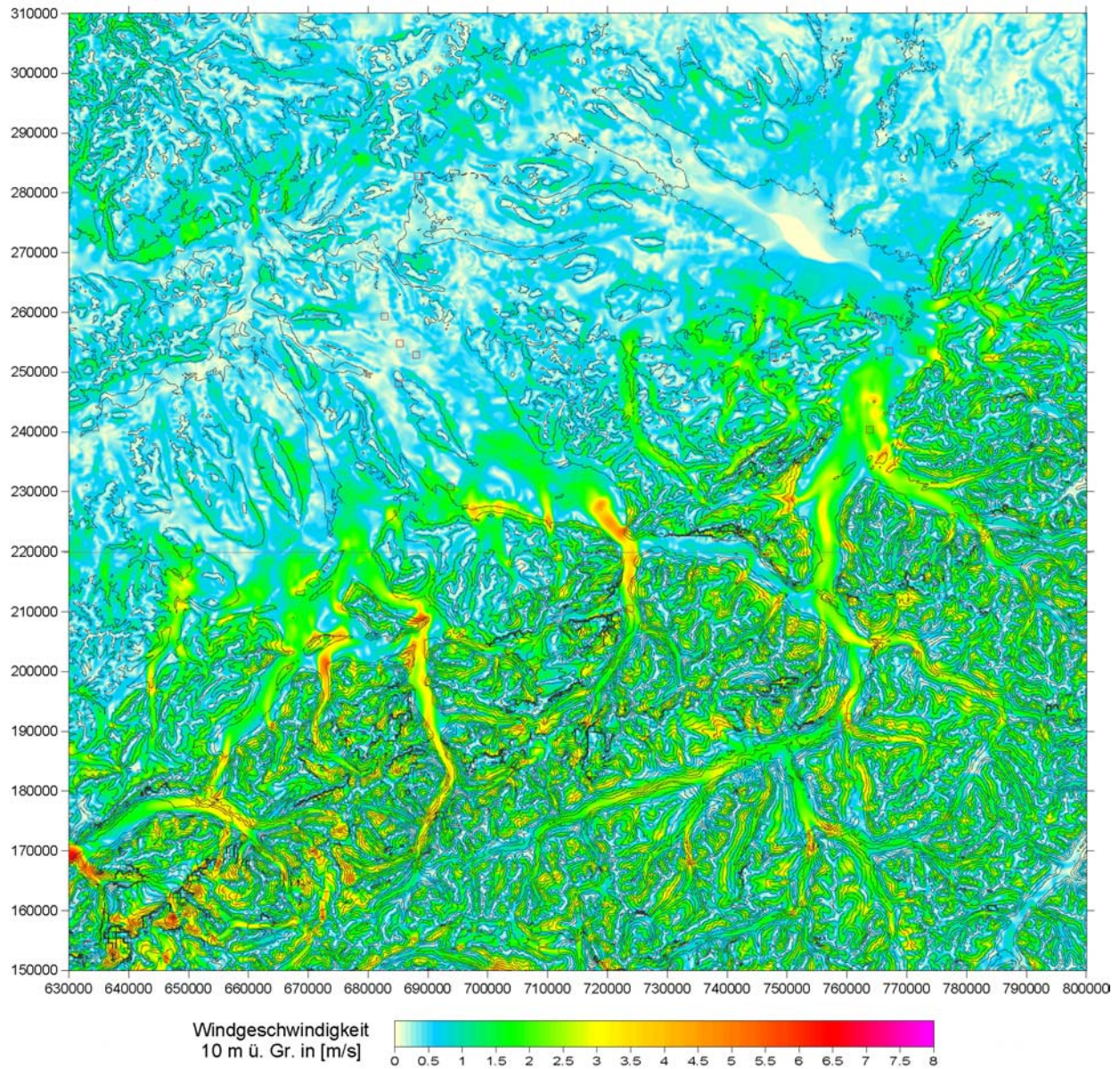


Abbildung A-9: Gemittelte Windgeschwindigkeit 3 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse

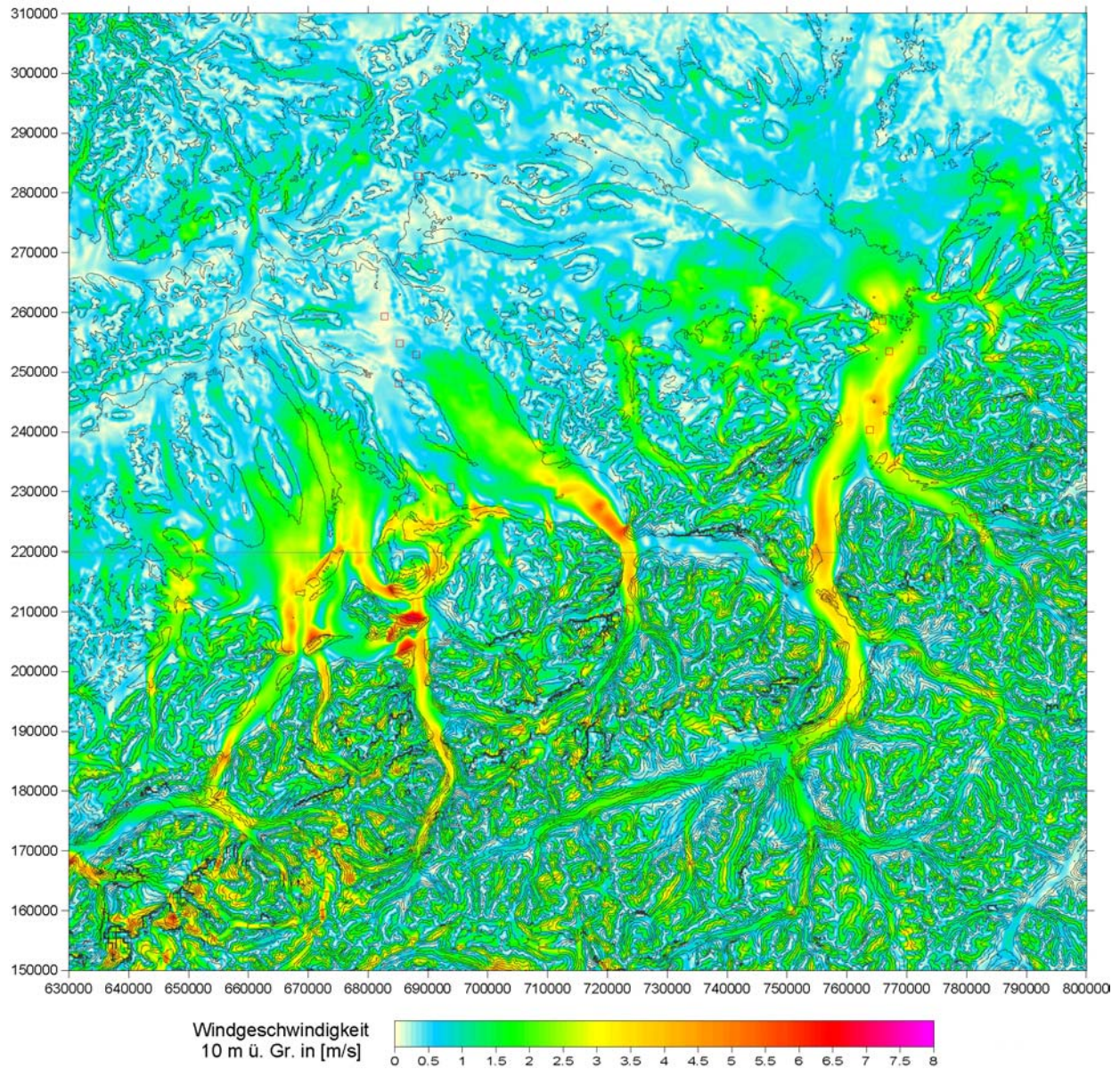


Abbildung A-10: Gemittelte Windgeschwindigkeit 5 Stunden nach Einsetzen der Kaltluftabflüsse