

IMPRESSUM:

Herausgeber:

Landeshauptstadt Stuttgart
Umweltschutz- und Ordnungsreferat
Amt für Umweltschutz
Abteilung Stadtklimatologie

Schutzgebühr DM 10,-

Bearbeitung:

Dr. G. Schädler, Dr. A. Lohmeyer
Ing.Büro Lohmeyer, Karlsruhe

Juli 1996
Im Auftrag des Amtes für Umweltschutz

INHALTSVERZEICHNIS

1. Zusammenfassung	1
2. Aufgabenstellung.....	3
3. Überblick	4
3.1 Eingesetzte Modelle	4
3.2 Definition der Untersuchungsgebiete, verwendete Topographie- und Landnutzungsdaten	5
4. Kurzbeschreibung der topographischen Verhältnisse im Stuttgarter Raum	8
5. Kaltluftsysteme	10
5.1 Diskussion der Simulationsergebnisse für das Gesamtgebiet	16
5.1.1 Volumenstromdichte.....	16
5.1.2 Kaltluftschichtdicke	17
5.1.3 Strömungsgeschwindigkeit	20
5.1.4 Kaltluftdaten einiger ausgewählter Stationen	23
5.1.5 Vertikale Struktur der Kaltluftflüsse	25
5.1.6 Volumenströme durch ausgewählte Talquerschnitte	26
5.2 Kaltluftsituation im Innenstadtbereich.....	28
6. Windfelder	35
6.1 Allgemeines	35
6.2 Diskussion ausgewählter Windfelder im Gesamtgebiet und im Innenstadtbereich	38
7. Windrosenbeete.....	48

8. Literatur	50
A N H A N G A : Beschreibung des Kaltluftabflußmodells KALM	54
A1. Allgemeines.....	55
A2. Modellbeschreibung	56
A3. Eingabedaten und Ergebnisse des Modells	57
A N H A N G B : Kurzbeschreibung des diagnostischen Windfeldmodells DIWIMO.....	58
B1. Einleitung.....	59
B2. Modellbeschreibung.....	59
B3. Anwendungsmöglichkeiten des Modells.....	60
B4. Vergleich von Modellrechnungen mit Messungen.....	61
B5. Typische Zahlenwerte	61
A N H A N G C : Weitere graphische Darstellungen zur Kaltluft	62
A N H A N G D : Bodennahe Windverteilungen im Gesamtgebiet und im Innenstadtbereich für Höhenwind aus Nord / Nordost / Südost / Süd / West.....	75

Hinweise:

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. In Kapitel 7 findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im Zusammenhang mit den städtebaulichen Planungen für das Projekt "Stuttgart 21" wurden sowohl für das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart als auch für den eigentlichen Innenstadtbereich unter Verwendung von numerischen Modellen die Windverhältnisse für den jetzigen Bauungszustand flächendeckend berechnet, dargestellt und diskutiert.

Wegen der ausgeprägten topographischen Gliederung des Stuttgarter Raumes und der großen Häufigkeit windschwacher Lagen wurden zwei typische Situationen unterschieden:

- Situationen mit höheren Windgeschwindigkeiten (Gradientwindlagen), und
- Schwachwindsituationen, bei denen sich reliefbedingte thermische Windsysteme (bes. Kaltluftsysteme) ausbilden.

Aus den berechneten Gradientwind- und Kaltluftwindfeldern wurden flächendeckend synthetische Windstatistiken erstellt.

Hinsichtlich der Kaltluftabflüsse konnten anhand der Abflußmengen (Volumenströme) u.a. das Nesenbachtal, das Feuerbacher Tal und das Rohrackertal als wesentliche Abflußsysteme identifiziert werden. Die Abflußmenge des Nesenbachtals beträgt etwa 100 Mio m³/h, diejenige des Rohrackertals etwa 160 Mio m³/h. Aus diesen Zahlen kann die Bedeutung des Nesenbachtals für die Kalt- und Frischluftversorgung der Stuttgarter Innenstadt ermessen werden. Die beste Durchlüftung ergibt sich meist im Mittellauf der Täler. Flächenhaft ausgedehnte Abflüsse mit geringen Volumenströmen finden sich im Bereich der Filder, der Gäulandschaft sowie im Neckartal nördlich von Stuttgart.

Ausgedehnte Kaltluftproduktionsgebiete konnten in den Bereichen der den Stuttgarter Kessel umgebenden Höhen identifiziert werden; die mittlere Kaltluftschichtdicke liegt bei etwa 25 m, der Maximalwert liegt etwas über 100 m.

Im dicht bebauten Bereich des Stuttgarter Kessels konnte insofern ein Verdrängungseffekt der Bebauung festgestellt werden, als in den Schichten oberhalb der Bebauung höhere Volumenströme als in der bodennahen Schicht auftraten.

Die detaillierteren Rechnungen für den Innenstadtbereich wurden in das Gesamtgebiet genestet. Dabei kann für das Plangebiet "Stuttgart 21" folgendes festgehalten werden: gut durchlüftet

sind der Bereich A sowie der nördliche Teil von Bereich C, während im Bereich B die Durchlüftung geringer ist.

Bei Gradientwindlagen kann deutlich die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit beobachtet werden. Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten in den offenen Lagen der Filder und an Bergrücken auf, während in Tälern wie dem Nesenbachtal oder dem Neckartal, welche meist auch noch dicht bebaut sind, wesentlich niedrigere Windgeschwindigkeiten herrschen. Auch die Kanalisierungswirkung dieser Täler ist deutlich zu beobachten.

Auch bei höheren Windgeschwindigkeiten hat das Nesenbachtal wegen seiner Orientierung etwa in Hauptwindrichtung eine große Bedeutung als Luftleitbahn. Im Plangebiet von "Stuttgart 21" hängt die Windgeschwindigkeit und damit die Durchlüftung stark von der Windrichtung ab. Die berechneten Windrosenbeete zeigen sowohl im Gesamttraum Stuttgart als auch im Plangebiet von "Stuttgart 21" eine ausgeprägte räumliche Variation, welche sowohl auf die Topographie als auch auf die Landnutzung zurückzuführen ist.

2. AUFGABENSTELLUNG

Im Zusammenhang mit den städtebaulichen Planungen für das Projekt "Stuttgart 21" sind für das gesamte Stadtgebiet von Stuttgart sowie für den eigentlichen Innenstadtbereich unter Verwendung von numerischen Modellen die Windverhältnisse zunächst für den jetzigen Bebauungszustand flächendeckend darzustellen. Diese Berechnungen dienen zur Dokumentation des jetzigen Zustands und als Grundlage für die Prüfung der Auswirkung geplanter baulicher Veränderungen bzw. von Planungsvarianten im innerstädtischen Umfeld des Projektes "Stuttgart 21".

Wegen der ausgeprägten topographischen Gliederung des Stuttgarter Raumes ist sowohl bei höheren Windgeschwindigkeiten (Gradientwindlagen, dynamisch dominiertes Windregime) als auch bei Schwachwindsituationen (durch Ausbildung thermischer Windsysteme) eine deutliche lokale Modifikation des bodennahen Windes zu erwarten. Für die Berechnung bei dynamisch dominiertem Windregime wird das diagnostische Windfeldmodell DIWIMO verwendet. Es sollen sowohl Einzelsituationen berechnet werden als auch unter Verwendung einer gemessenen Referenzstatistik synthetische Windstatistiken an vorgegebenen Aufpunkten berechnet werden. Die sich in Stuttgart bei windschwachen Strahlungsnächten ausbildenden Kaltluftsysteme werden mit dem Kaltluftmodell KALM simuliert und bei der Berechnung der synthetischen Windstatistiken berücksichtigt. Die Ergebnisse können für andere immissionsklimatologische Untersuchungen, z.B. für Ausbreitungsrechnungen herangezogen werden und sollen deshalb sowohl als graphische Darstellungen als auch auf Datenträger mit entsprechenden Auswerteprogrammen zur Verfügung gestellt werden.

3. ÜBERBLICK

Bei der Diskussion des Luftaustausches im Zusammenhang mit klimatischen und lufthygienischen Fragen interessieren vor allem die bodennahen Windverhältnisse, d.h etwa die untersten 50 m über Grund. In diesem Bereich sind Windrichtung und Windgeschwindigkeit am stärksten von der Topographie und der Landnutzung (z.B. Rauigkeit) beeinflusst; sie weisen eine starke lokale Variation auf und können stark von der großräumigen Windverteilung abweichen. Ferner sind in Bodennähe thermisch induzierte Windsysteme wie Kaltluftabflüsse oder Flurwinde, welche direkt durch die Temperaturunterschiede der Oberflächen gesteuert werden, am deutlichsten ausgeprägt.

Für verschiedene Stufen der Planung (Regionalplanung, Flächennutzungsplanung, Bebauungspläne) interessieren verschiedene Skalen des Windfeldes: während man bei der Regionalplanung eher an einem großräumigen Überblick (Größenordnung bis einige 10 Kilometer) über die Windverhältnisse interessiert ist, benötigt man für Bebauungspläne, insbesondere bei Wohngebieten, Informationen über das Windfeld im Umkreis von einigen 100 m; die Skala von Flächennutzungsplänen liegt zwischen diesen Eckwerten. Die im Zusammenhang mit dem Projekt "Stuttgart 21" derzeit interessierende städtebauliche Entwurfsplanung liegt im Zwischenbereich von Flächennutzungsplan und Bebauungsplan mit einer Gesamtabmessung von einigen Kilometern und einer geforderten Auflösung von etwa 100 m.

In jedem Fall ist man an flächendeckenden Informationen über das Windfeld interessiert. Da dies durch Messungen in der geforderten Auflösung nicht oder nur mit erheblichem Geld- und Zeitaufwand zu bewerkstelligen ist, wurde hier der Weg der Modellierung der Windverhältnisse mit einem Windfeld- und einem Kaltluftabflußmodell beschritten. Dabei wurden veröffentlichte bzw. uns zur Verfügung gestellte Windmessungen zur Verifizierung der Modelle verwendet.

3.1 Eingesetzte Modelle

Für die Berechnung des Windfeldes bei höheren Windgeschwindigkeiten (Gradientwindlagen, dynamisch dominiertes Windregime) wurde das diagnostische Windfeldmodell DIWIMO, für die Berechnung der Kaltluftsysteme wurde das Kaltluftabflußmodell KALM (Schädler und Lohmeyer, 1994) eingesetzt. Für beide Modelle sind Kurzbeschreibungen im Anhang zu finden.

3.2 Definition der Untersuchungsgebiete, verwendete Topographie- und Landnutzungsdaten

Topographie und Landnutzungsdaten für den Istzustand wurden in digitaler Form vom Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie, der Landeshauptstadt Stuttgart zur Verfügung gestellt, wobei die Topographiedaten aus dem Digitalen Geländemodell des Statistischen Landesamtes stammen. Die Auflösung der Topographiedaten betrug 50 m, die der Landnutzungsdaten 25 m.

Für die Modellrechnungen wurde die Landnutzung in folgende 6 Klassen, welche sich hinsichtlich ihrer dynamischen und thermischen Oberflächeneigenschaften wie z.B. Oberflächenrauigkeit, Verdrängungsschichtdicke, Versiegelungsgrad und Kaltluftproduktivität unterscheiden, unterteilt:

- Freiland
- Wald
- Wasser
- locker bebaute Wohngebiete
- dicht bebaute Wohn- und Gewerbegebiete
- Verkehrsflächen, insbesondere Gleisanlagen

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Lage und Größe der beiden Untersuchungsgebiete "Gesamtgebiet" und "Innenstadtbereich" sowie die jeweils verwendete horizontale Auflösung.

Gebiet	GK*-Koordinaten SW-Ecke	GK-Koordinaten NO-Ecke	Auflösung (m)
Gesamtgebiet	(3503000, 5395000)	(3523000, 5415000)	200
Innenstadtbereich	(3512000, 5403000)	(3516000, 5409000)	50 bzw. 100

Die Gebiete sind in **Abb. 3.1** (Gesamtgebiet) und **Abb. 3.2** (Innenstadtbereich mit Plangebiet "Stuttgart 21") dargestellt.

* GK = Gauß-Krüger

Abb. 3.1: Topographie des Gesamtgebietes

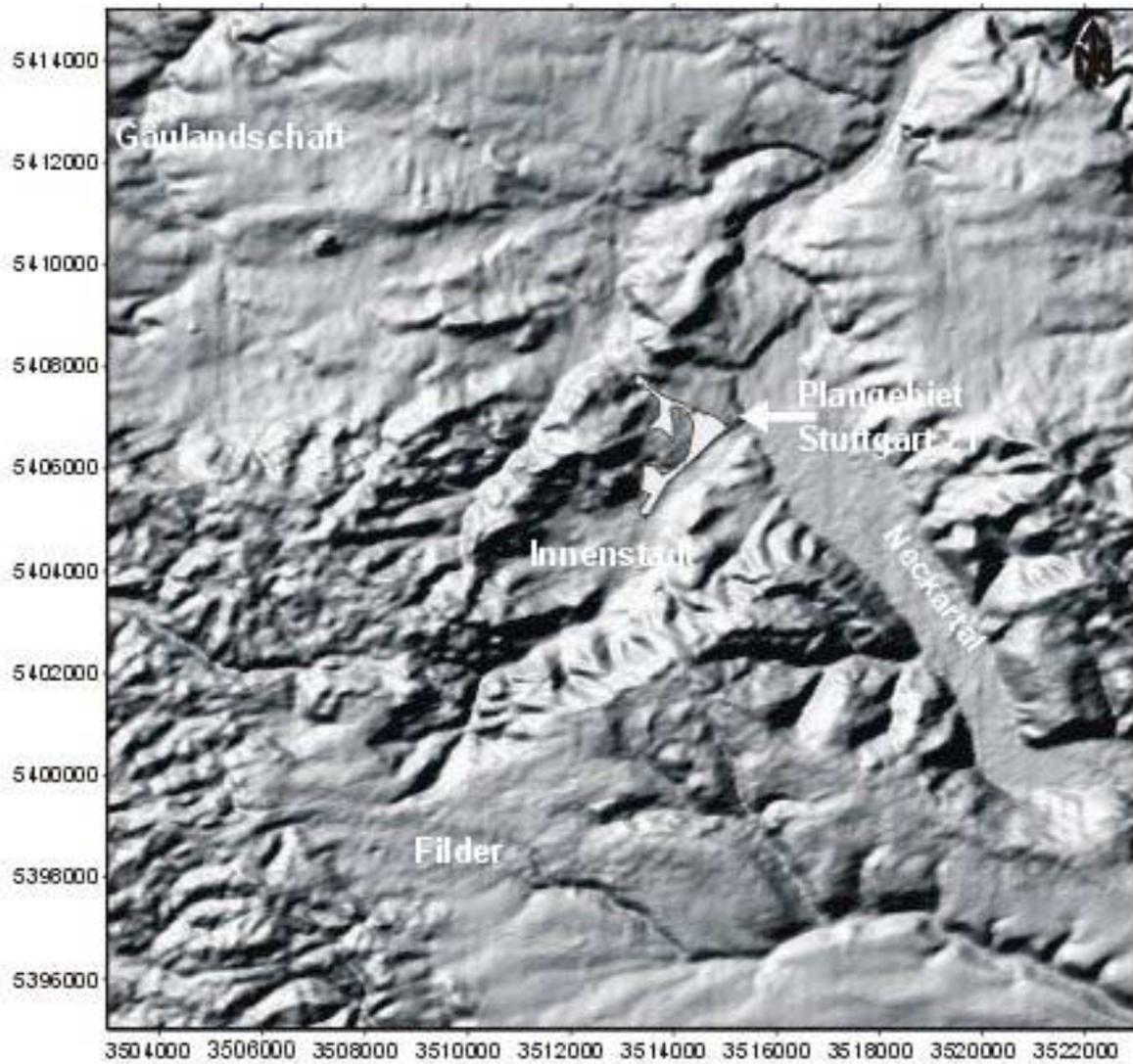
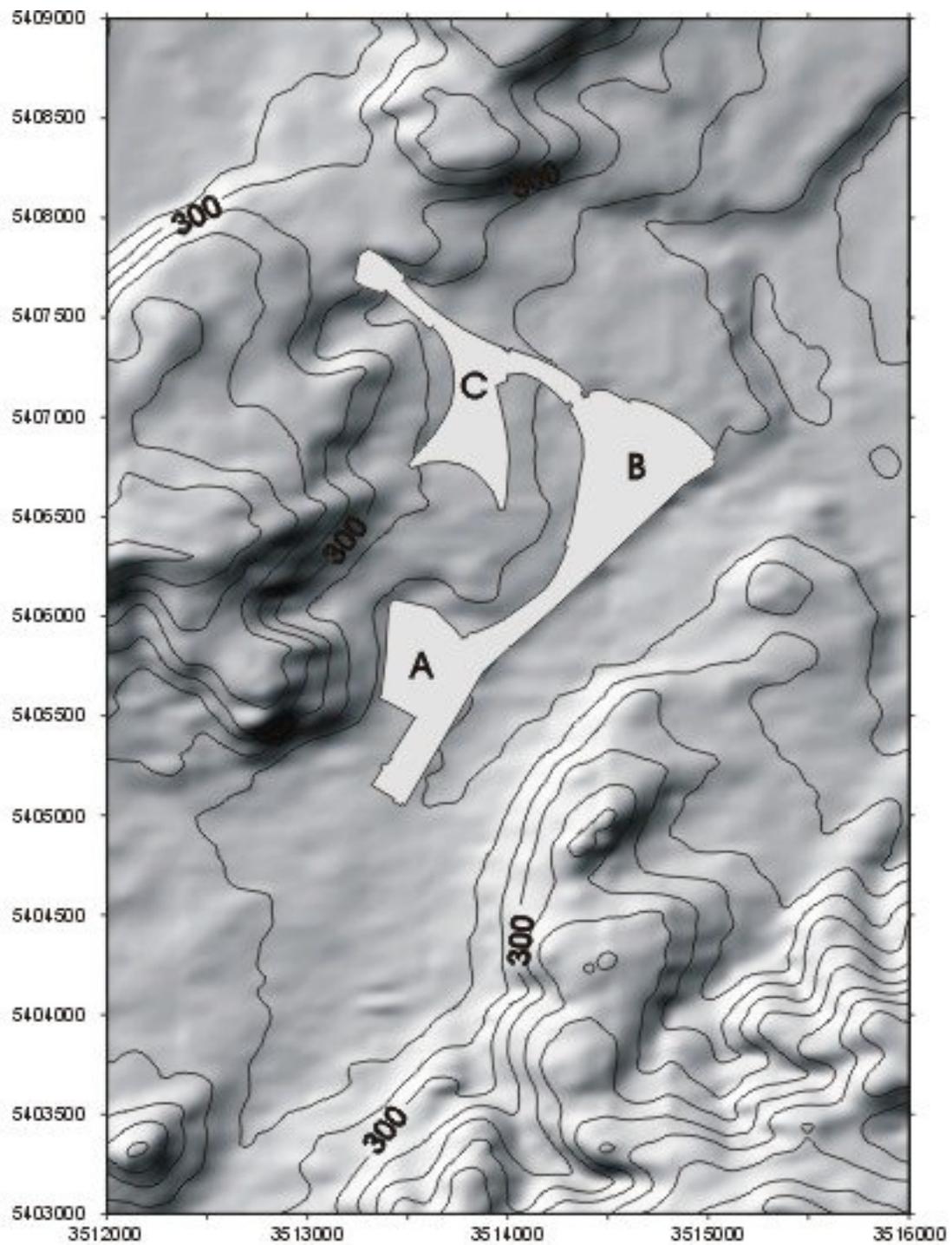


Abb. 3.2: Topografie des Innenstadtgebietes mit Plangebiet Stuttgart 21



4. KURZBESCHREIBUNG DER TOPOGRAPHISCHEN VERHÄLTNISSE IM STUTTGARTER RAUM

Die folgende Beschreibung der topographischen Verhältnisse im Stuttgarter Raum stützt sich besonders auf die Darstellungen in dem Bericht "Stadtklima 21" (Baumüller et al., 1996), in Hoffmann (1977) sowie in Geßler (1989).

Die naturräumliche Gliederung des Stuttgarter Raumes läßt sich bereits aus **Abb. 3.1** ablesen. Die wesentlichen Elemente sind im Zentrum der Abbildung das Nesenbachtal und der Stuttgarter Kessel, in denen die Innenstadt und auch das Plangebiet "Stuttgart 21" liegen, östlich davon das von Süden nach Norden verlaufende Neckartal und der weiter östlich gelegene Schurwald, im Süden die Filder und im Nordosten die Gäulandschaft.

Aus dieser topographischen Gliederung ergeben sich starke Höhenunterschiede. So liegt der Stuttgarter Marktplatz in etwa 250 m üNN, das Neckartal in etwa 220 m üNN, die den Stuttgarter Kessel umgebenden Höhen erreichen Höhen zwischen 400 m üNN und 500 m üNN, die Talsohlen der umgebenden Täler liegen auf etwa 250 m üNN bis 300 m üNN.

Während Filder und Gäulandschaft in sich nur geringe Höhenunterschiede aufweisen, zeigt sich das Relief in der näheren Umgebung des Stadtbereichs von Stuttgart sehr bewegt mit Höhenunterschieden im Bereich von 200 m bis 300 m und mehreren größeren und kleineren Tälern, welche für die Kalt- und Frischluftluftversorgung der Stadt von Bedeutung sind.

Das Stadtgebiet von Stuttgart im engeren Sinn liegt teils im von Südwest nach Nordost verlaufenden Nesenbachtal, teils im sogenannten Westkessel; beide werden durch einen Höhenrücken, welcher im Osten mit der Karlshöhe endet, getrennt. Im Osten Stuttgarts verengt sich der Talausgang des Nesenbachtals zwischen Kriegsberg und Uhlandshöhe noch einmal, bevor sich das Tal zum in diesem Bereich etwa in nördlicher Richtung verlaufenden Neckartal öffnet. Die Höhenunterschiede betragen im Bereich des Stuttgarter Kessels mehr als 300 m.

Im Süden Stuttgarts liegt, vom Nesenbachtal durch einen Höhenrücken getrennt, das Rohrackertal. Dieses aus einem Haupttal mit mehreren Seitentälern bestehende Talsystem verläuft in west-östlicher Richtung und mündet bei Hedelfingen in das Neckartal ein. Weiter im Süden und Südosten schließt sich die Filderhochebene an. Das sich im Norden an den Stuttgarter Kessel anschließende, etwa parallel zum Nesenbachtal verlaufende Feuerbacher Tal ist von diesem durch einen Höhenrücken von etwa 350 m bis 400 m Höhe getrennt.

Im gesamten Stadtgebiet stellt Freiland mit etwa 35 % Flächenanteil die überwiegende Landnutzung dar, gefolgt von bebautem Gebiet mit etwa 40 % und schließlich von Waldflächen mit etwa 25 %.

Aufgrund der genannten topographischen Charakteristika herrschen in großen Teilen des Stadtgebiets häufig niedrige Windgeschwindigkeiten. Hinzu kommt die geographische Lage von Stuttgart: das Gebiet liegt abseits der Zugstraßen der großen synoptischen Druckgebilde und wird großräumig u.a. vom Schwarzwald abgeschattet.

Wegen dieser Windarmut sind lokale Windsysteme in Tälern wie dem Nesenbachtal für die Frischluftversorgung der Stuttgarter Innenstadt umso wichtiger; mit seiner Orientierung liegt es einerseits etwa parallel zur Hauptwindrichtung und stellt damit eine Luftleitbahn dar, andererseits hat das Nesenbachtal eines der größten Kaltlufteinzugsgebiete im Stuttgarter Raum und ist somit auch bei autochtonen Wetterlagen von größter Bedeutung für die Durchlüftung Stuttgarts.

Detaillierte Diskussionen insbesondere der thermisch/hygienischen Verhältnisse im Stuttgarter Raum finden sich in Robel et al. (1978); eine umfassende Zusammenstellung von Karten klimatisch und lufthygienisch wichtiger Größen findet sich im Klimaatlas (1992).

5. KALLUFTSYSTEME

Im Stuttgarter Raum sind aufgrund der vielfältig gegliederten Topographie im größeren Stadtgebiet sowie um den Stuttgarter Kessel herum mehrere Kaltluftabflußsysteme anzutreffen. Genannt seien hier das Neckartal mit seinen Seitentälern, wie z.B. dem Rohrackertal (Kost, 1982), das Nesenbachtal, welches die Stuttgarter Innenstadt mit Kaltluft versorgt, das Körschtal und das Ramsbachtal im Süden, das Glemstal im Westen sowie das Feuerbacher Tal im Nordwesten.

Diese Kaltluftabflüsse sind in klaren oder nur gering bewölkten windschwachen Nächten am deutlichsten ausgeprägt. Sie treten an Hängen als anfangs hangabwärts, später mehr hangparallel orientierte Hangwinde auf, in Tälern als talachsenparallele Bergwinde. Mit zunehmender Kaltluftmächtigkeit gehen die Hangwinde in Bergwinde über.

Strömungsgeschwindigkeit und Kaltluftmächtigkeit hängen stark von der Talgröße und vom Taltyp ab. In Tälern mit größeren Einzugsgebieten, wie z.B. dem Neckartal oder dem Nesenbachtal, können die Abflüsse im Laufe einer Nacht Mächtigkeiten zwischen 50 m und 100 m erreichen, während Hangwinde geringere Mächtigkeiten (weniger als 20 m), aber höhere Strömungsgeschwindigkeiten (je nach Hangneigung etwa 2 m/s bis 3 m/s) aufweisen. In breiten Tälern dagegen liegt die Abflußgeschwindigkeit dagegen oft unter 1 m/s. In solchen Tälern bzw. Ebenen findet man häufig auch Kaltluftstaugebiete, in welchen wegen der schlechten Austauschbedingungen erhöhte Luftschadstoffkonzentrationen auftreten können.

Die Auftretenshäufigkeit von Kaltluftsituationen variiert von Region zu Region. Nach Heldt und Höschele (1989) treten Kaltluftsysteme im von ihnen untersuchten Gebiet an 10 % bis 40 % aller Tage, entsprechend etwa 5 % bis 20 % der Zeit eines Jahres, auf; die Jahreszeit des häufigsten Auftretens ist der Frühherbst mit seinen häufigen windschwachen Hochdruckwetterlagen. Für den Stuttgarter Raum, speziell das Nesenbachtal, kann die Kaltfluthäufigkeit folgendermaßen anhand der Windstatistik der Meßstation Schwabenzentrum abgeschätzt werden: betrachtet man die Tag- und Nachwindstatistik dieser Station (**Abb. 5.1** und **Abb. 5.2**), so kann man aus der Topographie und der gemessenen Windverteilung schließen, daß signifikante Kaltluftabflüsse stattfinden, und zwar aus den Sektoren 10, 11 und 12 (Anmerkung zur Numerierung der Sektoren: 1 = Nord, 5 = Ost, 9 = Süd, 13 = West usw., Sektorbreite 22,5°). Tagsüber beträgt die Windhäufigkeit aus diesen Sektoren 37 % (entsprechend 19 % der Zeit eines Jahres), nachts beträgt sie 65 % (entsprechend 33 % der Zeit eines Jahres). Nimmt man an, daß die Differenz zwischen Tag- und Nachthäufigkeiten im wesentlichen auf Kaltluftabflüsse

zurückzuführen ist, so kann die Häufigkeit von Kaltluftabflüssen am Schwabenzentrum und damit näherungsweise auch im Raum Stuttgart zu etwa 14 % der Zeit eines Jahres abgeschätzt werden; dies liegt im Bereich der oben angegebenen Spanne, wobei die auftretenden Häufigkeiten u.a. wegen der variablen Kaltluftmächtigkeiten sich natürlich von Ort zu Ort ändern können.

Die Kaltluftrechnungen werden mit dem Kaltluftmodell KALM (siehe Anhang) mit der in Kap. 3 angegebenen Einteilung der Landnutzungsklassen durchgeführt. Um sowohl die größerskaligen Abflüsse als auch die Details der die Innenstadt belüftenden Abflüsse zu erfassen, wurde mit den beiden in Kap. 3 beschriebenen Rechengebieten gearbeitet: dem Gesamtgebiet mit größerer horizontaler Auflösung (200 m) sowie dem Innenstadtbereich mit 50 m Auflösung. Die Modellrechnungen wurden im "two-way-nesting" durchgeführt, d.h. beide Gebiete werden simultan gerechnet, wobei die Strömungsinformation sowohl vom feinen zum groben Gitter als auch vom groben zum feinen Gitter fließen konnte.

Hinsichtlich der Zuordnung Kaltluftproduktionsraten - Landnutzung ist anzumerken, daß größere Verkehrsflächen größtenteils von Gleisanlagen repräsentiert werden, welche sich bei der Betrachtung von nächtlichen Thermalaufnahmen als kalt darstellen. Daher wurde diesen Flächen in Absprache mit dem Auftraggeber eine (geringe) Kaltluftproduktionsrate von 3 m/h zugeordnet.

Dargestellt werden die Abflußgeschwindigkeit (als Schichtmittelwert) sowie die Volumenstromdichte in verschiedenen bodennahen Schichten. Folgende Schichteinteilung wurde in Absprache mit dem Auftraggeber gewählt: bodennächste Schicht 0 m - 15 m, bodennahe Schicht 0 m - 50 m, abgehobene Schicht 15 m - 50 m und Gesamtschicht, welche die gesamte Kaltluftmächtigkeit erfaßt. Dies ermöglicht es zu beurteilen, wie sich die Kaltluft vertikal verteilt, ob z.B. die Hauptmasse durch die klimatisch wichtigste Schicht 0 m - 15 m geht oder ob die Kaltluft über die Bebauung hinwegströmt (15 m - 50 m). Dabei wurde die Höhe 15 m gewählt, um die Kaltluftverhältnisse bis zu einer mittleren Bebauungshöhe zu erfassen.

Die Darstellung des Schichtmittelwerts der Strömungsgeschwindigkeit wurde gewählt, um einerseits den in der Natur auftretenden Schwankungen der Kaltluftschichtdicke Rechnung zu tragen und eine bessere Vergleichbarkeit mit Messungen zu gewährleisten, andererseits die für planerische Zwecke (Bebauungshöhe) wichtige vertikale Variation der Kaltluftflüsse zu erfassen. In den Abbildungen ist die Kaltluftsituation nach 3 h simulierter Zeit dargestellt. Nach dieser Zeit sind die Kaltluftsysteme voll ausgebildet und es haben sich, sofern die Topographie es zuläßt, stationäre Verhältnisse eingestellt.

Bevor die Ergebnisse der Simulationen im einzelnen diskutiert werden, sollen hier kurz die Begriffe Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftvolumenstrom am Beispiel der bodennächsten Schicht (0 m - 15 m) erläutert werden. Die Kaltluftvolumenstromdichte ist diejenige Kaltluftmenge in m^3 , die pro Sekunde durch einen 1 m breiten Streifen zwischen der Erdoberfläche und 15 m über Grund, welcher senkrecht zur Strömung steht, fließt; ihre Einheit ist m^3/ms bzw. m^2/s . Der durch einen beliebigen Querschnitt fließende Kaltluftvolumenstrom läßt sich allgemein durch Aufsummieren der Kaltluftvolumenstromdichte entlang dieses Querschnittes ermitteln. Falls die Volumenstromdichte über einen Querschnitt konstant ist, läßt sich der Volumenstrom als Volumenstromdichte mal Länge der Grundlinie dieser Fläche berechnen.

Ein Zahlenbeispiel soll dies verdeutlichen: das 15 m-Schichtmittel der Volumenstromdichte betrage $10 \text{ m}^2/\text{s}$ über einen Talquerschnitt von 500 m Breite. Somit ist der Volumenstrom durch die 15 m dicke bodennahe Schicht $10 \text{ m}^2/\text{s} \times 500 \text{ m} = 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Wie klimarelevant dieser Volumenstrom ist, kann anhand der Luftwechselrate wie folgt grob abgeschätzt werden (dabei wird angenommen, daß das in Betracht gezogene Gebiet eine Ausdehnung von 1 000 m in Strömungsrichtung hat): das Volumen des betrachteten Gebiets beträgt $500 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m} \times 15 \text{ m} = 7.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, somit ist die Luftwechselrate $(5\,000 / 7.5 \cdot 10^6) / \text{s} = 0.0007/\text{s} = 2.4/\text{h}$. Das bodennahe Luftvolumen wird also etwa alle 25 Minuten einmal ausgetauscht; man kann hier von einer guten Durchlüftung sprechen.

Dieses Beispiel zeigt, daß der Kaltluftvolumenstrom selbst kein ausreichendes Maß für den Luftaustausch und damit auch die Klimarelevanz ist; er muß im Verhältnis zu den Abmessungen des zu durchlüftenden Gebietes beurteilt werden.

Fordert man, daß die Luft in einem $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ großen Volumen zweimal stündlich ausgetauscht wird, so erhält man eine Volumenstromdichte von etwa $8 \text{ m}^2/\text{s}$, entsprechend einem Volumenstrom von $8\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Wert stimmt in etwa mit dem in der Schriftenreihe Raumordnung (1979) angegebenen klimarelevanten Volumenstrom von $10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ überein.

Da somit die Kaltluftvolumenstromdichte zur klimatischen Beurteilung von Kaltluftabflüssen eine geeignete Größe ist, beziehen sich die folgenden Darstellungen und Aussagen auf diese Größe.

Anmerkung zu den folgenden Darstellungen:

In den Darstellungen sind die Vektorlängen nicht proportional zum Betrag der entsprechenden Größe; vielmehr sind aus Gründen der klareren Darstellung die kleineren Werte überproportional gezeichnet.

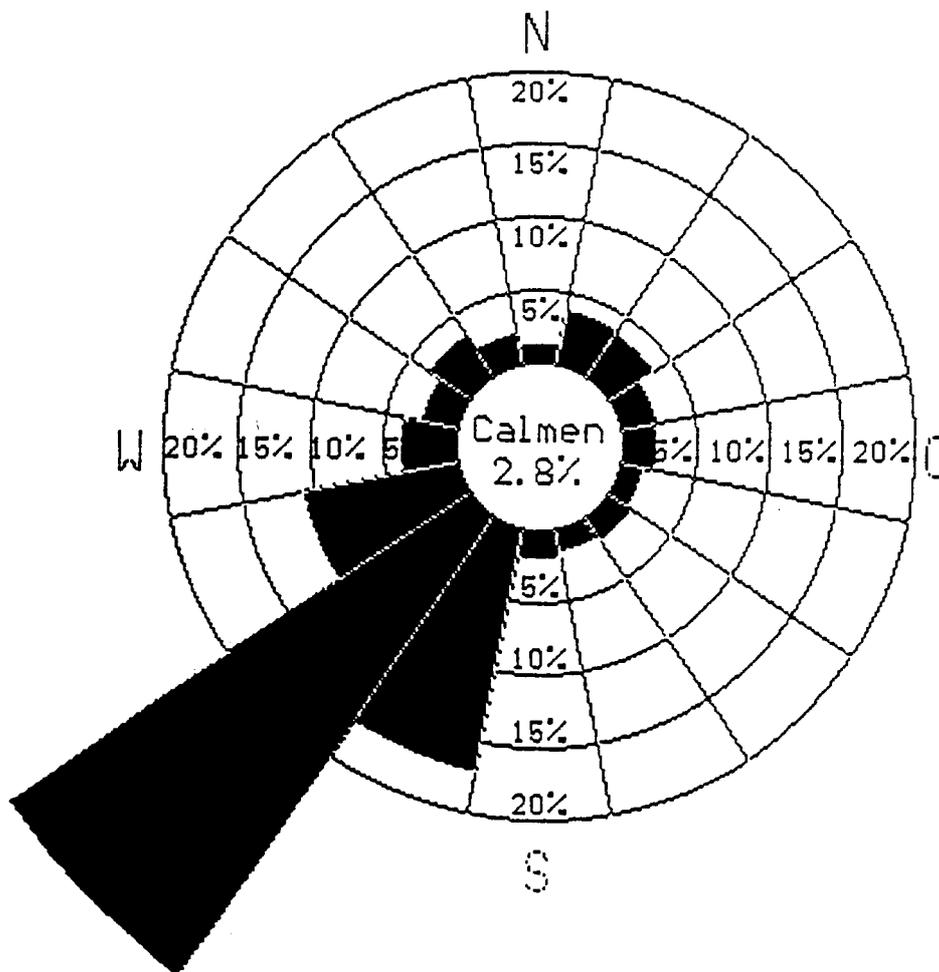
Abb. 5.2: Nachtrwindstatistik der Station Schwabenzentrum

Quelle: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz

NACHT - WINDROSE (0-40m/s)

SCHWABENZENTRUM

01.01.94 - 31.12.94



5.1 Diskussion der Simulationsergebnisse für das Gesamtgebiet

5.1.1 Volumenstromdichte

Abb. 5.3 zeigt die Summe (über die gesamte Kaltluftschicht) der Volumenstromdichte im Gesamtgebiet nach 3 Stunden simulierter Zeit. Die Volumenstromdichte gibt im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit über die Information zur Strömungsrichtung hinaus ein Bild von der abfließenden Kaltluftmenge. Man erkennt deutlich die wesentlichen Abflußsysteme, nämlich

- das Neckartal
- das Nesenbachtal
- das Feuerbacher Tal
- das Körschtal
- das Ramsbachtal
- das Rohrackertal, sowie östlich des Neckars
- das Riesenbachtal bei Obertürkheim.

Der für die Versorgung der Innenstadt bedeutsame Abfluß durch das Nesenbachtal wird sowohl durch das Nesenbachtal selbst als auch aus dem Tal zwischen Heidenklinge und Zwickenberg gespeist. Dieser letztere Abfluß stellt einen "Kaltluftüberlauf" aus dem Glemstal dar.

Flächenhaft ausgedehnte Abflüsse finden in den schwächer reliefierten Bereichen der Filder, der Gäulandschaft sowie im Neckartal nördlich von Stuttgart statt.

Die statistische Auswertung der für das Gesamtgebiet Stuttgart berechneten Volumenstromdichten ergibt einen Mittelwert von etwa $6 \text{ m}^3/\text{ms}$ bei einer Streuung von ähnlichem Betrag. Das Maximum beträgt $64 \text{ m}^3/\text{ms}$. Mehr als 80 % der Werte sind kleiner als $10 \text{ m}^3/\text{ms}$.

Im allgemeinen korrelieren hohe Werte der Strömungsgeschwindigkeit mit niedrigen Werten der Kaltluftschichtdicke und umgekehrt. Da die gesamte Volumenstromdichte im wesentlichen das Produkt von Strömungsgeschwindigkeit und Kaltluftschichtdicke ist, werden die höchsten Werte der Volumenstromdichte und damit die beste Durchlüftung dort erreicht, wo weder die Strömungsgeschwindigkeit noch die Schichtdicke zu hohe Werte annehmen. Aus diesem Grund werden in Tälern ohne größere Seitenzuflüsse die höchsten Werte der Volumenstromdichte und damit die beste Durchlüftung (falls die Kaltluft unbelastet ist) im Mittellauf erreicht. Im Oberlauf herrschen zwar höhere Windgeschwindigkeiten, aber die Schichtdicke ist gering; umgekehrt ist im Unterlauf wegen der i.a. geringeren Geländeneigung und aufgrund von Stauwirkungen zwar

die Schichtdicke hoch, aber die Strömungsgeschwindigkeit gering. Gut zu erkennen sind diese Effekte z.B. im Feuerbacher Tal.

5.1.2 Kaltluftschichtdicke

Die berechnete Kaltluftschichtdicken im Großraum Stuttgart bei ausgebildeten Kaltluftsystem zeigt die **Abb. 5.4**.

Die statistische Auswertung der im Gesamtgebiet berechneten Schichtdicken ergab eine mittlere Kaltluftmächtigkeit von etwa 25 m bei einer Streuung von etwa 20 m. Der Maximalwert der Schichtdicke liegt etwas über 100 m. Etwa die Hälfte aller Schichtdicken sind kleiner als 20 m.

Die Abbildung läßt deutlich einerseits die Kaltluftproduktionsgebiete mit niedrigen Schichtdicken, andererseits die Kaltluftsammel- bzw. -staugebiete mit hohen Schichtdicken erkennen. Dabei erweisen sich höhergelegene Flächen und Oberläufe von Tälern als vorrangige Produktionsgebiete, während die Mittel- und Unterläufe von Tälern sowie niedrig liegende Ebenen Kaltluftsammel- und staugebiete sind. Da die letztgenannten Gebiete oft auch dicht besiedelt sind, können sie durch die mit der Bebauung verbundene Aufwärmung und Vermischung eine "kaltluftvernichtende" Wirkung haben.

Abb. 5.3: Volumenströmdichte im Gesamtgebiet, gesamte Kaltluftschicht

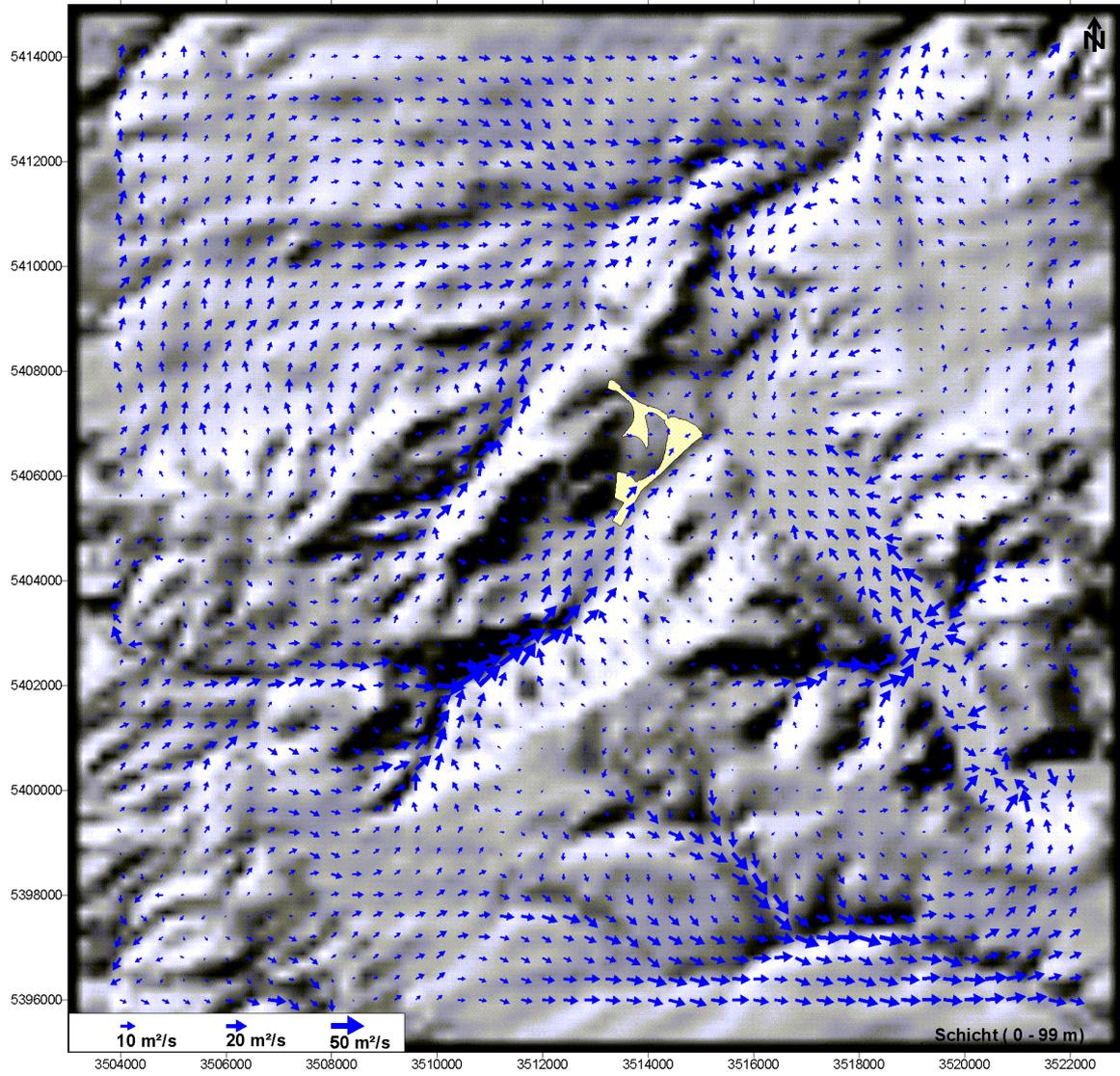
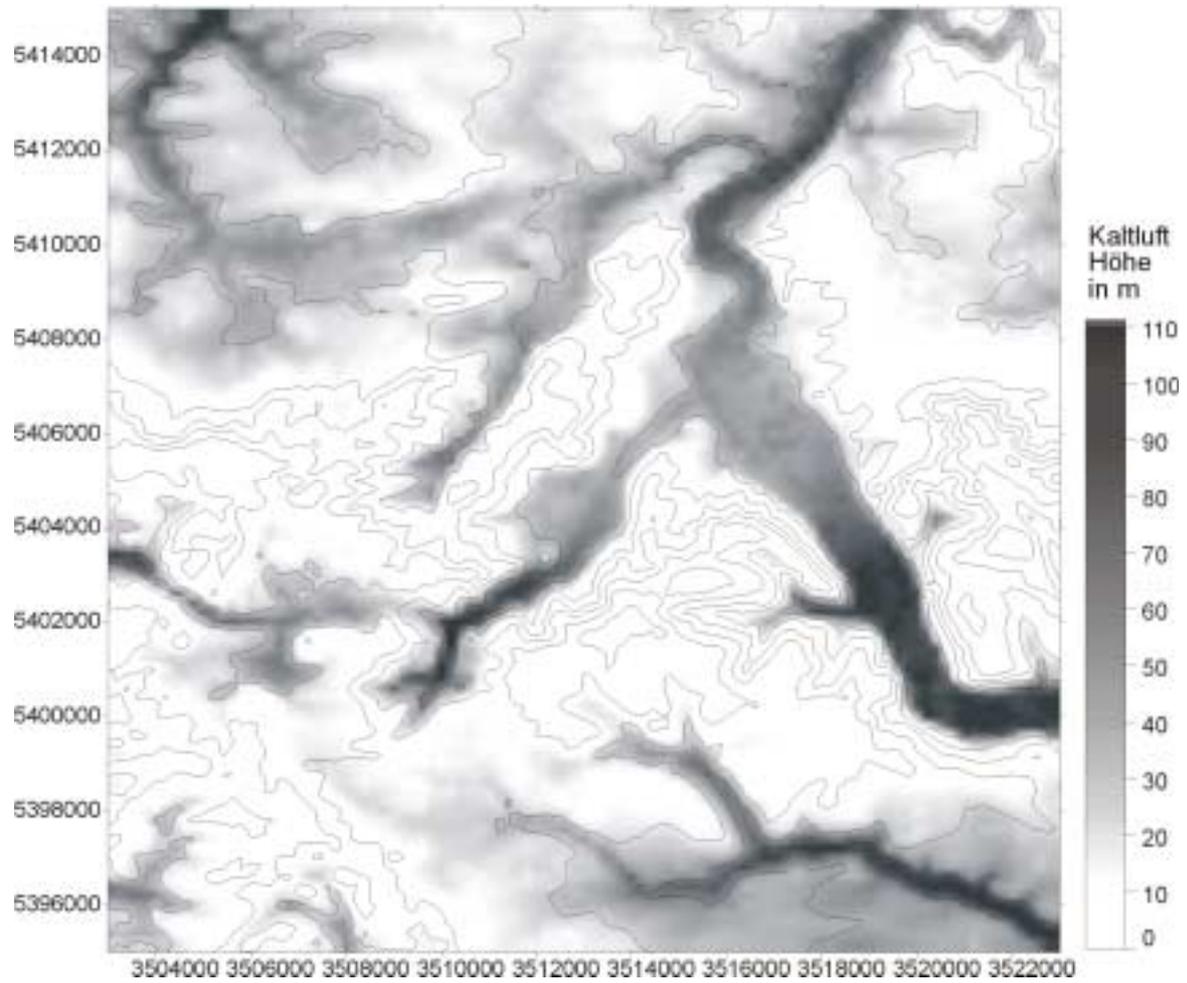


Abb. 5.4: Kaltluftschichtmächtigkeit im Gesamtgebiet



n den Kaltluftsammlgebieten mit großem Einzugsgebiet wie dem Neckartal, dem Nesenbachtal und dem Körschtal erreicht die Kaltluftmächtigkeit Werte zwischen etwa 60 m und etwa 80 m. Neben dem Zufluß hängt die sich einstellende Schichtdicke von der Landnutzung ab. Dies wird z.B. am Neckartal zwischen Esslingen und Bad Cannstatt deutlich, wo trotz kräftiger Zuflüsse von den Neckarhängen (vgl. **Abb. 5.4**) die Schichtdicke von Süden nach Norden hin aufgrund der landnutzungsbedingten kontinuierlichen Aufwärmung stetig abnimmt.

Ausgedehnte Kaltluftproduktionsgebiete befinden sich in den Bereichen Möhringen, Kaltental, in der Umgebung des Fernsehturms, im Bereich Sillenbuch/Rohrackeratal, östlich des Neckars im Bereich des Kappelbergs sowie westlich und nordwestlich des Stuttgarter Kessels im Bereich Heukopf, Birkenkopf und Gerlinger Kopf.

5.1.3 Strömungsgeschwindigkeit

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in der bodennächsten Schicht liegen im Stuttgarter Raum zwischen wenigen Dezimetern/s und etwa 2 m/s (**Abb. 5.5**); sie nehmen i.a. vom Oberlauf eines Tals zur Talmündung hin, entsprechend dem Übergang von Hangwind zum Bergwind, ab. Sehr niedrige Abflußgeschwindigkeiten ergeben sich im Kaltluftsammlgebiet Neckartal, z.B. dort, wo das Nesenbachtal in das Neckartal einmündet.

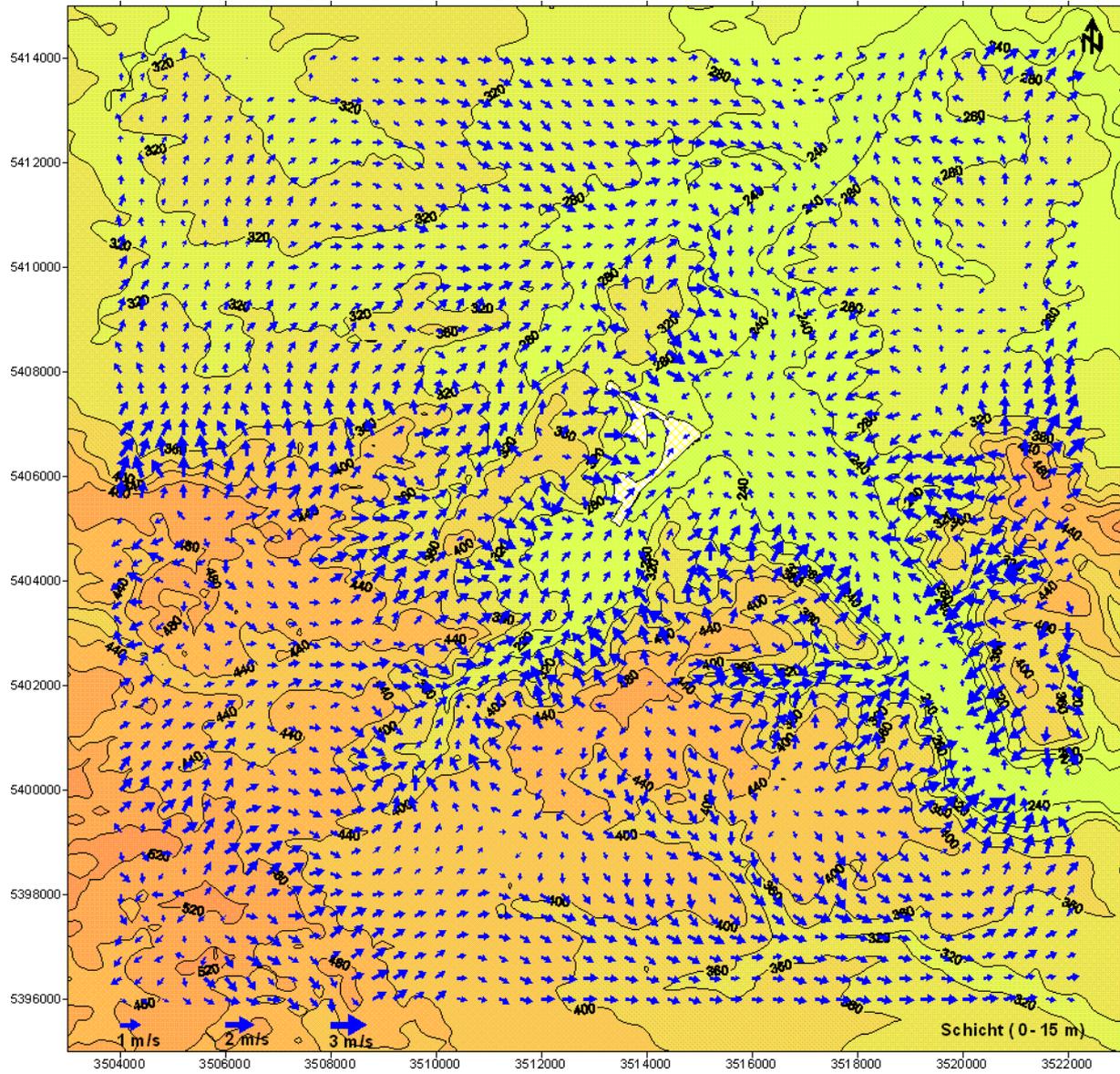
Hinsichtlich des Wertes und der Höhe der maximalen Strömungsgeschwindigkeit ergeben Messungen, Modellrechnungen mit vertikal auflösenden numerischen Modellen sowie theoretische Überlegungen folgende Aussagen: der Maximalwert der Strömungsgeschwindigkeit ist etwa doppelt so hoch wie der Schichtmittelwert (gesamte Schicht), die Lage des Maximalwerts liegt in etwa 1/4 der Schichtmächtigkeit über Grund.

Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten erwartungsgemäß an Hängen auf, wobei neben der Hangneigung auch die Landnutzung (niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten über Wald als über Freiland) eine Rolle spielt. Auf der anderen Seite stellen breite Täler und Talweitungen Gebiete mit sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten dar, z.B. das Neckartal im Bereich der Einmündung des Nesenbachtals. Die in den Tälern oft vorhandene Bebauung wirkt zusätzlich bremsend auf die Strömung.

Die mittlere Windgeschwindigkeit in der gesamten Kaltluftschicht beträgt etwa 0.4 m/s mit einer Streuung von etwa 0.3 m/s und einem Maximum von etwa 2 m/s. In der Schicht 0 m -15 m liegen Mittelwert und Streuung ähnlich, der Maximalwert liegt etwas höher.

Vergleicht man z.B. anhand der in **Abb. 5.5** eingezeichneten Höhenlinien die Richtung der Hangneigungen mit den berechneten Kaltluftabflußrichtungen, so zeigt sich, daß nur in höhergelegenen Bereichen mit größeren Hangneigungen die Kaltluft entlang des Hanggefälles abfließt, während sich in tieferen Lagen bei geringeren Hangneigungen eine mehr hangparallele Richtung einstellt. Leichte Erhebungen, wie z.B. am Asemwald, können sogar überströmt werden, wobei die Kaltluft entgegen den Hanggradienten fließt.

Abb. 5.5 Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gesamtgebiet
Schicht 0 m – 15 m



5.1.4 Kaltluftdaten einiger ausgewählter Stationen

Die im folgenden wiedergegebenen Daten einiger ausgewählter Stationen sollen das oben Gesagte quantitativ illustrieren. Die folgende **Tab. 5.1** beschreibt zunächst die Stationen.

Station Nr.	Koordinaten der ausgewählten Stationen		
	Bezeichnung	RW	HW
1	Neckartal, Otto-Konz-Brücke	3518 500	5403500
2	Neckartal, Berg	3515500	5407000
3	Rohrackeratal bei Rohracker	3517000	5402200
4	Nesenbachtal, Hauptbahnhof	3513500	5405200
5	Nesenbachtal, Karlshöhe	3512000	5403000
6	Feuerbacher Tal, südlicher Ortseingang Feuerbach	3511200	5407000
7	Körschtal bei Kemnat	3517000	5397000
8	Vaihingen, Hengstäcker	3509500	5399700

Tab. 5.1: Ausgewählte Stationen

Die Lage der Stationen geht aus **Abb. 5.6** hervor. Die folgende **Tab. 5.2** stellt einige Ergebnisse zusammen.

Station Nr.	Schichtdicke (m)	mittl. Strömungsgeschw. 0 m - 15 m m/s	Volumenstromdichte 0 m - 15 m m ³ /ms	gesamte Volumenstromdichte m ³ /ms	Richtung (°)
1	80	0.2	3	13	150
2	50	0.1	2	4	100
3	30	2.0	31	42	270
4	40	0.5	7	12	210
5	75	0.5	7	28	230
6	50	0.6	9	20	215
7	90	0.3	5	23	290
8	17	0.6	8	8	170

Tab. 5.2: Kaltluftparameter an den ausgewählten Stationen (alle Werte gerundet)

Abb. 5.6 Für die quantitative Diskussion der Kaltluftsysteme ausgewählte Stationen

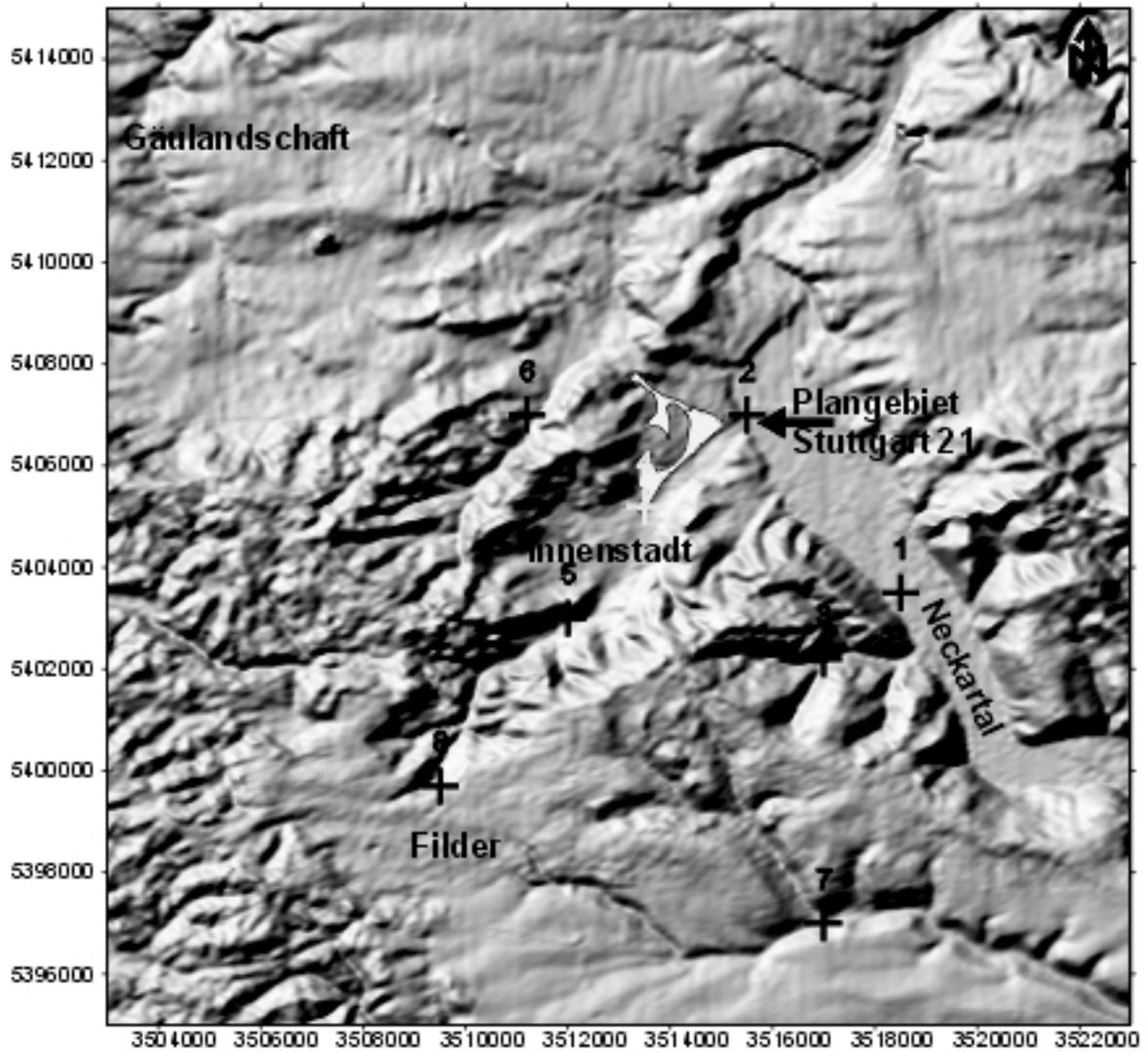


Abb. 5.6: Für die quantitative Diskussion der Kaltluftsysteme ausgewählte Stationen

5.1.5 Vertikale Struktur der Kaltluftflüsse

In Bereichen mit größerer Kaltluftmächtigkeit fließt der Hauptanteil der Kaltluft nicht in der bodennächsten Schicht (0 m-15m), sondern in höheren Schichten. Dies kann aus **Abb. 5.7** abgeleitet werden, in welcher die Volumenstromdichte in der Schicht zwischen 15 m und 50 m über Grund gezeigt ist. So treten z.B. im Neckartal nördlich der Einmündung des Rohrackertals, dem Rohrackertal selbst, dem Körschtal, dem oberen und mittleren Bereich des Nesenbachtals, sowie dem Feuerbachtal in dieser Schicht hohe Volumenstromdichten auf. Dies kann direkt mit der in **Abb. 5.4** dargestellten Kaltluftmächtigkeit in Beziehung gesetzt werden: diese Gebiete weisen auch eine hohe Kaltluftmächtigkeit auf, so daß dort im Höhenbereich zwischen 15 m und 50 m gleichhohe und z.T. höhere Volumenstromdichten als in Bodennähe auftreten. Dies hat zur Konsequenz, daß der Hauptfrischlufttransport sozusagen "oberhalb der Bebauung" stattfindet; dadurch wird einerseits die bodennahe Bebauung schlechter durchlüftet, andererseits wird die in der höheren Schicht abfließende Kaltluft weniger behindert und hat dort eine größere Reichweite, zudem können aus bodennahen Quellen wenige Schadstoffe eingemischt werden. In **Abb. 5.8** ist zusätzlich die bodennahe Volumenstromdichte (0 m - 15 m) gezeigt. Aus dieser Abbildung kann man ablesen, daß auch in Bodennähe noch hinreichend hohe Volumenstromdichten vorhanden sind.

Die vertikale Struktur von Kaltluftabflüssen läßt sich gut am Beispiel der Karlshöhe illustrieren (Station 5 in **Tab. 5.1** und **Tab. 5.2**). Die Schichtdicke beträgt dort nach 3 Stunden simulierter Zeit etwa 75 m bei einer gesamten Volumenstromdichte von etwa 28 m³/ms. Die untenstehende **Tab. 5.3** enthält die durch die angegebenen, jeweils 5 m dicken Schichten, fließende Kaltluftmenge.

Man sieht, daß in unmittelbarer Bodennähe (0 m -5 m) ein geringer Volumenstrom fließt. Die Volumenstromdichte in der bodennahen Schicht (0 m -15 m) beträgt mit etwa 7 m³/ms etwa ein Viertel der gesamten Volumenstromdichte, während in der Schicht zwischen 15 m und 30 m mit etwa 10 m³/ms, entsprechend etwa einen Drittel, ein größerer Anteil als in der darunterliegenden Schicht fließt.

Schicht zwischen	Volumenstromdichte (m ³ /ms)
0- 5 m	1.0
5-10 m	2.5
10-15 m	3.3

15-20 m	3.5
20-25 m	3.5
25-30 m	3.2
30-35 m	2.8
35-40 m	2.3
40-45 m	1.9
45-50 m	1.4
50-55 m	1.0
55-60 m	0.6
60-65 m	0.5
65-70 m	0.2
70-75 m	0.1

Tab. 5.3: Vertikalprofil der Volumenstromdichte an der Station 5 (Karlshöhe)

5.1.6 Volumenströme durch ausgewählte Talquerschnitte

Durch Summation der Volumenstromdichte über einen Querschnitt kann unter Berücksichtigung der Strömungsrichtung der Volumenstrom durch diesen Querschnitt bestimmt werden. Wählt man als Querschnitt einen Talquerschnitt, so kann auf diese Weise der Gesamtabfluß durch das Tal ermittelt werden. Die wurde exemplarisch für das Nesenbachtal im Bereich der Karlshöhe, das Rohrackertal an der Einmündung in das Neckartal (bei Hedelfingen) und für das Feuerbacher Tal südlich des Ortseingangs von Feuerbach durchgeführt.

Es ergaben sich folgende Gesamtabflüsse durch die jeweiligen Talquerschnitte:

- Nesenbachtal : ca. 100 Mio m³/h
- Rohrackertal : ca. 160 Mio m³/h
- Feuerbacher Tal : ca. 30 Mio m³/h

Aus diesen Zahlen läßt sich quantitativ die Bedeutung dieser Täler für ihr jeweiliges Einzugsgebiet ermessen.

Abb. 5.7: Volumenstromdichte im Gesamtgebiet
Schicht 15 m – 50 m

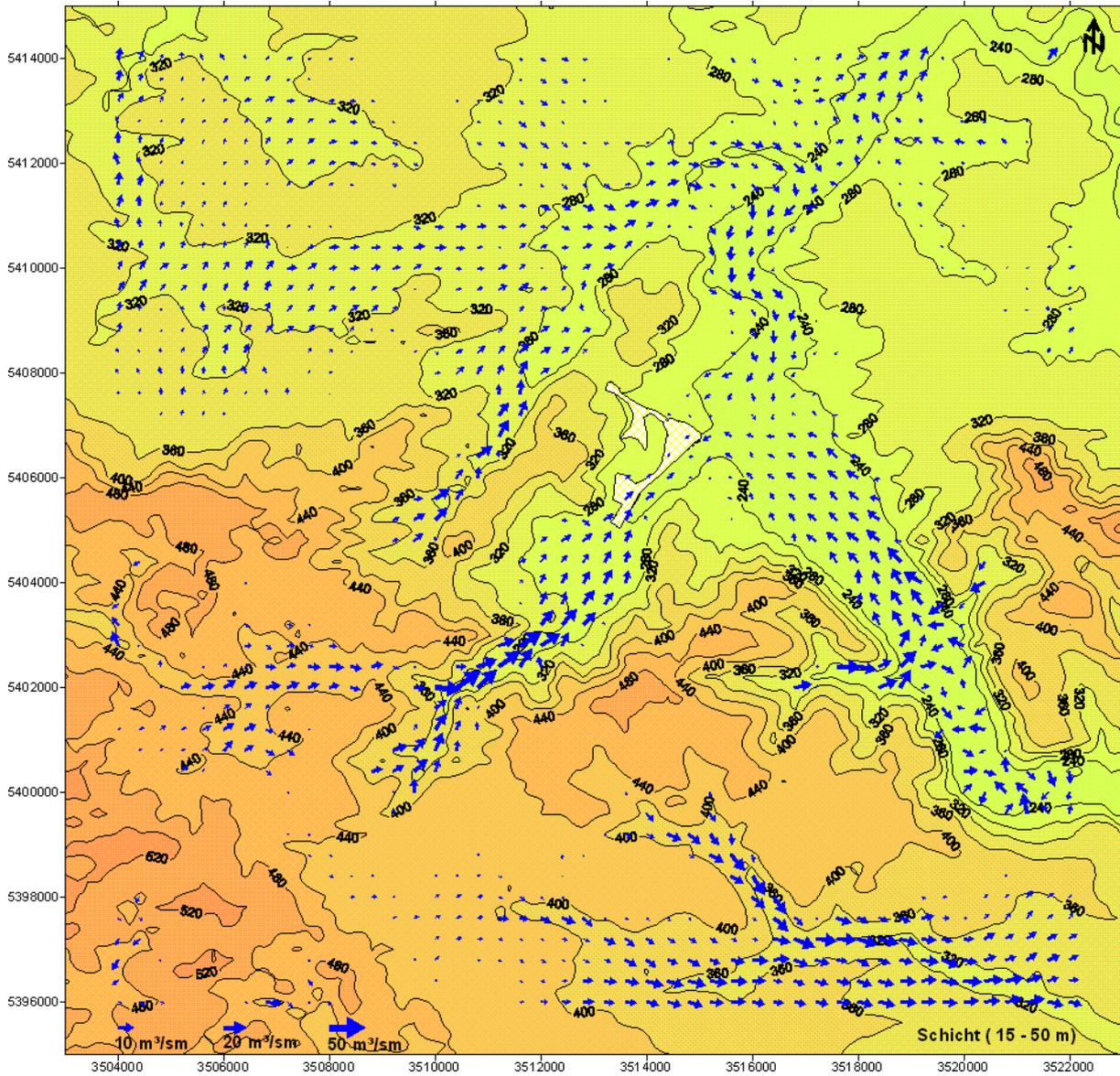
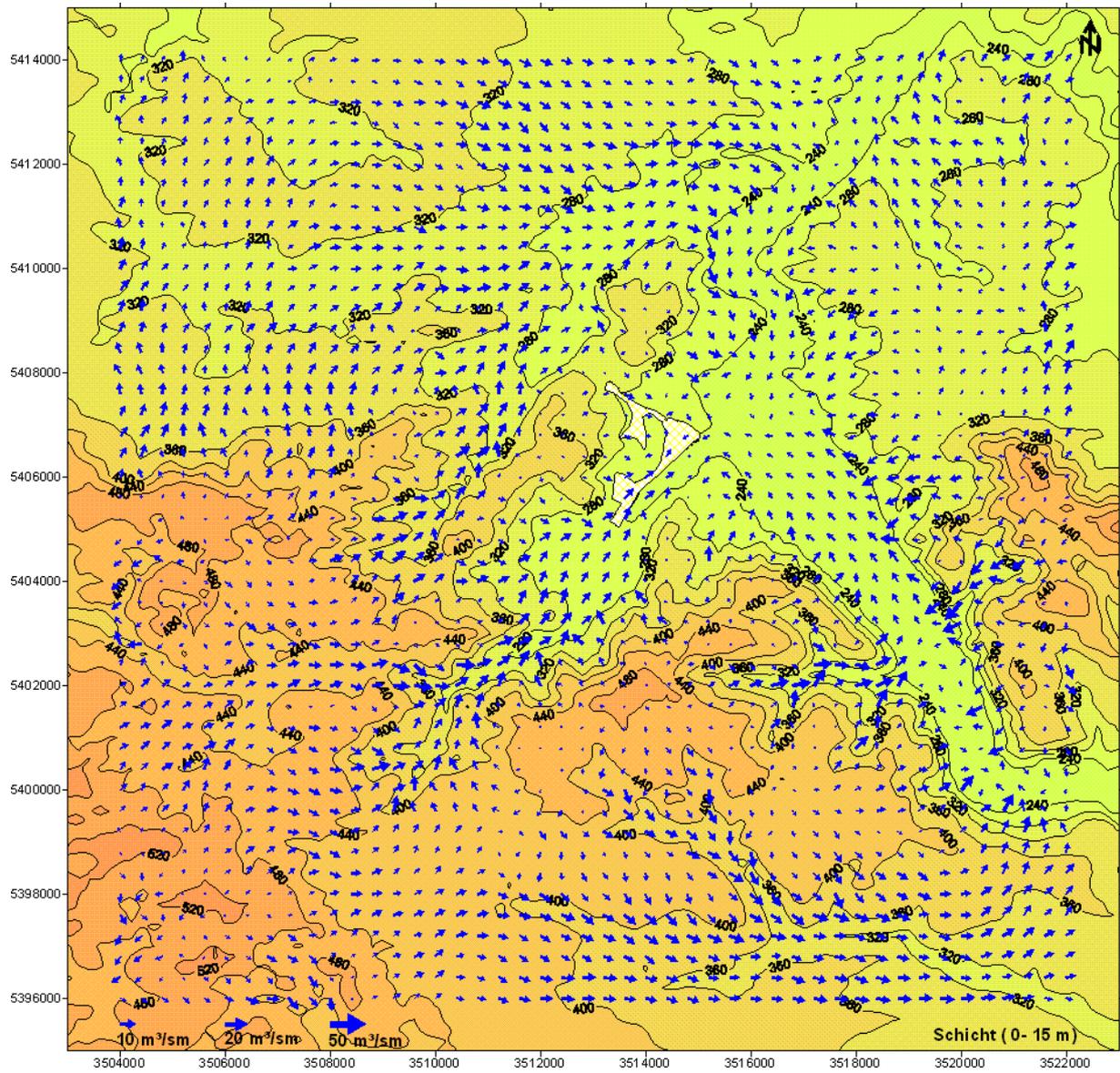


Abb. 5.8: Volumenstromdichte im Gesamtgebiet
Schicht 0 m – 15 m



5.2 Kaltluftsituation im Innenstadtbereich

Zur detaillierten Darstellung der Kaltluftsituation im Innenstadtbereich, in dem das Plangebiet "Stuttgart 21" liegt, wurden Kaltluftrechnungen mit höherer Auflösung durchgeführt (zur Beschreibung des Gebiets siehe Kap. 3).

Bei der gewählten Auflösung von 50 m werden Gebäude zwar nicht aufgelöst, wohl aber bereits kleinräumige Strukturen wie Baulücken, Parks, Straßen usw., sofern sie eine horizontale Ausdehnung im Bereich von mindestens 50 m haben. Bei der Berechnung von Kaltluftsystemen in solchen kleineren Gebieten mit hoher Auflösung müssen auch die aus der Umgebung in das Untersuchungsgebiet hineinreichenden Kaltluftsysteme berücksichtigt werden, in diesem Fall z.B. der im Nesenbachtal stattfindende Abfluß. Dies geschieht durch das bereits erwähnte "Nesten" des höher aufgelösten Gebietes in das in den vorigen Kapiteln betrachtete größere Gebiet. Dabei wird Information über die Strömungsverhältnisse aus dem höher aufgelösten Gebiet in das gröber aufgelöste übertragen und umgekehrt, so daß diese Methode die Vorteile der Gesamtbetrachtung mit denen der Detailbetrachtung in einem ausgewählten Gebiet vereint.

Abb. 5.9 zeigt die Volumenstromdichte über die gesamte Schichtdicke. Vergleicht man diese mit **Abb. 5.3**, so erkennt man die quantitative und qualitative Übereinstimmung der Abbildungen hinsichtlich der gröberskaligen Strömungssysteme (Nesenbachtal, Neckartal), wobei aber durch die vierfach höhere Auflösung der Topographie und der Landnutzung Details erscheinen, welche bei der Rechnung mit gröberer Auflösung nicht zutage treten; hier wäre z.B. der "Wirbel" beim Zusammentreffen der Abflüsse aus dem Nesenbachtals, dem Neckartal sowie dem Bereich Wartbergklinge, Steinbergklinge und Pragsattel zu nennen.

Bezüglich der Durchlüftung des Plangebietes "Stuttgart 21" läßt sich folgendes festhalten:

- die größte Volumenstromdichte findet sich im Bereich A, aus dem Nesenbachtal kommend, sowie im nördlichen Teil von Bereich C aus Richtung Wartbergklinge-Steinbergklinge
- der südliche Teil von Bereich B ist ein Gebiet mit niedrigeren Volumenstromdichten
- Bereich B liegt im Staubereich des Zusammenflusses, die Qualität der Kaltluft in diesem Gebiet ist geringer; durch die ungünstigen Transportbedingungen (Wirbelstrukturen) können hinsichtlich der Lufthygiene Probleme auftreten.

Die Hangabwinde von den das Nesenbach- und Neckartal umrahmenden Höhen erreichen eine nur geringe Mächtigkeit (maximal etwa 20 m). Wesentlich größere Schichtdicken (bis zu 60 m)

erreichen die aus dem Nesenbachtal und aus dem Neckartal kommenden Abflüsse (vgl. **Abb. 5.10**).

Wie bereits weiter oben diskutiert, wird ein wesentlicher Anteil der Kaltluftmenge nicht in Bodennähe (0 m - 15 m), sondern in höheren Schichten transportiert. So wird z.B. im Bereich des Hauptbahnhofs fast genausoviel Kaltluft in der Schicht zwischen 15 m und 30 m transportiert wie in der Schicht zwischen 0 m und 15 m.

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der bodennächsten Schicht zeigt **Abb. 5.11**.

Abb. 5.9: Volumenstromdichte im Innenstadtgebiet
gesamte Kaltluftschicht

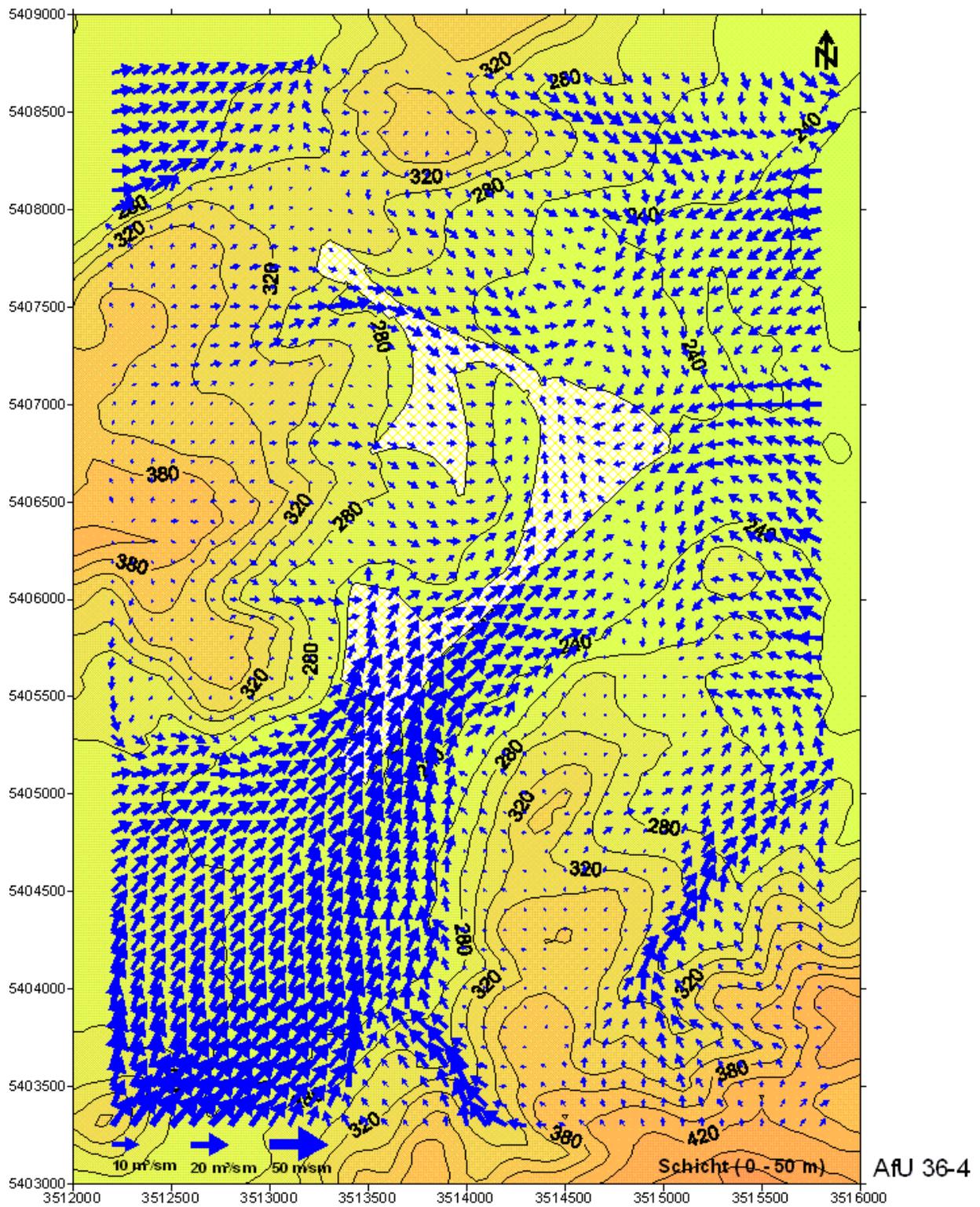


Abb. 5.10: Kaltluftschichtmächtigkeit im Innenstadtgebiet und Volumenstromdichte

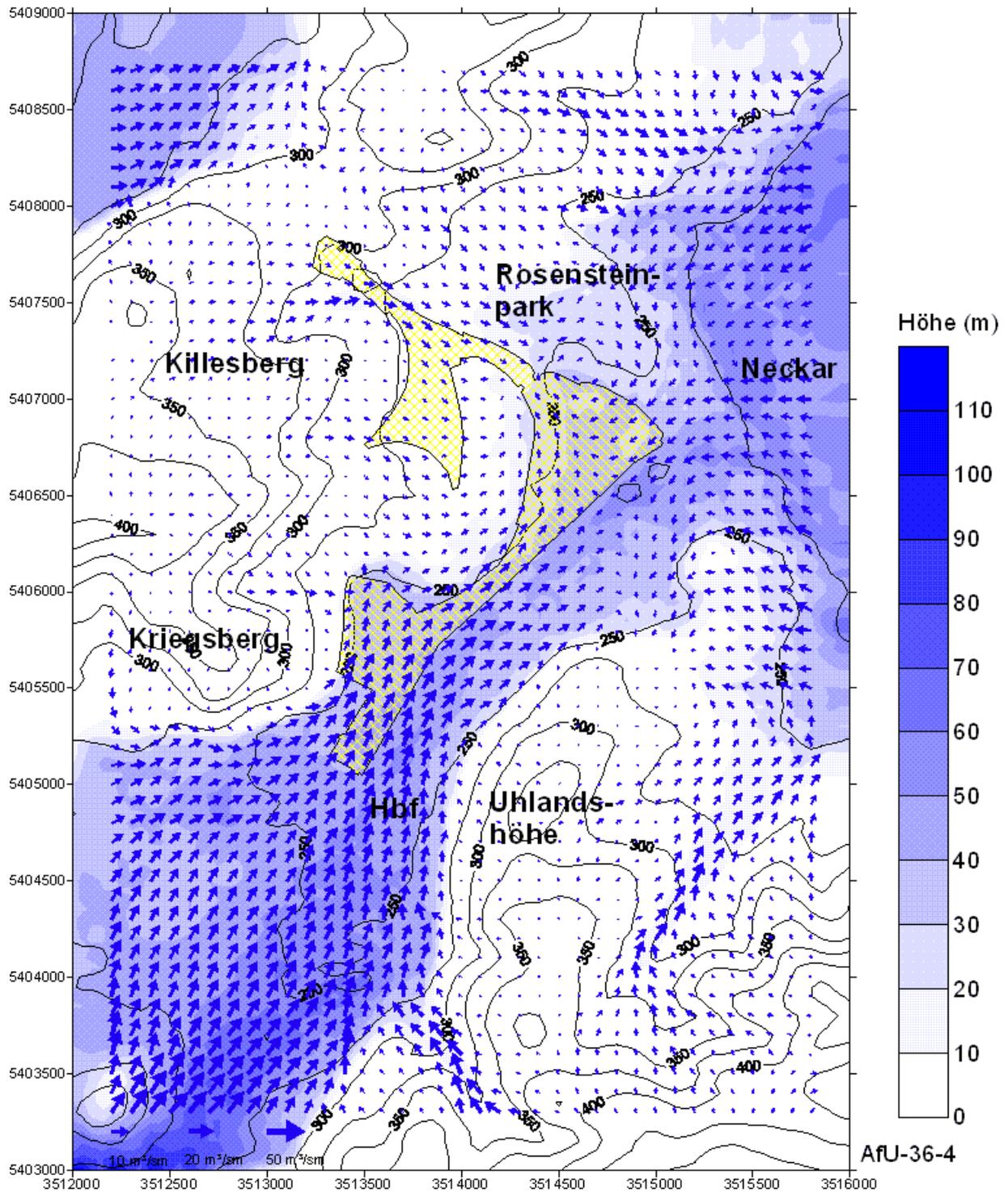
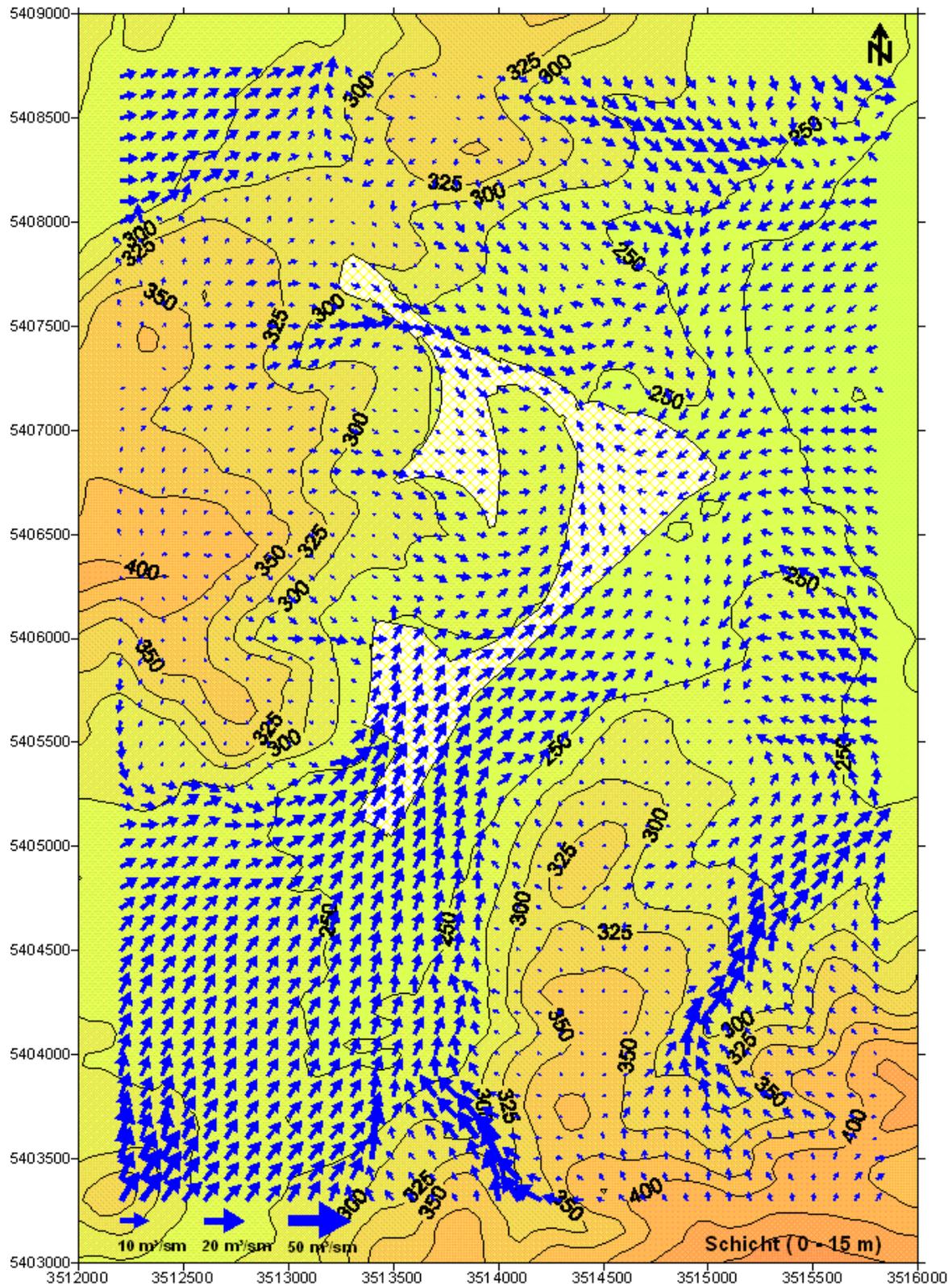


Abb. 5.11: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Innenstadtgebiet
Schicht 0 m - 15 m



6. WINDFELDER

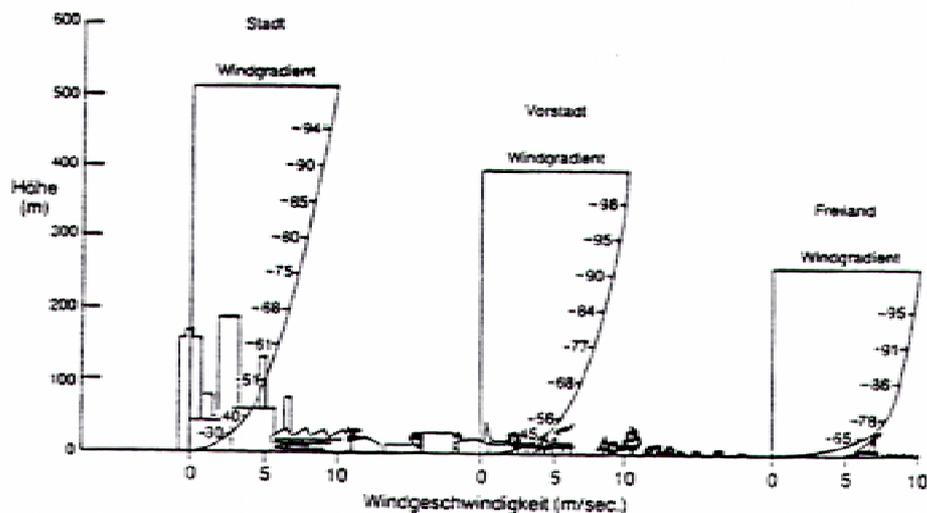
6.1 Allgemeines

Relief und Landnutzung beeinflussen nicht nur bei windschwachen Wetterlagen wie bei Kaltluftsituationen lokal die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit, sondern auch bei Wetterlagen mit höheren Windgeschwindigkeiten, sogenannten Gradientwindlagen. Dabei wirkt sich die Landnutzung über die Oberflächenrauigkeit vor allem auf die Windgeschwindigkeit aus; wie **Abb. 6.1** zeigt, ist in der gleichen Höhe über Grund die Windgeschwindigkeit über Freiland wegen der geringeren Oberflächenrauigkeit deutlich höher als über bebautem Gebiet. Das Geländere relief wirkt sich sowohl auf die Windgeschwindigkeit als auch auf die Windrichtung aus. In Tälern ist häufig zu beobachten, daß die Hauptwindrichtungen etwa parallel zur Talachse liegen (Kanalisation), während die Windgeschwindigkeit, ebenso wie in Kessellagen, niedriger ist als in ebenem Gelände. Allgemein kann festgestellt werden, daß die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Geländehöhe zunimmt. Kuppen werden je nach Temperaturschichtung der Atmosphäre mehr umströmt oder mehr überströmt. Umströmung tritt vor allem bei stabiler Schichtung auf, während Überströmung bei neutraler Schichtung stattfindet. Bei der Überströmung von Kuppen oder Bergen treten im Gipfelbereich deutlich erhöhte Windgeschwindigkeiten auf, dies umso mehr, als neutrale Schichtung meist zusammen mit höheren Windgeschwindigkeiten auftritt.

Durch das vorzugsweise Umströmen bei neutraler Schichtung wird sich das Relief weniger auf die Windrichtung, sondern mehr auf die Windgeschwindigkeit auswirken. Nur von größeren Einschnitten oder Erhebungen sind deutliche Auswirkungen auf die Windrichtung zu erwarten.

Das Zusammenwirken von Relief und Landnutzung kann gleichsinnig oder gegenläufig sein. In freien Kuppenlagen können z.B. extrem hohe Windgeschwindigkeiten auftreten, während in bewaldeten oder bebauten Tälern die Windgeschwindigkeit sehr niedrig werden kann. Umgekehrt kann es sein, daß sich die Windverhältnisse auf bewaldeten Kuppen und in freien Tälern recht wenig voneinander unterscheiden.

Abb. 6.1 Vergleich von Windprofilen über Bebauung und über Freiland
Quelle: Hoffmann, 1977



Zur Darstellung und Diskussion der Windverhältnisse im Stuttgarter Raum wurden mit dem diagnostischen Windfeldmodell DIWIMO (siehe Beschreibung im Anhang) für die 8 Höhenwindrichtungen 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° und 315° die sich einstellenden bodennahen Windverteilungen berechnet. Diese Windrichtungen wurden am Oberrand des Modellgebietes (etwa 700 m über dem tiefsten Punkt der Topographie) zusammen mit einer Windgeschwindigkeit von 10 m/s vorgegeben; als atmosphärische Stabilität wurde neutral bis schwach stabil vorgegeben, da wie bereits erwähnt im allgemeinen höhere horizontale Windgeschwindigkeiten mit neutraler Stabilität verbunden sind. Landnutzung und Topographie wurden in der gleichen Weise wie bei den Kaltluftrechnungen berücksichtigt.

Bei der Interpretation der Darstellungen ist zu beachten, daß wegen der Ekman-Drehung in der atmosphärischen Grenzschicht der (von der Topographie unbeeinflusste) bodennahe Wind gegen den Höhenwind um etwa 10° bis 20° gegen den Uhrzeigersinn gedreht ist, so daß z.B. ein Höhenwind aus Ost als Bodenwind aus Ostnordost erscheint.

Im Stuttgarter Stadtbereich liegen die mittleren Windgeschwindigkeiten im Überdachniveau meist unter 2 m/s (LfU, 1994). Gründe für diese niedrigen Windgeschwindigkeiten sind vor allem die Lage des Stuttgarter Raums im Windschatten ausgedehnter Waldgebiete wie Schwarzwald

und Schwäbische Alb sowie auch die Kessel- bzw. Tallage großer Teile Stuttgarts. Täler wie z.B. das Neckartal oder das Nesenbachtal sind außerdem meist dicht bebaut und bringen damit, wie oben erläutert, besonders niedrige Windgeschwindigkeiten mit sich.

Als repräsentativ für die großräumige Windrichtungsverteilung können die Stationen Stuttgart-Flughafen (**Abb. 6.2**) bzw. Schnarrenberg (**Abb. 6.3**) betrachtet werden. Die Hauptwindrichtungen sind demnach West bzw. Südwest und Ost bzw. Südost, am seltensten treten Winde aus nördlichen Richtungen auf. Allerdings kann aus dieser großräumigen Windrichtungsverteilung wegen der vielfältigen Reliefgliederung fast nirgends im Stuttgarter Raum auf die lokale Windrichtungsverteilung geschlossen werden. Im Hinblick auf diese Hauptwindrichtungen werden im folgen als typische Windrichtungen die Höhenwindrichtungen Südwest, Ost und Nordwest diskutiert.

Abb. 6.2 10-jährige Windstatistik der Station Stuttgart-Flughafen
Quelle: Deutscher Wetterdienst

WINDROSE FÜR AK-STATISTIK (TA LUFT)

STGT.-FLUGHAFEN
01.1981 - 12.1990

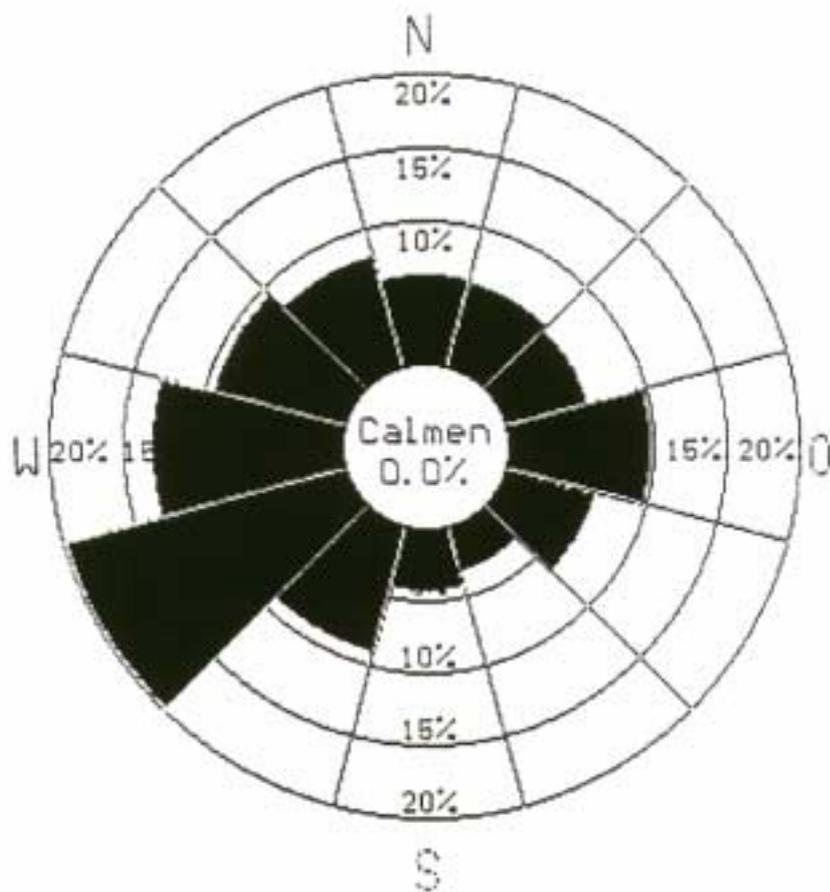
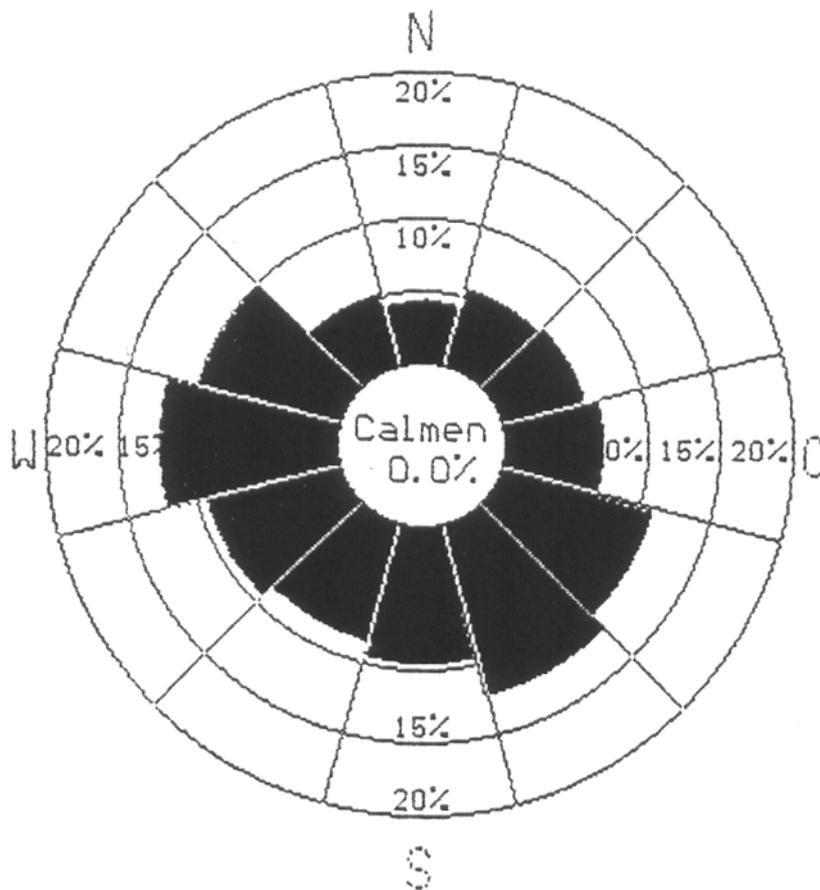


Abb. 6.3 10-jährige Windstatistik der Station Scharrenberg
 Quelle: Deutscher Wetterdienst

WINDROSE FÜR AK-STATISTIK (TA LUFT)

STGT. -SCHNARRENBURG

01.1981 - 12.1990



6.2 Diskussion ausgewählter Windfelder im Gesamtgebiet und im Innenstadtbereich

Abb. 6.4 zeigt die sich einstellende bodennahe Windverteilung bei einer Höhenanströmung aus Nordwest. Wegen der genannten Ekman-Drehung kommt der bodennahe Wind in diesem Fall aus Westnordwest. Man erkennt deutlich, daß die höheren Windgeschwindigkeiten in offenen höhergelegenen Gebieten (z.B. Filder) bzw. im Bereich von Bergrücken und Kuppen (z.B. Frauenkopf) auftreten, während in Tälern wie dem Nesenbachtal, dem Neckartal oder dem Feuerbacher Tal, welche meist auch bebaut sind, wesentlich niedrigere Windgeschwindigkeiten herrschen. Vergleicht man die Windfelder z.B. im Bereich des Nesenbachtals mit denen im Bereich Körschtal/Einmündung Ramsbachtal, so sieht man, daß für eine deutliche Beeinflussung der Windrichtung eine gewisse Mindestfläche des Einschnitts und eine Mindestgröße der Hangneigung erforderlich sind: das flächenmäßig kleinere Körschtal mit seinen geringeren Hangneigungen hat einen wesentlich schwächeren Einfluß auf die Windrichtung als das Nesenbachtal. Im Oberlauf des Nesenbachtals, im Rohrackertal sowie im Neckartal ist deutlich die kanalisierende Wirkung dieser Täler zu erkennen.

Das Gesagte gilt auch für Anströmungen aus anderen Windrichtungen wie z.B. Höhenwind aus Südwest (**Abb. 6.5**) oder aus Ost (**Abb. 6.6**). Anhand von **Abb. 6.5** ist gut zu erkennen, daß die Kanalisierungswirkung von Tälern am ausgeprägtesten ist, wenn das Tal in einem Winkel von weniger als etwa 45° zur Talachse angeströmt wird. Vergleicht man z.B. die Windgeschwindigkeit im Nesenbachtal mit der im Neckartal, so wird deutlich, daß die Windgeschwindigkeit im Tal umso höher ist, je weniger die großräumige Windrichtung von der Richtung der Talachse abweicht. Wird ein Tal etwa senkrecht zur Talachse angeströmt wie z.B. das Körschtal in **Abb. 6.5** oder das Neckartal in **Abb. 6.6**, so tritt bei Tälern dieser Größe praktisch keine Kanalisierung mehr auf, die Windgeschwindigkeit wird jedoch deutlich herabgesetzt.

Die beschriebenen Effekte sind auch in den räumlich höher aufgelösten Windverteilungen für die Stuttgarter Innenstadt zu sehen (**Abb. 6.7** bis **Abb. 6.9**); es wurde mit den gleichen Höhenwindrichtungen gerechnet wie in **Abb. 6.4** bis **Abb. 6.6**. Durch die höhere Auflösung von Topographie und Landnutzung bei diesen Rechnungen (100 m im Vergleich zu 200 m für das Gesamtgebiet) treten Details der Strömung deutlich zutage.

Aus dem Vergleich der **Abb. 6.7** bis **Abb. 6.9** läßt sich die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Anströmrichtung im Innenstadtbereich und speziell im Plangebiet "Stuttgart 21" ablesen: bei talenkrechten Richtungen wie Nordost (**Abb. 6.7**) sind die Wind-

geschwindigkeiten sehr niedrig, während bei eher talparallelen Richtungen wie Südwest (**Abb. 6.8**) oder Ost (**Abb. 6.9**) die Windgeschwindigkeiten im Innenstadtbereich höher sind. Die ist großenteils auf die beschriebenen Kanalisierungseffekte durch das Nesenbachtal zurückzuführen, einen Beitrag leistet auch die Abschattung durch die umgebenden Höhen. Generell ist die Windgeschwindigkeit in großen Teilen der Innenstadt durch die vorhandene dichte Bebauung im Vergleich zu Freiland herabgesetzt.

Im Plangebiet von "Stuttgart 21" treten bei den hier diskutierten Anströmrichtungen mit der derzeitigen Landnutzung die höchsten Windgeschwindigkeiten im Bereich B auf; in den Bereichen A und C hängen die auftretenden Windgeschwindigkeiten stark von der Windrichtung ab. Die sich einstellenden Windverteilungen werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Abb.: 6.4 Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Nordwest

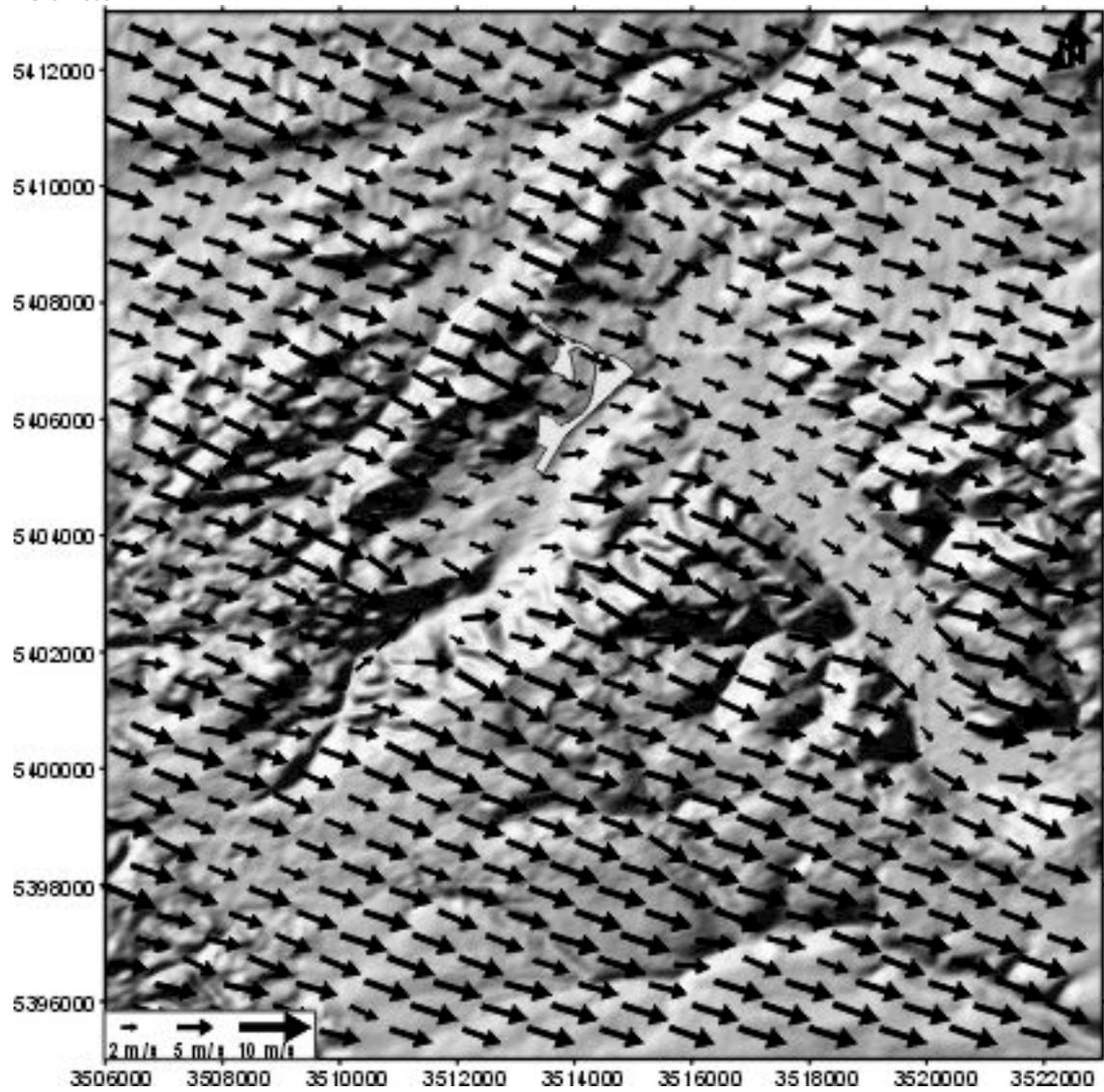


Abb.: 6.5 Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Südwest

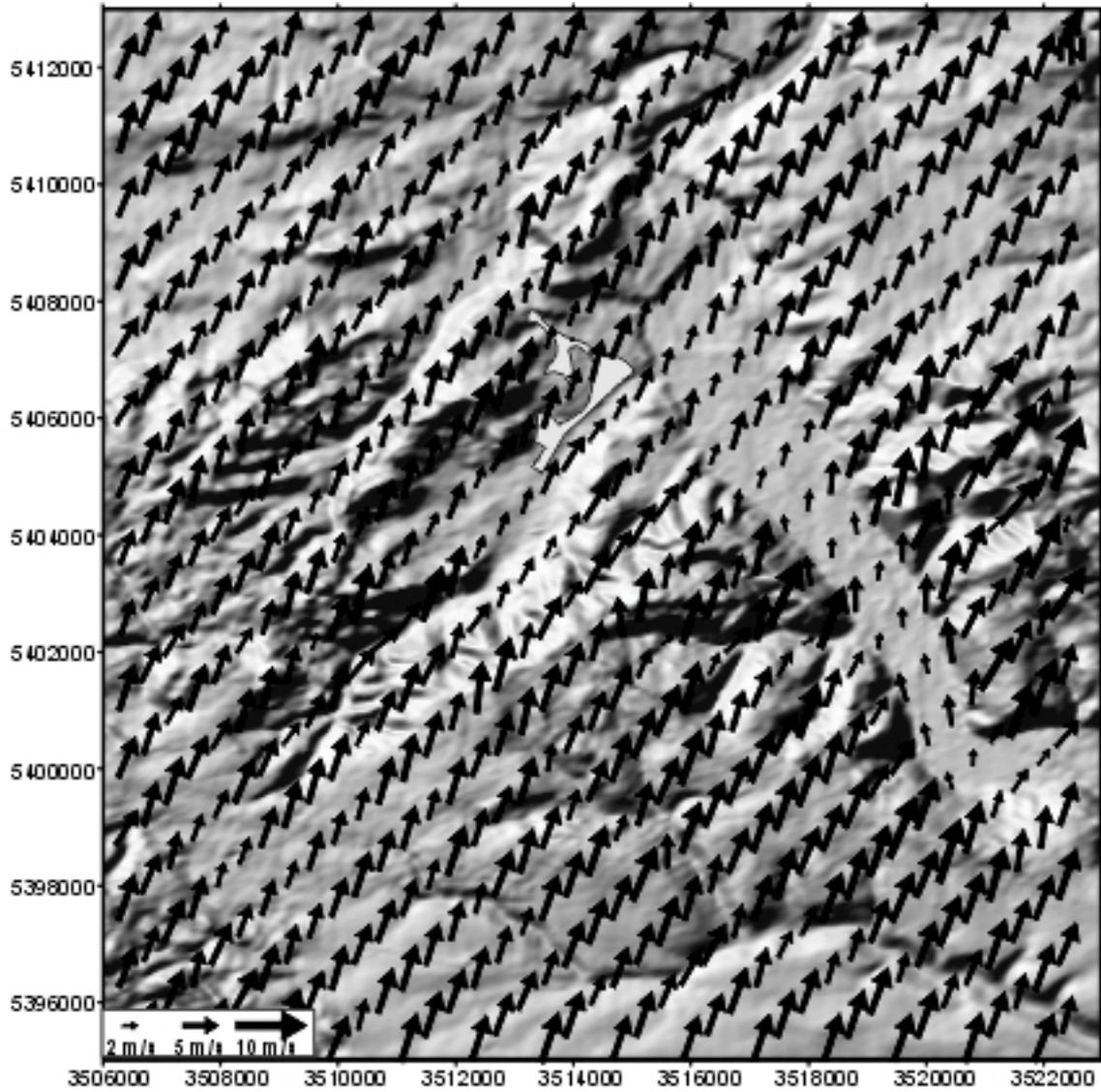


Abb.6 5: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Südwest

Abb.: 6.6 Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Ost++

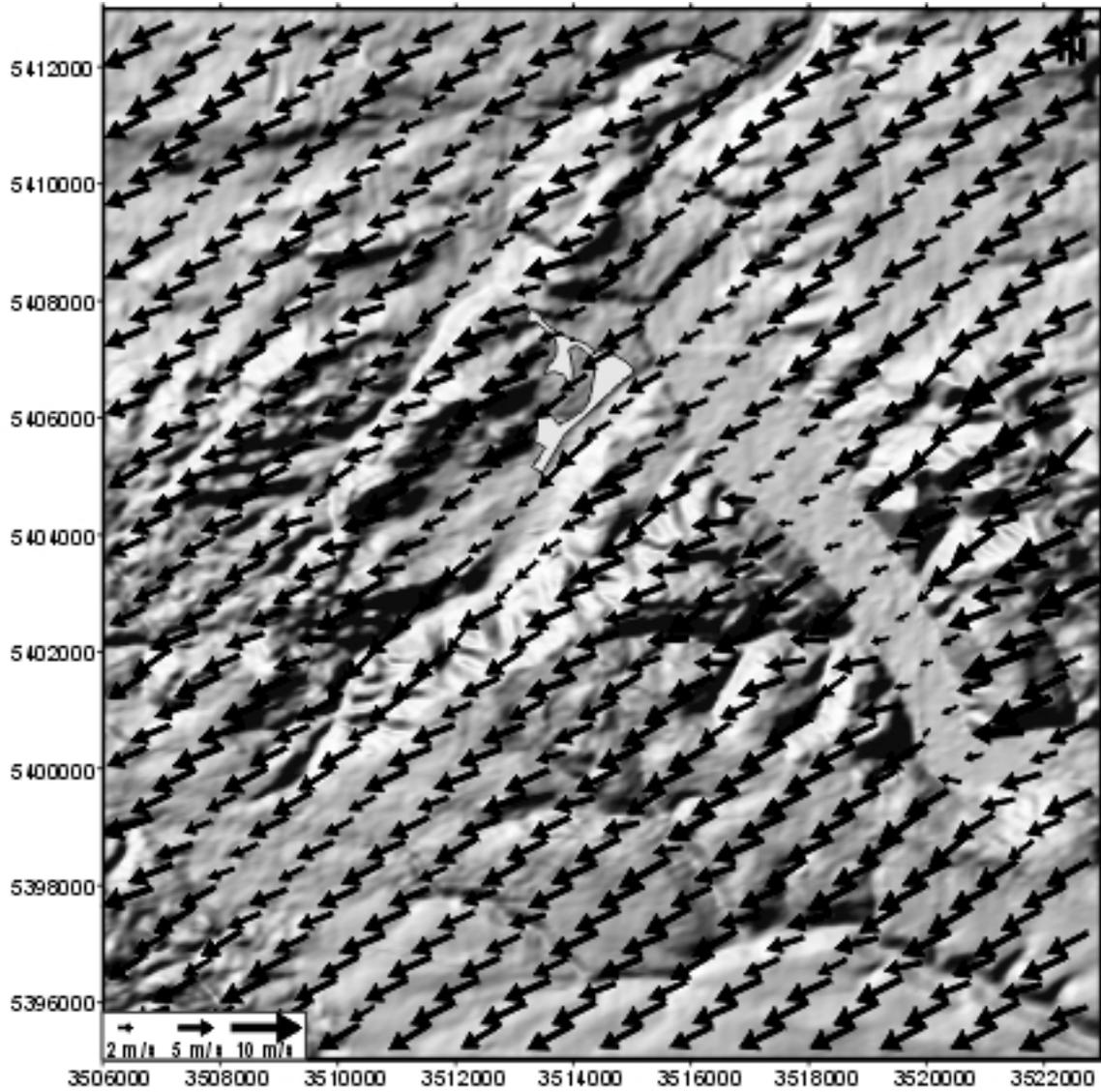


Abb. 6.6: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Ost

Abb.: 6.7: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Nordwest

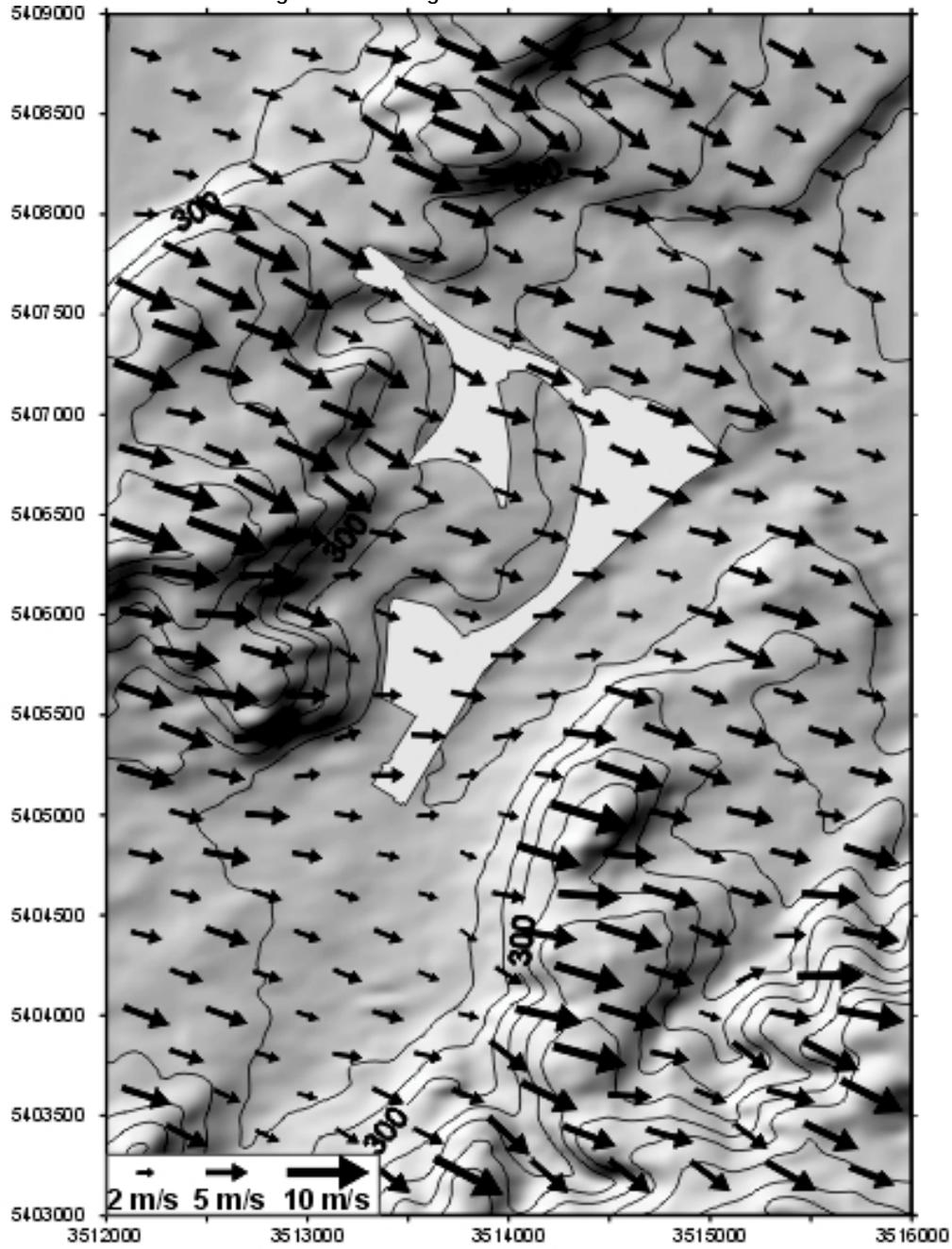


Abb. 6.7: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Nordwest

Abb.: 6.8: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Südwest

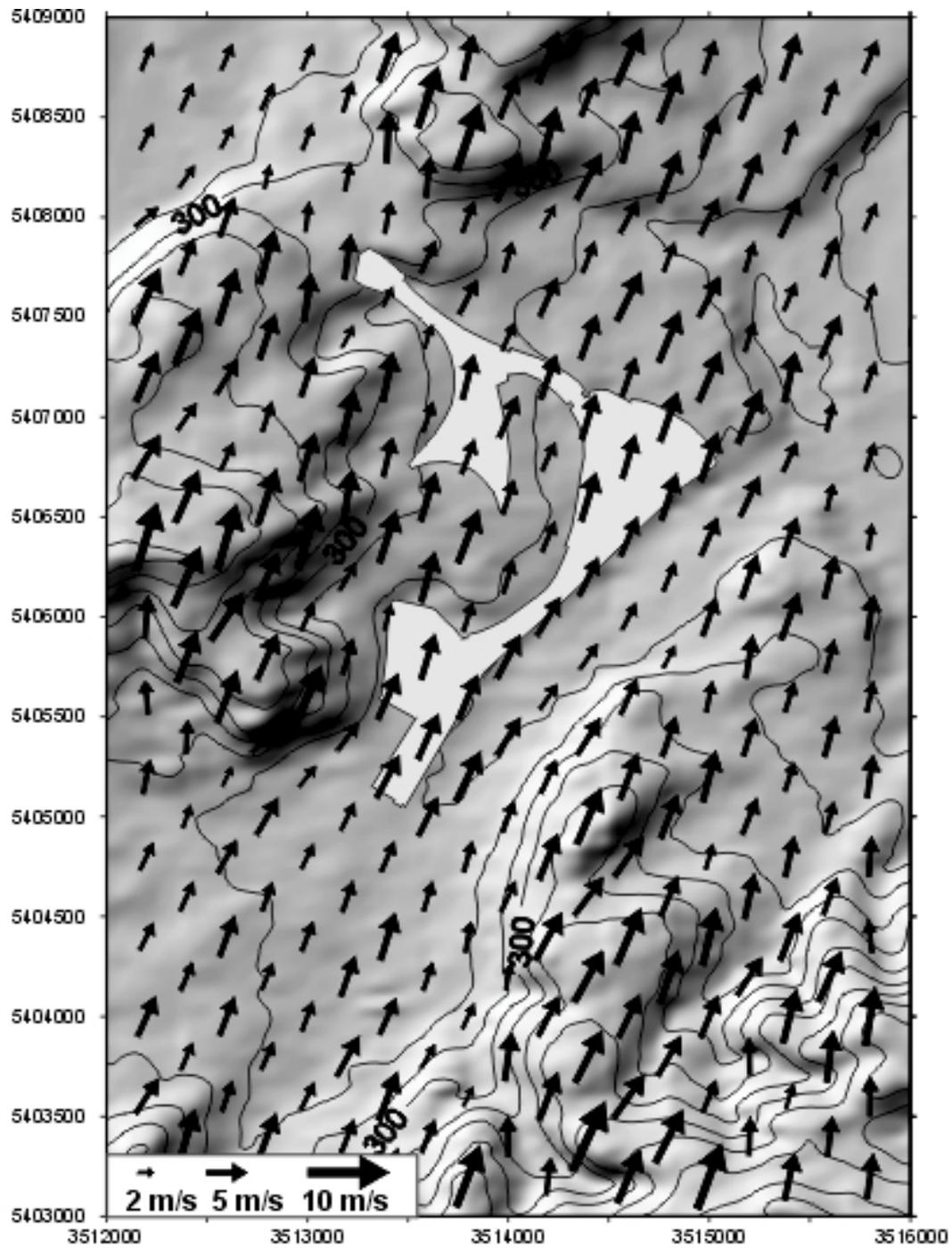


Abb. 6.8: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Südwest

Abb. 6.9 : Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Ost

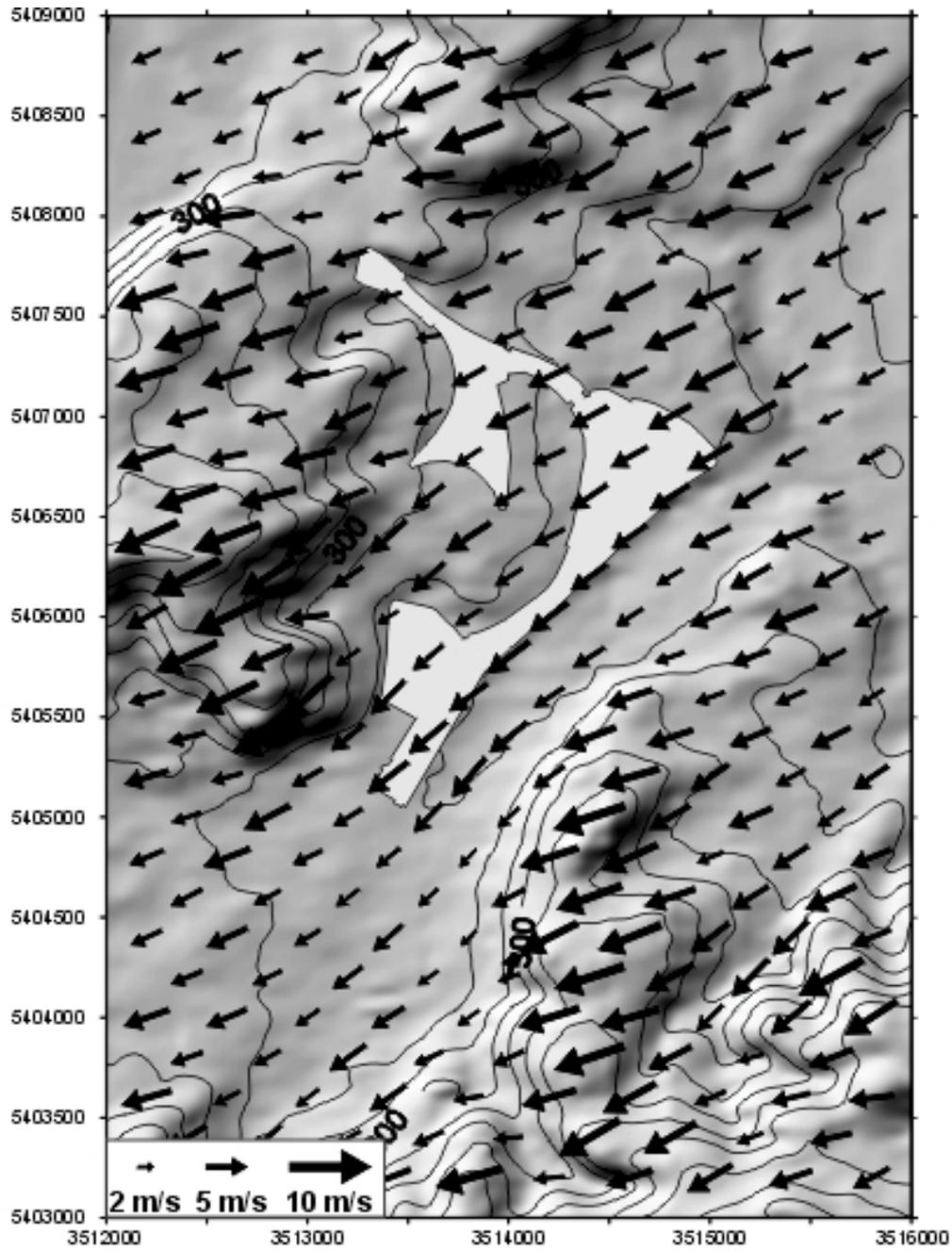


Abb. 6.9: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Ost

7. WINDROSENBEETE

Die Darstellung der flächenhaften Verteilung der Windstatistiken (Windrosenbeete) liefert einen guten Überblick über die durchschnittlichen Windverhältnisse im untersuchten Gebiet. Für Ausbreitungsbetrachtungen können damit die Homogenität der Windfelder bzw. die Gültigkeitsbereiche einzelner Windstatistiken abgeschätzt werden, für klimatische Fragen können z.B. Durchlüftungsbahnen und Hauptwindrichtungen in kleineren Bereichen daraus entnommen werden. Wie bereits erwähnt, weist das Windfeld im Stuttgarter Raum eine ausgeprägte lokale Variation auf, welche, wie bereits diskutiert, vor allem auf das bewegte Relief zurückzuführen ist, so daß Windrosen eine geringe räumliche Repräsentativität haben. Für höhere und freie Lagen kann zwar die Windstatistik des Stuttgarter Flughafens oder die der Wetterwarte am Schnarrenberg als typisch betrachtet werden, die Windverhältnisse in Stuttgarts Hang- und Tallagen werden jedoch durch diese Statistiken nicht wiedergegeben. Diese Variabilität der Windfelder wurde bereits im vorigen Kapitel anhand der sich bei einzelnen Höhenwindrichtungen einstellenden Windverteilungen diskutiert, sie wird weiter illustriert beim Vergleich der an verschiedenen Stellen des Stuttgarter Raums gemessenen Windstatistiken, welche in LfU, 1996 veröffentlicht sind. Wegen dieser starken Variabilität der Windstatistiken ist die Einschätzung der Repräsentativität gemessener Windstatistiken für ein interessierendes Gebiet - wie z.B. das Plangebiet des Projekts "Stuttgart 21" - problematisch. Eine Möglichkeit, hier dennoch flächendeckend zu lokal repräsentativen Statistiken zu gelangen, ist die Berechnung synthetischer Windstatistiken mit einem numerischen Modell.

Zur Erstellung solcher synthetischer Windstatistiken wurden mit dem diagnostischen Windfeldmodell DIWIMO (siehe Anhang) Windfelder in 10° -Schritten für das Gesamtgebiet und den Innenstadtbereich (vgl. Kap. 3) berechnet; einige Beispiele der sich dabei ergebenden Windverteilungen wurden im vorigen Kapitel dargestellt und diskutiert. Wie bei der Berechnung der Windfelder für einzelne Höhenwindrichtungen (vgl. Kap. 6), wurde dabei eine schwach stabile bis neutrale Schichtung der Atmosphäre angenommen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit wurden am Oberrand des Modellgebiets (in etwa 600 m bis 700 m über dem tiefsten Punkt des Modellgebiets) vorgegeben. Die Landnutzung wurde in Form der in Kap. 3 definierten 6 Landnutzungsklassen berücksichtigt. Unter Verwendung dieser Windfelder sowie der Windstatistik der DWD-Station Schnarrenberg wurden die in **Abb. 7.1** (Gesamtgebiet) und **Abb. 7.2** (Innenstadtbereich) dargestellten Windrosenbeete berechnet, wobei auch der Einfluß von Kaltluftabflüssen eingearbeitet wurde. Die Positionierung der Aufpunkte erfolgte in

Absprache mit dem Auftraggeber unter besonderer Berücksichtigung des Plangebiets von "Stuttgart 21". Alle Windrosen wurden für eine Anemometerhöhe von 10 m ü.Gr. erstellt.

Aus der Diskussion der Windstatistiken der Stationen Stuttgart-Flughafen und Schnarrenberg in Kap. 6 ergaben sich die großräumigen Hauptwindrichtungen West/Südwest und Ost/Südost; vergleicht man die folgenden lokalen Windstatistiken mit diesen "großräumigen" Richtungen, so kann der Einfluß von Relief und Landnutzung ermessens werden.

Die Windrosen im Gesamtgebiet (**Abb. 7.1**) zeigen eindrucksvoll die ausgeprägte räumliche Variabilität der Verteilungen; an einzelnen Verteilungen lassen sich deutlich lokale Einflüsse ablesen. Die Kanalisierungswirkung des Neckartals bzw. des Nesenbachtals läßt sich an der Station 7 bzw. den Stationen 5 und 6 (siehe **Abb. 7.1**) ablesen; das gilt auch für das Feuerbacher Tal (Station 4). Interessante Effekte ergeben sich auch beim Zusammentreffen zweier Täler. Ein Beispiel hierfür ist die Station 10, welche sowohl vom Körschtal als auch vom Ramsbachtal beeinflusst wird: die Verteilung ist im wesentlichen parallel zum Körschtal orientiert, es treten jedoch auch Windrichtungen aus dem Ramsbachtal und - weniger ausgeprägt - aus dem Klingenbachtal, wobei letztere beide wohl vor allem von Kaltluftabflüssen aus diesen beiden Tälern herrühren. Ähnliches gilt auch für die Station 9, im Mündungsbereich des Rohrackertals in das Neckartal. Hier nimmt die Windverteilung eine mittlere Orientierung zwischen der Orientierung des Neckartals und der Orientierung des Rohrackertals ein; zu dieser Ausrichtung trägt auch der in die gleiche nordöstliche Richtung gehende Kaltluftabfluß aus dem Rohrackertal bei (vgl. **Abb. 5.3**).

Ein noch stärkerer Eindruck von der lokalen Variation der Windverteilungen ergibt sich beim Betrachten der Verteilungen im Innenstadtbereich, **Abb. 7.2**. Man sieht, wie sich auf Distanzen von wenigen 100 m der Charakter der Verteilungen wesentlich ändert. Während im mittleren und südlichen Bereich (Bereich A des Stuttgart 21-Plangebiets) die von der Orientierung des Nesenbachtals aufgeprägten südsüdwestlichen Richtungen vorherrschen, zeigt sich im nördlichen Bereich (Bereich C des Plangebiets von "Stuttgart 21") der Einfluß des Pragsattels in vorherrschenden nordöstlichen Windrichtungen. Zu diesen "Umverteilungen" tragen auch hier wesentlich die aus diesen Richtungen kommenden Kaltluftabflüsse bei. Man erkennt auch am Vergleich von Stationen, die weiter im Nesenbachtal liegen, mit solchen, die mehr im Zusammenfluß von Nesenbachtal und Neckartal liegen, wie der kanalisierende Einfluß der Täler rasch mit der Aufweitung der Täler und dem zunehmenden Einfluß anderer Täler (in diesem Fall des Neckartals) abnimmt.

Abb.: 7.1: Synthetische Windstatistiken im Gesamtgebiet an ausgewählten Stationen

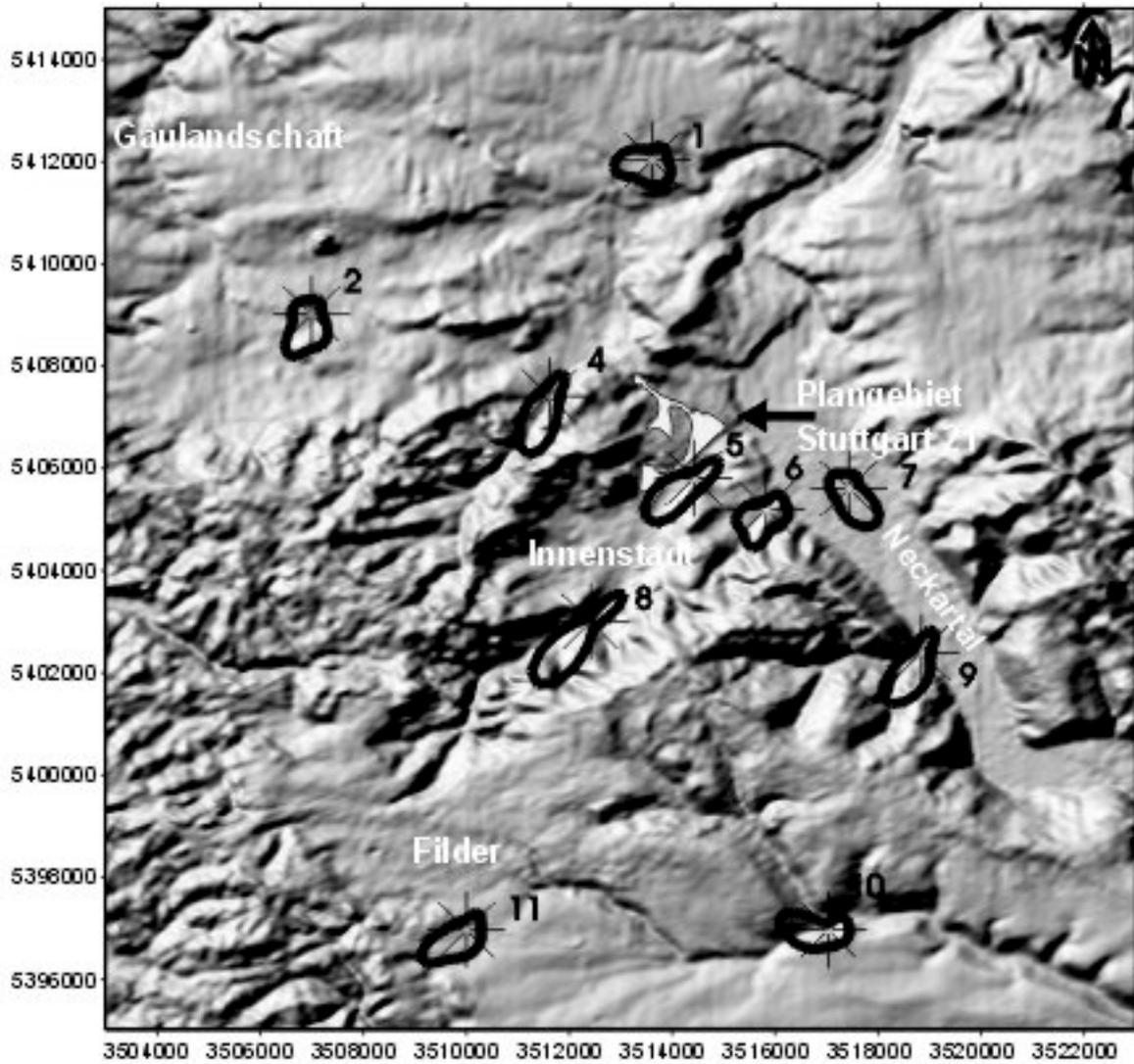


Abb. 7.1: Synthetische Windstatistiken im Gesamtgebiet an ausgewählten Stationen

Abb.: 7.2 Synthetische Windstatistiken im Innenstadtgebiet an ausgewählten Stationen

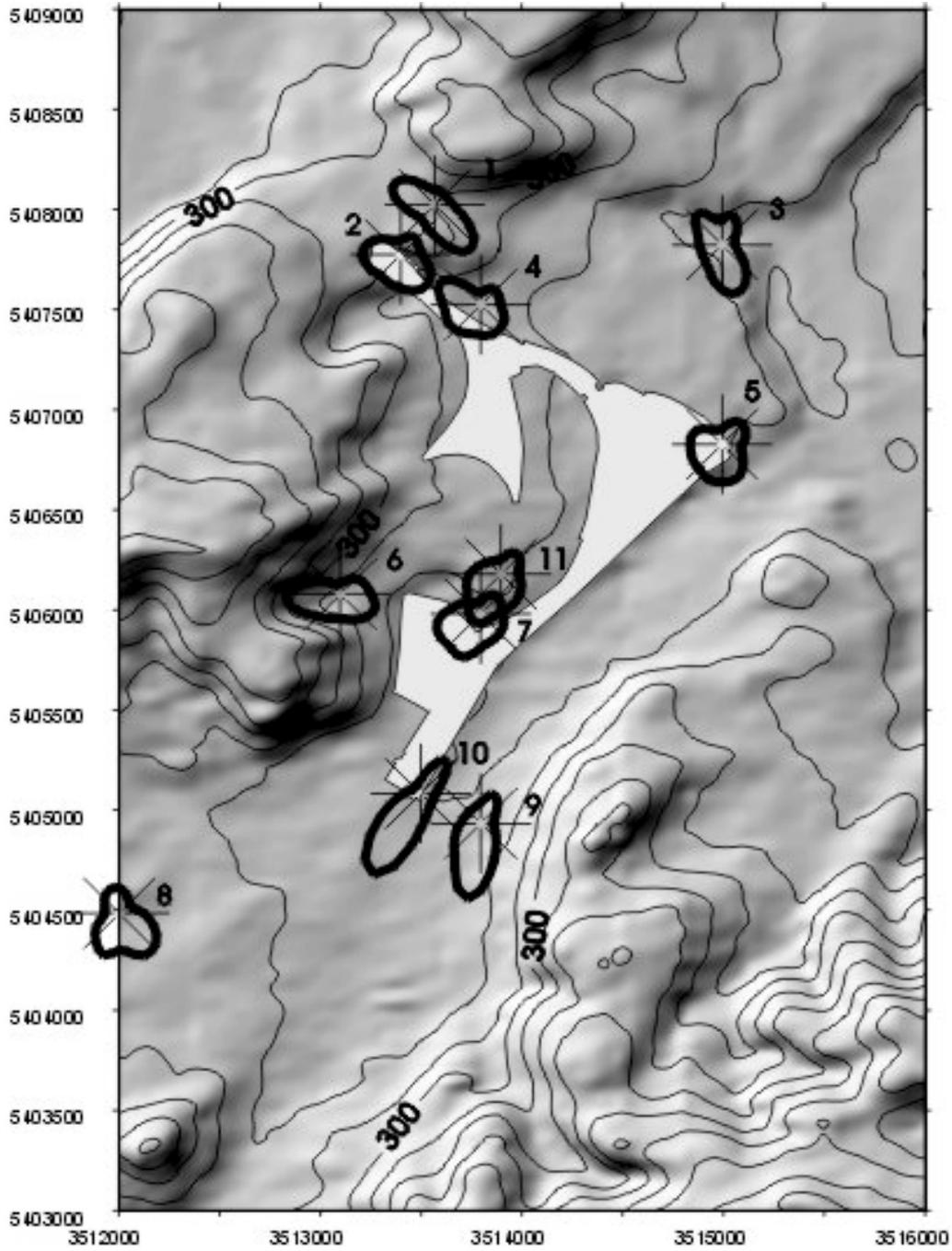


Abb. 7.2: Synthetische Windstatistiken im Innenstadtgebiet an ausgewählten Stationen

8. LITERATUR

- Baumüller, J. (1996): Persönliche Mitteilung von Prof. Baumüller, Umweltamt Stuttgart.
- Geßler, E. (1989): Numerische Simulation der Windverhältnisse im Bereich der Stadt Stuttgart. Diplomarbeit im Fach Meteorologie; Universität Karlsruhe.
- Heldt, K. (1984): Räumliche und zeitliche Struktur von Kaltluftabflüssen am Rheintalrand bei Karlsruhe. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Karlsruhe.
- Heldt, K., Hörschele, K. (1989): Hang- und Bergwinde am Rheintalrand bei Karlsruhe. In: Meteorol. Rundschau, 41, S. 104-110.
- Hoffmann, U. (1977): Probleme des Stadtklimas von Stuttgart. In: E. Franke (Hrsg.): Stadtklima, Karl Krämer Verlag, Stuttgart.
- Klimaatlas (1992): Klimauntersuchung für den Nachbarschaftsverband Stuttgart und angrenzende Teile der Region Stuttgart. Hrsg.: Nachbarschaftsverband Stuttgart.
- Kost, W.J. (1982): Experimentelle Untersuchung zur Ausbreitung von Luftverunreinigungen in einem Talsystem. Diplomarbeit Meteorologisches Institut, Universität Karlsruhe.
- LfU (1994): Solar- und Windenergieatlas Baden-Württemberg. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- LfU (1996): Windstatistiken in Baden-Württemberg. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Moussiopoulos, N. (1989): Mathematische Modellierung mesoskaliger Ausbreitung in der Atmosphäre (VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 15, Nr. 64).
- Robel, F., Hoffmann, U., Riekert, A. (1978): Daten und Aussagen zum Stadtklima von Stuttgart auf der Grundlage der Infrarot-Thermographie. Beiträge zur Stadtentwicklung Nr. 15, Landeshauptstadt Stuttgart.
- Schädler, G., Lohmeyer, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. In: Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3 167-171.

Schriftenreihe Raumordnung (1979): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung. Schriftenreihe "Raumordnung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Nr 06.032.

A N H A N G A : Beschreibung des Kaltluftabflußmodells KALM

A1. Allgemeines

Unter bestimmten meteorologischen Bedingungen können sich nachts über geneigtem Gelände sogenannte Kaltluftabflüsse bilden; dabei fließt in Bodennähe (bzw. bei Wald über dem Kronenraum) gebildete kalte Luft hangabwärts. Die Dicke solcher Kaltluftschichten beträgt i.a. zwischen 1 m und 50 m, in sog. Kaltluftseen, in denen sich die Kaltluft staut, kann die Schicht auf über 100 m anwachsen. Die typische Fließgeschwindigkeit der Kaltluft liegt in der Größenordnung von 1 m/s bis 3 m/s. Die folgenden beiden meteorologischen Bedingungen müssen für die Ausbildung von Kaltluftabflüssen erfüllt sein:

- i) wolkenarme Nächte: dadurch kann die Erdoberfläche kräftig auskühlen und die darüberliegende Luft abkühlen
- ii) großräumig windschwache Situation: dadurch kann sich die Tendenz der Kaltluft, an geneigten Flächen abzufließen, gegenüber dem Umgebungswind durchsetzen.

Die Produktionsrate von Kaltluft hängt stark vom Untergrund ab: Freilandflächen weisen die höchste Kaltluftproduktion auf (etwa $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$). Die Literaturwerte für Wald streuen zwischen $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ und etwa $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Besiedelte Gebiete verhalten sich bezüglich der Kaltluftproduktion neutral bis kontraproduktiv (städtische Wärmeinsel).

Unter Umweltgesichtspunkten hat Kaltluft eine doppelte Bedeutung: zum einen kann Kaltluft nachts für Belüftung und damit Abkühlung thermisch belasteter Siedlungsgebiete sorgen. Zum anderen sorgt Kaltluft, die aus Reinluftgebieten kommt, für die nächtliche Belüftung schadstoffbelasteter Siedlungsräume. Kaltluft kann aber auch auf ihrem Weg Luftbeimengungen (Autoabgase, Geruchsstoffe etc.) aufnehmen und transportieren. Nimmt sie zu viele Schadstoffe auf, kann ihr Zufluß von Schaden sein. Vom Standpunkt der Regional- und Stadtplanung her ist es daher von großer Bedeutung, eventuelle Kaltluftabflüsse in einem Gebiet qualitativ und auch quantitativ bestimmen zu können. Als Hilfsmittel dazu ist das im folgenden beschriebene Modell erstellt worden.

A2. Modellbeschreibung

Das Modell verwendet die sog. Flachwassergleichungen, eine vertikal integrierte Form der Grundgleichungen der Strömungsmechanik. Durch diese Vereinfachung ist es möglich, das Modell mit relativ geringem Rechenzeit- und Speicherbedarf auch auf Personal Computern zu betreiben.

Die Bezeichnung "Flachwassergleichungen" hat sich eingebürgert; die Gleichungen eignen sich jedoch genauso zur Beschreibung der Strömung jedes relativ zur Umgebung schweren Fluids, z.B. von Wasser oder von kalter Luft. Eine solche Strömung hat folgende Charakteristika:

- Abfluß über geneigtem Gelände entsprechend der Hangneigung
- Weiterbewegen der "Kaltluftfront" auch über ebenem Gelände
- Auffüllen von Becken (Kaltluftseen)
- Einfluß der Schichtdicke auf Strömungsrichtung und -geschwindigkeit (Druckgradienten).

Angetrieben wird die Strömung durch die auftriebskorrigierte Erdbeschleunigung. Innerhalb der Flachwassergleichungen werden folgende Einflüsse auf die Strömung berücksichtigt:

- Modifikation der lokalen Strömungsverhältnisse durch die Strömungsverhältnisse in der Umgebung (Advektion)
- Reibung zwischen Erdoberfläche und Luft: diese Reibung variiert mit der Landnutzung (Freiland: niedrige Reibung, Bebauung: hohe Reibung)
- Beschleunigung oder Abbremsen der Strömung durch Änderung der Geländehöhe und/oder der Kaltluftschichtdicke
- von der Landnutzung abhängige Kaltluftproduktion.

Das Lösungsverfahren ist ein Differenzenverfahren mit variabler Gitterpunktzahl und Gitterweite, d.h. Topographie und Landnutzung müssen an den einzelnen Gitterpunkten digitalisiert vorliegen; es wird ein versetztes Gitter verwendet. Um großskalige Einflüsse (z.B. Flußtäler) bei

gleichzeitiger hoher Auflösung im interessierenden Gebiet zu berücksichtigen, kann das Modell auf einem geschachtelten Gitter ("Nesting") betrieben werden.

Falls keine Kaltluftseebildung auftritt, wird die Rechnung nach etwa 1 h simulierter Zeit stationär, d.h. die berechneten Werte ändern sich dann nicht mehr. Im allgemeinen Fall ist es sinnvoll, etwa 3 h bis 6 h zu simulieren; dies entspricht den Verhältnissen in der Natur. Für eine solche Rechnung benötigt das Modell bei etwa 40 x 40 Gitterpunkten weniger als 5 Minuten Rechenzeit auf einem 486er PC.

A3. Eingabedaten und Ergebnisse des Modells

Vorausgesetzt wird die in Abschnitt A1 genannte für Kaltluftabflüsse optimale Situation, d.h. eine klare und windstille Nacht. Das Modell berechnet die zeitliche Entwicklung der Kaltluftströmung, ausgehend vom Ruhezustand (keine Strömung) bei gegebener zeitlich konstanter Kaltluftproduktionsrate. Diese, ebenso wie die Reibungskoeffizienten, werden über die Art der Landnutzung gesteuert. Zur Zeit werden 6 Landnutzungsklassen berücksichtigt: dichte Bebauung, lockere Bebauung, Wald, Freiland, Wasser und Verkehrsflächen (Straßen, Bahn). Für die Kaltluftproduktionsraten, Reibungskoeffizienten und Nullpunktverschiebungen sind Standardwerte vorgesehen, welche aber bei Bedarf geändert werden können. Weiterhin benötigt das Modell die Topographie in digitalisierter Form. Die Skala des Modells ist beliebig (i.a. etwa 10 km × 10 km), die Auflösung liegt zwischen etwa 20 m und 200 m

Berechnet wird die Dicke der Kaltluftschicht sowie die beiden horizontalen Geschwindigkeitskomponenten (West-Ost und Süd-Nord), gemittelt über die Dicke der Kaltluftschicht. Aus diesen Größen kann dann auch der Kaltluftvolumenstrom berechnet werden.

Zur Weiterverarbeitung der Modellergebnisse stehen Postprozessoren u.a. zur graphischen Darstellung der berechneten Felder (Vektor- und Rasterdarstellung), zur Berechnung und Darstellung von Kaltluftvolumenströmen durch wählbare Schichten, zur Visualisierung der Strömung durch Vorwärts- und Rückwärtstrajektorien und zur Darstellung von Zeitreihen an ausgewählten Punkten zur Verfügung.

Durch Kopplung der von KALM berechneten Windfelder mit Eulerschen oder Lagrangeschen Ausbreitungsmodellen, wie z.B. LASAT, kann die Schadstoffausbreitung in Kaltluftabflüssen berechnet und z.B. in Immissionsstatistiken eingearbeitet werden.

**A N H A N G B : Kurzbeschreibung des diagnostischen Windfeldmodells
DIWIMO**

B1. Einleitung

Für viele umweltrelevante Fragestellungen ist die Kenntnis des dreidimensionalen Windfeldes (zwei horizontale, eine vertikale Windgeschwindigkeitskomponente), vor allem in Bodennähe, von Bedeutung. Das Vorhandensein von Tälern, Kuppen und anderen orographischen Charakteristiken ebenso wie unterschiedliche Landnutzungen haben deutliche Auswirkungen auf das bodennahe Windfeld und führen zu horizontalen und vertikalen Inhomogenitäten, welche sich zum Beispiel in kleinräumigen Variationen der Windstatistik und deutlichen Abweichungen der Schadstoffkonzentrationen vom horizontal homogenen Fall (z.B. Gauß'sche Ausbreitungsrechnung) äußern. Um den Orographieeinfluß in der Fläche und an einzelnen Punkten quantitativ zu erfassen, bieten sich (neben dem Ignorieren des Einflusses) folgende Möglichkeiten an:

- i) Interpolation von nahegelegenen Messungen
- ii) Simulation mit einem diagnostischen Windfeldmodell
- iii) Durchführung von Windkanalversuchen
- iv) Simulation mit einem prognostischen Windfeldmodell
- v) Aufstellen von Meßmasten

Im Vergleich dieser Verfahren stellt die diagnostische Windfeldmodellierung einen günstigen Kompromiß zwischen Realitätsnähe einerseits und zeitlichem, technischem und finanziellem Aufwand andererseits dar. Das zu diesem Zweck erstellte diagnostische Windfeldmodell DIWIMO soll im folgenden kurz vorgestellt werden.

B2. Modellbeschreibung

Die Grundidee der diagnostischen Windfeldmodellierung ist, aus einem (im Prinzip beliebig vorgebbaren) dreidimensionalen Windfeld ein divergenzarmes Windfeld zu berechnen (Divergenzfreiheit ist mit einem numerischen Modell i.a. nicht zu erreichen). Dazu wird dem Initialwindfeld das Gradientfeld eines Skalars (welcher die Rolle eines ausgleichenden Druckes

spielt) überlagert und die Divergenz des resultierenden Windfeldes minimiert. In der praktischen Durchführung läuft dies auf die Lösung einer Poisson-Gleichung mit gemischten Randbedingungen hinaus. In DIWIMO wird ein geländefolgendes Koordinatensystem verwendet. Der höhere mathematische und programmtechnische Aufwand wird durch die größere Rechengenauigkeit mehr als ausgeglichen.

Die atmosphärische Stabilität kann näherungsweise durch einen Wichtungsfaktor berücksichtigt werden, welcher das Verhältnis von vertikalen zu horizontalen Divergenztermen bestimmt.

Das berechnete Windfeld hat den Charakter einer Potentialströmung; Advektions- und Diffusionseffekte (z.B. auch dynamisch bedingte Strömungsablösungen) werden ebensowenig erfaßt wie thermisch induzierte Strömungen (z.B. Konvektion, Hangwinde, Kaltluftabflüsse).

Das numerische Verfahren ist ein Differenzenverfahren mit einem versetzten äquidistanten horizontalen Gitter, dessen Gitterweiten beliebig und innerhalb gewisser Grenzen unabhängig voneinander gewählt werden können. Das vertikale Gitter ist nichtäquidistant mit höherer Auflösung in Bodennähe. Die vollständige Theorie des Modells ist z.B. in Moussiopoulos (1989) zu finden, wobei in dem von uns erstellten Modell Änderungen vorgenommen wurden.

Das Initialwindfeld kann auf verschiedene Arten vorgegeben werden:

- höhenkonstant
- Potenzprofil in Bodennähe (bis etwa 100 m über Grund)
- empirische Profile der atmosphärischen Grenzschicht zur Berücksichtigung der Coriolis-Drehung des Windes mit der Höhe; dies ist vor allem bei der Erstellung von synthetischen Windrosen, die auf Höhenwindstatistiken basieren, wichtig.

B3. Anwendungsmöglichkeiten des Modells

Das Modell kann u.a. für folgende Fragestellungen eingesetzt werden:

- Bereitstellung von Windfeldern für Euler'sche oder Lagrange'sche Ausbreitungsmodelle; bei Ausbreitungsrechnungen ist es besonders wichtig, mit einem massenerhaltenden Windfeld zu arbeiten.

- Abschätzung der Beeinflussung des Windfeldes durch geplante Baumaßnahmen (Halden, Deponien, Erweiterung von Siedlungsgebieten) bereits im Planungsstadium
- Übertragung von Windstatistiken auf Standorte, an denen keine Windmessungen vorliegen
- Erstellung synthetischer Windstatistiken
- Erstellung von Bodenwindkarten (z.B. für Windenergienutzung)

B4. Vergleich von Modellrechnungen mit Messungen

Abb. B1 zeigt einen Vergleich zwischen Windkanalmessungen und Modellrechnungen mit DIWIMO für den Fall einer Hügelüberströmung. Dargestellt ist die prozentuale Änderung der Windgeschwindigkeit gegenüber einer Referenzgeschwindigkeit entsprechend Windkanalmessungen (**Abb. B1 oben**) und entsprechend Modellrechnungen (**Abb. B1 unten**).

B5. Typische Zahlenwerte

Die folgende Tabelle listet einige für das Modell typische Zahlenwerte auf.

Anzahl Gitterpunkte x-,y-,z-Richtung	41 x 41 x 16
horizontale Maschenweite	50 m
vertikale Auflösung	20 m - 100 m
Höhe des Modellgebietes (Mittel über Grund)	500 m - 1000 m
Wichtungsfaktor	0.1
Abbruchkriterium $\Delta u, \Delta v$	0.01 m/s
Abbruchkriterium Δw	0.001 m/s
relativer Fehler der integralen Massenbilanz	1 %
Rechenzeit auf 486er PC	20 min

A N H A N G C : Weitere graphische Darstellungen zur Kaltluft

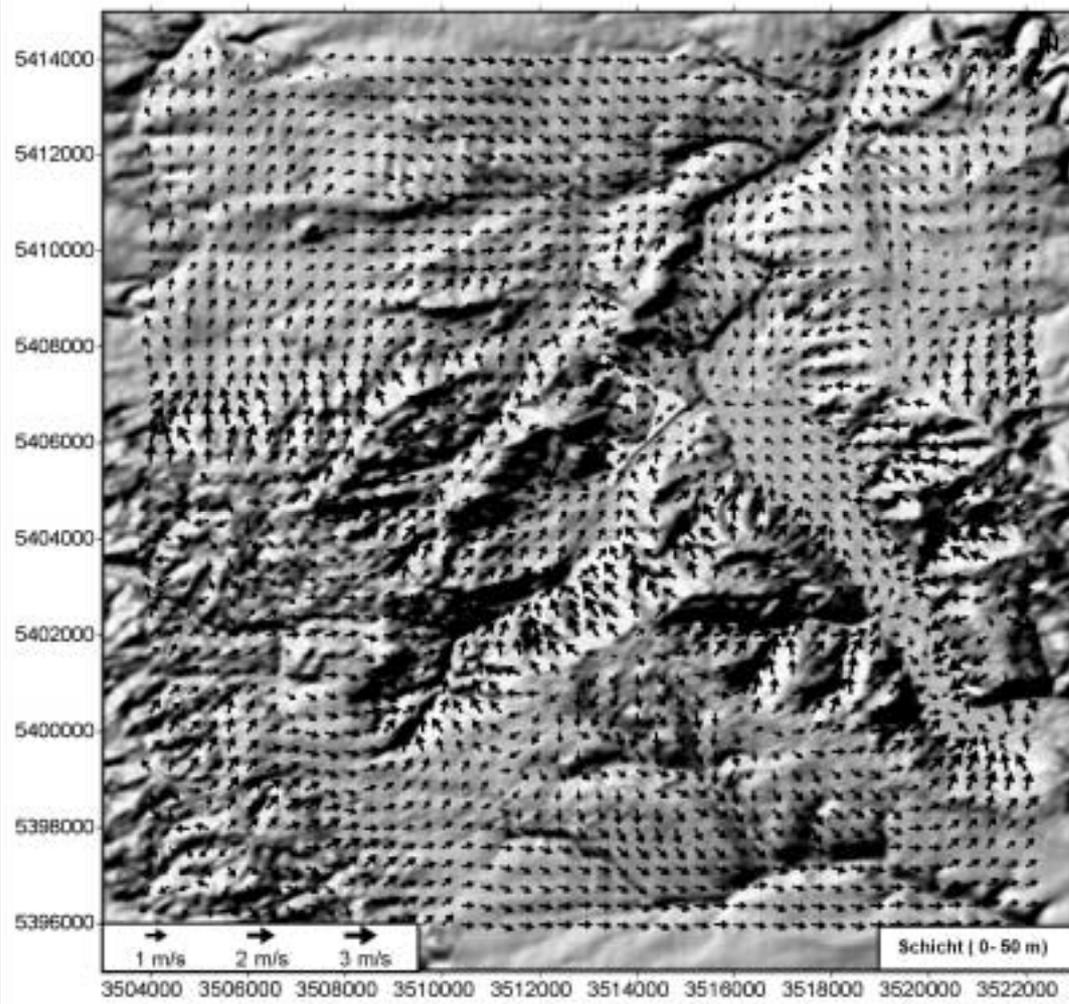


Abb. C1: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gesamtgebiet
Schicht 0 m - 50 m

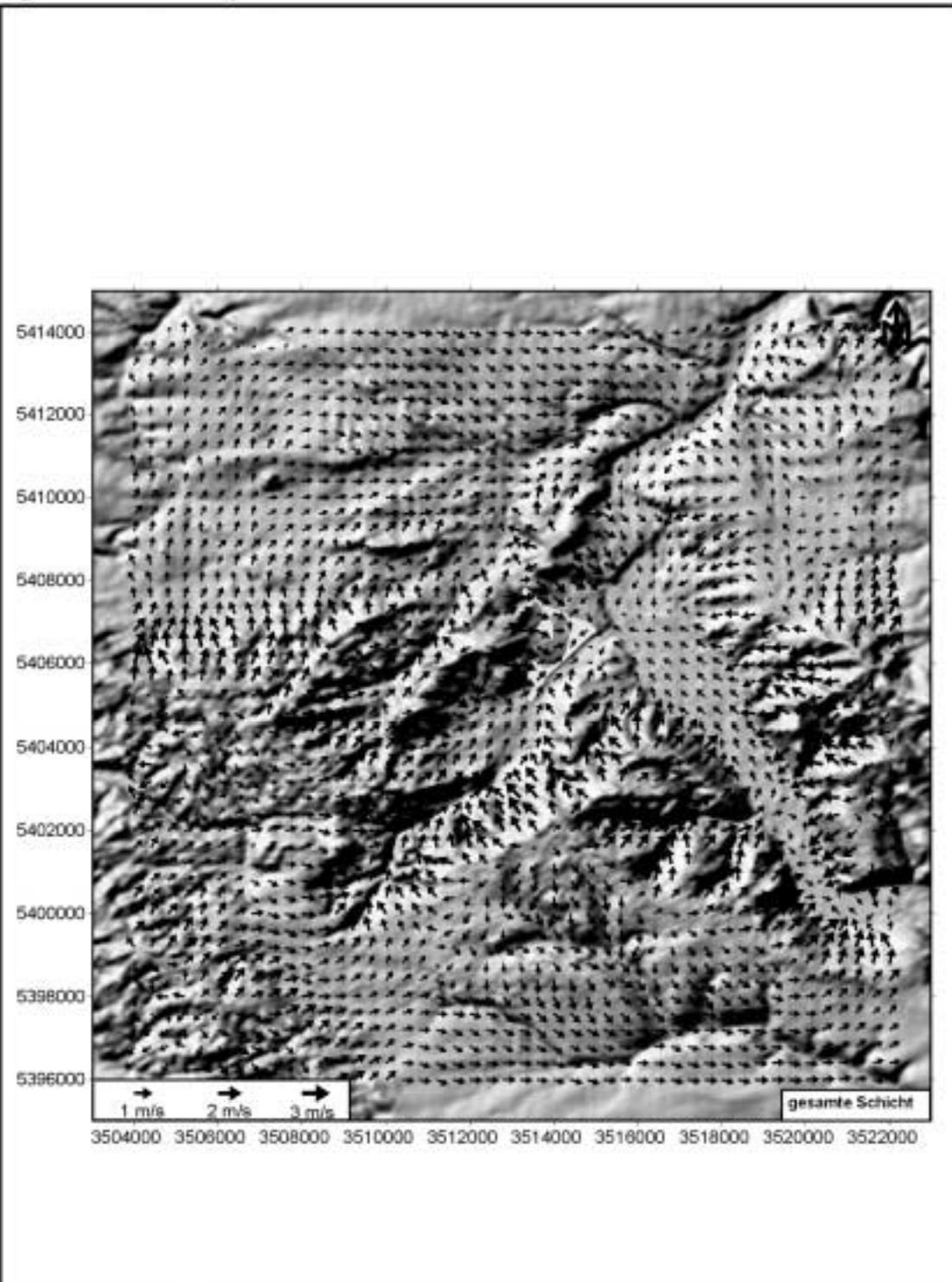


Abb. C.2: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gesamtgebiet, gesamte Kaltluftschicht

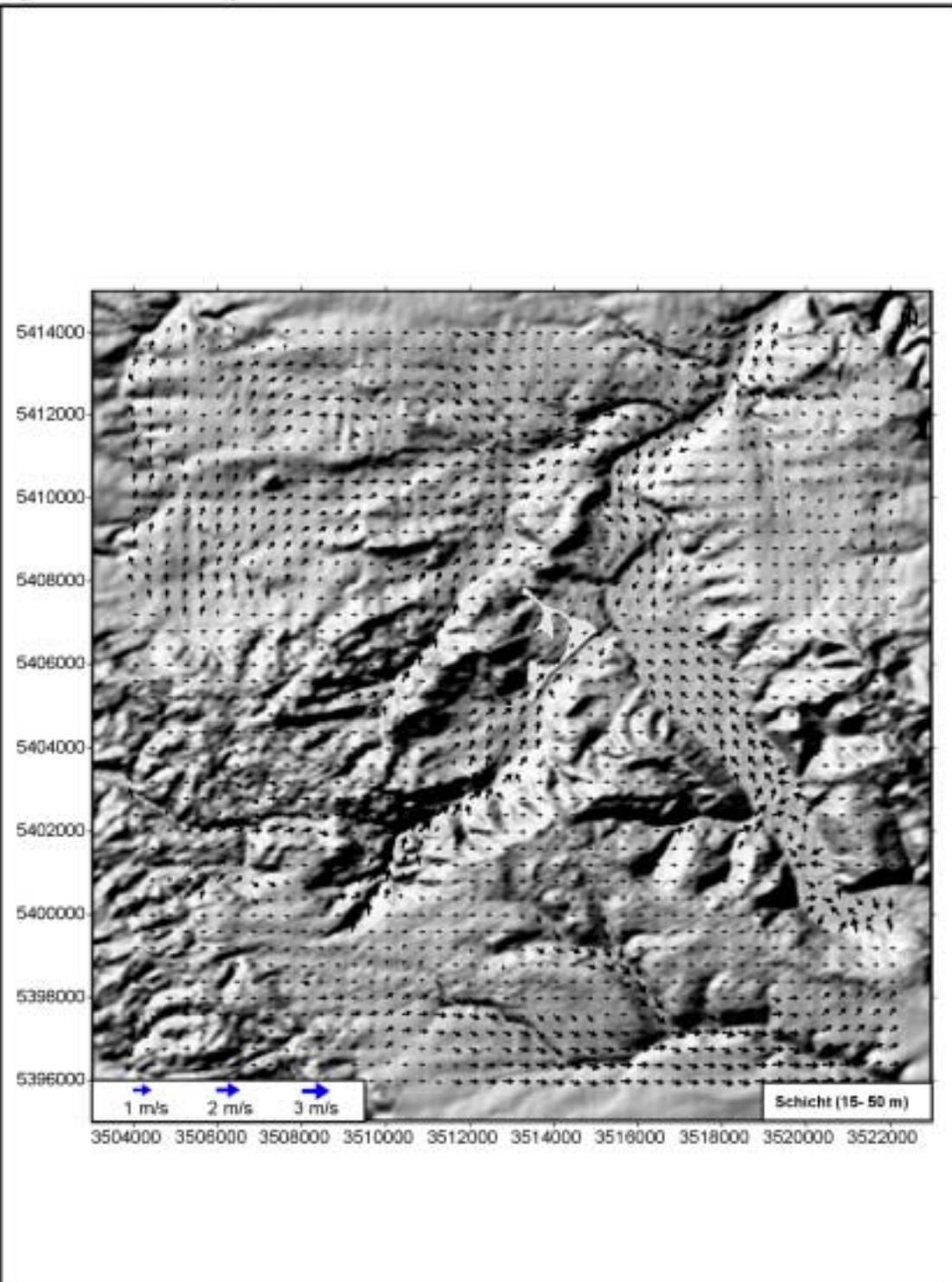


Abb. C3: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Gesamtgebiet, Schicht 15 m - 50 m

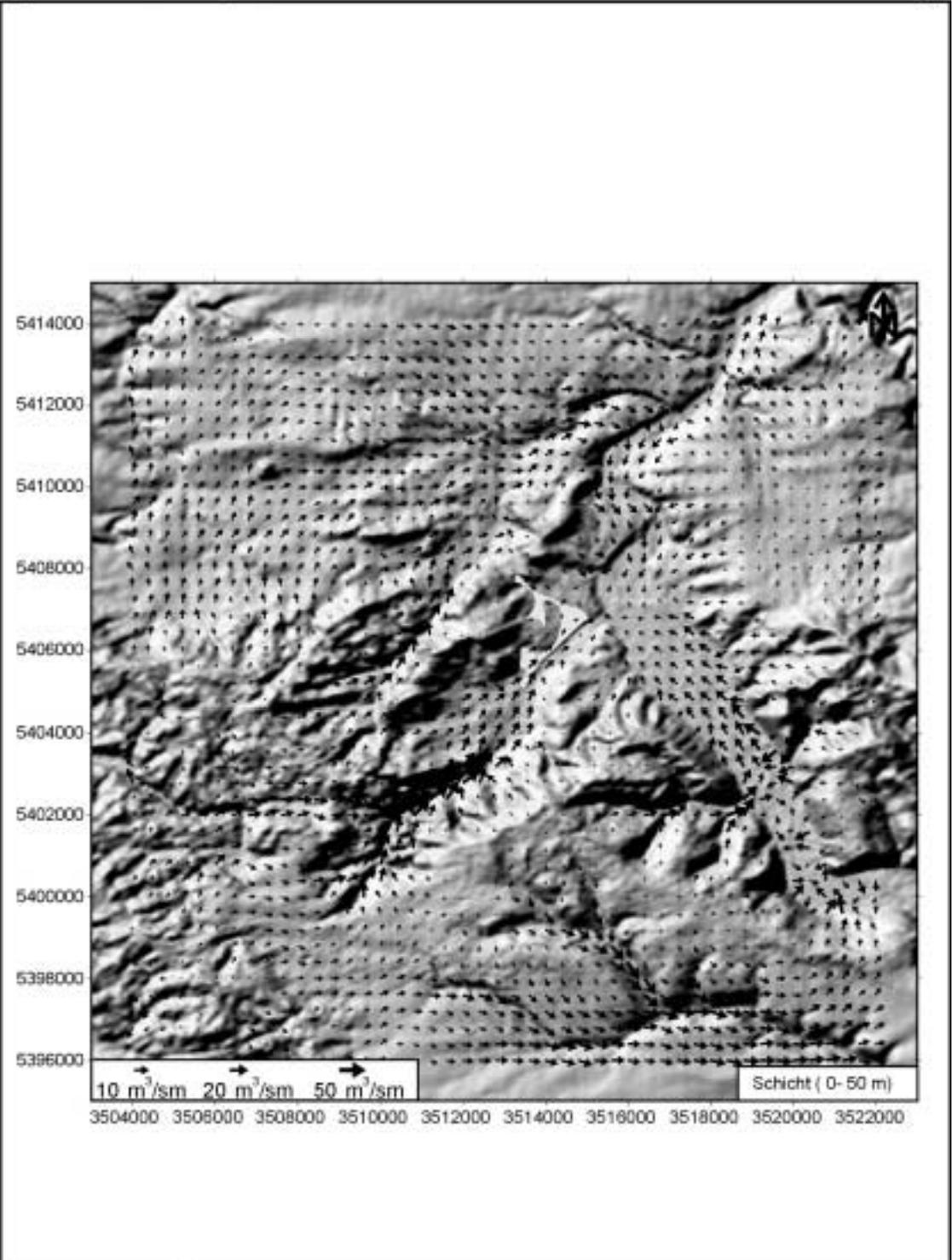


Abb. C4: Volumenstromdichte im Gesamtgebiet,
Schicht 0 m - 50 m

Durch Bebauung reduzierte Volumenstromdichten im Stadtgebiet von Stuttgart

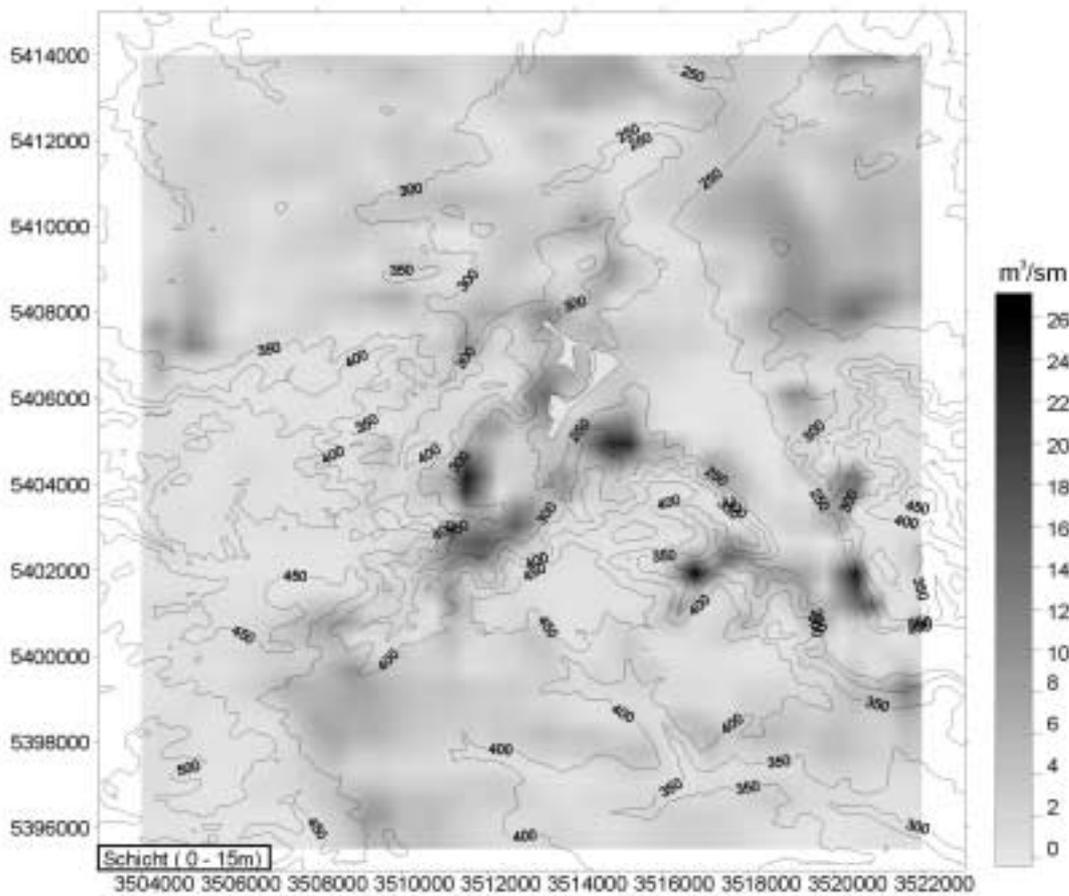


Abb. C5: Differenz der Volumenstromdichte im Gesamtgebiet
(ohne Bebauung - derzeitige Bebauung),
Schicht 0 m - 15 m

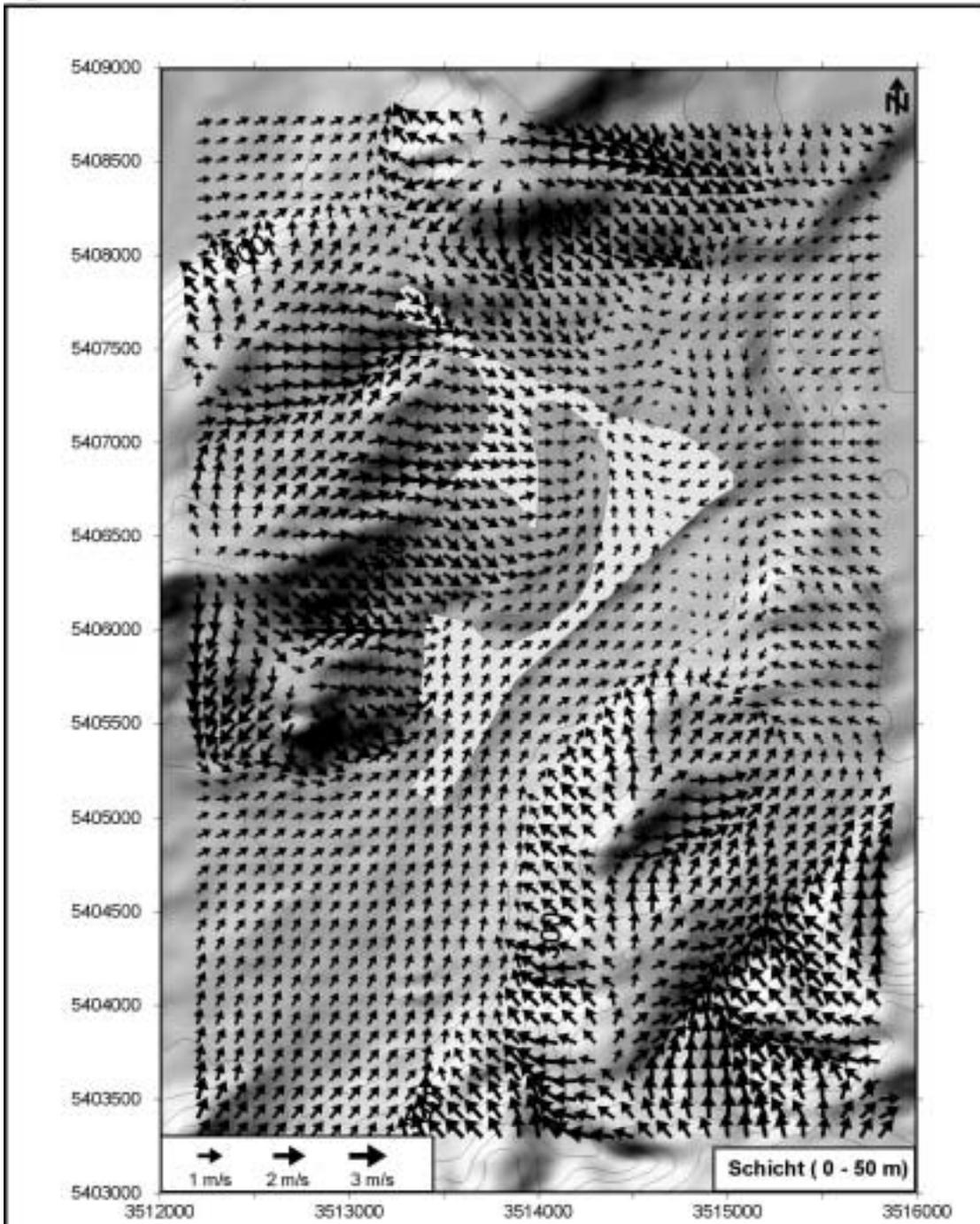


Abb. C6: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Innenstadtbereich, Schicht 0 m - 50 m

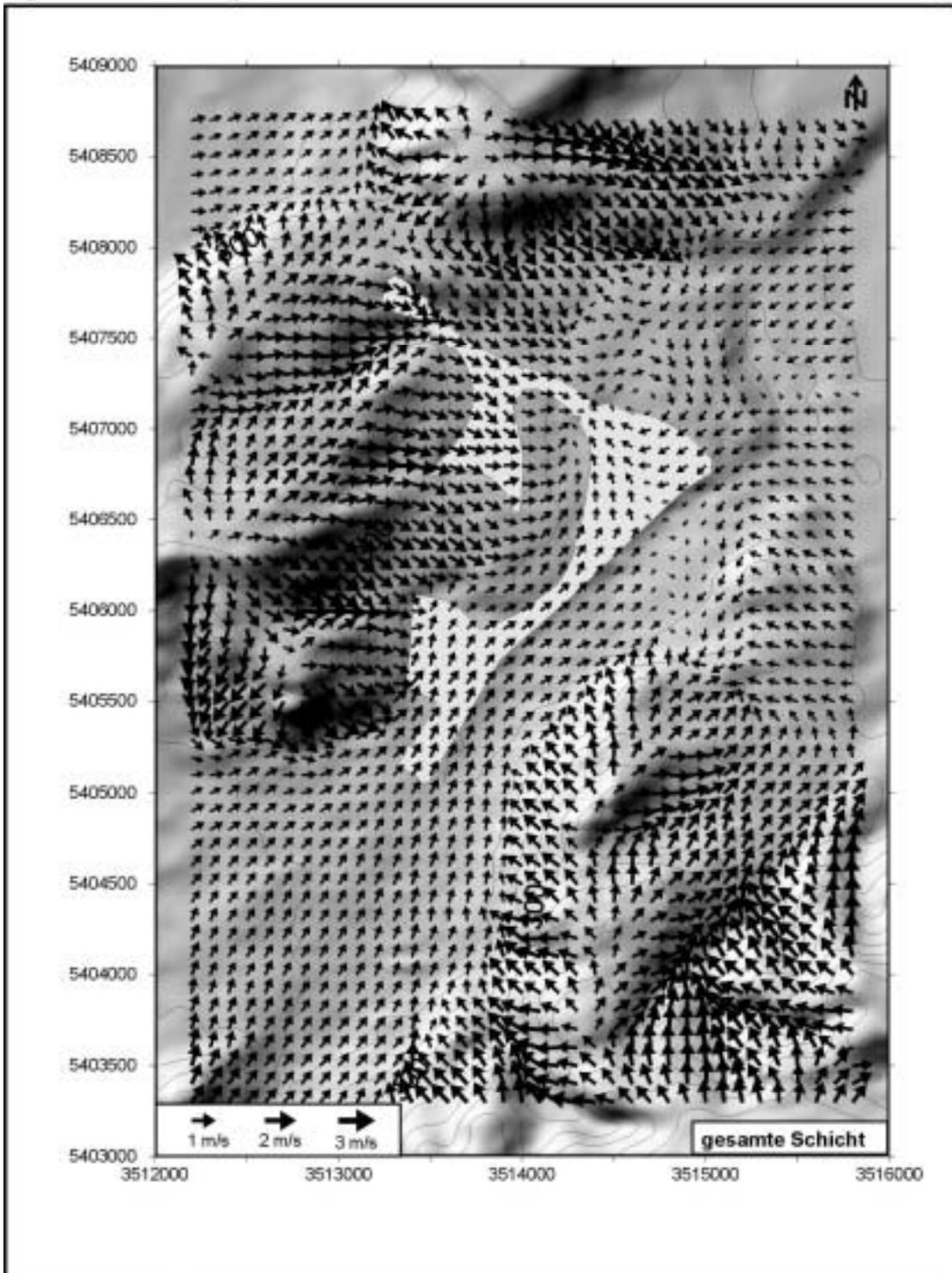


Abb. C7: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Innenstadtbereich, gesamte Kaltluftschicht

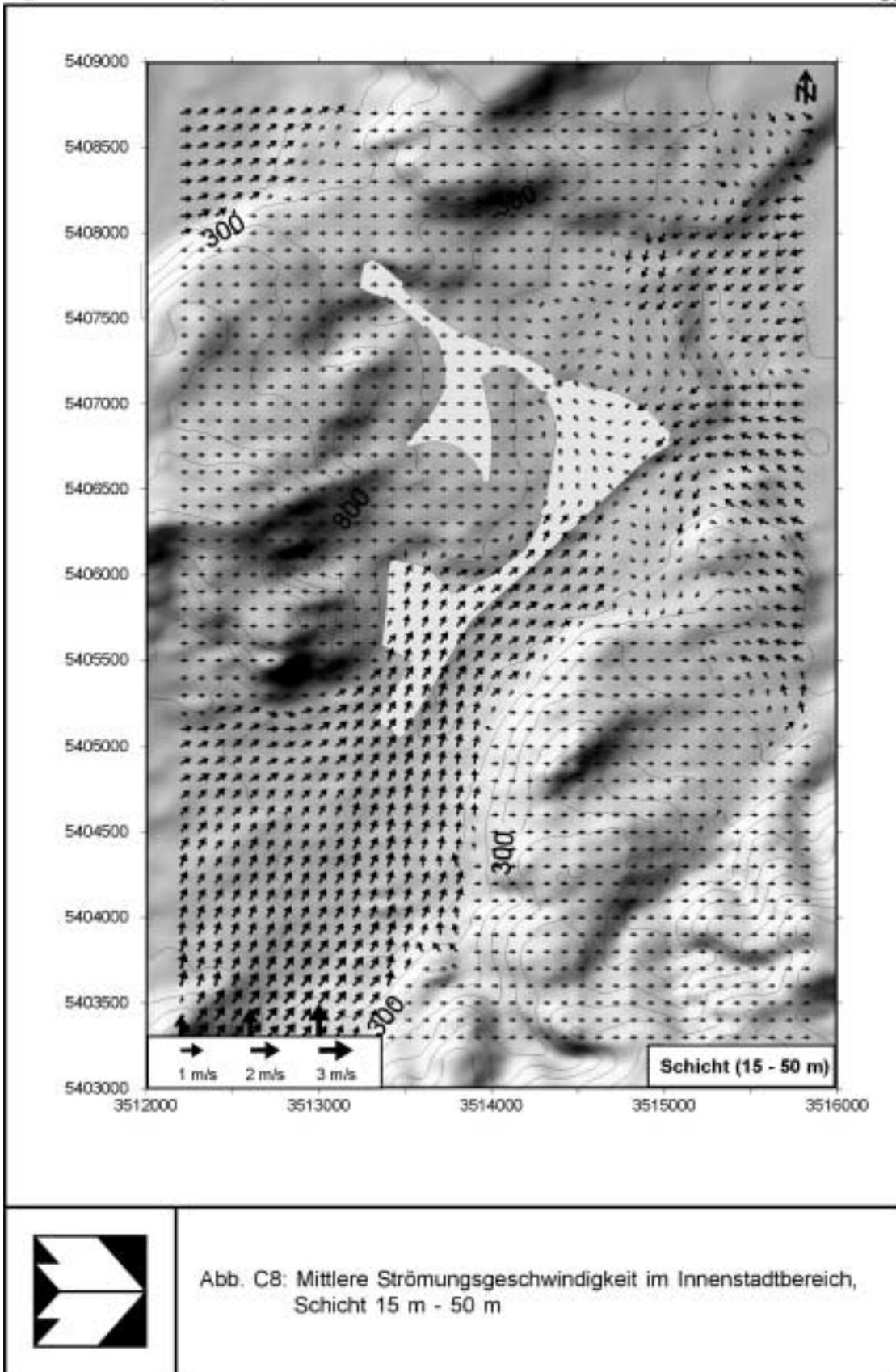


Abb. C8: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Innenstadtbereich, Schicht 15 m - 50 m

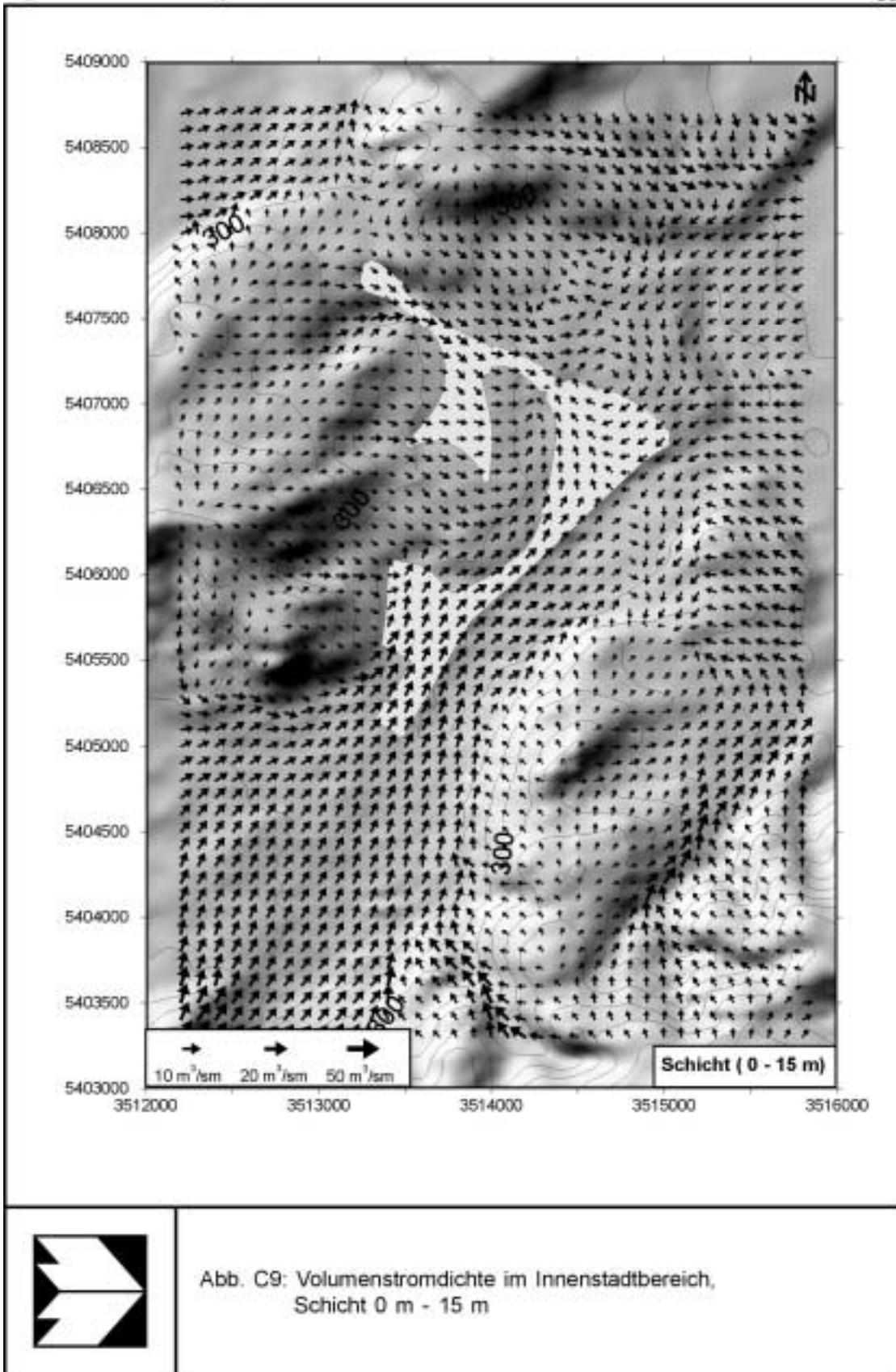


Abb. C9: Volumenströmdichte im Innenstadtbereich,
Schicht 0 m - 15 m

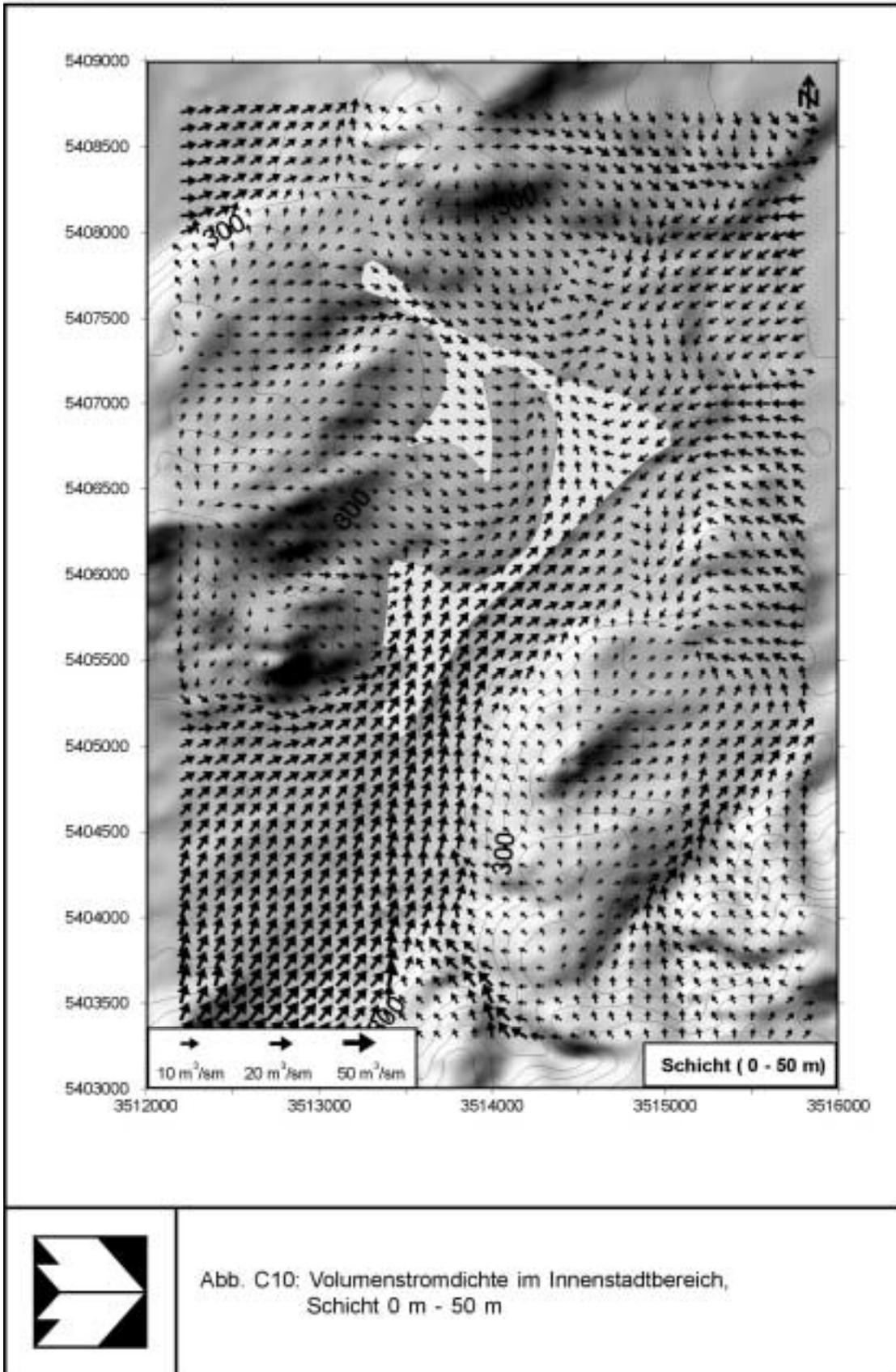


Abb. C10: Volumenstromdichte im Innenstadtbereich,
Schicht 0 m - 50 m

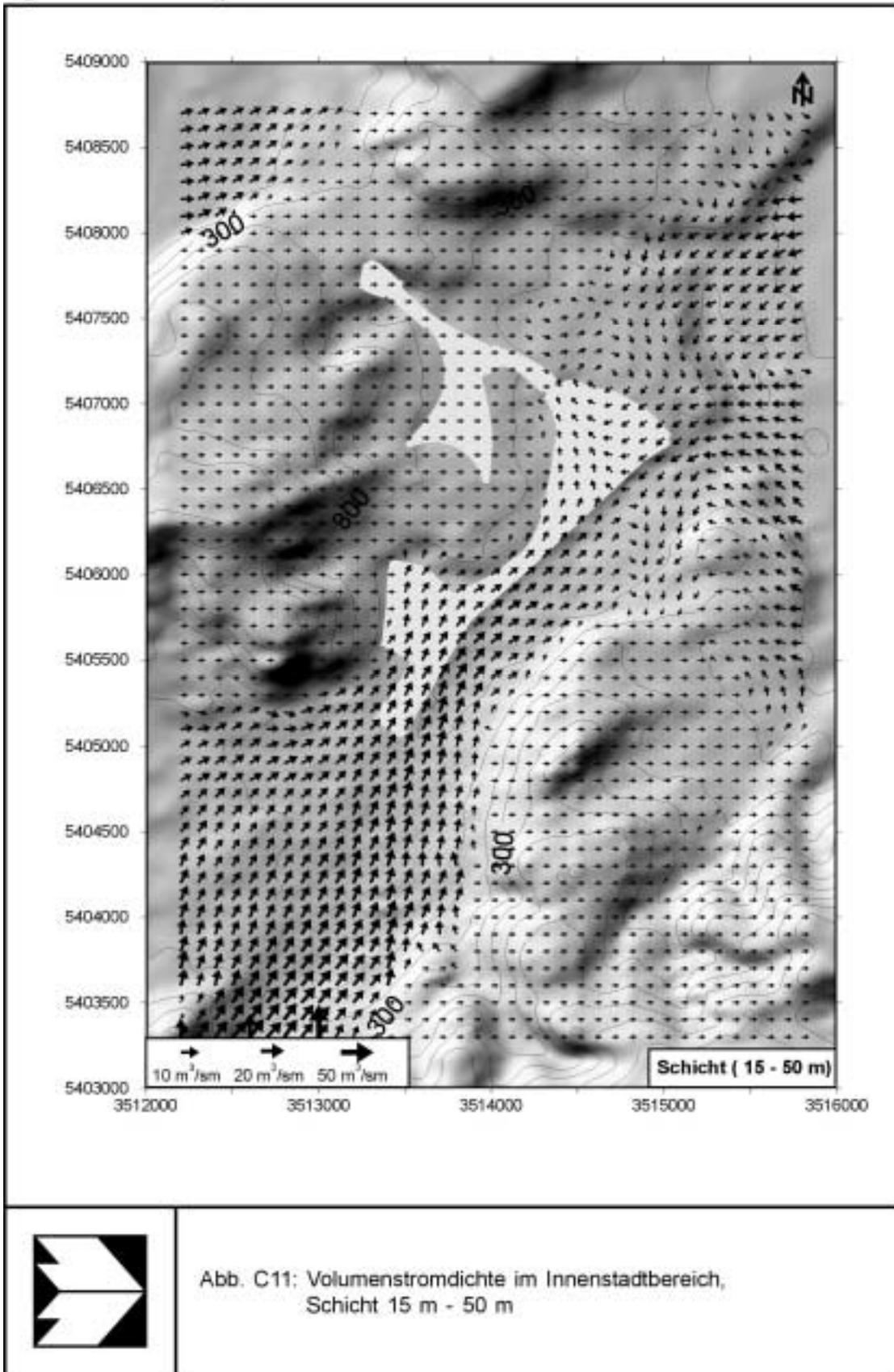


Abb. C11: Volumenstromdichte im Innenstadtbereich,
Schicht 15 m - 50 m

**A N H A N G D : BODENNAHE WINDVERTEILUNGEN IM GESAMTGEBIET
UND IM INNENSTADTBEREICH FÜR HÖHENWIND AUS
NORD / NORDOST / SÜDOST / SÜD / WEST**

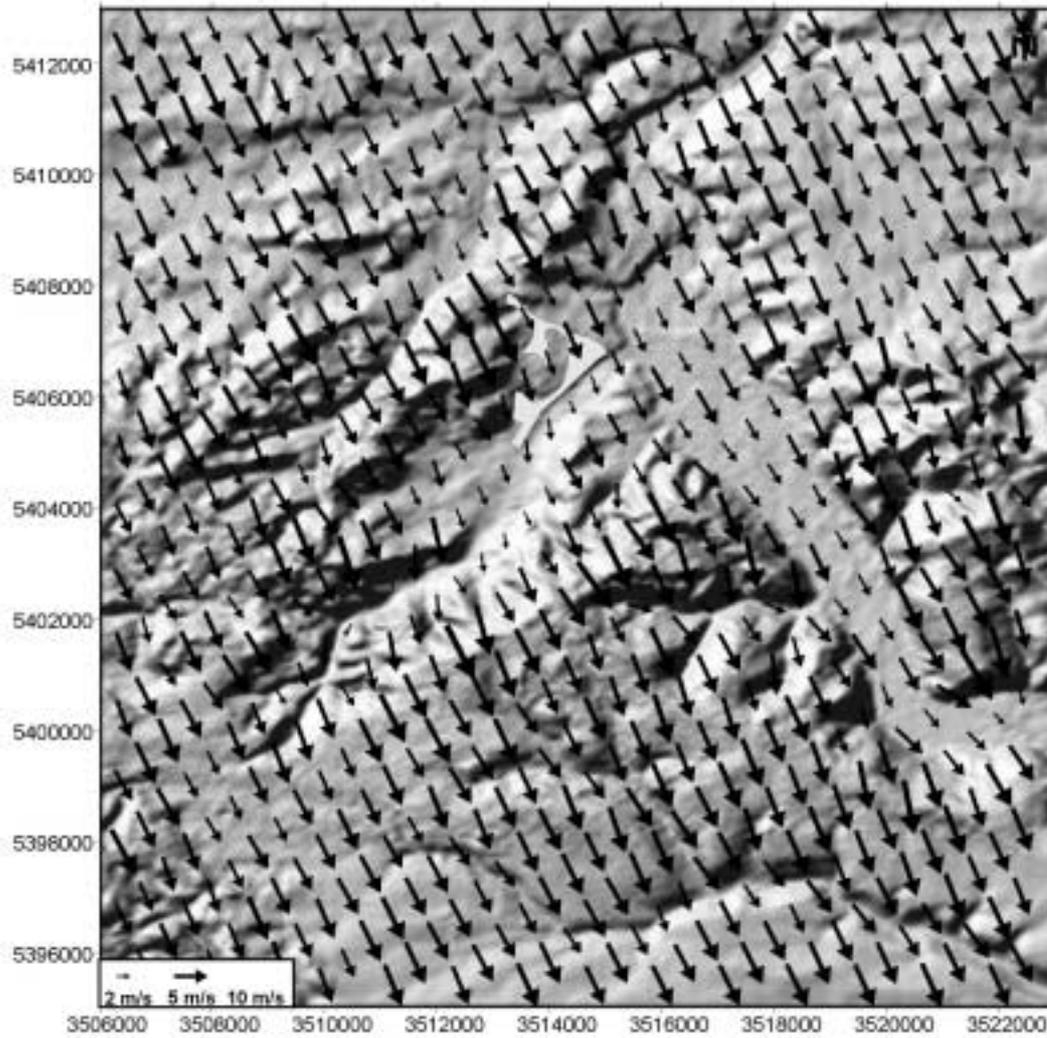


Abb. D1: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Nord

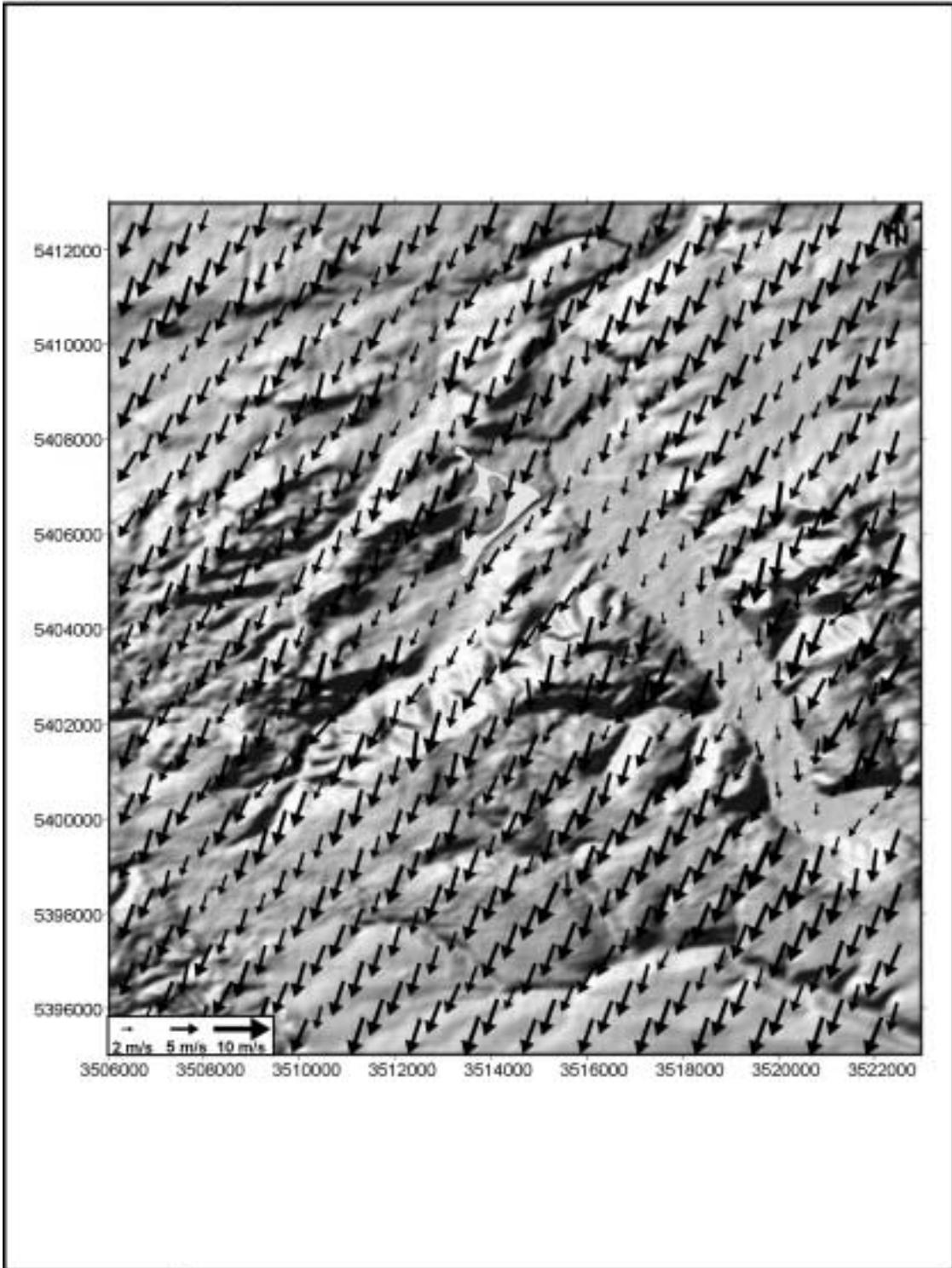


Abb. D2: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Nordost

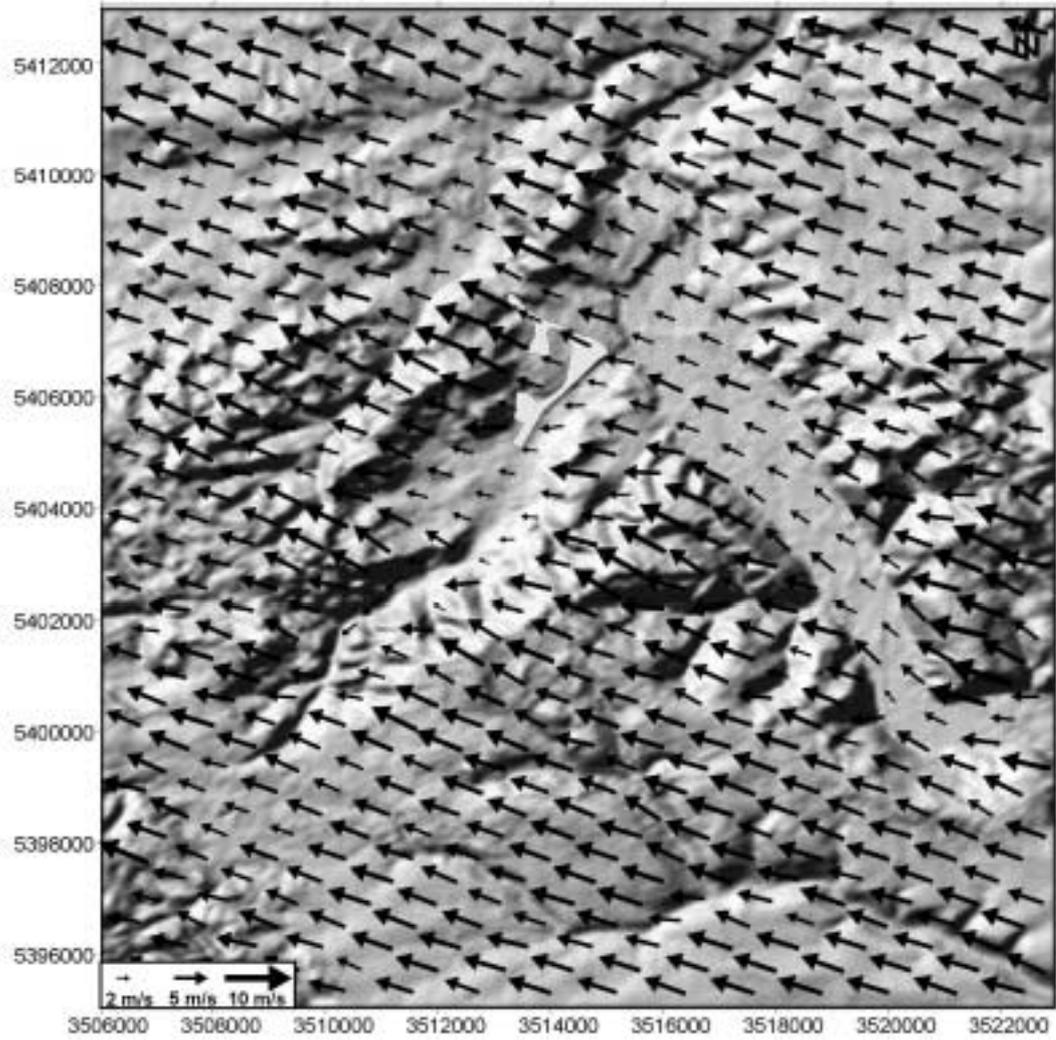


Abb. D3: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Südost

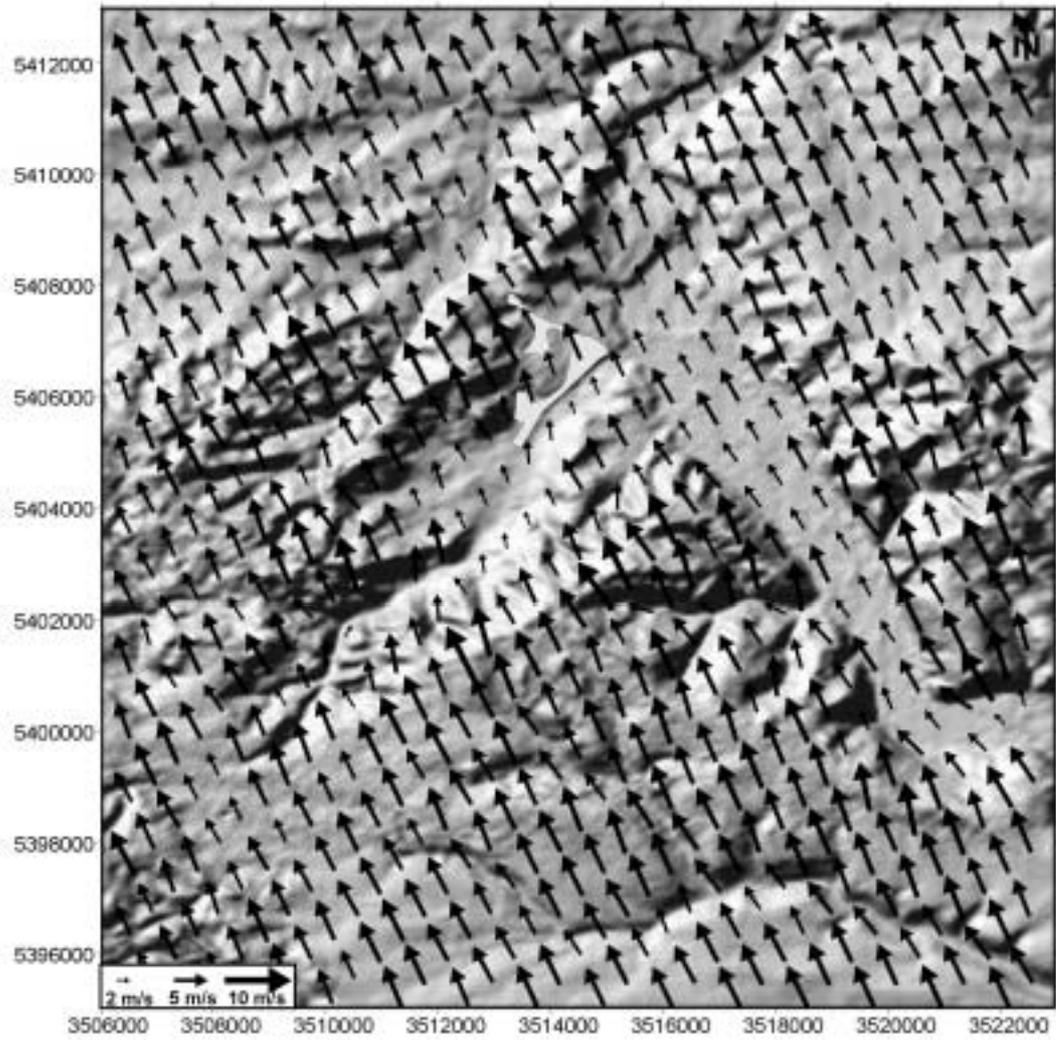


Abb. D4: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Süd

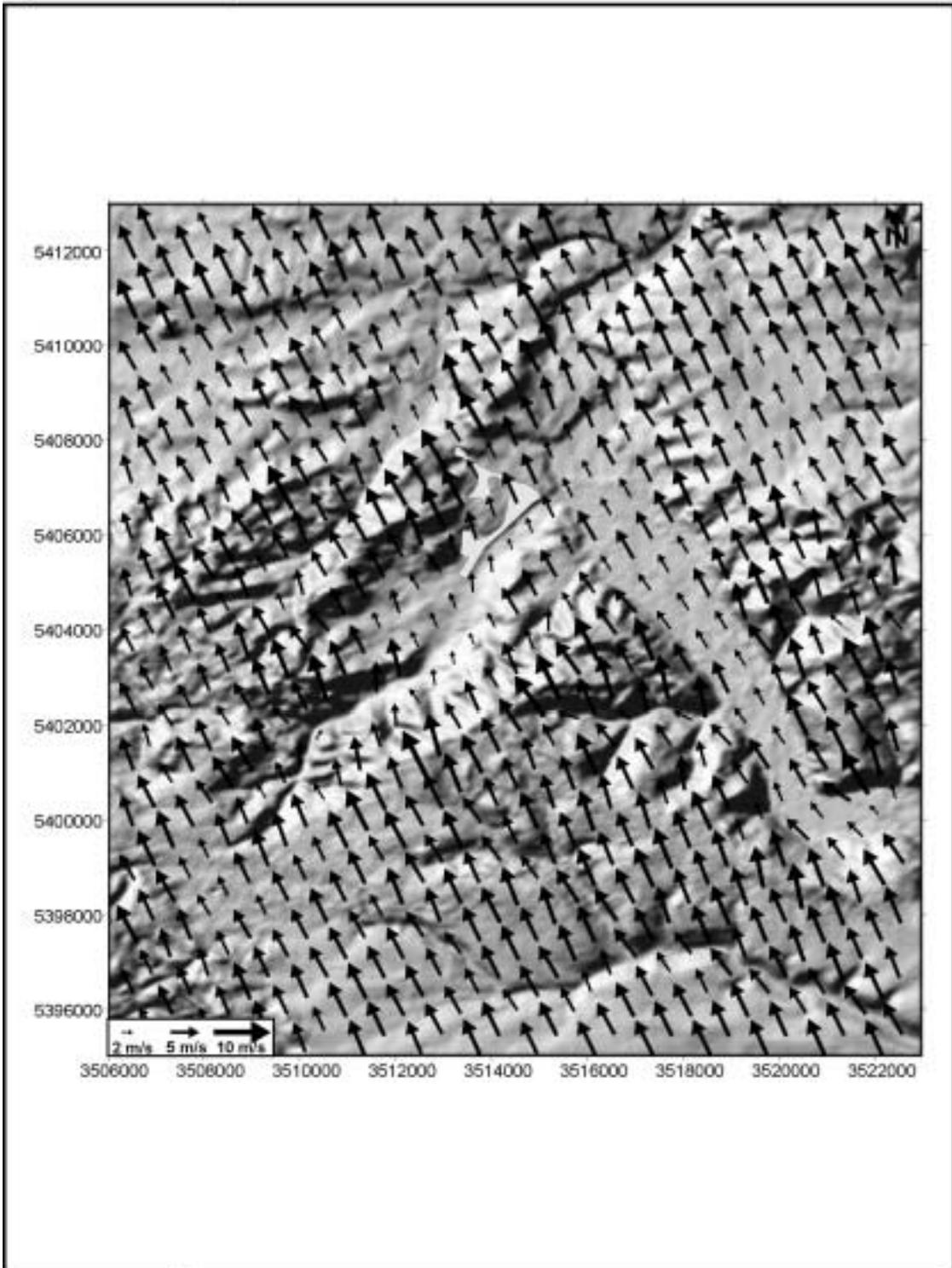


Abb. D4: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus Süd

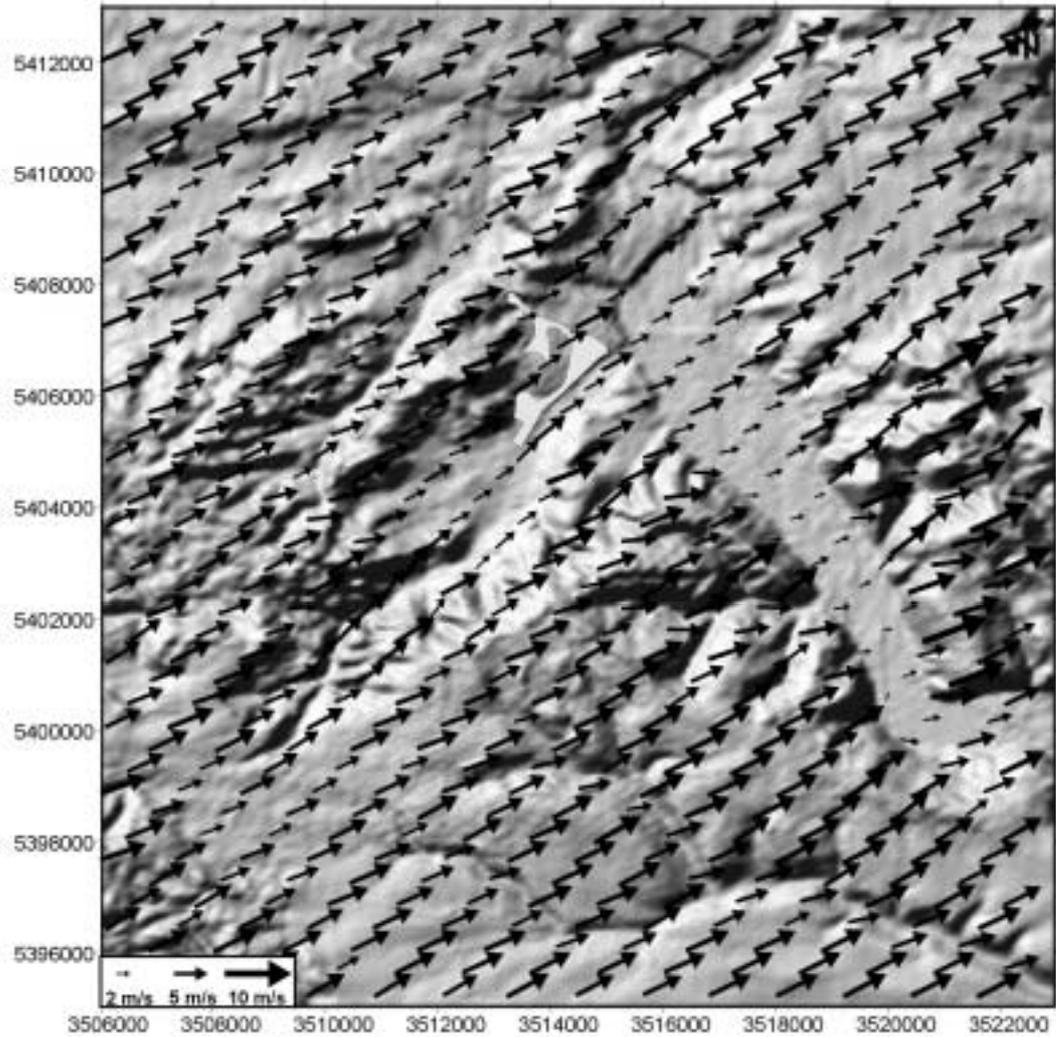


Abb. D5: Bodennahe Windverteilung im Gesamtgebiet bei Höhenwind aus West

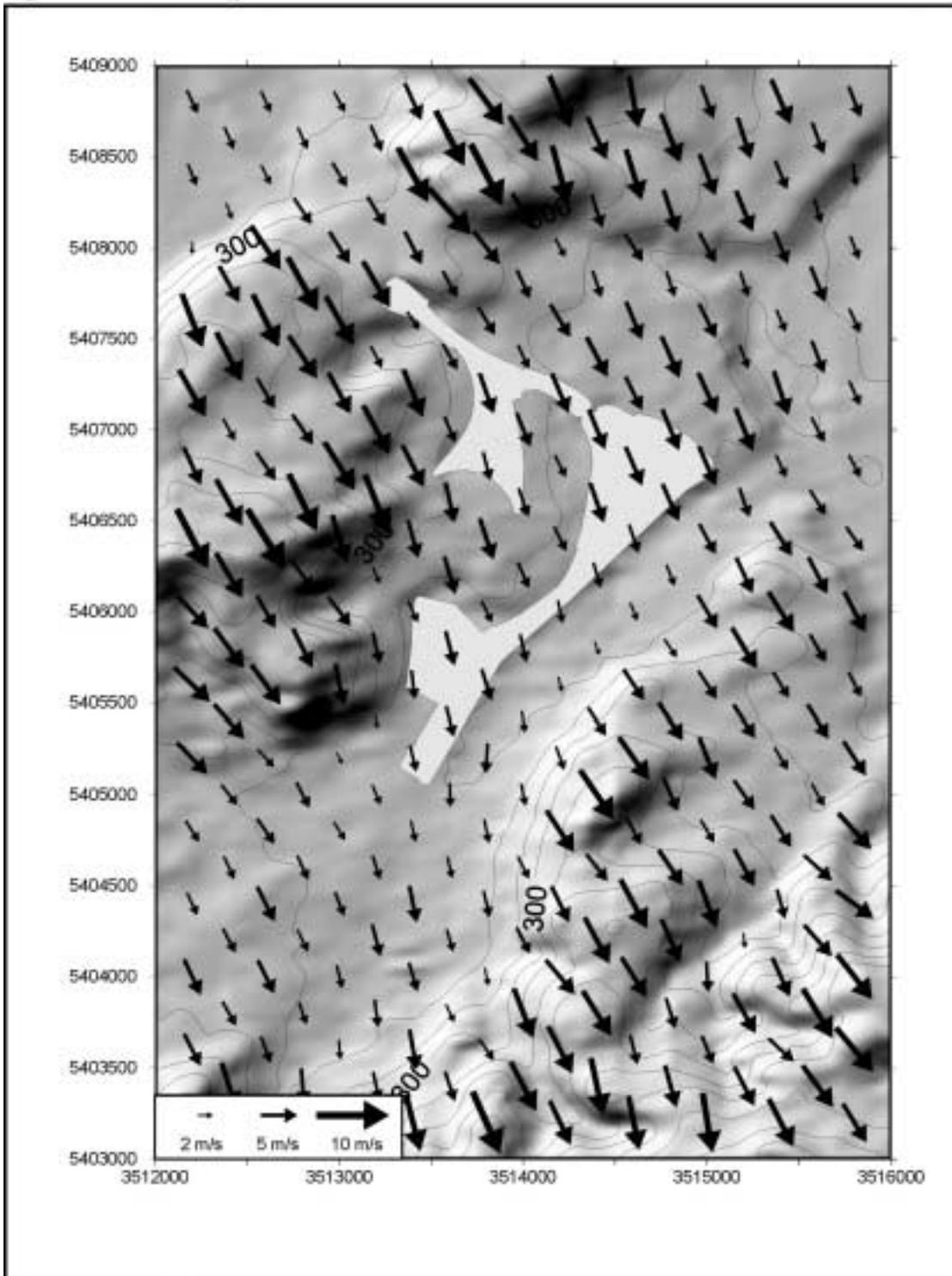


Abb. D6: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Nord

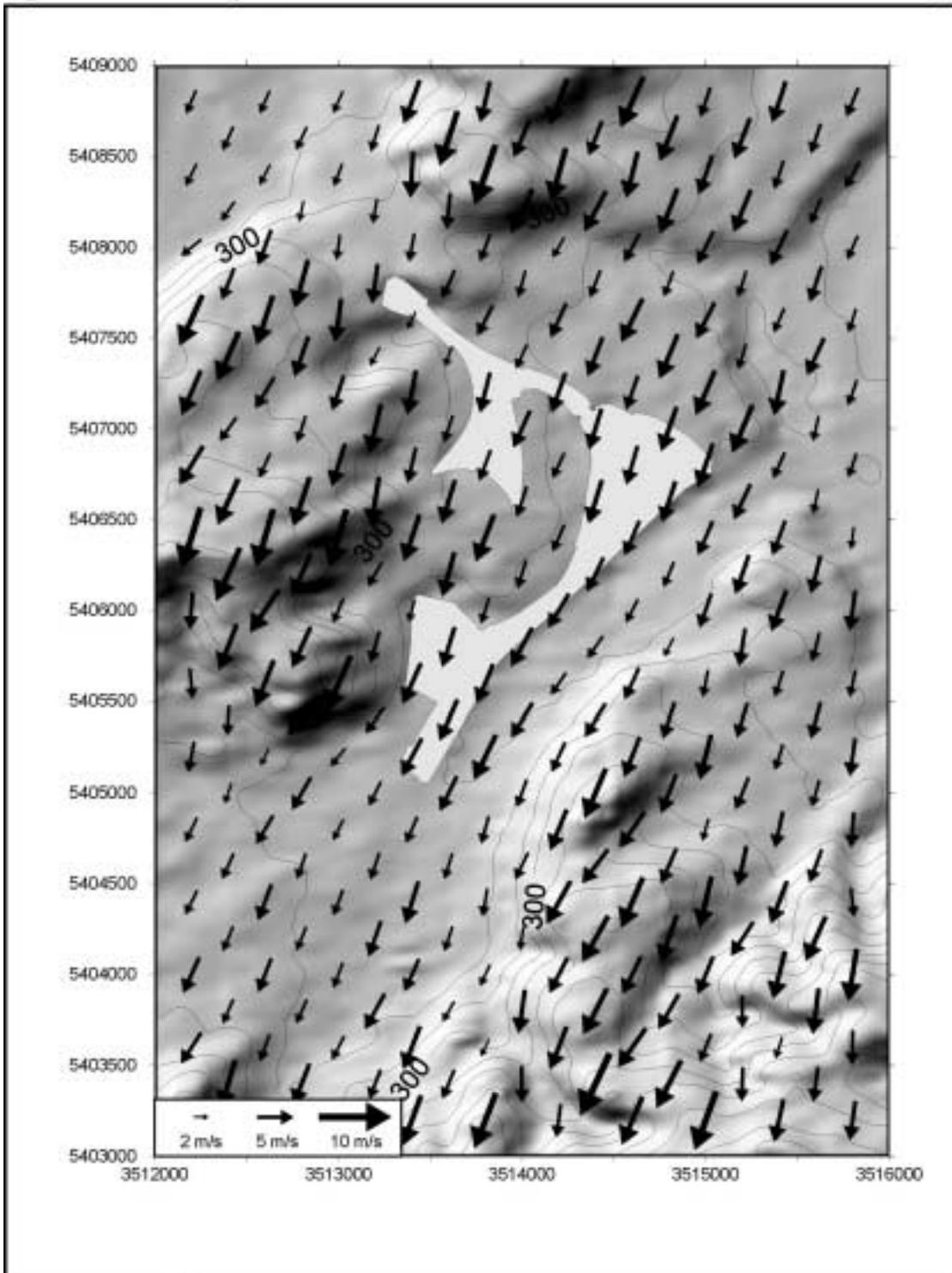


Abb. D7: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Nordost

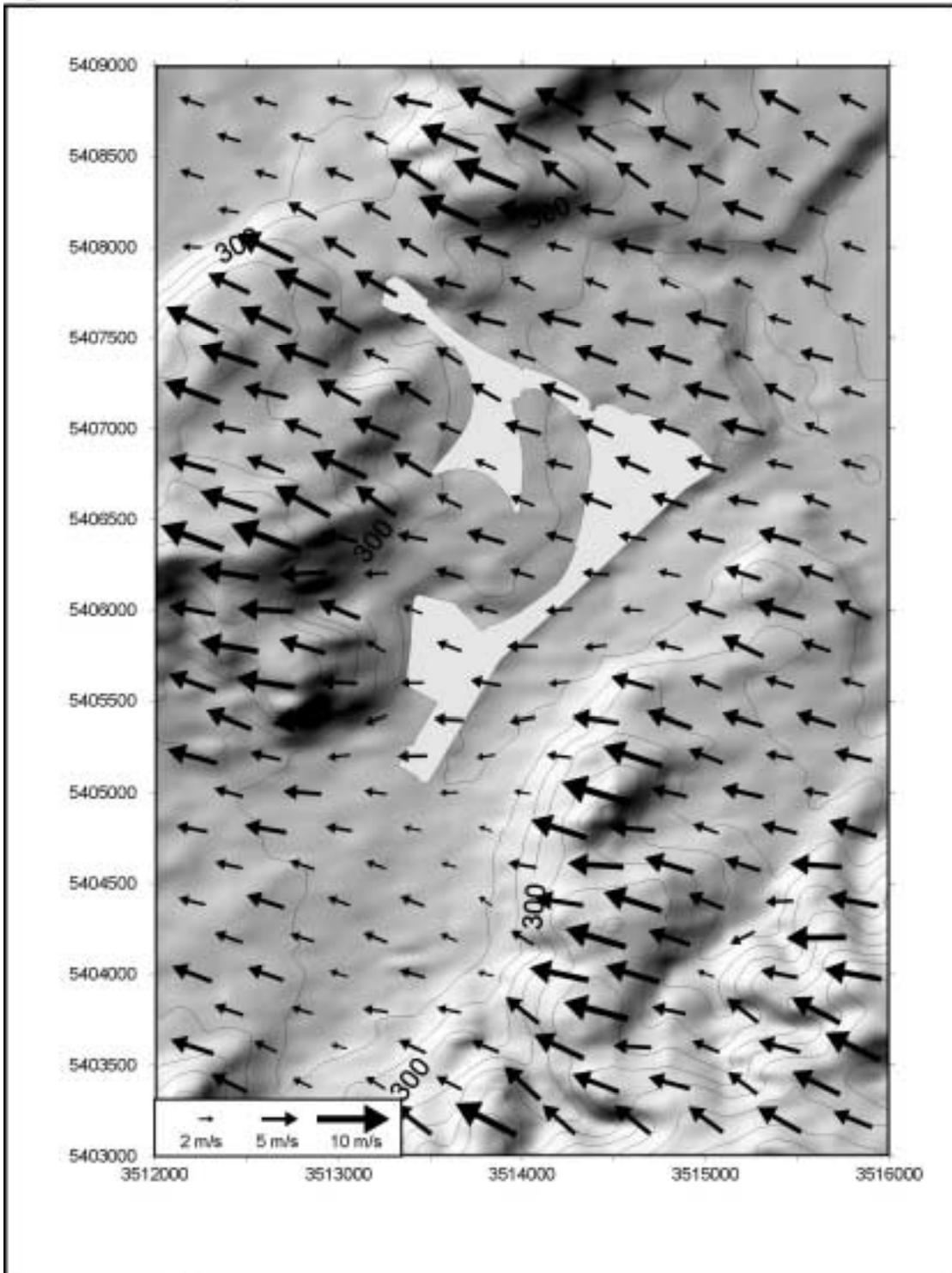


Abb. D8: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Südost

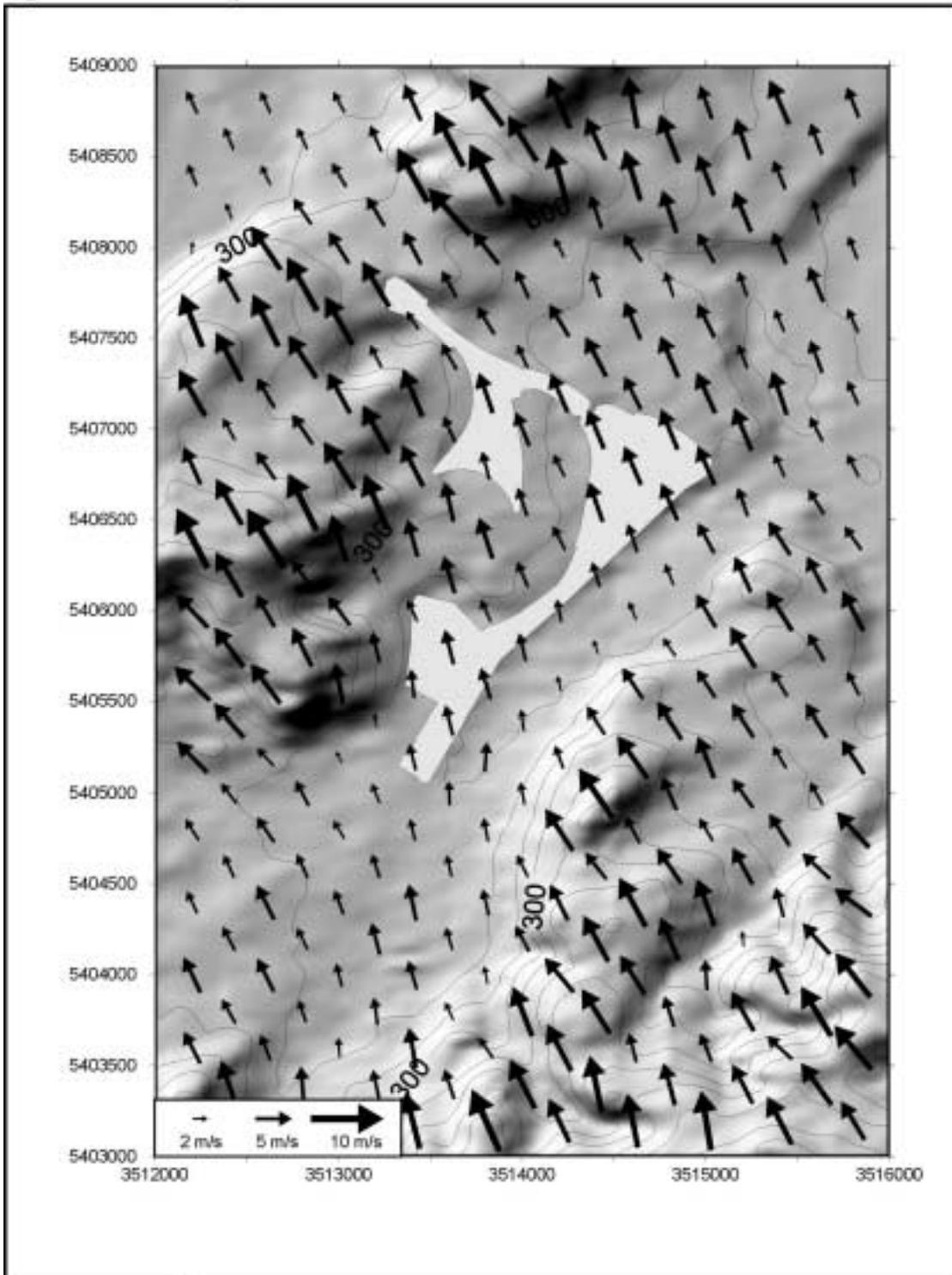


Abb. D9: Bodennahe Windverteilung im Innenstadtgebiet bei Höhenwind aus Süd

