

Die Wirkung von Vegetation in randstädtischen Luftleitbahnen

-

Studien zur Kaltluft in der Stadt Aachen

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **M.A.**

Timo Gerhard Sachsen

aus Düren

Berichter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Christoph Schneider
apl.-Prof. Dr. phil. Wolfgang Römer

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Oktober 2013

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

„Eine bemerkenswerte Frische und Gesundheit lacht überhaupt von den meisten Gesichtern, eine Lebenslust, wie sie sonst Großstadtgesichter nicht offenbaren, die aber sich hier erklärt aus der großen Natur, in die Aachen gebettet ist, aus der frischen Luft, die stets vom nahen Wald- und Wiesenlande her durch alle Straßen und Gassen der Stadt weht.“

Hermann Ritter 1912¹

¹ Ökologie-Zentrum Aachen (Hrsg.) / Vigener, M. (2000): Lebendiges Wasser - Die Aachener und Burtscheider Thermalquellen; S. 129.

Vorwort

Bei der Erstellung der Dissertation wurde ich in den vergangenen Jahren auf unterschiedliche Art und Weise von vielen unterstützt, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein erster Dank gilt dabei meinem Betreuer, Prof. Dr. Christoph Schneider, der die Erstellung der vorliegenden Arbeit ermöglicht hat. Seine Anregungen und die Möglichkeit, in den verschiedensten Projekten wertvolle Erfahrungen sammeln zu können, trugen maßgeblich zum Gelingen der Arbeit bei. Prof. Dr. Wolfgang Römer danke ich für die frühe Unterstützung, die Arbeit auf den Weg zu bringen sowie seine Bereitschaft, die Begutachtung der Dissertation vorzunehmen. Herzlich danken möchte ich Dr. Gunnar Ketzler, der mich zu Studienzeiten für die Stadt- und Geländeklimatologie begeistert hat. Ohne seine Ideen, seine detaillierten Ortskenntnisse und seine freundschaftliche Unterstützung wäre die Erstellung der Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen KollegInnen Mareike Buttstädt, Isabell Maras, Dr. Hendrik Merbitz und Achim Knörchen danke ich für die tolle Arbeitsatmosphäre und den freundschaftlichen Zusammenhalt sowie für die zahlreichen fachspezifischen und fachfremden Diskussionen und Exkursionen. Achim Ehrig danke ich für seine zeichnerischen Fähigkeiten und die montäglichen Spieltageanalysen. Zudem möchte ich mich bei allen MitarbeiterInnen der Arbeitsgruppe Physische Geographie und Klimatologie am Geographischen Institut der RWTH Aachen für die gute Zusammenarbeit bedanken, sowie bei meinen KollegInnen im Projekt City 2020+ für den reichen Schatz interdisziplinärer Arbeitserfahrungen.

Besonders hervorzuheben beim Zustandekommen der Datengrundlage dieser Arbeit ist Gerhard Peschel stellvertretend für den Fachbereich Umwelt der Stadt Aachen. Dank seiner Unterstützung wurden geeignete Standorte für die Wetterstationen im Kannegießerbachtal gefunden. Sein großer Erfahrungsschatz bezüglich der klimatologischen Gegebenheiten in der Stadt Aachen war stets sehr hilfreich. In Bezug auf das Untersuchungsgebiet gilt mein Dank Dietmar Veith. Unter seiner Anleitung konnten die für die Untersuchung so wichtigen Veränderungen an Gehölzbeständen vorgenommen werden. Sein Engagement für den Erhalt der im Kannegießer- und Johannisbachtal typischen Natur und Kulturlandschaft ist bewundernswert. Für die freundliche, engagierte und verlässliche Unterstützung bei der Erstellung eines umfangreichen, stadtklimatologischen Datenpools, danke ich Uwe Beitzel und seinem Team, sowie Bernhard Breuer von der ASEAG. Dr. Meinolf Koßmann vom DWD danke ich für die Informationen rund um das Modell KLAM_21.

Einen sehr großen Anteil am Gelingen der Arbeit haben meine Familie und Freunde. Herzlich danken möchte ich meinen Eltern und Schwiegereltern für verschiedene und zahlreiche Hilfestellungen, meiner angeheirateten Verwandtschaft für verschiedene Unterkünfte, in denen die Arbeit entstanden ist. Meinen Freunden Eddi und Alex danke ich für verschiedene Auf- und Abbauten, ich wäre sonst sicher nicht auf die Idee gekommen im Kannegießerbachtal zu übernachten. Matthes, Kathrin und Martin danke ich fürs Lesen ... und allen fürs unermüdliche Nachfragen und den Glauben an mich.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Kathrin und meinen Töchtern Lena und Maya. Es war nicht immer leicht und schon gar nicht selbstverständlich mir so viel Freiraum zu geben. Ihr seid eine große Unterstützung für mich.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XVI
1. Einleitung	- 1 -
2. Das Projekt City2020+	- 2 -
3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss	- 4 -
3.1 Begriffsbestimmungen	- 5 -
3.2 Meteorologische Einflussgrößen	- 6 -
3.3 Einfluss von Topographie und Oberfläche	- 12 -
3.4 Kaltluft und Vegetation	- 18 -
3.5 Hindernisse in der Luftleitbahn	- 23 -
3.6 Kaltluftwirkung auf das städtische Klima	- 30 -
3.7 Kaltluft in der Planung	- 34 -
3.8 Kaltluftmodellierung	- 37 -
4. Das Untersuchungsgebiet	- 39 -
4.1 Geographische Einordnung	- 39 -
4.2 Aachener Bachtäler	- 44 -
4.2.1 Bisheriger Kenntnisstand	- 47 -
4.2.2 Kleinräumige Betrachtung der Untersuchungsgebiete	- 51 -
5. Material und Methoden	- 54 -
5.1 Stationäre Messungen	- 54 -
5.1.1 Stationsstandorte und Umfeld	- 54 -
5.1.2 Veränderungen im Stationsumfeld	- 58 -
5.1.3 Messzeiträume	- 62 -
5.1.4 Messtechnik	- 63 -
5.1.5 Datenerfassung	- 64 -
5.1.6 Datenbearbeitung	- 65 -
5.2 Mobile Messungen	- 67 -
5.2.1 Fesselballonsondierungen	- 68 -
5.2.2 Strahlungsbilanzmessungen	- 69 -

5.2.3 Talquerprofilmessungen	- 69 -
5.2.4 ASEAG Messkampagne	- 70 -
5.2.5 Luftqualitätsmessungen	- 72 -
5.2.6 Vegetationskartierung	- 72 -
5.3 Modellierung	- 74 -
5.3.1 Theoretische Grundlagen	- 74 -
5.3.2 Allgemeine Modellkonfiguration	- 77 -
5.3.3 Modellierte Vegetationsstrukturen	- 83 -
5.3.4 Ausbreitung von Luftbeimengungen	- 88 -
5.4 Übersicht über Messstandorte und Aufzeichnungstermine	- 89 -
6. Ergebnisse	- 91 -
6.1 Klimatische Bedingungen im Untersuchungszeitraum	- 91 -
6.1.1 Windfeld	- 91 -
6.1.2 Temperatur und Relative Feuchte	- 97 -
6.2 Allgemeine Merkmale der Kaltluftabflüsse	- 102 -
6.2.1 Allgemeine Kaltlufteigenschaften	- 102 -
6.2.2 Auftrittshäufigkeit von Kaltluftabflüssen	- 111 -
6.2.3 Bestimmung der Kaltluftobergrenze	- 113 -
6.2.4 Fließgeschwindigkeit der Kaltluft	- 117 -
6.2.5 Fließverhalten der Kaltluft	- 123 -
6.2.6 Kaltluftabflussmenge	- 126 -
6.2.7 Reichweite der Kaltluft	- 130 -
6.2.8 Qualität der Kaltluft	- 132 -
6.3 Vegetationseffekte auf das Mikroklima	- 135 -
6.3.1 Modifikation des Windfeldes	- 136 -
6.3.2 Modifikation von Temperatur und Feuchte	- 142 -
6.4 Vegetationseffekte auf den Kaltluftabfluss	- 149 -
6.4.1 Vorbemerkung	- 149 -
6.4.2 Modifikation der Fließgeschwindigkeit	- 149 -
6.4.3 Ablenkung durch Vegetationsstrukturen	- 159 -
6.4.4 Veränderungen von Temperatur und Feuchte	- 160 -
6.4.5 Veränderung der Abflussmenge	- 163 -
6.4.6 Einflüsse auf die Qualität der Kaltluft	- 166 -

6.4.7 Jahreszeitliche Vegetationseinflüsse	- 168 -
6.4.8 Vegetationsspezifische Auswertungen im Johannisbachtal	- 174 -
7. Modellierte Vegetationsszenarien	- 180 -
7.1 Allgemeine Betrachtung modellierter Vegetationsszenarien	- 180 -
7.2 Fließgeschwindigkeit	- 180 -
7.2.1 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur	- 180 -
7.2.2 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur	- 182 -
7.3 Kaltluftmächtigkeit	- 184 -
7.3.1 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur	- 184 -
7.3.2 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur	- 185 -
7.4 Volumenstromdichte	- 187 -
7.4.2 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur	- 187 -
7.4.1 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur	- 188 -
7.5. Kaltluftabflussmengen unterschiedlicher Vegetationsstrukturen	- 189 -
8. Diskussion	- 191 -
9. Zusammenfassungen	- 194 -
9.1 Zusammenfassung	- 194 -
9.2 Summary	- 196 -
10. Literaturverzeichnis	- 198 -
11. Anhang	- 213 -
11.1 Formelverzeichnis	- 213 -
11.2 Tabellenanhang	- 216 -
11.3 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	- 222 -
12. Veröffentlichungen	- 226 -

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Struktur des Forschungsprojektes City2020+ (nach SACHSEN et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2011).....	- 2 -
Abb. 2:	Darstellung der nächtlichen Strahlungs- und Energiebilanz bei wolkenlosem Himmel (nach VDI 2003, HUPFER & KUTTLER 2005, HÄCKEL 1999).....	- 8 -
Abb. 3:	Typischer Temperaturverlauf (2 m ü. Gr.) an einer Freilandstation während einer nächtlichen austauscharmen Strahlungswetterlage (nach VDI 2003).....	- 9 -
Abb. 4:	Einfluss der Längen-Froude-Zahl Fr als Beschreibung des synoptischen Windes auf das nächtliche Windfeld in Tälern (nach BENDIX 2004; BARR & ORGILL 1989).....	- 10 -
Abb. 5:	Schematische Darstellung von Hangwind (a) und Bergwind (b) (nach z.B. BENDIX 2004, SCHÖNWIESE 2003, HÄCKEL 1999, DEFANT 1933).....	- 12 -
Abb. 6:	Boden- (kursiv) und Oberflächeneigenschaften (unterstrichen) und ihre Eignung zur Kaltluftbildung.	- 14 -
Abb. 7:	Normiertes, vertikales Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft an einem Hang konstanter Neigung ohne großräumigen Wind (nach VDI 2003).....	- 16 -
Abb. 8:	Vertikalprofil katabatischer Winde hinter einem Vegetationsbestand (gestrichelte Linie) und nach der Rodung (durchgezogene Linie) (GROSS 1986).	- 20 -
Abb. 9:	Temperaturprofile während Kaltluftabflussbedingungen über einem Weizenfeld und vegetationslosem Ackerland (nach CORNFORD 1938).....	- 21 -
Abb. 10:	Beeinflussung des Windfeldes durch topographische Begebenheiten aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Kaltluftabflussbedingungen in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a).	- 26 -
Abb. 11:	Beeinflussung des Windfeldes durch Vegetationsstrukturen aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Bedingungen des Kaltluftabflusses in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a (siehe Fußnote 2)).	- 28 -
Abb. 12:	Beeinflussung des Windfeldes durch Bebauungsstrukturen aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Bedingungen des Kaltluftabflusses in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a (siehe Fußnote 2)).	- 29 -
Abb. 13:	Naturräumliche Gliederung Aachens und des Umlandes. Die Stadtgrenze Aachens ist mit einer schwarzen Linie dargestellt (HAVLIK & KETZLER 2000, verändert v. H.-J. EHRIG 2013).	- 40 -
Abb. 14:	Digitales Höhenmodell der Stadt Aachen (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000). ...	- 41 -
Abb. 15:	Temperaturverlauf im Zeitraum 1980 - 2009 an der Station Aachen-Hörn bzw. Aachen (Wetterstation) des DWD (BUTTSTÄDT et al. 2010).....	- 42 -
Abb. 16:	Maximale Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und Umland ΔT in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für Städte in Nordrhein Westfalen (nach MUNLV 2009).	- 43 -
Abb. 17:	Statisch perspektivische Ansicht (5-fach überhöht, Sonne 45° am südlichen Himmel, Gelände 20° nach vorne geneigt) eines Teiles der Aachener Bachtäler. Blau hinterlegt sind das Kannegießer- und Johannisbachtal (Kartengrundlage: LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 2005).	- 44 -

Abb. 18:	Flusseinzugsgebiete des Aachener Talkessels (Kartengrundlage: BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2012).....	- 45 -
Abb. 19:	Lage der Untersuchungsgebiete Johannisbachtal (J) und Kannegießerbachtal (K) im Aachener Stadtgebiet (Kartengrundlage LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1995a-e).....	- 46 -
Abb. 20:	Orthophoto des Kannegießerbachtals mit Standort der Wetterstation KBR, KW, KB und der Richtung des Kaltluftabflusses (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).	- 51 -
Abb. 21:	Orthophoto des Johannisbachtals mit Standort der Wetterstation JH und der Richtung des Kaltluftabflusses (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).....	- 52 -
Abb. 22:	Station KBR am 19.11.2009 mit Wind- und Thermo-Hygro-Geber in 3 m ü. Gr. (Blickrichtung: NW); Hintergrund: Bebauung entlang der Lütticherstraße (vgl. Abb. 20).	- 55 -
Abb. 23:	Station KW am 25.03.2009 mit dem Windgeber in 3 m ü. Gr. sowie den Thermo-Hygro-Gebern in 2,5 m ü. Gr. und 0,5 m ü. Gr. (Blickrichtung: NW).....	- 56 -
Abb. 24:	Station KB in einer Messhöhe von 5,5 m ü. Gr. im Baum in Messzeitraum 1 (oben links, vgl. Kap 5.1.3, 08.02.2010) und am Mast in Messzeitraum 2 (unten links, vgl. Kap. 5.1.3, 15.09.2010) sowie Station KB (1 m) (rechts, 03.08.2009).....	- 57 -
Abb. 25:	Station JH am 18.01.2010 mit Wind- und Thermo-Hygro-Geber in 2,5 m ü. Gr. (Blickrichtung: SW).....	- 57 -
Abb. 26:	Vegetationsveränderungen im Johannisbachtal (A) und Kannegießerbachtal (B) mit den entsprechenden Eigenschaften der veränderten und unveränderten Vegetation. Dargestellt sind zudem die Wetterstationen JH (1), KW (2) und KB (3).....	- 59 -
Abb. 27:	Schematische Darstellung des Talquerschnittes mit den veränderten Vegetationsbeständen V_3 bis V_7 sowie den unveränderten Vegetationsbeständen V_c und V_d im Kannegießerbachtal auf Höhe der Messstationen KW und KB. Die Blickrichtung ist talaufwärts.....	- 59 -
Abb. 28:	Veränderungen des Vegetationsbestandes an Station KW / KB im Vergleich von Messzeitraum 1 (links, vgl. Kap. 5.1.3, 12.05.2009) und Messzeitraum 2 (rechts, vgl. Kap. 5.1.3, 12.04.2010)	- 60 -
Abb. 29:	Veränderungen des Vegetationsbestandes an Station JH im Vergleich von Messzeitraum 1 (oben, vgl. Kap. 5.1.3, 18.01.2010) und Messzeitraum 2 (unten, vgl. Kap. 5.1.3, 09.04.2010).	- 60 -
Abb. 30:	Höhe der Wiesenvegetation im Bereich von Station KW / KB im Jahr 2010.	- 61 -
Abb. 31:	Jahreszeitlich bedingte Veränderungen des Vegetationsbestandes im Umfeld von Station KW / KB (links: Aufnahme vom 03.08.2009, rechts: Aufnahme vom 25.03.2009)	- 61 -
Abb. 32:	Schematische Darstellung der Messstationen KBR, KW, KB und JH mit den jeweiligen Messhöhen und erfassten Parametern (T , u , f , Φ).....	- 64 -
Abb. 33:	Messstandorte der Talquerprofilmessungen auf Höhe von Messpunkt M1 und M3 (vgl. Abb. 42; Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).	- 70 -

Abb. 34: Messeinheit mit Temperatur und GPS Logger (links) sowie deren Montage an einem Linienbus (ASEAG) in Aachen (Grafik links: EHRIG, A., Geographisches Institut, RWTH Aachen)..... - 71 -

Abb. 35: Mittlere Bestandshöhe H_{VEG} mit der entsprechenden Standardabweichung (links) und Zusammenhang der Bestandshöhe H_{VEG} und dem Kronendurchmesser Φ_{VEG} im Rahmen der Vegetationskartierung (rechts) auf Basis von Mittelwerten der erweiterten KLAM_21 Klassen 11 bis 21 (vgl. Tab. 9). - 73 -

Abb. 36: Definierte Kartenausschnitte für die Erzeugung der Rasterdateien als Basis für die Modellierung mit KLAM_21 sowie die jeweiligen Flächennutzungen (mit Nennung der jeweiligen KLAM_21 Klasse) und die Bereiche, in denen die Vegetationskartierung stattfand (schraffiert) (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2013). - 77 -

Abb. 37: Digitales Höhenmodell der Untersuchungsgebiete als Basis der Erzeugung einer Rasterdatei für die Modellierung mit KLAM_21 sowie die jeweiligen Kernbereiche (schraffiert) der Untersuchungsgebiete (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000). - 78 -

Abb. 38: Kartierte Vegetation im Kannegießerbachtal und deren Umsetzung in KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9) für MZ1 und MZ2. - 84 -

Abb. 39: Vegetationsszenarien im Kannegießerbachtal mit reduzierter (SZ1) und erweiterter Vegetationsstruktur (SZ2) auf Basis von baumhöhen-abhängigen KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9). - 85 -

Abb. 40: Kartierte Vegetation im Johannisbachtal und deren Umsetzung in KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9) für MZ1 und MZ2. - 86 -

Abb. 41: Vegetationsszenarien im Johannisbachtal mit reduzierter (SZ1) und erweiterter Vegetationsstruktur (SZ2) auf Basis von baumhöhen-abhängigen KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9). - 87 -

Abb. 42: Übersicht über die Standorte der mobilen Messungen im Kannegießer- und Johannisbachtal (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012). - 90 -

Abb. 43: 14tägiger gleitender Durchschnitt der Windgeschwindigkeit u an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB basierend auf Tagesmittelwerten in der Messperiode vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011..... - 92 -

Abb. 44: Korrelation der Windgeschwindigkeit u an Station HÖ und den Stationen KBR, KW, KB (5,5 m) und KB (1 m) auf Basis von Tagesmittelwerten im Messzeitraum vom 01.04.2009 bis 28.02.2011. - 93 -

Abb. 45: Prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsklassen an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen eingeteilt, Windgeschwindigkeitsklassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt. - 94 -

Abb. 46: Mittlere Windgeschwindigkeit u im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 95 -

Abb. 47:	Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 10 min-Mittelwerten.....	- 96 -
Abb. 48:	Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Lufttemperatur T an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten.....	- 98 -
Abb. 49:	Mittlere Lufttemperatur T im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.....	- 99 -
Abb. 50:	Mittlere Relative Feuchte f im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.....	- 100 -
Abb. 51:	Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten.....	- 100 -
Abb. 52:	Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen an den Stationen KW und HÖ basierend auf 60-min Mittelwerten im Messzeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011.....	- 101 -
Abb. 53:	Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen KB und KW während Kaltluftabflusssituationen im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf der Basis von 10-min-Mittelwerten.....	- 103 -
Abb. 54:	Geländehöhe ü. NN und Strömungsfeld der Kaltluft in 2 m ü. Gr.; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).....	- 104 -
Abb. 55:	Mittlere Lufttemperatur T_{KL} im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.....	- 105 -
Abb. 56:	Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Temperatur der Kaltluft T_{KL} an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten während Kaltluftabfluss.....	- 106 -
Abb. 57:	Mittleres Maximum, Mittelwert und mittleres Minimum und die jeweilige Standardabweichung der Temperatur der Kaltluft an den Stationen KBR, KW und HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten.....	- 107 -
Abb. 58:	Talquerprofile der Lufttemperatur T_{KL} im Kannegießerbachtal auf Höhe von Station KW (links) und KBR (rechts). Eine Übersicht über die Messpunkte gibt Abb. 33. Die Messpunkte sind in etwa äquidistant.....	- 107 -
Abb. 59:	Mittlere Bodentemperatur T im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen KW und HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.....	- 108 -

Abb. 60: Differenz der mittleren Bodentemperatur T im Nachtgang während Kaltluftabfluss zwischen der Station KW und der Station HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten..... - 109 -

Abb. 61: Mittlere Relative Feuchte f_{KL} im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten..... - 110 -

Abb. 62: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f_{KL} an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten während Kaltluftabfluss. - 111 -

Abb. 63: Mittlerer Jahresverlauf der Nächte mit Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011, basierend auf 60 min-Mittelwerten der Station KBR. Hellgrau dargestellt sind Nächte in denen bis zu 3 h pro Nacht der Abfluss von Kaltluft nachgewiesen werden konnte, dunkelgrau dargestellt sind Nächte mit vier und mehr Stunden Kaltluftabfluss (vgl. Kap. 5.1.6). - 112 -

Abb. 64: Fesselballonsondierung am 10.07.2010 in der Zeit von 05:24 bis 05:41 Uhr MEZ im Kannegießerbachtal (M2, vgl. Abb. 42) zur Bestimmung der Kaltluftobergrenze mittels Messung von Temperatur T_{KL} (links), Windgeschwindigkeit u_{KL} (Mitte) und Windrichtung ϕ_{KL} (rechts)..... - 113 -

Abb. 65: Lage der Kaltluftobergrenze in Anhängigkeit der verstrichenen Zeit seit dem Sonnenuntergang Δt_{SU} während unterschiedlicher Fesselballonaufstiege an M2 (vgl. Abb. 42, 13.06.2009: 21:07 Uhr und 21:36 Uhr MEZ; 25.09.2009: 19:30 Uhr MEZ; 09.07.2010: 22:00 Uhr, 00:31 Uhr, 04:15 Uhr und 05:25 Uhr MEZ). - 114 -

Abb. 66: Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10)..... - 116 -

Abb. 67: Relative Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10). - 117 -

Abb. 68: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Kaltluft-Fließgeschwindigkeit u_{KL} an der Station KBR im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten. Da der Untersuchungszeitraum zwei Jahre betrug, wurde der Mittelwert aus beiden Jahren gebildet..... - 118 -

Abb. 69: Prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeitsklassen u_{KL} der Kaltluft an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Windgeschwindigkeitsklassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4). ... - 119 -

Abb. 70: Mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} im Nachtgang an den Stationen KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 120 -

Abb. 71: Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Höhe nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10)..... - 121 -

- Abb. 72: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelter Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} nach 90 Minuten Modellierung. Zusätzlich sind die Mozartstraße (M) und innerstädtische Gleisanlagen (G) kenntlich gemacht; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10). - 122 -
- Abb. 73: Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft in zwei ausgesuchten Strahlungsnächten (oben: 13./14.06.2009, unten: 09./10.07.2010) im Kannegießerbachtal auf Basis von 10 min-Mittelwerten. Werte $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt..... - 124 -
- Abb. 74: Fesselballonsondierungen am Messpunkt M7 (vgl. Abb. 42) am 28.09.2011. Dargestellt sind drei unterschiedliche Ballonaufstiege am gleichen Standort. - 125 -
- Abb. 75: Messung des Talquerprofils (links, 13.06.2009, 20:15 Uhr bis 20:35 Uhr MEZ) und Ballonsondierung (rechts, 13.06.2009, 20:26 Uhr bis 21:04 Uhr MEZ) zur Bestimmung der Kaltluftausbreitung und Kaltluftmächtigkeit (H_{KL}) (vgl. SACHSEN et al. 2011; SACHSEN et al. 2012). - 126 -
- Abb. 76: Höhe H_{KL} und Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft entlang eines Geländeschnittes auf Höhe von Station KBR (rechts) sowie die Lage des Schnittes im Untersuchungsgebiet (links). Die Blickrichtung des Schnittes ist talaufwärts; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10). - 128 -
- Abb. 77: Volumenstromdichte $V_{t_{KL}}$ der Kaltluft nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10). - 129 -
- Abb. 78: Wegstrecke der ASEAG Buslinie 2 (weiße Linie) durch das Kannegießerbachtal mit den vordefinierten Punkten der Datenzuordnung und der jeweiligen, höhenkorrigierten Temperaturdifferenz zur Station HÖ (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000, LANDESVERMESSUNGSAMT NRW 1995a-e)..... - 131 -
- Abb. 79: Differenzwerte der mittleren Lufttemperatur T zwischen der Station HÖ und vordefinierten Punkten auf der ASEAG-Linie 2 (vgl. Abb. 78). Die Datenaufzeichnung erfolgte am 16.03.2010, 24.03.2010 und 10.05.2010. - 132 -
- Abb. 80: Feinstaubkonzentrationen an den Messpunkten M4, M5 und M6 (vgl. Abb. 42) im Kannegießerbachtal während Kaltluftabfluss am 19.09.2010 (19:47 Uhr bis 22:34 Uhr MEZ). Die Erfassung erfolgte in einem Abstand von 60 min über ein Intervall von 10 min. Die Blickrichtung ist talaufwärts. - 134 -
- Abb. 81: Differenz der Windgeschwindigkeit u zwischen der Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 mit der jeweils dazugehörigen Trendlinie in MZ1 und MZ2 auf Basis von Tagesmittelwerten. - 136 -
- Abb. 82: Mittlere Abweichung der Windgeschwindigkeit u zwischen Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB sowie die Amplitude der Abweichung in MZ1 und MZ2 auf Basis von Tagesmittelwerten. - 137 -
- Abb. 83: Prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsklassen an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt, Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4). - 139 -

Abb. 84: Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit u zwischen der Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 im Tagesgang sowie deren Differenz (MZ2 - MZ1) auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 140 -

Abb. 85: Korrelationen (auf Basis der Differenzen der Windgeschwindigkeit zwischen Station KBR, KW, KB und Station HÖ) der Differenz der Windgeschwindigkeit u zwischen der Station KW und den Stationen KB (5,5, m) und KB (1 m) (links) und Station KBR und Station KW (rechts) in MZ1 und MZ2 auf Basis von tageszeitlichen Mittelwerten..... - 141 -

Abb. 86: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 auf der Basis von 10 min-Mittelwerten. - 142 -

Abb. 87: Differenz der Lufttemperatur T zwischen den Stationen KBR und KW und der Station HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten..... - 143 -

Abb. 88: Zusammenhang der kurzwelligen Strahlung Q_k an Station BU und der Lufttemperatur T an Station KW (0,5 m) auf Basis des Gesamtdatensatzes (oben), der Daten am Tag (06:30 Uhr bis 18:30 Uhr MEZ, Mitte) und der Daten am Tag im Sommer (Jun. bis Aug., unten) jeweils in MZ1 und MZ2. Die Auswertung erfolgte auf Basis von 60-min Mittelwerten. - 144 -

Abb. 89: Differenz des Mittelwertes, des mittleren Maximums, des mittleren Minimums und der Amplitude (Differenz aus den Differenzen von mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Lufttemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von Tagesmittelwerten. - 146 -

Abb. 90: Differenz der mittleren Lufttemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) im Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 146 -

Abb. 91: Differenz der mittleren Bodentemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 147 -

Abb. 92: Differenz der mittleren Relativen Feuchte f zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenzen (unten) im Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 148 -

Abb. 93: Differenz des Mittelwertes, des mittleren Maximums, des mittleren Minimums und der Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von Tagesmittelwerten. - 149 -

Abb. 94: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an den Stationen KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt. - 150 -

Abb. 95: Differenz der mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} im Nachtgang an den Stationen KBR und KW in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 151 -

Abb. 96:	Korrelation der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.	- 151 -
Abb. 97:	Monatliche Differenzen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zwischen Station KBR und KW in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.....	- 152 -
Abb. 98:	Talquerprofilmessungen der Windgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Messhöhe an Messpunkt M3 (vgl. Abb. 33) und die dazugehörigen Mittelwerte (gestrichelte Linie). Die Blickrichtung ist talaufwärts. Die Messungen fanden am 15.07.2009 und 22.09.2009 statt. Der zwischen MZ1 und MZ2 entnommene Baumbestand ist in der Bildmitte zu erkennen (vgl. Abb. 27) (vgl. Sachsen et al. 2012).....	- 153 -
Abb. 99:	Talquerprofilmessungen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} in 0,5 m, 2 m, 4 m und 6 m Höhe ü. Gr. am 15.07.2009. Die Kreise stellen den Kronendurchmesser von Straßenbegleitgrün auf Höhe von M3 dar (vgl. Abb. 33). Die graue Fläche stellt dichten Baumbestand im Luv der Messpunkte dar (vgl. Abb. 27). Die Blickrichtung ist entlang der Talachse talaufwärts gerichtet.....	- 154 -
Abb. 100:	Betragsdifferenz und Vektoren der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m ü. Gr. (oben) und über die Kaltluftmächtigkeit gemittelt (unten) zwischen MZ2 und MZ1 nach 90 Minuten Modellierung. Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 13 / 15 (vgl. Tab. 10).	- 157 -
Abb. 101:	Höhe H_{KL} und Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft entlang eines Geländeschnittes auf Höhe von Station KW in MZ1 (rechts oben) und MZ2 (rechts unten) sowie die Lage des Schnittes im Untersuchungsgebiet (links). Die Blickrichtung des Schnittes ist talaufwärts; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).	- 158 -
Abb. 102:	Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen KW und KB in MZ1 und MZ2 im Kannegießerbachtal auf Basis von 60 min-Mittelwerten.	- 159 -
Abb. 103:	Nachtgang der Temperaturdifferenz der Kaltluft T_{KL} zwischen Station KBR und den Stationen KW (2m) und KW (0,5 m) in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min Mittelwerten.	- 160 -
Abb. 104:	Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Temperaturdifferenz der Kaltluft T_{KL} zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten.	- 161 -
Abb. 105:	Korrelation der Lufttemperatur T_{KL} zwischen Station KBR und Station KW (2,5 m) bzw. Station KBR und Station KW (0,5 m) in MZ1 und in MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.	- 162 -
Abb. 106:	Nächtlicher Verlauf der Bodentemperatur während Kaltluftabfluss in MZ1 (links) und MZ2 (rechts) an Station KW auf Basis von 60-min Mittelwerten.	- 163 -
Abb. 107:	Rasterung des Talquerschnitts auf Höhe der Stationen KW und KB. Die schraffierte (Baum-)Fläche markiert den nach MZ1 entnommenen Baumbestand. Die grüne Fläche bildet als Referenzfläche die Grundlage für die Datenauswertung in Tab. 12. Die Blickrichtung ist talaufwärts.	- 164 -

Abb. 108: Betragsdifferenz und Vektoren der Kaltluft-Volumenstromdichte Vt_{KL} nach 90 min Modellierung in 2 m ü. Gr.. Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 13 / 15 (vgl. Tab. 10)..... - 166 -

Abb. 109: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Schadstoffkonzentration und das Strömungsfeld zu unterschiedlichen Modelllaufzeiten im Kannegießerbachtal; Konfiguration: Lauf 19 (vgl. Tab. 10). - 167 -

Abb. 110: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an den Stationen KBR und KW im meteorologischen Sommer von MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4). - 169 -

Abb. 111: Korrelation der Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1-S und MZ2-S auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 170 -

Abb. 112: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an der Station KW in MZ1-S und MZ2-S auf Basis von 60 min-Mittelwerten. - 171 -

Abb. 113: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Differenz der Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10). - 172 -

Abb. 114: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10)..... - 173 -

Abb. 115: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung (Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10)..... - 174 -

Abb. 116: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an der Station JH in MZ1 und MZ2 auf Basis von 30-min Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,5 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt..... - 175 -

Abb. 117: Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Höhe nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10)..... - 176 -

Abb. 118: Lenkung eines Kaltluftstromes als Folge eines Kaltluftstaus im Luv hoch aufwachsender Baumvegetation im Dorbachtal..... - 177 -

Abb. 119: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an der Station JH in MZ1 und MZ2 auf der Basis von 30 min-Mittelwerten..... - 178 -

Abb. 120: Relative Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10). - 179 -

Abb. 121: Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10)..... - 179 -

Abb. 122: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10)..... - 181 -

- Abb. 123: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 44 (VS4-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 44 / 42 (vgl. Tab. 10). - 182 -
- Abb. 124: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10). - 183 -
- Abb. 125: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 46 / 42 (vgl. Tab. 10). - 184 -
- Abb. 126: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10). - 185 -
- Abb. 127: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10). - 186 -
- Abb. 128: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 46 / 42 (vgl. Tab. 10). - 186 -
- Abb. 129: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10). - 187 -
- Abb. 130: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10). - 188 -
- Abb. 131: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10). - 189 -
- Abb. 132: Lage der Geländeschnitte im Kannegießer- und Johannisbachtal zur Errechnung der Kaltluftabflussmengen in Tab. 13..... - 190 -
- Abb. 133: Station JH im jahreszeitlichen Wechsel Einband

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Schematischer Überblick über die Eigenschaften der Kaltluftbereiche und des Kaltluftabflusses im Laufe der Nacht (nach VDI 2003, YOSHINO et al. 1981).	- 17 -
Tab. 2:	Ursachen der städtischen Wärmeinsel (nach MILLS 2008, HUPFER & KUTTLER 2006, OKE 1982).....	- 33 -
Tab. 3:	Bewertung verschiedener Luftleitbahnen hinsichtlich der Eignung für den Kaltlufttransport (nach z.B. BARLAG 1997).	- 35 -
Tab. 4:	Eigenschaften der Kaltluftabflüsse in den Aachener Bachtälern (nach KETZLER 2002, HAVLIK & KETZLER 2000).	- 49 -
Tab. 5:	Messzeiträume an den Stationen JH, KBR, KW und KB mit den jeweiligen Tagen mit Datenerfassung sowie Messausfällen.	- 62 -
Tab. 6:	Daten und Datenauflösung der Messstationen KBR, KB, KW, HÖ, JH, HÖ und BU.	- 65 -
Tab. 7:	Übersicht über die Standardklassen der Flächennutzung und der entsprechend definierten Eigenschaften in KLAM_21.	- 76 -
Tab. 8:	Übersicht über die Parameter-Veränderungen der KLAM_21 Standardklassen (grau hinterlegte Werte weichen von der Standardbelegung ab).....	- 81 -
Tab. 9:	Übersicht über die erweiterten KLAM_21 Klassen und die dazugehörigen Parameter.....	- 82 -
Tab. 10:	Modellläufe und deren zu Grunde liegende Vegetationsstruktur im jeweiligen Kerngebiet des Kannegießer- und Johannisbachtals (vgl. Abb. 38 bis Abb. 41) sowie die jeweiligen jahreszeitlich variierenden Eingabeparameter (vgl. Tab. 9).	- 88 -
Tab. 11:	Übersicht über die Aufzeichnungstermine der mobilen Messungen an den Standorten aus Abb. 42.	- 89 -
Tab. 12:	Auswertung der Referenzfläche aus Abb. 107 hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} , der durch Vegetation "verstellten" Abflussfläche $H_{KL} \times B_{KL}$ sowie den sich daraus ergebenden Abflussmengen q_{KL} an Kaltluft pro Zeiteinheit in MZ1 und MZ2. Die zu Grunde liegenden Annahmen stammen aus einer Ballonsondierung vom 22.06.2009 (vgl. Kap. 6.2.3) sowie Talquerprofilmessungen (vgl. Abb. 98).	- 165 -
Tab. 13:	Übersicht über die Kaltluftabflussmengen q_{KL} in Abhängigkeit der Vegetationsstruktur.....	- 190 -

1. Einleitung

Städte weisen, u.a. aufgrund reduzierter Windgeschwindigkeiten, einem höheren Versiegelungsgrad, spezifischer Baumaterialien und geringer Begrünung, höhere Lufttemperaturen auf, als das Umland. Dieser Effekt, der als „Städtische Wärmeinsel“ bekannt ist, ist seit langem Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (z.B. STEWART 2011, OKE 2006a, LANDSBERG 1981, KRATZER 1937). Im Rahmen des anthropogenen Klimawandels wird ein weiterer Anstieg der städtischen Temperaturen gegenüber dem Umland prognostiziert (z.B. DELLA-MARTA et al. 2007, WILBY 2008, MEEHL & TEBALDI 2004). Zudem werden austauscharme Wetterlagen in ihrer Dauer und Häufigkeit zunehmen, mit deutlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (z.B. LI et al. 2012, GABRIEL & ENDLICHER 2011, MATZARAKIS & DE ROCCO 2009, ROBINE et al. 2008, KOPPE et al. 2004, SCHÄR & JENDRITZKY 2004). Vor diesem Hintergrund gewinnt die Frage nach einer Versorgung der Städte mit kühler und unbelasteter Luft zunehmend an Bedeutung.

Bei Städten in Tallage, wie der Stadt Aachen, besteht die Möglichkeit des Luftaustauschs während austauscharmer Wetterlagen durch den Abfluss von Kaltluft, die sich im randstädtischen Bereichen, auf geeigneten Flächen bildet. Im Süden Aachens sind dies vor allem der Höhenzug des Aachener Waldes und die daran angrenzenden Grünflächen. Die Kaltluft fließt in Folge entlang von Luftleitbahnen (Bachtälern) in Richtung Innenstadt und trägt dort zur Reduktion hoher innerstädtischer Lufttemperaturen bei. Die Bachtäler Aachens sind folglich von hohem stadtklimatischem Wert (z.B. KETZLER 2002, HAVLIK & KETZLER 2000). Aufgrund der Kenntnis ihrer stadtklimatischen Bedeutung sind Teile der Bachtäler weitestgehend unbebaut, unterliegen jedoch aufgrund Ihrer naturräumlichen Attraktivität baulichem Flächendruck (z.B. KETZLER et al. 2010a, SACHSEN et al. 2011). Vor diesem Hintergrund ist eine genaue Kenntnis der Auswirkungen von Eingriffen in die Täler von hoher Bedeutung. Dabei bestehen umfangreiche Kenntnisse bezüglich Bebauung in der Kaltluftbahn (z.B. MVI BW 2013, WETZEL 2008, VDI 2003), jedoch vergleichsweise wenige Erkenntnisse über die Effekte von Vegetationsbeständen auf den Kaltluftabfluss.

In der vorliegenden Arbeit, werden Kaltluftabflüsse in zwei Bachtälern im Süden Aachens einer genaueren Betrachtung unterzogen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Einflüssen von Vegetation auf die abfließende Kaltluft, insbesondere auf die Veränderung von Fließverhalten und Abflussmenge. Zur Gewinnung von Vergleichsdatensätzen wurden zu diesem Zwecke Vegetationsbestände in der Talauflage modifiziert. Die Datenerfassung erfolgte mit Hilfe von vier Wetterstationen. Der Datenpool wurde zudem durch mobile Messungen (Fesselballonsondierungen, Luftqualitätsmessungen, Talquerprofilmessungen etc.) ergänzt.

Des Weiteren fand im Untersuchungsgebiete eine umfangreiche Vegetationskartierung statt, die die Basis für die Modellierung des Kaltluftgeschehens mit dem Modell KLAM_21 bildete. Die Modellergebnisse konnten anschließend mit den empirischen Daten überprüft und die Eingabeparameter des Modells modifiziert werden.

Die vorliegende Arbeit trägt insgesamt zu einem besseren Verständnis der Effekte von Hindernissen in der Kaltluftbahn bei, wie sie u.a. vom VDI gefordert wird (VDI 2003).

2. Das Projekt City2020+

Die vorliegende Arbeit entstand als Teil des Projektes City2020+ innerhalb des Projekthauses HumTec (Human Technology Centre). Das interdisziplinäre Projekthaus ist Teil des Zukunftskonzeptes der RWTH und wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzinitiative der Bundesrepublik Deutschland und der Länder gefördert (RWTH AACHEN 2012).

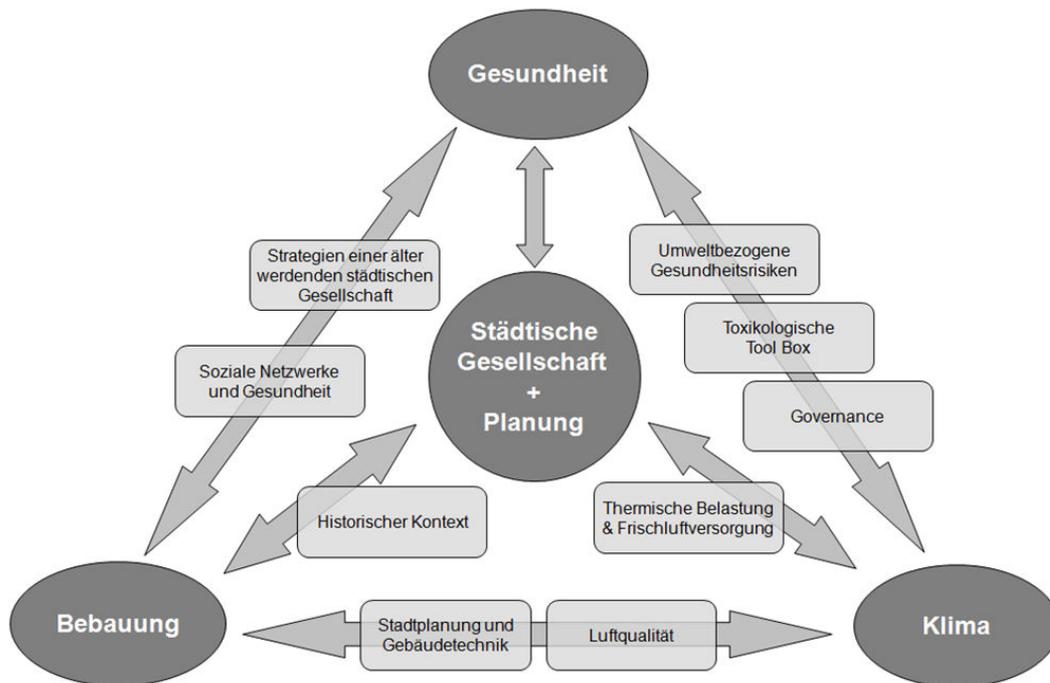


Abb. 1: Struktur des Forschungsprojektes City2020+ (nach SACHSEN et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2011)

Im Projekt City2020+ arbeitet ein interdisziplinäres Forschungsteam aus insgesamt sieben universitären Fachbereichen an zehn verschiedenen Fragestellungen der Stadtforschung. Gemeinsamer, projektübergreifender Inhalt der Untersuchung ist die Frage, wie sich der für kommende Jahrzehnte prognostizierte klimatische und demographische Wandel auf den Menschen in städtischer Umgebung auswirken wird und wie eine möglichst optimale Anpassung der städtischen Bevölkerung, Umwelt und politischen Struktur an diese klimatischen und demographischen Veränderungen erreicht werden kann. Dabei werden Wechselwirkungen zwischen strukturellen, politischen und soziologischen Gegebenheiten ebenso berücksichtigt, wie die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Das Projekt City2020+ entwickelt Szenarien, Möglichkeiten und Planungsempfehlungen, aus denen angepasste, zukunftsfähige Stadtstrukturen ersichtlich werden (SACHSEN et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2011, SCHNEIDER et al. 2010).

Die Ziele des Projektes City2020+ sind im Einzelnen

- (1) ... die Identifizierung der Zusammenhänge zwischen städtischen Mikroklimaten, gesundheitlichen Auswirkungen und der urbanen Struktur,
- (2) ... die Beurteilung der Risiken für die Individuen, die unter diesen Bedingungen arbeiten und leben und

- (3) ... die Vorstellung neuer Anpassungsstrategien für die zukünftigen städtischen Bedürfnisse, die aus der Kooperation zwischen den Forschungsbereichen Medizin, Geographie, Soziologie, Geschichte, Bauingenieurwesen und Architektur entstehen.

Die verschiedenen Einzelprojekte und ihre Einordnung in die Gesamtstruktur des Projektes sind aus Abb. 1 ersichtlich.

Wie die jüngste Vergangenheit zeigt, bedingt ein verantwortungsbewusster Forschungsumgang mit dem Thema Klimaschutz und Klimaanpassung eine integrierte Herangehensweise vieler verschiedener Fachdisziplinen (MILLS 2011, HALLEGATTE et al. 2010, MEARNs 2010, OKE 2006b, KUTTLER & BARLAG 2003). Diese integrierte Herangehensweise verfolgt das Projekt City2020+.

Die im Rahmen des Projektes und darüber hinaus entstandenen Veröffentlichungen unter Federführung oder Beteiligung des Autors sind in Kap. 12 aufgelistet. Für alle Inhalte dieser Publikationen, die in der Arbeit Verwendung finden, ist der Verfasser der vorliegenden Doktorarbeit verantwortlich.

3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss

Die Entstehung von Kaltluft in der Theorie ist ein seit langem bekanntes lokal-klimatologisches Phänomen der Stadt- und Geländeklimatologie (z.B. OKE 2006a, HUPFER & KUTTLER 2005, BENDIX 2004, VDI 2003, VOGT 2001, GOLDREICH 1984, FLEAGLE 1950, GEIGER 1950). Die Kaltluftentstehung, der Kaltluftabfluss sowie die Auswirkungen auf das städtische Klima sind Gegenstand vieler Publikationen in den vergangenen Dekaden, die dazu beigetragen haben, die klimatischen und meteorologischen Komponenten der Kaltluft zu erforschen (z.B. BIGG et al. 2012, MET OFFICE 2012, TRACHTE et al. 2010, VOSPER & BROWN 2008, WEBER & KUTTLER 2004, MAHRT et al. 2001, VOGT 2001, IJIAMA & SHINODA 2000, MAHRT et al. 1998).

Publikationen, deren zentrale Fragestellung der Einfluss von Vegetation auf den Kaltluftabfluss darstellt, sind darunter eher selten zu finden. UNSWORTH weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Struktur des Kaltluftabflusses umso komplexer wird, wenn die Abflussbahn vegetationsbestanden ist (UNSWORTH et al. 2004). Da Kaltluftentstehungsgebiete in Hanglagen oftmals für den Ackerbau ungeeignet und daher bewaldet sind, findet sich eine Auswahl von Publikationen, die den Einfluss von Baumvegetation (Wald) auf den Kaltluftabfluss als Gegenstand haben (z.B. PYPKER et al. 2007, UNSWORTH et al. 2004, BERGEN 1969). In der Literatur finden sich zudem seit langem Fragestellungen der Kaltluftbildung und des Kaltluftabflusses vielfach im Zusammenhang mit einer möglichen Frostgefährdung für obsttragende Gehölze im Wein- und Obstanbau (z.B. QUENOL & BELTRANDO 2008, OKE 2006a, HÄCKEL 1999, BOOTSMA 1976, CORNFORD 1938), die man durch die gezielte Pflanzung von Begleitvegetation (Hecken) zu schützen versucht (z.B. Frey & Lösch 2010, VDI 2003, QUENOL & BELTRANDO 2008). DEVITO & MILLER vergleichen die Einflüsse eines Eichenwaldes und eines Maisfeldes auf den Kaltluftstrom (DEVITO & MILLER 1983). Eine weitere Betrachtung der Literatur zum Zusammenhang von Kaltluft und Vegetation findet sich in Kap. 3.4.

Seit einiger Zeit wird die Kaltluftbildung auch vermehrt – vor dem Hintergrund steigender Temperaturen im Rahmen des anthropogenen Klimawandels – in der Literatur als bedeutsames Phänomen zur Reduktion thermischer Belastung in der Stadt genannt (z.B. GABRIEL & ENDLICHER 2011, DALY et al. 2010, MKULNV NRW 2010). Der Beitrag zur thermischen Reduktion durch hinzufließende Kaltluft ist dagegen seit langem Inhalt verschiedener Untersuchungen (z. B. MKULNV NRW 2010, KUTTLER et al. 1996, NKEMDIRIM 1980).

Zum besseren Verständnis werden in den folgenden Kapiteln zunächst die Theorie und der Stand der Forschung zum Thema „Kaltluft“ zusammengestellt. Dabei stehen mikroklimatologische Prozesse, die die Kaltluftbildung und den Kaltluftabfluss bedingen, im Vordergrund (vgl. Kap. 3.2 und Kap. 3.3). Ein Schwerpunkt liegt auf den beeinflussenden Eigenschaften von Hindernissen – insbesondere von Vegetation (vgl. Kap. 3.4 und Kap. 3.5) – in der Kaltluftbahn, da diese Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind. In Kap. 3.6 wird beschrieben, welche Modifikationen des städtischen Klimas durch Kaltluftabflüsse verursacht werden können. Kap. 3.7 gibt einen Überblick über die mögliche Berücksichtigung von Kaltluftbelangen in der Planung sowie über die Möglichkeiten durch gezielte

Planung Einfluss auf Kaltluftabflüsse zu nehmen. Kap. 3.8 gibt schließlich eine Übersicht über bisherige Modellierungen mit dem Kaltluftabflussmodell KLAM_21.

3.1 Begriffsbestimmungen

An dieser Stelle soll die Terminologie der deutschsprachigen Literatur zum Thema Kaltluft erläutert werden, da diese in der Literatur teilweise unterschiedlich gehandhabt werden. Die vorliegende Arbeit richtet sich dabei weitestgehend nach den Vorgaben der VDI Richtlinie 3787, Blatt 5 (VDI 2003), die um Begrifflichkeiten aus anderen Literaturquellen erweitert wurde.

Bei der in der vorliegenden Arbeit abgehandelten Kaltluft handelt es sich streng definitorisch um lokale Kaltluft (nicht advehierte, autochthone Kaltluft), die von der advehierten (allochthonen) Kaltluft abgegrenzt werden muss (HUPFER & KUTTLER 2005). Der Einfachheit halber wird in Folge von Kaltluft gesprochen, womit stets lokale Kaltluft gemeint ist.

Unter **lokaler Kaltluft** versteht man ein Luftvolumen im bodennahen Bereich, das aufgrund bestimmter meteorologischer Voraussetzungen – vor allem aber aufgrund einer hohen nächtlichen Ausstrahlung (und somit einer negativen Strahlungsbilanz) – stark abkühlt und dabei kälter wird als die umgebende Luft (z.B. VDI 2004, VDI 2003, VOGT 2001). Infolgedessen bildet sich eine Bodeninversion (z.B. MILIONIS & DAVIES 2008, AMANATIDIS et al. 1992, YOSHINO 1984, HEYWOOD 1933), die klar von der Umgebungsluft abgegrenzt ist. Aufgrund einer höheren Dichte und somit eines höheren Gewichtes fließt die kalte Luft in geneigtem Gelände hangabwärts (STULL 2000), man spricht von **Kaltluftabfluss** (HUPFER & KUTTLER 2005, VDI 2003). Die Luftleitbahn über die die kalte Luft transportiert wird, wird als Kaltluftabflussbahn (DRAUTZ & REUTER 2011, VDI 2003) oder **Kaltluftbahn** (WEBER & KUTTLER 2003) bezeichnet. Die **Kaltluftabflussmenge** q_{KL} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] – auch Kaltluftvolumenstrom genannt (z.B. VDI 2003, KETZLER 1989), das pro Zeiteinheit abfließende Kaltluftvolumen, errechnet sich aus der Multiplikation der Querschnittsfläche der Kaltluft $H_{KL} \times B_{KL}$ [m^2] und der Fließgeschwindigkeit u_{KL} [m s^{-1}] (HUPFER & KUTTLER 2005, KETZLER 2002). Da der Kaltluftabfluss in der Regel intermittierend ist, ist als Produkt die mittlere Fließgeschwindigkeit über einen definierten Zeitraum anzugeben. Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft wird als **Kaltluftabflussgeschwindigkeit** u_{KL} [m s^{-1}] bezeichnet (HUPFER & KUTTLER 2005). Die Obergrenze der Bodeninversion bildet die Obergrenze der Kaltluft und gibt daher einen Anhaltspunkt über die sogenannte **Kaltluftmächtigkeit** H_{KL} [m] (HUPFER & KUTTLER 2005), das heißt die vertikale Ausdehnung der Kaltluft. In der Planung findet sich der Begriff der **Volumenstromdichte** (= Kaltluftmassenstrom) V_{tKL} [$\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$], dem Produkt aus u.a. der Kaltluftabflussgeschwindigkeit u_{KL} und der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} als gängiges Maß für die Durchlüftung. Die Volumenstromdichte ist die Kaltluftmenge [m^3], die pro Zeiteinheit [s] durch einen 1 m breiten Talabschnitt (von der Erdoberfläche bis zur Kaltluftobergrenze) strömt (VDI 2003, AMBIMET 2000). Die Bildung eines Volumens kalter Luft pro Fläche und Zeit wird **Kaltluftproduktivität** (HUPFER & KUTTLER 2005) oder Kaltluftproduktion (BENDIX 2004) genannt. Die Kaltluftproduktivität errechnet sich demnach aus dem Quotient von Kaltluftabflussmenge [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] und Kaltlufteinzugsgebiet [m^2] und trägt die Einheit $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (VDI 2003). Ein Volumen, das als Schwellenwert für die Bezeichnung „Kaltluft“ gilt, findet sich in der Literatur nicht. VOGT schreibt in diesem Zusammenhang, dass der Begriff der Bil-

dung oder Produktivität rein sprachlich irrenführend ist, da keine Luft gebildet oder produziert wird, sondern eine Temperaturänderung durch mikroklimatische Prozesse herbeigeführt wird (VOGT 2001). Dennoch hat sich der Begriff der Kaltluftproduktivität in der Literatur durchgesetzt und findet auch in der vorliegenden Arbeit Anwendung. Bei der Angabe der Kaltluftproduktivität eines bestimmten Flächentyps und beim Vergleich verschiedener Flächen untereinander findet sich als Synonym zur Kaltluftproduktivität der Begriff der Kaltluftproduktivitätsrate oder Kaltluftproduktionsrate (HUPFER & KUTTLER 2005). Das **Kaltlufteinzugsgebiet** eines Kaltluftabflusses umfasst alle Flächen, auf denen Kaltluft gebildet wird und deren Kaltluftproduktion einen entsprechenden Volumenbeitrag zum Kaltluftabfluss leisten. Der ausschlaggebende Faktor ist dabei die Hangneigung. Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass im englischen Sprachgebrauch die Fachtermini ähnlich uneinheitlich sind wie im Deutschen. Die gängigste Bezeichnung für Kaltluftabfluss ist dort „*cold air drainage*“, es finden sich aber ebenso die Begriffe „*cold air run-off*“, „*cold air stream*“, „*cold air flow*“, „*Cold air current*“, „*nocturnal wind*“, „*downhill wind*“, „*valley wind*“ und „*gravity wind*“ in der Fachliteratur (z.B. YOSHINO 1984, CORNFORD 1938).

3.2 Meteorologische Einflussgrößen

Der Vorgang der Kaltluftbildung findet in der atmosphärischen Grenzschicht statt, dem untersten Teil der Troposphäre mit einer Höhe von bis zu 2 km (z.B. FOKEN 2006, OKE 2006a, HUPFER & KUTTLER 2005, VDI 2004). Dort herrschen reduzierte Windgeschwindigkeiten und abweichende Windrichtungen im Vergleich zur freien Atmosphäre aufgrund der Nähe und Rauigkeit der Erdoberfläche. Zudem kennzeichnet sich die atmosphärische Grenzschicht durch turbulente Vorgänge aufgrund der Windscherung (mechanische Turbulenz), der Rauigkeit der Erdoberfläche (dynamische Turbulenz) und unterschiedlicher Oberflächenerwärmung (thermische Turbulenz) (HUPFER & KUTTLER 2005). Die Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht unterliegen einem ausgeprägten Tagesgang (FOKEN 2006). Am Tag kennzeichnet sich die atmosphärische Grenzschicht durch turbulente Mischungsvorgänge aufgrund solarer Einstrahlung und damit einer Erwärmung der Erdoberfläche und die atmosphärische Grenzschicht weist einen negativen vertikalen Temperaturgradienten auf (STULL 2000). In der Nacht fehlt diese solare Einstrahlung und es baut sich unter idealtypischen Bedingungen eine Inversion auf, die eine sehr stabile Schichtung aufweist (FOKEN 2006). Man spricht in diesem Zusammenhang von einer stabilen Grenzschicht als Typ der atmosphärischen Grenzschicht (KRAUS 2008). Der Temperaturgradient innerhalb der Inversion ist positiv (STULL 2000). Die Charakteristika der atmosphärischen Grenzschicht sind von besonderer Bedeutung, da sie direkten Einfluss auf den Lebensraum des Menschen haben. In der atmosphärischen Grenzschicht finden wichtige meteorologische Vorgänge wie z.B. Wärme und Feuchtigkeitstransport statt (WEBER 2004).

Die Entstehung lokaler Kaltluft ist ein abendliches bzw. nächtliches Phänomen, das auf der Auskühlung der Erdoberfläche basiert (z.B. SMITH et al. 2010, VOSPER & BROWN 2008, DEVITO & MILLER 1983). Voraussetzung für die Abkühlung der Erdoberfläche ist dabei eine negative Strahlungsbilanz, zu deren Verständnis zunächst die Strahlungsbilanzgleichung herangezogen werden soll. Demnach setzt sich die Strahlungsbilanz der Erdoberfläche wie folgt zusammen (z.B. HÄCKEL 1999, WARNECKE 1997):

$$Q = \underbrace{(D + H - R)}_{Q_K} + \underbrace{(AG - A)}_{Q_L} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad \text{Gl. 1}$$

Dabei beschreibt:

Q	Gesamtstrahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_K	Kurzwellige Strahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_L	Langwellige Strahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$

Die kurzwellige Strahlungsbilanz der Erdoberfläche beinhaltet:

D	Direkte Sonneneinstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
H	Himmelsstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
R	Reflexstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
$D + H$	Globalstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$

Die langwellige Strahlungsbilanz der Erdoberfläche beinhaltet:

AG	Atmosphärische Gegenstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
A	Ausstrahlung der Oberfläche	$[\text{W m}^{-2}]$

Die von einer Oberfläche ausgehende Wärmestrahlung hängt von der absoluten Temperatur der Oberfläche T und dem jeweiligen effektiven Emissionsgrad ε ab. Der Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Körpers und dessen Strahlungsflussdichte E (Abstrahlung in W m^{-2}) wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben (z.B. WEISCHET 2008; BENDIX 2004, VDI 2003, HÄCKEL 1999).

$$J = \sigma \times T^4 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad \text{Gl. 2}$$

Dabei beschreibt:

J	Abgegebener Strahlungsstrom der Oberfläche	$[\text{W m}^{-2}]$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante ($=5,67 \times 10^{-8}$)	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^4]$
T	Absolute Temperatur	$[\text{K}]$

Der Emissionsgrad ε verschiedener Oberflächen wird in Kap. 3.3 näher beschrieben.

Die Bildung von Kaltluft in trockenen, wolkenlosen Nächten wird durch die sinkende kurzwellige Einstrahlung Q_K mit Sonnenuntergang ausgelöst (z.B. PYPKER et al. 2007; WEBER 2004, GEIGER 1950). Einen wichtigen Beitrag liefert jedoch nachfolgend der langwellige Teil der Strahlungsbilanz Q_L , da die Ausstrahlung des Erdbodens A in wolkenlosen Nächten besonders groß ist und nur ein geringer Teil der langwelligen Ausstrahlung A in der Atmosphäre absorbiert und remittiert wird, was wiederum die Strahlungsbilanz Q in den negativen Bereich zieht (z.B. OKE 2006a, HÄCKEL 1999). In bewölkten Nächten dagegen wird ein Großteil der Ausstrahlung A in der Atmosphäre absorbiert und in Form von atmosphärischer Gegenstrahlung AG remittiert, die Strahlungsbilanz Q bleibt positiv, die Bildung von bodennaher Kaltluft bleibt aus. Ausschließlich bei sehr hoher oder lockerer Bewölkung findet in begrenztem Umfang die Bildung von Kaltluft statt (YE et al. 1998). Der Teil der Atmosphärischen Ge-

3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss

genstrahlung AG , der in wolkenlosen Nächten nachweisbar ist, stammt von Gasen in der Atmosphäre (Wasserdampf, CO_2 , CH_4 , NO_2 , O_3), die langwellige Strahlung remittieren (vgl. BENDIX 2004, SWINBANK 1963). Der Grad der Emissivität hängt dabei stark von der Konzentration und Temperatur der Gase ab (VDI 2003). Je höher der Anteil der oben genannten Gase in der Atmosphäre ist, desto höher ist die atmosphärische Gegenstrahlung und desto nachteiliger wirkt sich dies auf die Kaltluftbildung aus. In mittleren geographischen Breiten stammt – aufgrund der vertikalen Wasserdampfverteilung der Atmosphäre bei wolkenlosem Himmel – ein großer Teil der atmosphärischen Gegenstrahlung (AG) aus bodennahen Luftschichten (unterhalb von 150 m ü. Gr.) (z.B. IZIOMONA et al. 2003, VDI 2003, VOGT 2001, SWINBANK 1963).

Betrachtet man die Wärme- oder Energiebilanz der Erdoberfläche, definiert sich diese für eine ebene Erdoberfläche wie folgt (z.B. HUPFER & KUTTLER 2005, VDI 2003, WARNECKE 1997).

$$Q + Q_H + Q_E + Q_B = 0 \quad [W m^{-2}] \quad \text{Gl. 3}$$

Dabei beschreibt:

Q	Gesamtstrahlungsbilanz	$[W m^{-2}]$
Q_H	Sensibler Wärmestrom	$[W m^{-2}]$
Q_E	Latenter Wärmestrom	$[W m^{-2}]$
Q_B	Bodenwärmestrom	$[W m^{-2}]$

Die einzelnen Terme der Gleichung beschreiben die Energieflussdichte, die Summe aller Energieflussdichten ist gleich Null (VDI 2003). Die Terme sind positiv, wenn sie zur Umsatzfläche hin gerichtet sind und negativ, wenn sie von der Umsatzfläche weg gerichtet sind (HUPFER & KUTTLER 2005).² Abb. 2 fasst die vorhandenen nächtlichen Energie- und Strahlungsflüsse mit ihrer entsprechenden Ausrichtung zusammen.

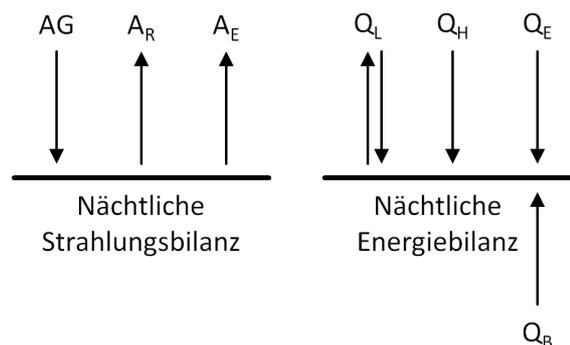


Abb. 2: Darstellung der nächtlichen Strahlungs- und Energiebilanz bei wolkenlosem Himmel (nach VDI 2003, HUPFER & KUTTLER 2005, HÄCKEL 1999)

² Bei der urbanen Energiebilanz spielen neben den genannten Termen der anthropogene Wärmestrom Q_{anthr} und der metabolische Wärmestrom Q_{met} eine Rolle. Erster beinhaltet thermische Emissionen von u.a. KFZ-Verkehr, Industrie, Kraftwerken und Gebäudeklimatisierung. Q_{met} beinhaltet die durch den Menschen direkt abgegebene Wärme und spielt als Größe eine untergeordnete Rolle (z.B. HUPFER & KUTTLER 2005).

Kurz nach Sonnenuntergang ist die Ausstrahlung A hoch und die an die Erdoberfläche angrenzende Luftschicht wird durch den sensiblen Wärmestrom Q_H rasch abgekühlt (z.B. MÜLLER 2004, WEBER 2004, VDI 2003, VOGT 2001). In der darüber liegenden Luft und im Boden herrschen noch höhere Temperaturen vor, so dass Energieflüsse (Bodenwärmestrom Q_B und turbulenter vertikaler Luftaustausch) in Richtung der Erdoberfläche einsetzen, um den Wärmeverlust zu kompensieren (z.B. WEBER 2004, VDI 2003, THAMM 2000). Daraus lässt sich erklären – wie in Abb. 3 zu erkennen – dass die Abkühlungsrate zu Beginn der Nacht hoch ist und dann im Laufe der Nacht sinkt.

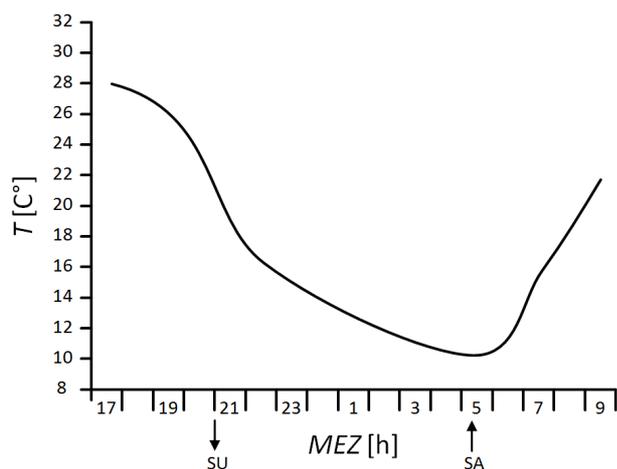


Abb. 3: Typischer Temperaturverlauf (2 m ü. Gr.) an einer Freilandstation während einer nächtlichen ausstrahlungswetterlage (nach VDI 2003).

Die Temperatur der Kaltluft erreicht kurz vor Sonnenaufgang ihr Minimum. Die Abkühlungsrate der Luft bleibt, solange die Strahlungsbilanz negativ ist, größer Null (YOSHINO 1984). Durch die anhaltende Abkühlung der bodennahen Luftschicht bildet sich eine Kaltluftschicht aus. In dieser findet sich eine im Vergleich zur freien Atmosphäre entgegengesetzte Temperaturschichtung (Bodeninversion) – die Lufttemperatur nimmt mit der Höhe zu (z.B. Stull 2000). Die Bodeninversion ist eine stabile Schichtung mit kaum turbulentem Austausch (z.B. WEISCHET 2008, VDI 2003).

Die Bildung von Kaltluft erstreckt sich über alle Jahreszeiten, wobei die Häufigkeit des Auftretens in Abhängigkeit von der Jahreszeit und vom Standort variiert (BIGG et al. 2012, IJIAMA & SHINODA 2000).

Eine weitere atmosphärische Voraussetzung für die Bildung von Kaltluft sind sehr niedrige Windgeschwindigkeiten vor Bildung der Inversion (bzw. im Idealfall Windstille), da sonst durch turbulente Durchmischung die Ausbildung einer Bodeninversion gestört wird. Wie spätere Auswertungen zeigen, kann eine zu starke synoptische Strömung immer wieder in die Bodeninversion einbrechen und diese zumindest kurzzeitig auflösen. Der VDI gibt als Obergrenze der Windgeschwindigkeit des synoptischen Windes für einen ungestörten Kaltluftabfluss bis zu 3 m s^{-1} an (VDI 2003). Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 3 m s^{-1} wird laut KING die Ausbildung und Strömungsrichtung der Kaltluft gestört, so dass keine signifikant messbaren Kaltluftabflüsse entstehen (KING 1973). ARRIFF & PIELKE fanden heraus, dass es unterschiedliche Störungscharakteristika gibt, je nachdem ob die synoptische Strömung entgegen oder in Richtung der Kaltluft weht (ARRITT & PIELKE 1986). OKE und BENDIX weisen in diesem Zusammenhang ergänzend auf einen – aus Massenbilanzgründen – theoretisch

3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss

vorhandenen Anti-Höhenwind hin, der in der Höhe entgegen der Kaltluftabflussrichtung weht (OKE 2006a, BENDIX 2004). Da die meisten Talsysteme jedoch sehr komplexe topographische Gebilde mit entsprechend komplexen Ausgleichsströmungen sind, ist der Anti-Höhenwind schwer nachweisbar (BENDIX 2004).

Aufschluss über das Verhalten des synoptischen Windes bei stabiler Schichtung (Inversion bei Kaltluftbildung) gibt die Längen-Froude-Zahl Fr . Diese beschreibt bezogen auf Talwindssysteme eine vollständige synoptische Durchmischung der Kaltluft (mit Auflösung der Inversion = $Fr \sim 0,7$ = überkritische Strömung) oder eine vollständige Abkopplung des synoptischen Windes von der Talzirkulation (= $Fr \sim 2,8$ = unterkritische Strömung). Die Gleichung zur Berechnung der Längen-Froude-Zahl Fr lautet wie folgt (z.B. BENDIX 2004):

$$Fr = \frac{v_s}{N \times L} \quad \text{mit} \quad N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \times \frac{d\theta}{dz}} \quad [-] \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei beschreibt:

Fr	Längen-Froude-Zahl	[-]
v_s	Mittlere Windgeschwindigkeit der synoptischen Strömung über dem Tal	[m s ⁻¹]
N	Brunt-Väisälä-Frequenz	[s ⁻¹]
L	Halbweite der Randhöhen	[m]
θ	Potenzielle Temperatur	[K]
$d\theta / dz$	Potenzieller Temperaturgradient	[K m ⁻¹]

Die Brunt-Väisälä-Frequenz N ist die natürliche Frequenz vertikaler Oszillationen in der Windströmung, die Halbweite der Randhöhen L beschreibt die horizontale Entfernung vom Hang bis zur halben vertikalen Erstreckung der Randhöhe ($0,5 \times h$). Zum besseren Verständnis dient Abb. 4:

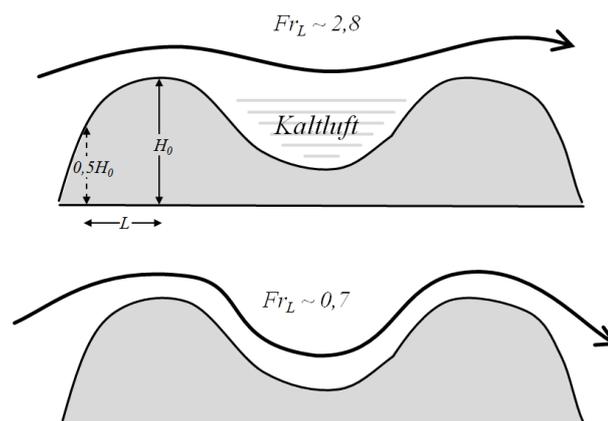


Abb. 4: Einfluss der Längen-Froude-Zahl Fr als Beschreibung des synoptischen Windes auf das nächtliche Windfeld in Tälern (nach BENDIX 2004; BARR & ORGILL 1989).

Um die tatsächliche Höhe der vom synoptischen Wind ungestörten Talatmosphäre zu berechnen geben BARR & ORGILL die folgende Gleichung an (z.B. BARR & ORGILL 1989, OKE 2006a):

$$\frac{H_s}{H_0} = 1 - 0,068v_s \quad \sim \quad (1 - 0,068v_s)H_0 \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 5}$$

Dabei beschreibt:

H_s	Tatsächliche Mächtigkeit der synoptisch ungestörten Talatmosphäre	[m]
H_0	Höhe des Tales (vgl. Abb. 4)	[m]
v_s	Mittlere Windgeschwindigkeit der synoptischen Strömung über dem Tal	[m s ⁻¹]

Hat die Kaltluft eine gewisse Mächtigkeit erreicht lässt sich die Stabilität der Schichtung durch die Richardson-Zahl Ri ausdrücken (VDI 2003, MAHRT & VICKERS 2002). Bei der Richardson Zahl Ri handelt es sich definitorisch um die inverse, densimetrische Froude-Zahl Fr_d (z.B. BAI et al. 2012, FERRERO et al. 2011, HOLDEN et al. 2000).

$$Ri = \frac{1}{Fr_d^2} \quad [-] \quad \text{Gl. 6}$$

Dabei beschreibt:

Ri	Richardson-Zahl	[-]
Fr_d	Densimetrische Froude-Zahl	[-]

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle noch die Reynolds-Zahl Re beschrieben werden, die das Verhältnis von Trägheit zu Reibungskräften und somit letztendlich turbulente oder laminare Vorgänge beschreibt (z.B. SHAPIRO & FEDOROVICH 2008, HUPFER & KUTTLER 2005; VDI 2003):

$$Re = \frac{H_{KL} \times u_{KL}}{\nu} \quad [-] \quad \text{Gl. 7}$$

Dabei beschreibt:

Re	Reynolds-Zahl	[-]
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	[m]
u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft	[m s ⁻¹]
ν	Mittlere kinematische Zähigkeit der Kaltluft	[m ² s ⁻¹]

Bei einer laminaren Strömung bewegen sich die Luftteilchen auf geordneten Bahnen, die sie im Falle einer turbulenten Strömung verlassen. Die kritische Reynold-Zahl Re_{kr} beträgt etwa 3000. Für $Re < 3000$ kann eine laminare Strömung angenommen werden, für $Re > 3000$ eine turbulente Strömung. Selbst für geringe Windgeschwindigkeiten wie den Abfluss von Kaltluft ergibt sich ein Wert der über der kritischen Reynolds-Zahl liegt Re_{kr} (HUPFER & KUTTLER 2005).

Abschließend und zusammenfassend lassen sich für die Kaltluftentstehung und deren Intensität folgende meteorologische Voraussetzungen zusammenfassen:

- Vorherrschen einer Strahlungswetterlage (Wolkenlosigkeit), so dass eine negative Strahlungsbilanz vorliegt.
- Ein geringer oder gänzlich fehlender synoptischer Wind,

so dass sich ungestört eine Bodeninversion bilden kann.

- Ein möglichst geringer Gehalt an v.a. Wasserdampf in der Atmosphäre, so dass die atmosphärische Gegenstrahlung gering ist.

3.3 Einfluss von Topographie und Oberfläche

Nachdem in Kap. 3.2 die meteorologischen Einflussgrößen der nächtlichen Kaltluftbildung zusammengefasst wurden, soll in Folge der Einfluss der Topographie erfasst werden. Bei der Kaltluftbildung spielen Faktoren wie Relief, Geländeexposition sowie Oberflächenbeschaffenheit eine entscheidende Rolle (z.B. TRACHTÉ et al. 2010; VDI 2003). Eine Vielzahl von Untersuchungsstandorten wurde dabei bereits hinsichtlich der Abhängigkeit des Kaltluftabflusses von Hangneigung und Landnutzung untersucht. Eine Zusammenstellung von Literaturquellen dazu findet sich bei DÜTEMEYER (DÜTEMEYER 2000).

In ebenem Gelände baut sich die Kaltluftschicht wie bereits in Kap. 3.2 beschrieben auf und es bilden sich Kaltluftseen (z.B. HORLACHER et al. 2012, VOSPER & BROWN 2008, ZÄNGL 2005, KETZLER 1989), die Mächtigkeiten von mehr als 100 m erreichen können (VDI 2003). Dort herrscht aufgrund der stabilen Schichtung nahezu Windstille. Erreicht die Lufttemperatur im Kaltluftsee ausreichend niedrige Werte kommt es zur Kondensation von Wasserdampf, der als Nebel sichtbar wird (z.B. FOKEN 2006, BENDIX 2004). Selbst auf leicht aufgewölbtem Niveau ist die Bildung eines Kaltluftsees möglich, wenn Hindernisse das seitliche Abfließen der Kaltluft verhindern (GEIGER 1950).

Ist das Gelände, in dem sich die Kaltluft bildet geneigt, so setzt sich die Kaltluft aufgrund ihrer größeren Dichte (und damit auch Schwere) im Vergleich zu warmer Luft hangabwärts (katabatisch) in Bewegung (z.B. PYPKER et al. 2007, OKE 2006a, HUPFER & KUTTLER 2005, BENDIX 2004, WEBER 2004, KETZLER 2002, HÄCKEL 1999). Beim Abfließen von Kaltluft unterscheidet man zwischen Hang- und Bergwinden. Diese sind in Abb. 5 dargestellt.

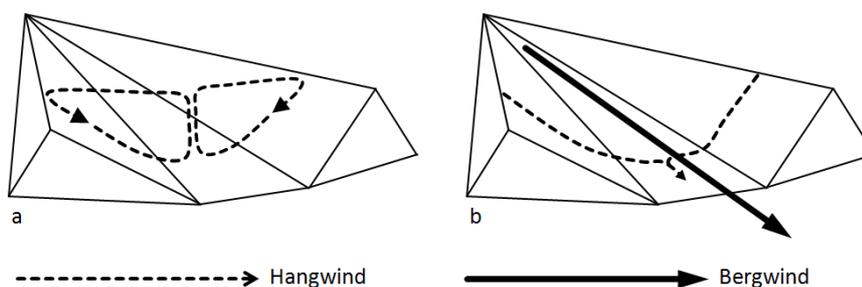


Abb. 5: Schematische Darstellung von Hangwind (a) und Bergwind (b) (nach z.B. BENDIX 2004, SCHÖNWIESE 2003, HÄCKEL 1999, DEFANT 1933).

Zu Beginn der Nacht setzt bei einsetzender Kaltluftbildung zunächst eine Hangwindzirkulation quer zum Talverlauf ein. Ist der Volumenstrom der Hangwinde groß genug, bildet sich in der Talsohle der hangabwärts gerichtete Bergwind (z.B. HÄCKEL 1999, VOGT 2001). Auf eine räumlich feinere Differenzierung soll an dieser Stelle verzichtet werden, da diese in ausführlicher Form in der Literatur beschrieben ist (z.B. BENDIX 2004, Schönwiese 2003, VOGT 2001, HÄCKEL 1999, DEFANT 1933). Im vorliegenden Untersuchungsgebiet findet sich kein weitverzweigtes Talsystem, so dass Hangwinduntersu-

chungen nicht stattfinden konnten, da deren Nachweis aufgrund der geringen Ausbildungsvolumina kaum möglich ist. Die Untersuchungen beziehen sich daher auf den Bergwind, der als Fachterminus in der vorliegenden Arbeit Verwendung findet.

Hangwinde erreichen Mächtigkeiten von bis zu mehreren Metern, wohingegen Bergwinde als Zusammenfluss der Hangwinde mehrere Dekameter mächtig werden können (VDI 2003).

Wie in Kap. 3.2 beschrieben ist der Bodenwärmestrom Q_B als ausgleichende Komponente für die Ausstrahlung an der Erdoberfläche A von Bedeutung. Dementsprechend bewirkt ein geringer Bodenwärmestrom Q_B eine starke Abkühlung der bodennahen Luft und eine hohe Kaltluftproduktionsrate (vgl. Kap. 3.1). Da an nordexponierten Hängen die Einstrahlung und damit die Erwärmung des Bodens tagsüber geringer als an südexponierten Hängen ist, ist der Bodenwärmestrom in Richtung Erdoberfläche nachts geringer. Nordexponierte Hänge bilden daher in der Regel mehr Kaltluft pro Zeiteinheit als südexponierte Hänge (VDI 2003). An ostexponierten Hängen setzt in mittleren Breiten die Kaltluftbildung dagegen im Tagesverlauf zuerst ein, da diese zuerst bei Sonnenuntergang verschattet werden. Am Morgen findet die Bildung an westexponierten Hängen am längsten statt, ebenfalls aufgrund der Verschattung. Die Ausrichtung des Tales spielt demnach eine entscheidende Rolle für die produzierte Kaltluftmenge und die Dauer der Kaltluftproduktion (z.B. BENDIX 2004, VDI 2003). Laut OKE lassen sich idealtypische Kaltluftabflussbedingungen in einem tiefen, geraden Tal mit einem Verlauf von Norden nach Süden vorfinden (OKE 2006a). Bei Ein- und Ausstrahlung sind zudem jahreszeitliche Effekte von Bedeutung, die die Dauer der jeweiligen Strahlungskomponente beeinflussen.

Wie die oben genannten Beispiele zeigen, ist keinesfalls davon auszugehen, dass eine zeitlich gleichmäßige Kaltluftproduktion auf den Oberflächen im Talbereich vorliegt. Vielmehr ist diese Produktion stark räumlich und zeitlich differenziert.

Für die Intensität des Bodenwärmestromes sind die bodenphysikalischen Gegebenheiten von Bedeutung, zu denen u.a. Dichte, Luftgehalt, Wassergehalt sowie das Porenvolumen des Bodens zählen. Des Weiteren spielen die Bodenfarbe, die Bodenstruktur sowie die Bodenzusammensetzung eine Rolle (z.B. HUPFER & KUTTLER 2005, VDI 2003). Böden mit geringer Dichte leiten Wärme schlechter als Böden mit hoher Dichte. Für die Entstehung von Kaltluft sind demnach weniger dichte Böden von Vorteil, da der nächtliche Bodenwärmestrom die Kaltluftbildung nicht hemmen kann (vgl. Kap. 3.2). Stark vernässte Böden, wie sie in Tälern oft zu finden sind, haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit und sind dementsprechend schlechte Kaltluftbildner (BANTA & GANNON 1995). Aufgrund der geschilderten Zusammenhänge ist ein eventueller Einfluss der Landwirtschaft auf die Kaltluftentstehung durch Bodenbearbeitung oder Drainage nachvollziehbar (VDI 2003). Wird der Boden beispielsweise auf ackerbaulich genutzten Flächen durch Pflügen aufgelockert, so steigt das Porenvolumen des Bodens – der Luftgehalt des Bodens erhöht sich – und an der Oberfläche wird unter Umständen mehr Kaltluft produziert (VDI 2003). Die Farbe des Bodens bedingt eine unterschiedliche Erwärmung bei Sonneneinstrahlung aufgrund der Albedo. Dunkle Böden erwärmen sich stärker und haben dementsprechend nachts einen ausgeprägteren Bodenwärmestrom, was sich nachteilig auf die Kaltluftbildung auswirkt. Eine Übersicht – auf Basis der genannten Literaturquellen – über die Boden- und Oberflächeneigenschaften und ihre Eignung für die Bildung von Kaltluft gibt Abb. 6.

3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss

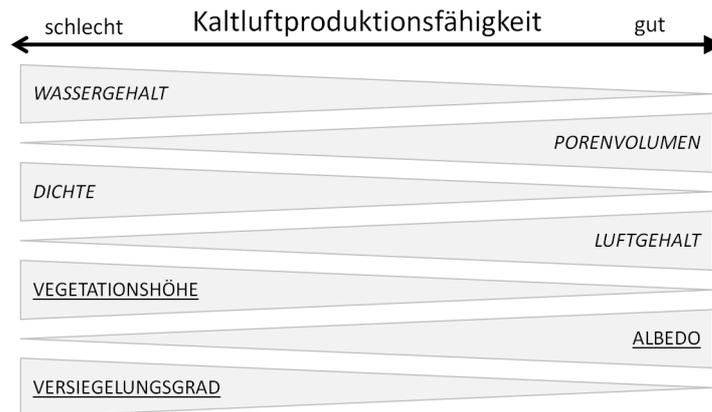


Abb. 6: Boden- (kursiv) und Oberflächeneigenschaften (unterstrichen) und ihre Eignung zur Kaltluftbildung.

Neben den Bodeneigenschaften spielt auch die Flächennutzung für die Kaltluftentstehung, den Transport sowie die Beschaffenheit eine wichtige Rolle (STENDEL et al. 2006). Demnach können Wasserflächen die Temperatur der Kaltluft erhöhen, da sie – ebenso wie bestimmte städtische Oberflächen – eine hohe Wärmespeicherfähigkeit haben und nachts verstärkt Wärme an Ihre Umgebung abgeben (z.B. VDI 2003, SCHWAB 2000). In der Stadt wird während des Tages aufgrund mangelnden Wasser- und Pflanzenangebotes beinahe die gesamte Strahlungsenergie in Wärme umgesetzt, die teilweise im Baukörper gespeichert wird. Diese Energie wird während der Nacht abgegeben und führt zu höheren Lufttemperaturen im städtischen Raum im Vergleich zum Umland (z.B. SCHWAB 2000). Der städtische Baukörper sowie versiegelte Flächen führen demnach in der Regel dazu, dass die einfließende Kaltluft aufgezehrt wird. Sie vermischt sich solange mit der wärmeren Stadtluft, bis ein Temperaturunterschied nicht mehr nachweisbar ist. In der Planung (vgl. Kap. 3.7) spielt vielfach die Frage eine Rolle, wie weit Kaltluft in städtisch bebauten Gebiet eindringt, da die kühlenden Effekte dort besonders erwünscht sind. Empirisch, alleine anhand von Temperaturmessungen, ist dies nur sehr schwer nachzuweisen. Daher werden der Kaltluft im Entstehungsgebiet Tracer beigesetzt (z.B. SF₆), die chemisch in der Stadtluft nachweisbar sind (z.B. ROTACH et al. 2005, WEBER & KUTTLER 2004, EGGERT 1999, GUDIKSEN & SHEARER 1988, WHITEMAN 1988).

Das Zusammenspiel verschiedener Faktoren bestimmt die Entstehung und den Transport von Kaltluft. Es liegt daher auf der Hand, dass Veränderungen der Topographie und der Oberfläche Auswirkungen auf den Kaltluftabfluss haben. Fragestellungen, die dieses Themengebiet betreffen, sind vielfach Inhalt der Planung, die Kaltluftentstehungsgebiete und Frischluftschneisen betreffen. Dies soll in Kap. 3.7 weiter vertieft werden.

Die Kaltluft wird während der Entstehung und dem Abfluss von verschiedenen Komponenten beeinflusst. Diese sind in vereinfachter Form und in Anlehnung an den VDI (VDI 2003):

- (1) Die Schwerkraft, die die Luft den Hang hinabfließen lässt,
- (2) die Reibung der Bestandsoberfläche, die mehr oder weniger bremsend wirken kann und
- (3) die synoptische Strömung über der Talatmosphäre, die im am wenigsten nachteiligen Falle Turbulenz an der Kaltluftobergrenze verursacht, im nachteiligsten Falle aber auch den Kaltluftstrom stört oder auflöst (VOSPER & BROWN 2008, VDI 2003).

Beim Hinunterfließen der Kaltluft von höheren Gegenden des Hang- und Bergbereiches findet eine trockenadiabatische Erwärmung der Luft statt. Zudem bewirkt die turbulente Einmischung wärmerer Umgebungsluft (Entrainment) in die Kaltluft eine Temperaturzunahme (z.B. LAPWORTH 2006, PAPADOPOULOS et al. 1997, NAPPO & RAO 1987). Mehr als ausgeglichen wird diese Erwärmung durch den turbulenten sensiblen Wärmestrom Q_H der in Richtung Erdoberfläche gerichtet ist. Unter idealen Bedingungen tritt demnach in der Kaltluft beim Fließen ein Nettowärmeverlust auf (BENDIX 2004), die Mächtigkeit der Kaltluft nimmt während des Fließvorganges kontinuierlich zu. Die Abkühlungsrate eines Kaltluftpaketes während des Fließvorganges definiert BENDIX wie folgt (BENDIX 2004):

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{dp}{dt} - \frac{dQ_H}{dxy} - \frac{dQ}{dxy}\right)}{\rho \times c_p} \quad [\text{K s}^{-1}] \quad \text{Gl. 8}$$

Dabei beschreibt:

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$	Abkühlungsrate eines Kaltluftpaketes während des Fließvorganges	$[\text{K s}^{-1}]$
p	Luftdruck	$[\text{hPa}]$
t	Zeit	$[\text{s}]$
Q_H	Sensibler Wärmestrom	$[\text{W m}^{-2}]$
dxy	Länge der Fließstrecke in horizontaler Richtung	$[\text{m}]$
Q	Gesamtstrahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
ρ	Luftdichte	$[\text{kg m}^{-3}]$
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$

Diese idealen Bedingungen finden sich in planerisch kaltluftrelevanten Gebieten eher selten, da dort bereits beschriebene Faktoren, wie weniger geeignete Vegetationseinheiten oder Versiegelung, die Kaltluftabfluss- und Kaltluftproduktionsbedingungen verschlechtern (vgl. Kap. 3.5 und 3.7).

Unter idealen Bedingungen (konstante Hangneigung, kein Wind) lautet die Gleichung für das Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft u_{KL} (VDI 2003):

$$u_{KL} = u \sin\left(\pi \frac{z-z_0}{H_{KL}}\right) \exp\left[-n \left(\frac{z-z_0}{H_{KL}}\right)\right] \quad [\text{m s}^{-1}] \quad \text{Gl. 9}$$

Dabei beschreibt:

u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft	$[\text{m s}^{-1}]$
z	Höhe über Grund	$[\text{m}]$
z_0	aerodynamische Rauigkeitslänge	$[\text{m}]$
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	$[\text{m}]$

Abb. 7 zeigt das idealtypische Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft. Demnach findet sich die maximale Fließgeschwindigkeit der Kaltluft laut Faustformel bei etwa einem Viertel der Höhe der Kaltluftmächtigkeit (VDI 2003).

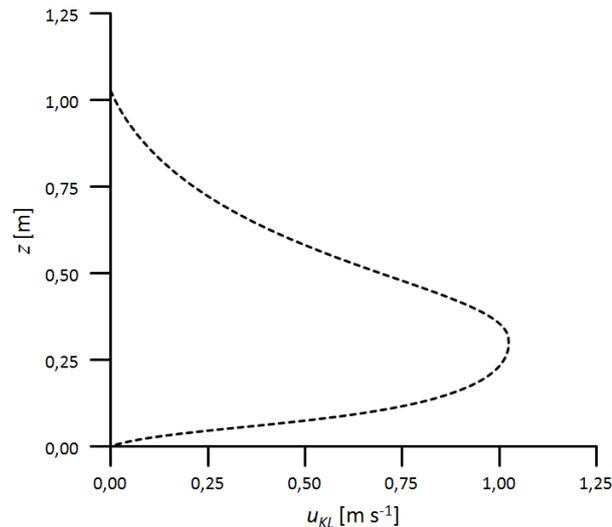


Abb. 7: Normiertes, vertikales Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft an einem Hang konstanter Neigung ohne großräumigen Wind (nach VDI 2003).

Die Mindestneigung der Fläche α für einsetzenden Kaltluftabfluss beträgt über niedriger Vegetation (Wiese o.ä.) ca. 1° , über höherer Vegetation (Wald o.ä.) ca. 5° (z.B. VDI 2003; MAHRT et al. 2001). Diese Neigung wurde aufgrund von messtechnischen Limitierungen getroffen und stellt keine allgemeingültige Mindestneigung dar (VDI 2003). So haben SOLER et al. in einer Untersuchung Kaltluftabflüsse auf einem gerade einmal 1° geneigten Gelände nachweisen können (SOLER et al. 2002). Bezüglich der Fließgeschwindigkeit finden sich in der Literatur meist Angaben von 1 m s^{-1} bis 3 m s^{-1} . Höhere Geschwindigkeiten werden nur bei sehr mächtigen Kaltluftströmen oder sehr hoher Geländeneigung erreicht (Oke 2006a, HUPFER & KUTTLER 2005). Wird die Bodenoberfläche verändert, so verändert sich als direkte Folge auch die Fließgeschwindigkeit (HUPFER & KUTTLER 2005, VDI 2003). Ohne die Berücksichtigung von Oberflächenrauigkeit und Hindernissen in der Luftleitbahn würde die Kaltluft direkt an der Erdoberfläche die höchsten Fließgeschwindigkeiten aufweisen (STULL 2000). Da in der Wirklichkeit keine Oberfläche ohne Rauigkeit existiert, verlagert sich das Strömungsmaximum je nach Oberfläche (und Bestand) nach oben (z.B. FOKEN 2006). Ein Beispiel für den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft gibt YOSHINO. Um eine Fließgeschwindigkeit von 1 m s^{-1} bei gleicher Hangneigung zu erreichen, muss die Kaltluft eine Schneedecke von 600 m Länge überströmen, bei einem bestellten Feld sind dies 700 m (YOSHINO 1984). Schon GEIGER gibt eine Übersicht über die verschiedenen Vegetationsarten und die dazugehörige Rauigkeit, wobei der Wald als Oberfläche höchster Rauigkeit angegeben und „kurzes Gras“ als bewachsene Oberfläche geringster Rauigkeit zugeordnet wird (GEIGER 1961).

Die Kaltluftmächtigkeit H_{KL} ergibt sich für rauigkeitsarme Flächen aus der folgenden Gleichung (z.B. BENDIX 2004, HUPFER & KUTTLER 2005):

$$H_{KL} = 0,0375 \times \sin \alpha^{\frac{2}{3}} \times x_{KL} \quad [\text{m}] \quad \text{Gl. 10}$$

Dabei beschreibt:

$$H_{KL} \quad \text{Mittlere Höhe der Kaltluft} \quad [\text{m}]$$

α	Neigung der Fläche	[°]
x_{KL}	Zurückgelegte Fließstrecke der Kaltluft	[m]

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle die Formel zur Berechnung des Kaltluftvolumens aufgeführt werden. Diese beinhaltet sowohl meteorologische als auch bodenphysikalische Parameter (HUPFER & KUTTLER 2005):

$$V_{KL} = \frac{\alpha_{ST} \times \varepsilon \times (a - b \times 10^{-c \times e}) \times (T_{KL} - T_B) \times \Delta t_Q \times A_F}{\rho \times c_p \times \Delta T_R} \quad [m^3] \quad \text{Gl. 11}$$

Dabei beschreibt:

V_{KL}	Kaltluftvolumen	[m ³]
ε	Emissionsgrad der Oberfläche	[-]
α_{ST}	Wärmeübergangskoeffizient	[W m ⁻² K ⁻¹]
a, b und c	Empirische Konstanten	[-]
e	Dampfdruck	[hPa]
T_{KL}	Temperatur der Kaltluft	[K]
T_B	Temperatur in Bodennähe	[K]
Δt_Q	Dauer der negativen Strahlungsbilanz	[s]
A_F	Ausstrahlungsfläche	[m ²]
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	Luftdichte	[kg m ⁻³]
ΔT_R	Abkühlungsbetrag der Luft durch Strahlung	[K]

Die verschiedenartigen Talbereiche mit Kaltluftkontakt im Laufe der Nacht lassen sich nach VDI in drei Klassen unterteilen: Kaltluftabfluss-, Kaltluftakkumulations- und Kaltluftstaugebiete (VDI 2003).

Tab. 1: Schematischer Überblick über die Eigenschaften der Kaltluftbereiche und des Kaltluftabflusses im Laufe der Nacht (nach VDI 2003, YOSHINO et al. 1981).

Topographie	Vorgang	Eigenschaften	Fließgeschwindigkeit	Fließrichtung	Mächtigkeit
Oberer Talbereich	Kaltluftproduktion	Pos. Korrelation zw. u_{KL} und T_{KL}	geländeabhängig intermittierend	hangabwärts	sehr gering < 10m
Mittlerer Talbereich	Kaltluftabfluss	T_{KL} und u_{KL} schwanken	groß 1 m/s ⁻¹ bis 3 m/s ⁻¹	hangabwärts	gering bis 10 m
Unterer Talbereich	Kaltluftabfluss	Neg. Korrelation zw. u_{KL} und T_{KL}	groß 1 m/s ⁻¹ bis 3 m/s ⁻¹	talabwärts	mittel 10 bis 50 m
Talsole / Becken	Kaltluftakkumulation	Pos. Korrelation zw. u_{KL} und T_{KL}	mittel 0,5 m/s ⁻¹ bis 1 m/s ⁻¹	talabwärts	mittel 10 bis 50 m
Hindernis	Kaltluftstau	Pos. Korrelation zw. u_{KL} und T_{KL}	gering < 0,5 m/s ⁻¹	keine definierte Richtung	groß 50 bis > 100 m

Im Laufe der Nacht kann es durch steigende Kaltluftmächtigkeiten und durch Kaltluftstau dazu kommen, dass ein Messpunkt in allen drei Vorgangsbereichen liegt (VDI 2003). Zudem weist jedes Stadium – in Tab. 1 nach YOSHINO et al. um die Kaltluftproduktionsfläche erweitert – typische Charakteris-

tika bezüglich der Fließgeschwindigkeit (u_{KL}) und -richtung, der Kaltluftmächtigkeit (h_{KL}) sowie der Zusammenhänge zwischen Temperatur der Kaltluft (T_{KL}) und der Fließgeschwindigkeit (u_{KL}) auf (VDI 2003, YOSHINO et al. 1981). Alle Eigenschaften sind in Tab. 1 zusammengefasst.

3.4 Kaltluft und Vegetation

Der Einfluss der Erdoberfläche auf die Kaltluftproduktion wurde bereits in Kap. 3.3 ausführlich beschrieben. An dieser Stelle soll daher die Betrachtung auf dem Einfluss eventuell vorhandener Oberflächenbedeckungen liegen. Dabei entsprechen die Eigenschaften des Strahlungsumsatzes – als Grundlage der Kaltluftbildung – der Bestandsoberfläche oder auch einzelner Elemente im Bestand, denen der Erdoberfläche (HUPFER & KUTTLER 2005), wohingegen das Mikroklima im Bestand sehr von einer vegetationslosen Fläche abweicht (HUPFER & KUTTLER 2005). Die höchsten Abkühlungsraten werden an der Bestandsoberfläche erreicht, da dort eine ungehinderte nächtliche Abstrahlung stattfinden kann, wohingegen in tiefer gelegenen Schichten des Bestandes die Strahlungsbilanz zunehmend ausgeglichener wird, da dort eine wechselseitige Beeinflussung der Bestandselemente stattfindet (HÄCKEL 1999).

Laut VDI ist der Einfluss der Oberflächenbedeckung auf die Kaltluftproduktion „abhängig von ihrem Flächenanteil an der Gesamtfläche sowie von der Art des Bestandsaufbaus (z.B. Wiesen-, Kraut-, Strauch- oder Baumvegetation)“ (VDI 2003:23). Dabei zeigt sich, dass der Bestand nachweisbar Einfluss auf die Strömungscharakteristika der Kaltluft nimmt (z.B. VDI 2003, YOSHINO 1984). Je dichter dabei die Vegetation in der Frischluftschneise ist, desto komplexer werden die Charakteristika des Kaltluftabflusses (UNSWORTH et al. 2004). Laut Yi sind die entscheidenden Parameter, die den Kaltluftabfluss beeinflussen, die Hangneigung, die Rauigkeit sowie die Blattdichte der Vegetation (Yi 2009). SÖDERSTRÖM und MAGNUSSON schreiben zu den Einflüssen von Vegetation, dass diese sehr schwer vorherzusagen sind (SÖDERSTRÖM & MAGNUSSON 1995).

An dieser Stelle soll zunächst bei den zu erklärenden Charakteristika von Vegetation auf den Kaltluftabfluss zwischen einer niedrigen Wiesen- oder Feldvegetation und einer hoch aufwachsenden Baumvegetation unterschieden werden. Diese beiden Bewuchsvarianten stellen für die vorliegende Arbeit die beiden Extreme dar. Selbstverständlich kommen alle Bewuchsformen, die zwischen einer kurzen Wiese und einem Wald liegen im Untersuchungsgebiet vor, die Einflüsse auf den Kaltluftstrom sind dann dementsprechend gemischt und variabel. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass zwar zur Erklärung der unterschiedlichen Bestandscharakteristika in der theoretischen Betrachtung von einer idealtypischen Wald- und Wiesenvegetation ausgegangen werden kann, es diese jedoch in der Natur nicht gibt. So ist zur abschließenden Klärung jede Bestandsfläche gesondert hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu betrachten (CORNFORD 1938).

Der Einfluss hochwachsender Baum und Buschvegetation war bereits Gegenstand einiger Untersuchungen (z.B. HORLACHER et al. 2012, PYPKER et al. 2007, UNSWORTH et al. 2004, KOMATSU et al. 2003, DEVITO & MILLER 1983, BERGEN 1969), wohingegen bei der Wiesenvegetation in der Literatur nur wenige Quellen zu finden sind (z.B. SCHWAB 2000, GROSS 1986, GEIGER 1950). Dies mag unter anderem da-

ran liegen, dass Kaltluftentstehungsgebiete in gegliedertem Gelände der mittleren Breiten oftmals aufgrund ihrer Topographie bewaldet sind, weil sie für die landwirtschaftliche Nutzung eher ungeeignet sind.

Aufgrund der Bestandshöhenunterschiede zwischen Wiese und Wald ergeben sich unterschiedliche mikroklimatische Prozesse während austauscharmer Strahlungswetterlagen. Im Falle hoch aufwachsender Vegetation (Wald) finden die größten Energieumsätze im Kronendach statt (z.B. VOGT 2001, BENDIX 2004, BAUMGARTNER 1956) was durch die hohe Temperaturamplitude im Tagesverlauf – wie aus Thermalbildern ersichtlich – belegt wird. Zwar ist die durchschnittliche Verdunstung am Kronendach am Tage höher als bei der Wiesenvegetation – was in der Theorie zu einer stärkeren Abkühlung der aufliegenden Luft führen würde – der Verdunstungseffekt wird jedoch durch die geringere Albedo kompensiert (VOGT 2001). Auch in der Nacht findet an der Bestandsobergrenze der Bäume eine verstärkte Evapotranspiration statt, höhere Rauigkeiten im Vergleich zur Wiese behindern jedoch das Absinken und Abfließen der Kaltluft (VOGT 2001, vgl. Kap. 3.3). Entscheidend für den Austausch von Kaltluft im Bestand sind vertikale Volumenflüsse, die im Falle hochwachsender Vegetation ausgeprägter sind, da das Bestandsvolumen größer ist. Dementsprechend ist das Volumen abzukühlender Luft größer und die Luft erreicht im Waldbestand nur geringere Abkühlungsraten. Daher kommt VOGT zu dem Schluss, dass zwar im Wald im Vergleich zur Wiese wärmere Kaltluft produziert, davon jedoch größere Mengen (VOGT 2001 nach GOSSMANN 1984). Der VDI unterscheidet bei der Kaltluftproduktion im Falle von Wald zwischen Waldbeständen in ebenem und geneigtem Gelände (VDI 2003). In der Ebene sinkt die Kaltluft ab und stagniert im Stammraum oder fließt als Waldwind aus dem Waldbestand heraus. Bei Waldbeständen in geneigtem Gelände fließt die Kaltluft gravitativ bedingt mit entsprechend höherer Geschwindigkeit dem Relief folgend aus dem Stammraum heraus (vgl. Kap. 3.3) und bedingt ein Nachströmen von Luft in den Stammraum. Diese ist oftmals aufgrund des schnellen Nachströmens nicht so stark abgekühlt, so dass Kaltluft im Stammraum der ebenen Fläche kälter ist (VOGT 2001 nach GOSSMANN 1984). Das beschriebene Phänomen spielt bei der Frostgefährdung von Obstbeständen und im Weinbau eine Rolle (BENDIX 2004). Dort werden oftmals Bergkuppen – z.B. von Weinbergen – aufgeforstet, um unkontrolliertes Abgleiten allzu großer Mengen sehr kalter Luft zu vermeiden (HÄCKEL 1999).

KOMATSU stellte bei einer Untersuchung in tropischen Klimaten fest, dass bei sehr dichtem Bewuchs nur sehr wenig Kaltluft in den Vegetationsbestand eindringt und der Abfluss der Kaltluft dementsprechend an der Bestandsoberfläche stattfindet (KOMATSU et al. 2003). Bei Vegetationsbeständen in mitteleuropäischen Klimaten findet sich eine so dichte Bestandsoberfläche in der Regel nicht. Bei für mitteleuropäische Klimate dichtem Bewuchs der Kaltluftbahn, kann es zu einer „Zweiteilung“ des Kaltluftabflusses kommen. So sinkt ein Teil der Kaltluft in den Bestand ein und fließt dort hangabwärts („sub canopy flow“), ein anderer Teil bleibt an der Bestandsoberfläche und fließt dort über die Oberfläche hinweg (FEZER 1995). Das Geschwindigkeitsprofil (vgl. Abb. 7) zeigt dementsprechend zwei Maxima der Fließgeschwindigkeit, eines etwas über der Erdoberfläche und eines an der Bestandsoberfläche (z.B. PYPKER et al. 2007, FOKEN 2006, BERGEN 1969), wobei die Kaltluft im Stammraum (trotz Hindernissen) konstanter (DEVITO & MILLER 1983), dafür aber langsamer fließt (HORLACHER et al. 2012). Bestandstypische Vertikalprofile finden sich bei DEVITO & MILLER (DEVITO & MILLER 1983)

3. Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss

und GROSS (GROSS 1986, vgl. Abb. 8). Nach GEIGER finden sich in einem mitteldichten Waldbestand, in dem Teile der Kaltluft an der Kronenoberfläche verbleiben und Teile zum Erdboden absinken, eher geringe vertikale Temperaturunterschiede (GEIGER 1950) aufgrund der guten Durchmischung der Luft (UNSWORTH et al. 2004).

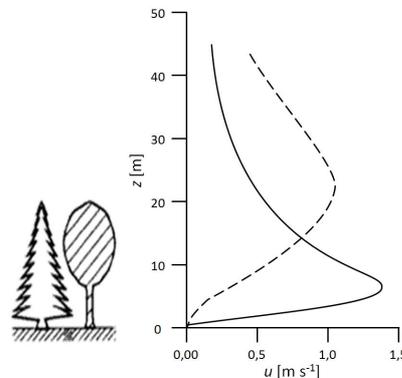


Abb. 8: Vertikalprofil katabatischer Winde hinter einem Vegetationsbestand (gestrichelte Linie) und nach der Rodung (durchgezogene Linie) (nach GROSS 1986).

Kommt es zur Ausbildung eines Kaltluftabflusses über dem Kronenraum, so fließt die kalte Luft bis zum Waldrand und sinkt dort zu Boden. Durch das beschriebene Phänomen kann es in Tälern, in denen der obere Talbereich baumbestanden ist, zu höheren Windgeschwindigkeiten kommen, als in unbewaldeten Tälern, da die Höhe des Baumbestandes zum Gesamtgefälle hinzuaddiert werden muss (GEIGER 1950).

GROSS untersuchte mit Hilfe von Modellen die Auswirkungen von Vegetationsänderungen in der Kaltluftbahn. Dabei verglich er eine bewaldete Fläche mit einer unbewaldeten, grasbestandenen Fläche (GROSS 1986). Die Modellergebnisse unterstreichen die oben beschriebenen Messungen und Beobachtungen (z.B. FEZER 1995, PYPKER et al. 2007, FOKEN 2006, BERGEN 1969) eines Geschwindigkeitsmaximums des Kaltluftabflusses über dem Kronenraum. Der Modelllauf einer unbewaldeten Fläche zeigt demnach höhere Windgeschwindigkeiten in Bodennähe sowie eine durch den „schnelleren“ Abfluss verringerte Kaltluftmächtigkeit (GROSS 1986).

DEVITO & MILLER untersuchten unterschiedliche Belaubungszustände in der Baumvegetation hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Kaltluftbahn. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass in der unbelaubten Zeit die Kaltluft rasch in den Stammraum absinkt und dort durch die Baumkronen geschützt eine stabile Schichtung ausbilden kann (SMITH et al. 2010, DEVITO & MILLER 1983). Ein unbelaubter Baumbestand kann demnach in Kaltluftbahnen, in denen ansonsten eine regelmäßige Störung des Kaltluftstromes durch Einmischung der synoptischen Strömung auftritt, zu konstantem Kaltluftabfluss beitragen. Ähnliche Effekte wie die oben beschriebenen in unbelaubtem Wald finden sich laut GEIGER in einem Waldbestand mit sehr lockerer Bestandsoberfläche. Dort finden sich die niedrigsten Temperaturen in Nähe der Erdoberfläche (GEIGER 1950). Aufgrund der jahreszeitlichen Belaubungsunterschiede stellen sich die zu messenden Windgeschwindigkeiten in einem Vegetationsbestand sehr unterschiedlich dar. So geben RINGHOF & HENNINGER bei einer modellierten Blattflächendichteveränderung ($1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$) eine um $0,8 \text{ m s}^{-1}$ reduzierte Windgeschwindigkeit des Kaltluftabflusses an, was bei maxi-

malen Fließgeschwindigkeiten von bis zu 3 m s^{-1} eine erhebliche Reduktion darstellt (RINGHOF & HENNINGER 2010).

Waldflächen erfüllen nicht nur eine wichtige Funktion im Hinblick auf die Produktion kalter Luft, sondern auch unter lufthygienischen Gesichtspunkten. Das liegt vor allem am Filterpotenzial der Blätter, von denen feste und gasförmige Schadstoffe gebunden werden (ESCOBEDO et al. 2011, PRYOR et al. 2008). Zudem bedingt die erhöhte Rauigkeit im Bereich des Waldes eine gute Durchmischung der Luft (HAVLIK & KETZLER 2000), da Äste und Blätter zur Bildung von Wirbeln führen (HÄCKEL 1999).

An dieser Stelle bleibt anzumerken, dass es eine Reihe weiterer Untersuchungen hinsichtlich des Strömungsverhaltens von Wind in Waldbeständen gibt (z.B. DUPONT et al. 2008, POGGI et al. 2008, YANG et al. 2006, BALDOCCI & MEYERS 1989). Da es sich dabei jedoch nicht um thermisch induzierte Luftströmungen handelt, bedingt das Fließverhalten bei höheren Windgeschwindigkeiten auch zum Teil andere Effekte, die durch Vegetation hervorgerufen werden. Aus diesem Forschungsbereich sind demnach keine Ansätze für die vorliegende Arbeit verwandt worden.

Bei der Wiesenvegetation entstehen ähnliche Effekte wie bei hoch aufwachsender Vegetation, allerdings in sehr viel kleinerem Maßstab. Auch dort fließt je nach Dichte des Bestandes die Kaltluft an der Bestandsoberfläche ab oder sinkt in den Bestand ein (SCHWAB 2000, GEIGER 1950). Mikroklimatische Prozesse zum Strömungsverhalten von Kaltluft in der Wiesenvegetation sind in der Literatur sehr unterrepräsentiert. Das mag zum einen daran liegen, dass Wiesen in der Regel eine so große Dichte aufweisen, dass der überwiegende Teil der Kaltluft an der Bestandsobergrenze abfließt. Zum anderen sind derartige mikroklimatische Effekte empirisch nur sehr schwer zu erfassen, da die Fließgeschwindigkeit inner- und auch oberhalb des Bestandes je nach Geländeneigung sehr gering ist. Ein weiteres Problem mikroklimatologischer Messungen in der Empirie ist die starke Veränderung des Bestandes durch das bloße Einbringen von Messgeräten (FOKEN 2006). CORNFORD zeigt – wie aus Abb. 9 ersichtlich – in einer Untersuchung den oben angesprochenen Kaltluftabfluss an der Bestandsobergrenze am Beispiel eines Weizenfeldes (CORNFORD 1938).

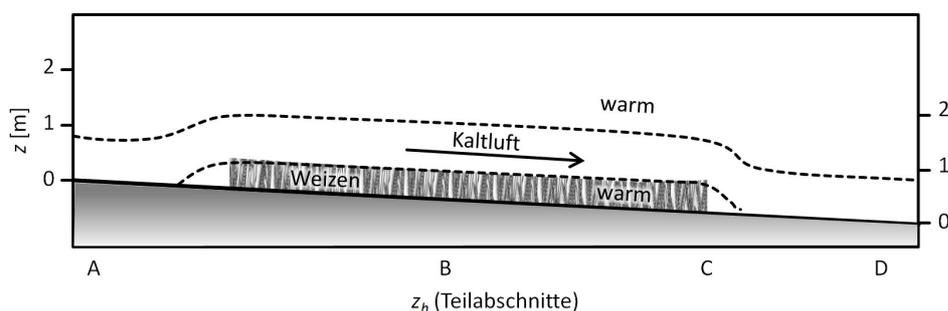


Abb. 9: Temperaturprofile während Kaltluftabflussbedingungen über einem Weizenfeld und vegetationslosem Ackerland (nach CORNFORD 1938).

In Bereich A befindet sich die kälteste Luft an der Erdoberfläche. Beim Auftreffen auf den Bestand kommt es zu einem Aufgleiten der Kaltluft, so dass im Bestand höhere Temperaturen vorherrschen als direkt an der Bestandsobergrenze (B). Im Bereich C sinkt die Kaltluft dann wieder bis zur Erdoberfläche. Die schematische Darstellung nach CORNFORD zeigt das Fließverhalten der Kaltluft stark gene-

ralisiert, hinzu kommen mikroklimatische Strömungsprozesse im Bestand selbst. Messungen bei nicht inversiver Schichtung der Atmosphäre im Weizenbestand zeigen steigende Windgeschwindigkeiten mit zunehmender Bestandshöhe, was der Annahme für das Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft spricht (SHAW et al. 1974). Ein ähnliches Phänomen wie das Überströmen des Weizenbestandes passiert bei einem dichten Heckenbestand. Steht dieser isoliert und nicht flächig, so kommt es aufgrund der größeren vertikalen Erstreckung zunächst zu einem messbaren Kaltluftstau. Dichte Heckenbestände sind so in der Lage Kaltluft zu stauen und frostempfindliche Vegetationsbereiche zu schützen (z.B. QUENOL et al. 2008).

Bezüglich des Strömungsverhaltens der Kaltluft weisen unterschiedliche Bestandsarten konsequenterweise unterschiedliche Charakteristika auf (PYPKER et al. 2007). Wohingegen bei niedrigen Wiesenbeständen die Bestandsoberfläche zugleich die Abflussfläche für die Kaltluft bildet, so muss der Bestand bei hoch aufwachsender Baum- oder Buschvegetation durch-, um- oder überflossen werden. Bei der Durchströmung von Vegetation entsteht dabei dynamische Turbulenz, „wodurch sich der Volumenstrom im bodennächsten Niveau vermindert und horizontale oder vertikale Verlagerungen des Strömungsmaximums erfolgen können“ (VDI 2003:36). Die Windgeschwindigkeiten im Bestand variieren demnach mit der Höhe stark (BALDOCCI & MEYERS 1989). „Die leeseitige Reichweite dieser Störungen ist abhängig von der vertikalen Erstreckung und der Geschwindigkeit der Kaltluft, vom Turbulenzgrad sowie von Größe und Form der Hindernisse“ (VDI 2003:36).

Der Abfluss der Kaltluft ist intermittierend, wobei die Kaltluftpakete in sehr unterschiedlichen Intervallen nachgewiesen wurden (VOGT 2001). Mikroskalig kann man sich den Kaltluftabfluss laut OKE und YOSHINO wie folgt vorstellen: Über der Erdoberfläche bilden sich „Kaltluftlinsen“ in einem sie umgebenden wärmeren Luftpaket (YOSHINO 1984). Diese Linsen wachsen im Luv eines Hindernisses so lange an, bis sie das Hindernis, das sie an dem gravitativ bedingten Hangabwärtsfließen hindert, überströmen (OKE 2006a, YOSHINO et al. 1981). Das Hindernis kann dabei noch so klein sein, beispielsweise in Form eines Grasbüschels. Der Ablauf – für ein kleines Hindernis beschrieben – findet sich auch mit wachsender Größe der Hindernisse wieder. So finden sich auch in großen Kaltluftabflüssen intermittierende Tendenzen (vgl. Ergebnis in Kap. 6.2.7). FRANKE & TETZLAFF schreiben das intermittierende Verhalten im Kaltluftabfluss Turbulenzen zu, die nach dem Überschreiten einer kritischen Fließgeschwindigkeit in der zunächst gleichmäßig fließenden Strömung entstehen (FRANKE & TETZLAFF 1987). Kaltluftabflüsse mit hohen Fließgeschwindigkeiten haben aufgrund der Turbulenzen daher ein eher einheitliches Temperaturniveau (HAVLIK et al. 2000). SOLER et al. stellten in einer Untersuchung auf einem etwa 1° geneigtem Gelände fest, dass der aufgrund der geringen Neigung langsam fließende Kaltluftstrom sehr wenig Turbulenzen aufwies, weil innerhalb der Kaltluft eine sehr ausgeprägte stabile Schichtung vorzufinden war (SOLER et al. 2002). Auch dort befand sich – wie bereits beschrieben – die Kaltluft im hochwachsenden Baumbestand in Bodennähe. Turbulenzen entstanden nur dann, wenn die Kaltluft Äste oder den Stamm eines Baumes umfließen musste (PYPKER et al. 2007). HORST & DORAN beschreiben die Turbulenz als höhenabhängige Variable. So nimmt diese mit zunehmendem Abstand von der Erdoberfläche aufgrund abnehmender Rauigkeit ab und erreicht ihr Minimum im Bereich größter Kaltluft-Volumenströme. Danach nimmt die Turbulenz mit der Höhe zu, wobei die Zunahme von der Richtung und Windgeschwindigkeit des synoptischen Windes abhängig

ist (HORST & DORAN 1986). Die Eigenschaften abfließender Kaltluft dürfen keineswegs mit denen von Wasser verglichen werden (GEIGER 1050), vielmehr beschreibt HÄCKEL die abgekühlte Luft als „zähen Brei“, die in Schüben „abtropft“ (HÄCKEL 1999:314). Die Ergebnisse verschiedener Messungen in Kap. 6.2.7 werden zeigen, dass dieses intermittierende Fließverhalten messtechnisch nachweisbar ist.

Da – durch den anthropogenen Klimawandel verursacht – die Vegetationsperiode in ganz Deutschland immer früher beginnt, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Vegetation auf Kaltluftabflüsse mit steigenden Lufttemperaturen zunehmen wird. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise der Einfluss von Belaubung zu nennen (vgl. DEVITO UND MILLER 1983), die dann entsprechend der Verschiebung der Vegetationsperiode früher an der Pflanze vorhanden ist. Im Jahr 2012 begann die Vegetationsperiode in der Region Aachen ca. 10 Tage früher als der Normalwert der Referenzperiode von 1961 bis 1990 (DWD 2012a). Durch einen erhöhten Belaubungszustand werden große Unterschiede in der Abflussmenge und der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft verursacht, wie verschiedene Auswertungen in Kap. 6 und Kap. 7 zeigen.

Ebenso wie die Wirkung von Vegetation auf Kaltluftentstehung und –abfluss, so kommt es auch zu einem umgekehrten Wirkungsbezug. So ist anhand der Vegetation ablesbar wo es zu temporärem Kaltluftabfluss und vor allem zu Kaltluftstau kommt. FREY & LÖSCH beschreiben in diesem Zusammenhang eine „temperaturabhängige Umkehr in der Höhenzonierung der Vegetation, mit Koniferenbewuchs in den tieferen Bereichen und Laubbaumbeständen an den höheren Talhangabschnitten“, die mitunter im alpinen Raum zu einer inversen Baumgrenze führen kann (FREY UND LÖSCH 2010:202).

3.5 Hindernisse in der Luftleitbahn

Jedes Hindernis bildet eine Störung im Strömungsfeld (des Windes und der Kaltluft) und verursacht so komplexe Charakteristika (z.B. OERTEL 2008). Da in der Kaltluftabflussbahn selten einzelne isolierte Hindernisse, sondern vielmehr verschiedene Hindernisstrukturen auftreten, unterscheidet sich das Strömungsfeld von Landschaftsabschnitt zu Landschaftsabschnitt und macht eine für jeden Einzelfall isolierte Betrachtung notwendig (Oke 2006a). Die wichtigsten einflussnehmenden Größen sind Art, Höhe und Form des Hindernisses (z.B. WARNECKE 1997). In Kap. 3.5 wird systematisch erfasst, welche topographischen, vegetationsbedingten und bautypologischen Eigenschaften Strömungsveränderungen im Windfeld auslösen können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der mikroklimatischen Betrachtung zum besseren Verständnis der Ergebnisse in Kap. 6 und Kap. 7. Zudem werden die allgemeingültigen Strömungscharakteristika in Bezug zum Kaltluftabfluss gesetzt. Da Kaltluft nicht wie Wasser, sondern eher viskos und zäh fließt und dazu noch intermittierende Tendenzen und geringe Fließgeschwindigkeiten aufweist (vgl. Kap. 3.3), finden sich die typischen Strömungscharakteristika in der Kaltluft in der Regel nicht in derart ausgeprägter Form wie beschrieben.

In Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12 sind die vereinfachten, generalisierten Grundformen der Beeinflussung dargestellt. Da in der Natur kaum einfache Strukturen wie die Beschriebenen vorzufinden sind, sind die Auswirkungen dort wesentlich komplexer. Zu den häufigsten, kleinräumigen Effekten der Strömungsfeldbeeinflussung zählen Luv und Lee-Wirbel sowie Düseneffekte. Von einem Düseneffekt

spricht man dann, wenn eine durch Strömungsraumverengung hervorgerufene Windgeschwindigkeitszunahme über die ungestörte Windgeschwindigkeit hinaus erfolgt (VDI 1988). Luv- und Lee-Wirbel sind durch Luftdruckunterschiede – die durch den Winddruck auf das Hindernis ausgelöst werden – entstehende Strömungen vor bzw. hinter dem Strömungshindernis (OKE 2006a, BENDIX 2004). Trotz geringer Strömungsgeschwindigkeiten können diese Effekte in abgeschwächter Form durch hangabwärtsströmende Kaltluft hervorgerufen werden (vgl. Kap. 6). Sind die Hindernisstrukturen nur schwach ausgebildet, erfolgt zwar eine Beeinflussung des Windfeldes, es kommt jedoch wenn überhaupt nur zu geringen Ausprägungen von Turbulenzen und Wirbeln. Sind Vollformen stark ausgeprägt, oder finden sich markante Geländestufen, so kommt es zur Ausbildung von Luv- oder Leewirbeln. Spalte A in Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12 zeigt das Strömungsfeld des Windes aus horizontaler Sicht, Spalte B aus vertikaler Sicht. Die bislang bekannte Systematik wurde um Spalte C ergänzt, um die topographischen Eigenschaften in geneigtem Gelände unter Bedingungen des Kaltluftabflusses darzustellen. Gestaute Kaltluft ist schraffiert dargestellt. Dabei wird vor allem die Kaltluftobergrenze schematisch wiedergegeben. Messungen und vor allem Rauchversuche zeigen eine konkave Form der Kaltluftobergrenze im Staubereich sowie eine Aufwölbung im Bereich des Hindernisses (z.B. KING 1973).

Zur Erstellung der folgenden Systematiken in Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12 zur Veränderung von Luftströmungen durch Hindernisse wurden verschiedene Quellen aus der Literatur herangezogen. Das umfassendste Werk stammt dabei sicherlich von OKE, weitere Quellen stammen z.B. von OERTEL, BENDIX, HÄCKEL sowie dem VDI (OERTEL 2008, OKE 2006a, BENDIX 2004, HÄCKEL 1999, VDI 1988). Spalte C in Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12 wurde anhand von Literaturquellen und empirischen Erkenntnissen, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie gewonnen wurden, ergänzt.

Hinsichtlich der Beeinflussung des Windfeldes durch topographische Strukturen lassen sich zunächst Vollformen wie Hügel oder Mulden von Geländestufen mit einseitiger Geländeerhöhung oder -absenkung unterscheiden (Abb. 10). Für das Windfeld ist von entscheidender Bedeutung, wie stark diese Strukturen ausgeprägt sind. Als Folge des Kontinuitätsprinzips ist das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit und durchströmtem Querschnitt konstant, was dazu führt, dass bei Verringerung des Querschnitts die Strömungsgeschwindigkeit hoch und bei Vergrößerung niedrig ist (HÄCKEL 1999).

Die jeweiligen Strömungsbeeinflussungen – wie in den Spalten [A] bis [C] in Abb. 10 dargestellt – lassen sich wie folgt beschreiben:

- [a] Im bodennahen Bereich kommt es durch erhöhten Luftdruck zu einer leichten Erhöhung der Windgeschwindigkeit an der höchsten Stelle der Erhebung [Aa]. Zudem kommt es zu einer leichten seitlichen Ablenkung des Windes beim Überströmen des Hindernisses [Ba]. Findet sich eine derart schwach ausgeprägte Erhebung in geneigtem Gelände so wird sie von der abfließenden Kaltluft überströmt [Ca]. Dabei kommt es je nach Geländeneigung zu sich verändernden Fließgeschwindigkeiten.
- [b] Vor der Erhebung kommt es zu einem Stau und damit zu einer Luftdruckerhöhung. Die Luft weicht daher im Luv des Hindernisses in eine Gegend niedrigeren Druckes aus, das heißt im Falle von [Ab] nach oben und unten sowie im Fall [Bb] zu den Seiten. Unten am Hang ent-

steht dadurch ein Luv-Wirbel, auf der Erhebung entstehen höhere Windgeschwindigkeiten. Hinter der Erhebung entsteht durch sinkende Windgeschwindigkeiten ein Lee-Wirbel (vgl. OERTEL 2008). Ist die Erhebung in geneigtem Gelände sehr exponiert und weist die abfließende Kaltluft entsprechend geringe Mächtigkeiten auf, wird das Hindernis nur um- und nicht überströmt [Bb]. Bei geneigtem Gelände ohne seitliche Abflussmöglichkeiten kommt es im Luv der Erhebung zu einem Kaltluftstau [Cb]. Erreicht die Höhe der aufgestauten Kaltluft die Höhe des Hindernisses, kommt es zum Überfließen. Dabei erhöht sich kurzzeitig die Fließgeschwindigkeit, bevor sie in der Ebene wieder abnimmt (KING 1973).

- [c] Bei einer leicht ausgebildeten Senke kommt es am Grund dieser zu einer Reduktion der Windgeschwindigkeit [Ac]. Bezieht man diese Grafik auf ein Tal, so lässt die Höhe der Tal Schulter und die Talbreite einen Rückschluss über das Verhalten des synoptischen Windes bei stabiler Schichtung zu (vgl. Abb. 4 und Gl. 4). Ist der talabwärtsgerichtete Hang der Senke in geneigtem Gelände nicht höher als der tiefste Punkt der Senke, so wird diese von der Kaltluft durchströmt, ohne dass sich ein Kaltluftstau bildet [Cc]. Wie in [Bc] gezeigt erfolgt dann eine horizontale Ablenkung der Kaltluft in Richtung der tiefsten Stelle der Senke mit leicht erhöhten Fließgeschwindigkeiten durch das Gefälle.
- [d] Beim Überströmen einer tiefen Senke und ausreichenden Windgeschwindigkeiten bildet sich in dieser ein Lee-Wirbel durch niedrigeren Luftdruck über der Senke [Ad]. Im Falle einer Vollform in geneigtem Gelände [Cd] bildet sich in der Senke ein Kaltluftsee mit sehr stabiler Schichtung und sehr niedrigen Temperaturen. Sensible Vegetation im Bereich der Senke wird agroklimatisch als frostgefährdet bezeichnet (vgl. Kap. 3.4). Ist die Senke vollständig mit Kaltluft gefüllt, wird sie von nachfolgender Kaltluft überflossen (KING 1973). YU spricht in diesem Zusammenhang von einem „katabatic flow jump“. Im dem Bereich, wo abfließende Kaltluft auf gestaute Kaltluft trifft, kommt es zu Turbulenz (YU 2006).
- [e] Bei der Geländestufe (Erhebung) kommt es am Fuße der Erhebung zu sinkenden Windgeschwindigkeiten, am höchsten Punkt des Hanges zu erhöhten Windgeschwindigkeiten [Ae]. Bei vertikaler Betrachtung des Strömungsfeldes sind kaum Ablenkungen zu erkennen [Be]. In geneigtem Gelände unter Kaltluftabflussbedingungen [Ce] wird die Geländestufe wie in Fall [Ca] überströmt.
- [f] Ähnlich wie im Fall [Ab] entsteht vor einer stark ausgebildeten Geländestufe aufgrund von Druckunterschieden ein Luv-Wirbel und auf der Geländestufe ein Lee-Wirbel [Af]. Bei vertikaler Betrachtung des Strömungsfeldes sind keine Ablenkungen zu erkennen [Bf]. In geneigtem Gelände findet sich im Luv ein Kaltluftstau mit Ausbildung eines Kaltluftsees [Cf].
- [g] Bei der Geländestufe kommt es am höchsten Punkt des Hanges zu erhöhten Windgeschwindigkeiten und am Fuße der Geländestufe zu sinkenden Windgeschwindigkeiten aufgrund von Druckunterschieden [Ag]. Im Falle von Kaltluftabfluss in geneigtem Gelände kommt es dagegen zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit hinter der Geländestufe, da hier die Geländeneigung ausschlaggebend ist [Cg].
- [h] Bei einer ausgeprägten abfallenden Geländestufe [Ah] entsteht ein Lee-Wirbel (vgl. [Ab]). Man spricht bei dieser Art des Überströmens von einem Überfallwind (HÄCKEL 1999). Im Falle von Kaltluftabfluss mit hohen Fließgeschwindigkeiten findet sich bei sehr ausgeprägten Geländestufen eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit beim Überströmen [Ch].

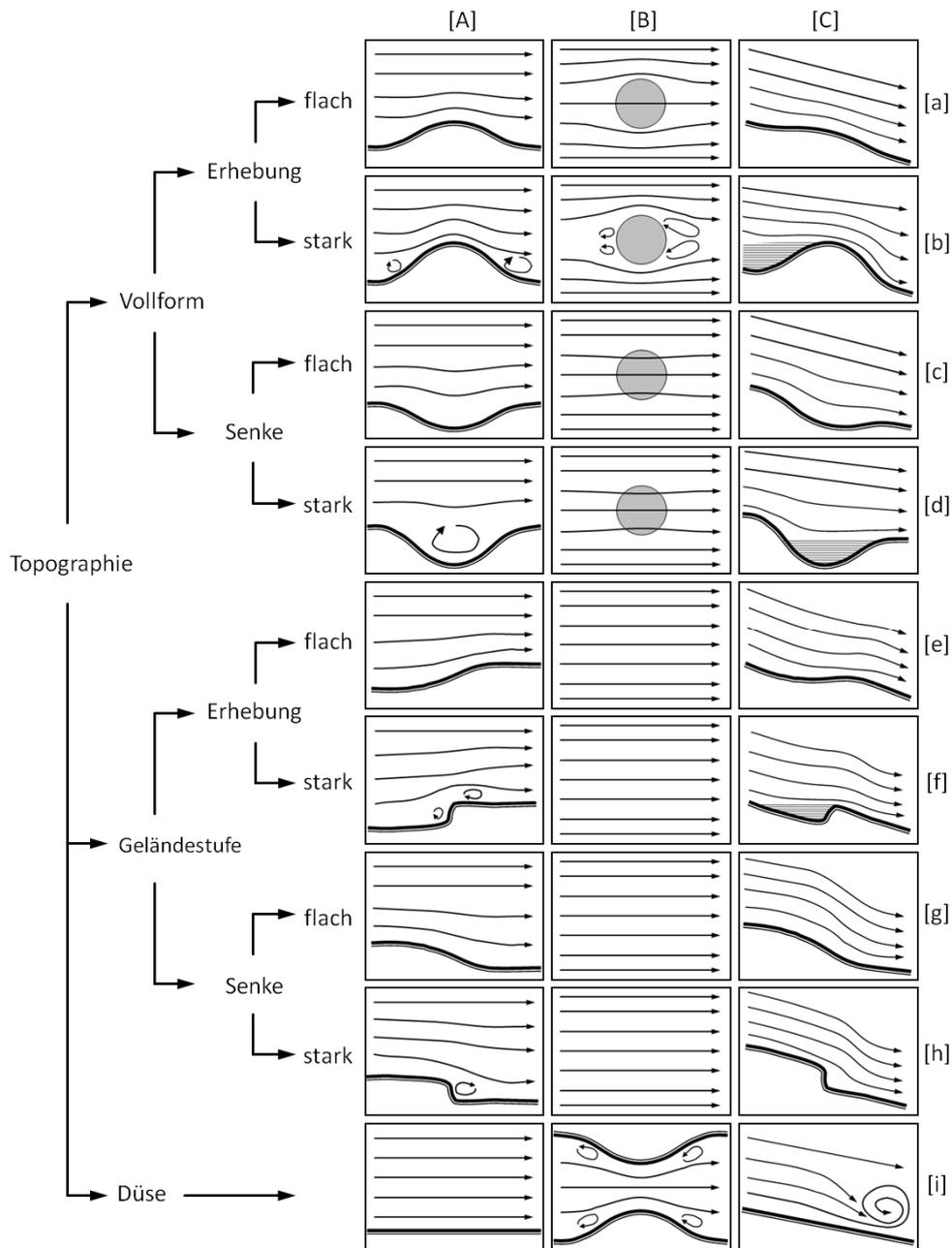


Abb. 10: Beeinflussung des Windfeldes durch topographische Begebenheiten aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Kaltluftabflussbedingungen in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a).³

[i] Die Düse führt zu hohen Windgeschwindigkeiten mit einem Maximum an der engsten Stelle [Ai] (HÄCKEL 1999). Diese Art von Düsen lassen sich in der Empirie oft in Folge von Windbrü-

³ Die Spalten A und B der Abb. 10 wurden nach dem Vorbild bereits vorhandener Literaturquellen erstellt, die im Text angegeben wurden. Spalte C wurde weitestgehend durch den Autor erstellt, wobei die zu Grunde liegenden Annahmen teilweise aus den angegebenen Literaturquellen stammen. Insofern eine entsprechende Abbildung in der Literatur zu finden war, ist die Quelle im Text angegeben. Selbiges gibt für Abb. 11 und Abb. 12.

chen feststellen (z.B. SCHWARTZ et al. 1995, LOEFFLER et al. 1992, BEAN et. al. 1975). In Bezug auf die träge fließende Kaltluft kann es laut BENDIX an dieser Stelle zu kurzzeitigen Unterbrechungen des Kaltluftabflusses kommen (BENDIX 2004). Voraussetzung ist jedoch eine ausreichende Einengung des Luftstromes durch die Düse. [Ci] zeigt ergänzend das Fließverhalten von Kaltluft auf geneigtem Gelände. Schiebt sich die Kaltluft unter wärmere Umgebungsluft so kommt es aufgrund der Reibung dort zur Ausbildung eines Rotors mit entsprechendem Drehsinn (BENDIX 2004, WARNECKE 1997).

Eine Systematik von Strukturen in Form von Vegetation die das Windfeld beeinflussen ist in Abb. 11 dargestellt. Demnach lässt sich das Fließverhalten je nach Einzelbestand oder Flächenbestand unterscheiden. Hinzu kommen wie bei den topographischen Strukturen Düseneffekte, die durch Vegetation hervorgerufen werden können.

Die jeweiligen Strömungsbeeinflussungen – wie in den Grafiken in Abb. 11 dargestellt – lassen sich wie folgt beschreiben:

- [a] Durch das dichte Hindernis wird die Luft zur Überströmen gezwungen. Dabei bilden sich aufgrund von Luftdruckunterschieden (vgl. Abb. 10 [Ab]) sowohl Luv- als auch Lee-Wirbel [Aa]. Die Strömung erreicht nach überfließen des Hindernisses relativ schnell wieder die alte Form, da durch die intensiv ausgebildete Zone niedrigen Luftdrucks im Lee der Vegetation, die überströmende Luft wieder schnell in Bodennähe strömt (OKE 2006a). Oftmals interessieren im Zusammenhang mit dem oben beschriebenen Strömungsverhalten die Akkumulationsmaxima von Schnee hinter einem Vegetations- oder Gebäudebestand, da sich durch gezielte Anpflanzung oder Bebauung das Ablagern von verwehtem Schnee steuern lässt. Sensible Bereiche wie Straßen können so freigehalten werden (OKE 2006a). In geneigtem Gelände kann sich im Luv der Vegetation (wenn diese flächig, wenig porös ist und nicht umströmt werden kann) ein Kaltluftsee bilden [Ca]. Dabei wird jedoch bei Vegetationsbeständen in Mitteleuropa keine derartige Dichte erreicht, dass der Kaltluftabfluss in der Gänze unterbrochen wird. Vielmehr sickern kontinuierlich geringe Mengen Kaltluft durch den Vegetationsbestand (vgl. Kap. 3.4). Ist die Kaltluft bis zur Oberkante des Hindernisses aufgestaut, wird dieses überströmt. Durch den Höhenunterschied kommt es zu steigenden Fließgeschwindigkeiten.
- [b] Ein weniger dichter Vegetationsbestand wird von der Luft durchströmt und braucht eine gewisse Zeit (länger als im Fall [Aa]) um wieder das ursprüngliche Strömungsverhalten anzunehmen [Ab]. Dies liegt an reduzierten Windgeschwindigkeiten im Bestand, so dass die Luft nach Durchströmen dessen zunächst wieder an Geschwindigkeit gewinnen muss (OKE 2006a). Beim vertikalen Blick auf das Strömungsfeld finden sich vegetationsbedingte Ablenkungen [Bb]. Auch unter Kaltluftabflussbedingungen wird die Vegetation durchströmt und es finden sich reduzierte Fließgeschwindigkeiten [Cb]. Generell sinkt die Menge der umgelenkten Luft mit abnehmender Windgeschwindigkeit (VOGT et al. 2003).
- [c] Flächige Bestände geringer Höhe werden überströmt [Ac]. Luv und Lee-Wirbel bilden sich analog zu Fall [Aa]. Kommt es zu einer Einengung des Luftstromes durch dichte Vegetationsbestände kommt es unter Umständen zu hohen Windgeschwindigkeiten [Bc]. Durch Luft-

druckunterschiede und (die Rauigkeit der Bestandsgrenze) kann es sowohl vor als auch nach der Engstelle im randlichen Bereich zur Wirbelbildung kommen (Luv- und Lee-Wirbel). In geneigtem Gelände und geringer Vegetationshöhe sinkt die Kaltluft zwar in dichte Vegetationsbestände ein, der Abfluss findet jedoch überwiegend an der Bestandsoberfläche statt [Cc] (vgl. Abb. 9).

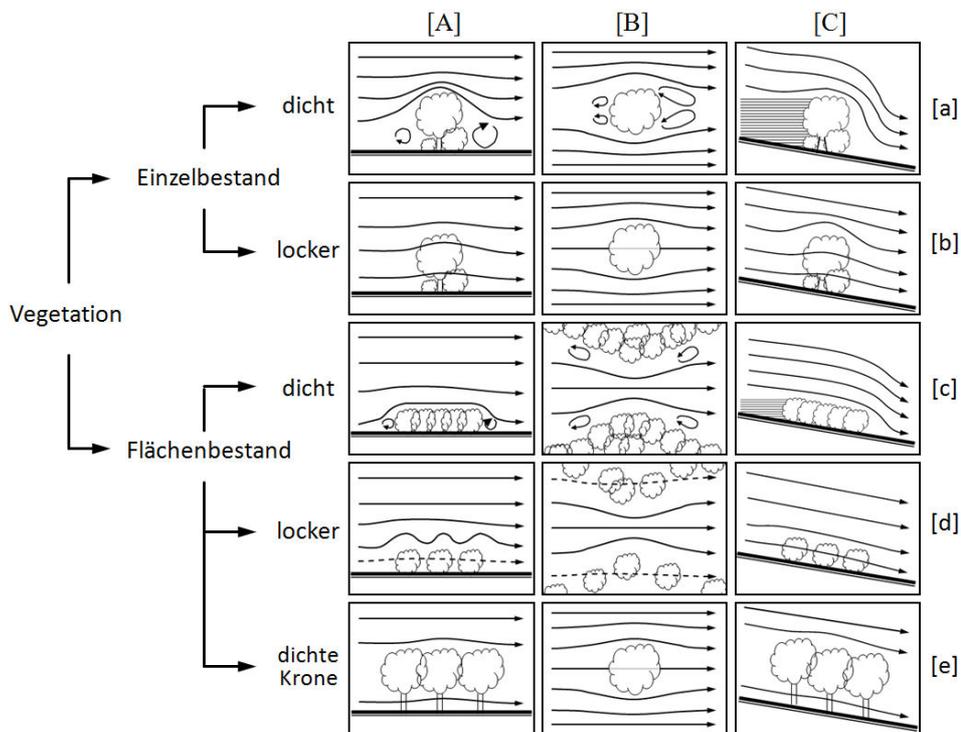


Abb. 11: Beeinflussung des Windfeldes durch Vegetationsstrukturen aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Bedingungen des Kaltluftabflusses in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a (siehe Fußnote 2)).

- [d] Findet sich ein lockerer Vegetationsbestand in Bodennähe, so kann die Luft diesen durchströmen [Ad]. Aufgrund einer ständig wechselnden Höhe der Bestandsoberfläche kann es zu Turbulenz kommen. Unter Kaltluftabflussbedingungen findet analog zu Fall [Cb] eine Durchströmung mit reduzierten Fließgeschwindigkeiten statt [Cd]. Kommt es zu einer Einengung des Kaltluftstromes durch Vegetationsbestände, die aber anders als in Fall [Bc] durchströmt werden können, kommt es unter Umständen zu höheren Windgeschwindigkeiten im Bereich der Verengung [Bd]. Die Ausbildung von Luv- oder Lee-Wirbeln ist in diesem Zusammenhang nicht bekannt. Je nach Fließverhalten der Kaltluft und Breite der Verengung kann es im Gegenteil auch zu kurzzeitigen Unterbrechungen des Kaltluftabflusses kommen (BENDIX 2004).
- [e] Charakterisiert sich ein Vegetationsbestand durch einen offenen Stammraum und einen darüber liegenden geschlossenen Kronenraum, so wird die Krone oberhalb und unterhalb durchströmt [Ae]. Gleiches findet sich in geneigtem Gelände, der Kaltluftabfluss ist dann zweigeteilt [Ce]. Ein Maximum der Fließgeschwindigkeit befindet sich oberhalb des Kronenraumes und ein zweites im Stammraum (sub canopy flow) (z.B. PYPKER et al. 2007).

Ähnlich wie bei Hindernissen in Form von Vegetation bilden sich beim Auftreffen des Kaltluftabflusses auf Bebauung typische Charakteristika des Windfeldes heraus, die in der Folge beschrieben werden (Abb. 12). Demnach lässt sich die Strömungsbeeinflussung wie in Abb. 11 nach Einzelbestand oder Flächenbestand unterscheiden. Hinzu kommen wie bei den topographischen und vegetationsbedingten Strukturen Düseneffekte durch enge Bebauung.

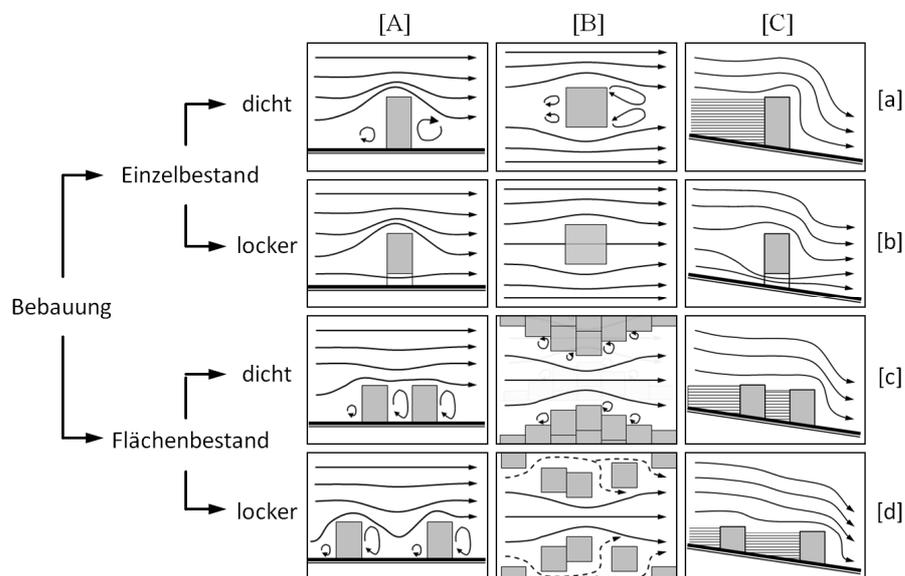


Abb. 12: Beeinflussung des Windfeldes durch Bebauungsstrukturen aus horizontaler [A] und vertikaler [B] Sicht sowie unter Bedingungen des Kaltluftabflusses in geneigtem Gelände [C] (Eigene Darstellung nach z.B. OKE 2006a (siehe Fußnote 2)).

- [a] Vor dem Baukörper kommt es zu einem Windstau und damit zu einer Luftdruckerhöhung. Die Luft weicht daher im Luv des Hindernisses in eine Gegend niedrigeren Druckes aus, das heißt im Fall [Aa] nach oben und unten sowie im Fall [Ba] zu den Seiten. Dadurch entstehen die abgebildeten Luv-Wirbel. Hinter dem Baukörper entsteht durch sinkende Windgeschwindigkeiten ein Lee-Wirbel. OKE spricht in diesem Zusammenhang von „isolated roughness flow“ (OKE 2006a), in der deutschsprachigen Literatur spricht man von einer „isolierten Rauigkeitsströmung“ (GROMKE 2009). Bei geneigtem Gelände ohne seitliche Abflussmöglichkeiten kommt es im Luv des Baukörpers zu einem Kaltluftstau [Ca]. Erreicht die Höhe der aufgestauten Kaltluft die Höhe des Hindernisses kommt es zum Überfließen, wobei die Fließgeschwindigkeit zunimmt. KING wies das starke „Herabfallen“ der Kaltluft hinter einer Folienwand nach (KING 1973).
- [b] Wird ein Gebäude auf Säulen/Stelzen errichtet, so kann die Luft das Hindernis nicht nur um- und überfließen, sondern auch „unterfließen“ [Ab]. Die Konsequenz sind erhöhte Windgeschwindigkeiten im bodennahen Windfeld des Gebäudes, was wiederum im Hinblick auf den Aufenthaltskomfort für den Menschen als eher ungünstig einzustufen ist. Hinsichtlich der Auswirkung auf fließende Kaltluft ermöglicht es dieser jedoch ein Abfließen ohne Ausbildung eines Kaltluftsees (unter Umständen mit Ausbildung eines Kaltluftstaus) auf der Luvseite des Gebäudes [Cb]. Aus diesem Grund findet diese Art der Bebauung Berücksichtigung bei der Planung von Neubauten in kaltluftrelevanten Luftleitbahnen.

- [c] Bei dicht aufeinander folgenden Baukörpern bilden sich Luv sowie Lee-Wirbel vor, zwischen und hinter den Baukörpern. Abgesehen von dem Leewirbel zwischen den Gebäuden werden diese zu einem Großteil von der Luft überströmt [Ac] (YU 2006, KING 1973). OKE spricht in diesem Zusammenhang von „skimming flow“ (OKE 2006a), in der deutschsprachigen Literatur spricht man von einer „abgehobenen Stömung“ (GROMKE 2009). Kommt es zu einer Einengung des Luftstromes durch Bebauung kommt es unter Umständen zu hohen Windgeschwindigkeiten durch sogenannte „Düseneffekte“ [Bc]. Unter Kaltluftabflussbedingungen bildet sich im Luv der Baukörper ein Kaltluftstau, der bis an die Oberkante der Gebäude anwächst und diese dann überströmt. Sind am Hang mehrere Gebäude in entsprechender Entfernung hintereinander angeordnet, so staut sich die Kaltluft zwischen den Gebäuden [Cc], wobei nach OERTEL eine Abhängigkeit des Überströmens und dem Hinderniszwischenraum besteht (OERTEL 2008). Ist der Abstand der Gebäude zu groß, verringert sich die Wahrscheinlichkeit einer ungehinderten Überströmung und die Strömung ähnelt [Ad]. Wird der Kaltluftstrom zwischen mehreren Gebäuden eingeeengt so ergeben sich Umlenkeffekte [Bd] (VDI 1988).
- [d] Bei mehreren Gebäuden in ausreichend großem Abstand bilden sich die Effekte wie im Falle [Aa], wobei sich Luv- und Lee-Wirbel gegenseitig beeinflussen (= „wake interference flow“ nach OKE 2006a oder „Wirbelüberlagerungsströmung“ nach GROMKE 2009). Die Strömungsbeeinflussung des Windfeldes [Ad] sowie die kaltluftstauende Wirkung [Cd] entspricht der eines Einzelgebäudes.

Oftmals – und so auch im Untersuchungsgebiet – findet der Kaltluftabfluss in kleinen, stadtnahen Bachtälern statt. Da diese bei der infrastrukturellen Erschließung der Stadtumgebung oftmals mit Dämmen verbaut werden, kommt es in diesen Bereichen zu einem Kaltluftstau, der sich je nach Hangneigung und Kaltluftmenge talaufwärts erstreckt. Der VDI beziffert die Reichweite des Staus auf maximal das 10fache der Dammhöhe (VDI 2003), wobei einmal gestaute Kaltluft von der darauffolgenden Luft überströmt wird (KING 1973). Die Charakteristika der den Damm überströmenden Luft sind in Abb. 10 [Cb] beschrieben. Liegen Straßen im Bereich abfließender und vor allem gestauter Kaltluft, kommt zudem die Frage nach einer eventuellen Frostgefährdung für die Verkehrsplanung auf (VDI 2003). GEIGER beschreibt in diesem Zusammenhang eine höhere Anfälligkeit für Frost im Staubereich der Kaltluft als im Abflussbereich (z.B. OKE 2006a, GEIGER 1950), was mit Beobachtungen aus der Agrarmeteorologie übereinstimmt (vgl. Kap. 3.4). Im Lee eines Dammes beträgt die Reichweite der Störung im Fließverhalten in bis zu 30facher Entfernung vom Damm (im Verhältnis zur Dammhöhe) immer noch 10 % (VDI 2003). Baut man statt eines Dammes eine Brücke für die Talquerung, so wird ein Kaltluftstau durch die Berücksichtigung von mindestens 10m breiten Durchlässen im Bauwerk verhindert (VDI 2003, KING 1973).

3.6 Kaltluftwirkung auf das städtische Klima

Abfließende und auch stagnierende Kaltluft haben während austauscharmer Strahlungswetterlagen großen Einfluss auf das städtische Klima. Gerade bei Städten in Tallage stellen Kaltluftzuflüsse unter den angesprochenen Bedingungen eine der wenigen Möglichkeiten dar, unbelastete und kalte Luft aus der städtischen Umgebung in die Stadt zu transportieren. Dabei hat die Kaltluft sowohl Einfluss

auf die städtische Wärmeinsel, als auch auf die Luftqualität und damit als Konsequenz auch Auswirkung auf den human-biometeorologischen Wirkungskomplex. Insgesamt finden sich vor- und nachteilige Wirkungen von Kaltluft auf das städtische Klima (z.B. SONG 2003). Diese werden im folgenden Kap. 3.6 zusammengefasst.

Die Städtische Wärmeinsel („urban heat island“, UHI) ist eines der am besten untersuchten Bestandteile des städtischen Klimas (z.B. STEWART 2011, OKE 2006a, FEZER 1995, LANDSBERG 1981, KRATZER 1937). Die UHI beschreibt den positiven horizontalen Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland und lässt sich in der folgenden Formel ausdrücken:

$$\Delta T = T_u - T_r \quad [\text{K}] \quad \text{Gl. 12}$$

Dabei beschreibt:

ΔT	Wärmeinselintensität	[K]
T_u	Temperatur der städtischen Luft	[K]
T_r	Temperatur der Luft in ländlicher Umgebung	[K]

Die Eigenschaften des städtischen Baukörpers, die zur Ausbildung der städtischen Wärmeinsel beitragen sind in Tab. 2 zusammengetragen.

Die **Städtische Wärmeinsel** unterliegt in ihrer Ausprägung tageszeitlichen, jahreszeitlichen sowie witterungsbedingten Änderungen. Dabei lässt sich die stärkste Wärmeinselintensität während sommerlicher austauscharmer Strahlungswetterlagen (KUTTLER & BARLAG 2003) und in den Nachtstunden nachweisen (z.B. CHOW & ROTH 2006, OKE 2006a, CHRISTEN & VOGT 2004, UNGER 2004). Strahlungswetterlagen bieten zugleich die besten Voraussetzungen zur Produktion von Kaltluft (vgl. Kap. 3.2). Der entscheidende Einfluss auf die Intensität der nächtlichen Wärmeinsel geht von der Geometrie der Straßenschluchten und folglich dem sogenannten sky-view-factor Ψ_s ⁴ aus (z.B. HAMDİ & SCHAYES 2008, COUTTS et al. 2008). Dabei haben die Straßenschluchten auch entscheidenden Einfluss auf die Eindringtiefe der Kaltluft in bebauten Gebiet. Durch gezielte Planung beim Eingriff in den Gebäudebestand – eine Möglichkeit, die sich der Stadtplanung zugegebener Maßen selten bietet – oder bei der Neuplanung von Bebauung, bietet sich so die Chance sowohl die Temperaturen, als auch die Durchlüftung in einer Straßenschlucht positiv zu beeinflussen.

Unter der Annahme steigender mittlerer Temperaturen im Rahmen des anthropogenen Klimawandels wird es zukünftig zu einem vermehrten Auftreten von Hitzewellen kommen (z.B. DELLA-MARTA et al. 2007, MEEHL & TEBALDI 2004). Durch diesen Effekt wird auch die Wärmeinselintensität während

⁴ Der sky-view-factor Ψ_s ist das Verhältnis von der theoretisch unbeeinflussten Himmelsicht eines Standortes und der tatsächlichen Himmelsicht (z.B. HÄMMERLE et al. 2011, MATZARAKIS & MATUSCHEL 2011, GRIMMOND et al. 2001). Nach OKE erreichen Standorte ohne Himmelsichteinschränkung einen sky-view-factor von $\Psi_s = 1$, Standorte mit Sichteinschränkung Werte von $\Psi_s < 1$ (OKE 2006).

entsprechender Wetterlagen zunehmen. Zwar werden in der Literatur auch positive Effekte eines verstärkten Wärmeinseleffektes diskutiert, wie z.B. eine Verkürzung der Heizperiode in den Wintermonaten (z.B. HUNT & WATKISS 2010, WILBY 2008), die bioklimatischen Nachteile hoher sommerlicher Temperaturen überwiegen jedoch an dieser Stelle (z.B. LI et al. 2012, GABRIEL & ENDLICHER 2011, MATZARAKIS & DE ROCCO 2009). Dies liegt vor allem daran, dass bei der Zunahme hoher Temperaturen im Allgemeinen und tropischer Nächte ($T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) im Besonderen die Gesundheitsgefährdung und auch Sterblichkeit v.a. vulnerabler Bevölkerungsgruppen stark zunimmt (COUTTS et al. 2008). Gerade hohe nächtliche Temperaturen stellen aufgrund fehlender Regeneration in Kombination mit einer verringerten Flüssigkeitsaufnahme eine Gefahr für den menschlichen Organismus dar. Belegt wird dies durch den sehr warmen Sommer 2003, bei dem in Deutschland eine Übersterblichkeit von 10 % auftrat (GOLDEN 2004). In Westeuropa kam es zu einer ursächlich temperaturbedingten Übersterblichkeit von ca. 35.000 Menschen (KOPPE et al. 2004). ROBINE et al. errechnen eine Übersterblichkeit von 70.000 Personen für ganz Europa (ROBINE et al. 2008). Zu den besonders gefährdeten Bevölkerungsgruppen zählen laut SMOYER-TOMIC et al. ältere Menschen, Geringverdiener und Bewohner stark verdichteter Stadträume sowie Bewohner älteren Gebäudebestands und aus Gebäudebeständen mit wenig Umgebungsvegetation (z.B. SMOYER-TOMIC et al. 2003, COUTTS et al. 2008). Die Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) bezieht auch Kinder in den Kreis der gefährdeten Personengruppen mit ein (ARL 2009). Durch das Zusammenfallen höchster nächtlicher Temperaturen mit den höchsten nächtlichen Kaltluftbildungsraten können Kaltluftabflüsse bei Städten in Tallage Einfluss auf die städtische Wärmeinsel nehmen. KUTTLER & BARLAG schreiben zum Zusammenhang der Reduktion städtischer Temperaturen durch lokale Kaltluftabflüsse, dass diese durchaus planungsrelevante klimatische Effekte hervorrufen können (KUTTLER & BARLAG 2003, VDI 2003). So ist durch den Eintrag von Kaltluft der Abbau der nächtlichen Überwärmung möglich (KUTTLER & BARLAG 2003, MVI BW 2013, NKEMDIRIM 1980). Die wohl am besten untersuchte Stadt Deutschlands in diesem Zusammenhang ist Stuttgart (z.B. BAUMÜLLER 2012, DRAUTZ & REUTER 2011, BAUMÜLLER 2008, WETZEL 2008).

Während austauscharmer Wetterlagen kommt es neben steigenden Temperaturen im städtischen Raum zu einer Anreicherung von Luftschadstoffen, deren Konzentration durch den Eintrag von Kaltluft reduziert werden kann (z.B. WETZEL 2008, VDI 2004, SONG 2003, VDI 2003). Wie auch schon bei den Eigenschaften der Wärmeinsel, so lassen sich bei der Kaltluft in Bezug auf die Lufthygiene auch nachteilige Eigenschaften feststellen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es zur Stagnation von Kaltluft in städtischen Bereichen kommt, wo durch die Bildung eines Kaltluftsees mit sehr stabiler Schichtung der Luftaustausch verhindert wird (KUTTLER & BARLAG 2003, VDI 2003). In dieser Kaltluft kann es zur Anreicherung städtischer Emissionen – v.a. aus Industrie und Verkehr – kommen, da das Ausbreitungsvolumen durch die Höhe der Kaltluft stark begrenzt ist (SONG 2003, VDI 2003). Je nach Dauer der stabilen Schichtung können die Schadstoffkonzentrationen in der Kaltluft gesundheitsgefährdende Ausmaße annehmen (z.B. SAVIJÄRVI & LIYA 2001, GEIGER 1950). Ebenso können Emissionen mit der fließenden Kaltluft in innerstädtische Bereiche transportiert werden und dort nachteilig wirken (z.B. KETZLER 2009, KUTTLER et al. 2007, PARDYJAK et al. 2009, VDI 2003). Inwieweit Pollen als Allergene in der Kaltluft, die aus dem vegetationsbestandenen Kaltluftentstehungsgebiet stammen, die menschliche Gesundheit beeinflussen, ist bislang wenig untersucht (vgl. PRTENJAK et al. 2012). Im Hinblick auf die Zusammensetzung der Kaltluft und beim Überfließen rand- und innerstädtischer

Grünflächen spielen in der jüngsten Diskussion zunehmend sogenannte BVOCs eine Rolle (SIMPSON & MCPHERSON 2011). VOCs (engl. Volatile Organic Compounds) spielen bei der Entstehung von Ozon eine wichtige Rolle. BVOCs, die biogene Variante der Kohlenwasserstoffe, werden bei hohen Lufttemperaturen von Laub- und Nadelbäumen sowie Sträuchern emittiert (KUTTLER 2011a).

Je nach Struktur des städtischen Baukörpers kann die Wirkung von Kaltluft auf die städtische Wärmeinsel stark verringert werden (FEZER 1995). Dies geschieht dann, wenn der städtische Baukörper die Talsohle der Kaltluftbahn fast vollständig verschließt. Die Kaltluft kann dann auf die Wärmeinsel aufgleiten und diese überfließen (z.B. DÜTEMEYER 2000, BARLAG 1993), ähnlich dem Phänomen des Aufgleitens von Kaltluft auf einen Kaltluftsee oder Staubereich (vgl. Abb. 10 [Cd], MAHRT 1986).

Tab. 2: Ursachen der städtischen Wärmeinsel (nach MILLS 2008, HUPFER & KUTTLER 2006, OKE 1982).

Term der Energiebilanz	Städtische Faktoren	Meteorologischer Effekt
Erhöhte Absorption kurzwelliger Strahlung D	Stadtgeometrie	Größere Oberflächen, Mehrfachreflexion
Erhöhte Atmosphärische Gegenstrahlung AG	Luftverschmutzung	Größere Strahlungsabsorption und -reemission
Verringerte effektive langwellige Ausstrahlung $A_{(AR+AE)}$	Stadtgeometrie	Verringerter Sky-View-Faktor
Anthropogene Wärmeproduktion Q_F	Gebäude, Verkehr	Direkte Wärmezufuhr
Erhöhte Wärmespeicherung Q_S	Baumaterialien	Erhöhte Wärmeabgabe
Verringerte Verdunstung Q_E	Baumaterialien	Erhöhter Versiegelungsgrad
Verringerter sensibler und fühlbarer Wärmestrom $Q_H + Q_E$	Stadtgeometrie	Niedrigere Windgeschwindigkeiten

Wie aus Tab. 2 hervorgeht, kommt es in städtischem Gebiet zu einer Verringerung des latenten Wärmestromes. Dies liegt zum einen an der entsprechend hohen Flächenversiegelung und zum anderen - und dies steht in engem Zusammenhang mit der Versiegelung – an der schnellen Abführung des Oberflächenwassers nach einem Niederschlagsereignis in die Kanalisation. Aufgrund der oben genannten Vorgänge ist die Relative Luftfeuchte f in städtischem Gebiet im Mittel geringer als die im Umland. FEZER gebraucht in diesem Zusammenhang den Begriff der Trockeninsel für die Stadt in Anlehnung an die städtische Wärmeinsel (FEZER 1995). Im Umland steht aufgrund der unversiegelten und vegetationsbestandenen Flächen Wasser zur Verdunstung zur Verfügung, wodurch die Relative Feuchte erhöht wird. Da die Kaltluftbildung auf unversiegelten Flächen stattfindet, die dazu idealerweise vegetationsbestandenen sind (vgl. Kap. 3.3) und wo folglich Verdunstung stattfindet, findet sich in der Kaltluft eine höhere Luftfeuchtigkeit als in der städtischen Luft. Kaltluftabflüsse tragen demnach zu einer Erhöhung der Relativen Feuchte der Stadtluft bei. Der VDI weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass - auch wenn es zu einer Erhöhung der Relativen Feuchte in der Luft kommt – die „Lufttemperatur den entscheidenden meteorologischen Parameter bei der thermophysiologischen Auswirkung von Kaltluft darstellt“ (VDI 2003:41). Im Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit der Kaltluft ist noch das Phänomen der Nebelbildung zu nennen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass im Zusammenhang mit der Kaltluftbildung eine erhöhte Nebelneigung gegeben ist (z.B. MAHRT 2011, VDI 2003). Je nach Stärke der Abkühlung der Kaltluft erreicht die Luft die Taupunkttemperatur

und es kommt zur Nebelbildung. Dies ist besonders oft in Kaltluftsammlgebieten (KETZLER 1989) und Kaltluftstaugebieten der Fall (MVI BW 2013).

Durch die Rauigkeit des städtischen Baukörpers finden sich in der Stadt – abgesehen von Düseneffekten (vgl. Abb. 12 [Bc]) – reduzierte Windgeschwindigkeiten im Vergleich zum Umland. Mögen diese hinsichtlich des Windkomforts⁵ für den Menschen von Vorteil sein, so sind diese während austausch- armer Strahlungswetterlagen hinsichtlich des Austauschs der Stadtluft sehr nachteilig (z.B. BAUMÜLLER 2008). Durch abfließende Kaltluft findet eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit statt, die vom menschlichen Organismus unter Kaltluftabflussbedingungen - während windschwacher und ther- misch belastender sommerlicher Wetterlagen - als angenehm empfunden wird (VDI 2003).

3.7 Kaltluft in der Planung

Die Durchlüftung einer Stadt wird durch das Vorhandensein sogenannter Luftleitbahnen begünstigt. Dabei sind Ventilationsbahnen (Luftleitbahn mit unterschiedlich thermischem und lufthygienischem Niveau), Frischluftbahnen (Luftleitbahn mit unterschiedlich thermischem Niveau und lufthygienisch unbelasteter Luft) und Kaltluftbahnen (Luftleitbahn mit unterschiedlich lufthygienischem Niveau und mit kühlerer Luft als im Stadtgebiet) zu unterscheiden (z.B. WEBER 2004, VDI 1988). In Kap. 3.7 wer- den die Eigenschaften von Kaltluftbahnen sowie deren Planungsberücksichtigung beschrieben. Ver- schiedene Luftleitbahnen eignen sich in unterschiedlichem Maße als Kaltluftbahn. Begrünte Bachtä- ler, sogenannte Grünfinger, die weit bis in die bebaute Kernstadt reichen stellen ein Optimum dar, abhängig jedoch vom Grad der Vegetationsbedeckung. Gleisanlagen eignen sich, durch den geringen Schadstoffeintrag eines weitgehend elektrifizierten Schienenverkehrs ebenfalls gut als Kaltluftbahn (WEBER 2004). Demgegenüber sind Straßen eher kritisch zu betrachten, da die Eignung stark vom jeweiligen Verkehrsaufkommen abhängt. Stark befahrene Straßen führen zu einer Schadstoffanrei- cherung in der Kaltluft und die Schadstoffe werden dann unter Umständen mit der Kaltluft ins Stadt- zentrum transportiert (z.B. HUPFER & KUTTLER 2005). Eine Bewertung verschiedener Luftleitbahnen hinsichtlich der Eignung für den Kaltlufttransport findet sich in Tab. 3.

Der Idealverlauf einer Luftleitbahn ist geradlinig vom Stadtrand in den städtischen Baukörper rei- chend, mit einer Länge von ca. 1000 m und einer Mindestbreite von 50 m. Zudem sollte die Rauig- keitslänge von 0,5 m nicht überschritten werden (BARLAG 1997).

Die Beachtung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen im Allgemeinen sowie von Luftleit- und Kaltluftbahnen im Speziellen, findet in der Stadtplanung bereits seit mehreren Dekaden Berücksichtigung (z.B. FRERICHS et al. 2011, REUTER 2011, Ren et al. 2011, WETZEL 2008). Die funktiona- len Zusammenhänge zwischen der Kaltluft und ihrer Wirkung auf das städtische Klima sind hinrei-

⁵ Der Windkomfort macht eine Aussage zur Aufenthaltsqualität für den Menschen in Abhängigkeit von der Windgeschwin- digkeit. Dabei spielt nicht nur die mittlere Windgeschwindigkeit, sondern auch die Böenwindgeschwindigkeit eine Rolle (z.B. VDI 2006, MVI BW 2013).

chend bekannt (z.B. MVI BW 2013, WETZEL 2008, HUPFER & KUTTLER 2005, BENDIX 2004, VDI 2003). Dabei sollte es Ziel der Stadtplanung sein, ungünstige – den Kaltluftabfluss behindernde Strukturen (vgl. Kap. 3.5) – in der Kaltluftbahn zu vermeiden und Freiräume für den Abfluss zu schaffen. ENDLICHER & KRESS sowie BAUMÜLLER schreiben der Stadtplanung eine Schlüsselrolle bei der Minderung von Auswirkungen des Klimawandels zu, sowohl durch adaptive als auch mitigative Prozesse (ENDLICHER & KRESS 2008, BAUMÜLLER 2008). Als Stadtstruktur mit optimierter Anpassung an zukünftige Herausforderungen des Klimawandels schlagen sie unter Berücksichtigung verschiedener Belange (z.B. Energieeffizienz, Infrastruktur, Flächenverbrauch, Freiräume) eine Stadt mit „mittlerer Dichte unter Einschluss von begrünten Flächen, Wasserflächen und Arealen mit gemischter Nutzung“ vor (ENDLICHER & KRESS 2008:442). Auch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) macht den Zielkonflikt in Klimaschutz und Klimaanpassung deutlich, der zwischen lockerer Bebauung und Erhaltung von Freiflächen – als Ventilationsbahn für Kaltluftabflüsse – und der kompakten Stadt als flächen-, verkehrs- und energiesparender Struktur besteht (MUNLV 2009). Dennoch sieht das MUNLV die dringende Notwendigkeit innerstädtische Grünflächen und Frischluftschneisen zu sichern, um die Hitzebelastung in Innenstädten abzuschwächen. COUTTS et al. weisen darauf hin, dass bisherige städtische Strukturen die städtische Wärmeinsel weiter intensivieren werden (COUTTS et al. 2007). Als Konsequenz bleibt die dringend notwendige weiterer Integration von klimatischem Wissen in Planungsstrategien (COUTTS et al. 2008).

Tab. 3: Bewertung verschiedener Luftleitbahnen hinsichtlich der Eignung für den Kaltlufttransport (nach z.B. BARLAG 1997).

	Straße	Bahntrasse	Grünfläche	Gewässer
Rauigkeit	+++	++	+ vegetations- abhängig	+++
Kühleffekt	--- sehr hohe Wärme- speicherfähigkeit	+	+++ bei ausreichendem Wasserangebot	- hohe Wärme- speicherfähigkeit
Schadstoffeintrag	--- emissionsabhängig	+ beim Betrieb von E-Loks	++ natürliche Noxen	+++
Gesamturteil	-	++	++	++
+	Positive Eigenschaften		-	Negative Eigenschaften

Auch wenn Kaltluftabflüsse in der Gesetzgebung lange keine explizite Erwähnung fanden, so sind Belange des Klimaschutzes schon seit 1976 gesetzlich verankert (BauGB 1976). Seit der Novelle des Baugesetzbuches im Jahre 2004 ist der „allgemeine Klimaschutz“ Aufgabe der Bauleitplanung und gleichwertiger Abwägungsbelang (BauGB 2004). So ist es vorgeschrieben bei raumbedeutsamen Planungen eine Strategische Umweltprüfung (SUP) durchzuführen (Baumüller 2008). Auch im Raumordnungsgesetz aus dem Jahr 2008 wird der Klimaschutz als Grundsatz genannt (ROG 2008, GREIVING & FLEISCHHAUER 2008). Im Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz heißt es, dass in der Prüfung die Auswirkungen eines Vorhabens auf Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft durchzuführen ist (UVPG

2002). Städte, die also bislang eine gesetzliche Grundlage für den Schutz von Kaltluftentstehungs- und -abflussgebieten suchten, fanden diese, wenn auch „lediglich“ als Abwägungsbelang, im Gesetztext. In der Baugesetzbuchnovelle von 2011 wurden Klimaschutz und Klimawandelanpassung erstmals ausführlicher beschrieben. So heißt es unter anderem, dass Bauleitpläne den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, fördern sollen und dass Stadtumbaumaßnahmen dazu beitragen sollen, brachliegende oder freigelegte Flächen einer nachhaltigen, insbesondere dem Klimaschutz und der Klimaanpassung dienenden oder einer mit diesen verträglichen Zwischennutzung zuzuführen (BauGB 2011). Als Maßnahme zur Klimawandelanpassung wird explizit erwähnt, dass Kaltluftschneisen als von Bebauung freizuhalten Flächen festgesetzt werden können (KRAUTZBERGER 2012, BauGB 2011). Da jedoch bis heute eine Interessenabwägung möglich ist, gibt es ausreichend positive als auch negative Beispiele im Umgang mit kaltluftsensiblen Flächen. Die ARL weist zu Recht darauf hin, dass die Sicherung von Kaltluftammelgebieten und Kaltluftleitbahnen planerisch meist nur auf regionaler (Regionalplanung) und nicht auf kommunaler Ebene erreicht werden kann, da diese über Stadt- und Kreisgrenzen – und wie im Falle Aachens gar über Landesgrenzen – hinaus reichen (ARL 2009).

In den VDI Richtlinien sind die Empfehlungen im Umgang mit Kaltluft klar definiert, dort heißt es: „Die planungsrelevanten Gebiete für Kaltluftentstehung und -abfluss sind entsprechend ihrer Festlegung als Vorrang-, Vorbehalts- oder Eignungsgebiet von entgegenstehenden Nutzungen freizuhalten“ (VDI 2004:24). Dies bedeutet im Falle von Kaltluftentstehungsgebieten die Vermeidung von Besiedlung und emissionsträchtigen Nutzungen sowie bei Kaltluftabfluss die Vermeidung von „Bebauung, von dichten Bepflanzungen, von Aufforstungen, von Dämmen aus Verkehrsbauten sowie Aufschüttungen“ (VDI 2004:24). Human-biometeorologische Effekte sollten bereits bei der Planung von Wohn-, Industrie- und Gewerbegebieten sowie beim Bau von Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt werden. Des Weiteren gibt der VDI bezüglich der Umnutzung von Freiraum in Siedlungsfläche und bei der Umnutzung bereits bestehender Baugebiete den Hinweis lufthygienische Belastungen zu vermeiden, „um die human-biometeorologischen Bedingungen in benachbarten und über den Kaltluftfluss [...] erreichbaren Wohngebieten [...] nicht zu verschlechtern“ (VDI 2004:31).

Neben der Planung von Kaltluftentstehungs- und abflussgebieten im randstädtischen Bereich haben auch innerstädtische Grünflächen nachweislich kaltluftbildende Eigenschaften (FOKEN 2006, HUPFER & KUTTLER 2005). Bei entsprechender Geländeneigung und –größe finden sich innerstädtisch gar Kaltluftabflüsse (ELIASSON & UPMANIS 2000). Die kaltluftproduzierende Wirkung innerstädtischer Grünflächen ist in der Literatur beschrieben (z.B. ELIASSON & UPMANIS 2000, UPMANIS & CHEN 1999, CHOW et al. 2011), sie ist jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht Untersuchungsgegenstand und soll daher nicht vertieft betrachtet werden. In Bezug auf abflusshindernde Effekte wie in Kap. 3.5 beschrieben, finden sich diese in Parks in ähnlicher Weise, jedoch meist in kleinerem Maßstab (z.B. KUTTLER 2011b). Kaltluftabflussbahnen und innerstädtische Grünflächen haben demnach stadtklimatologische Gemeinsamkeiten. Dies gilt sowohl hinsichtlich einer luftqualitätsverbessernden Wirkung (z.B. WETZEL 2008, VDI 2004, SONG 2003, VDI 2003) als auch hinsichtlich der Reduktion innerstädtischer Überwärmung (z.B. RINGHOF & HENNINGER 2010). Während lang anhaltender austauscharmer Wetterlagen sind innerstädtische Parks im Gegensatz zu Kaltluftabflussbahnen meist auf eine ausreichende (externe) Ver-

sorgung mit Wasser angewiesen. Diese muss gegebenenfalls durch Bewässerung eingebacht werden, um die stadtklimatologisch positiven Eigenschaften der Grünflächen aufrecht zu erhalten (z.B. ROST & MAYER 2006).

Eine häufige Fragestellung in der Stadtplanung ist die Frage nach der Eindringtiefe von Kaltluft in städtisch bebautes Gebiet. Dabei zu berücksichtigen ist das „Aufzehren“ der Kaltluft durch die innerstädtische warme Luft, und insbesondere die Wärmeabgabe von Gebäuden. Da Gebäude anders als Vegetation kein poröses Medium darstellen, wird die kalte Luft bei nicht vorhandener Ausweichmöglichkeit aufgestaut. Erreicht der Rückstau eine ausreichende Mächtigkeit, überströmt die Kaltluft das Gebäude (vgl. Abb. 12 [Ca]). Ist der Kaltluftstrom nun von geringer Ausprägung und Dauer, kann die Abwärme des Gebäudes die kalte Luft aufzehren. Die Kaltluft ist dann nicht in der Lage entsprechende Höhen zu erreichen, um ein Hindernis zu überströmen. Der VDI gibt für die Eindringtiefe der Kaltluft in bebautes Gebiet Richtwerte an. Beträgt der Volumenstrom $10.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ oder mehr, so werden kleine Siedlungen und Gebäudegruppen um-, über oder durchströmt. Die Eindringtiefe der Kaltluft in bebautes Gebiet liegt typischerweise zwischen 100 und 1.000 Metern und kann von stadtplanerischen Maßnahmen intensiv beeinflusst werden (VDI 2003).

3.8 Kaltluftmodellierung

Die Modellierung von Kaltluftabflüssen in komplexem Gelände dient der großräumigen Erfassung des Kaltluftgeschehens im gesamten Kaltluftabflussgebiet. Da die abfließende Kaltluft bei empirischen Studien überwiegend nur punktuell erfasst werden kann, oftmals aber gerade die räumliche Verteilung der Kaltluft und die Eindringtiefe in bebautes Gebiet zentrale Fragestellungen in Forschung und Planung sind, sind modellhafte Darstellungen von großem Nutzen. In der Empirie ist die Ausbreitung von Kaltluft im Gelände letztlich nur durch Tracergas-Versuche sicher nachweisbar. Diese sind jedoch in Durchführung und Vorbereitung mit einem erheblichen Aufwand verbunden (vgl. Kap. 3.3).

In der vorliegenden Untersuchung kam zur Modellierung das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Anwendung. Das Modell wurde nach der Entwicklung für verschiedene Veröffentlichungen – überwiegend im deutschsprachigen Raum – genutzt, die im Wesentlichen im Zusammenhang mit der Raum- und Regionalplanung standen. Eine umfangreiche Untersuchung von Kaltluftabflüssen mit Hilfe von KLAM_21 fand so z.B. im Raum Bodensee-Oberschwaben statt (SCHWAB & ZACHENMACHER 2009). KOßMANN und SIEVERS führten zudem Untersuchungen zur Bildung eines Kaltluftsees in einer Hohlform (KOßMANN & SIEVERS 2009) sowie zur städtischen Durchlüftung im Zusammenhang mit Aspekten der Luftqualität durch (KOßMANN & SIEVERS 2007). RINGHOF & HENNINGER nutzten das Modell KLAM_21 für Untersuchungen in der südkoreanischen Stadt Daegu. Hintergrund war u.a. die Fragestellung, in wie weit eine Optimierung der vorhandenen Luftleitbahnen durch eine angepasste Stadtplanung erfolgen kann (RINGHOF & HENNINGER 2010).

Das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit (vgl. Kap. 4.2.2) wurde neben den in Kap. 6 und Kap. 7 dargestellten Modellläufen mit Hilfe von KLAM_21 einer historischen Betrachtung unterzogen, die einen Vergleich der Abflusssituationen im Jahre 1810 und im Jahre 2010 zum Gegenstand hatte

(KETZLER et al. 2010a, KETZLER et al. 2012). Dort standen allerdings vielmehr bauliche Veränderungen in der Stadtstruktur und deren Auswirkung auf den Kaltluftabfluss im Vordergrund, als Veränderungen der Vegetationsstruktur (vgl. Kap. 4.2.1). Eine Beschreibung des Modells KLAM_21 sowie der durchgeführten Modellierungen findet sich in Kap. 5.3.

Neben dem in der vorliegenden Arbeit verwandten Kaltluftabflussmodell KLAM_21 existieren weitere Modelle zur Simulation von Kaltluftabflüssen in geneigtem Gelände. Häufige Anwendung bei Planungsvorhaben findet das auf Flachwassergleichungen basierende Modell KALM (LOHMEYER & SCHÄDLER 1998), das die Voreinstellung von spezifischen Reibungskoeffizienten und Kaltluftproduktionsraten ermöglicht (ZENGER 1998). Anwendung fand es u.a. bei der Planung des Projektes „Stuttgart 21“, im Hinblick auf durch bauliche Veränderungen hervorgerufene Modifikationen des Kaltluftabflusses im Stuttgarter Stadtgebiet (SCHÄDLER & LOHMEYER 1996).

Das Modell FITNAH (Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat Sources) ist ein dreidimensionales, nichthydrostatisches numerisches Modell, das bei komplexen Fragestellungen im mesoskaligen Bereich verwendet wird (HUPFER & KUTTLER 2005, ZENGER 1998). So modellierte GROSS die Auswirkungen einer Rodung im Odenwald auf die dortige Kaltluftproduktion und den Kaltluftabfluss (GROSS 1986, vgl. Abb. 8).

Am Geographischen Institut der RWTH Aachen wurde das Kaltluftabflussmodell SIMKLA entwickelt, das in angewandten lokalen Studien eingesetzt wurde (z.B. KETZLER et al. 2010, SCHNEIDER & KETZLER 2006). Das Modell „basiert auf einem Energiebilanzmodell und einem Strömungsmodell [...] zur Berechnung gravitativer Luftbewegungen geringmächtiger Luftschichten unter Reibungseinfluss, der die in anderen Modellen verwendeten sog. Flachwassergleichungen vertritt“ (KETZLER et al. 2010a:87).

Die vorangegangene Beschreibung von Kaltluftabflussmodellen bietet einen Überblick über die im deutschsprachigen Raum häufiger verwendeten Modelle. Die Liste der ausgewählten Modelle erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Eine Übersicht über die Modelle sowie weitere Informationen zu den Modelleigenschaften und dem jeweiligen Modelloutput findet sich z.B. bei GROß & ETLING, HUPFER & KUTTLER oder dem MVI BW (MVI BW 2013, HUPFER & KUTTLER 2005, GROß & ETLING 2003).

4. Das Untersuchungsgebiet

Die Stadt Aachen bietet aufgrund verschiedener Faktoren gute Voraussetzungen für die vorliegende Untersuchung. Seit jeher spielen thermisch induzierte Windsysteme - wie Kaltluftabflüsse - eine wichtige Rolle für das Stadtklima Aachens, sowohl aus thermischer als auch lufthygienischer Sicht. Bereits früh begannen daher Untersuchungen zu städtischen Kaltluftabflüssen und den dazugehörigen Kaltluftbahnen. Federführend war dabei das Geographische Institut der RWTH Aachen in Kooperation mit dem Fachbereich Umwelt der Stadt Aachen. So entstanden eine Reihe von Forschungsprojekten und Gutachten, auf deren Inhalt zurückgegriffen werden kann (vgl. Kap. 4.2.1). Auch für das vorliegende Forschungsvorhaben konnten gemeinsam mit dem Fachbereich Umwelt geeignete Vegetationsbestände in Kaltluftbahnen als Untersuchungsobjekt ausgewählt werden.

Bezüglich der übergreifenden Fragestellung, der Frischluftversorgung von Städten in Tallage, bietet die Stadt Aachen ebenfalls gute Voraussetzungen. Klimatisch betrachtet liegt Aachen laut Klimaklassifikation von Köppen und Geiger in der gemäßigten Zone, die weite Teile Mitteleuropas bedeckt (KOTTEK et al. 2006, KÖPPEN & GEIGER 1936). Sowohl Stadtgröße als auch Stadtstruktur sind durchaus typisch für mittlere Großstädte am Mittelgebirgsrand (KETZLER 2002). Aachen weist zudem ein für Größe und Struktur entsprechendes Stadtklima auf (KETZLER 2002). Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Kaltluftuntersuchungen auf andere Städte ist damit – unter Berücksichtigung der örtlichen Strukturen – grundsätzlich möglich.

Im folgenden Kap. 4.1 soll zunächst ein Überblick über die Stadt Aachen gegeben werden bevor in Kap. 4.2 das Hauptaugenmerk auf die beiden Untersuchungsbiote gelegt wird. Dabei wird die historische Entwicklung der Bachtäler berücksichtigt und der derzeitige Kenntnisstand über Kaltluftabflüsse in Aachen aufgearbeitet.

4.1 Geographische Einordnung

Die Stadt Aachen ist die westlichste Großstadt Deutschlands und liegt in Nordrhein-Westfalen an der Grenze zu den Niederlanden und Belgien. Zusammen mit niederländischen und belgischen Landesteilen bildet sie grenzübergreifend die Euregio Maas-Rhein mit einer Fläche von ca. 11.000 km² und 3,7 Millionen Einwohnern (STADT AACHEN 2012a). Administrativ ist die Stadt Aachen mit Sonderstatus Teil der Städteregion Aachen, einem Ballungsraum mit ca. 542.000 Einwohnern (STATISTISCHES BUNDESAMT 2013, Stand: 31.12.2011). In der Stadt Aachen leben auf einer Fläche von ca. 160 km² ca. 239.000 Einwohner (STADT AACHEN 2012a, STATISTISCHES BUNDESAMT 2013, Stand: 31.12.2011).

Die Nord-Süd Ausdehnung der Stadt Aachen beträgt im Maximum 21,6 km, die West-Ost-Ausdehnung 17,2 km (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009). Landschaftlich betrachtet ist die Stadt Aachen Teil des Aachen-Limburger Hügellandes, „eines Übergangsraumes zwischen der Nordwestabdachung der Eifel [= linksrheinisches Schiefergebirge] („Hohes Venn“ mit Höhen bis zu 693 m ü. NN) und der Jülicher bzw. Limburger Börde mit Höhen um ca. 100 bis 200 m ü. NN“ (KETZLER 2002:22).

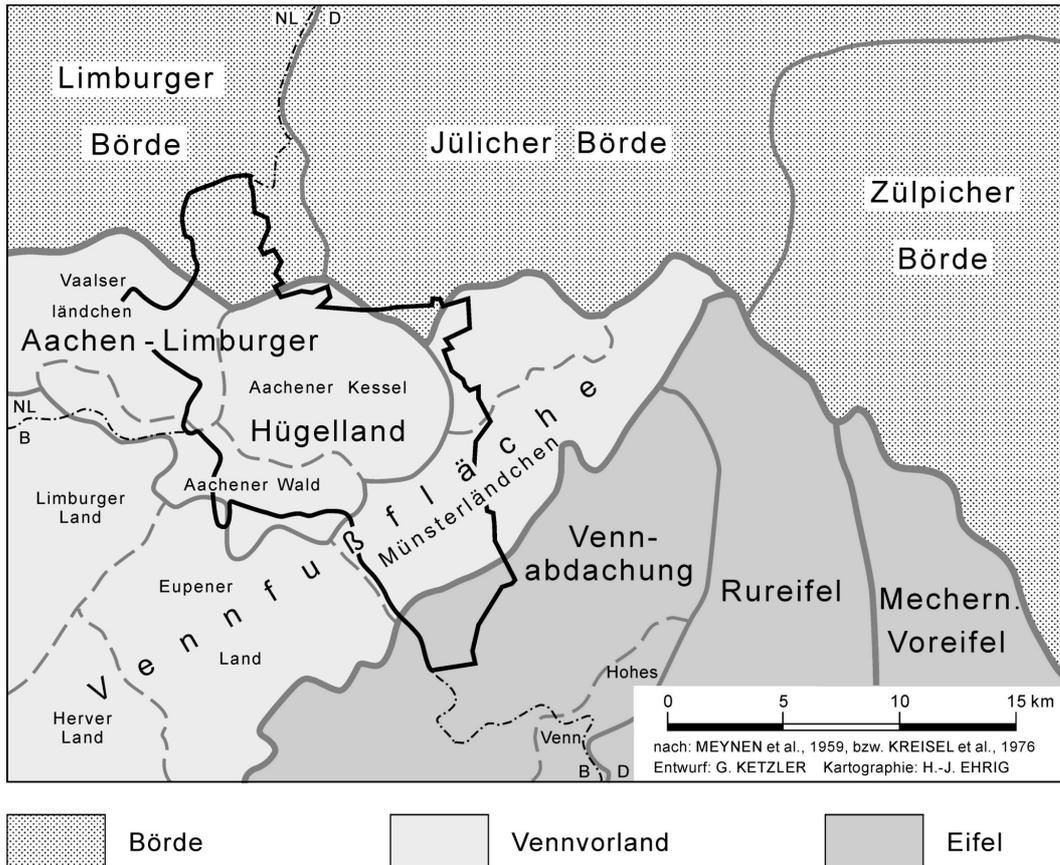


Abb. 13: Naturräumliche Gliederung Aachens und des Umlandes. Die Stadtgrenze Aachens ist mit einer schwarzen Linie dargestellt (HAVLIK & KETZLER 2000, verändert durch H.-J. EHRIG 2013).

Das Zentrum der Stadt Aachen liegt im sogenannten Aachener Talkessel⁶, dessen Relief für die vorliegende klimatologische Untersuchung von großer Bedeutung ist (EMONDS 1986). Der Talkessel bedingt eine verstärkte Austauschbarkeit thermisch und lufthygienisch belasteter Luft im Vergleich mit dem Aachener Umland. Zur Verbesserung des städtischen Klimas während austauschbarer Witterung tragen reliefbedingte Kaltluftabflüsse bei, die Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind. Der Aachener Talkessel bildet eine fast vollständig geschlossene Hohlform (HAVLIK & KETZLER 2000), deren Sohle leicht nach Norden geneigt ist (BRAUERS & KETZLER 1988). Der tiefste Punkt im Talkessel liegt bei ca. 125 m ü. NN im Norden der Stadt, der höchste Punkt im Aachener Wald ganz in Südwesten des Stadtgebietes bei ca. 410 m ü. NN. Es existiert somit ein Höhenunterschied von ca. 285 m (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009). Die Stadt Aachen weist damit im Talkessel auf kleinem Raum hohe Reliefunterschiede auf, von denen ein Großteil dem Anstieg hinauf zum Aachener Wald am Südrand des Talkessels zuzuschreiben ist (HAVLIK & KETZLER 2000). Der Talkessel wird im Süden vom Aachener Wald begrenzt und im Norden von einer ebenfalls recht markanten Geländestufe zur Limburger (Nordwesten) und Jülicher Börde (Nordosten). Abb. 14 zeigt ein digitales Höhenmodell des Aachener Talkes-

⁶ Im Aachener Talkessel liegt nicht nur das stark verdichtete Stadtzentrum, sondern auch weitere Ortsteile des Stadtbezirks Aachen-Mitte, Aachen-Haaren, Aachen-Eilendorf und ein Großteil des Stadtbezirks Aachen-Laurensberg (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009).

sels. Gut erkennbar sind die höher gelegenen Bereiche des Aachener Waldes im Süden und die anschließenden Bachtäler, die in Richtung Innenstadt verlaufen.

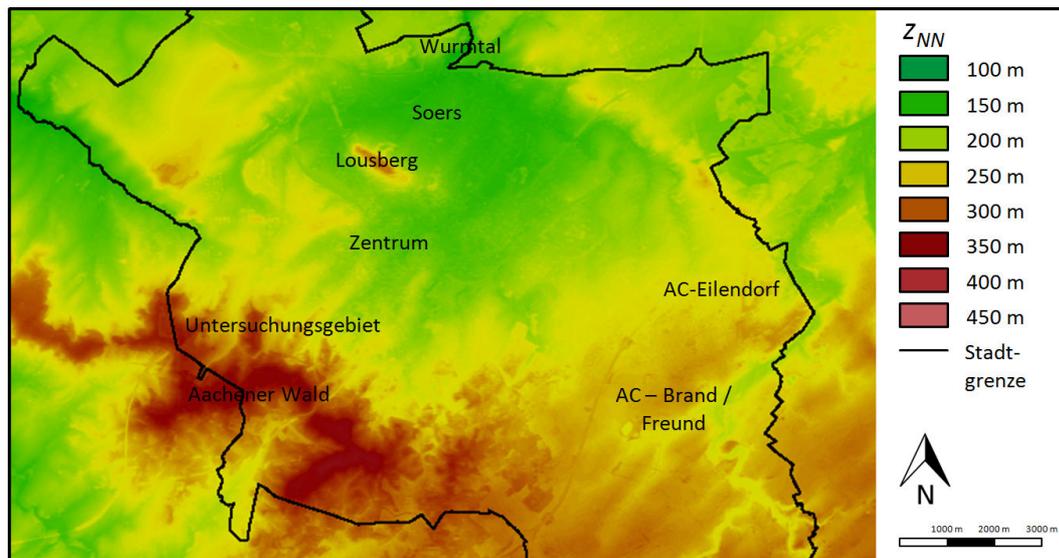


Abb. 14: Digitales Höhenmodell der Stadt Aachen (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000).

Von den 260.000 Einwohnern der Stadt Aachen leben laut Luftreinhalteplan ca. 187.000 im Aachener Talkessel (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009) und sind demnach von nachteiligen thermischen und lufthygienischen Verhältnissen direkt betroffen. Die Flächengröße des gesamten Talkesselbereiches beträgt etwa 65 km² (Gesamtstadt: 160 km²) (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009).

Obwohl in einer Entfernung von ca. 220 km zur Nordsee gelegen, ist das Klima von Aachen ausgesprochen ozeanisch geprägt (BUTTSTÄDT et al. 2010c, BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009, HAVLIK & KETZLER 2000). Die Jahresamplitude der Lufttemperatur als Kriterium der Maritimität – 15,3 °C basierend auf einer Berechnung von HAVLIK mit Monatsmittelwerten aus den Jahren 1961 bis 1990 (HAVLIK 2002) – weicht in Aachen nur gering von niederländischen und belgischen küstennahen Standorten (Brüssel und Vlissingen) ab. Begründet ist dies im Wesentlichen durch geringe Reliefunterschiede auf der Zugbahn der überwiegend aus Westen heranströmenden Luftmassen (HAVLIK 2002). Die sommerlichen Temperaturen sind in Aachen vergleichsweise niedrig, die im Winter vergleichsweise mild (HAVLIK 2002). So ist auch die hohe jährliche Mitteltemperatur von 9,7 °C vor allem auf hohe Lufttemperaturen im Winter zurückzuführen (z.B. BUTTSTÄDT et al. 2010, HAVLIK 2002, HAVLIK & KETZLER 2000).

Laut HAVLIK ist das Aachener Klima hinsichtlich der Hitze- und Schwülebelastung als „ausgesprochen angenehm“ zu bezeichnen (HAVLIK 2002). HAVLIK kommt in Anlehnung an SCHARLAU zu dem Ergebnis, dass basierend auf den Messdaten der Station Aachen-Hörn (vgl. Kap. 5.1.1) in den Jahren 1991 bis 2000 lediglich an 9 Tagen der Tagesmittelwert des Dampfdruckes ausreichend hoch war um als Stadtbewohner Schwüle zu empfinden. An 28 Tagen im gleichen Auswertungszeitraum finden sich zudem kurzzeitige Schwüleereignisse. Im gesamtdeutschen Mittel gibt es in Aachen wenig direkte Sonneneinstrahlung (Sonnenschein) und häufiger Niederschlag, dafür treten Wärme- und Schwülebelastung im Sommer, bzw. Kältereize im Winter seltener auf.

4. Das Untersuchungsgebiet

Der langjährige Temperaturtrend für die Stadt Aachen ist positiv. Eine Untersuchung von KETZLER, bei der die Jahresmittelwerte der Lufttemperatur an einem innerstädtischen Stationsstandort (Augustinerplatz) in Aachen Gegenstand waren, kam zu dem Ergebnis, dass sowohl die Lufttemperaturmaxima als auch -minima im langjährigen Trend steigen. Im Zeitraum von 1901 bis 1991 zeigt sich eine Steigerung der Jahresmittelwerte von 0,5 K (KETZLER 1997). Da am Untersuchungsstandort Begrünungsmaßnahmen durchgeführt wurden, ist dabei „der Wert von 0,5 K vermutlich als untere Grenze der durch die zwischenzeitliche Bebauung hervorgerufenen relativen Erwärmung anzusehen [...]“ (KETZLER 1997:146). Neuere Untersuchungen von BUTTSTÄDT et al. zur Lufttemperaturentwicklung in der Stadt Aachen zeigen für den Zeitraum von 1980 bis 2009 einen Temperaturanstieg von ca. 1,5 °C (BUTTSTÄDT et al. 2010).

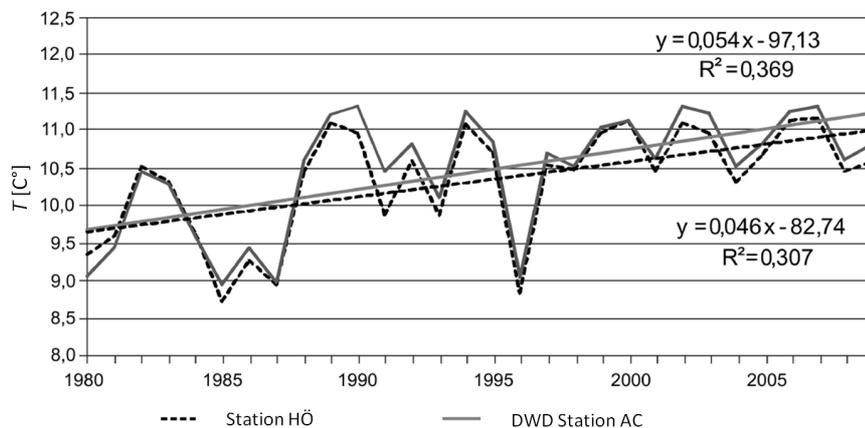


Abb. 15: Temperaturverlauf im Zeitraum 1980 - 2009 an der Station Aachen-Hörn bzw. Aachen (Wetterstation) des DWD (BUTTSTÄDT et al. 2010).

Zudem ist im oben aufgeführten Zeitraum eine Abnahme von Frost- und Eistagen sowie eine Zunahme von Sommer und heißen Tagen zu verzeichnen (BUTTSTÄDT et al. 2010). Die Auftretshäufigkeit von Hitzewellen⁷ in der Stadt Aachen unterliegt ebenfalls einem positiven Trend (BUTTSTÄDT et al. 2010). Gerade länger anhaltende thermische Stresssituationen mit hohen nächtlichen Temperaturen wirken nachteilig auf die Gesundheit des Menschen - ältere Menschen, Kinder und Menschen mit Vorerkrankungen sind durch hohe Temperaturen besonders gesundheitsgefährdet (z.B. ALEX et al. 2013, KOPPE et al. 2004, vgl. Kap. 3.6). Das Gefährdungspotenzial der städtischen Bevölkerung wächst nochmals durch eine Zunahme der über 60 bis 80 jährigen Bewohner um 27,6 % bis zum Jahr 2025 gegenüber dem Jahr 2005 (SIUDA et al. 2010, STADT AACHEN 2006). Dementsprechend kommen hier verstärkt die temperaturmindernden Effekte von Kaltluftabflüssen zum Tragen, die gerade in heißen, windschwachen Nächten große Mengen an kalter Luft in die Innenstadt bringen.

Bei der räumlichen Differenzierung der städtischen Temperaturen im Aachener Kessel zeigt sich während einer Messperiode von April 1998 bis März 1999 eine um 0,5 °C höhere Jahresmitteltemperatur

⁷ Mindestens drei aufeinander folgende Tage haben eine Tageshöchsttemperatur von mindestens 30 °C oder eine Periode von mehr als drei Tagen, mit dazwischen liegenden Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur von nicht unter 25 °C (BUTTSTÄDT et al. 2010).

der Kernstadt im Vergleich zur Wetterstation Hörn (STADT AACHEN 2001). Dabei bleibt festzustellen, dass der gemessene Temperaturunterschied lediglich als Indiz für die Wärmeinselintensität der Stadt Aachen herangezogen werden kann, da die Station Hörn selbst noch im Aachener Kessel - wenn auch auf einer relativen Höhenlage – liegt und demnach keineswegs unbeeinflusst von der städtischen Wärmeinsel ist (KETZLER 1997). Das MNULV weist für die Stadt Aachen die höchste Wärmeinselintensität (ca. 7 °C) im Verhältnis zur Einwohnerzahl für Nordrhein-Westfalen aus (MUNLV 2009, vgl. Abb. 16), die im Wesentlichen durch die ausgeprägte Kessellage Aachens und den damit einhergehenden eingeschränkten Luftaustausch verursacht wird.

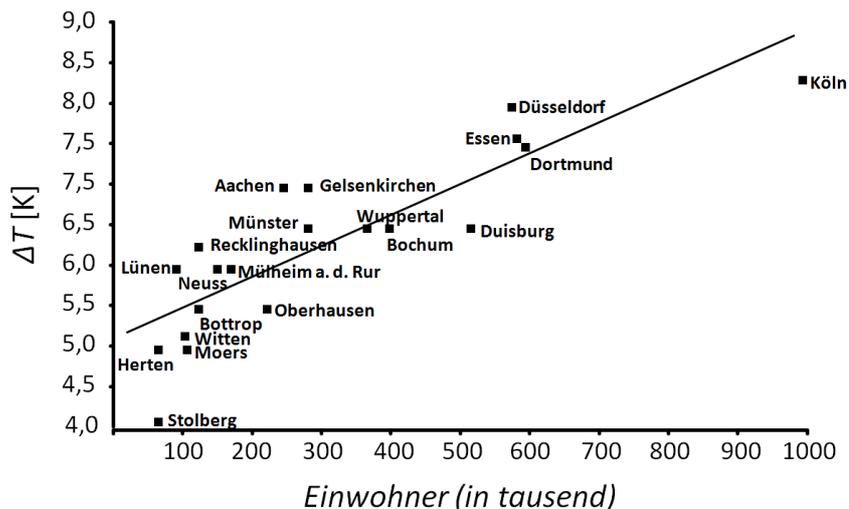


Abb. 16: Maximale Temperaturunterschiede zwischen Stadtzentrum und Umland ΔT in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für Städte in Nordrhein Westfalen (nach MUNLV 2009).

Hinzu kommt, dass an mehr als einem Viertel aller Messtage im Messzeitraum 1971 bis 1980 Windgeschwindigkeiten kleiner 3 Bft (3,4 bis < 5,5 m s⁻¹) im Tagesmittel gemessen wurden und somit schwachwindige Verhältnisse vorzufinden sind (STADT AACHEN 2001). So können auch an schwachwindigen Tagen ohne Inversionsbildung thermische und lufthygienische Ungunstsituationen auftreten (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009).

Im Raum Aachen sind südwestliche Windrichtungen vorherrschend, ca. 60 % aller Registrierungen entfallen auf diesen Quadranten. Insbesondere bei höheren Windgeschwindigkeiten weht der Wind ganz überwiegend aus diesen Richtungen (HAVLIK & KETZLER 2000).

Bei austauscharmen Wetterlagen ist vor allem während der Nacht der vertikale Luftaustausch aufgrund der Inversionsbildung im Aachener Talkessel stark eingeschränkt bzw. nicht vorhanden (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009), was neben thermischen auch lufthygienische Probleme mit sich bringt (HAVLIK & KETZLER 2000). Im Rahmen der Untersuchungen zum „Gesamtstädtischen Klimagutachten Aachen“ konnte an mehr als einem Viertel aller Tage eines Jahres eine Inversion über dem Aachener Talkessel messtechnisch erfasst werden, ein Wert der von keiner anderen Stadt der Region erreicht wird (HAVLIK & KETZLER 2000). So kann es während oben genannter Wetterlagen zu einer Anreicherung von Luftschadstoffen im Aachener Talkessel kommen. Vor allem bei PM₁₀ und NO₂ werden dadurch an einer Reihe von Hauptverkehrsstraßen Grenzwerte überschritten (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2009),

was die Aufstellung eines Luftreinhalteplanes im Jahre 2009 zur Folge hatte (MERBITZ et al. 2012). Berücksichtigt man im Falle von Feinstaub die hohe Hintergrundbelastung - im europaweiten Vergleich gehört die Region Maas-Rhein zu den am stärksten durch Feinstaub belasteten Regionen innerhalb der Europäischen Union (MERBITZ 2010) – so wird erneut die Notwendigkeit des Luftaustausches durch Kaltluftabflüsse während austauscharmer Wetterlagen belegt.

Betrachtet man die Stadtstruktur Aachens, so sind die Bedingungen für Kaltluftabflüsse ins Stadtzentrum vorzudringen als vergleichsweise günstig einzuschätzen. So entspricht Aachen dem Typ der gegliederten Stadt, als mittlerer Typ im Vergleich zur kompakten und aufgelockerten Stadt (CURDES 2010). Lediglich das direkte Stadtzentrum sowie Gewerbe- und Industrieflächen im Ostteil der Stadt sind dicht bebaut und weisen einen hohen Versiegelungsgrad auf. Der Süden und Westen der Stadt sind dagegen locker bebaut (MERBITZ et al. 2012). Insgesamt betrachtet zeigt die Stadt Aachen (bis auf wenige Ausnahmen) eine typische Gliederung der Bebauung: Die Dichte nimmt mit zunehmender Entfernung vom Stadtzentrum ab, basierend auf einer städtebaulichen Entwicklung nach dem „Prinzip von Ringen und Radialen“ (CURDES 1997:32).

4.2 Aachener Bachtäler

Die Bachtäler Aachens liegen am südlichen Rand des Aachener Talkessels. Hier entspringt im Höhenzug des Aachener Waldes eine Vielzahl von Quellbächen, die durch keilförmige Erosionstäler in den Aachener Kessel hinabfließen und sich dort zur Wurm – einem Vorfluter der Rur – vereinen (CURDES et al. 1989). Die Höhenunterschiede zwischen Talboden und Talschulter der Bäche liegen zwischen 20 m und 40 m (HAVLIK & KETZLER 2000), der Verlauf der Täler ist im oberen Bereich teilweise recht steil (BRAUERS & KETZLER 1988). Die Ausrichtung der Bachtäler ist im überwiegenden Verlauf von Südwest nach Nordost. Über die beschriebenen Bachtäler als Luftleitbahn, fließt während austauscharmer Wetterlagen Kaltluft in Richtung Stadtzentrum. Abb. 17 gibt einen Überblick über einen Teil der Bachtäler Aachens, die Karte ist anders als üblich nicht genordet, da aufgrund der Ausrichtung der Täler diese bei überhöhter Darstellung des Geländes nur unzureichend sichtbar wären.

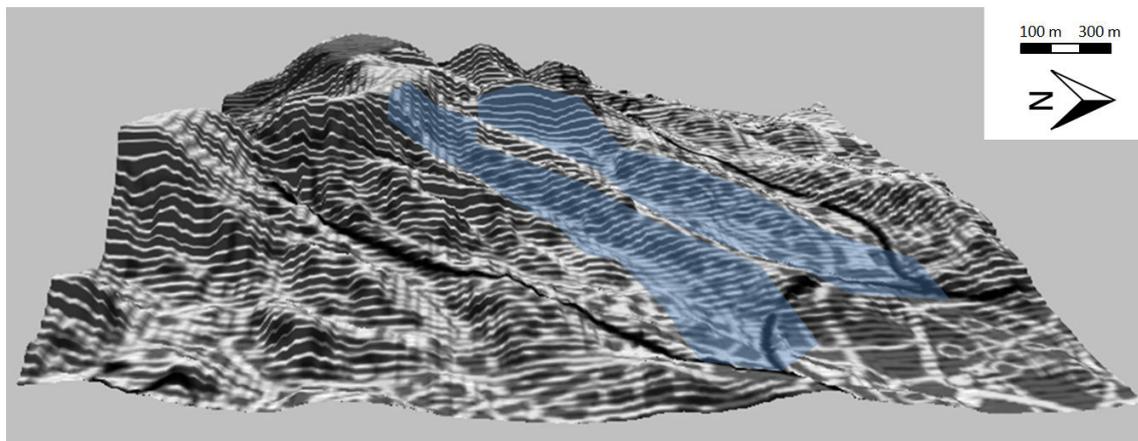


Abb. 17: Statisch perspektivische Ansicht (5-fach überhöht, Sonne 45° am südlichen Himmel, Gelände 20° nach vorne geneigt) eines Teiles der Aachener Bachtäler. Blau hinterlegt sind das Kannegießer- und Johannsbachtal (Kartengrundlage: LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 2005).

Die Bachtäler im Süden Aachens ziehen sich in vergleichsweise wenig bebautem Zustand in Form von Grünfingern in Richtung Stadtzentrum. Innerhalb der Stadt finden sich zudem immer wieder Bauungslücken und Freiflächen, die Kaltluftabfluss ermöglichen. Dies ist in erster Linie einer überwiegend aufmerksamen Stadtplanung der vergangenen Dekaden zu verdanken, die seit langem die Schutzwürdigkeit der Täler erkannt hat und im Falle von geplantem neuem Flächenverbrauch in sensiblen Luftleitbahnen vorsichtig agiert. So wird jede Neubauplanung in der Luftleitbahn „zunächst einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) oder einer gleichgearteten Fachprüfung unterzogen“ (PESCHEL, G. / Fachbereich Umwelt der Stadt Aachen, pers. Mitteilung 2013; vgl. Kap. 3.7). Der Abfluss der Kaltluft wird neben der städtischen Bebauung durch einen Bahndamm gestört, der die Stadt von Westen nach Osten durchquert. Im Modelllauf (vgl. Kap. 6) und in der Empirie hat sich gezeigt, dass dieser zwar teilweise von der Kaltluft überströmt wird (vgl. HAVLIK & KETZLER 1996, BRAUERS & KETZLER 1988), eine kaltluftstauende Wirkung dennoch anzunehmen ist.

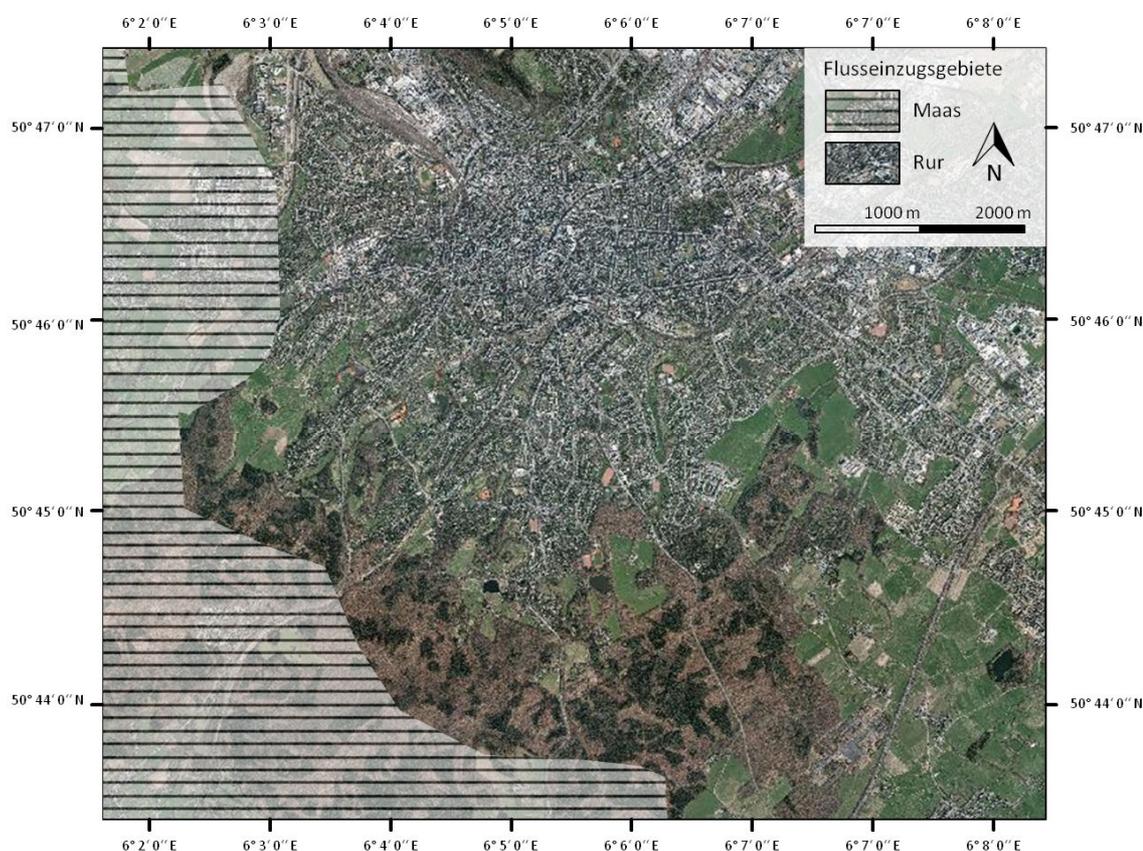


Abb. 18: Flusseinzugsgebiete des Aachener Talkessels (Kartengrundlage: BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 2012).

Die Bachtäler am Südrand der Stadt Aachen, die in der vorliegenden Studie Hauptuntersuchungsgebiet sind, entwässern alle in den Aachener Talkessel, der nach Nordosten hin über nur eine Öffnung, das Wurmtal, verfügt (vgl. Abb. 14). Der Aachener Talkessel liegt im Einzugsgebiet der Rur, lediglich die Höhenzüge des Aachener Waldes gehören zum Flusseinzugsgebiet der Maas (BFN 2012). Flächen die in Richtung der Rur entwässern sind weitestgehend (bis auf wenige Ausnahmen) – da auch der Kaltluftabfluss dem Relief folgt – potenzielle Flächen für die Bildung von Kaltluft, die auf das Stadtklima Aachens wirken. Wie aus Abb. 18 ersichtlich, sind die Höhenlagen der Kaltluftentstehungsge-

4. Das Untersuchungsgebiet

biete bewaldet, bevor sich nördlich Grünflächen anschließen, die dann entlang der Bachtäler in die Innenstadt hineinreichen. Seit dem Jahr 1985 sind große Teile des Johannis- und Kannegießerbachtals in deren unbebauten, oberen Talbereichen und dem Aachener Wald als Landschaftsschutzgebiet ausgewiesen (BFN 2013).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden zwei Bachtäler empirisch untersucht (vgl. Abb. 17), das Kannegießerbachtal, das später in das Ponellbachtal übergeht (vgl. ÖKOLOGIEZENTRUM AACHEN 1991) und das etwas weiter westlich gelegene Johannisbachtal. Beide Bachtäler, vor allem aber das Kannegießerbachtal, wurden bereits des Öfteren bezüglich ihrer Kaltlufteigenschaften untersucht (vgl. z.B. SCHNEIDER & KETZLER 2006, SCHNEIDER & KETZLER 2005, KETZLER 2002, HAVLIK & KETZLER 2000, BRAUERS & KETZLER 1988). In Folge wird das Kannegießer- und Ponellbachtal durchgängig als Kannegießerbachtal beschrieben. Grund dafür ist, dass die Kaltluft, die die beiden Talabschnitte und so auch den unteren Bereich des Ponellbachtals durchfließt überwiegend im Kannegießerbachtal gebildet wird. Die beiden Talbereiche mit den dazugehörigen Kaltlufteinzugs- und Abflussgebieten sowie deren Lage im Aachener Stadtgebiet sind in Abb. 19 dargestellt. Die dargestellten Talbereiche sind zudem der für die Modellierung in Kap. 6 und Kap. 7 ausgewählte Modellbereich.

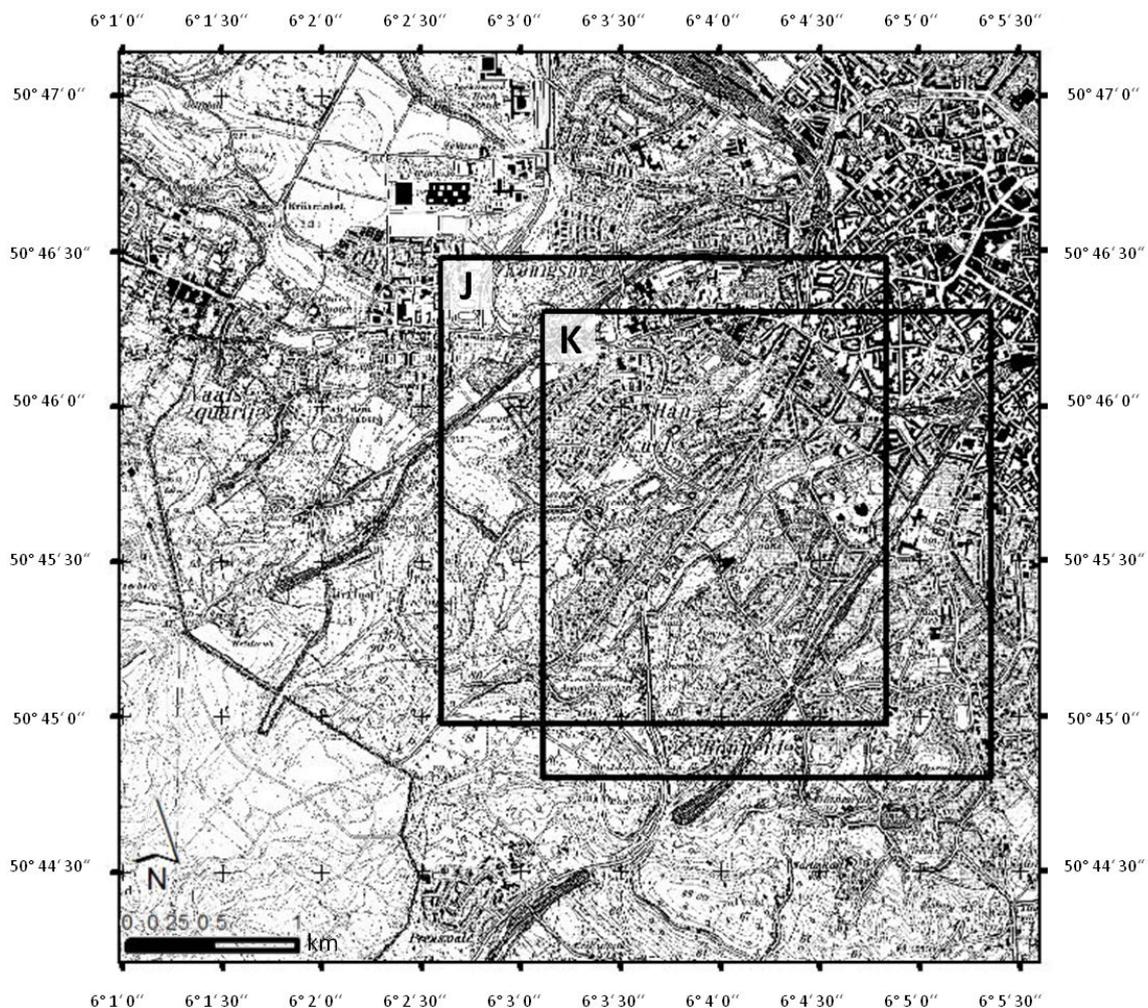


Abb. 19: Lage der Untersuchungsgebiete Johannisbachtal (J) und Kannegießerbachtal (K) im Aachener Stadtgebiet (Kartengrundlage LANDESVERMESSUNGSAMT NORDRHEIN-WESTFALEN 1995a-e).

Die bisherigen Forschungsergebnisse, die im Untersuchungsgebiet entstanden sind, sind in Kap. 4.2.1 zusammengetragen, bevor in Kap. 4.2.2 eine detaillierte geographische Betrachtung des Untersuchungsraumes erfolgt.

4.2.1 Bisheriger Kenntnisstand

Die Bachtäler im Süden der Stadt Aachen sind seit längerem Gegenstand zahlreicher Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bildung und dem Abfluss von Kaltluft. Das Untersuchungsgebiet wurde u.a. aufgrund dieser umfangreichen Gebietskenntnisse ausgewählt. So war z.B. unabdingbare Voraussetzung für die vorliegende Untersuchung, dass Kaltluft in ausreichender Menge und Mächtigkeit gebildet wird, diese entlang der Luftleitbahn fließt und in der zusätzlich verschiedene Vegetationsbestände vorhanden sind.

Die Untersuchungen in Aachen zur Interaktion zwischen Stadt- und Geländeklima reichen weit zurück. Spätestens seit Gründung des Meteorologischen Observatoriums (1900) spielen oben genannte Fragestellungen eine Rolle (vgl. SACHSEN et al. 2010) und tauchen in verschiedenen Quellen auf (EßER 2010). An dieser Stelle sollen die wichtigsten Erkenntnisse zu Kaltluftabflüssen – vor allem im Kannegießer- und Johannisbachtal – dokumentiert werden.

Aus planerischer Sicht, legte das 1972 durch die Stadt Aachen beauftragte und 1978 fertiggestellte landschaftsplanerische Gutachten die Grundlage für weitere stadt- und geländeklimatologische Untersuchungen. Ziel des Gutachtens war es, die „charakteristischen geländeklimatischen, stadtklimatischen und lufthygienischen Verhältnisse im Aachener Stadtgebiet festzustellen“ (PFLUG et al. 1978:28), um diese in die Erstellung eines Flächennutzungsplanes zu integrieren, der schließlich 1980 vollendet wurde.⁸ Das Landschaftsplanerische Gutachten stellte bezüglich der Kaltluftbahnen fest, dass diese dringend freigehalten oder wieder geöffnet werden sollten, um der lufthygienischen und klimatischen Empfindlichkeit des Aachener Stadtkernes Sorge zu tragen (PFLUG et al 1978).

Wenn auch in der 1986 von EMONDS veröffentlichten Arbeit Fragen der Luftqualität im Aachener Kessel im Mittelpunkt standen, so lieferte die Arbeit zusätzlich Erkenntnisse über die Kaltluftabflussbedingungen im Aachener Süden (EMONDS 1986). So beobachtete Emonds große Lufttemperaturunterschiede verschiedener Messstellen im Aachener Kessel, vor allem während südlicher Winde und während Kalmen, für die er als „einfachste Erklärung“ den Abfluss von Kaltluft anführte (EMONDS 1986:84).

In Folge kam es zur empirischen Klärung von Detailfragen in Form von Forschungsarbeiten, Lehrveranstaltungen und der Erstellung von Gutachten. So befassen sich BRAUERS & KETZLER erstmals umfassend mit den Bachtälern Aachens sowie deren stadt- und geländeklimatologischen Funktionen. Dabei

⁸ Der Flächennutzungsplan von 1980 wurde inzwischen stark verändert, besitzt jedoch nach wie vor Gültigkeit und befindet sich derzeit in Überarbeitung (STADT AACHEN 2012b, Sachsen et al. 2011).

wurden Messfahrten anhand von Talquerprofilen durchgeführt, um die Ausbreitungs- und Abflussbedingungen der Kaltluft festzustellen sowie Fesselballonsondierungen zur Bestimmung der Kaltluftmächtigkeit. BRAUERS & KETZLER stellen im Kannegießerbachtal abfließende Kaltluftmengen von bis zu $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ und Fließgeschwindigkeiten von bis zu $3,5 \text{ m s}^{-1}$ in $5,6 \text{ m}$ ü. Gr. fest (BRAUERS & KETZLER 1988). Zudem wird erstmals für Aachen der Einfluss von Vegetation auf den Kaltluftabfluss beschrieben. So existierten Bäume und Hecken, „deren Umrisse einen erheblichen Teil des Talquerschnittes versperren“ und die je nach Anordnung als „ausgesprochenes Hindernis“ fungieren (BRAUERS & KETZLER 1988:9). Die gegebenen Planungsempfehlungen für das Kannegießerbachtal sind daher das Freihalten des Tales von Hindernissen und eine Auflockerung bestehender Hindernisse (BRAUERS & KETZLER 1988). Im Falle des Johannisbachtals wird zu einer Auflockerung der talquerenden Hecken geraten (BRAUERS & KETZLER 1988). HAVLIK & KETZLER schreiben 1996 über das Kannegießerbachtal, dass in ca. 40 % aller Nächte Kaltluftabflüsse nachweisbar sind, zudem fließen bereits vor Sonnenuntergang große Mengen Kaltluft in Richtung Innenstadt. Die Fließgeschwindigkeit am Brüsseler Ring (vgl. Abb. 20) beträgt dabei ca. 1 m s^{-1} , im Bereich der Schillerstraße im verbauten Querschnitt ca. $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (HAVLIK & KETZLER 1996), wobei dort kein Überfließen der Bebauung stattfindet, sondern vielmehr ein Fließen der Kaltluft durch vorhandene Baulücken, mit einer dennoch nachweislichen Verbesserung der Lufthygiene in Teilen der südlichen Innenstadt (HAVLIK & KETZLER 1995). Am Damm des Brüsseler Ringes werden bei intermittierendem Abfluss Geschwindigkeiten von bis zu 3 m s^{-1} erreicht. Auch hier findet sich ein Hinweis zu Vegetationsbeständen in der Kaltluftbahn. So wird für den Bereich Mariabrunnstraße / Mozartstraße die Reduktion der Baumhöhen vorgeschlagen sowie eine Vernetzung von isolierten Grünflächen weiter stadteinwärts (HAVLIK & KETZLER 1996). Zudem wird die verkehrliche Situation angesprochen, wobei das Verkehrsaufkommen während Kaltluftabflussbedingungen nach Möglichkeit zu reduzieren ist. SCHNEIDER & KETZLER schreiben in Folge sehr deutlich, dass eine weitere bauliche Verdichtung der Talachse des Kannegießerbachtals „erhebliche und nicht kompensierbare Auswirkungen“ auf die Belüftungsfunktionen haben wird (SCHNEIDER & KETZLER 2006:3), was durch bereits durchgeführte Nachverdichtung im Bestand belegt werden kann (SCHNEIDER & KETZLER 2005). Neben den bereits beschriebenen Größenordnungen von Fließgeschwindigkeit und Mächtigkeit der Kaltluft erreicht die Kaltluft im Kannegießerbachtal ein Volumen von bis zu $80.000.000 \text{ m}^3$ pro Nacht, was die Bedeutung des Kannegießerbachtals für das Stadtklima Aachens verdeutlicht (SCHNEIDER & KETZLER 2006). Auch hier findet sich der Hinweis, dass Veränderungen der Bepflanzung – vor allem wenn sie in größerem Umfang geschehen – hinsichtlich der Einflüsse auf die fließende Kaltluft zu beachten sind (SCHNEIDER & KETZLER 2006). Weitere Untersuchungen mit Kaltluftbezug im südlichen Stadtgebiet Aachens finden z.B. durch HAVLIK und KETZLER im Gillesbachtal (HAVLIK & KETZLER 1993) sowie durch KETZLER et al. im Dorbachtal statt (KETZLER et al. 2010b).

Durch Fortschritte in der Klimatologie und städtebauliche Veränderungen Aachens wurde im Jahr 2000 das bereits mehrfach zitierte „Gesamtstädtische Klimagutachten Aachen“ veröffentlicht (HAVLIK & KETZLER 2000). In Bezug auf die Aachener Bachtäler fanden umfangreiche Messungen mittels temporärer Messstationen, mobiler Messungen und Ballonsondierungen statt, die erneut die Relevanz zweckangepasster Planung im Kannegießerbachtal und den anderen Bachtälern dokumentierten. Ergänzend konnte Horbert anhand von Messfahrten die Kaltluftabflüsse in der Wärmeinselkartierung gut als Bereiche niedriger städtischer Temperaturen identifizieren (HORBERT 2000). Die nachfolgenden

Eigenschaften der Aachener Bachtäler entstammen weitestgehend den Messungen, die im Rahmen des „Gesamtstädtischen Klimagutachten Aachen“ durchgeführt wurden.

Das Kannegießerbachtal (vgl. Tab. 4) weist im Vergleich mit den anderen Tälern die höchste Kaltluftfließgeschwindigkeit, den höchsten Volumenstrom sowie die höchste Kaltluftproduktionsrate auf. Da das Kannegießerbachtal zudem seinen tiefsten Punkt genau im Zentrum Aachens erreicht, wird ihm das größte Potenzial bei der Reduktion städtischer Überwärmung und der Verbesserung der Luftqualität zugeschrieben. Der Grünfinger des Kannegießerbachtals ist vergleichsweise weit bis in die Innenstadt unbebaut. Die ersten Hindernisse in Form von Bebauung stellen Kleingartenanlagen von niedriger Bauhöhe dar, wie aus Abb. 20 ersichtlich.

Tab. 4: Eigenschaften der Kaltluftabflüsse in den Aachener Bachtälern (nach KETZLER 2002, HAVLIK & KETZLER 2000).

Einzugsgebiet	Gillesbachtal (Branderhofer Weg)	Kannegießerbachtal (Brüsseler Ring)	Ponellbachtal (Schillerstraße)	Johannisbachtal (Auf der Mauer)	Dorbachtal (Steppen-berg)	Wildbachtal (Schurzelt)	Haarbachtal (Birkstraße)
Längsgefälle [%]	5,0	3,3	2,4	3,3	2,0	0,9	1,1
Max. Höhenunterschied [m]	80	130	150	90	120	170	80
Einzugsgebiet [km ²]	1,1	1,2	2,7	0,8	2,7	6,9	6,5
davon Freiflächen [km ²]	0,3	0,6	1,0	0,4	1,4	4,8	3,6
Reliefenergie [m km ⁻²]	75,4	112,4	56,5	112,5	44,2	24,6	12,4
OKG [m ü. Gr.]	30	32	30	30	23	25	33
Breite [m]	150	180	300	200	150	300	300
Querschnitt [m ²]	2250	2880	4500	3000	1725	3750	4950
OKG [m.ü.G.]	15	18	30	20	15	30	30
Mit. Fließgeschwindigkeit [m s ⁻¹]	0,3	1,1	0,4	0,2	0,7	0,5	0,4
Volumenstrom [m ³ s ⁻¹]	674	3168	1690	607	1283	1886	1974
Kaltluftproduktionsrate [m ³ m ² h ⁻¹]	7,7	20,6	6,0	5,5	3,4	1,4	2,0

Bei der weiter in Richtung Innenstadt anschließenden Bebauungsplanung in den vergangenen Jahrzehnten, wurde darauf geachtet den Einfluss auf den Kaltluftstrom möglichst gering zu halten (z.B. SCHNEIDER & KETZLER 2005). Ab dem Bereich der Schillerstraße findet sich erst die für Aachen typische viergeschossige Bauhöhe von ca. 15 m (vgl. KETZLER et al. 2010a). Es folgt weiter stadteinwärts der bereits beschriebene Bahndamm, der nachweislich von der Kaltluft – zwar nicht kontinuierlich aber intermittierend – überströmt wird (HAVLIK & KETZLER 1996). So erreicht die Kaltluft mindestens den Boxgraben (vgl. Kap.6.2.7 und Abb. 74). Weiter innerstädtisch konnte die Kaltluft bislang nicht empirisch nachgewiesen werden, die Mächtigkeit im Bereich des Boxgraben lässt jedoch vermuten, dass die Kaltluft beinahe alle Teile des Talverlaufes – wenn auch weiter innerstädtisch in geringer Intensität – erreicht. Diese Annahme wird zudem durch Modellergebnisse bestätigt (vgl. Kap. 6 und Kap. 7).

Die Flächen mit höchstem Kaltluftbildungspotenzial im Kannegießerbachtal sind Wiesen im oberen Talverlauf (vgl. Kap. 3.3). Da diese Wiesen auch schon vor dem astronomischen Sonnenuntergang durch den umgebenden hochgewachsenen Waldbestand (Aachener Wald) vor kurzweiliger Strahlung geschützt sind, beginnt die Kaltluftbildung bereits vor Sonnenuntergang (HAVLIK & KETZLER 2000, BRAUERS & KETZLER 1988). Inwieweit der Wald als Kaltluftbildner einen Beitrag zur gebildeten Kaltluftmenge leistet, ist bislang nicht untersucht worden. Aufgrund des starken Reliefs ist davon auszugehen, dass erhebliche Mengen kalter Luft im Bereich des Waldes gebildet werden (vgl. Kap. 3.4). Einen ähnlichen Hinweis ergibt die Interpretation einer Thermalkarte des Aachener Stadtgebietes, wo Kaltluft am Waldrand in Erscheinung tritt, die vorher, durch das Kronendach geschützt, nicht sichtbar war (HAVLIK et al. 2000). Vor allem im Bereich des Brüsseler Ringes ist die Talsohle stark vernässt, was eher nachteilig auf die Kaltluftproduktion wirkt (vgl. Kap. 3.3). Die größten Kaltluftmengen werden folglich im oberen Talbereich gebildet. Aufgrund der Übereinstimmung des Talverlaufs mit der häufigsten Windrichtung (SW) für Aachen übernimmt das Kannegießerbachtal auch in Nächten ohne Kaltluftabfluss sowie tagsüber wichtige Belüftungsfunktionen für die Stadt (HAVLIK & KETZLER 2000).

Das Johannisbachtal weist u.a. aufgrund der größeren Talbreite eine geringere Volumenstromdichte auf als das Kannegießerbachtal (vgl. Tab. 4). Aufgrund des geringeren Höhenunterschiedes und der größeren Talbreite finden sich zudem niedrigere Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft. Da die Kaltluft auf ihrem weiteren Weg in Richtung Stadtzentrum länger durch bebautes Gebiet fließt und sich dabei erwärmt, ist die Bedeutung des Johannisbachtals für die Temperatur und Luftqualität in der Innenstadt von untergeordneter Bedeutung. Die Auswahl des Untersuchungsraumes im Johannisbachtal ist einigen prägnanten, isoliert stehenden Vegetationseinheiten zuzuschreiben, bei denen im Rahmen landschaftspflegerischer Maßnahmen mehrere Gehölzbestände, deren Verlauf quer zur Talrichtung ist, zurückgeschnitten („auf-den-Stock-gesetzt“) wurden (vgl. Kap. 4.2.2).

Die historische Betrachtung des Kannegießerbachtals mit der Funktion als Ventilationsbahn und Kaltluftschneise erfolgte in einer modellbasierten Studie von KETZLER et al. im Jahre 2010 sowie einer Vertiefung im Jahre 2012 (KETZLER et al. 2010a, KETZLER et al. 2012). Da die Auswirkungen der Flächennutzung ein entscheidendes Kriterium für Kaltluftbildung und Kaltluftabfluss sind, ist die Veränderung der Nutzung Grundlage des Modellvergleiches. So konnte mit Hilfe der Kaltluftabflussmodelle KLAM_21 (vgl. Kap. 5.3) und SIMKLA (KETZLER et al. 2010a) sowie GIS-gestützter Datenaufbereitung und -verwertung, die Veränderung der Belüftungsfunktion des Kannegießerbachtals in den vergangenen 200 Jahren rekonstruiert werden. Das Ergebnis zeigt die (auch historisch) wichtige Funktion des Kannegießerbachtals als Kaltluftbahn zur Reduktion städtischer Überwärmung und schlechter Luftqualität (KETZLER et al. 2010a, KETZLER et al. 2012). Zudem wurde anhand von historischen Dokumenten gezeigt, dass das Kannegießerbachtal überwiegend frei von Bebauung und begrünt war (z.B. VON KOPPEN 1996). Unter wachsendem Flächendruck im 20. Jahrhundert ist die Erhaltung der Aachener Grünfinger vor allem der Entwicklung eines umfassenden Grünflächensystems (im Wesentlichen in den Jahren 1913 bis 1945) zu verdanken (HOFMANN 1953). Zwar geschah die Anlage, Erhaltung und Erschließung der Freiflächen entlang des Kannegießer- und Johannisbachtals nicht unter klimatischen, sondern kurstädtischen Gesichtspunkten, was den klimatischen Nutzen aus heutiger Sicht

jedoch keineswegs schmälert. Eine Teilbebauung des Tales erfolgte erst im 20. Jahrhundert einhergehend mit erweiterten technischen Möglichkeiten (KETZLER et al. 2010a, CURDES 1997).

Neben lufthygienischen und thermischen Effekten erfüllen die Bachtäler Aachens wichtige Aufgaben hinsichtlich der Biodiversität, da sie als überwiegend geschützter Landschaftsbestandteil seltene Tiere und vor allem Pflanzen beherbergen. Vor allem der recht kurze Kannegießerbach zeigt eine große Vielfalt an Ausprägungen (NELIBEN 2009).

4.2.2 Kleinräumige Betrachtung der Untersuchungsgebiete

Beide Bachtäler, die in der vorliegenden Arbeit Untersuchungsgebiet sind, wurden vornehmlich unter vegetationsgeographischen Gesichtspunkten ausgewählt. Dabei war es das Ziel einen Vegetationsbestand zu finden, der ein ausreichendes Hindernis für den Kaltluftabfluss darstellt und zudem nach Möglichkeit modifiziert werden kann. Passende Vegetationsbestände fanden sich im Johannisbachtal und Kannegießerbachtal, die Auswahl erfolgte in Kooperation mit dem Fachbereich Umwelt der Stadt Aachen. Abb. 20 zeigt das Untersuchungsgebiet Kannegießerbachtal mit den dazugehörigen Messstationen KBR, KW und KB.

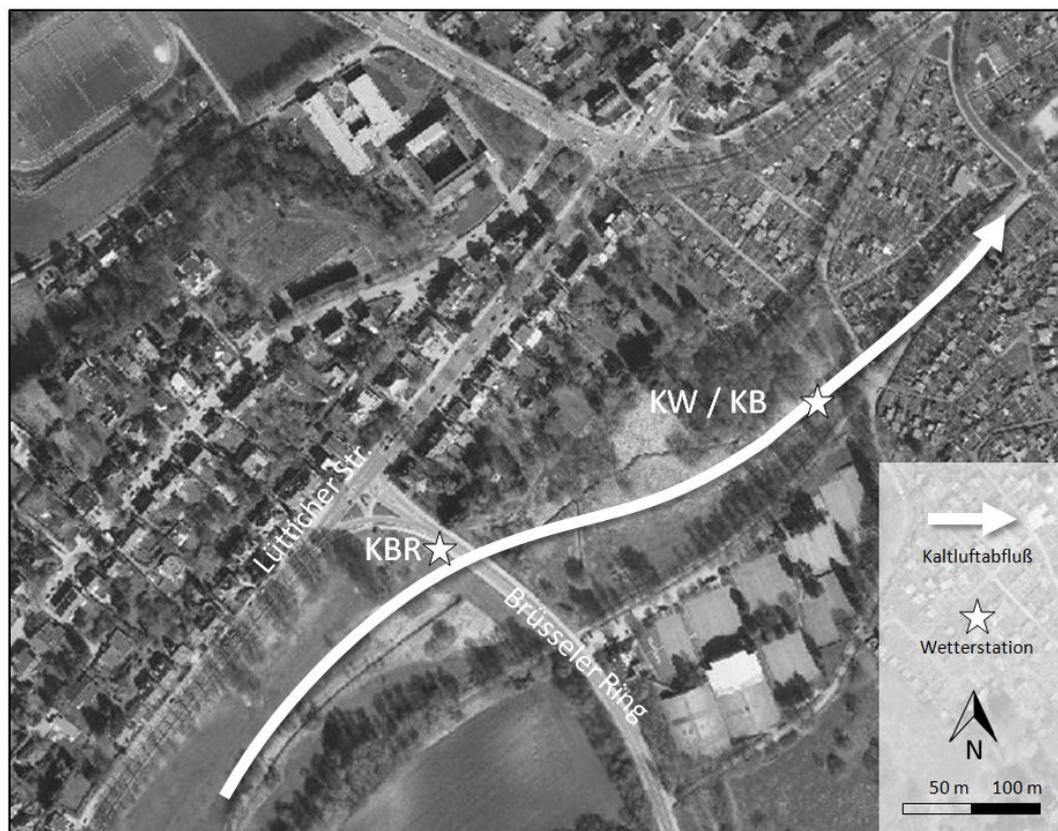


Abb. 20: Orthophoto des Kannegießerbachtals mit Standort der Wetterstation KBR, KW, KB und der Richtung des Kaltluftabflusses (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).

In Abb. 20 ist zu erkennen, dass der Kannegießerbach, anders als weiter nördlich an das Untersuchungsgebiet anschließend, oberirdisch verläuft. So ist der Verlauf der Talsohle, an dem sich auch der

4. Das Untersuchungsgebiet

Kaltluftabfluss orientiert, ersichtlich. Wie bereits in Kap. 4.2.1 beschrieben ist der zentrale Talverlauf in dem abgebildeten Bereich frei von Bebauung. Bebauung in Form von eingeschossigen Kleingartenanlagen schließt sich erst nordöstlich von Messstation KW und KB an. Die lockere Bauweise der „Gartenlauben“ stellt für die bis zu 30 m mächtige Kaltluft kein nennenswertes Hindernis dar. Hindernisse in der Luftleitbahn sind in diesem Talabschnitt hoch aufwachsende Vegetationsbestände (vgl. Kap. 5.1.1), wobei der Großteil des Tales Grünflächen sind, die extensiv landwirtschaftlich genutzt werden. Die Lütticher Straße verläuft auf dem westlichen Höhenrücken des Kannegießerbachtals und stellt eine der Hauptausfallstraßen der Stadt Aachen in Richtung Belgien dar (vgl. Abb. 20). Historisch betrachtet war sie die Hauptverbindungsstraße zwischen Aachen und Lüttich, was die recht dichte, am Straßenverlauf orientierte Bebauung erklärt. Im Rahmen der Kaltluft-Modellierung in Kap. 6 und Kap. 7 findet sich in Kap. 5.3 eine detaillierte Beschreibung und kartographische Darstellung der Flächennutzung - als elementarer Beeinflussungsfaktor der Kaltluftbildung und des Kaltluftabflusses - im Kannegießer- und (dem nachfolgend beschriebenen) Johannisbachtal.

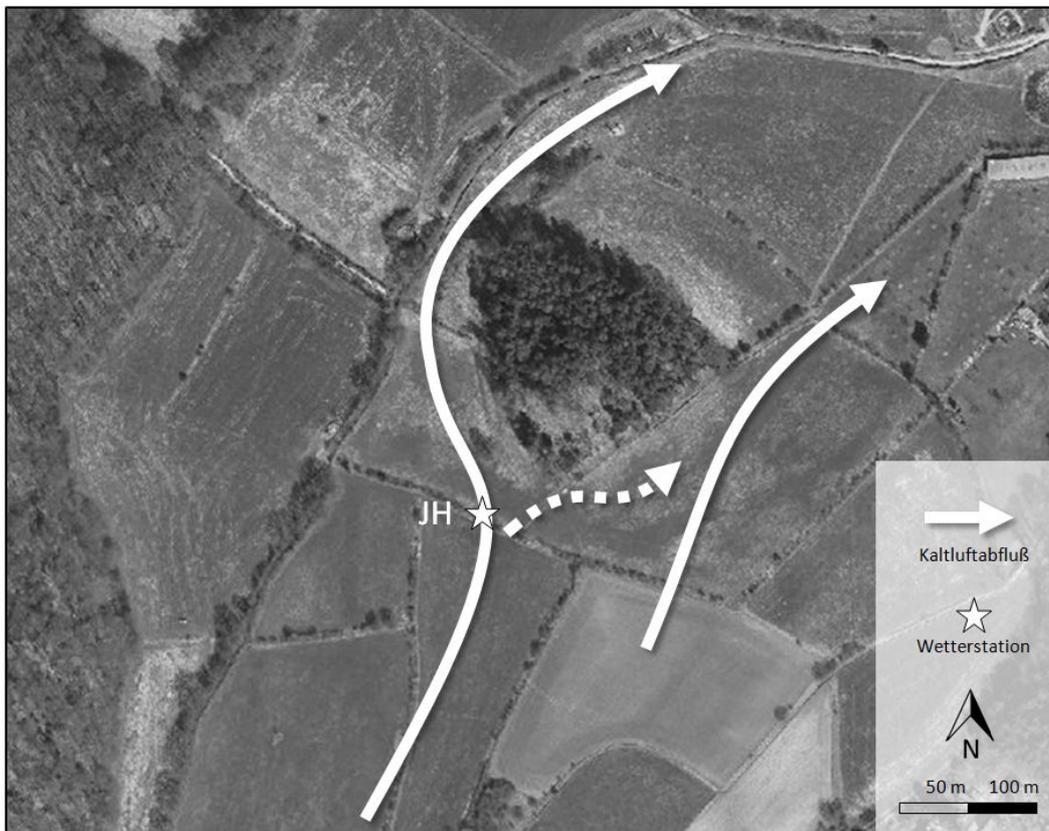


Abb. 21: Orthophoto des Johannisbachtals mit Standort der Wetterstation JH und der Richtung des Kaltluftabflusses (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).

Das Untersuchungsgebiet im Johannisbachtal liegt westlich des Kannegießerbachtals (vgl. Abb. 19). Wenn auch nicht in wesentlich größerer Entfernung zur Innenstadt Aachens gelegen, ist das Johannisbachtal stärker ländlich geprägt. Auf dem überwiegenden Teil der Flächen findet sich Grünlandwirtschaft mit Beweidung, auf einer kleinen Fläche im Südosten wird Ackerbau betrieben. Die höher gelegenen Bereiche des Tales sind – wie beim Kannegießerbachtal auch – Teil des Aachener Waldes, der überwiegend mit Koniferen bestanden ist. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes Johannisbach-

tal befindet sich ein isolierter Waldbestand, der aufgrund der exponierten Lage von der Kaltluft umflossen wird. Der eigentliche Talverlauf liegt westlich des Waldbestandes. Eine kleinere, eigenständige Talmulde findet sich östlich des Waldes und mündet im Norden des Untersuchungsgebietes in den eigentlichen Talverlauf des Johannisbachtals. Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Heckenpflanzungen vorgenommen, die das traditionelle Bild der Kulturlandschaft wieder herstellen. Ein solcher, quer zum Tal verlaufender Heckenbestand war der Grund für die Auswahl des Untersuchungsgebietes.

5. Material und Methoden

Zur Erarbeitung der Untersuchungsergebnisse in Kap. 6 wurde ein Datenpool mit Hilfe stationärer Messstationen und mobiler Messungen erstellt, dessen Eigenschaften in den folgenden Kapiteln beschrieben werden. Die Daten dienen neben der kleinräumigen empirischen Erfassung der Kaltluftströme und deren Eigenschaften zur Kalibrierung und Falsifizierung der Kaltluftabflussmodellierungen in Kap. 6 und Kap. 7.

5.1 Stationäre Messungen

In der vorliegenden Arbeit wurden Daten von sechs verschiedenen Wetterstationen verwandt, die in Kap. 5.1.1 hinsichtlich ihres Standortes und Stationsumfeldes beschrieben werden. Dabei handelt es sich um vier Stationen, die ausschließlich Bestandteil der vorliegenden Untersuchung waren. Als Referenzstation diente zudem die Wetterstation Hörn des Geographischen Instituts der RWTH Aachen. Des Weiteren wurden Strahlungsdaten der Station des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Aachen-Burtscheid verwandt. Da die Erfassung geänderter Klimaparameter aufgrund geänderter Vegetationsstrukturen Schwerpunkt der Untersuchung ist, werden diese Veränderungen in der Vegetationsstruktur in Kap. 5.1.2 systematisch erfasst und beschrieben. Eine Übersicht über die jeweiligen Messzeiträume liefert Kap. 5.1.5. Kap. 5.1.3 beschreibt das Messdesign und Kap. 5.1.4 die Messtechnik.

5.1.1 Stationsstandorte und Umfeld

In Folge sind die Stationen beschrieben, deren Daten in der vorliegenden Untersuchung Berücksichtigung fanden.

Kannegießerbachtal - Brüsseler Ring: KBR

Lage: 6°03'53,89"E 50°45'33,16"N Höhe: 212 m ü. NN

Die Messungen der Station KBR erfolgten in 3 m Höhe ü. Gr. an einem Laternenmast. Die gemessenen Parameter waren die Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Lufttemperatur und Relative Feuchte. Die Station war dabei so ausgerichtet, dass während Kaltluftabflusssituationen mit einer Anströmrichtung aus Südwest keinerlei Einflüsse des Laternenmastes auf den Windgeber sowie Thermo-Hygro-Geber zu erwarten waren. Der Mast stand unmittelbar in der Talsohle, dort allerdings auf einem ca. 3 m hohen Damm, auf dem der Brüsseler Ring das Kannegießerbachtal quert (vgl. Abb. 20). Die Station war von allen Seiten frei anströmbar, vor allem in Richtung Südwesten gab es keinerlei Hindernisse – auch nicht in Form von Vegetation – die den Kaltluftabfluss hätten modifizieren können. Die Station KBR lieferte für die Untersuchung Daten des ungestörten Kaltluftabflusses im Kannegießerbachtal und diente damit als Referenzstation in der Kaltluftbahn als Basis der Datenauswertungen in Kap. 6. Der Stationsaufbau ist Abb. 22 in zu erkennen.



Abb. 22: Station KBR am 19.11.2009 mit Wind- und Thermo-Hygro-Geber in 3 m ü. Gr. (Blickrichtung: NW); Hintergrund: Bebauung entlang der Lütticherstraße (vgl. Abb. 20).

Kannegießerbachtal – Wiese: KW

Lage: 6°04'06,47''E 50°45'37,81''N Höhe: 200 m ü. NN

Die Messungen an der Station KW erfolgten in unterschiedlichen Höhen. Die Windgeschwindigkeit und Richtung wurden analog der Station KBR in 3 m Höhe ü. Gr. erfasst. Aufgrund bautechnischer Gegebenheiten des Mastes, wurden Lufttemperatur und Relative Feuchte in einer Höhe von 2,5 m ü. Gr. erfasst. Zudem war ein weiterer Thermo-Hygro-Geber in 0,5 m ü. Gr. installiert, um die entsprechenden Parameter in der Wiesenvegetation, bzw. je nach Jahreszeit an der Bestandsoberfläche, zu erfassen (vgl. Abb. 30). Die Bodentemperatur wurde in drei Tiefen erfasst, in -0,05 m, -0,2 m und -0,5 m unter der Erdoberfläche. Die Erdoberfläche der Stationsumgebung war gänzlich unversiegelt und v.a. in den Sommermonaten stark vernässt. Die Wiesenvegetation wies aufgrund des hohen Wasserangebotes starke jahreszeitliche Schwankungen zwischen ca. 0,1 m und 1,2 m auf (vgl. Abb. 30). Die Station KW wurde etwa 30 m südöstlich der Talsohle positioniert, da diese dort durch einen bis zu 22 m hohen Schwarzerlenbestand bestanden war. Eine kleinere Gruppe Schwarzerlen befand sich zudem südwestlich der Station, so dass die Station bei Kaltluftabfluss im Lee der Baumgruppe stand. Dies war insofern beabsichtigt, als dass die angesprochene Gruppe von drei ca. 13 m bis 15 m hohen Schwarzerlen nach der Hälfte der Messperiode zur Gewinnung zweier Vergleichsdatensätze entnommen wurde. Drei Erlen mit einer Höhe von 4 m bis 14 m wurden im Lee der Station entnommen. Im Osten und Nordosten war die Station von einer Wiese umgeben, die durch Bäume eingefriedet war. Eine detaillierte Beschreibung der Vegetationsveränderungen findet sich in Kap. 5.1.2. Der Stationsaufbau von Station KW ist in Abb. 23 zu erkennen.



Abb. 23: Station KW am 25.03.2009 mit dem Windgeber in 3 m ü. Gr. sowie den Thermo-Hygro-Gebern in 2,5 m ü. Gr. und 0,5 m ü. Gr. (Blickrichtung: NW).

Kannegießerbachtal – Baum: KB

Lage: 6°04'06,36"E 50°45'37,67"N Höhe: 200 ü. NN

Die Station KB (vgl. Abb. 24) wurde in dem oben angesprochenen Schwarzerlenbestand positioniert. Die Höhe der Messwertgeber für die Windgeschwindigkeit und Richtung betrug 5,5 m im Baumbestand. Eine weitere Windfahne sowie ein Anemometer, wurden in 1 m Höhe positioniert. Die Geber in 5,5 m Höhe lieferten in der ersten Messperiode Daten aus dem inneren Astwerk der Schwarzerle. Nach Entfernung dieser wurde die Station in gleicher Höhe an einem Mast angebracht. Die Geber in 1 m Höhe erfassten Windgeschwindigkeit und Richtung unmittelbar an der sommerlichen Bestandsobergrenze der Wiesenvegetation nach Entnahme der Erlen. Zuvor, im Schatten der Erlen, war die Wiesenvegetation entsprechend niedriger. Die weitere Stationsumgebung entspricht der von Station KW. Eine detaillierte Beschreibung der Vegetationsveränderungen findet sich in Kap. 5.1.2.

Johannisbachtal – Hecke: JH

Lage: 6°02'57,92"E 50°45'29,07"N Höhe: 240 ü. NN

Die Station JH (vgl. Abb. 25) wurde im Nordosten einer quer zum Tal verlaufenden Hecke im Johannisbachtal aufgestellt. Bei Kaltluftabfluss stand die Station JH im Lee der Hecke. Die Hecke, bestückt mit heimischen Gehölzen, war im Mittel etwa 3 m hoch. Nach der Hälfte der Messperiode wurde ein ca. 15 m breiter Heckenabschnitt auf ca. 0,5 m Höhe zur Gewinnung zweier Vergleichsdatensätze gekürzt, so dass die Station frei von der Kaltluft anströmbar war. Die Station lag in der Mitte der Talsohle des Johannisbachtals, was sehr eindrucksvoll durch einen sich bildenden Wasserlauf während der Schneeschmelze belegt werden konnte. Die Kaltluftbahn aufwärts betrachtet, befand sich in ca. 130 m Distanz eine weitere Hecke, deren Verlauf jedoch etwa dem Talverlauf entsprach, so dass keine erhebliche Störung des Kaltluftabflusses anzunehmen war. Talabwärts dagegen erfolgte in ca. 50 m Distanz ein ca. 0,02 km² großer Waldbestand in exponierter Lage, der den Kaltluftstrom nach Westen ablenkte und durch eine ca. 40 m breite Engstelle zwang. Die nähere Umgebung der Station

wurde als Grünland/Weideland genutzt. Die gemessenen Parameter waren Lufttemperatur und Relative Feuchte sowie Windgeschwindigkeit und -richtung in 2,5 m Höhe.



Abb. 24: Station KB in einer Messhöhe von 5,5 m ü. Gr. im Baum in Messzeitraum 1 (oben links, vgl. Kap 5.1.3, 08.02.2010) und am Mast in Messzeitraum 2 (unten links, vgl. Kap. 5.1.3, 15.09.2010) sowie Station KB (1 m) (rechts, 03.08.2009).



Abb. 25: Station JH am 18.01.2010 mit Wind- und Thermo-Hygro-Geber in 2,5 m ü. Gr. (Blickrichtung: SW).

Hörn – Geographisches Institut: HÖ

Lage: 6°03'43,19"E 50°46'48,36"N

Höhe: 222 m ü. NN

Die Messwiese der Wetterstation des Geographischen Instituts der RWTH Aachen liegt auf einer leicht geneigten Grünfläche auf dem Königshügel im Stadtteil Hörn, ca. 1,5 km westlich der Innen-

stadt. Die Station wird von einer ca. 0,008 km² großen Grünfläche umgeben, die westlich von einem Parkplatz mit randlichen Baumbeständen (ca. 20 m Entfernung) und in sonstigen Richtungen von Universitäts- und Wohngebäuden (ca. 50 m bis 120 m Entfernung) begrenzt wird. Die in der Untersuchung verwandten Lufttemperatur-, Bodentemperatur- und Feuchtedaten wurden auf der beschriebenen Messwiese aufgezeichnet. Die Erfassung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung erfolgte durch eine Station, die auf einem angrenzenden Universitätsgebäude in 10 m Höhe über dem Dach positioniert ist, eine Beeinflussung durch lokale Kaltluft ist demnach ausgeschlossen. Nähere Angaben zur Station finden sich z.B. bei KETZLER (KETZLER et al. 2010c, KETZLER 1997).

Burtscheid – DWD: BU

Lage: 6°05'40,24"E 50°45'21,52"N Höhe: 205 m ü. NN

Die Station des Deutschen Wetterdienstes (DWD) liegt ca. 2,5 km südlich des Stadtzentrums im Stadtteil Aachen-Burtscheid. Da von dieser Station ausschließlich Strahlungsdaten verwandt wurden, ist die weitere Stationsumgebung von untergeordneter Bedeutung. Nähere Angaben zur Station finden sich beim DWD (DWD 2012b). Die für die Untersuchung verwandten Daten der Station BU sind die der kurzweiligen Strahlungsbilanz Q_k .

Ergänzend sei zur Nomenklatur der Messstationen bemerkt, dass in den Fällen, in denen meteorologische Parameter in mehreren Messhöhen aufgezeichnet wurden, an entsprechender Stelle die Messhöhe in Klammern ergänzt wird. Eine Unterscheidung ist bei Station KW für die Temperatur und Relative Feuchte (KW (2,5 m), KW (0,5 m), KW (-0,05 m), KW (-0,2 m) und KW (-0,5 m)) sowie bei Station KB für die Windgeschwindigkeit und -richtung (KB (5,5 m) und KB (1 m)) erforderlich.

5.1.2 Veränderungen im Stationsumfeld

Station KB und KW dienen zur Erfassung der Vegetationseinflüsse auf den Kaltluftstrom im Kannegießerbachtal, Station JH zur Erfassung der Einflüsse im Johannisbachtal. Die stationsumgebenden Vegetationsbestände wurden jeweils einer Veränderung unterzogen, um so den Zusammenhang zwischen den Kaltluftabflusseigenschaften und den Hindernissen in Form von Vegetation in der Luftleitbahn zu dokumentieren. Die Vegetationsveränderungen sind in Folge systematisch erfasst und schematisch dargestellt (Abb. 26).

Kannegießerbachtal – Station KW und KB

Im Kannegießerbachtal wurden insgesamt sechs Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) am 16.02.2010 entnommen, drei die unter Kaltluftabflussbedingungen im Luv (V_5 , V_6 und V_7) und drei die im Lee der Station KW standen (V_2 , V_3 und V_4). Eine der Schwarzerlen (V_6) diente bis zur Entnahme als "Mast" für Station KB. Der Vegetationsbestand V_c wurde nicht verändert.

Johannisbachtal – Hecke: JH

Im Johannisbachtal wurde am 12.02.2010 ein Heckenabschnitt (V_1) von ca. 15 m Breite entnommen. Im Rahmen landschaftspflegerischer Maßnahmen werden in regelmäßigen Abständen Heckenabschnitte gekürzt, um einen charakteristischen Heckenbestand zu erhalten. Station JH stand im Lee der Hecke bei Kaltluftabfluss. Die umgebende Heckenvegetation (V_a und V_b) wurde nicht verändert.

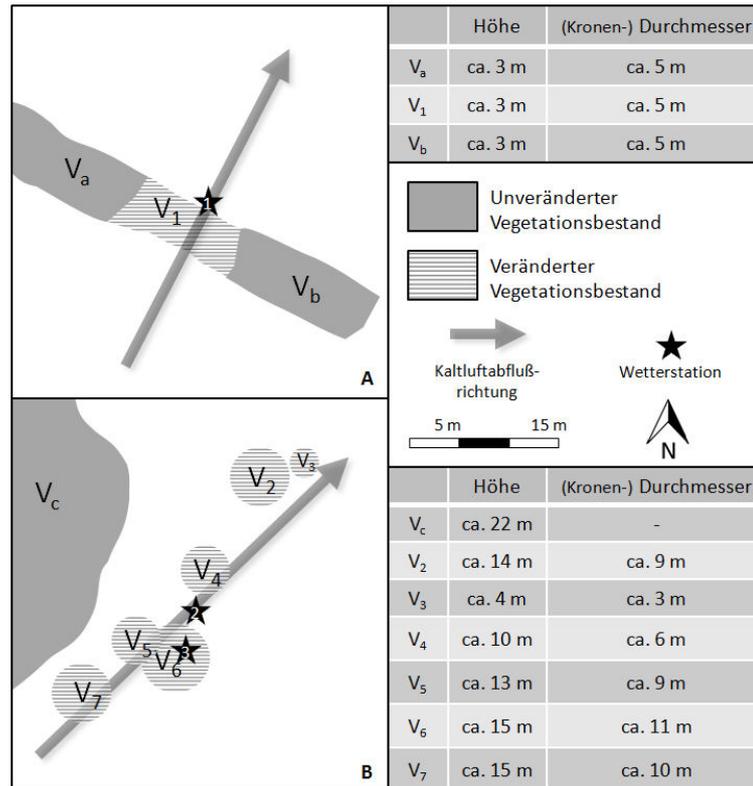


Abb. 26: Vegetationsveränderungen im Johannisbachtal (A) und Kannegießerbachtal (B) mit den entsprechenden Eigenschaften der veränderten und unveränderten Vegetation. Dargestellt sind zudem die Wetterstationen JH (1), KW (2) und KB (3).

Gerade im Kannegießerbachtal sind aufgrund der Umgebungseigenschaften des entnommenen Bestandes ausgeprägte Veränderungen der Kaltlufteigenschaften zu erwarten. Dies liegt daran, dass der Talbereich für den ungehinderten Abfluss kalter Luft auf Höhe der Messstation KB und KW durch weitere Vegetation (V_c und V_d) eingeengt wird und die entnommene Vegetation somit eine verhältnismäßig große Querschnittsfläche des Tales einnimmt. Die schematische Darstellung des Talquerschnitts in Abb. 27 verdeutlicht dies.

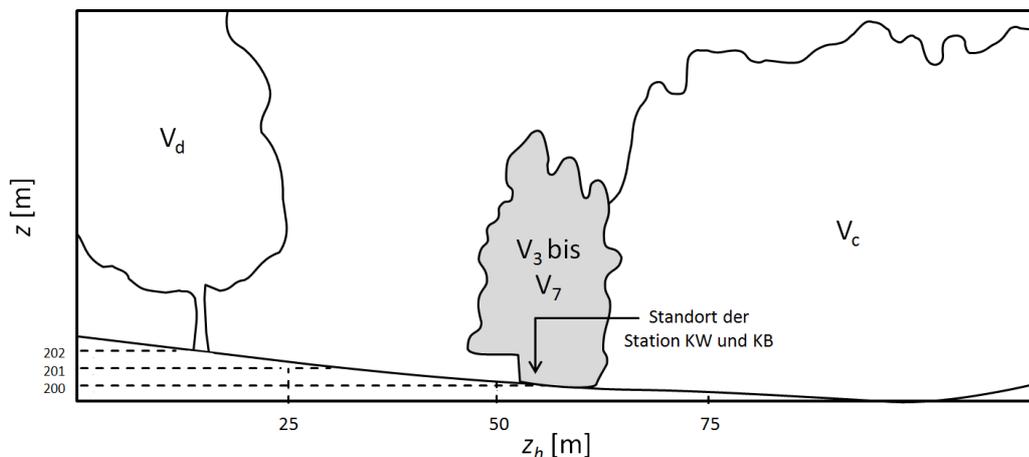


Abb. 27: Schematische Darstellung des Talquerschnitts mit den veränderten Vegetationsbeständen V₃ bis V₇ sowie den unveränderten Vegetationsbeständen V_c und V_d im Kannegießerbachtal auf Höhe der Messstationen KW und KB. Die Blickrichtung ist talaufwärts.

In Folge sind die Veränderungen der Vegetationsbestände in den Bachtälern fotografisch dokumentiert. Abb. 28 zeigt die Veränderungen im Kannegießerbachtal, Abb. 29 die im Johannsbachtal.



Abb. 28: Veränderungen des Vegetationsbestandes an Station KW / KB im Vergleich von Messzeitraum 1 (links, vgl. Kap. 5.1.3, 12.05.2009) und Messzeitraum 2 (rechts, vgl. Kap. 5.1.3, 12.04.2010)



Abb. 29: Veränderungen des Vegetationsbestandes an Station JH im Vergleich von Messzeitraum 1 (oben, vgl. Kap. 5.1.3, 18.01.2010) und Messzeitraum 2 (unten, vgl. Kap. 5.1.3, 09.04.2010).

Neben den anthropogen verursachten Veränderungen der Talvegetation sind zudem die jahreszeitlich bedingten Vegetationseigenschaften zu berücksichtigen. So ist bei Laubbäumen, zu denen auch die Schwarzerlenbestände des Kannegießerbachtals zählen, die belaubte von der unbelaubten Messperiode zu unterscheiden. Der Blattflächenindex (LAI, vgl. Kap. 5.3.2) sowie die daraus errechnete Blattflächendichte (LAD), weisen jahreszeitlich bedingt große Schwankungen auf. Die Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft im Vegetationsbestand weist im Sommer ihr mittleres Minimum auf (vgl. Kap. 6.4.7), da das Blattwerk der Vegetation am flächigsten und dichtesten ausgebildet ist. Gerade während hoher sommerlicher Temperaturen sind jedoch Kaltluftabflüsse für die Reduktion innerstädtischer hoher Temperaturen besonders wichtig und nachteilige Einflüsse auf die Kaltluftversorgung der Innenstadt entsprechend unerwünscht. Die jahreszeitlichen Veränderungen der Vegetation wurden durch eine zweijährige Messperiode berücksichtigt und finden in der Datenauswertung (Kap. 6.4.7) ebenfalls Berücksichtigung.

Auch die Wiesenvegetation unterliegt starken jahreszeitlichen Schwankungen. Während im Johannsbachtal während der Wachstumsperiode die Wiesen beweidet und landwirtschaftlich genutzt wurden, fand im Kannegießerbachtal ein nahezu ungestörtes Wachstum in unmittelbarer Stationsumgebung statt. In Teilen der Grünfläche des Talbereiches fanden während der Vegetationsperiode Mäh- und Mulcharbeiten statt, deren Durchführung jedoch überwiegend gegen Ende der Vegetationsperiode stattfand. Die Wiesenvegetation im Kannegießerbachtal schwankte zwischen winterlichen Höhen von wenigen Zentimetern bis hin zu sommerlichen Höhen von bis zu 1,2 m. Die Vegetationshöhen im Jahresverlauf – exemplarisch für das Jahr 2010 – sind in Abb. 30 für das Kannegießerbachtal dargestellt. Die maximale Höhendifferenz der Wiesenvegetation im Johannsbachtal betrug ca. 0,25 m bei einer maximalen Höhe von ca. 0,3 m.

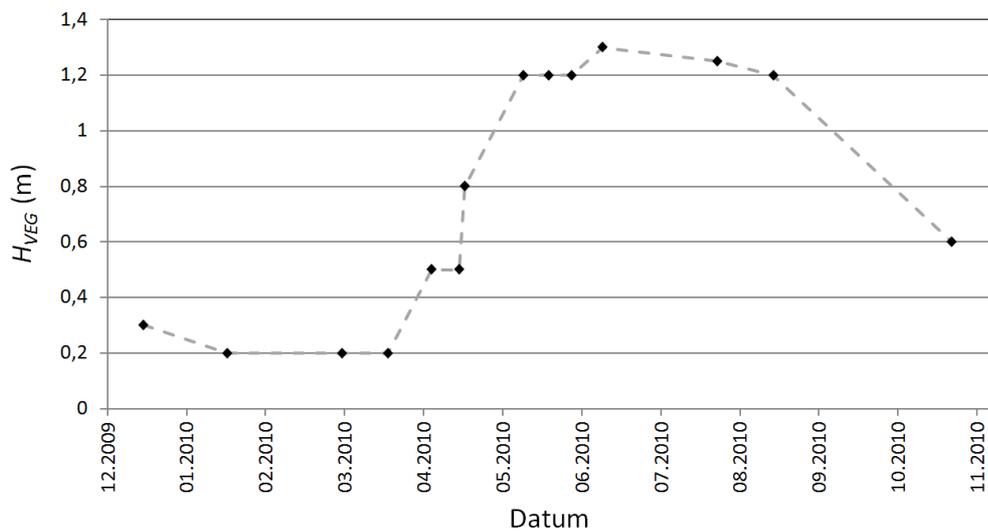


Abb. 30: Höhe der Wiesenvegetation im Bereich von Station KW / KB im Jahr 2010.

Sowohl die jahreszeitlichen Unterschiede der Baumbestände hinsichtlich ihrer Belaubung, als auch die deutlichen Höhenunterschiede der Wiesenvegetation sind in Abb. 31 zu erkennen, die die Umgebung von Station KW / KB zeigt.

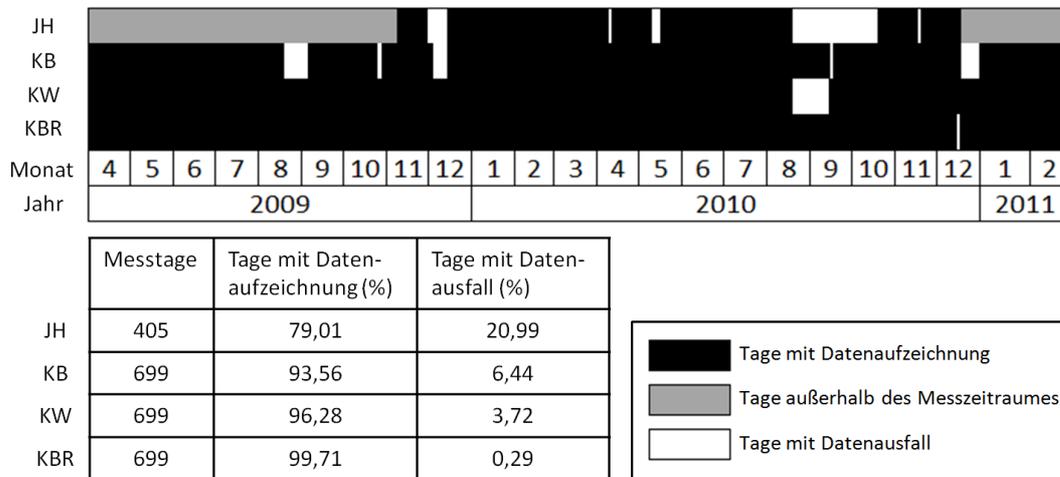


Abb. 31: Jahreszeitlich bedingte Veränderungen des Vegetationsbestandes im Umfeld von Station KW / KB (links: Aufnahme vom 03.08.2009, rechts: Aufnahme vom 25.03.2009)

5.1.3 Messzeiträume

Der Messzeitraum der drei Stationen im Kannegießerbachtal (KBR, KW, KB) erstreckte sich vom März 2009 bis zum März 2011. Da der Aufbau der Wetterstationen witterungsabhängig war, erfolgte dieser nicht an gleichen Tagen. Für die Datenauswertung (vgl. Kap. 6) wurde daher ein Auswertungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 gewählt. Im Johannisbachtal (Station JH) wurden vom November 2009 bis zum Dezember 2010 Daten aufgezeichnet. Tab. 5 zeigt eine Übersicht über die jeweiligen Messzeiträume der verschiedenen Stationen und gibt zudem Aufschluss über Messausfälle.

Tab. 5: Messzeiträume an den Stationen JH, KBR, KW und KB mit den jeweiligen Tagen mit Datenerfassung sowie Messausfällen.



Im Frühjahr 2010 erfolgte die Entnahme von Gehölzen im Kannegießer- und Johannisbachtal (vgl. Kap. 5.1.2). Da bei der Auswertung der Daten der Vergleich zwischen den Zeiträumen vor der Vegetationsentnahme und nach der Vegetationsentnahme elementarer Bestandteil ist, wird für die beiden Messzeiträume im Kannegießerbachtal in den weiteren Kapiteln folgende Benennung verwandt:

MZ1: Messzeitraum 1 umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 01.04.2009 bis zum 15.02.2010.

MZ2: Messzeitraum 2 umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 17.02.2010 bis zum 28.02.2011.

Analog erfolgte die Benennung im Johannisbachtal:

MZ1: Messzeitraum 1 umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 09.11.2009 bis zum 08.02.2010.

MZ2: Messzeitraum 2 umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 16.02.2010 bis zum 18.12.2010.

In Kap. 6.4.7 werden zudem jahreszeitliche Auswertungen des Kaltluftdatensatzes vorgenommen, für die an dieser Stelle ebenfalls eine Nomenklatur definiert wird:

MZ1-S: Messzeitraum 1-S umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 01.06.2009 bis zum 31.08.2009, d.h. die des meteorologischen Sommers im Jahr 2009, in dem der Vegetationsbestand noch nicht entnommen war.

MZ2-S: Messzeitraum 2-S umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 01.06.2010 bis zum 31.08.2010, d.h. die des meteorologischen Sommers im Jahr 2010, in dem der Vegetationsbestand entnommen war.

MZ1-W: Messzeitraum 1-W umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 01.12.2009 bis zum 15.02.2010, d.h. die des meteorologischen Winters im Jahr 2009/2010, in dem der Vegetationsbestand noch nicht entnommen war.

MZ2-W: Messzeitraum 2-W umfasst alle aufgezeichneten Werte vom 01.12.2010 bis zum 15.02.2011, d.h. die des meteorologischen Winters im Jahr 2010/2011, in dem der Vegetationsbestand entnommen war.

5.1.4 Messtechnik

Bei den Stationen KBR, KW und JH kamen ausschließlich Messinstrumente und Datenlogger der Fa. Thies Clima, Göttingen zum Einsatz. Dazu zählten kombinierte Windgeschwindigkeits- und Richtungsgeber des Typs 4.3324.32.xxx sowie kombinierte Thermo-Hgyro-Geber des Typs 1.1005.50.515 mit einem Strahlungsschutzgehäuse des Typs 1.1025.51.000. Als Logger wurde Typ 9.1200.00.000 verwendet. Das Anemometer des kombinierten Windgeschwindigkeits- und Richtungsgebers (Typ 4.3324.32.xxx) hat eine Anlaufgeschwindigkeit von $0,3 \text{ m s}^{-1}$ und Messgenauigkeit von $\pm 0,4 \text{ m s}^{-1}$. Die Windfahne hat eine Messgenauigkeit von $1,5^\circ$. Die Messgenauigkeit des kombinierten Thermo-Hgyro-Gebers (Typ 1.1005.50.515) beträgt im Hinblick auf die Temperatur $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ und im Hinblick auf die Relative Feuchte $\pm 3 \%$ (Thies Clima 2009, Thies Clima o.J.a, Thies Clima o.J.b). Station KB nutzte einen Logger der Firma TH. Friedrichs, Schenefeld (Typ Combilog 1020) sowie Schalenkreuzanemometer und Windrichtungsgeber der Fa. Thies, Göttingen vom Typ 4.3711.10.000 sowie Typ 4.3127.10.000. Die Anlaufgeschwindigkeit des Anemometers beträgt ca. $0,4 \text{ m s}^{-1}$, die Messgenauigkeit etwa $\pm 0,4 \text{ m s}^{-1}$ (Thies Clima 1989, Thies Clima o.J.c, Thies Clima 2013).

Die Messung der Fließgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluft stellt aufgrund der zeitlichen Schwankungen und geringen Fließgeschwindigkeiten eine große Herausforderung dar. So fanden Fließgeschwindigkeiten, die unter der Anlaufgeschwindigkeit der verwandten Anemometer liegen, Berücksichtigung in der Datenauswertung in Kap. 6. Eine Löschung der Daten wurde insofern nicht in Betracht gezogen, da bei Windgeschwindigkeiten von $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ zwar keine genaue Aussage über die exakte Windgeschwindigkeit getroffen werden kann, jedoch immer eine Geschwindigkeit zwischen 0 m s^{-1} und $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ zu Grunde liegt. Eine Löschung der Daten bei der Auswertung würde der tatsächlichen Situation im Tal nicht gerecht, da schwachwindige Zeiten und Kalmen keine Berücksichtigung in der Auswertung finden würden. Im Kannegießer- und Johannisbachtal liegt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in der Regel deutlich über der Anlaufgeschwindigkeit der Anemometer (vgl. Kap. 6.2.4). Der Fehler diesbezüglich wird demnach als eher gering eingeschätzt. Allenfalls in kürzeren Intervallen sowie zu Beginn und zum Ende der Nacht, finden sich Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft an Station KBR und KW, die in einen nicht messbaren Bereich fallen. Aufgrund der umfangreichen Datenmenge (vgl. Kap. 5.1.6), fallen einzelne Fehlmessungen weniger stark ins Gewicht. Welche Windgeschwindigkeitswerte bei den unterschiedlichen Grafiken verwendet wurden, ist an entsprechender Stelle vermerkt. Die Messungenauigkeit bezüglich der Lufttemperatur ($\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) und der

Relativen Feuchte ($\pm 3\%$) sind bei den gemessenen Differenzwerten als unerheblich einzustufen. Auch hier liegt den Auswertungen eine sehr umfassende Datenmenge zu Grunde (vgl. Kap. 5.1.6). Der Aufbau der Stationen KBR, KW, KB und JH ist in Abb. 32 schematisch dargestellt.

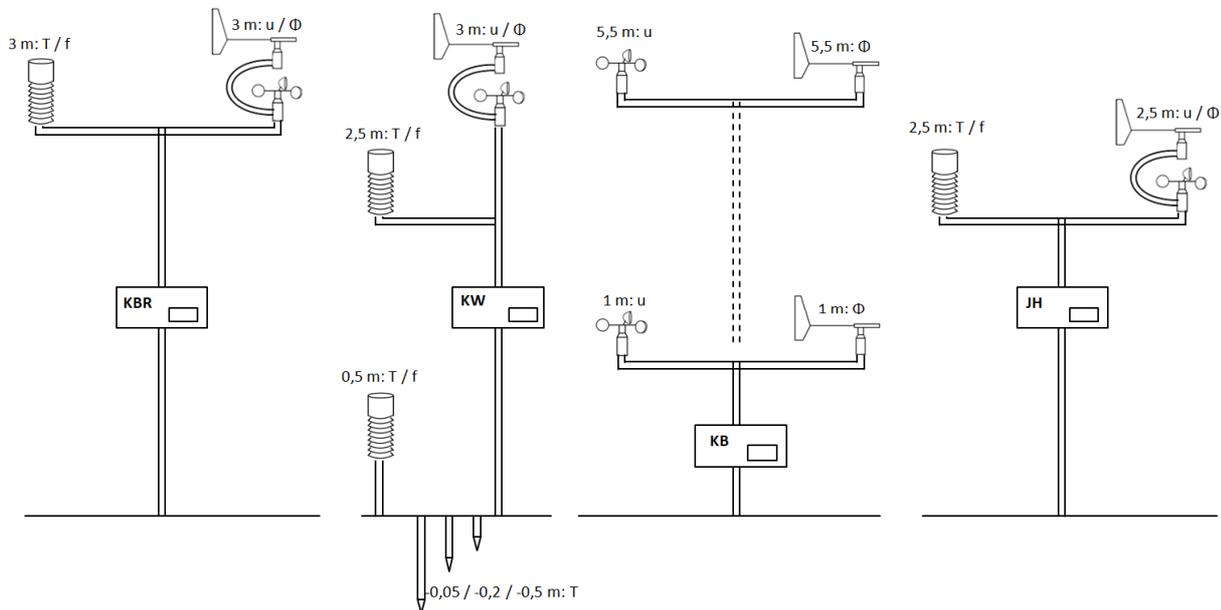


Abb. 32: Schematische Darstellung der Messstationen KBR, KW, KB und JH mit den jeweiligen Messhöhen und erfassten Parametern (T , u , f , Φ).

Die Funktionalität der Messinstrumente und Speichermedien wurden vor der Feldstudie im mehrwöchigen Betrieb sowohl im Innen-, als auch Außenraum getestet. Zudem wurden die aufgezeichneten Daten verglichen und auf Plausibilität geprüft, um eventuelle Abweichungen der Aufzeichnungsdaten gleicher Messinstrumente zu dokumentieren. Eine solche Abweichung lag jedoch nicht vor.

5.1.5 Datenerfassung

Die Daten der verschiedenen Wetterstationen lagen in zeitlich unterschiedlicher Auflösung vor, die für die jeweiligen Auswertungen bearbeitet werden musste. Wurde eine andere Datenauflösung als in Tab. 6 angegeben verwandt, so wird im entsprechenden Kapitel, bzw. in der entsprechenden Abbildung darauf hingewiesen.

Insgesamt waren an den Messstationen im Kannegießerbachtal – wie aus Tab. 5 ersichtlich – nur wenige Tage mit Messausfällen zu verzeichnen (3,49 % bei Station KW und 0,27 % bei Station KBR). Eine leicht höhere Datenausfallquote lag bei Station KB vor (6,22 %), die über ein aufwändigeres Messdesign verfügte als die Stationen KBR und KW. Die Datenausfälle (20,99 %) an Station JH basieren im Wesentlichen auf technischen Gegebenheiten von Logger und Ausleselaptop und an der geländebedingt schlechteren Erreichbarkeit der Station. Die Datenauslesung erfolgte in einem Intervall von zwei Wochen. Bei Station JH und KB erfolgte die Auslesung des Ringspeichers mittels Laptop, bei Station KW und KBR erfolgte der Austausch eines Speicherchips, der am Geographischen Institut der RWTH Aachen ausgelesen werden musste. Alle verwendeten Zeitangaben beziehen sich auf die Mit-

teleuropäische Zeit (MEZ). Die ausgelesenen Daten wurden unmittelbar im Anschluss an die Auslesung in einem Gesamtdatensatz weiterverarbeitet und auf Plausibilität geprüft.

Tab. 6: Daten und Datenauflösung der Messstationen KBR, KB, KW, HÖ, JH, HÖ und BU.

Station	Aufgezeichnete Parameter	Datenaufzeichnung durch Logger
KBR	T/f	60 min Mittelwert
KBR	u/Φ	10 min Mittelwert
KW	T/f	60 min Mittelwert
KW	u/Φ	10 min Mittelwert
KB	u/Φ	5 min Mittelwert
JH	T/f	10 min Mittelwert
JH	u/Φ	10 min Mittelwert
HÖ	$T/f/RR$	10 min Mittelwert
BU	Q_k	30 min

5.1.6 Datenbearbeitung

Aufgrund der Vielzahl an Daten unterschiedlicher Herkunft und Auflösung war mitunter eine aufwändige Datenaufbereitung notwendig. Da diese Datenbearbeitung je nach Untersuchungskriterium variiert, werden in Folge unterschiedliche Bearbeitungswege beschrieben. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Auflistung jedes einzelnen Bearbeitungsweges an dieser Stelle nicht möglich ist und nicht sinnvoll erscheint. Es wird daher bei Besonderheiten in der Datenbearbeitung an entsprechender Stelle in Kap. 6 explizit darauf hingewiesen.

Kaltluftdatensatz

Für die beiden Messstationen KBR und KW wurde aus dem Gesamtdatensatz ein Datensatz extrahiert, der die gemessenen Bedingungen während Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal zeigt. Dazu wurden zunächst für die Parameter Windrichtung und -geschwindigkeit der Stationen KBR und KW sowie für die Daten der Station HÖ Stundenmittelwerte errechnet. Anschließend wurde der Datensatz einem komplexen Filterprozess unterzogen, um sicherzustellen, dass es sich bei den gemessenen Klimatelementen ausschließlich um solche handelt, die während des Abflusses von Kaltluft aufgezeichnet wurden. Durch die Wahl umfassender Bedingungen für diesen Datensatz kommt es zu einer leichten Unterschätzung der Kaltluftabflusssituationen was deren Häufigkeit angeht, die zu Gunsten der Ergebnisse in Kap. 6 in Kauf genommen wurde. Dieser Datensatz dient zur späteren Analyse der vergleichenden Untersuchungen in MZ1 und MZ2. Die Filterkriterien des Gesamtdatensatzes hinsichtlich Kaltluftabflusssituationen sind wie folgt:

1. Strahlungsbilanz: Zunächst wurden Daten der ca. 2,5 km entfernten Wetterstation BU des Deutschen Wetterdienstes herangezogen, da dies die nächstgelegene Station war, an der Strahlungsbilanzmessungen durchgeführt wurden (vgl. Kap. 5.1.1). Voraussetzung für die Bildung von Kaltluft ist eine negative Gesamtstrahlungsbilanz. Da solche Daten in der Untersu-

chung und auch in der direkten Umgebung des Untersuchungsgebietes nicht aufgezeichnet wurden, wurden die Daten der kurzwelligen Strahlungsbilanz der Station BU verwandt. Während des Tages dominiert die kurzwellige Strahlungsbilanz die Gesamtstrahlungsbilanz, d.h. erst nach Wegfall der direkten Sonneneinstrahlung wird die Gesamtstrahlungsbilanz negativ. Folglich wurden alle Zeitpunkte an denen eine kurzwellige Strahlungsbilanz > 0 vorlag aus dem Datensatz entfernt.

2. Niederschlag: Da Niederschlag Bewölkung voraussetzt und unter diesen Bedingungen keine negative Strahlungsbilanz vorkommt, wurden Zeitpunkte an denen die Station HÖ Niederschlag registrierte aus dem Datensatz entfernt. Gelöscht wurde dabei jeweils der Datensatz der gesamten Nacht, da ein wolkenloser Himmel vor und nach dem Niederschlagsereignis unwahrscheinlich ist.
3. Windgeschwindigkeit: Aufgrund der Sichtung des Gesamtdatensatzes und den bisherigen umfangreichen Messungen im Kannegießerbachtal (vgl. Kap. 4.2.1) wurde als Windgeschwindigkeit unter Kaltluftabflussbedingungen ein Maximalwert von $1,6 \text{ m s}^{-1}$ definiert. Zeitpunkte an denen entweder an der Station KBR oder an der Station KW Windgeschwindigkeiten von $1,6 \text{ m s}^{-1}$ oder höher vorlagen, wurden aus dem Datensatz entnommen, da dann nicht sicher gestellt werden konnte, dass ausschließlich die Kaltluft die gemessene Windgeschwindigkeit verursacht, sondern zumindest zu einem Teil der synoptische Wind Einfluss nimmt. Zudem wurden Zeitpunkte ausgeschlossen, an denen die Windgeschwindigkeit an der Station KBR 0 m s^{-1} betrug. Zwar ist es durchaus möglich, dass die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft unter der Anlaufgeschwindigkeit des Schalensternanemometers lag, umgekehrt kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass eine windschwache Wetterlage ohne die Bildung von Kaltluft vorliegt. Zudem kam es im Winter aufgrund niedriger Temperaturen an einzelnen Tagen zur Bewegungsunfähigkeit des Anemometers.
4. Windrichtung: Findet im Kannegießerbachtal Kaltluftabfluss statt, so strömt dieser Station KBR der Orographie folgend aus Richtung Südwesten ($202,6^\circ$ bis $247,5^\circ$) an. Liegt eine andere Anströmrichtung vor, so handelt es sich nicht um Kaltluftabfluss. Diese Daten wurden folglich dem Gesamtdatensatz entnommen. An der Station KW dürfen aufgrund der Vegetationseinflüsse leicht abweichende Windrichtungen vorkommen. Als zusätzliches Kriterium wurden alle Daten aus dem Gesamtdatensatz entnommen, bei denen an der Referenzstation HÖ Windrichtungen zwischen $157,6^\circ$ und $292,5^\circ$ vorlagen. Bei übereinstimmenden Windrichtungen des synoptischen Windes und des Kaltluftabflusses kann keine sichere Aussage getroffen werden, ob es sich bei der gemessenen Windrichtung im Talbereich um Kaltluftabfluss handelt, oder ob der synoptische Wind dem Talverlauf folgt.
5. Datenvergleich: Für die vergleichende Auswertung in MZ1 und MZ2 wurden Zeitpunkte aus dem Datensatz gelöscht, an denen keine Daten für den Standort KBR oder den Standort KW vorlagen. Zudem wurden alle Daten gelöscht für die keine Daten der Referenzstation HÖ vorlagen.

Durch den beschriebenen Bearbeitungsprozess wurde im Falle des Kannegießerbachtals das Datenvolumen von ca. 1,4 Mio. Werte auf etwa 30.000 Werte reduziert.

Im Falle des Datensatzes, der im Johannisbachtal entnommen wurde, fanden weitestgehend die gleichen Kriterien zur Datenfilterung Anwendung. Der einzige Unterschied war eine Ausweitung des Bereichs möglicher Anströmrichtungen auf 180° bis 270°. Diese Änderung schien vor allem deshalb sinnvoll, weil keine Kaltluftreferenzstation (wie im Kannegießerbachtal die Station KBR) im Johannisbachtal zu Verfügung stand. Eine Streuung der Windrichtungen durch den Vegetationsbestand wäre so unter Umständen herausgefiltert worden.

Datenangleichung, Mittelwertberechnung und Tages-/Nachtgänge

Bei einem stationsübergreifenden Datenvergleich wurden die Messwerte mit Hilfe von Mittelwertberechnungen aufbereitet. Dabei gab stets die Station mit dem größten Aufzeichnungsintervall das Auswertungsintervall vor. Zur Bildung von Tagesmittelwerten wurden alle Werte eines Tages von 00:00 Uhr bis 23:59 Uhr MEZ verwandt und das Mittel gebildet. Das Stations- bzw. Messinstrument-abhängige Messintervall als Datengrundlage für die Mittelwertbildung ist Tab. 6 zu entnehmen. Bei der Bildung von Stundenmittelwerten wurden die Daten von z.B. 12:00 Uhr bis 12:59 Uhr verwandt. Tagesmittelwerte von Tagen, an denen stundenweise Messausfälle zu verzeichnen waren, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Bei der Darstellung von Tages- und Nachtgängen wurden nur Stundenmittelwerte verwandt, deren Mittel aus mind. 30 Einzelwerten gebildet wurde. Zudem wurde die Darstellung der nächtlichen Verläufe der gemessenen Klimaelemente unter Kaltluftabflussbedingungen auf einen festen Zeitraum begrenzt. Dieser wurde so gewählt (22:30 Uhr bis 04:30 Uhr⁹), dass alle Jahreszeiten hinsichtlich des Sonnenauf- und Untergangs Berücksichtigung fanden und theoretisch Kaltluft gebildet werden konnte.

Windrichtung

Die in Grad aufgezeichneten Windrichtungen wurden bei den Auswertungen in acht Sektoren aufgeteilt. Die Zuordnung der einzelnen Werte zu den Sektoren erfolgte dabei wie folgt:

Nord (N) :	> 337,6° und < 360,0° sowie > 0° und < 22,5°
Nordwest (NW):	> 292,6° und < 337,5°
West (W):	> 247,6° und < 292,5°
Südwest (SW):	> 202,6° und < 247,5°
Süd (S):	> 157,6° und < 202,5°
Südost (SE):	> 112,6° und < 157,5°
Ost (E):	> 67,6° und < 112,5°
Nordost (NE):	> 22,6° und < 67,5°

5.2 Mobile Messungen

Neben den stationären Messungen spielte die mobile Datenerfassung eine besondere Rolle, da mit Hilfe dieser eine räumliche Erfassung der abfließenden Kaltluft vorgenommen werden konnte. Eben-

⁹ Grundlage dieser Annahme war der Sonnenaufgang (05:22 Uhr) und -untergang (21:53 Uhr) am 21.06.2010.

so wurden räumliche Veränderungen des Kaltluftabflusses durch veränderte Vegetationsbestände mit Hilfe mobiler Messungen erfasst. So fanden im Untersuchungsgebiet Ballonsondierungen, Talquerprofilmessungen, Feinstaubmessungen, Turbulenzmessungen, GPS-gestützte mobile Messungen mit Hilfe des ortsansässigen öffentlichen Personennahverkehrsunternehmens (ASEAG) und weitere Datenerfassungen im Rahmen universitärer Lehrveranstaltungen statt.

5.2.1 Fesselballonsondierungen

Ballonsondierungen gehören zu den Standardverfahren bei der Untersuchung von Kaltluftabflüssen (z.B. PYPKER et al. 2007, WEBER 2004, HARTENSTEIN 2000, PAPADOPOULOS & HELMIS 1999). Sowohl im Kannegießerbachtal als auch im Johannisbachtal haben sich Fesselballonsondierungen zur Bestimmung der Kaltluftobergrenze bewährt, da die Mächtigkeit der Kaltluft in den entsprechenden Bereichen für die Messung vom Boden aus zu groß ist (vgl. BRAUERS & KETZLER 1988, KETZLER 2002). Zur Messung wurde eine eigens am Geographischen Institut der RWTH Aachen entwickelte Apparatur eingesetzt: Auf einem Stativ wurde eine automatische Winde mit digitaler Anzeige befestigt, die mit rissfester und dennoch leichter Leine bestückt ist. Mittels Seilwinde konnte die Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit des Ballons sowie die räumliche Auflösung der Daten beliebig variiert werden. An der Leine wurden ein bis drei Helium-Folienballons befestigt, deren Auftrieb ausreichend war, einen Temperatur-Feuchtelogger vom Typ MicroLog Pro der Firma Fourtec - Fourier Technologies mit externer Temperatursonde zu tragen, der alle 20 Sekunden Lufttemperatur und Relative Feuchte aufzeichnete (FOURTEC – FOURIER TECHNOLOGIES 2013). Die maximale Aufstiegshöhe des Ballons betrug ca. 80 m ü. Gr., was bei den vorhandenen Kaltluftmächtigkeiten als ausreichend erachtet wurde. Vor dem Aufstieg wurde der Logger per Laptop aktiviert, nach dem Aufstieg mit selbigem ausgelesen. Die Datenerfassung erfolgte in einem Intervall von 10 s mittels eines externen Sensors, der ausreichend schnell die Temperaturveränderungen registrierte. Zudem wurden für jede Messhöhe zur Sicherheit über einen Zeitraum von mindestens 3 min Daten erfasst, um dem Sensor zusätzliche Zeit zur Anpassung an die Umgebungstemperatur zu geben. Da der Ballon je nach Fließgeschwindigkeit der Kaltluft und der Strömungsgeschwindigkeit des synoptischen Windes nicht senkrecht über dem Stativ stand, stimmte die Leinenlänge nicht mit der Höhe über Grund überein, so dass zusätzlich die Neigung der Leine mittels eines Inclinometers erfasst wurde. Mit Hilfe der Neigungsdaten, der Leinenlänge und dem per Federwaage bestimmten Auftrieb des Ballons, wurde die Höhe des Ballons ü. Gr. errechnet. Zudem wurde die Abdrift-Richtung des Ballons mittels Kompass kontinuierlich erfasst, da diese Aufschluss über einen vorhandenen Kaltluftabfluss geben kann.

YOSHINO schreibt bezüglich der Bestimmung der Kaltluftobergrenze, dass diese von vielen Faktoren abhängt und daher schwer zu bestimmen ist. Das am häufigsten genannte Kriterium in diesem Zusammenhang ist eine Temperaturumkehr mit der Höhe an der Kaltluftobergrenze (OKG) (YOSHINO 1984). Dass diese jedoch zur sicheren Bestimmung der OKG nicht ausreicht macht KRAUS deutlich, der auf eine vielfach nicht klar erkennbare OKG hinweist, was sich unter anderem darin äußert, dass die vertikalen Temperaturprofile in der Auswertung „vielfach Knicke aufweisen“ (KRAUS 2008:121). Zur Bestimmung der OKG wurden daher weitere Kriterien hinzugezogen, die auch schon bei früheren Messungen durch KETZLER im Untersuchungsgebiet angewandt wurden:

- „(1) Der vertikale Temperaturgradient wird klein oder negativ (die Lufttemperatur kann dementsprechend in dieser Höhe ein relatives Maximum aufweisen);
(2) Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe ab (und kann ein relatives Minimum aufweisen);
(3) Die Windscherung kann zu Turbulenzen führen;
(4) Die Windrichtung dreht mit zunehmender Höhe aus der Richtung des Bergwindes in die Richtung [des synoptischen Windes] (sofern beide nicht zufällig die gleiche Richtung haben)“ (KETZLER 2002:28).

Anhand dieser Kriterien wurden die durchgeführten Fesselballonsondierungen aus den Jahren 2009, 2010 und 2011 hinsichtlich der aufgetretenen Kaltluftobergrenze untersucht. Diese soll in Kap. 6.2.6 zusammen mit der Talbreite und der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft Aufschlüsse über den Volumenstrom liefern, der talwärts in Richtung der Innenstadt Aachens strömt.

Einen Überblick über die Standorte und Zeitpunkte der durchgeführten Ballonsondierungen geben Abb. 42 und Tab. 11. Sondierungen wurden an den Standorten M2, M7, M8 und M10 durchgeführt (vgl. Abb. 42).

5.2.2 Strahlungsbilanzmessungen

An mehreren Messtagen (vgl. Tab. 11) wurden die mobilen Messungen durch Strahlungsbilanzmessungen ergänzt. Für die Bilanzmessungen wurde ein Strahlungsbilanzsensor der Fa. Kipp & Zonen, Delft / NL vom Typ NR Lite2 verwandt. Die Messhöhe betrug 1 m ü. Gr., die Datenablesung erfolgte in regelmäßigen Abständen mit Hilfe eines Auslesegerätes, Typ MTX 3281 der Fa. Metrix.

5.2.3 Talquerprofilmessungen

Talquerprofilmessungen sind dann notwendig, wenn die komplexe Struktur des Kaltluftabflusses genauer betrachtet werden soll, da die verschiedenen Kaltlufteigenschaften (z.B. die Strömungsgeschwindigkeit oder die Mächtigkeit) je nach Entfernung von der Talsohle stark variieren können (vgl. VDI 2003). Im Bereich aller Wetterstationen (JH, KBR, KW, KB) wurden daher mobile Messungen durchgeführt, bei denen ein lineares Messprofil entlang des Talquerschnitts gewählt wurde. So wurden die Strömungsgeschwindigkeit und die Lufttemperatur, je nach Entfernung von der Talsohle, erfasst. Diese Messungen waren für die vorliegende Untersuchung von besonderer Bedeutung, da Vegetationsbestände in beiden Talbereichen Einfluss auf das Fließverhalten der Kaltluft nahmen, diese jedoch nicht den gesamten Talquerschnitt verschlossen, sondern lediglich Teile davon. Es war daher zu erwarten, dass die gemessenen Klimaelemente je nach Standort eine deutliche Abhängigkeit von den Vegetationseigenschaften aufweisen. Insgesamt wurden zwei unterschiedliche Arten von Querprofilmessungen durchgeführt. Bei der Messmethodik die häufiger Anwendung fand, wurde die Lufttemperatur und die Windgeschwindigkeit mittels eines Handgerätes (Hitze-Kugelanemometer vom Typ Testo 491) in 2 m ü. Gr. aufgezeichnet. Erfasst wurden die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit in einem Messintervall von zwei bzw. vier Minuten, zudem die maximale und minimale ge-

messene Windgeschwindigkeit des gleichen Messzeitraumes. Bei der Temperatur wurde das Maximum und Minimum innerhalb des Messintervalls erfasst. Diese Art von Querprofilmessung fand sowohl an Messpunkt M1, als auch an Messpunkt M3 statt. Eine Übersicht über die Lage der Messpunkte findet sich in Abb. 42. Die detaillierte Lage der Querprofile mit den entsprechenden Messstandorten sind für M1 und M3 in Abb. 33 dargestellt.

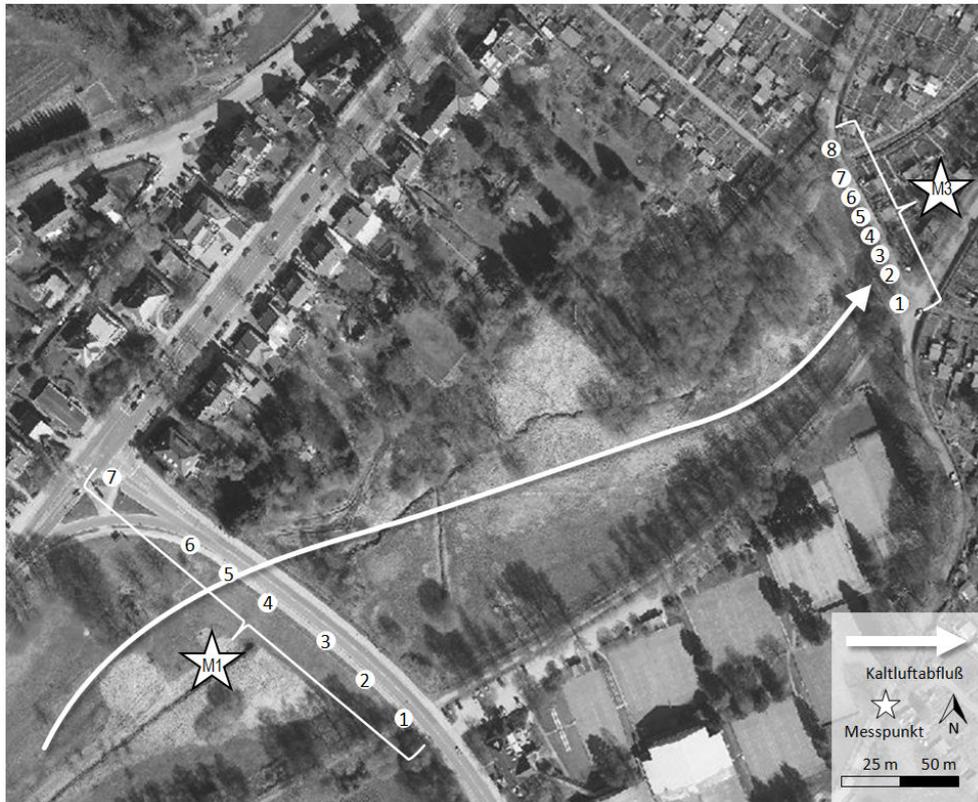


Abb. 33: Messstandorte der Talquerprofilmessungen auf Höhe von Messpunkt M1 und M3 (vgl. Abb. 42; Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).

Bei weiteren Messungen an M3 wurden neben den horizontalen Eigenschaften der gemessenen Klimatelemente auch die vertikalen Eigenschaften erfasst. So wurde entlang eines linearen Messprofils im Talquerschnitt die Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft in 0,5 m, 2 m, 4 m und 6 m Höhe ü. Gr. erfasst. Erhoben wurde pro Messpunkt ein Mittelwert über einen Zeitraum von 30 s.

Einen Überblick über die Standorte und Zeitpunkte der durchgeführten Talquerprofilmessungen gibt Abb. 42 und Tab. 11 (Kap. 5.4).

5.2.4 ASEAG Messkampagne

Zur Erfassung von Temperaturdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung wurde im Rahmen des Projektes City2020+ (vgl. Kap. 2) eine Messeinheit entwickelt, mit der Linienbusse des öffentlichen Personennahverkehrs (ASEAG) bestückt wurden. Der Sensor wurde an der oberen Front und Fahrerseite des Busses montiert. Der Aufbau der Messeinheit sowie deren Montage am Linienbus, sind in Abb. 34 ersichtlich.



Abb. 34: Messeinheit mit Temperatur und GPS Logger (links) sowie deren Montage an einem Linienbus (ASEAG) in Aachen (Grafik links: EHRIG, A., Geographisches Institut, RWTH Aachen)

Unabhängig voneinander wurden durch den Temperaturlogger Hobo Pro v2¹⁰ (ONSET 2009) und den GPS Logger Winner Fly¹¹ (MOBILE ACTION n.d.) während des Linienbetriebes der Busse Datenwerte erfasst. Die Erfassung der Lufttemperatur erfolgte in einem Intervall von 5 Sekunden, die Position des Busses wurde alle 15 Sekunden aufgezeichnet. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von $> 50 \text{ km h}^{-1}$ verringerte sich das Aufzeichnungsintervall des GPS auf 10 Sekunden. Die erhobenen Daten wurden in Folge mit Hilfe der GPS Daten vordefinierten Punkten auf der Wegstrecke des Busses zugeordnet. Da die ausgewählten Buslinien kontinuierlich tageweise auf gleichbleibenden Routen verkehrten, wurden täglich mehrere Datenwerte pro Messpunkt aufgezeichnet. Ein Streckenabschnitt der Buslinie 2 (mit den dazugehörigen vordefinierten Datenpunkten), der durch das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Studie führt, ist Abb. 78 (vgl. auch Kap. 6.2.7) zu entnehmen. Neben der ursprünglichen Intention der ASEAG-Messkampagne, thermische Hotspots und die dazugehörigen beeinflussenden Faktoren zu identifizieren, dienen die Daten an dieser Stelle dazu, die Eindringtiefe und Ausbreitung von Kaltluft in städtischem Gebiet abzuleiten sowie Kaltluftbahnen zu identifizieren. Dazu wurden Tage ausgewählt, an denen nachweislich (vgl. Kap. 5.1.6) Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal stattfand. Von denen auf dem Linienbus aufgezeichneten Messdaten wurden alle Werte nach 22:30 Uhr MEZ verwandt, da zu diesem Zeitpunkt unabhängig von der Jahreszeit die Kaltluft alle Talbereiche erreicht.

¹⁰ Die Messgenauigkeit des Sensors beträgt $\pm 0.2^\circ\text{C}$ bei Temperaturwerten zwischen 0°C und 50°C . Der Logger speichert bis zu 42.000 Werte, was bei der voreingestellten Auflösung für die Messkampagne einer Aufzeichnungsdauer von mehr als 24 Stunden entspricht.

¹¹ Der GPS Logger speichert bis zu 65.000 Wegpunkte, was für die Messdauer von jeweils einem Tag ausreichend war. Die Funktionalität wird für Temperaturen von -10°C bis $+50^\circ\text{C}$ gewährleistet.

Eine weitere Beschreibung der ASEAG-Messkampagne sowie der Datenaufbereitung und Auswertung findet sich bei BUTTSTÄDT et al. 2010a, BUTTSTÄDT et al. 2010b, SACHSEN et al. 2010 oder BUTTSTÄDT et al. 2011 (vgl. Kap. 12).

5.2.5 Luftqualitätsmessungen

Da Kaltluftabflüsse mit einer ausgeprägt stabilen Luftschichtung einhergehen, ist die Qualität der Kaltluft, die in den städtischen Baukörper einströmt von besonderer Bedeutung. Selbst geringe Emissionen können dazu führen, dass die Immissionskonzentration in der Kaltluft stark erhöht ist (VDI 2003). Eine Erfassung der gasförmigen Schadstoffe des Straßenverkehrs im Bereich der Lütticherstraße und des Brüsseler Ringes (vgl. Abb. 20) wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht durchgeführt. Um eine Aussage über die partikuläre Belastung der Kaltluft zu treffen, wurden Feinstaubmessungen (PM₁₀, PM₅, PM_{2,5}) im Kannegießerbachtal durchgeführt. Da das Kannegießerbachtal flächig mit Vegetation bedeckt ist, ist zunächst keine merkliche Aufwirbelung von Staubpartikeln zu erwarten, zudem gibt es keine nennenswerten anthropogenen Quellen für die Entstehung von Feinstaub im oberen Talbereich. Hinzu kommt durch die stark baumgeprägte Vegetationsbedeckung des Kannegießerbachtals ein gewisses Filterpotenzial durch Deposition der Partikel (z.B. ESCOBEDO et al. 2011, LITSCHKE & KUTTLER 2008). In der Summe sind daher vergleichsweise niedrige Feinstaubkonzentrationen im Untersuchungsgebiet zu erwarten. Da bei der Erfassung der Feinstaubkonzentration nicht ausschließlich anthropogene Feinstäube erfasst wurden, können in Wald- und Wiesenbeständen Pollen eine Rolle spielen. Da Pollen eine allergene Wirkung haben, ist eine verstärkte Einmischung in die Kaltluft als nachteilig zu betrachten, zumal Pollen aufgrund der Schrumpfung durch Wasserverlust wie feine Partikel über weite Strecken transportiert werden können (PRTENJAK et al 2012). So zeigt eine Untersuchung von PRTENJAK et al. die höchsten Pollenkonzentrationen in der Stadtluft Zagrebs zu Nachtzeiten während dem Auftreten lokaler, thermisch induzierter Windsysteme (PRTENJAK et al 2012).

Die Datenerhebung erfolgte mit einem mobilen Feinstaubmessgerät der Firma Grimm (Environmental DustMonitor EDM 107), das die Partikelgrößen PM₁₀, PM₅ und PM_{2,5} in einem optischen Verfahren erfasst (GRIMM 2013). Die Messung fand in einer Höhe von ca. 1,8 m ü. Gr. statt. Die Dauer jeder Einzelmessung betrug 10 Minuten, der Abstand zwischen zwei Vergleichsmessungen am gleichen Standort betrug 60 Minuten. Einen Überblick über die Standorte und Zeitpunkte der durchgeführten Feinstaubmessungen geben Abb. 42 und Tab. 11. Messungen wurden an den Standorten M4, M5 und M6 durchgeführt.

5.2.6 Vegetationskartierung

Im Rahmen einer universitären Lehrveranstaltung wurden im Johannis- und Kannegießerbachtal im Sommer 2010 umfangreiche Vegetationskartierungen durchgeführt, die die Grundlage von Modellläufen in Kap. 6 und Kap. 7 bilden (REIL et al. 2010). Die genaue Lage der kartierten Gebiete ist aus Abb. 36 ersichtlich (vgl. Kap. 5.3.2). Die zu kartierenden Talbereiche waren im Wesentlichen frei von Bebauung. Ausnahmen waren die Lütticherstraße (vgl. Abb. 20), Kleingartenanlagen im Kannegießer-

bachtal und einzelne Gebäude im Johannisbachtal (vgl. Abb. 36). Bei der Kartierung wurden sowohl einzelne Gehölze als auch Gehölzgruppen dichten Bestandes und ähnlicher Arten erfasst, für die jeweils die mittlere Höhe, der mittlere Kronendurchmesser, die Grundfläche und die Art vermerkt wurden. Die Baumart war insofern von Belang, als dass daraus für die Modelleingaben verschiedene Blattflächenindizes generiert wurden. War eine Art nicht exakt zu bestimmen, so wurde eine Unterscheidung in Laub- und Nadelgehölz vorgenommen. Die jeweiligen Parameter wurden im Gelände zunächst auf Luftbildern punktuell vermerkt (vgl. FREY & LÖSCH 2010), in einem zweiten Schritt in ein Geographisches Informationssystem (GIS) übertragen und dort manuell nachbearbeitet.

Bei der Kartierung wurden insgesamt 1461 verschiedene Bäume und Sträucher kartiert, von denen 1399 (95,8 %) Laubgehölze und 62 (4,2 %) Nadelgehölze waren. Die ungleiche Verteilung basiert dabei auf zwei wesentlichen Aspekten. Im zeitweise stark vernässten Auenbereich des Kannegießerbachtales finden sich überwiegend Gehölze deren Vorkommen auf staunassem Boden gegeben ist. Als Pioniergehölze sind in diesem Zusammenhang die Schwarzerle (*Alnus*) und die Weide (*Salix*) zu nennen (HECKER 2008), deren Anzahl bei der Kartierung 177 (12,1 %) betrug. Ein erheblicher Anteil der kartierten Vegetation des Kannegießerbachtales bestand zudem aus Straßenbegleitgrün, das sich charakteristischerweise überwiegend aus Laubbäumen zusammensetzt. Alleine 223 (15,3 %) kartierte Gehölze sind dabei der Pflanzengattung Birke (*Betula*), Ahorn (*Acer*) oder Kastanie (*Castanea*) zuzuschreiben. Die Vegetation des Johannisbachtals trägt ebenfalls zu einem Übergewicht an Laubbäumen gegenüber den Nadelgehölzen bei. Bei der dort kartierten Vegetation handelt es sich im Wesentlichen um Sträucher, die in Form von Hecken die landwirtschaftlichen Parzellen abgrenzen und die bewusst zum Erhalt der dortigen traditionellen Kulturlandschaft und Artzusammensetzung angepflanzt wurden. Zu diesen Arten zählen u.a. Haselnuss (*Corylus avellana*), Holunder (*Sambucus*), Schlehe (*Prunus spinosa*) und Weißdorn (*Crataegus*), die in der Kartierung gemeinsam 320 Mal (21,9 %) dokumentiert wurden.

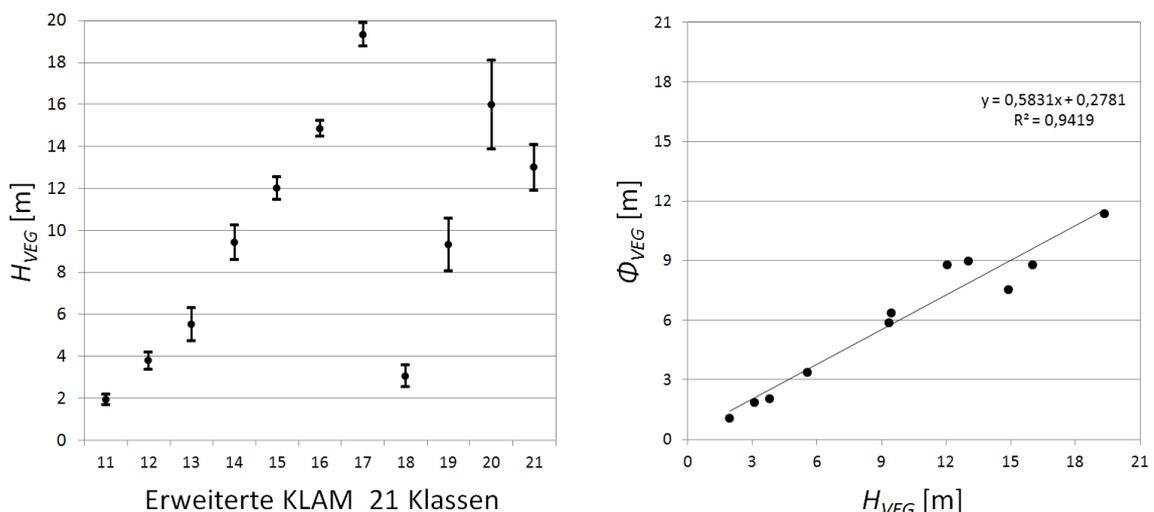


Abb. 35: Mittlere Bestandshöhe H_{VEG} mit der entsprechenden Standardabweichung (links) und Zusammenhang der Bestandshöhe H_{VEG} und dem Kronendurchmesser Φ_{VEG} im Rahmen der Vegetationskartierung (rechts) auf Basis von Mittelwerten der erweiterten KLAM_21 Klassen 11 bis 21 (vgl. Tab. 9).

Die Vegetationskartierung war Basis der Bildung erweiterter KLAM_21 Flächennutzungsklassen (vgl. Tab. 9). Dabei ging der Kronendurchmesser als Bestandsfläche direkt in die Rasterdatei der Flächennutzung ein. Die mittlere Bestandshöhe führte zur Bildung der KLAM_21 Klassen 11 bis 21, wobei die Klasseneinteilung so vorgenommen wurde, dass die Standardabweichung der jeweiligen Klasse möglichst gering war. Die mittlere Bestandshöhe der jeweiligen KLAM_21 Klasse mit der dazugehörigen Standardabweichung ist in Abb. 35 (links) dargestellt, wobei die Klassen 11 bis 17 und 21 Laubgehölze darstellen und die Klassen 18 bis 20 Nadelgehölze.

Bei der weiteren statistischen Auswertung der kartierten Daten wurde der Zusammenhang zwischen Bestandshöhe und Kronendurchmesser überprüft, der artübergreifend gegeben sein sollte. Dabei konnte die starke positive Korrelation ($R^2 = 0,94$) zwischen den kartierten Daten bestätigt werden.

5.3 Modellierung

Zur Modellierung der Kaltluftabflusssituation wurde das vom DWD entwickelte zweidimensionale, mathematisch-physikalische Kaltluftabflussmodell KLAM_21 verwandt. Über die Handhabung, die Anwendung und die theoretischen Grundlagen des Modells finden sich umfassende Angaben in der Modellbeschreibung von SIEVERS (SIEVERS 2005).

In Kap. 5.3.1 sollen die Modellgrundlagen kurz beschrieben werden, deren Inhalte, wenn nicht anders angegeben, aus der genannten Veröffentlichung stammen (SIEVERS 2005). Da im modellierten Untersuchungsgebiet eine Vielzahl empirischer Daten zur Verfügung standen (vgl. Tab. 11) konnten die Modellergebnisse stets überprüft werden. Dies führte zu verschiedenen Veränderungen an den Modell-Eingangsparametern, die in Kap. 5.3.3 beschrieben werden. Vorab werden jedoch in Kap. 5.3.2 die für alle Modellläufe gleichermaßen gültigen Modellparameter definiert.

5.3.1 Theoretische Grundlagen

Das Modell KLAM_21 trifft Aussagen zur zeitlichen und räumlichen Variabilität von Kaltluftabflüssen in orographisch gegliedertem Gelände, insbesondere zur Strömungsgeschwindigkeit und der Kaltluftmächtigkeit (SIEVERS 2005). Dabei geht das physikalische Konzept von einer Zweiteilung der Atmosphäre aus, so dass eine Oberschicht mit vorherrschendem adiabatischen und hydrostatischen Gleichgewicht und eine Kaltluftschicht mit einem adiabatischen Ungleichgewicht der vertikalen Temperaturverteilung existieren. Die Kaltluftschicht unterliegt zudem aufgrund eines hydrostatischen Ungleichgewichts einem Antrieb. Eine flächenspezifisch zu definierende Kälteproduktion simuliert den nächtlichen, strahlungsbedingten Wärmeverlust der Atmosphäre und bedingt eine Veränderung der Kaltluftschicht in Dichte, Höhe und Temperatur (SIEVERS 2005). Das vertikale Temperaturprofil und die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in unterschiedlichen Höhen werden in KLAM_21 durch universelle Profile errechnet, die anhand empirischer Untersuchungen ermittelt wurden. Neben den beschriebenen Profilen, beinhaltet das Modell KLAM_21 zwei zentrale Gleichungen (SIEVERS 2005), die unter Zuhilfenahme von allgemeingültigen Energie-, Impuls- und Massenerhaltungsgleichungen der Atmosphäre entstanden (DWD 2006):

- Die Bewegung der Kaltluft wird anhand einer vereinfachten Bewegungsgleichung (ohne den Einfluss der Corioliskraft) definiert. Als einflussnehmende Faktoren wirken darin die Schwerkraft, die Bodenreibung (Rauigkeit), der Regionalwind und ein horizontaler Impulsaustausch sowie ergänzend in Abhängigkeit der Hindernishöhen eine Volumenreibung. Das Ergebnis der gelösten Gleichung ist die über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Windgeschwindigkeit je Gitterzelle.
- Der Kälteinhalt (Energiebilanz) der Kaltluft basiert auf der flächenspezifischen Kälteproduktion sowie einem Kälte-transport, der durch die Bewegung der Kaltluft entsteht. Das Ergebnis der gelösten Gleichung ist der Kälteinhalt in der Kaltluftsäule über jeder Gitterzelle des Modells, aus der dann die Kaltluftmächtigkeit errechnet wird.

Als Gesamtergebnis erhält man „die flächenhafte Verteilung der Kaltluftmächtigkeit und ihrer mittleren Fließgeschwindigkeit oder der Volumenströme zu beliebig abgreifbaren Simulationszeitpunkten“ (DWD 2006:1).

Das Modellgebiet von KLAM_21 ist rechteckig und nord-süd-orientiert (SIEVERS 2005) und wird mit einem numerischen Gitter überzogen. Dabei ist die Größe der Gitterzellen definierbar. Jede Gitterzelle wird anhand eines Rechts- und Hochwertes genau beschrieben und enthält vordefinierte, veränderbare Parameter (vgl. Tab. 7), aus denen das Modell die Entstehung, das Abfließen und die Ansammlung von Kaltluft generiert.

Zur Durchführung eines Modelllaufes mit KLAM_21 wird zunächst eine Eingabedatei erstellt, die alle modellrelevanten Parameter enthält. Die Bestandteile der Eingabedatei sind:

- Angaben zur Größe des Modellgebietes und zur Modellauflösung,
- Angaben zu den Rasterdateien der Flächennutzung und Orographie,
- Angaben zur Simulationsdauer und Zeit der Resultatausgabe.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden hinsichtlich der Fragestellung der Arbeit Spezifikationen der Eingabeparameter des Modells vorgenommen sowie Modellerweiterungen genutzt. Die wesentlichen Veränderungen betrafen die Eigenschaften der verschiedenen Flächennutzungstypen, denen vordefinierte Parameter zu Grunde liegen und die in Tab. 7 aufgelistet sind. Änderungen dieser können in der Eingabedatei (Gruppe „Professional“) vorgenommen werden. An dieser Stelle sollen die veränderlichen Parameter beschrieben werden, die Art der Modifikation findet sich in Kap. 5.3.2. Zu den veränderlichen Parametern der Flächennutzung zählen:

- z_{0g} [m] = Rauigkeitslänge des Bodens (ohne Beachtung von explizit spezifizierter Bebauung oder Bewaldung)
- grz [dimensionslos] = Gebäudeanteil an der Grundfläche
- hg [m] = mittlere Gebäudehöhe
- wai [dimensionslos] = Wandflächenindex (mittleres Verhältnis der Wandfläche eines Einzelgebäudes zu dessen Grundfläche)
- bg [dimensionslos] = Bestandsgrad (mittlerer Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen)
- hv [m] = mittlere Baumhöhe

- *xlai* [dimensionslos] = Blattflächenindex (über die Höhe aufsummierte einseitige Blattfläche eines Baumes im Verhältnis zu seinem Kronenquerschnitt (z.B. BULCOCK & JEWITT 2010, KRAUS 2008, ASNER ET AL. 2003))
- *a* [dimensionslos] = Relative Ausstrahlung (relativer Wirkungsgrad der effektiven Ausstrahlung im Vergleich zu einer optimalen Abkühlungsfläche)

In der Untersuchung liegt das Hauptaugenmerk auf den Parametern *bg*, *hv* und *xlai*. Auf die Veränderung von Bebauungsparametern (*grz*, *hg*, *wai*) wurde verzichtet. In den Tab. 7, Tab. 8 und Tab. 9 werden der Übersicht halber auch immer die unveränderten Standardparameter aufgeführt.

Tab. 7: Übersicht über die Standardklassen der Flächennutzung und der entsprechend definierten Eigenschaften in KLAM_21.

Klasse	Nutzung	z0g	grz	hg	wai	bg	hv	xlai	a
1	Siedlung (dicht)	0,1	0,6	15	3	0	0	0	0
2	Siedlung (locker)	0,1	0,4	8	4	0	0	0	0,28
3	Wald	0,4	0	0	0	0,9	20	6	0,56
4	halb versiegelte Flächen	0,02	0	0	0	0	0	0	0,64
5	Industriegebiet	0,08	0,6	12	0,9	0	0	0	0
6	Park	0,1	0	0	0	0,2	20	6	1
7	unversiegelte Freiflächen	0,05	0	0	0	0	0	0	1
8	versiegelte Flächen	0,01	0	0	0	0	0	0	0,28
9	Wasser	0,001	0	0	0	0	0	0	0

Im Rahmen der Nutzung der Gruppe „Professional“ im Modell KLAM_21 wurden weitere Modellbestandteile automatisch aktiviert, bei deren Werten jedoch die Standardbelegung beibehalten wurde. Zu diesen Parametern zählen:

- *EBGO* [W m²] = Grundwert der Kälteproduktion
- *croof* [J K m²] = Flächenhafte Wärmekapazität der Dächer
- *cwall* [J K m²] = Flächenhafte Wärmekapazität der Wände
- *DeltaT0* [K] = Anfängliche Überwärmung der Bebauung

Für *EBGO* nimmt KLAM_21 standardmäßig einen Wert von 30 W m⁻² an¹², für *croof* einen Wert von 150.000 J K⁻¹ m⁻², für *cwall* einen Wert von 300.000 J K⁻¹ m⁻² sowie für *DeltaT0* einen Wert von 0,5 K. Zudem wird durch die Eingabe „reduce=.true.“ die Kälteansammlung in bebautem Gebiet auch nach dem Abbau der anfänglichen Überwärmung reduziert, da davon ausgegangen werden kann, dass ein Teil der zufließenden Kaltluft zur Kühlung der Wand- und Dachflächen verbraucht wird.

Im Zusammenhang mit lufthygienischen Fragestellungen bezüglich der Kaltluftbeschaffenheit wurde die Ausbreitung von Schadstoffen im Untersuchungsgebiet modelliert. Anlass für die Untersuchung war die Fragestellung, welche Ausbreitungscharakteristika Emissionen, die durch eine das Untersu-

¹² Im Rahmen mehrerer Fesselballonsondierungen fanden begleitende Strahlungsbilanzmessungen statt. So wurde am 22.09.2009 in der Zeit zwischen 21:00 Uhr und 22:00 Uhr eine mittlere negative Strahlungsbilanz von 27 W m⁻² am M3 gemessen. Am 25.9.2009 zwischen 18:30 Uhr und 20:30 Uhr betrug die mittlere negative Strahlungsbilanz 31 W m⁻².

chungsbiet querende Straße (Brüsseler Ring, vgl. Abb. 20) verursacht werden, zeigen. Das Modell KLAM_21 ist so programmiert, dass einmal in die Kaltluft eingetragene Schadstoffe dort verbleiben. Sedimentation oder Deposition wird durch das Modell nicht berücksichtigt (SIEVERS 2005).

5.3.2 Allgemeine Modellkonfiguration

In Kap. 5.3.2 sollen zunächst die Teile der Modellkonfiguration beschrieben werden, die für alle Läufe gleichermaßen gelten, bevor in Kap. 5.3.3 die weiteren veränderten Eingabeparameter für die einzelnen Modellläufe beschrieben werden.

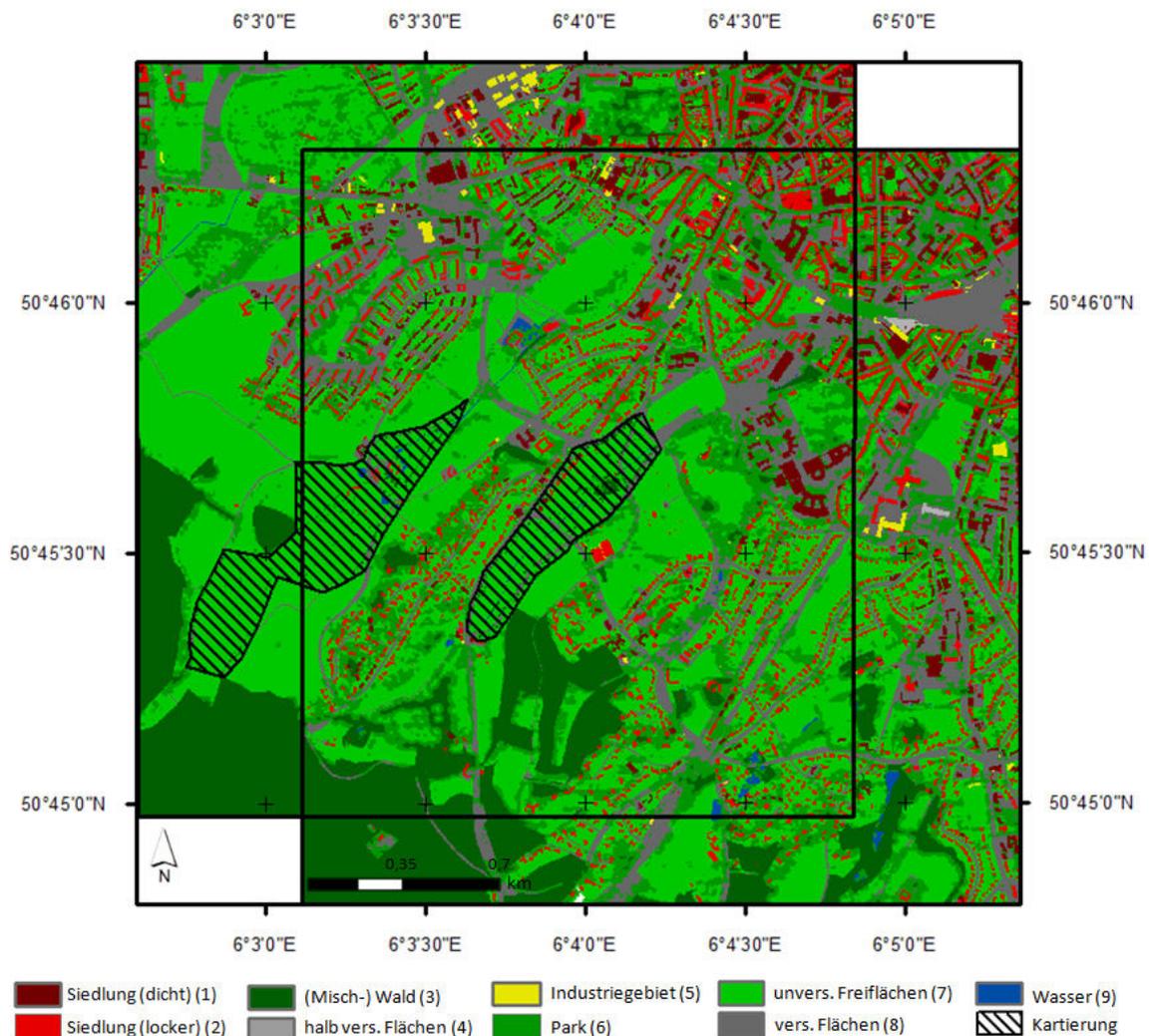


Abb. 36: Definierte Kartenausschnitte für die Erzeugung der Rasterdateien als Basis für die Modellierung mit KLAM_21 sowie die jeweiligen Flächennutzungen (mit Nennung der jeweiligen KLAM_21 Klasse) und die Bereiche, in denen die Vegetationskartierung stattfand (schraffiert) (Kartengrundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2013).

Für die Modellierung in KLAM_21 wurden für die beiden Talbereiche im Johannis- und Kannegießerbachtal Kartenausschnitte vordefiniert. Diese sind in Abb. 36 dargestellt. Neben der Einbeziehung sämtlicher Örtlichkeiten von Vegetationsveränderungen wurde darauf geachtet, dass das Modellge-

biet alle Kaltluftproduktionsflächen des jeweiligen Tales umfasst. Gerade in den oberen Talbereichen des Johannis- und Kannegießerbachtales wird in erheblichem Umfang Kaltluft gebildet, die zu den gemessenen Fließgeschwindigkeiten und Mächtigkeiten im Bereich der Wetterstationen beiträgt. Ebenfalls sollten wenn möglich Teile der Innenstadt im Modellgebiet auftauchen, da so eventuelle Rückschlüsse über die Reichweite der Kaltluft gezogen werden können. Der limitierende Faktor für die Gebietsgröße war eine maximale Anzahl von 1400 x 1400 Gitterzellen für die Modellierung mit KLAM_21 (SIEVERS 2008).

Die Datenbasis in Bezug auf die Höhendatei ist bei allen Modellläufen gleich. Unterschiede bei den verschiedenen Modellläufen gibt es hinsichtlich der Flächennutzung in den schraffierten Bereichen von Abb. 36, da unterschiedliche Vegetationsbestände modelliert wurden. Diese Unterschiede werden in Kap. 5.3.3 erläutert. Die in Abb. 36 schraffierten Bereiche des Kannegießer- und Johannisbachtales werden in Folge als Kerngebiete bezeichnet. Sie sind zudem, aufgrund der besseren Orientierung, in allen KLAM_21 Abbildungen eingezeichnet

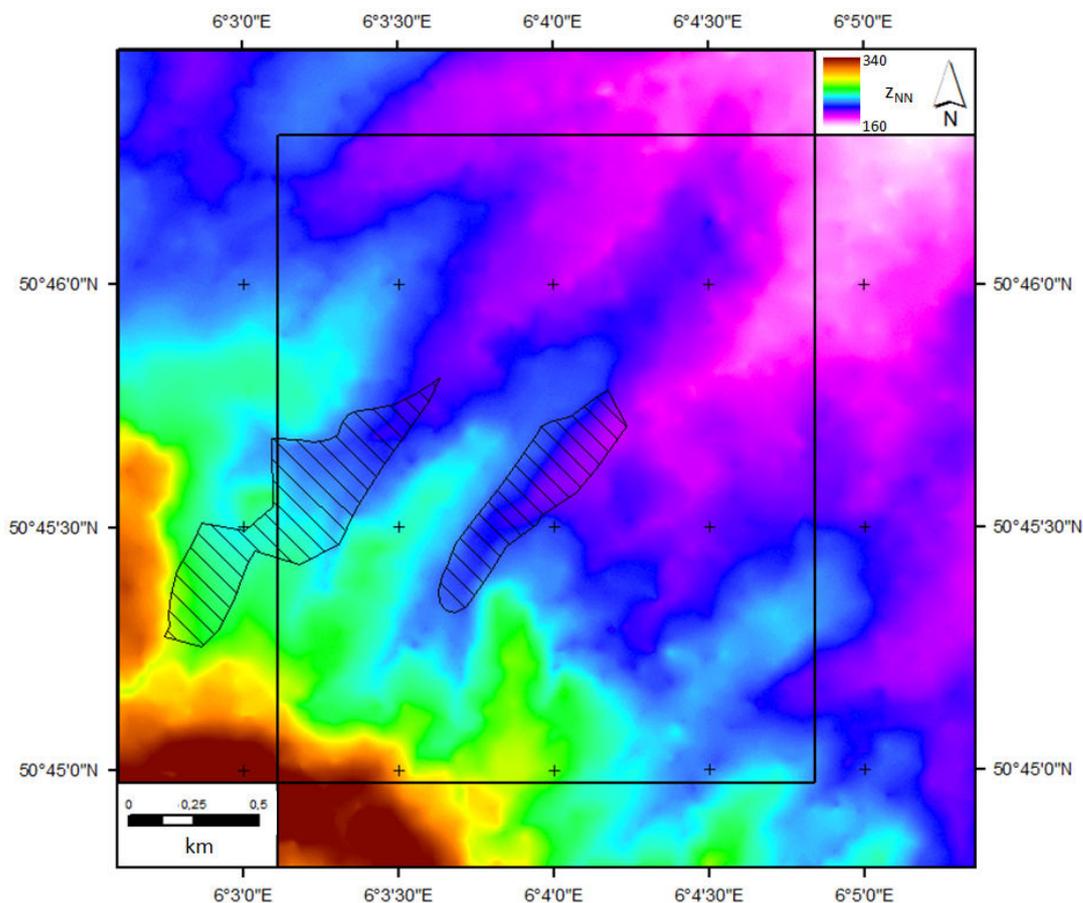


Abb. 37: Digitales Höhenmodell der Untersuchungsgebiete als Basis der Erzeugung einer Rasterdatei für die Modellierung mit KLAM_21 sowie die jeweiligen Kernbereiche (schraffiert) der Untersuchungsgebiete (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000).

Die Erzeugung der Rasterdateien für Flächennutzung und Orographie, die in einem Geographischen Informationssystem (GIS) erstellt wurden, stimmt bei allen Modellläufen überein und fand wie folgt statt:

Rasterdatei der Orographie

Im Rahmen der Erstellung des „Gesamtstädtischen Klimagutachtens Aachen“ wurde mit Hilfe einer Radarbefliegung ein Digitales Höhenmodell (DHM) erstellt (vgl. Abb. 36, HAVLIK & KETZLER 2000). Da das Radarbild die Geländestruktur inklusive Bebauung, Vegetation und weiteren Bestandshöhen abbildet, war zur Erstellung eines Modells der Geländeoberfläche eine weitere Bearbeitung des Datensatzes notwendig. In einem Raster von 50 m x 50 m wurde zunächst der Wert als tatsächliche Geländehöhe angenommen, der im Radarbild als die am tiefsten gelegene Stelle aufgezeichnet wurde. Das Höhenmodell der tatsächlichen Geländeoberfläche („Natural DHM“), wurde durch Interpolation (Kriging) aus diesen Höhendaten gewonnen. Die Differenz zwischen dem DHM und dem Natural DHM beschreibt die Bestandshöhe (Canopy Modell). Für die Erstellung der für die Modellierung verwendeten Rasterdatei wurden die Höhendaten des Natural-DHM verwandt.

Rasterdatei der Flächennutzung

Als Basis der generierten Flächennutzungs-Rasterdatei diente der Datensatz des Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem Nordrhein-Westfalens (ALKIS) (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2011). Die Klassen, die darin enthalten waren, wurden in einem ersten Schritt in eine jeweilige KLAM_21 Klasse überführt. Aus dem Gebäudedatensatz der ALKIS-Daten wurden dabei im Wesentlichen die bebauungsabhängigen KLAM_21 Klassen 1 (Siedlung dicht) und 2 (Siedlung locker) gebildet. Aus den ALKIS Flächendaten wurden im Wesentlichen die weiteren KLAM_21 Klassen gebildet. Eine Übersicht über die Zusammenfassung der ALKIS Klassen zu KLAM_21 Klassen gibt Tab. A 1 und Tab. A 2 in Kap. 11.2. Da für die Kaltluftabfluss-Modellierung mit KLAM_21 eine möglichst genaue Bestandsoberfläche (Canopy) benötigt wurde, wurde in einem weiteren Schritt die Klasse 6 (Park) in die Klasse 7 (unversiegelte Freifläche) überführt, um so die Bestandshöhen (im Wesentlichen Vegetation) aus einem Canopy-Modell als Bestandsoberfläche auf das Digitale Höhenmodell (Erdoberfläche) aufzusatteln (vgl. Kap. 5.3.2: Rasterdatei der Orographie). Da die Vegetation und deren Höhe in den Modellläufen möglichst genau abgebildet werden sollte, wurden zudem alle Flächen, bei denen das Canopy-Modell Höhen ≥ 5 m und < 10 m aufweist in die KLAM_21 Klasse 6 (Park) überführt, insofern sie dadurch die KLAM_21 Klassen 7 (unversiegelte Freiflächen), 8 (versiegelte Freiflächen) oder 9 (Wasser) ersetzen. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass Vegetation, die z.B. Wasser oder Straßen überragt, größeren Einfluss auf die abfließende Kaltluft hat, als die Wasser- oder Straßenfläche selbst. Ebenso verfahren wurde mit Flächen, auf denen das Canopy-Modell Höhen von ≥ 10 m und zudem einen Bedeckungsgrad von ≥ 90 % aufweist. Dort wurden die Klassen 6 (Park), 7 (unversiegelte Freiflächen), 8 (versiegelte Freiflächen) und 9 (Wasser) in die KLAM_21 Klasse 3 (Wald) überführt.

Zur genaueren Darstellung der Gehölzstrukturen in der Umgebung der Vegetationsveränderungen (vgl. Abb. 26) und Wetterstationen (vgl. Kap. 5.1.1) wurde 2010 eine Vegetationskartierung durchgeführt (vgl. Kap. 5.2.6). Daher wurde für die Modellläufe in den vordefinierten Talbereichen (schraffierte Fläche in Abb. 36) das gesamte Canopy bis auf die Bebauung extrahiert, um so, die kartierte Vegetation dort einzufügen. Die kartierte Vegetation wurde dabei in die KLAM_21 Klassen 10 bis 21 eingruppiert (vgl. Tab. 9).

Bei den unterschiedlichen Modellläufen, deren Ergebnisse in Kap. 6 und Kap. 7 zu finden sind, wurde drauf geachtet, dass eine möglichst große Zahl an Eingabeparametern für KLAM_21 zu Gunsten einer späteren Vergleichbarkeit konstant bleibt. Diese für alle Modellläufe gültigen Parameter sind:

Modellauflösung

Die Modellläufe wurden in einer Auflösung von 2 m x 2 m je Gitterzelle durchgeführt. Für das Kannegießerbachtal wurde ein Modellgitter mit 1322 x 1397 Gitterzellen ausgewählt, für das Johannisbachtal eines mit 1320 x 1398 Gitterzellen.

Dauer der Modellläufe und Resultatsausgabe

Alle Modellläufe wurden über eine Gesamtdauer von 3 Stunden betrieben. Die Anzahl der Zeitpunkte, zu denen eine Resultatsausgabe¹³ (in Form einer gespeicherten Datei) erfolgte, betrug 36, eine Resultatsausgabe erfolgte demnach alle 5 Minuten. Die Höhe ü. Gr., für die eine zusätzliche Ausgabedatei generiert wurde, wurde mit 2 m definiert. Für die Auswertung der Modelldaten wurde als Zeitpunkt 90 min nach Modellstart definiert. Der Grund dafür liegt in der Auswahl und Größe des Untersuchungsgebietes sowie empirisch ermittelter Daten. Sowohl das Johannis-, als auch das Kannegießerbachtal, verlaufen von Südwest nach Nordost durch das Modellgebiet. Bei der Größe des Modellgebietes „Kannegießerbachtal“ von 2644 m in ost-westlicher Ausdehnung und 2794 m in nord-südlicher Ausdehnung, legt die Kaltluft eine maximale Wegstrecke von 3847 m zurück. Die entsprechende Wegstrecke für das Modellgebiet „Johannisbachtal“ beträgt 3845 m. Unter der Annahme einer mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Untersuchungszeitraum von 0,8 m s⁻¹ (vgl. Kap. 6.2.4) benötigt die Kaltluft maximal 81 min um das Modellgebiet theoretisch vollständig zu durchfließen. Eine Ergebnisentnahme nach 90 Minuten garantiert somit eine ausreichende Kaltluftausbreitung im Untersuchungsgebiet. Bei längeren Modelllaufzeiten zeigen sich trotz einer definierten anfänglichen Überwärmung der Gebäude (vgl. Kap. 5.3.1), die zur Reduktion der Kälteansammlung führt, Tendenzen eines Kaltluftstaus in den tieferen Regionen des Modellgebietes, in diesem Fall der Innenstadt von Aachen, was aufgrund des städtischen Wärmeinseleffektes als nicht realistisch zu erachten ist. Ein Kaltluftstau ist nach einer Modelllaufzeit von 90 Minuten noch nicht zu erkennen.

Flächennutzungsklassen

Da in der vorliegenden Untersuchung das Hauptaugenmerk auf kleinräumigen Vegetationsveränderungen lag, mussten einige Parameter der KLAM_21 Standard-Flächennutzungsklassen (vgl. Tab. 8) des Modells dementsprechend angepasst werden. Dabei fanden die folgenden Veränderungen in allen Modellläufen Anwendung:

- *bg*: Der Bedeckungsgrad des Bodens mit Bäumen wurde für die Klasse 3 (Wald) von 0,9 auf 0,827 verändert. Grundlage ist eine Publikation von VAN DEN HURK et al., die auch bei der Definition der Werte für den Blattflächenindex herangezogen wurde. VAN DEN HURK et al. be-

¹³ Die Ausgabedateien beinhalten die folgenden Kaltluftgrößen: Die mittleren Windgeschwindigkeitskomponenten u und v [cm s⁻¹], die Kaltluftmächtigkeit H_{KL} [dm], den Kälteinhalt E_{KL} [100 J m⁻²] sowie die Windgeschwindigkeitskomponenten u und v [cm s⁻¹] und den Kälteinhalt E_{KL} [100 J m⁻¹] für ein vorgegebenes Höhenniveau.

schreiben die saisonale Schwankung des Blattflächenindex und den Bedeckungsgrad des Bodens mit Vegetation auf Basis von NDVI Daten¹⁴ (VAN DEN HURK et al. 2003).

- *hv*: Die mittlere Baumhöhe für die Klasse 6 (Park) wurde von 20 auf 15 m reduziert. Übereinstimmende mittlere Baumhöhen für die Klasse 3 (Wald) und 6 (Park) wurden für das Untersuchungsgebiet als nicht realistisch betrachtet.
- *xlai*: Da die Dichtigkeit / Porosität von Vegetation maßgeblich durch ihren Blattflächenindex LAI bestimmt wird und dieser großen Einfluss auf den Kaltluftabfluss hat, wurde der LAI gleich mehrfach verändert. So wurde der LAI von Klasse 3 (Wald) für die Darstellung der sommerlichen, belaubten Periode von 6 auf 6,68 angehoben. Die Waldflächen des Untersuchungsgebietes bestehen überwiegend aus Mischwald, daher wurde die Klasse 3 in (Misch-)Wald umbenannt. Für die unbelaubte, winterliche Modellierung wurde der LAI dagegen von 6 auf 1,02 gesenkt (VAN DEN HURK et al. 2003). Die gleiche Anpassung erfolgte für die Klasse 6 (Park). Erschwerend für die Untersuchung war, dass es keine allgemein gültigen Werte des LAI gibt, da Vegetationsbestände in verschiedensten Formen auftreten. So unterscheiden sie sich beispielsweise in der Zusammensetzung der Arten, der Bestandshöhe und der Bestandsdichte, des Weiteren u.a. durch die Verfügbarkeit an Wasser oder solarer Einstrahlung. So geben BERNHOFER et al. für eine Buche einen LAI von 3,9 an (BERNHOFER et al. 2011), ERIKSSON et al. von 4,4 (ERIKSSON et al. 2005), BREUER & FREDE von 6,5 (BREUER & FREDE 2003a,b) und VAN DEN HURK et al. von 5,88 für einen Laubbaum im Sommer (VAN DEN HURK et al. 2003). Für die Modellierung wurden verschiedene Publikationen herangezogen, um die Angaben von VAN DEN HURK et al. vor ihrer Verwendung zu überprüfen, neben den bereits genannten so z.B. von BULCOCK & JEWITT, GONG et al. und ASNER et al. (BULCOCK & JEWITT 2010, ASNER et al. 2003, GONG et al. 2003).

Tab. 8: Übersicht über die Parameter-Veränderungen der KLAM_21 Standardklassen (grau hinterlegte Werte weichen von der Standardbelegung ab).

Sommer						
Klassen	Nutzung	z0g	bg	hv	xlai	a
3	(Misch-) Wald	0,4	0,827	20	6,68	0,56
6	Park	0,1	0,2	15	6,68	1

Winter						
Klassen	Nutzung	z0g	bg	hv	xlai	a
3	(Misch-) Wald	0,4	0,827	20	1,02	0,56
6	Park	0,1	0,2	15	1,02	1

Zur weiteren Differenzierung von Vegetationseigenschaften wurden weitere KLAM_21 Klassen gebildet. Die Klasseneinteilung folgte anhand der in Kap. 5.2.6 beschriebenen Vegetationskartierung in den Talbereichen. Finden in einzelnen Modellläufen abweichende Werte Anwendung, so ist dies entsprechend vermerkt. Die Definition der Werte ist in Tab. 9 dargestellt.

¹⁴ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): Zur Bestimmung des LAI-Wertes verwendeter Vegetationsindex, der aus der Differenz der Spektralkanäle des roten Lichtes und des Nahen Infrarot ermittelt wird (z.B. FOKEN 2006, CARLSON & DAVID 1997).

Tab. 9: Übersicht über die erweiterten KLAM_21 Klassen und die dazugehörigen Parameter.

Sommer						
Klassen	Nutzung	z0g	bg	hv	xlai	a
10	Wiese	0,05	0	0	0	1
11	Laubgehölz: bis 2 m	0,4	1	1,94	5,88	0,56
12	Laubgehölz: 3 bis 4 m	0,4	1	3,8	5,88	0,56
13	Laubgehölz: 5 bis 7 m	0,4	1	5,52	5,88	0,56
14	Laubgehölz: 8 bis 10 m	0,4	1	9,43	5,88	0,56
15	Laubgehölz: 11 bis 13 m	0,4	1	12,02	5,88	0,56
16	Laubgehölz: 14 bis 16 m	0,4	1	14,84	5,88	0,56
17	Laubgehölz: 17 bis 20 m	0,4	1	19,32	5,88	0,56
18	Nadelgehölz: bis 4 m	0,4	1	3,06	4,96	0,56
19	Nadelgehölz: 5 bis 10 m	0,4	1	9,19	4,96	0,56
20	Nadelgehölz: 11 bis 20 m	0,4	1	16,00	4,96	0,56
21	S-Laubgehölz: 12 bis 14 m	0,4	1	13	2,94	0,56

Winter						
Klassen	Nutzung	z0g	bg	hv	xlai	a
10	Wiese	0,05	0	0	0	1
11	Laubgehölz: bis 2 m	0,4	1	1,94	0,72	0,56
12	Laubgehölz: 3 bis 4 m	0,4	1	3,8	0,72	0,56
13	Laubgehölz: 5 bis 7 m	0,4	1	5,52	0,72	0,56
14	Laubgehölz: 8 bis 10 m	0,4	1	9,43	0,72	0,56
15	Laubgehölz: 11 bis 13 m	0,4	1	12,02	0,72	0,56
16	Laubgehölz: 14 bis 16 m	0,4	1	14,84	0,72	0,56
17	Laubgehölz: 17 bis 20 m	0,4	1	19,32	0,72	0,56
18	Nadelgehölz: bis 4 m	0,4	1	3,06	1,95	0,56
19	Nadelgehölz: 5 bis 10 m	0,4	1	9,19	1,95	0,56
20	Nadelgehölz: 11 bis 20 m	0,4	1	16,00	1,95	0,56
21	S-Laubgehölz: 12 bis 14 m	0,4	1	13	0,36	0,56

Die in Tab. 9 definierten Werte lassen sich wie folgt beschreiben:

- *z0g*: Die Rauigkeitslänge der KLAM_21 Klassen 10 bis 21 wurde aus den Standardklassen übernommen. Dabei entspricht die Rauigkeitslänge von Klasse 10 (Wiese) der von Klasse 7 (unversiegelte Freifläche). Die Rauigkeitslänge der Baumvegetation der Klassen 11 bis 21 entspricht der von Klasse 3 (Wald). Dabei ist zu beachten, dass *z0g* die Rauigkeitslänge ohne eventuell vorhandene, weiter spezifizierte Bebauung oder Bewaldung darstellt. So erklärt sich z.B. die geringe Rauigkeitslänge von Klasse 1 (Siedlung dicht) von 0,1, die einen Bedeckungsgrad mit Gebäuden von 0,6 und eine mittlere Gebäudehöhe von 15 m einschließt. In der Literatur finden sich unter Berücksichtigung von Bebauungsstrukturen Werte von > 2 (z.B. STULL 2000).
- *bg*: Der Bedeckungsgrad des Bodens bei Bäumen wurde für die Klasse 10 auf 0 gesetzt, da der Baumvegetation im Talbereich eine eigene KLAM_21-Klasse zugewiesen wurde. Die Fläche mit der Klasse 10 ist frei von hoch aufwachsender Vegetation. Bei Klasse 11 bis 21 ist der Bedeckungsgrad 1, da die kartierten Bäume anhand ihres Kronendurchmessers als eigene Klasse ausgewiesen wurden und in der Flächennutzungsdatei mit ihrem Kronendurchmesser als Flächennutzung auftauchen.
- *hv*: Die mittlere Baumhöhe wurde anhand der Kartierung definiert. So wurde der Mittelwert der Höhe aller kartierten Bäume einer Klasse errechnet. Die Kriterien der Klassenfestlegung wird in Abb. 35 beschrieben. Wie bereits oben erklärt, beträgt der Bedeckungsgrad der Klasse 10 mit Bäumen 0.

- *lai*: Der Blattflächenindex der Laubgehölze beträgt im Sommer laut VAN DEN HURK et al. 5,88, im Winter 0,72, der der Nadelgehölze im Sommer 4,96 und im Winter 1,95 (VAN DEN HURK et al. 2003). Die Klasse 21 (S-Laubgehölz) dient der genaueren Beschreibung des Straßenbegleitgrüns im Leebereich von Station KW und KB. Dabei handelt es sich um bis etwa zur Hälfte der Baumhöhe entasteten Ahorn (*Acer platanoides*). Der LAI Wert für Laubgehölze wurde dementsprechend sowohl für den Winter als auch für den Sommer halbiert.
- *a*: Die relative Ausstrahlung wurde anhand der KLAM_21 Standardklassen definiert. So entspricht die Ausstrahlung der Klasse 10 (Wiese) der von Klasse 7 (unversiegelte Freiflächen), die Ausstrahlung der Klassen 11 bis 21 entsprechen der Klasse 3 (Wald).

5.3.3 Modellierete Vegetationsstrukturen

Neben den in Kap. 5.3.2 beschriebenen Eingabeparametern des Modells werden in Folge die unterschiedlichen Modellläufe hinsichtlich der modellierten Vegetationsstrukturen beschrieben. Eine Erläuterung der Vegetationsveränderungen fand bereits in Kap. 5.1.2 statt. Da die Kaltluftmodellierung in KLAM_21 neben der Orographie über die Flächennutzung gesteuert wird (vgl. Kap. 5.3.1), wird in Folge die kartierte Vegetation, bzw. deren praktische und theoretische Veränderung kartographisch dargestellt und beschrieben.

Vegetationsstruktur 1 (VS1)

VS1 (vgl. Abb. 38) zeigt im MZ1 die ursprüngliche Auenvegetation, wie sie von Beginn der Untersuchung bis einschließlich zum 15.02.2010 im Kannegießerbachtal vorzufinden war. Vor Beginn von MZ2 (17.02.2010) wurde ein Baumbestand in der Umgebung der Stationen KW und KB – wie in Kap. 5.1.2 beschrieben – entfernt.

Vegetationsstruktur 2 (VS2)

VS2 (vgl. Abb. 39) zeigt zwei Vegetationsszenarien für das Kannegießerbachtal. In Szenario 1 (SZ1) wurde die Vegetation im Kartenausschnitt so „verschoben“, dass eine „baumlose“ Kaltluftschneise im Bereich der Stationen KW und KB entstand. Es ist folglich davon auszugehen, dass der Einfluss der hoch aufwachsenden Baumvegetation minimiert wurde. In Szenario 2 (SZ2) wurde im Bereich der Stationen KW und KB Baumvegetation hinzugefügt, um den Abfluss der Kaltluft stärker zu beeinflussen. Eine zunehmende Verbuschung und Bewaldung des Kannegießerbachtales, wie in SZ2 dargestellt, wäre ohne anthropogenen Eingriff für die Zukunft als durchaus realistisch zu betrachten und findet – bei Betrachtung der vergangenen Dekaden – bereits statt.

Vegetationsstruktur 3 (VS3)

VS3 (vgl. Abb. 40) zeigt im MZ1 die ursprüngliche Heckenvegetation, wie sie von Beginn der Untersuchung bis einschließlich zum 11.02.2010 im Johannisbachtal vorzufinden war. Vor Beginn von MZ2 (13.02.2010) wurde ein Heckenabschnitt in der Umgebung der Station JH – wie in Kap. 5.1.2 beschrieben – entfernt.

Vegetationsstruktur 1 (VS1)

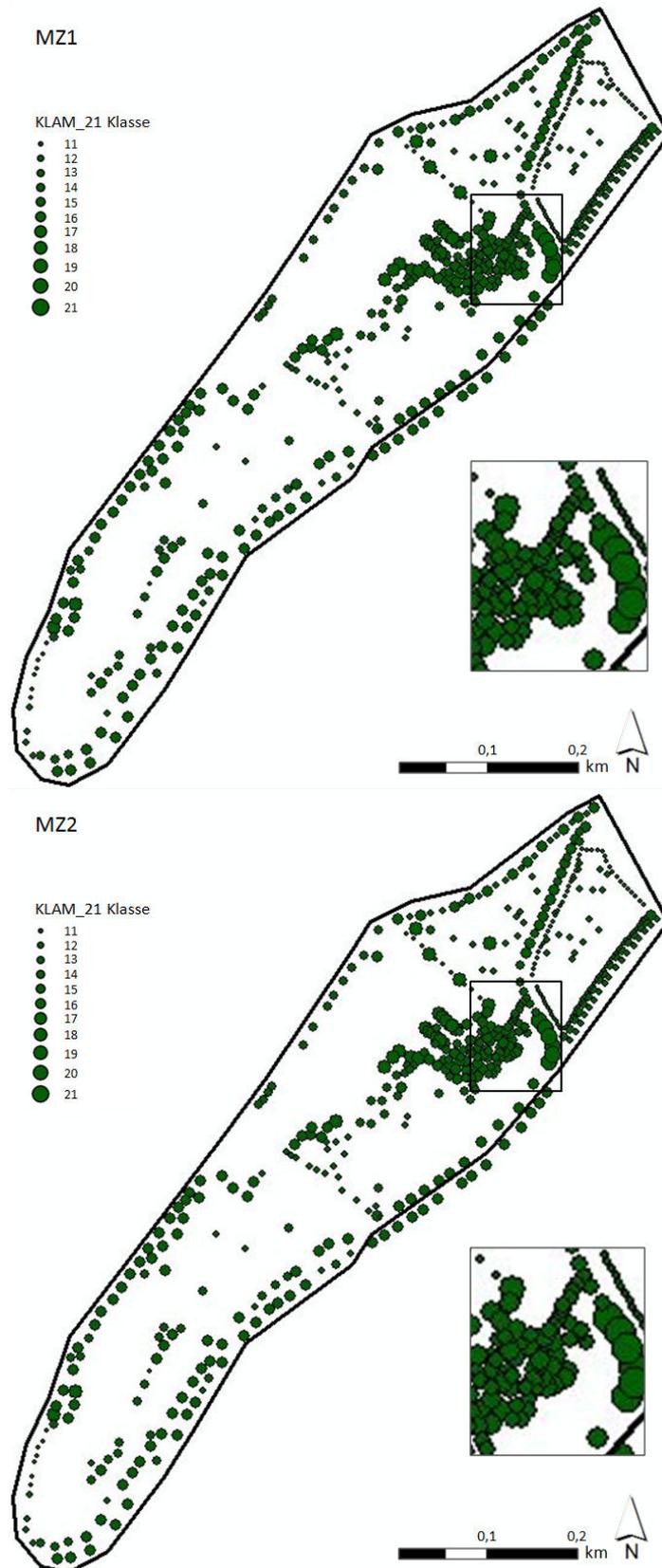


Abb. 38: Kartierte Vegetation im Kannegießerbachtal und deren Umsetzung in KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9) für MZ1 und MZ2.

Vegetationsstruktur 2 (VS2)

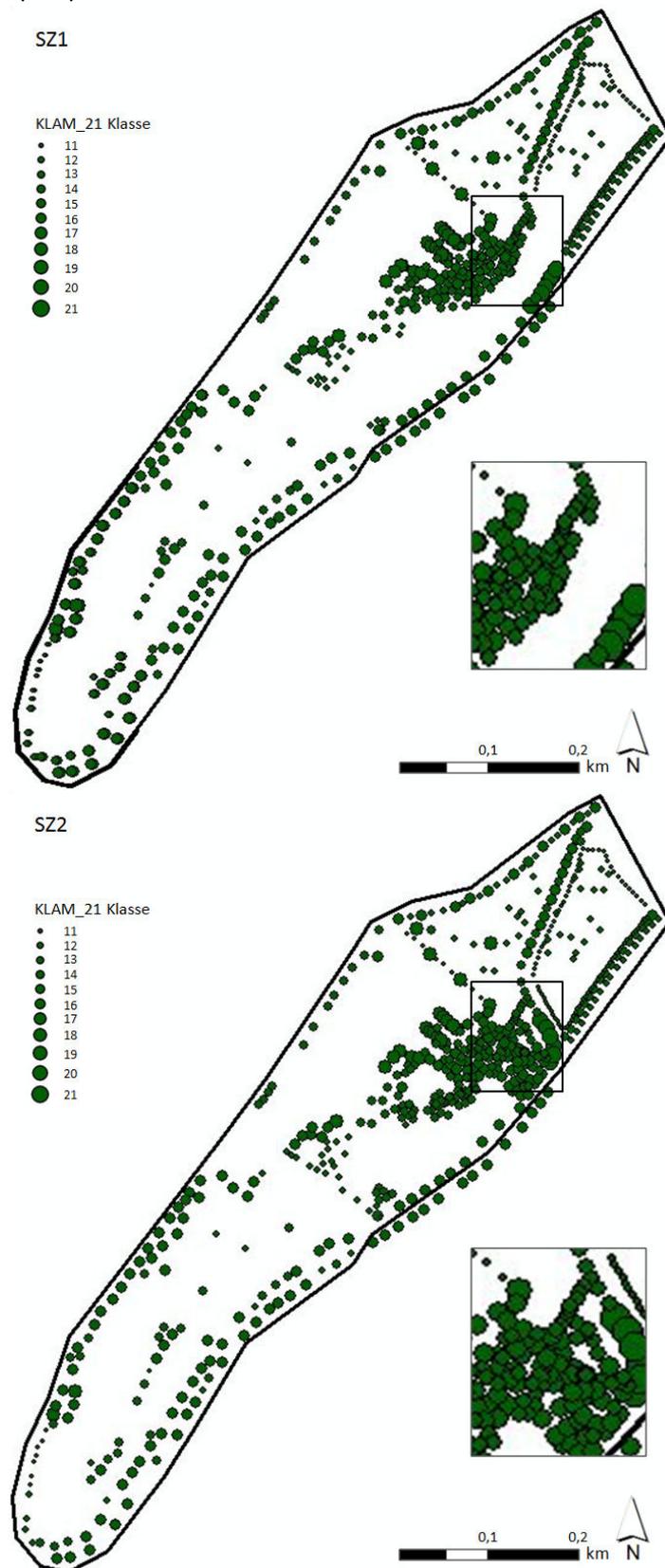


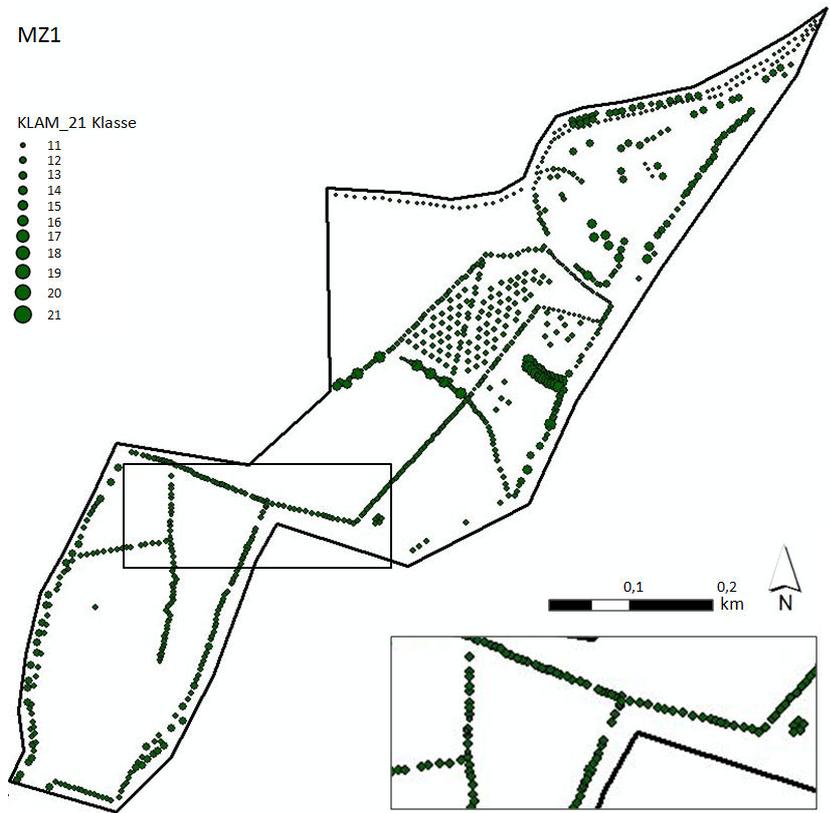
Abb. 39: Vegetationsszenarien im Kannegießerbachtal mit reduzierter (SZ1) und erweiterter Vegetationsstruktur (SZ2) auf Basis von baumhöhen-abhängigen KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9).

Vegetationsstruktur 3 (VS3)

MZ1

KLAM_21 Klasse

- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21



MZ2

KLAM_21 Klasse

- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21

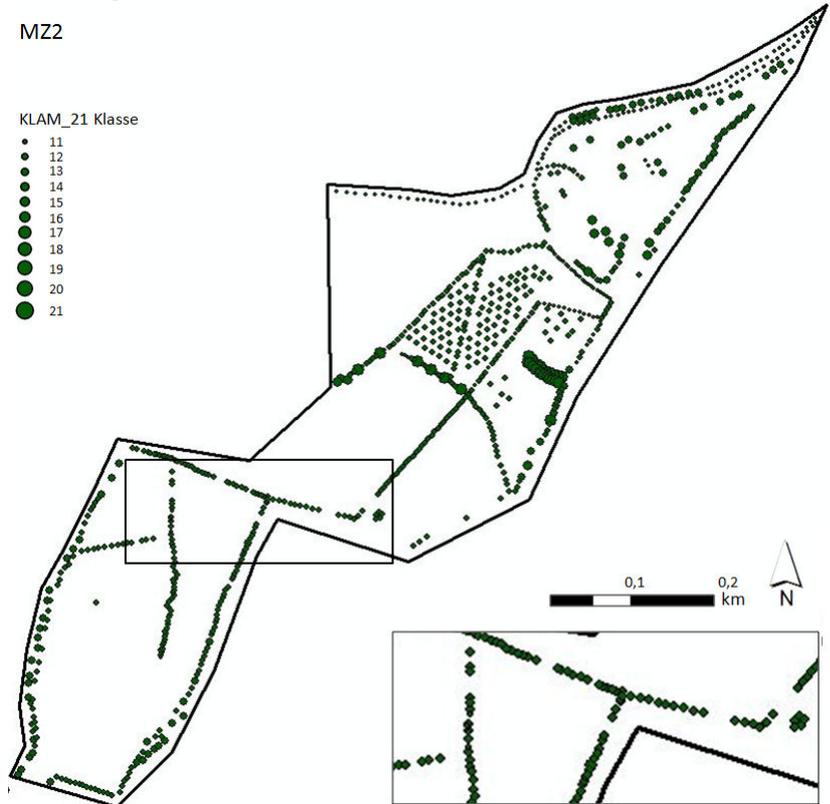


Abb. 40: Kartierte Vegetation im Johannisbachtal und deren Umsetzung in KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9) für MZ1 und MZ2.

Vegetationsstruktur 4 (VS4)

SZ1

KLAM_21 Klasse

- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21



SZ2

KLAM_21 Klasse

- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21



Abb. 41: Vegetationsszenarien im Johannisbachtal mit reduzierter (SZ1) und erweiterter Vegetationsstruktur (SZ2) auf Basis von baumhöhen-abhängigen KLAM_21 Klassen (vgl. Tab. 9).

Vegetationsstruktur 4 (VS4)

VS4 (vgl. Abb. 41) zeigt zwei Vegetationsszenarien für das Johannisbachtal. In Szenario 1 (SZ1) wurde die Vegetation im Kartenausschnitt so „verschoben“, dass die Heckenbestände, die quer zum Tal verlaufen, zugunsten einer dem Talverlauf parallelen Struktur verändert wurden. Es ist folglich davon auszugehen, dass die Kaltluft während des Fließens weniger Beeinflussung durch die Heckenvegetation erfährt. In Szenario 2 (SZ2) wurden Heckenabschnitte im Johannisbachtal hinzugefügt. Dabei liegt der Gedanke zu Grunde, dass eine weitere Strukturierung des Talbereiches durch Hecken durchaus denkbar ist. Hierbei spielen z.B. kulturlandschaftliche und den Naturschutz betreffende Aspekte eine Rolle. Auch im Hinblick auf den Frostschutz könnte eine weitere Unterteilung des Gebietes von Interesse sein. Bei SZ2 ist davon auszugehen, dass die Kaltluft in ihrem Fließverhalten im Vergleich zu SZ1 eine Behinderung erfährt.

Als Übersicht für die Modellläufe in Kap. 6 und Kap. 7 dient Tab. 10. Dort ist, neben der für die unterschiedlichen Vegetationsstrukturen eingeführten Nomenklatur, das Modellgebiet und die angenommene Jahreszeit, die durch die Modifikation des LAI Eingang in die Modellierung findet, aufgeführt. Die drei angegebenen Modellparameter werden den jeweiligen Modellläufen zugeordnet, die bei den Darstellungen genutzt wurden.

Tab. 10: Modellläufe und deren zu Grunde liegende Vegetationsstruktur im jeweiligen Kerngebiet des Kannegießer- und Johannisbachtals (vgl. Abb. 38 bis Abb. 41) sowie die jeweiligen jahreszeitlich variierenden Eingabeparameter (vgl. Tab. 9).

Lauf	Modellgebiet	Vegetationsstruktur	LAI Werte
13	Kannegießerbachtal	VS1-MZ1	Sommer
14	Kannegießerbachtal	VS1-MZ1	Winter
15	Kannegießerbachtal	VS1-MZ2	Sommer
19	Kannegießerbachtal	VS1-MZ1	Sommer
25	Kannegießerbachtal	VS2-SZ1	Sommer
27	Kannegießerbachtal	VZ2-SZ2	Sommer
40	Johannisbachtal	VS3-MZ1	Sommer
42	Johannisbachtal	VS3-MZ2	Sommer
44	Johannisbachtal	VS4-SZ1	Sommer
46	Johannisbachtal	VS4-SZ2	Sommer

5.3.4 Ausbreitung von Luftbeimengungen

Wie bereits in Kap. 5.3.1 beschrieben, bietet das Modell KLAM_21 die Möglichkeit Punkt- oder Linienquellen (aneinandergereihte Punktquellen) in den Modelllauf zu implementieren. Diese Möglichkeit wurde in der vorliegenden Arbeit genutzt, um das Fließverhalten der Kaltluft in Abhängigkeit der vorhandenen Talvegetation und vor dem Hintergrund einer möglichen Konzentrationsverringering oder –erhöhung von in die Kaltluft eingebrachten Schadstoffen zu untersuchen. Im Kannegießerbachtal werden feste und gasförmige Schadstoffe in erster Linie durch den Straßenkehr emittiert. Von Bedeutung sind dabei die im oberen Talverlauf durch das Tal, im unteren Talbereich auf Höhe der Stationen KBR und KW / KB auf der westlichen Talschulter verlaufende Lütticherstraße sowie der

auf Höhe der Station KBR das Tal querende Brüsseler Ring (vgl. Abb. 20). Um eine annähernd realistische Aussage bezüglich der emittierten Schadstoffe (in diesem Falle PM₁₀) zu treffen wurden die DTV-Zahlen¹⁵ (durchschnittliche, tägliche Verkehrsstärke) der Prognose für das Jahr 2010 zu Grunde gelegt und mit Hilfe dieser eine 150 m lange Linienquelle auf dem Brüsseler Ring modelliert (Datenquelle: LANUV NRW, NIEDERAU et al. 2011). Nach den DTV-Zahlen werden im Jahr 2010 in der Summe 318,81 kg km⁻¹ PM₁₀ durch Kraftfahrzeuge (KFZ), landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge (LNFZ), motorisierte Zweiräder (KRAD), Busse (BUS) und weitere schwere Nutzfahrzeuge (SNOB) freigesetzt. Nach Umrechnung wurde für die einzelnen Punkte der Linienquelle im Abstand von 1 m ein Wert von 0,0000101 g s⁻¹ m⁻¹ PM₁₀ vorgegeben.

5.4 Übersicht über Messstandorte und Aufzeichnungstermine

An dieser Stelle soll die Lage der Messstandorte der Untersuchung zusammengefasst werden. Dabei zeigt Abb. 42 eine Übersicht über alle Standorte der mobilen Messungen im Untersuchungsgebiet. Die Messpunkte M8 bis M10 befinden sich im Johannisbachtal, alle übrigen Messpunkte im Kannegießerbachtal. Tab. 11 gibt einen Überblick über die Tage, an denen mobile Messungen stattfanden.

Tab. 11: Übersicht über die Aufzeichnungstermine der mobilen Messungen an den Standorten aus Abb. 42.

	Ballonsondierung	Talquerprofilmessung	Feinstaubmessung	Strahlungsbilanzmessung
M1		13.06.2009		
M2	13.06.2009 22.06.2009 25.09.2009 27.09.2010 09.07.2010			
M3		15.07.2009 09.09.2009 22.09.2009 25.09.2009 18.07.2010		09.09.2009 22.09.2009 25.09.2009
M4			19.09.2010	22.09.2009 24.06.2010
M5			19.09.2010	22.09.2009 24.06.2010
M6			19.09.2010	22.09.2009 24.06.2010
M7	28.09.2011			
M8	04.09.2010			
M9		04.09.2010		04.09.2010
M10	24.06.2010 04.09.2010			
M11	08.10.2010			
M12	08.10.2010			
M13	15.11.2011			

¹⁵ Die DTV Zahlen geben den durchschnittlichen täglichen Verkehr gemittelt über ein Jahr wieder (LANUV NRW, Niederau, et al. 2011).

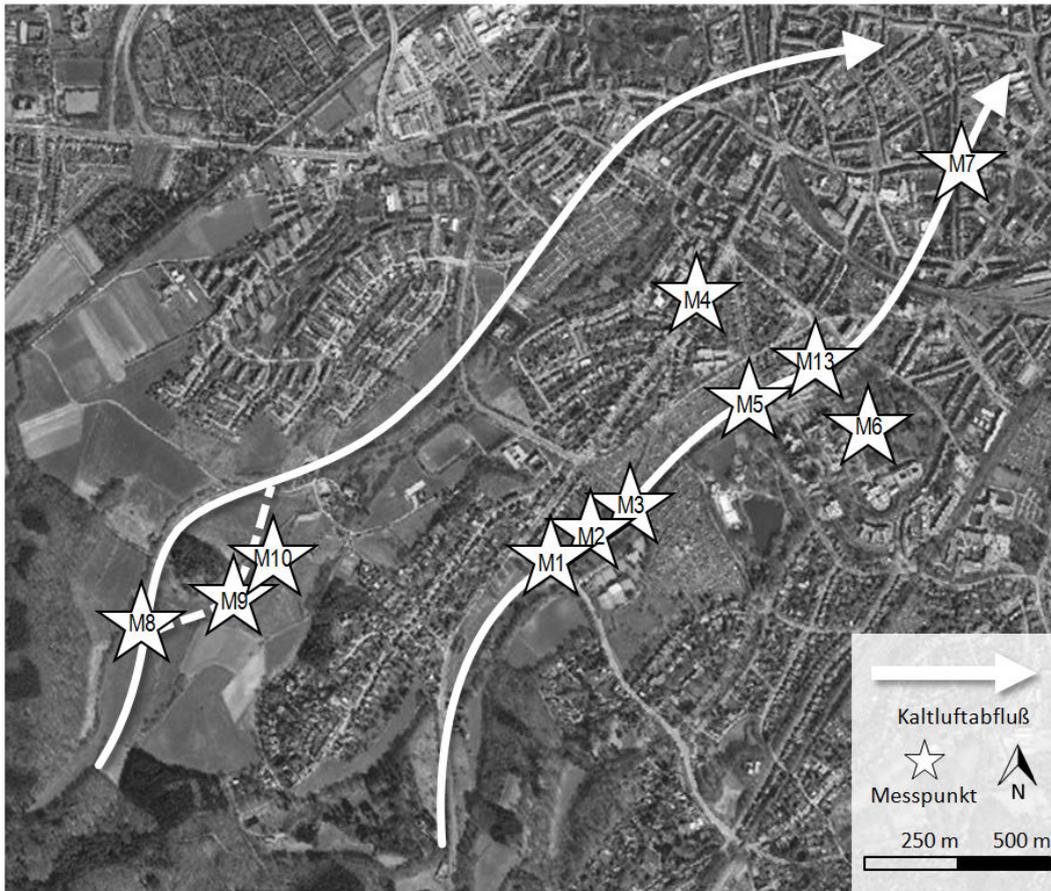


Abb. 42: Übersicht über die Standorte der mobilen Messungen im Kannegießer- und Johannisbachtal (Karten-
grundlage: BEZIRKSREGIERUNG KÖLN 2012).

6. Ergebnisse

Kap. 6 beinhaltet die Ergebnisse der empirischen Messungen und der Modellläufe. Dabei werden zunächst in Kap. 6.1 die klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet dargestellt. Den Auswertungen liegt dabei der Gesamtdatensatz aller Wetterstationen im Untersuchungsgebiet zu Grunde. Darin sind auch solche Daten enthalten, bei deren Aufzeichnung Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet auftrat. Kap. 6.2 beschreibt die Ausprägung der Klimaelemente ausschließlich unter Kaltluftabflussbedingungen. Dies dient dem besseren Verständnis des Kaltluftabflussgeschehens im Kannegießerbachtal. Kap. 6.3 und 6.4 beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der im Datensatz nachweisbaren Vegetationseffekte im Kannegießer- und Johannisbachtal, sowohl in Bezug auf den Gesamtdatensatz (Kap. 6.3) als auch auf den Kaltluftdatensatz (Kap. 6.4). Modellergebnisse wurden an verschiedenen Stellen in Kap. 6 eingearbeitet.

6.1 Klimatische Bedingungen im Untersuchungszeitraum

In Folge werden in Kap. 6.1 zunächst, basierend auf dem Gesamtdatensatz, Auswertungen der Messdaten der Stationen KBR, KW und KB vorgenommen, die die gemessenen Klimaelemente unabhängig davon zeigen, ob zum entsprechenden Aufzeichnungszeitpunkt Kaltluftabfluss stattfand. So wird eine Übersicht über die Eigenschaften der gemessenen Klimaelemente in den verschiedenen Talbereichen gezeigt, die für einen späteren Vergleich bei der Auswertung des Datensatzes bei Kaltluftabfluss (vgl. Kap. 6.2) herangezogen werden. Gleichzeitig wird damit jeder Messstandort einer kurzen statistischen und klimatischen Charakterisierung unterzogen. Vergleichend aufgeführt werden in der Regel die Daten der Referenzstation HÖ außerhalb des Untersuchungsgebietes (vgl. Kap. 5.5.1). Die Daten der Station JH finden eine ergänzende Betrachtung in Kap. 6.4.8, sowie bei der Modellierung der Vegetationsszenarien in Kap. 7.

6.1.1 Windfeld

Bezogen auf das Windfeld weisen die Messstationen jeweils unterschiedliche Charakteristika auf, die im Wesentlichen auf den unterschiedlichen Eigenschaften der Stationsumgebungen beruhen.

Abb. 43 zeigt den 14tägigen gleitenden Durchschnitt der Windgeschwindigkeit an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB, basierend auf Tagesmittelwerten der Messperiode vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011. Die Referenzstation HÖ weist im Untersuchungszeitraum eine vergleichsweise hohe mittlere Windgeschwindigkeit von $3,2 \text{ m s}^{-1}$ auf, die der exponierten Lage im Relief geschuldet ist. Die Daten der Stationen KBR und KW weisen deutlich geringere mittlere Windgeschwindigkeiten von jeweils $1,4 \text{ m s}^{-1}$ auf. Betrachtet man deren Lage im Untersuchungsgebiet, so wäre zunächst zu vermuten, dass das Geschwindigkeitsniveau an Station KBR höhere Werte zeigt als an Station KW. Der Grund hierfür ist die im Talbereich verhältnismäßig frei anströmbare Station KBR, wohingegen Station KW vor allem in MZ1 durch teilweise dichte Vegetation beeinflusst wird (vgl. Abb. 20). Erwartungsgemäß zeigen sich an der Station KB auf beiden Messniveaus vergleichsweise niedrige mittlere

Windgeschwindigkeiten von $1,0 \text{ m s}^{-1}$ in 5,5 m Höhe ü. Gr. und $0,6 \text{ m s}^{-1}$ in 1 m Messhöhe ü. Gr.. Hier spielt der Vegetationseinfluss eine entscheidende Rolle (vgl. Kap. 6.3 und 6.4).

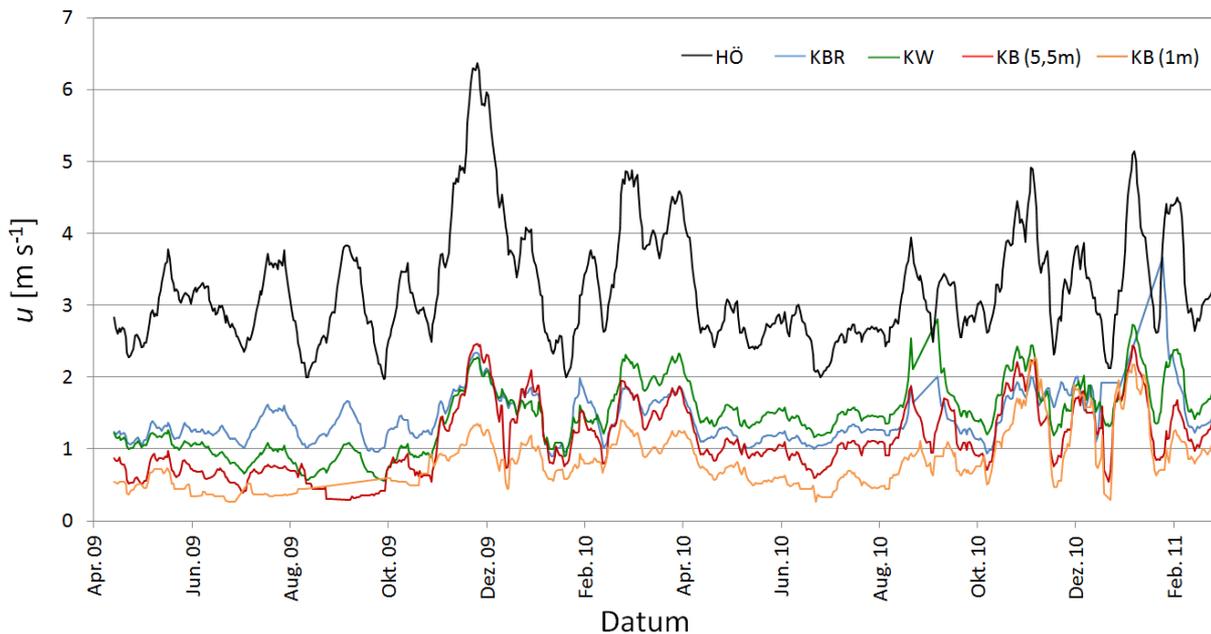


Abb. 43: 14tägiger gleitender Durchschnitt der Windgeschwindigkeit u an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB basierend auf Tagesmittelwerten in der Messperiode vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011.¹⁶

Abb. 43 zeigt den deutlichen und zu erwartenden Zusammenhang zwischen den an der Station HÖ gemessenen Windgeschwindigkeiten und den Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet, auch wenn dieser Zusammenhang durch häufig auftretenden nächtlichen Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet zeitweise schwächerer Ausprägung ist. Zeiträume hoher mittlerer Windgeschwindigkeiten an Station HÖ wie im November 2009 oder März 2010 haben deutlichen Einfluss auf die an den Messstationen im Kannegießerbachtal auftretenden Windgeschwindigkeiten. Ebenso prägen sich schwachwindige Perioden wie im September 2009 und Juli 2010 im Talbereich aus.

Bei der statistischen Analyse zeigen die aufgezeichneten Daten der Stationen im Talbereich einen ausgeprägten positiven linearen Zusammenhang mit den Messwerten der Station HÖ (vgl. Abb. 44). Dabei fällt auf, dass das Bestimmtheitsmaß R^2 und der Korrelationskoeffizient $|r|$ der Stationen KBR und KW ($R^2 = 0,67$, $|r| = 0,82$) höher ist, als an Station KB in 5,5 m Messhöhe ($R^2 = 0,61$, $|r| = 0,78$) und in 1 m Messhöhe ($R^2 = 0,53$, $|r| = 0,73$). Erklären lässt sich dieser Sachverhalt in der Vegetationsstruktur im Bereich von Station KB. In 5,5 m Messhöhe wird die Windgeschwindigkeit offensichtlich durch dichtes Astwerk und Blätter modifiziert, in der Messhöhe von 1 m kommt zudem der Einfluss der hohen (sommerlichen) Wiesenvegetation hinzu. Auf Station KW, die ebenfalls ähnlich positioniert ist wie Station KB, wirkt die Vegetationsstruktur in einer Messhöhe von 3 m offensichtlich weniger.

¹⁶ Im Kap. 6 finden trotz definierten Anlaufgeschwindigkeiten der Anemometer Windgeschwindigkeiten unter $0,3 \text{ m s}^{-1}$ Berücksichtigung. Eine entsprechende Begründung findet sich in Kap. 5.1.4.

Der direkte Einfluss der Wiesenvegetation ist nicht vorhanden, zudem ist das Astwerk im unteren Stammraum – wenn auch mit einem größeren Durchmesser als in 5,5 m Messhöhe – weniger dicht und nimmt weniger Einfluss auf die Windgeschwindigkeit. Derartige Verteilungen der Blattflächendichte (LAI) sind nicht untypisch. So können in Abhängigkeit von der Art der höchste LAI, und somit die höchste Beeinflussung der Fließgeschwindigkeit – durchaus auf zwei Dritteln der Gesamthöhe des Baumes liegen (KRAUS 2008). Da im Falle von Kaltluftabfluss die katabatischen Winde des Kannegießerbachtals vom synoptischen Wind (Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der Station HÖ) abgekoppelt sind, bleibt anzumerken, dass in diesem Zeitraum kein eindeutiger statistischer Zusammenhang zwischen den Windgeschwindigkeiten an den Messstationen im Bachtal und der Referenzstation HÖ gegeben sein muss, was zu geringeren Korrelationen der Datensätze führt. Da der Betrachtungsschwerpunkt der Arbeit auf der Wirkung von Kaltluft lag, wurde an dieser Stelle ein eventuell stärkerer statistischer Zusammenhang zwischen den Messdaten an den Talstationen und der Referenzstation zu Zeiten ohne Kaltlufteinfluss nicht überprüft.

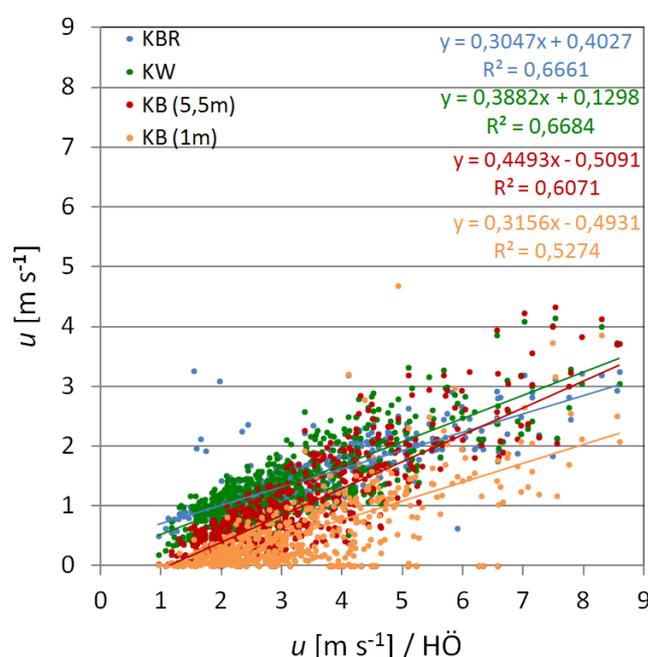


Abb. 44: Korrelation der Windgeschwindigkeit u an Station HÖ und den Stationen KBR, KW, KB (5,5 m) und KB (1 m) auf Basis von Tagesmittelwerten im Messzeitraum vom 01.04.2009 bis 28.02.2011.

Bei der weiteren Betrachtung von Abb. 43 fällt auf, dass die Sommermonate insgesamt deutlich niedrigere mittlere Windgeschwindigkeiten und eine deutlich geringere Amplitude der Windgeschwindigkeit aufweisen. Auch wenn der Messzeitraum von zwei Jahren keine sichere Aussage hinsichtlich eines Jahresganges möglich macht, so stimmt dieser Sachverhalt mit Beobachtungen überein, die eine zunehmende Anzahl schwachwindiger und folglich austauscharmer Tage in den Sommermonaten sehen (vgl. Kap. 1, z.B. Li et al. 2012). Gerade zu windschwachen Zeiten ist die Produktion von Kaltluft, für den Fall, dass weitere Voraussetzungen ebenfalls erfüllt sind, und der Bedarf an Kaltluft im Stadtraum am höchsten (vgl. Kap. 3.6). Aus Abb. 43 ist zudem ersichtlich, dass die Vegetationsentnahme am 16.02.2010 im Mittel steigende mittlere Windgeschwindigkeiten an Station KW und KB bewirkt. Ein detaillierter Vergleich der beiden Messzeiträume findet sich in Kap. 6.3.

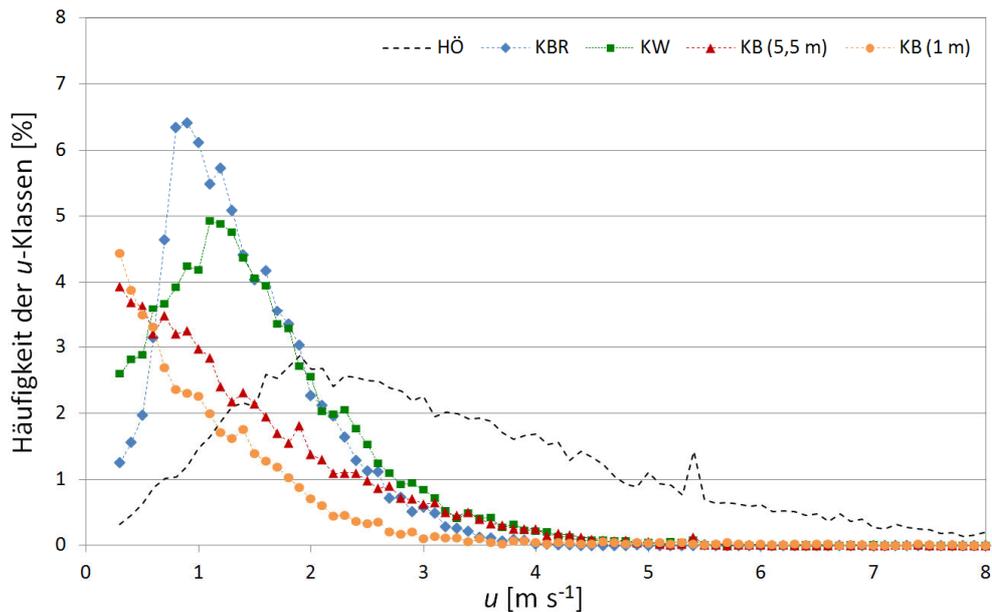


Abb. 45: Prozentuale Auftrettsfrequenz unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsklassen an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen eingeteilt, Windgeschwindigkeitsklassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt.

Zur weiteren statistischen Betrachtung wurden 60 min-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB in Geschwindigkeitsklassen von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ eingeteilt und in Abb. 45 dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden mittlere Windgeschwindigkeiten über 8 m s^{-1} , die alleine an der Station HÖ erreicht wurden, nicht abgebildet. Daten mit einer Windgeschwindigkeit von unter $0,3 \text{ m s}^{-1}$ gingen in die Berechnung mit ein, wurden jedoch nicht dargestellt, da eine genaue Einteilung in Klassen nicht möglich war (vgl. Kap. 5.1.4). Die Station HÖ zeigt aufgrund ihrer exponierten Lage und der damit freien Anströmbarkeit eine recht gleichmäßige Verteilung der Windgeschwindigkeiten mit einem Maximum bei etwa 2 m s^{-1} . An allen anderen Stationen ist die Dominanz schwachwindiger Situationen deutlich zu erkennen. Bei Station KBR treten am häufigsten Windgeschwindigkeiten von etwa 1 m s^{-1} auf, an der Station KW Geschwindigkeiten von ca. $1,2 \text{ m s}^{-1}$. Da an Station KBR weder Vegetation noch Bebauung in unmittelbarer Stationsumgebung die Anströmbarkeit beeinflussen, ist zunächst überraschend, dass Station KW dennoch eine höhere Windgeschwindigkeitsklasse als Maximum aufweist. In Abb. 43 sind ebenfalls zeitweise höhere Windgeschwindigkeiten an Station KW im Vergleich zur Station KBR zu erkennen. Eine abschließende Klärung findet sich in Kap. 6.3. An dieser Stelle sei jedoch vorab angemerkt, dass durch die Vegetationsentnahme zur Mitte der Messperiode Düseneffekte an Station KW eine Rolle spielen (vgl. Abb. 11 [Bc]). Station KB weist sowohl in einer Messhöhe von 5,5 m, als auch in einer Messhöhe von 1 m, durchgehend steigende Häufigkeiten mit abnehmender Windgeschwindigkeit auf. Dies stimmt aufgrund des dichten Vegetationsbewuchses, der die Anemometer umgab, mit den empirischen Beobachtungen überein und wurde bereits in Abb. 43 ersichtlich. Die Tatsache, dass nahezu alle dargestellten Windgeschwindigkeitsklassen an Station KB in 5,5 m Höhe häufiger vorkommen, als in 1 m Messhöhe, ergibt sich aus der in den Sommermonaten hoch aufwachsenden Wiesenvegetation, die in Kap. 5.2.1 (vgl. Abb. 30) näher beschrieben ist. Lediglich in Klassen kleiner als $0,5 \text{ m s}^{-1}$ übersteigt die Auf-

trittshäufigkeit an Station KB (1 m) die Werte der Station KB (5,5 m). Windgeschwindigkeiten von mehr als 5 m s^{-1} werden an den Talstationen nur in Ausnahmesituationen erreicht.

Bei der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten in Abb. 45 kann ebenfalls ein direkter Zusammenhang zur jeweiligen Stationsumgebung hergestellt werden. Hinzu kommt die insgesamt geschützte Lage des Kannegießerbachtals im Relief. Auch wenn in der Talsohle des Kannegießerbachtals überwiegend Wiesenvegetation auftritt, sind die Talschultern in großen Teilen baumbestanden und teilweise bebaut, was die starke Ausprägung der Klassen mit niedriger Windgeschwindigkeit in Abb. 45 spricht.

Der Tagesgang der mittleren Windgeschwindigkeit u an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB (vgl. Abb. 46) zeigt den typischen Verlauf steigender Windgeschwindigkeit mit Sonnenaufgang (06:00 Uhr bis 08:00 Uhr MEZ) aufgrund zunehmender konvektiver Durchmischung der bodennahen Luftschicht und umgekehrt sinkende mittlere Windgeschwindigkeiten mit Sonnenuntergang (18:00 bis 20:00 Uhr MEZ). Die Maxima der mittleren Windgeschwindigkeit liegen übereinstimmend aus gleichem Grund am Mittag zwischen 12:00 Uhr und 14:00 Uhr MEZ. Gut zu erkennen ist eine leichte Verschiebung des Windgeschwindigkeitsmaximums an Station HÖ in den Nachmittag. Grund hierfür ist ebenfalls die konvektiv-turbulente Durchmischung der bodennahen Luftschicht aufgrund solarer Einstrahlung. Wohingegen die Umgebung des Stationsstandortes HÖ auch am Nachmittag weitestgehend sonnenbeschienen ist, sind große Teile des Kannegießerbachtals – und so auch in jedem Fall die Stationsstandorte KW und KB – bei niedrigem Sonnenstand aus westlicher Richtung bereits verschattet (vgl. Abb. 20).

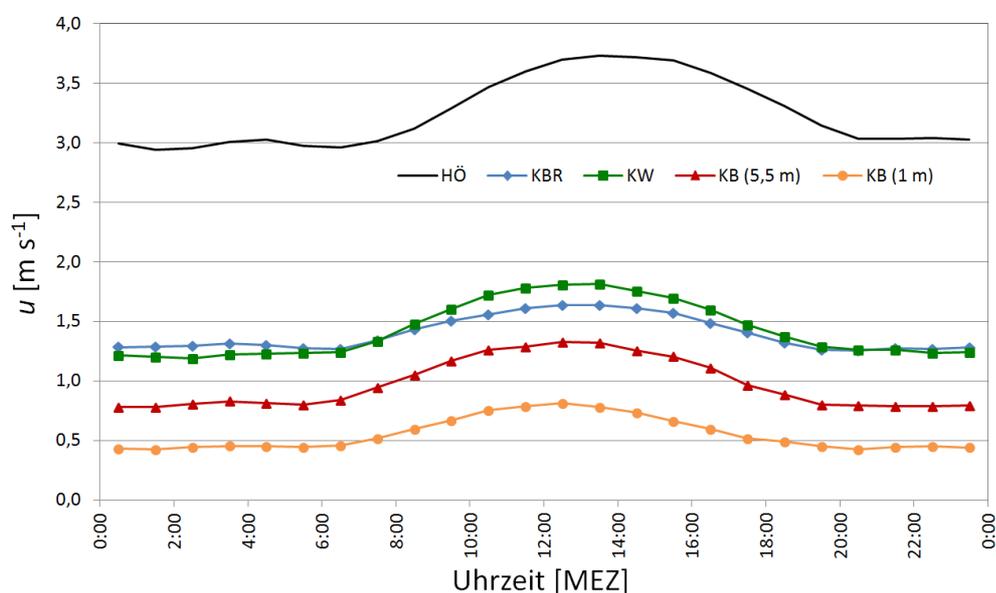


Abb. 46: Mittlere Windgeschwindigkeit u im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Auch in Abb. 46 bestätigt sich das vorangegangene Bild aus Abb. 43 und Abb. 45 mit zeitweise höheren mittleren Windgeschwindigkeiten an Station KW gegenüber Station KBR. Die tageszeitliche Differenzierung macht deutlich, dass dies vor allem am Tag der Fall ist, wohingegen die mittleren Windge-

schwindigkeitswerte in der Nacht systematisch unter die Werte an Station KBR absinken. Zieht man nun regelmäßigen Kaltluftabfluss im Talbereich mit in die Betrachtung ein, so führt dieser zu einer Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeitswerte an Station KBR in der Nacht im Vergleich zur Station KW, vor allem in MZ1, wo der Station KW umgebende Schwarzelnenbestand noch vorhanden war (vgl. Abb. 94). Der Vergleich der beiden Messzeiträume in Kap. 6.3 zeigt stark ansteigende Windgeschwindigkeiten an Station KW nach der Vegetationsentnahme, wobei die Messwerte an Station KBR in Relation zur Station HÖ nahezu gleich bleiben (vgl. Abb. 84). Die Windgeschwindigkeit steigt dabei auf ein Maximum am Mittag, was ein weiterer Grund für höhere mittlere Windgeschwindigkeiten am Tage, in Abb. 46 bei der Betrachtung des Gesamtdatensatzes, sein kann. Mögliche Gründe hierfür werden in Kap. 6.3.1 in Zusammenhang mit Abb. 84 beschrieben.

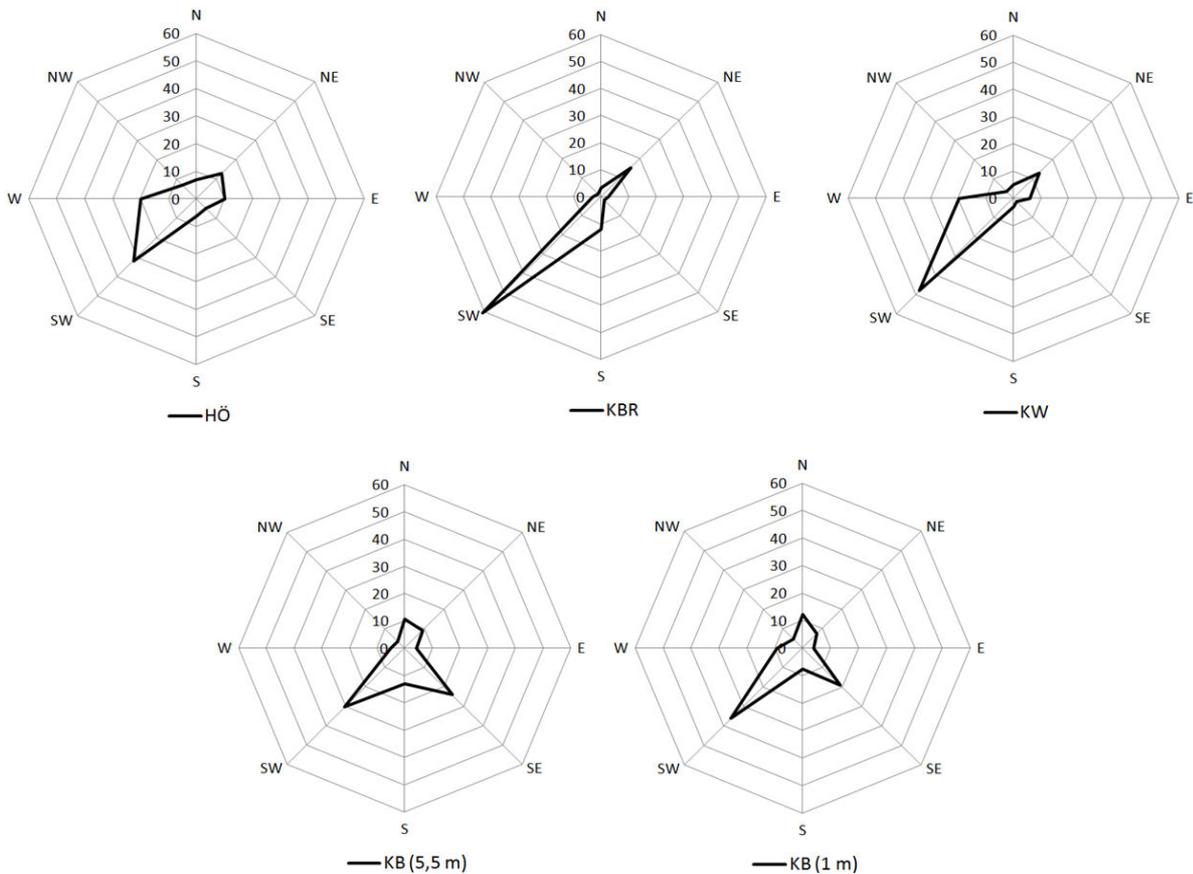


Abb. 47: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 10 min-Mittelwerten.

Die Windrichtungsverteilung der Stationsstandorte HÖ, KBR, KW und KB ist in Abb. 47 dargestellt. Dabei zeigt Station HÖ die für Aachen bekannte Verteilung mit einem Maximum aus dem südwestlichen Sektor (vgl. Kap. 4.1). Station KBR, die im Talbereich frei anströmbar ist, zeigt deutlich die kanalisierende Wirkung des Tales auf den Wind (vgl. Kap. 5.1.1). Der Wind strömt die Station KBR bei 60 % aller aufgezeichneten 10 min-Mittelwerte im Messzeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 aus Südwesten an. Dies entspricht exakt dem Talverlauf (vgl. Abb. 20). Ebenso deutlich, wenn auch mit etwas geringerer Ausprägung, zeigt sich die Verteilung für die Station KW. Hier entfallen 48 % aller Werte auf den südwestlichen Sektor. Sowohl an der Station KBR, als auch an der Station KW, tritt

neben dem südwestlichen Sektor als weiterer deutlich erkennbarer Peak die Windrichtung Nordost auf, die ebenfalls dem Talverlauf folgenden Wind repräsentiert. Auch bei nördlichen bis östlichen Windrichtungen wird die Luft im Tal kanalisiert. Zudem sind die beiden am häufigsten auftretenden Windrichtungen als deutliches Zeichen für ein häufiges und ausgeprägtes Berg-Talwind-System zu werten. Station KB zeigt in beiden Messhöhen, neben einem den anderen Stationen entsprechenden Maximum aus südwestlichen Richtungen (36 % im 1 m Messhöhe und 31 % in 5,5 m Messhöhe), zusätzlich eine auffällige Häufigkeit südöstlicher Anströmung (19 % in 1 m Messhöhe und 24 % in 5,5 m Messhöhe). Grund dafür ist der starke Vegetationseinfluss, wie in Kap. 5.1.1 beschrieben.

6.1.2 Temperatur und Relative Feuchte

Bei der Betrachtung des Gesamtdatensatzes hinsichtlich der Temperatur und Relativen Feuchte zeigen sich an den Stationen HÖ, KBR und KW unterschiedliche Stationscharakteristika in Abhängigkeit der Stationsumgebung, ähnlich der Untersuchung des Windfeldes in Kap. 6.1.1.

In Abb. 48 ist die Lufttemperatur an den Stationen KBR, KW und HÖ abgebildet. Bei der Erklärung der mittleren Temperaturdifferenzen spielen vor allem Effekte der Verschattung und solaren Einstrahlung sowie die Flächennutzung der Stationsumgebung eine entscheidende Rolle. Station HÖ weist in Abb. 48 mit 10,3 °C die höchste mittlere Lufttemperatur im Vergleich der Stationen auf. Zudem ist eine Abnahme der Mittelwerte von Station KBR (10,1 °C) über Station KW (2,5 m) (9,1 °C) hin zu Station KW (0,5 m) (8,9 °C) zu beobachten. Dieses Ergebnis spiegelt die allgemeine Annahme höherer städtischer Temperaturen im Vergleich zum Umland wieder, und zeigt den abnehmenden urbanen Einfluss auf die Stationen mit zunehmend stärker begrünter Stationsumgebung. Der Unterschied der Mittelwerte an den Stationen HÖ und KBR fällt jedoch nicht so deutlich aus, wie bei der Wärmeinselintensität Aachens (vgl. Abb. 16) zu erwarten wäre. Da die Station HÖ jedoch von der Lage her nicht den Kriterien einer „echten“ Stadtstation entspricht (vgl. Kap. 5.1.1), ist das Ergebnis aus Abb. 48 aufgrund der Stationsumgebung nachvollziehbar. Hinzu kommt, dass die Station HÖ mit ihrer Stationsumgebung tagsüber zwar weitestgehend durchgängig direkter solarer Einstrahlung ausgesetzt ist, am späten Nachmittag, vor allem im Winterhalbjahr bei niedrigem Sonnenstand, finden sich jedoch Verschattungseffekte durch angrenzende Bäume in der westlichen Stationsumgebung. Zu den dennoch vergleichsweise höheren Lufttemperaturen an Station HÖ trägt u.a. ein höherer Grad versiegelter Fläche in der Stationsumgebung – verglichen mit den übrigen Stationen – bei, so dass der auf Evaporation basierende, lufttemperaturmindernde Einfluss der Vegetation geringer ausfällt. Erwartungsgemäß sind die mittleren Temperaturen an Station KBR denen von Station HÖ am ähnlichsten. Hier spiegelt sich die zu Gunsten der freien Anströmbarkeit gewählte exponierte Lage der Station im Gelände wieder, so dass auch Station KBR und ihre Umgebung trotz Tallage über einen langen Zeitraum im Tagesverlauf solarer Einstrahlung ausgesetzt ist. Begünstigend für hohe mittlere Lufttemperaturen wirkt die Lage der Station an einer Straße, die durch ihre thermischen Eigenschaften, insbesondere einer erhöhten Wärmespeicherfähigkeit zu hohen mittleren Lufttemperaturen beiträgt. Die mittleren Maxima der Lufttemperatur zeigen nur geringe Unterschiede und liegen allesamt zwischen 13 °C und 14 °C, wobei Station KW in der Summe geringere Maxima aufweist. Insgesamt spielt bei dieser Betrachtung das häufige Auftreten schwachwindiger Situationen im Talbereich und vor allem

im dichten Vegetationsbestand an Station KW (vgl. Abb. 45) eine entscheidende Rolle, wobei Station HÖ zudem aufgrund ihrer exponierten Lage aus den genannten Gründen von niedrigeren mittleren Maxima der Lufttemperatur im Vergleich zu einer Stadtstation profitiert. Die mittleren Minima spiegeln in ihrem Verlauf das Bild der Mittelwerte wieder, wobei die Differenz der Minima und Mittelwerte der Lufttemperatur mit wachsender Ruralität des Standortes zunehmen. Hieran haben mitunter häufig vorkommende nächtliche Kaltluftabflusssituationen Anteil, deren Auswertung in Kap. 6.2 erfolgt. Die Amplitude der mittleren Lufttemperatur wird mit zunehmender Einschränkung der Luftaustauschmöglichkeiten größer. Demnach weist Station HÖ die geringste Amplitude und Station KW in einer Messhöhe von 0,5 m die höchste Amplitude auf. Sowohl (stagnierende, durch solare Einstrahlung) erwärmte Luft, als auch (nahezu) stagnierende Kaltluft im Vegetationsbestand, tragen zu diesem Sachverhalt bei.

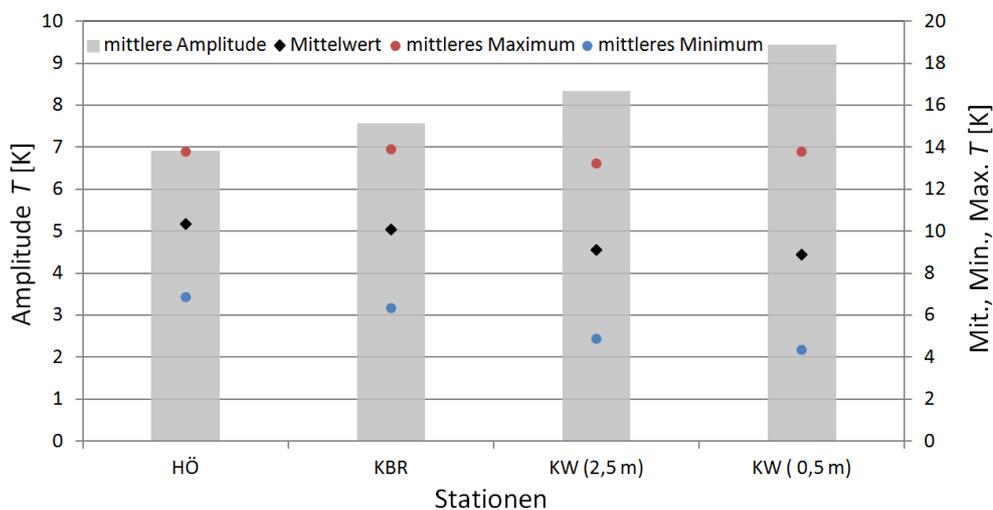


Abb. 48: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Lufttemperatur T an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten.

Gestärkt wird die vorangegangene Argumentation durch Abb. 49. Diese zeigt den Tagesgang der mittleren Lufttemperatur an den Messstationen KBR, KW und HÖ, basierend auf 60 min-Mittelwerten im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis 28.02.2011. Dabei zeigt sich die typische Lufttemperaturverteilung im Tagesverlauf mit einem Maximum am frühen Nachmittag und einem Minimum in den frühen Morgenstunden. Wie schon aus Abb. 48 ersichtlich, ist auch hier die mittlere Lufttemperatur im Tagesverlauf an der Station HÖ durchschnittlich nur unwesentlich höher als an Station KBR. Auffällig überschreiten die mittleren Lufttemperaturen an Station KBR in der Zeit zwischen 16:00 Uhr und 20:00 Uhr MEZ die Werte der Station HÖ, was sich mit gering höheren Maxima der mittleren Lufttemperatur an Station KBR im Vergleich zur Station HÖ in Abb. 48 deckt und die Annahme von Verschattungseffekten am Nachmittag an der Station HÖ bestätigt. Die gesamte Nacht und bis zum Mittag liegen die gemittelten Lufttemperaturwerte an Station KBR unter denen von Station HÖ. Dies ist zum einen aufgrund der Ruralität der Station zu erwarten, zum anderen führen Kaltluftabflüsse in den Nachstunden zu einer Absenkung des Mittelwertes der Lufttemperatur. Die abendliche Abnahme der Einstrahlung in Kombination mit orographisch und vegetationsbedingten Verschattungseffekten sowie eine stärker begrünte Stationsumgebung sind ebenfalls Auslöser

einer stark absinkenden mittleren Lufttemperatur an Station KW (0,5 m) ab 15:00 Uhr MEZ und der leicht zeitversetzt beginnenden Erwärmung der Lufttemperatur im Talbereich in den Morgenstunden. Station KW (0,5 m) zeigt sowohl die höchsten Erwärmungsraten am Morgen, als auch die höchsten Abkühlungsraten am Nachmittag. Auffällig ist zudem die hohe nächtliche Temperaturdifferenz im Vergleich zum Tag zwischen den Stationen KW und HÖ, die u.a. auf das temporäre aber häufige Auftreten nächtlicher Kaltluftabflüsse zurückzuführen ist (vgl. Kap. 6.2.2).

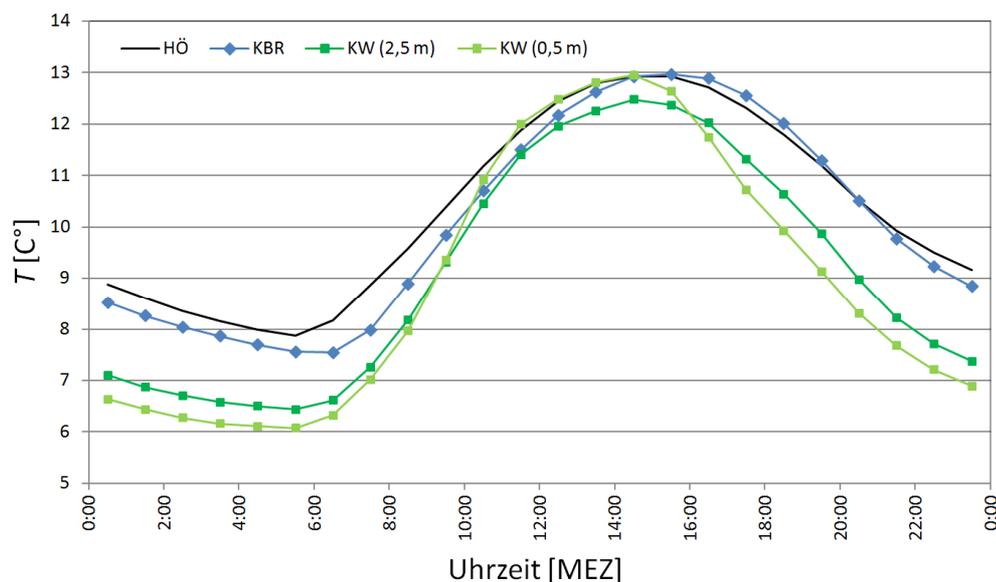


Abb. 49: Mittlere Lufttemperatur T im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Bei der Betrachtung der statistischen Zusammenhänge der Lufttemperaturen beträgt das R^2 zwischen den Werten der Station HÖ und den Werten der Station KBR 0,99. Ein ebenso hoher statistischer Zusammenhang der Werte findet sich bei Station KW (2,5 m), wobei das R^2 der Werte zwischen Station HÖ und Station KW (1 m) immer noch 0,94 beträgt. Zur detaillierteren Klärung dieses Sachverhaltes wird in Kap. 6.3 der Datensatz einer weiteren Betrachtung unterzogen.

Abb. 50 zeigt die mittlere Relative Feuchte an den Stationen HÖ, KBR und KW im Tagesgang. Insgesamt besteht bei allen Stationen eine negative Korrelation der Relativen Feuchte zur Lufttemperatur ($R^2 = 0,99$), wie durch deren Abhängigkeit zwingend vorgeschrieben. Dennoch zeigt der diurnale Verlauf der Relativen Feuchte geringe Unterschiede. Auffällig ist, dass Station KBR durchgängig zu allen Tageszeiten den geringsten mittleren Feuchtegehalt der bodennahen Luftschicht aufweist. Lediglich in den Nachstunden wird die Differenz zur Station HÖ etwas geringer, was der Beobachtung der Lufttemperaturverläufe im diurnalen Verlauf entspricht (vgl. Abb. 49). Auch hier spielt, wie schon bei der Auswertung der Lufttemperatur, die in den Wesenszügen im Allgemeinen eher wenig an eine urbane Station erinnernde begrünte Stationsumgebung von Station HÖ eine Rolle. Am Mittag und Nachmittag erreicht die Luft an Station HÖ Feuchtwerte, die über den gemessenen Werten an Station KW liegen. Insgesamt überschreitet der Feuchtwerte an Station HÖ in der Zeit von 11:00 Uhr bis 16:00 Uhr MEZ den Wert der Station KW in 0,5 m Messhöhe und in der Zeit von 10:00 Uhr bis 19:00 Uhr MEZ der Wert von Station KW in 2,5 m Messhöhe.

6. Ergebnisse

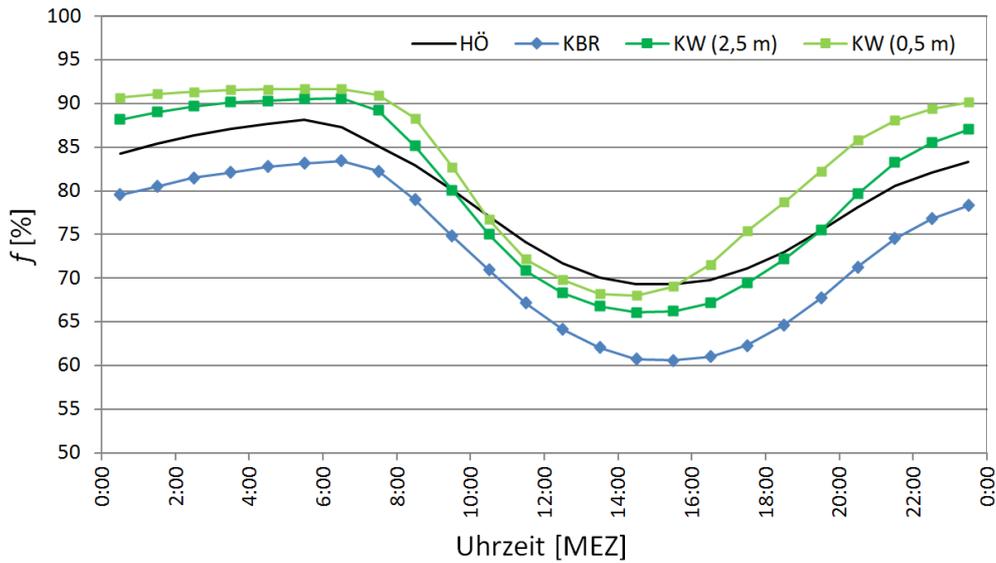


Abb. 50: Mittlere Relative Feuchte f im Tagesgang an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

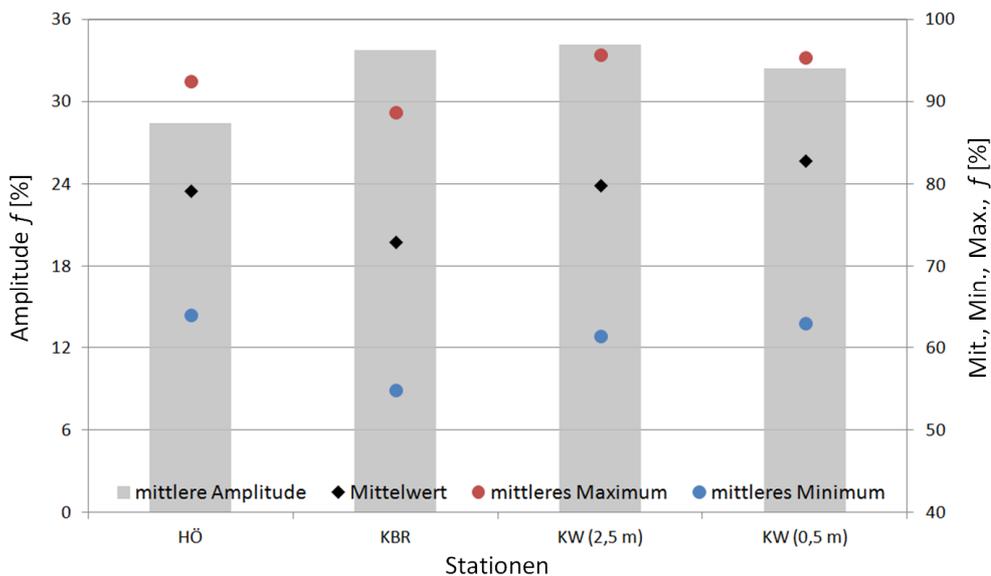


Abb. 51: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten.

In Anlehnung an Abb. 48 zeigt Abb. 51 die Datenauswertung hinsichtlich der Mittelwerte der Relativen Feuchte im Untersuchungszeitraum an den unterschiedlichen Stationen. Insgesamt zeigen alle Stationen die typischen Charakteristika, die auch bereits im Zusammenhang mit Abb. 48 erläutert wurden. Zusätzlich zu der bereits bekannten Tatsache, dass Station KBR im Mittel geringere Feuchtwerte aufweist als Station HÖ, so zeigt sich eine insgesamt höhere Amplitude des Feuchtegehalts der Luft an Station KBR. Vor allem das mittlere tägliche Minimum liegt an Station KBR deutlich unter dem Minimum an Station HÖ und auch KW. Station KW zeigt in Abhängigkeit der Umgebungssituation die höchsten mittleren täglichen Maxima. An dieser Stelle sei anzumerken, dass der Vegetation im Untersuchungsgebiet das ganze Jahr über eine ausreichende Menge an Wasser zur Verfügung steht.

Anders als bei innerstädtischen Grünflächen, bei denen – mit sinkendem Wasserangebot während länger anhaltender Strahlungswetterlagen mit hohen Lufttemperaturen – der kühlende Effekte der Vegetation abnimmt, ist eine solche Abnahme der Evapotranspiration im Untersuchungsgebiet nicht zu erwarten (vgl. Kap. 3.7). Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass für die verwendeten Messinstrumente eine Messgenauigkeit von $\pm 3\%$ angegeben wird. Sehr geringe Differenzen der Messwerte sind daher mit Vorsicht zu interpretieren.

Neben der Lufttemperatur wurde an Station KW die Bodentemperatur in drei verschiedenen Tiefen erfasst (vgl. Abb. 32 und Abb. 52).

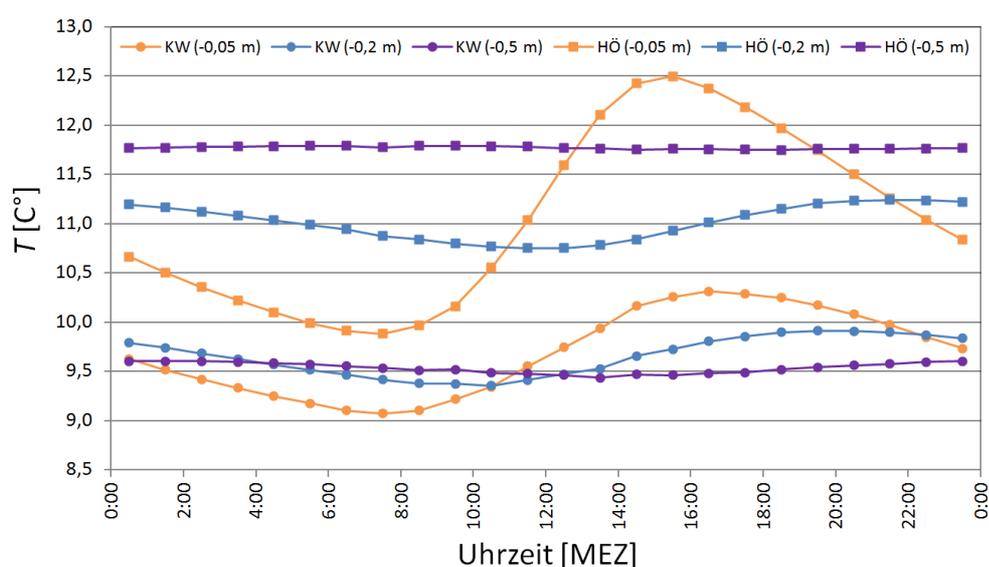


Abb. 52: Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen an den Stationen KW und HÖ basierend auf 60-min Mittelwerten im Messzeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011.

Insgesamt zeigen die Bodentemperaturen einen typischen tiefenabhängigen Tagesverlauf. Dabei fällt auf, dass das Temperaturniveau in allen drei Messtiefen (-0,05 m, -0,2 m und -0,5 m) an der Station HÖ höher ist als an Station KW. Die Station HÖ zeigt in einer Messtiefe von -0,5 m eine nahezu konstante mittlere Temperatur von etwa 11,8 °C. Schwankungen aufgrund sich verändernder solarer Einstrahlung im Tagesgang sind erst in einer Tiefe von -0,2 m zu erkennen. Die Amplitude der Schwankungen beträgt 0,5 °C. In einer Messtiefe von -0,05 m zeigt sich der idealtypische Tagesgang mit den niedrigsten mittleren Temperaturen am frühen Morgen und der größten Erwärmung am frühen Nachmittag, wobei ein zeitlicher Versatz um zwei Stunden gegenüber der Lufttemperatur zu erkennen ist (vgl. Abb. 49). Die Temperaturamplitude in einer Messtiefe von -0,05 m an Station HÖ beträgt 2,6 °C. Die Messwerte in einer Messtiefe von -0,05 m an Station KW zeigen deutlich geringere tageszeitliche Schwankungsbreiten. Hauptgrund dafür ist die Lage im Relief und die dadurch orographisch bedingte geringere direkte solare Einstrahlung. Zudem machen sich die Vegetationseinflüsse deutlich bemerkbar. Bei der Verdunstung von Wasser durch die (v.a. im Sommer üppige) Vegetation im Talbereich wird dieser Energie entzogen. Dieser Energieverlust macht sich in Form von Verdunstungskälte bemerkbar, so dass sich die Oberfläche und die bodennahe Luft nicht so stark erwärmen. Dies wiederum führt zu einem geringeren nach unten gerichteten Bodenwärmestrom oder gar zu einem umgekehrten Bodenwärmestrom, der wiederum zu einer Abkühlung des Erdbodens führt (vgl.

Kap. 3.2). Bei der Betrachtung der Temperaturdifferenzen zwischen Station HÖ und der Talstation KW fällt auf, dass die Unterschiede in einer Messtiefe von -0,05 m in der Nacht am geringsten sind. Diese Tatsache verwundert zunächst, da häufig auftretende Kaltluftabflüsse an Station KW größere Unterschiede der Temperaturen im oberflächennahen Bereich vermuten lassen. Hauptgrund dafür dürfte die nahezu ungehinderte langwellige Ausstrahlung an der Station HÖ sein, wohingegen diese im Kannegießerbachtal zum Teil durch hoch aufwachsende Vegetation (an Station KW und KB) und Wasserpartikel aufgrund tendenziell höherer Luftfeuchtigkeit durch Gegenstrahlung gemindert wird. Die Messwerte in den Messtiefen von -0,2 m und -0,5 m zeigen ähnliche Schwankungsbreiten wie die an Station HÖ. Insgesamt liegen die Temperaturwerte im Talbereich auf einem deutlich geringeren Niveau. Das Mittel aller Werte beträgt dort 9,6 °C, wohingegen es auf der HÖ 11,3°C beträgt. Betrachtet man alleine die Temperaturwerte in den drei Messtiefen im Tal, so zeigen diese insgesamt geringe Abweichungen voneinander, was ein Beleg für die vermutete gute Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes im Talbereich ist (vgl. Kap. 3.3). Bei der Betrachtung der Temperaturen an Station KW fällt des Weiteren auf, dass die Temperatur in der Zeit von etwa 04:00 Uhr bis 12:00 Uhr MEZ in einer Tiefe von -0,2 m niedriger sind als in einer Tiefe von -0,5 m. Dies ist Folge der nächtlichen Abkühlung der oberen Bodenschichten (vor allem aufgrund von Kaltluftbildung und -abfluss), die erst durch Einstrahlung nach Sonnenaufgang wieder kompensiert wird.

6.2 Allgemeine Merkmale der Kaltluftabflüsse

In Kap. 6.2 erfolgt die Betrachtung des Kaltluftdatensatzes, der nach den in Kap. 5.1.6 definierten Filterkriterien aus dem Gesamtdatensatz extrahiert wurde. Dabei sollen zunächst die allgemeinen Eigenschaften der Kaltluftabflüsse im Kannegießerbachtal betrachtet werden, ohne dass bereits zwingend ein Hauptaugenmerk auf Vegetationseffekte gelegt wird. Die Betrachtung der modifizierten Vegetationsstruktur erfolgt in ausführlicher Form in Kap. 6.4. Dennoch ist es nicht möglich als Erklärung von Eigenschaften und Veränderungen der gemessenen Klimaelemente gänzlich auf die Diskussion der Vegetationsstruktur im Untersuchungsgebiet zu verzichten. Eine Betrachtung der allgemeinen Kaltlufteigenschaften dient dem besseren Verständnis der Zusammenhänge in Kap. 6.4, die letztendlich maßgeblich durch vorhandene Vegetationsstrukturen beeinflusst werden.

6.2.1 Allgemeine Kaltlufteigenschaften

Eine Voraussetzung für den Eingang in den Kaltluftdatensatz, waren südwestliche Windrichtungen an Station KBR und das Vorherrschen eines synoptischen Windes, der nicht der Kaltluftabflussrichtung entsprach (vgl. Kap. 5.1.6). Auf eine Darstellung der Windrichtungsverteilung an Station KBR wurde daher verzichtet, da dort als Konsequenz des Filterprozesses bei 100 % der gemessenen Daten des Kaltluftdatensatzes die Windrichtung Südwest vorlag. Aus ähnlichen Gründen ist die Windrichtungsverteilung der Station HÖ nicht abgebildet, da dort in umgekehrter Weise aufgrund der Datenfilterung die Windrichtung Südwest im Kaltluftdatensatz nicht vorkommt. Die Windrichtungsverteilung der Stationen KBR und HÖ kann Abb. 47 (Kap. 6.1.1) entnommen werden, die die Werte des gesamten Messzeitraumes zeigt.

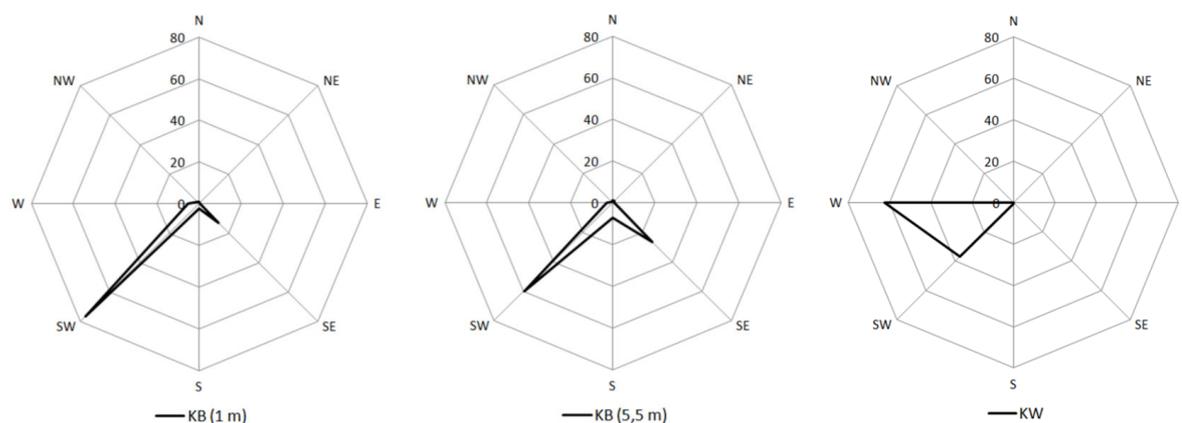


Abb. 53: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen KB und KW während Kaltluftabflusssituationen im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf der Basis von 10-min-Mittelwerten.

Die Windrichtungsverteilung der Station KB (vgl. Abb. 53) zeigt in beiden Messhöhen übereinstimmend Südwest als häufigste Windrichtung. Die Talachse und somit die Richtung der abfließenden Kaltluft verläuft in dem betreffenden Talabschnitt, in dem die Stationen KW und KB positioniert waren, von West-Südwest nach Nordost (vgl. Abb. 20). Die Verteilung der Windrichtungshäufigkeiten an Station KB spiegelt den Talverlauf deutlich wieder. In einer Messhöhe von 1 m strömt die Kaltluft in 76,5 % aller Zeiten die Station aus Südwest an, in einer Messhöhe von 5,5 m bei 59,9 % der gemessenen Werte. Station KW zeigt in einer Messhöhe von 3 m vermehrt westliche Richtungen (62,5 %), hat jedoch mit 36,9 % der Messwerte ebenfalls eine starke südwestliche Komponente (vgl. Abb. 46). Geringe Unterschiede in der Windrichtungsverteilung der drei Messvorrichtungen lassen sich anhand der Stationsumgebung erklären. So spielt u.a. die Vegetation in Abhängigkeit von der Messhöhe eine Rolle. Genauer erklären lässt sich dieser Sachverhalt bei einer weiteren Aufteilung des Kaltluftdatensatzes in einen Messzeitraum vor und nach der Vegetationsentnahme, oder bei Differenzierung des Kaltluftdatensatzes in belaubte und unbelaubte Zeiten. Diese Analyse findet sich in Kap. 6.4 und Kap. 7.

Abb. 54 zeigt die modellierte Richtung des Kaltluftabflusses im Kannegießerbachtal. Dabei zeigt sich die zwingende südwestliche Richtung des Kaltluftabflusses in der Talsohle des Kannegießerbachtals und des Johannisbachtals. Abweichende Windrichtungen der abfließenden Kaltluft in der Talsohle treten allenfalls lokal sehr begrenzt auf und werden dann durch Hindernisse in der Luftleitbahn verursacht. Eine orographische Ablenkung der Kaltluft ist in Abb. 54 nicht zu erkennen und auch bei Geländebegehungen nicht erkennbar. Da im Bereich der Wetterstationen Bebauung ebenso als ablenkender Faktor ausscheidet, bleibt einzig die Vegetationsstruktur zur Erklärung der Abweichung von der eigentlichen Abflussrichtung Südwest. Inwieweit das prozentuale Maximum westlicher Windrichtungen an Station KW anhand von Vegetationsbeständen erklärbar ist, muss eine detaillierte Auswertung der Vegetationsstruktur in Kap. 6.4 zeigen. In Abb. 54 sind kleinräumig sowohl im Bereich des Kannegießer- als auch Johannisbachtals Hangwinde zu erkennen, so z.B. westlich des Kerngebietes im Kannegießerbachtal.

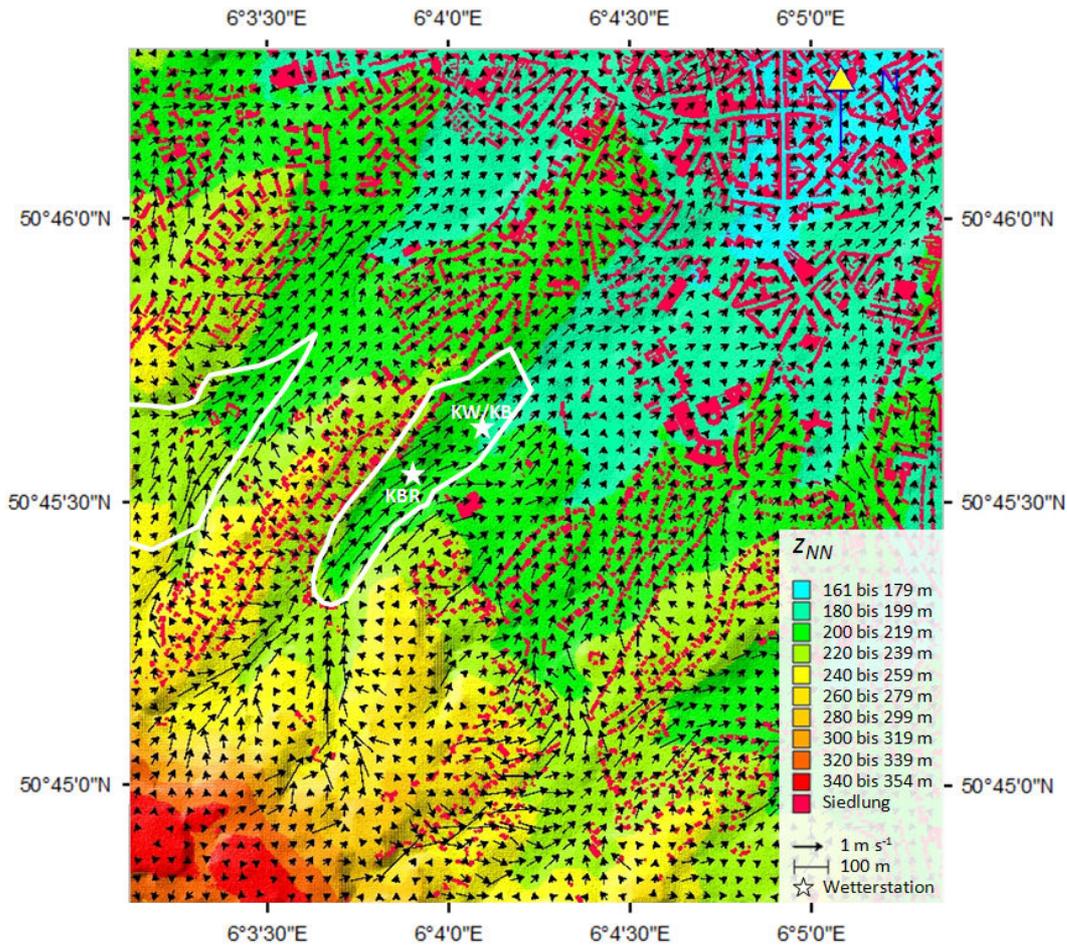


Abb. 54: Geländehöhe ü. NN und Strömungsfeld der Kaltluft in 2 m ü. Gr.; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10)¹⁷.

Die Veränderung der Lufttemperatur während Kaltluftabfluss im Laufe der Nacht an den Stationen KBR und KW ist in Abb. 55 dargestellt. Die Stationen zeigen übereinstimmend einen Temperaturrückgang der abfließenden Kaltluft von 22:30 Uhr MEZ bis zum Morgen. Die Temperatur der Kaltluft erreicht kurz vor Sonnenaufgang ihr Minimum, was insgesamt dem Kenntnisstand in der Literatur entspricht (vgl. Kap. 3.2). Die anhaltende Abkühlung der bodennahen Luftschicht ist der Grund für die Ausbildung einer Kaltluftinversion mit Mächtigkeiten von bis zu 40 m ü. Gr. im Kannegießerbachtal (vgl. Kap. 6.2.3). Jahreszeitlich bedingt variieren die Zeiten einsetzenden Kaltluftabflusses stark, da der Kaltluftbildungsprozess unabhängig von der Tageszeit bei negativer Strahlungsbilanz beginnt (vgl. Kap. 3.3).

¹⁷ Das Referenzgebiet der Vegetationskartierung im Kannegießer- und Johannisbachtal (mit den Stationen KBR, KW/KB und JH; vgl. Abb. 20 und Abb. 21) ist in allen KLAM_21 Modellergebnissen weiß umrandet. Je nach Modellgebiet ist das Kerngebiet des Johannisbachtals (wie in Abb. 54) nur teilweise sichtbar.

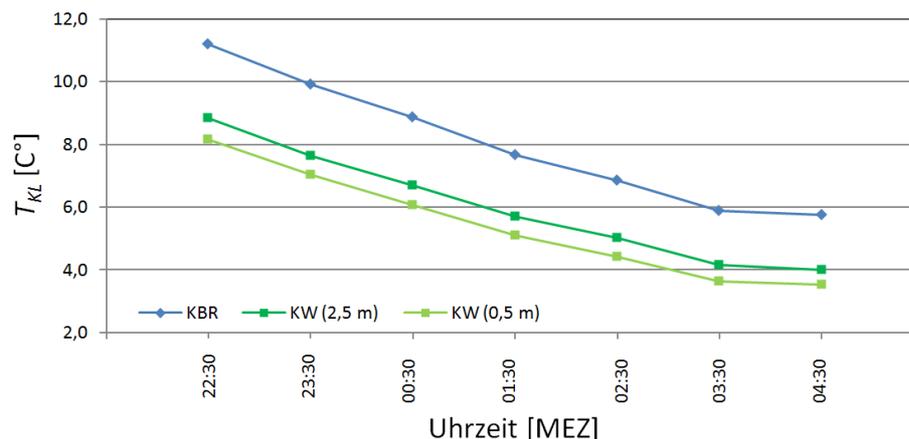


Abb. 55: Mittlere Lufttemperatur T_{KL} im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Bei höherer zeitlicher Auflösung wäre u.U. eine leichte Verschiebung der Temperaturreihe an Station KBR gegenüber der Station KW (2,5 m) zu früheren Uhrzeiten zu erkennen. Station KBR liegt etwa 300 m weiter talaufwärts. Bei einer durchschnittlichen mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft von $0,8 \text{ m s}^{-1}$ (vgl. Kap. 6.2.4) würde diese die Station KBR im Mittel 7 min früher erreichen als Station KW. Inwieweit eine Verschiebung gegenüber Station KW (0,5 m) zu erkennen wäre ist unklar, da nicht nur fließende Kaltluft Station KW erreicht, sondern sich auch im Bodenbereich Kaltluft bildet, die u.U. im Wiesenbestand stagniert und zu einer raschen Abkühlung an Station KW (0,5 m) führt. Auch wenn an Station KW in einer Messhöhe von 0,5 m keine Windgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden, so zeigt sich in Kap. 6.2.4, dass die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in Bodennähe rauigkeitsbedingt reduziert ist (vgl. Abb. 69). Vor allem die Wiesenvegetation des Kannegießerbachtals hat entscheidenden Einfluss auf das Fließverhalten der Luft in Bodennähe. Bei Betrachtung des Gesamtdatensatzes (vgl. Abb. 43) sei angemerkt, dass Station KB (1 m), die sowohl von der Lage als auch von der Messhöhe der Station KW (0,5 m) am nächsten kommt, die mit Abstand niedrigsten mittleren Windgeschwindigkeiten aufweist.¹⁸ Auch wenn im Vegetationsbestand aufgrund von spezifischen, sich kontinuierlich verändernden Dichte- und Masseunterschieden kein typisches Windprofil anzunehmen ist (vgl. Abb. 7), so kann man für Station KW (0,5 m) dennoch niedrigere mittlere Windgeschwindigkeiten annehmen als für Station KB (1 m). Sehr gut zu erkennen ist anhand Abb. 55 die idealtypische vertikale Struktur der Kaltluft, mit den niedrigsten Temperaturen in Bodennähe (vgl. Kap. 3.2). Station KW zeigt in einer Messhöhe von 0,5 m durchgehend das niedrigste Temperaturniveau gefolgt von Station KW (2,5 m) und Station KBR mit einer Messhöhe von 3 m. Die Tatsache, dass die Temperaturverläufe in Abb. 55 stark korrelieren (R^2 zwischen Station KBR und KW (2,5 m) = 0,974, R^2 zwischen Station KBR und KW (0,5 m) = 0,984, R^2 zwischen Station KW (2,5 m) und KW (0,5 m) = 0,997), zeigt deutlich, dass die Kaltluft den Vegetationsbestand trotz herabgesetzter Fließgeschwindigkeit vollständig durchdringt. Dies gilt sowohl für die hoch aufwachsende Baumvegetation (Station KW (2,5 m)), als auch für die Wiesenvegetation (KW (0,5 m)).

¹⁸ Es zeigen sich u.a. niedrigere mittlere Windgeschwindigkeiten an Station KB (5,5 m) als an Station KW (3 m).

Abb. 56 zeigt für den Kaltluftdatensatz ähnliche, jedoch wesentlich deutlichere Unterschiede der Lufttemperaturmittelwerte der Messstationen als Abb. 48, die die Situation des gesamten Messzeitraumes widerspiegelt. Station HÖ wurde an dieser Stelle aufgeführt, da so die Temperaturdifferenz zwischen der Kaltluft und der Umgebungsluft $\Delta T - T_{KL}$ deutlich wird. Diese Differenz beträgt an der Station KBR 1,4 K, an der Station KW (2,5 m) 3,3 K und an der Station KW (0,5 m) 4,0 K. Das mit niedrigerer Messhöhe die mittlere Lufttemperatur sinkt und die Differenz zur Station HÖ steigt, ist erneut ein Beleg für das typische, vertikale Temperaturprofil der Kaltluftinversion im Kannegießerbachtal (vgl. Kap. 3.2). Berücksichtigt man die Tatsache, dass die innerstädtischen Lufttemperaturen während austauscharmer Strahlungswetterlagen erheblich höher sein dürften, als die gemessenen Werte an Station HÖ, so sind erhebliche Temperaturdifferenzen zwischen der Kaltluft und der „Stadtluft“ anzunehmen, die zugleich zu einem großen Abkühlungspotenzial der Kaltluft bei der Durchmischung mit der innerstädtischen Luft führen.

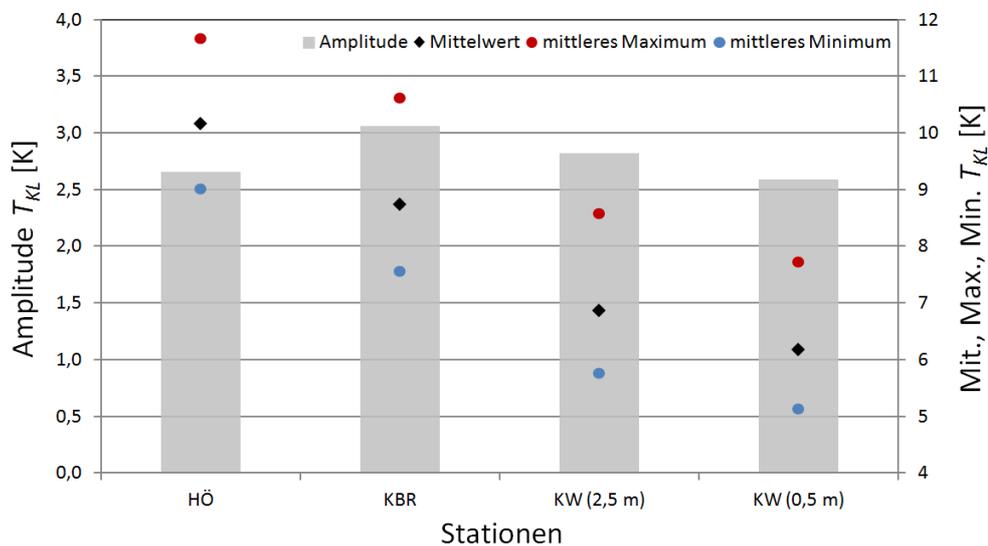


Abb. 56: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Temperatur der Kaltluft T_{KL} an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten während Kaltluftabfluss.

Betrachtet man die Amplitude der mittleren Lufttemperatur der Kaltluft an den Stationen KBR und KW, so zeigt diese nur geringe mittlere Schwankungsbreiten von 2,6 K bis 3,1 K, die in etwa den mittleren Schwankungsbreiten der Temperatur an Station HÖ entsprechen. Ein detaillierteres Bild der Schwankungsbreiten der Lufttemperatur gibt Abb. 57. Demnach beträgt der Mittelwert, der auf Basis der nächtlichen Mittelwerte gebildet wurde, an Station KBR 8,5 °C mit einer Standardabweichung von 6,5 °C, an der Station KW (2,5 m) 6,6 °C mit einer Standardabweichung von 5,9 °C und an der Station KW (0,5 m) 6,0 °C mit einer Standardabweichung von 6,1 °C. Die Station HÖ liegt mit einem Mittelwert von 10,3 °C ($\sigma = 6,4$ °C) deutlich über den kaltluftbeeinflussten Talstationen. Die gebildeten Mittelwerte mit einer hohen Standardabweichung verdeutlichen, dass das Auftreten von Kalt-

luftabflüssen in einem sehr breiten Spektrum an Temperaturniveaus auftritt. So betrug die höchste im Untersuchungszeitraum gemessene Kaltluft-Temperatur $26,1\text{ °C}$ ¹⁹ und die niedrigste Kaltluft-Temperatur $-13,4\text{ °C}$.²⁰

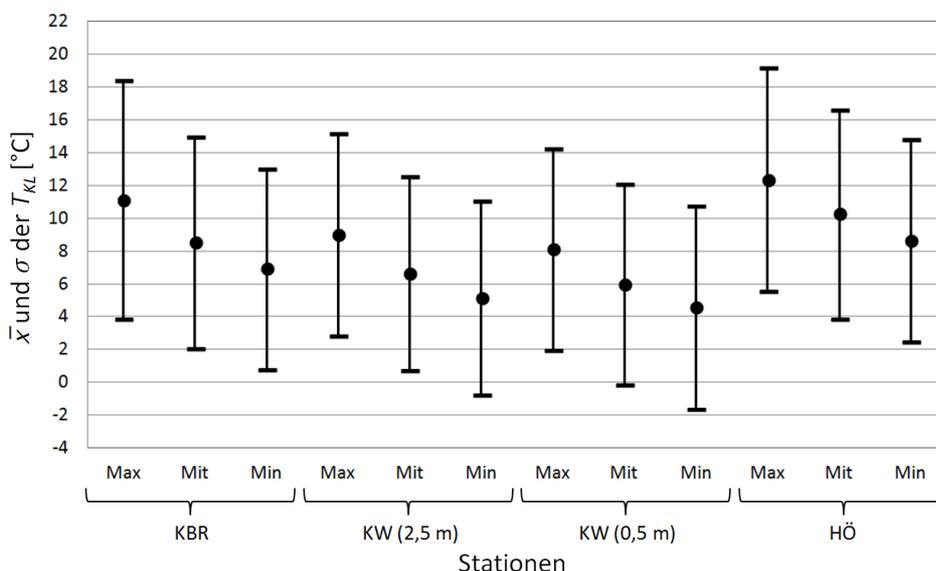


Abb. 57: Mittleres Maximum, Mittelwert und mittleres Minimum und die jeweilige Standardabweichung der Temperatur der Kaltluft an den Stationen KBR, KW und HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten.

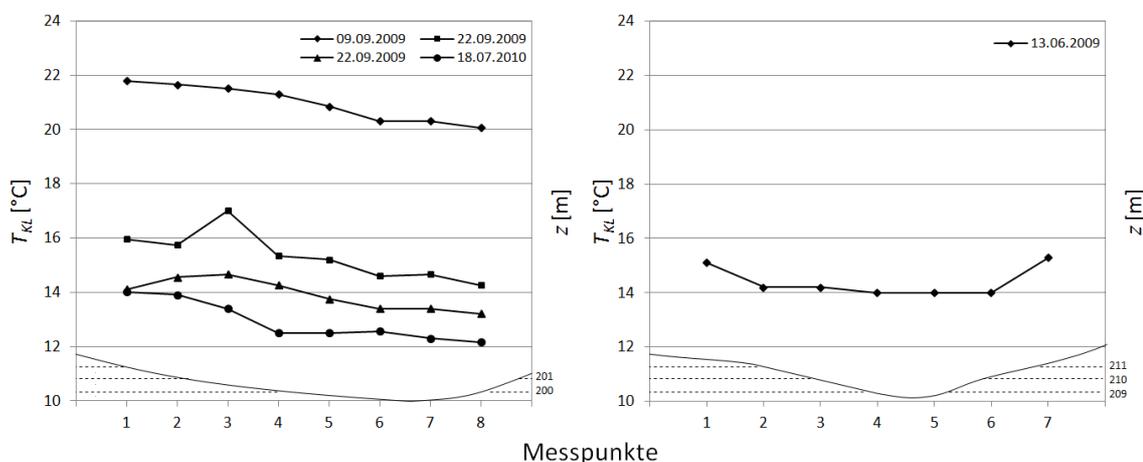


Abb. 58: Talquerprofile der Lufttemperatur T_{KL} im Kannegießerbachtal auf Höhe von Station KW (links) und KBR (rechts). Eine Übersicht über die Messpunkte gibt Abb. 33. Die Messpunkte sind in etwa äquidistant.

Bei der Betrachtung der Verteilung der Lufttemperatur entlang linearer Querprofile im Kannegießerbachtal wurden unabhängig von Vegetationsstrukturen die geringsten Lufttemperaturen in der Talsohle gemessen (vgl. Abb. 58). Dies entspricht der Annahme, dass aufgrund physikalischer Gegeben-

¹⁹ Diese Lufttemperatur wurde am 02.07.2009 (22:30 Uhr MEZ) und 11.07.2010 (22:30 Uhr MEZ) an Station KBR gemessen.

²⁰ Dieser Lufttemperaturwert wurde am 17.02.2010 (01:30 Uhr und 02:30 Uhr MEZ) an Station KW (0,5 m) aufgezeichnet.

heiten, die kälteste Luft an der tiefsten Geländestelle anzutreffen ist, was in der Praxis u.a. zur Ausbildung von Kaltluftseen führt (vgl. Kap. 3.3). Bei Talquerprofilmessungen im Bereich von Station KBR (Abb. 58, rechts), an dem keine Vegetation den Kaltluftabfluss beeinträchtigt war dies ebenso der Fall, wie im Falle der Querprofilmessungen im Bereich von Station KW (M3), wo sich im Bereich der Querprofil-Messpunkte 4 bis 6 (vgl. Abb. 33) dichte Vegetationsbestände talaufwärts befinden (Abb. 58, links). Dort zeigen sich zum Teil deutliche Temperaturdifferenzen von bis zu 1,8 K auf einer Strecke von weniger als 100 m.

An Station KW wurde neben der Lufttemperatur auch die Bodentemperatur in drei unterschiedlichen Messtiefen erfasst. Diese sind in Abb. 59 im Verlauf der Nacht aufgetragen. Daneben ist der Bodentemperaturverlauf der Station HÖ dargestellt, um Temperaturveränderungen, die der Kaltluft zuzuschreiben sind, erkennen zu können.

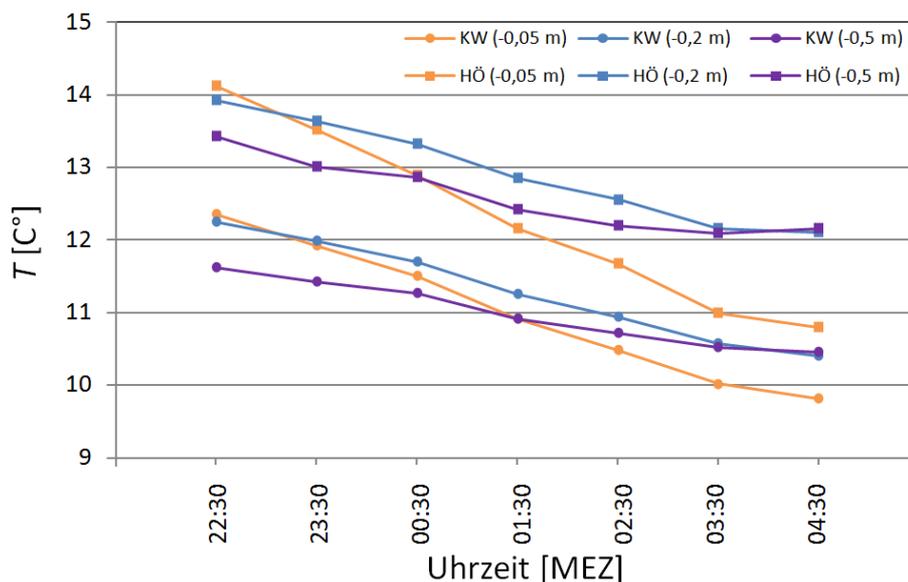


Abb. 59: Mittlere Bodentemperatur T im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen KW und HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Wie auch schon beim Verlauf der Lufttemperaturen, so setzt auch bei der Bodentemperatur nach dem Sonnenuntergang ein Abkühlungstrend ein. Wie erwartet liegt das Niveau der Bodentemperatur an Station KW insgesamt, im Mittel 1,5 K, unter dem von Station HÖ. Der Grund hierfür dürfte in erster Linie die orographisch und vegetationsbedingt geringere solare Einstrahlung im Kannegießerbachtal am Tag sein, womit die Wärmespeicherung des Bodens im Bereich von Station KW im Vergleich zur Station HÖ herabgesetzt ist. Mit zunehmender Tiefe der Messung im Erdboden nimmt die nächtliche Amplitude der Temperatur ab, da die Beeinflussung durch Geschehnisse an der Erdoberfläche geringer wird. Die absoluten Werte in einer Messtiefe von -0,2 m und -0,5 m weisen im Laufe der Nacht ähnliche Verläufe auf, wohingegen die Bodentemperatur in einer Messtiefe von -0,05 m Auffälligkeiten aufweist. Ist die absolute Temperaturdifferenz zwischen Station HÖ und Station KW in einer Messtiefe von -0,2 m und -0,5 m im Verlauf der Nacht in etwa konstant, so ist die Abkühlung während der Nacht in einer Messtiefe von -0,05 m auf der Station HÖ stärker als im Kannegießerbachtal, die Bodentemperaturen erreichen gegen Morgen in einer Messtiefe von -0,05 m die gerings-

te Temperaturdifferenz im Vergleich der Stationen. Deutlich wird dies in Abb. 60, in der die Temperaturdifferenzen im Boden im Vergleich der Stationen KW und HÖ dargestellt sind.

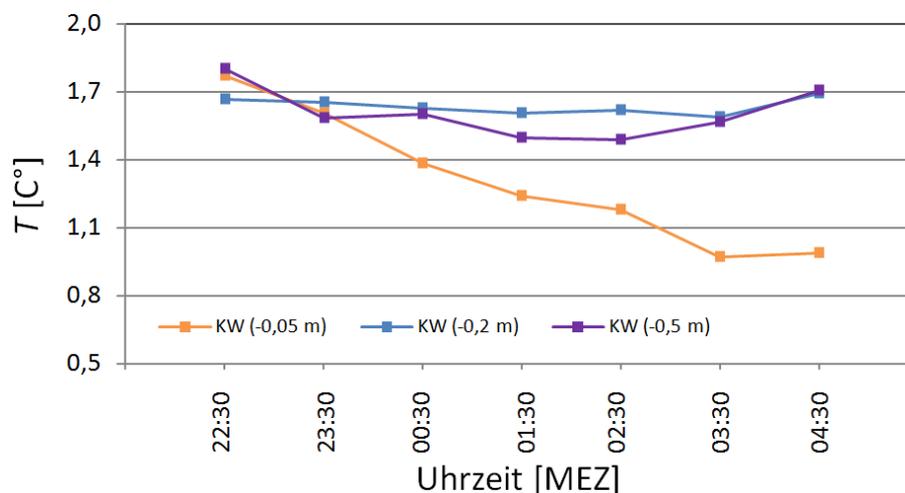


Abb. 60: Differenz der mittleren Bodentemperatur T im Nachtgang während Kaltluftabfluss zwischen der Station KW und der Station HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Nach Beginn der nächtlichen Abkühlungsphase wird die Temperaturdifferenz zwischen der Station HÖ und Station KW in einer Messtiefe von $-0,05$ m rasch kleiner. Der wesentliche Grund hierfür dürfte die ungehinderte langwellige Ausstrahlung Q_L der Erdoberfläche an Station HÖ sein, die zu einer starken Abkühlung dieser und der unmittelbar angrenzenden Bodenschichten führt. Der Bodenwärmestrom Q_B versucht, neben dem turbulenten vertikalen Luftaustausch, den Energieverlust auszugleichen, was offensichtlich an Station HÖ gut gelingt. Die Abkühlung der Erdoberfläche an Station KW fällt wesentlich geringer aus, da dort die langwellige Ausstrahlung durch hoch aufwachsende Baumvegetation beeinflusst wird, die durch Gegenstrahlung von Blatt und Astoberflächen kompensiert wird. Dies ist der Grund, warum Waldflächen im Allgemeinen schlechtere Kaltluftbildner sind, als offene Wiesenflächen (vgl. Kap. 3.4). Im teilweise dichten Vegetationsbestand des Kannegießerbachtals ist davon auszugehen, dass die Kaltluftproduktion an der Erdoberfläche stellenweise recht gering ist, ein Fakt der durch die Produktion von Kaltluft an der Bestandsoberfläche, die dann in den Bestand einsinkt, teilweise kompensiert wird (vgl. Kap. 3.3). Ist die Abkühlung der Erdoberfläche durch eine weniger negative langwellige Strahlungsbilanz herabgesetzt, so hat dies auch einen geringeren Bodenwärmestrom zur Folge, so dass die Abkühlung des Bodens geringer ausfällt. Dabei sind die Voraussetzungen für einen ausgeprägten Bodenwärmestrom im Talbereich als günstig einzuschätzen. Die Leitfähigkeit des Untergrundes im Talbereich ist hoch und der Boden ist im Bereich von Station KW in der überwiegenden Zeit des Jahres stark vernässt.

Da im Bereich der Station KW davon auszugehen ist, dass die allochthone, abfließende Kaltluft zu einer Abkühlung der Erdoberfläche beiträgt, ist anzumerken, dass ohne diesen Effekt eine Annäherung der Temperaturverläufe zwischen Station HÖ und KW in einer Messtiefe von $-0,05$ m aller Voraussicht nach früher im Nachtverlauf stattfinden würde. Obwohl an keiner anderen Messstation im Talbereich die Bodentemperatur erfasst wurde, ist davon auszugehen, dass die Bodentemperatur,

wie die anderen gemessenen Parameter auch, standortspezifische Bedingungen zeigt. So würde ein anderer, weniger verschatteter Standort im Tal wesentlich andere Charakteristika aufweisen. Insgesamt spielen die Oberflächenbeschaffenheit und der Bewuchs für die Kaltluftproduktion eine entscheidende Rolle. Die Produktion ist deshalb stark räumlich differenziert. Unter Berücksichtigung der bisherigen Kenntnisse ist davon auszugehen, dass die Umgebung von Station KW (u.a. die Bodenbeschaffenheit und Vegetationsstruktur) unter Gesichtspunkten der Kaltluftproduktionsbedingungen im Talbereich vergleichsweise weniger geeignet ist.

Die Relative Feuchte im Vergleich der Stationen KBR und KW ist in Abb. 61 dargestellt. Betrachtet man die Werte im Nachtverlauf, so zeigt sich an Station KW in einer Messhöhe von 0,5 m in der ersten Nachthälfte die höchste mittlere Luftfeuchtigkeit mit Werten zwischen 90 % und 95 %. Im Laufe der Nacht nähern sich die Werte der Talstationen immer weiter an, wobei an Station KW in beiden Messhöhen nahezu eine vollständige relative Sättigung der Luft erreicht wird. Bei zahlreichen Geländebegehungen wurde dies durch Kondensationsvorgänge im bodennahen Pflanzenbestand deutlich, wobei die stattfindenden Kondensationsprozesse Wärme freisetzen, die dem Kaltluftbildungsprozess abträglich sind (vgl. Kap. 3.2). Der Grund für steigende Werte der Relativen Feuchte im Nachtverlauf sind die sinkenden Lufttemperaturen (vgl. Abb. 55) im Bereich der Talstationen. Die Werte der Relativen Feuchte an Station KBR weisen ein deutlich tieferes Niveau auf, als die an Station KW. Die Steigerungsrate ist dementsprechend im Nachtverlauf am höchsten.

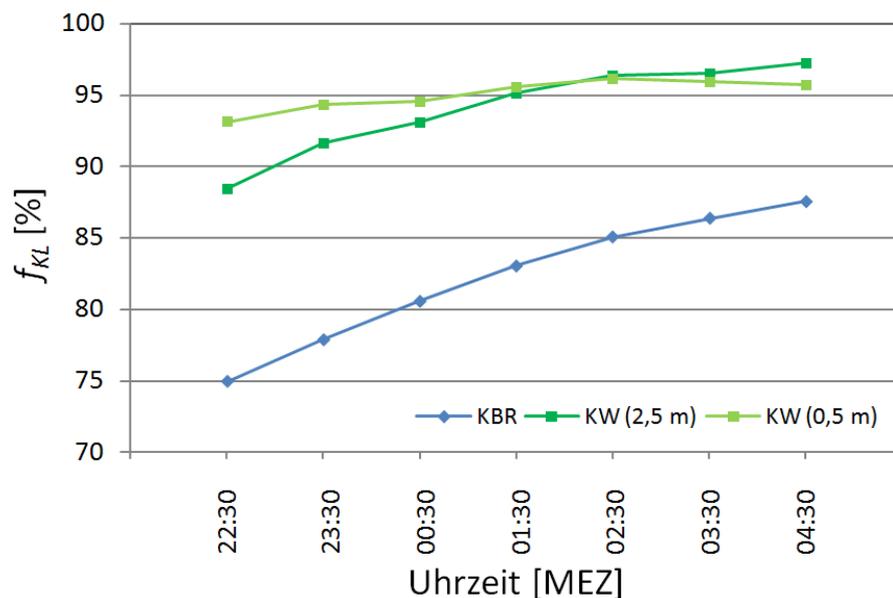


Abb. 61: Mittlere Relative Feuchte f_{KL} im Nachtgang während Kaltluftabfluss an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Abb. 62 zeigt die Mittelwerte der Relativen Feuchte der Kaltluft, deren mittleres Maximum und Minimum sowie die Amplitude. Die Amplitude im Vegetationsbestand an Station KW mit einer Messhöhe von 0,5 m zeigt bei Betrachtung der nächtlichen Mittelwerte nur sehr geringe Schwankungsbreiten bei hoher Luftfeuchtigkeit (93,6 %). Dies veranschaulicht indirekt erneut das Auftreten deutlich geringerer Lufttemperaturen an Station KW (0,5 m) aufgrund der inversiven Kaltluftschichtung. Station KW (2,5 m) zeigt ähnlich hohe mittlere Werte (90,8 %) wie Station KW (0,5 m). Deutlich höhere

Amplituden der Relativen Feuchte werden an Station KBR erreicht, die insgesamt nur geringe Abweichungen von Station HÖ zeigt. Dies zeigt zum einen erneut die Ruralität der urbanen Referenzstation HÖ, zum anderen im Umkehrschluss jedoch auch eine gewisse Urbanität der ruralen Station KBR.

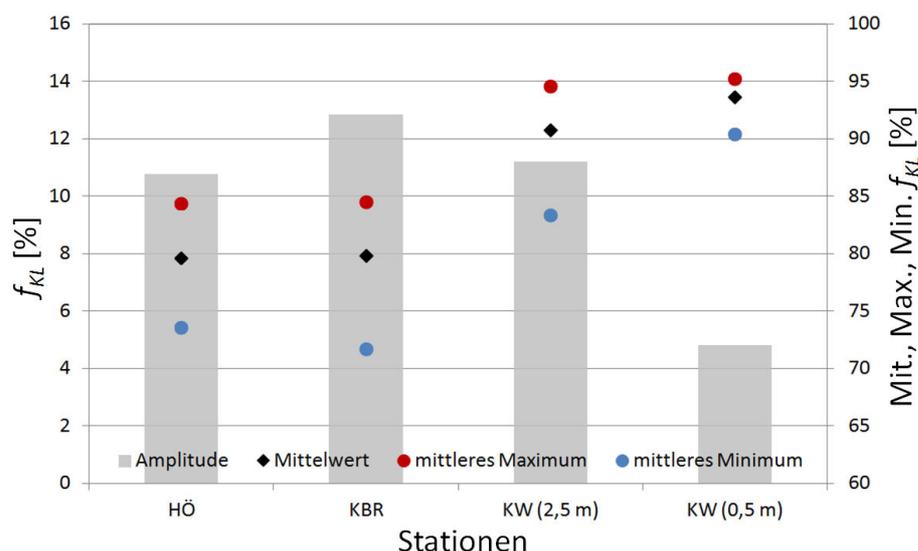


Abb. 62: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f_{KL} an den Stationen HÖ, KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten während Kaltluftabfluss.

6.2.2 Auftretshäufigkeit von Kaltluftabflüssen

Hinsichtlich der Auftretshäufigkeit von Kaltluftabflüssen im Untersuchungsgebiet und im Zeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 wurde der Gesamtdatensatz anhand der in Kap. 5.1.6 aufgeführten Kriterien gefiltert. Von 698 Nächten im gesamten Untersuchungszeitraum mit möglichem Kaltluftabfluss konnte in 185 Nächten auf Basis von Stundenmittelwerten der Abfluss von Kaltluft nachgewiesen werden. Dies entspricht dem Auftreten von Kaltluftabfluss in ca. einem Viertel (26,5 %) aller Nächte. In einer ähnlichen Untersuchung von KETZLER wurde ein Auftreten von Kaltluft in ca. 40 % aller Nächte ermittelt (KETZLER 2002), allerdings lagen dort andere Kriterien zu Grunde, als sie in der vorliegenden Untersuchung aufgrund der Weiterverarbeitung der Daten angezeigt waren. Die angewandte Filterung des Datensatzes führte dazu, dass auch Zeitpunkte, an denen mit großer Wahrscheinlichkeit Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal stattfand, entnommen wurden, wenn ein Beweis nicht zur Gänze erbracht werden konnte. Die Filterkriterien und die damit verbundenen Probleme sind in Kap. 5.1.6 beschrieben. Es ist folglich grundsätzlich anzunehmen, dass die tatsächliche Auftretshäufigkeit von Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal höher ist als an dieser Stelle ermittelt.

Aus Abb. 63 ist die Anzahl der Nächte mit Kaltluftabfluss im Jahresverlauf ersichtlich. Da sich der Untersuchungszeitraum auf zwei Jahre erstreckte, wurde der Mittelwert aus den beiden Messjahren gebildet. Bei der Auswertung bleibt anzumerken, dass bei der Mittelung über zwei Jahre keine abschließende Aussage über die jahreszeitliche Verteilung des Auftretens von Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet getroffen werden kann, da das jeweilige Witterungsgeschehen der beiden Jahre ent-

scheidenden Einfluss auf die Bildung von Kaltluft hat (vgl. BARR & ORGILL 1989). Zudem haben bei einer derartigen Verteilung die Sommermonate (Juni, Juli, August) aufgrund des kürzeren Zeitraumes mit potenziell negativer Strahlungsbilanz einen Nachteil gegenüber den Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) mit längerer nächtlicher Dunkelheit. Dennoch kann anhand von Abb. 63 eine Aussage über das Auftreten von Abflusssituationen im Untersuchungszeitraum selbst getroffen werden. In diesem findet sich im Frühjahr (März, April, Mai) – mit einer mittleren Auftretshäufigkeit von 40 Nächten – die höchste Anzahl an Nächten mit Kaltluftabfluss. Sowohl in Nächten mit bis zu dreistündigem Kaltluftabfluss, als auch in Nächten mit mehr als dreistündigem Kaltluftabfluss zeigt das Frühjahr die höchsten Auftretsraten. Die meisten Nächte mit Kaltluftabfluss und zudem die meisten Nächte mit lang anhaltendem Kaltluftabfluss (> 3 h) zeigt der April. Abgesehen vom Oktober, in dem ebenfalls in beiden Jahren des Untersuchungszeitraumes lang anhaltende austauscharme Wetterlagen auftraten, folgen dem Frühjahr die Sommermonate mit einer Auftretshäufigkeit von 28 Nächten. In den Wintermonaten fand im Mittel nur in 12 Nächten Kaltluftabfluss an der Station KBR im Kannegießerbachtal statt.

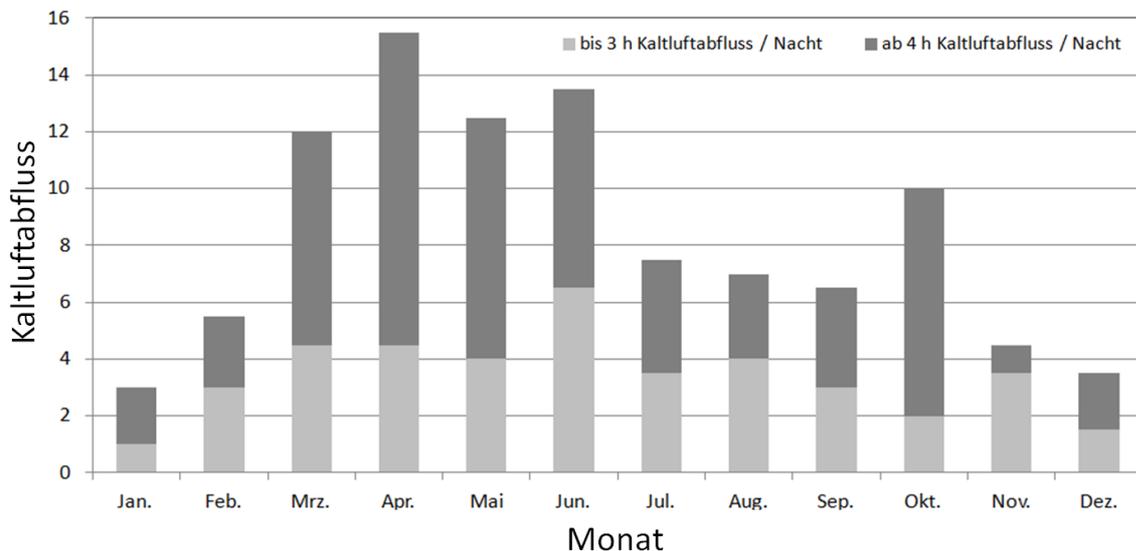


Abb. 63: Mittlerer Jahresverlauf der Nächte mit Kaltluftabfluss im Untersuchungsgebiet vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011, basierend auf 60 min-Mittelwerten der Station KBR. Hellgrau dargestellt sind Nächte in denen bis zu 3 h pro Nacht der Abfluss von Kaltluft nachgewiesen werden konnte, dunkelgrau dargestellt sind Nächte mit vier und mehr Stunden Kaltluftabfluss (vgl. Kap. 5.1.6).

Vor dem Hintergrund der Reduktion hoher innerstädtischer Temperaturen durch die Einmischung von Kaltluft aus dem suburbanen Raum, stellt die größere Abflusshäufigkeit im Sommerhalbjahr gegenüber dem Winterhalbjahr eine wünschenswerte Verteilung dar. Unter lufthygienischen Gesichtspunkten ist jedoch auch der Zufluss kalter und unbelasteter Luft in den Stadtraum im Winterhalbjahr bedeutsam, da die zufließende unbelastete Luft zu einem Konzentrationsrückgang der Luftschadstoffe in der städtischen Luft führt. Im Hinblick auf die Problemlagen, die aus dem Zusammenwirken einer erhöhten Luftschadstoffkonzentration und der stabil geschichteten Kaltluft resultieren, sei auf Kap. 6.2.8 verwiesen. Die Anzahl der Nächte mit Kaltluftabfluss, wie in Abb. 63 dargestellt, hat keine Aussagekraft bezüglich abfließender Kaltluftmengen und darf daher nicht überbewertet werden. Es muss nicht zwingend ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Kaltluftabfluss und dem Kalt-

luft-Volumenstrom bestehen (vgl. Kap. 6.2.4 und Kap. 6.2.6). So kann eine größere Mächtigkeit oder eine höhere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft eine geringere Aufttrittshäufigkeit kompensieren.

6.2.3 Bestimmung der Kaltluftobergrenze

Die Kaltluftobergrenze wurde empirisch mit Hilfe von Fesselballonsondierungen in insgesamt elf Nächten des Untersuchungszeitraumes bestimmt. Eine Übersicht über die Messstandorte und Daten findet sich in Tab. 11. Eine exemplarische Darstellung der jeweils gemessenen Parameter gibt Abb. 64. Der Messstandort der Sondierungen (M2) lag in einem Wiesenabschnitt zwischen den Stationen KBR und KW (vgl. Abb. 42). In Abb. 64-1 ist die Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Höhe dargestellt. Zu erkennen ist die typische Temperaturabnahme mit der Höhe innerhalb der Kaltluftinversion. In einer Höhe von ca. 40 m ist die Inversionsobergrenze zu erkennen, ab der die Lufttemperatur mit der Höhe wieder abnimmt. Abb. 64-2 zeigt die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe ü. Gr.. Zu erkennen ist eine Geschwindigkeitszunahme bis zu einer Höhe von ca. 20 m und eine folgende Geschwindigkeitsabnahme. Dieses Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft ist typisch (vgl. Abb. 7). Das Fließgeschwindigkeitsmaximum wird in einer Höhe von etwa 18 m erreicht. Auch wenn die kälteste Luft im Bodenbereich physikalisch betrachtet aufgrund ihrer Dichte die höchsten Geschwindigkeiten verursachen könnte, überwiegt an dieser Stelle die Rauigkeit der Erdoberfläche, im Bereich des Kannegießerbachtals in Form von hoch aufwachsender Wiesenvegetation (vgl. Abb. 30).

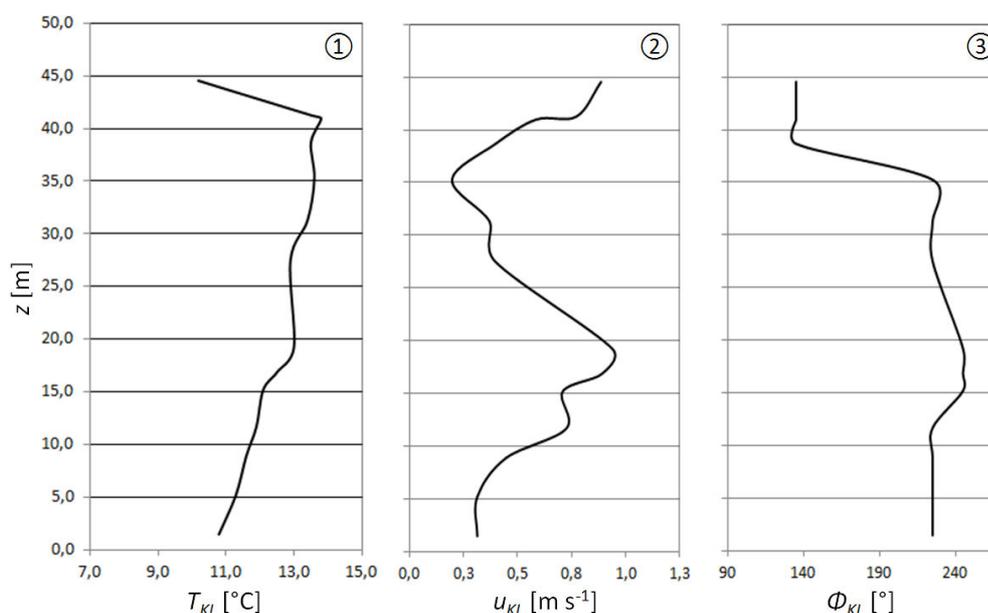


Abb. 64: Fesselballonsondierung am 10.07.2010 in der Zeit von 05:24 bis 05:41 Uhr MEZ im Kannegießerbachtal (M2, vgl. Abb. 42) zur Bestimmung der Kaltluftobergrenze mittels Messung von Temperatur T_{KL} (links), Windgeschwindigkeit u_{KL} (Mitte) und Windrichtung ϕ_{KL} (rechts).

In der Nähe der Inversionsobergrenze finden sich meist turbulente Durchmischungsvorgänge, vor allem dann, wenn, wie in dem vorliegenden Fall, der synoptische Wind über dem Tal und die abfließende Kaltluft unterschiedliche Strömungsrichtungen aufweisen (siehe Abb. 64-3). Die Turbulenz ist gut an den Bewegungen des Fesselballons zu erkennen. In Abb. 64 zeigt sie sich in steigenden Windgeschwindigkeiten. Abb. 64-3 dient zur abschließenden Bestimmung der Kaltluftobergrenze. Die ab-

fließende Kaltluft, die dem Talverlauf folgt, ist an Winden aus südwestlichen Richtungen zu erkennen ($202,5^\circ$ bis $247,5^\circ$), wohingegen der Wind ab einer Höhe von ca. 40 m aus südöstlichen Richtungen weht (um 140°). Unter Berücksichtigung aller drei Teilabbildungen aus Abb. 64 ist die Kaltluftobergrenze recht deutlich bei etwa 35 m bis 40 m ü. Gr. zu definieren.

Abb. 64 zeigt ein idealtypisches Ergebnis, dass eine eindeutige Definition der Kaltluftobergrenze ermöglicht. Leider ist in der Empirie eine solch eindeutige Zuordnung nicht immer vorzunehmen. Wie bereits angedeutet, trifft das Kriterium einer wechselnden Windrichtung in der Höhe nicht immer zu, gerade bei ähnlichen Windrichtungen des synoptischen Windes und der abfließenden Kaltluft ist der Turbulenzbereich im Windgeschwindigkeitsprofil unter Umständen nur schwach ausgebildet. Durch die mögliche kurzzeitige Einmischung des synoptischen Windes in die Kaltluft ist auch das Temperaturprofil nicht immer derart eindeutig wie in Abb. 64-1. In solchen Situationen ist die Beobachtung im Gelände unabdingbar. Das wichtigste Kriterium bei der Auswahl der Messtage im Untersuchungszeitraum für die Durchführung von Ballonsondierungen waren daher voneinander abweichende Richtungen des Kaltluftabflusses und des synoptischen Windes.

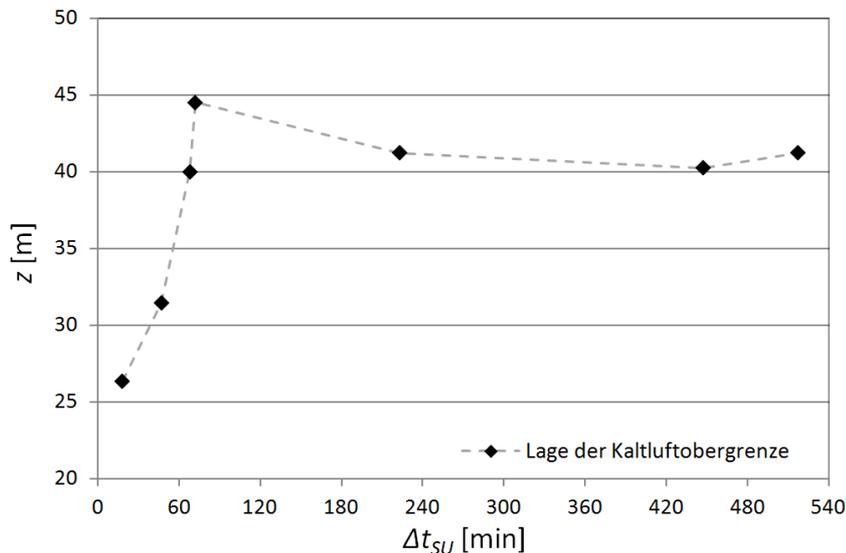


Abb. 65: Lage der Kaltluftobergrenze in Anhängigkeit der verstrichenen Zeit seit dem Sonnenuntergang Δt_{SU} während unterschiedlicher Fesselballonaufstiege an M2 (vgl. Abb. 42, 13.06.2009: 21:07 Uhr und 21:36 Uhr MEZ; 25.09.2009: 19:30 Uhr MEZ; 09.07.2010: 22:00 Uhr, 00:31 Uhr, 04:15 Uhr und 05:25 Uhr MEZ).

In Abb. 65 wurden empirisch ermittelte Kaltluftobergrenzen in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit seit dem Sonnenuntergang Δt_{SU} dargestellt. Dabei zeigt sich ein rascher Anstieg der Kaltluftmächtigkeit im Kannegießerbachtal nach Sonnenuntergang. Bereits ca. eine Stunde nach Sonnenuntergang ist das Maximum der Kaltluftmächtigkeit erreicht, dass die gesamte Nacht über recht konstant bei einer Höhe von ca. 40 m liegt. Das rasche Ansteigen der Kaltluftmächtigkeit wurde empirisch mehrfach nachgewiesen und stimmt mit theoretischen Überlegungen überein (vgl. Kap 3.2). Durch die hohe Ausstrahlung kurz nach Sonnenuntergang ausgelöst, findet eine starke Abkühlung der an die Bestandsoberfläche grenzenden Luftschicht statt. Leicht zeitversetzt hat dies das Einsetzen von Energieflüssen in Richtung Erdoberfläche zur Folge, die den Wärmeverlust kompensieren. Die Folge die-

ses Prozesses sind hohe Abkühlungsraten zu Beginn der Nacht, die sich im Laufe der Nacht dann verringern. Da die Ballonsondierungen in Nächten stattfanden, die ideale Bedingungen für die Produktion und den Abfluss von Kaltluft aufwiesen, dürften die gemessenen Kaltluftmächtigkeiten in Abb. 65 zugleich Maxima der Kaltluftmächtigkeiten im Kannegießerbach darstellen. Eine Mächtigkeit von etwa 40 m ist im Kannegießerbachtal daher nicht als Normalfall anzusehen. Die mittlere Mächtigkeit im Jahresverlauf liegt einige Meter darunter. So wurden in weiteren und früheren Messungen (z.B. KETZLER 2002) vielfach Mächtigkeiten von etwa 30 m erfasst.²¹

Die Modellierung mit KLAM_21 bestätigt die Annahme leicht niedrigerer mittlerer Kaltluftmächtigkeiten. Für den Standort M2 (vgl. Abb. 42), zeigt der Modelllauf Kaltluftmächtigkeiten von bis zu 29 m. Da im Rahmen der empirischen Messungen die Mächtigkeit der Kaltluft nur punktuell erfasst werden konnte, bietet Abb. 66 zudem einen guten Überblick über die Kaltluftobergrenze in den verschiedenen Talbereichen.

Die Täler im Kartenausschnitt sind anhand der höchsten Kaltluftmächtigkeiten deutlich zu erkennen. Dabei fällt im Kannegießerbachtal auf, dass die Kaltluft weiter talaufwärts, auf Höhe der Stationen KW und KBR, im Vergleich zu den Nachbartälern bei gleicher Geländehöhe größere Kaltluftmächtigkeiten aufweist. Die größten Mächtigkeiten werden im Übergangsbereich zwischen unbebauter Talsohle und der städtischen Bebauung erreicht. Dort findet ein Rückstau der Kaltluft statt, bis diese Höhen erreicht, bei denen die Bebauung überströmt werden kann (vgl. Abb. 12 [Ca], [Cc] und [Cd]). Die Straßenschluchten und wenigen Freiflächen sind demnach nicht ausreichend, um für einen Kaltluftabfluss ohne erkennbaren Rückstau zu sorgen. Die später in Kap. 6.2.5 dargestellte Ballonsondierung zeigt die Überströmung der Gebäude in der Talsohle mit großen Mächtigkeiten, die im Modell eher unterschätzt werden. Diese Unterschätzung der Kaltluftmächtigkeit im Modell wiederum, führt in der Summe zur Annahme annähernd realistischer Abflussmengen an Kaltluft, die das Modell in den betreffenden Bereichen abbildet. Grund dafür ist das Verhalten der Kaltluft, die mit Annäherung ans Stadtzentrum bei der angesprochenen Ballonsondierung zunehmend intermittierende Tendenzen aufweist und nicht kontinuierlich große Kaltluftmächtigkeiten erreicht (vgl. Kap. 6.2.5). Zudem muss bei der Kaltluftmächtigkeit im Stadtzentrum das Volumen der Bebauung berücksichtigt werden, dass zu größeren Kaltluftmächtigkeiten führt, da es die Kaltluft verdrängt. Eine ebensolche Verdrängung findet sich auch im Bereich von Vegetation. Allerdings ist sie dort weniger eindeutig manifestierbar, da Vegetation im Gegensatz zur Bebauung ein poröses Medium darstellt, in das die Kaltluft einsickern kann und das von dieser durchströmt werden kann. Die Verdrängungshöhe der Kaltluft kann in KLAM_21 als Ergebnis ausgegeben werden. Dabei zeigt sich eine prozentual zunehmende Verdrängung der Kaltluft durch Bebauung in größere Höhen mit zunehmender Annäherung an das Stadtzentrum. Die vegetationsbedingt größte Verdrängung verursacht der Aachener Wald, in dem flächig Baumhöhen von 14 m vorzufinden sind.

²¹ Ein weiteres Ergebnis einer Ballonsondierung findet sich in Abb. 74 zur Erklärung des Fließverhaltens der Kaltluft an M7 (vgl. Abb. 42).

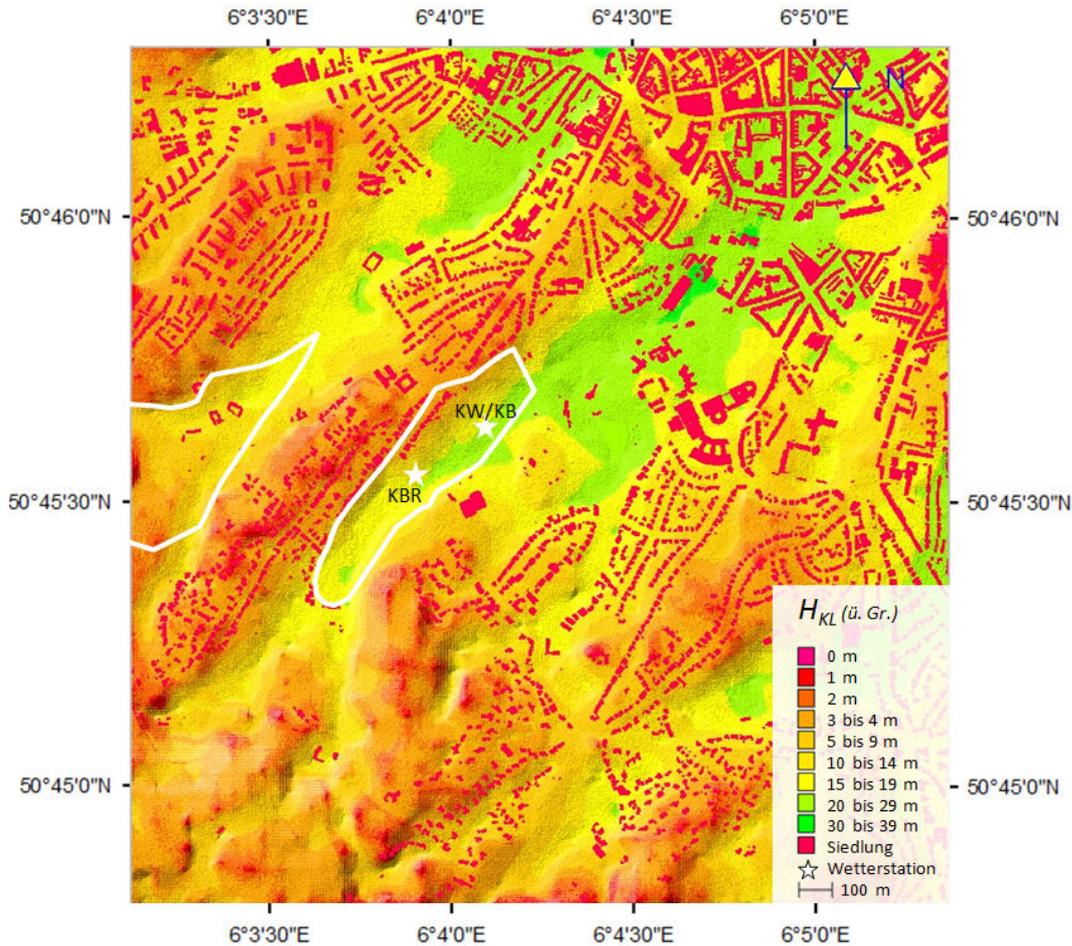


Abb. 66: Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

Die hohen Kaltluftmächtigkeiten im Übergangsbereich zwischen städtischer Bebauung und unbebauter Talachse werden des Weiteren dadurch verursacht, dass etwa in der Mitte des Kartenausschnittes in Abb. 66, nordöstlich von Station KW, das Kannegießerbachtal mit dem östlich angrenzenden Bachtal, dem Ponellbachtal, zusammentrifft. Dadurch findet weiterer Zufluss von Kaltluft statt, der allerdings vom Volumen her geringer ist, als die im Kannegießerbachtal abfließenden Kaltluftmengen.

Der Rückstau, der hohe Kaltluftmächtigkeiten im Übergangsbereich zwischen unbebauter Talachse und der städtischen Bebauung verursacht, ist in Abb. 67 zu erkennen. Dort ist die relative Kaltluftmächtigkeit abgebildet, die per Definition in KLAM_21 als der prozentuale Unterschied der modellierten Kaltluftmächtigkeit und einer fiktiven Kaltluftmächtigkeit definiert ist, die sich ohne Zu- und Abfluss auf einer Fläche mit maximaler Kälteproduktion gebildet hätte (SIEVERS 2005). In den roten Talbereichen ist die Mächtigkeit der Kaltluft gering und beträgt nur bis zu 20 % der fiktiven Kaltluftmächtigkeit. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen liegen diese Flächen vielfach in bebautem und damit teilversiegeltem Gebiet, was die Kaltluftproduktion verringert. Zum anderen bilden diese Flächen die Talschultern, von denen gebildete Kaltluft rasch abfließt. Selbiges gilt für die gelb dargestellten Flächen, wobei dort eindeutig der Abfluss kalter Luft und nicht Bebauung die im Verhältnis zur fiktiven Kaltluftmächtigkeit vergleichsweise geringen tatsächlichen Mächtigkeiten verursacht. Auf diesen Flächen ist die Geländeneigung am höchsten. Der bezüglich der Vegetation kar-

tierte Kernbereich des Kannegießerbachtals – in Abb. 67 mit einer weißen Linie eingefasst – liegt überwiegend in einem Gebiet, in dem 50 bis 100 % der Kaltluftmächtigkeit gemessen wird, die dort unter Idealbedingungen ohne Zu- und Abfluss vorzufinden wäre. Da die Wiesenbereiche des Kannegießerbachtals in den Eingangsdaten des Abb. 67 zu Grunde liegenden Modelllaufes als Wiese mit vergleichsweise geringer Rauigkeit definiert wurden, weisen diese Bereiche im Modell gute Bedingungen für Kaltluftabfluss auf. Die Tatsache, dass dort „nur“ 50 bis 100 % Relative Kaltluftmächtigkeit erreicht werden, lässt den Schluss zu, dass es sich eindeutig um ein Kaltluftabflussgebiet handelt. Demgegenüber befinden sich im blau eingefärbten Teil der Karte größere Kaltluftmächtigkeiten, als dort selbst unter idealen Bedingungen ohne Zu- und Abfluss gebildet werden könnte, was auf einen Kaltluftstau schließen lässt. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Kaltluftmächtigkeit im dichter bebauten, nordöstlichen Talbereich die Kaltluft durch ihr Volumen verdrängt und somit ebenfalls größere Mächtigkeiten verursacht.

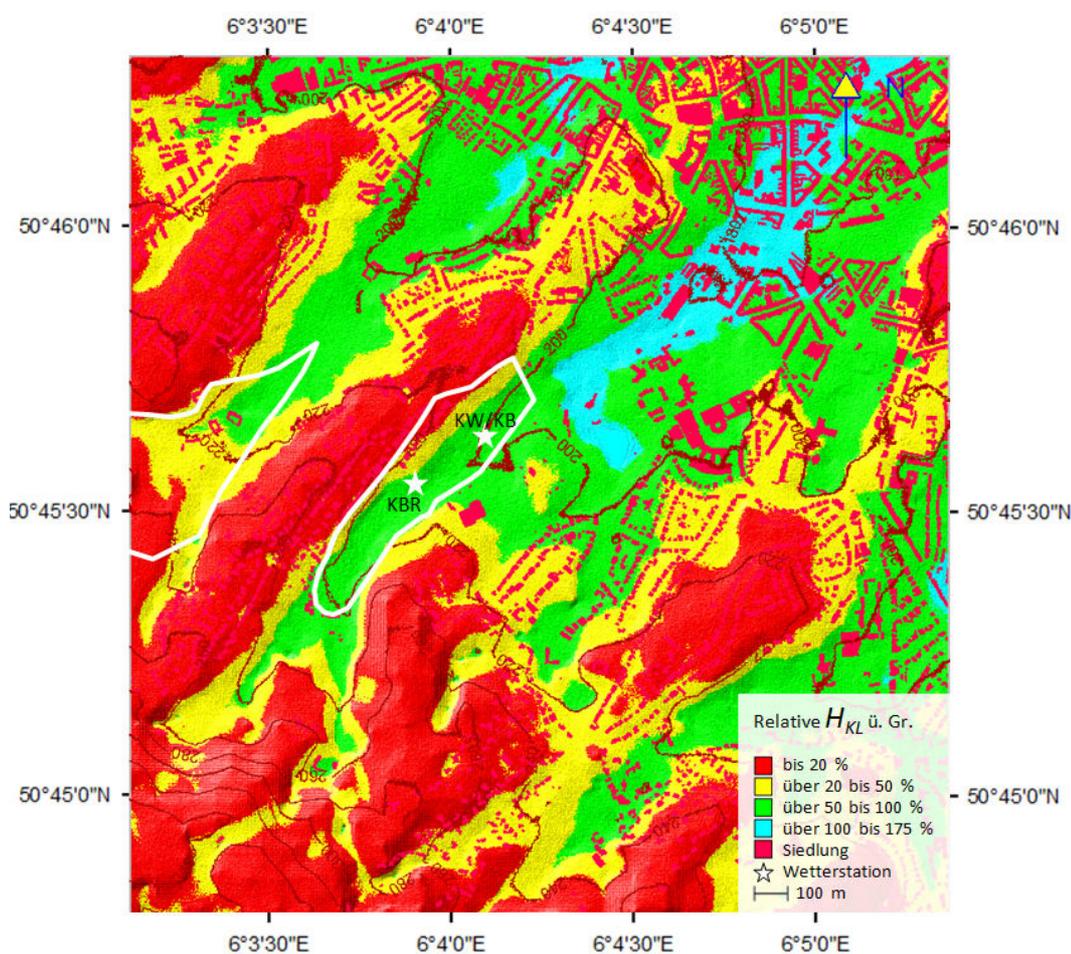


Abb. 67: Relative Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

6.2.4 Fließgeschwindigkeit der Kaltluft

Die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft ist neben der Mächtigkeit und der Auftrittshäufigkeit ein entscheidendes Kriterium bei der Betrachtung von Kaltluftabflüssen hinsichtlich ihrer Bedeutung für das städtische Klima. Wie Gl. 9 zeigt, haben verschiedene Parameter Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit

der Kaltluft. Dazu zählen neben der Hangneigung die Rauigkeit der überströmten Oberfläche, die Mächtigkeit der Kaltluft sowie die Differenz der Temperatur der Kaltluft und der Umgebungsluft. Je höher die Hangneigung, je geringer die Rauigkeit und je größer der Temperaturunterschied zwischen Kaltluft und Umgebungsluft ist, desto größer ist die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft.

Abb. 68 zeigt die jahreszeitliche Verteilung der mittleren Fließgeschwindigkeit an der Station KBR. Bei der Betrachtung der Mittelwerte zeigen die Frühlings- und Sommermonate die höchsten Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft. Entsprechend den oben genannten Kriterien und unter der Annahme gleich bleibender Hangneigung und Rauigkeit entspricht dies der Annahme höchster Temperaturdifferenzen zwischen der Kaltluft und der Umgebungsluft und größter Kaltluftmächtigkeit in den Sommermonaten (vgl. Kap. 6.4.7). Die Temperaturamplitude zwischen den nächtlich gemessenen geringsten und höchsten mittleren Abflussgeschwindigkeiten ist in den genannten Monaten am geringsten, was für relativ gleichmäßige Kaltluftabflussgeschwindigkeiten in den verschiedenen Nächten spricht. Zudem wird durch die Messungen die Annahme bestätigt, dass neben abendlichen und morgendlichen Schwankungen, die Kaltluftmächtigkeit während der Nacht auf einem relativ konstanten Niveau bleibt (vgl. Kap. 6.2.3). Die Monate Januar und November sind in Abb. 68 nicht dargestellt, da nur für ein Jahr Mittelwerte vorlagen.

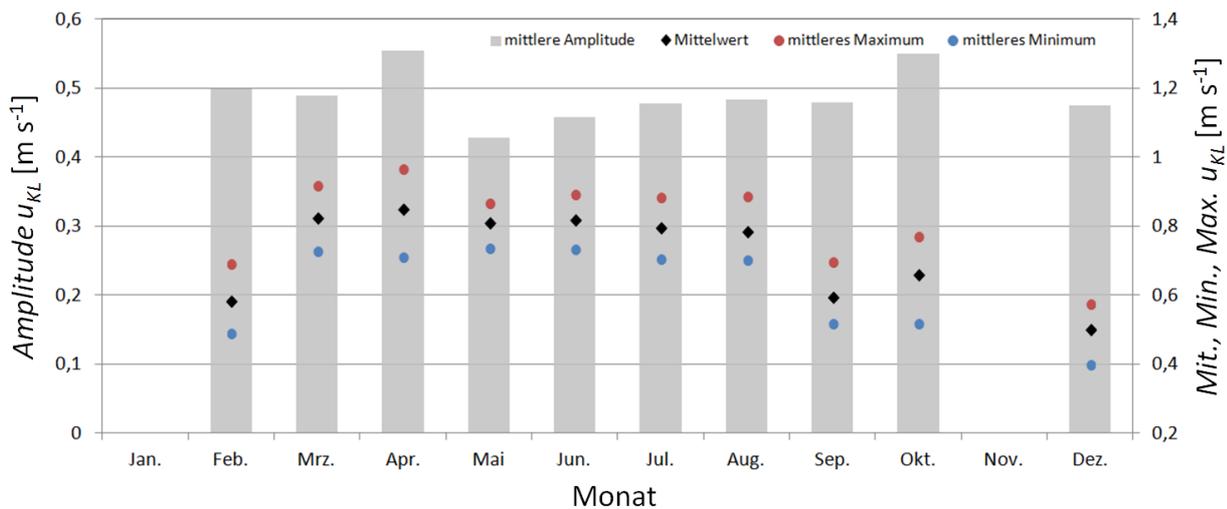


Abb. 68: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Kaltluft-Fließgeschwindigkeit u_{KL} an der Station KBR im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten. Da der Untersuchungszeitraum zwei Jahre betrug, wurde der Mittelwert aus beiden Jahren gebildet.

Insgesamt bewegt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Sommerhalbjahr bei etwa $0,8 m s^{-1}$ was unter Berücksichtigung der vergleichsweise kleinen Kaltluftproduktionsfläche im Kanngießerbachtal im Vergleich mit anderen Untersuchungen (z.B. HARTENSTEIN 2000) durchaus bemerkenswert ist. Die mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Winterhalbjahr bewegt sich zwischen ca. $0,65 m s^{-1}$ (Oktober) und der insgesamt geringsten mittleren Fließgeschwindigkeit von $0,5 m s^{-1}$ im Dezember. Eine erste Bestätigung der Vermutung (vgl. Kap. 6.1.1), dass geringere Auftrittshäufigkeiten von Kaltluftabflusssituationen (vgl. Abb. 63) durch höhere Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft kompensiert werden können, findet sich folglich an dieser Stelle.

Abb. 69 zeigt die prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft an den Stationen KBR, KW und KB. Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeitsklassen an Station HÖ dient der Darstellung der Situation außerhalb des Kaltluftabflussbereiches, dabei wurden zu Gunsten der Übersichtlichkeit Windgeschwindigkeitsklassen $> 1,5 \text{ m s}^{-1}$ nicht abgebildet. Zudem wurde bei der Datenauswertung deutlich, dass die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft an Station KB (1 m) in einen kaum messbaren Bereich fällt. So registrierte das Anemometer in 99,75 % aller Fälle Windgeschwindigkeiten $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$. Daher wurde auf die Darstellung der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft an Station KB (1 m) fortan verzichtet.

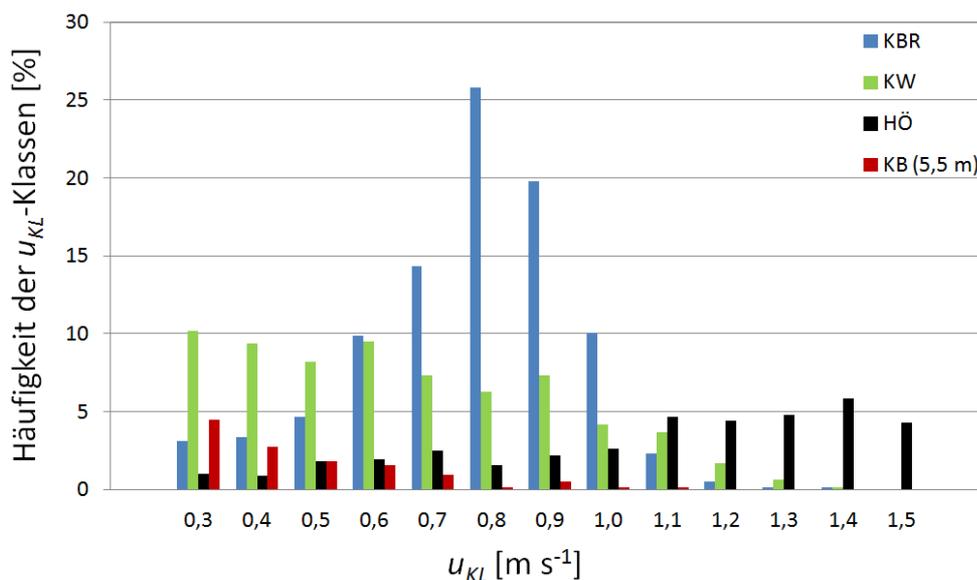


Abb. 69: Prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Fließgeschwindigkeitsklassen u_{KL} der Kaltluft an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Windgeschwindigkeitsklassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4).

Station KBR dient im Untersuchungsgebiet als Kaltluft-Referenzstation, da sie im Gegensatz zu allen anderen Stationen die abfließende Kaltluft an einer Stelle in Talbereich abbildet, an der der Einfluss von Vegetation und Bebauung äußerst gering ist. Die Betrachtung der Werte von Station KBR in Abb. 69 gibt daher am ehesten Aufschluss über die am häufigsten auftretenden Fließgeschwindigkeitsklassen der Kaltluft im Kannegießerbachtal, insofern die Kaltluft nicht von Vegetation gebremst oder durch Einengung der Luftleitbahn beschleunigt wird. Bei 25 % aller Stundenmittelwerte während Kaltluftabfluss, fließt diese an Station KBR mit einer Geschwindigkeit von $0,8 \text{ m s}^{-1}$. Die Klassen mit niedriger Fließgeschwindigkeit treten in der Summe in 35 % der Werte auf, höhere Fließgeschwindigkeiten werden bei 33 % der Kaltluftabflussstunden verzeichnet. Station KW zeigt abnehmende Häufigkeiten in den höheren Fließgeschwindigkeitsklassen. Insgesamt ist die Verteilung der Häufigkeiten an Station KW wesentlich gleichmäßiger als an Station KBR. Die Klasse mit den höchsten Häufigkeiten (10,2 %) ist die von $0,3 \text{ m s}^{-1}$, was den deutlichen Einfluss der Vegetation an Station KW zeigt. Ein noch stärkerer Vegetationseinfluss ist in Abb. 69 an Station KB (5,5 m) zu erkennen. Alle Klassen ab $0,7 \text{ m s}^{-1}$ zeigen Häufigkeiten von unter 1 %. Die Dominanz schwachwindiger Situationen an den vegetationsbeeinflussten Stationen des Untersuchungsgebietes, die auch schon bei der Analyse des

Gesamtdatensatzes in Kap. 6.1.1 (vgl. Abb. 45) festgestellt wurde, zeigt sich auch bei der Darstellung des Kaltluftdatensatzes in Abb. 69. Die häufigste, vorkommende Windgeschwindigkeitsklasse an Station KBR stimmt im Gesamtdatensatz und Kaltluftdatensatz nahezu überein, ein weiterer Beleg für das häufige Auftreten von Kaltluftabflusssituationen im Kannegießerbachtal.

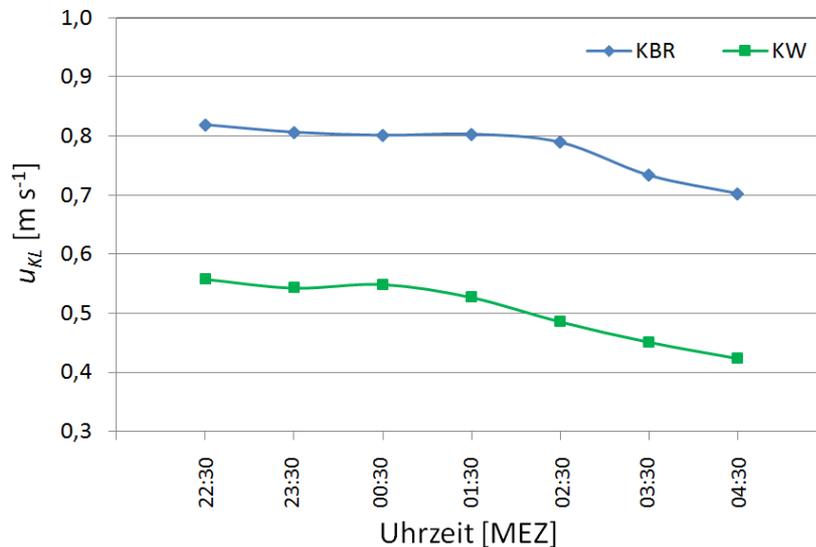


Abb. 70: Mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} im Nachtgang an den Stationen KBR und KW im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Abb. 70 zeigt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Verlauf der Nacht. Da die Fließgeschwindigkeit an Station KB (5,5 m) zu allen Uhrzeiten der Auswertung im Mittel $0,1 \text{ m s}^{-1}$ betrug und die Mittelwerte an Station KB (1 m) noch unter denen von Station KB (5,5 m) lagen, wurde auf eine Darstellung verzichtet. An den Messstationen KBR und KW sinken die Fließgeschwindigkeiten im Nachtverlauf. Die Fließgeschwindigkeit wird durch verschiedene Variablen beeinflusst (vgl. Gl. 9). Die Reibungskonstante und Neigung der Fläche und weitestgehend auch die Umgebungstemperatur der Kaltluft sowie die Schwerebeschleunigung, können im Untersuchungsgebiet als konstant betrachtet werden. Absinkende Fließgeschwindigkeiten im Verlauf der Nacht können demnach nur veränderlichen Variablen zugeschrieben werden, da die Fließgeschwindigkeit andernfalls konstant bleiben würde. Die veränderlichen Variablen sind die mittlere Höhe der Kaltluft und die Temperatur der Kaltluft. Die Kaltluftmächtigkeit im Kannegießerbachtal bleibt im Laufe der Nacht nahezu konstant mit leicht sinkenden Tendenzen (vgl. Abb. 65), was bei einer Konstanz aller weiteren Variablen überwiegend konstante, unter Umständen leicht sinkende Fließgeschwindigkeiten bedingen würde. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Kaltluftproduktionsraten zu Beginn der Nacht hoch sind und dann in Folge leicht sinken. Die starke Abkühlung der bodennahen Luft zu Beginn der Nacht führt zu hohen Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft. Das Windgeschwindigkeitsniveau an Station KW ist aufgrund der begrünten Stationsumgebung deutlich niedriger als das von Station KBR, wie auch schon aus früheren Abbildungen ersichtlich.

Auch an dieser Stelle werden die empirischen Messungen den Modellergebnissen aus KLAM_21 gegenübergestellt (vgl. Abb. 71). Dabei zeigen sich im Bereich der Station KBR in 2 m Höhe leicht höhere Fließgeschwindigkeiten ($0,5 \text{ m s}^{-1}$ bis 1 m s^{-1}) als an Station KW/KB ($0,2 \text{ m s}^{-1}$ bis $0,5 \text{ m s}^{-1}$). Zu be-

rücksichtigen ist an dieser Stelle, dass die Modellkonfiguration in Abb. 71 MZ1 entspricht, eine Entnahme von Vegetation aus der Talauwe hat demnach noch nicht stattgefunden. Die Ergebnisse des Modelllaufs stimmen mit den prozentualen Häufigkeiten der Fließgeschwindigkeit in Abb. 69 weitestgehend überein. Die prozentual am häufigsten auftretende Fließgeschwindigkeitsklasse an Station KBR ist $0,8 \text{ m s}^{-1}$, an Station KW treten Klassen unter $0,8 \text{ m s}^{-1}$ häufiger auf. Das hinsichtlich der Vegetation kartierte Kerngebiet des Untersuchungsgebietes „Kannegießerbachtal“ ist zugleich der Talbereich höchster Windgeschwindigkeiten. Zwar werden talaufwärts ähnlich hohe Windgeschwindigkeiten erreicht, diese treten jedoch nicht so flächig auf und sind stärker auf die Talsohle begrenzt. Im Bereich von Station KW ist die östliche Ablenkung der Kaltluft aufgrund des dichten Vegetationsbestandes zu erkennen, was in Kap. 6.4. noch genauer betrachtet wird. Dort wo die innerstädtische Bebauung beginnt, zeigen sich deutlich reduzierte Windgeschwindigkeiten von bis zu $0,2 \text{ m s}^{-1}$, die allenfalls stadteinwärts dort, wo größere nicht bebaute Flächen zu finden sind, kurzzeitig ansteigen. Eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit durch Einengung des Strömungsfeldes ist im Bereich der innerstädtischen Bebauung, auch in breiteren Straßenschluchten, nicht zu erkennen.

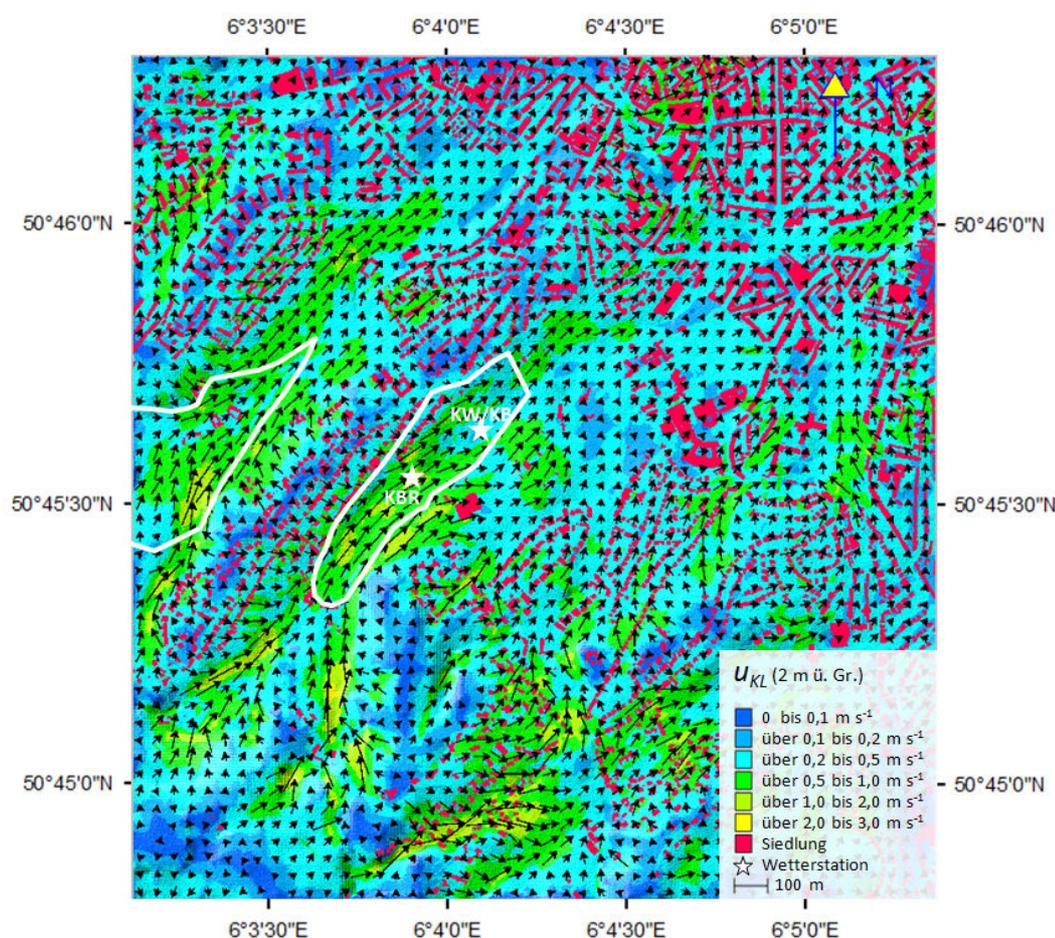


Abb. 71: Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Höhe nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

Wohingegen die Betrachtung der modellierten Windgeschwindigkeiten in 2 m Höhe in Abb. 71 vor allem der Vergleichbarkeit mit den empirisch gewonnenen Daten an Station KBR und KW in 3 m Messhöhe dient, zeigt die über die gesamte Höhe gemittelte Fließgeschwindigkeit der Kaltluft räum-

lich abweichende Ergebnisse (vgl. Abb. 72). Bei der Mittelung der Fließgeschwindigkeit sind in den unbebauten Talbereichen eine Konzentration hoher Windgeschwindigkeiten zu erkennen, die teilweise deutlich über den in 2 m Höhe gemessenen Werten liegen. Die in Abb. 74 abgebildete Ballonsondierung bestätigt die Annahme, dass das Maximum der Fließgeschwindigkeit bei Kaltluftmächtigkeiten von bis zu 40 m in einer größeren Höhe als 2 m vorzufinden ist. Die angesprochene Ballonsondierung zeigt in 15 m bis 20 m ü. Gr. das Maximum der Fließgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu liegt in den steileren Hanglagen und randlichen Talbereichen die höhengemittelte Fließgeschwindigkeit der Kaltluft unter den in 2 m Höhe gemessenen Werten. Dies ist vor allem dort der Fall, wo die Kaltluftmächtigkeit 3 m bis 4 m nicht übersteigt (vgl. Abb. 66). Insofern lässt sich ein in der Theorie angenommenes Kaltluftabflussprofil in Abhängigkeit der jeweiligen Kaltluftmächtigkeit wiedererkennen. Die maximale Abflussgeschwindigkeit findet sich bei den Messungen und im Modell in etwa bei einem Drittel der Höhe der Kaltluftmächtigkeit. Ein leicht höher gelegenes Fließgeschwindigkeitsmaximum ist im Bereich des Kannegießerbachtals der größeren Oberflächenrauigkeit zuzuschreiben.

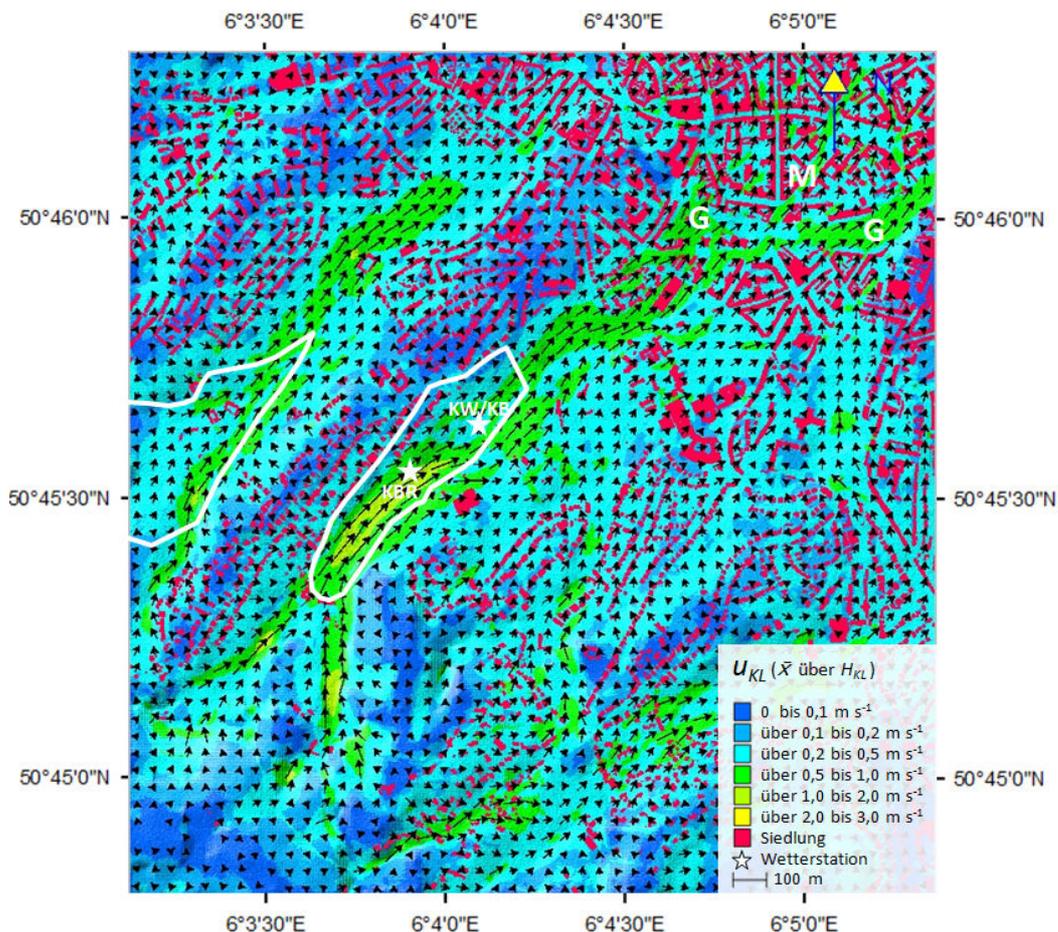


Abb. 72: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelter Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} nach 90 Minuten Modellierung. Zusätzlich sind die Mozartstraße (M) und innerstädtische Gleisanlagen (G) kenntlich gemacht; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

Bei der Betrachtung des innerstädtischen, bebauten Bereiches im Modellgebiet zeigt sich bei der Mittelung der Fließgeschwindigkeit über die Kaltluftmächtigkeit die Überströmung der Gebäude.²² Dabei ist die gemittelte Windgeschwindigkeit insgesamt deutlich höher als die in 2 m Höhe. Zudem ist eine angedeutete Kanalisierung von Kaltluft im Bereich der Gleisanlagen (G) und in breiteren Straßenschluchten, wie beispielsweise der Mozartstraße (M) zu erkennen. Die in Abb. 74 dargestellte Ballonsondierung fand in der Mozartstraße an Messpunkt M7 statt (vgl. Abb. 42).

6.2.5 Fließverhalten der Kaltluft

Das Fließverhalten der Kaltluft wird maßgeblich durch die überströmte Oberfläche beeinflusst. Je höher die Rauigkeit dieser ist, desto stärker lässt sich der Einfluss anhand der Messungen nachweisen. Da der Einfluss von Vegetation als Rauigkeitsparameter Untersuchungsgegenstand in Kap. 6.4 ist, soll an dieser Stelle das Fließverhalten der Kaltluft hinsichtlich allgemeiner theoretischer Überlegungen aus Kap. 3.2 und Kap. 3.3 überprüft werden. Abb. 73 zeigt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in zwei Strahlungsnächten an Station KBR und KW. Darin lässt sich eine ständig schwankende Windgeschwindigkeit in allen vier Datensätzen erkennen. Der Sonnenuntergang am 13.06.2009 fand um 20:50 MEZ statt, der Sonnenaufgang am 14.06.2009 um 04:22 MEZ. Der Sonnenuntergang am 09.07.2010 fand um 20:48 MEZ statt, der Sonnenaufgang am 10.07.2010 um 04:34 MEZ. Während des gesamten abgebildeten Zeitraumes fand, unter Berücksichtigung einer früheren Verschattung am Abend und einer längeren Verschattung am Morgen im Bereich der Messstationen aufgrund der Tal-lage, Kaltluftabfluss statt, was durch zeitgleiche Ballonsondierungen und Talquerprofilmessungen Messungen belegt wurde (vgl. Tab. 11).

Die schwankenden Windgeschwindigkeiten zeigen das intermittierende Fließverhalten von Kaltluft, dass in Kap. 3.4 beschrieben wird. Dabei hat die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in Abb. 73 in der Messung aus dem Jahre 2009 (oben) an Station KBR eine Amplitude von $0,9 \text{ m s}^{-1}$ und einen Mittelwert von $0,8 \text{ m s}^{-1}$. Große Spannweiten zeigen sich vor allem am Morgen. Die Windgeschwindigkeit an Station KW im Jahre 2009 schwankt um einen Mittelwert von nur $0,3 \text{ m s}^{-1}$, ein Hinweis auf den dichten Vegetationsbestand, in dem Station KW zu dieser Zeit positioniert war. Da dieser in der Messung im Jahr 2010 (Abb. 73, unten) bereits entnommen war, ist die Amplitude ($1,3 \text{ m s}^{-1}$) und der Mittelwert der Fließgeschwindigkeit ($0,7 \text{ m s}^{-1}$) an Station KW deutlich höher. In Abb. 73 ist zu erkennen, wie es auch in späteren Auswertungen der Fall sein wird (vgl. z.B. Kap. 6.4.2), dass die Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft an Station KW, die an Station KBR aufgezeichneten Werte im Jahr 2010 übersteigen. Station KBR zeigt in den Jahren 2009 und 2010 ähnliche Schwankungen in der Fließgeschwindigkeit. Insgesamt bleibt festzuhalten dass die Schwankungsbreite im Fließverhalten der allgemeinen Annahme des Fließverhaltens von Kaltluft entspricht. Für das Kannegießerbachtal kann zudem ein, wenn auch schwankender, aber kontinuierlicher Kaltluftabfluss über den ganzen Nachtverlauf hinweg angenommen werden.

²² Die Farbgebung der Gebäude überblendet zur besseren Orientierung die Färbung der Fließgeschwindigkeit. Für die Gebäudeflächen ist daher die umgebende Fließgeschwindigkeit als Wert anzunehmen.

Während der im Jahr 2009 in Abb. 73 (oben) dargestellten Datenaufzeichnung ergaben Fesselballonsondierungen eine Kaltluftobergrenze in etwa 30 m Höhe, während der Datenerhebung im Jahr 2010 lag die Kaltluftobergrenze bei etwa 40 m. Obwohl höhere Kaltluftmächtigkeiten zu einer höheren Fließgeschwindigkeit führen, ist diese in Abb. 73 nicht erkennbar. Dies lässt den Schluss zu, dass – analog zur Auswertung in Kap. 6.2.4 – auch andere Kriterien im Kannegießerbachtal als ausschließlich die Kaltluftmächtigkeit Einfluss auf den Kaltluftabfluss haben. Da die Vegetationsbedeckung des Kannegießerbachtals im oberen Talverlauf sehr inhomogen ist, fällt dieser sicherlich eine große Rolle bei der Modifikation des Fließverhaltens zu.

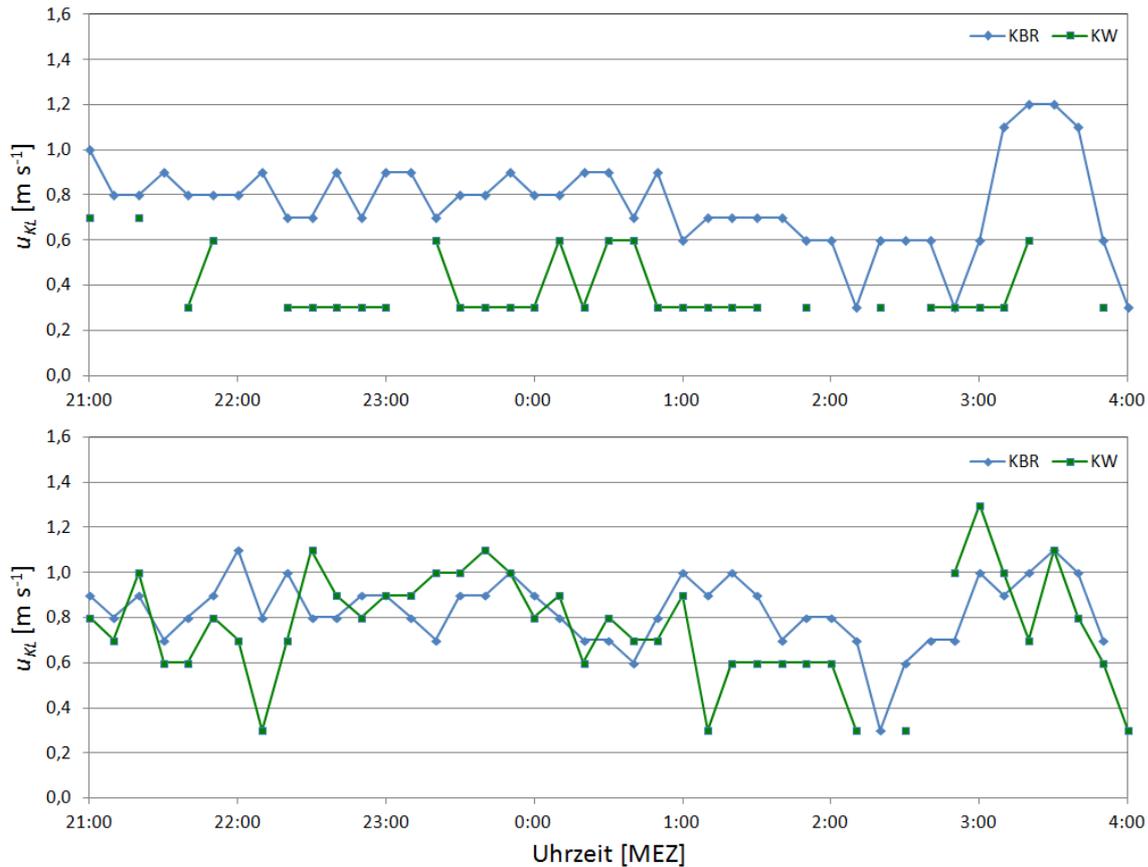


Abb. 73: Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft in zwei ausgesuchten Strahlungsnächten (oben: 13./14.06.2009, unten: 09./10.07.2010) im Kannegießerbachtal auf Basis von 10 min-Mittelwerten. Werte $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt.

Das intermittierende Fließverhalten der Kaltluft als Folge hoher Rauigkeit konnte des Weiteren bei einer Fesselballonsondierung am 28.09.2011 an einem weiter innenstädtisch gelegenen Standort (M7, vgl. Abb. 42) belegt werden (vgl. Abb. 74). Der Messstandort M7 liegt in der weitestgehend versiegelten und bebauten Fortführung des Kannegießerbachtals im Bereich einer breiten Straßenschlucht (ca. 45 m). In der Messnacht entsprach die Richtung des synoptischen Windes nicht der Fließrichtung der Kaltluft, so dass die Kaltluftobergrenze nicht nur anhand der Daten der Ballonsonde, sondern auch anhand des Richtungswechsels in der Abdrift des Ballons bestimmt werden konnte. Während beim ersten und zweiten Aufstieg die Obergrenze der Kaltluft in etwa 25 m Höhe festgelegt werden konnte, war bei der dritten Messung eine Festlegung nicht möglich. Der Ballon driftete bis in

einer Höhe von 50 m ü. Gr. ausschließlich talabwärts. In Abb. 74 ist eine kontinuierliche Zunahme der Temperatur bis in eine Höhe von 50 m zu erkennen. Aus Sicherheitsgründen bezüglich der umgebenden Bebauung konnte ein Aufstieg in größere Höhen nicht erfolgen. Offensichtlich kam es bei M7 zu einem intermittierenden Abfließen großer Mengen Kaltluft, die die durchschnittliche Gebäudehöhe in diesem Talbereich überragt. Ein Rückstau, der das intermittierende Verhalten der Kaltluft in solchen Dimensionen verursacht, ist in der Umgebung von M7 denkbar. Zum einen findet sich im Bereich des Südviertels überwiegend dichte, bis zu 5-geschossige Blockrandbebauung, in unmittelbarer Umgebung des Messpunktes hoch aufwachsendes Straßen-Begleitgrün (Platanen) sowie ein Bahndamm in etwa 300 m Entfernung talaufwärts, der in früheren Untersuchungen nachweislich von der Kaltluft überströmt wird. Des Weiteren erfolgte in regelmäßigen Abständen ein Abdriften des Ballons im Bodenbereich, das nicht der Abflussrichtung der Kaltluft entsprach. Zu diesen Zeiten kam der Kaltluftstrom selbst in Bodennähe vollständig zum Erliegen. Da die Ballonaufstiege zeitnah zum Sonnenuntergang (18:21 Uhr MEZ) erfolgten, ist es möglich, dass zum Zeitpunkt der Messungen erste „Kaltluftlinsen“ den Messpunkt passierten, die weiter talaufwärts aufgestaut wurden und sich erst später in der Nacht ein eher kontinuierlicher Kaltluftabfluss, wie aus dem oberen Talbereich bekannt, bildet.

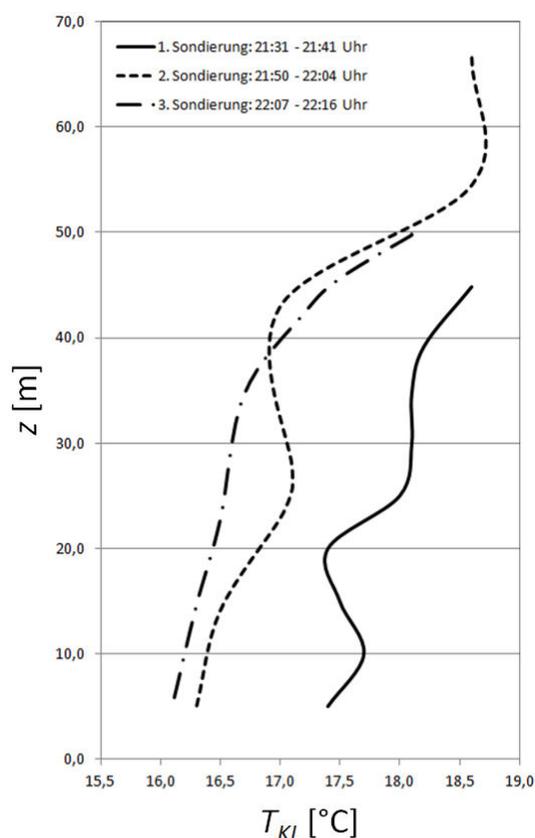


Abb. 74: Fesselballonsondierungen am Messpunkt M7 (vgl. Abb. 42) am 28.09.2011. Dargestellt sind drei unterschiedliche Ballonaufstiege am gleichen Standort.

In dicht bewachsenen Waldgebieten kommt es, wie in Kap. 3.4 besprochen, zu Maxima der Fließgeschwindigkeit oberhalb des Kronenraumes, ein Vorgang der analog dem Sub-Canopy-Flow als Supra-Canopy-Flow bezeichnet werden kann. Dabei kommt es zwar zum Einsickern von Kaltluft in den Baumbestand, das Gros der Kaltluft fließt jedoch oberhalb des Kronenraumes ab. In Bezug auf Bau-

strukturen wäre ein vergleichbares Phänomen – ähnlich der Darstellung [Cc] in Abb. 12, jedoch mit dichter stehender Bebauung – bei ausreichender Fließgeschwindigkeit und Hangneigung im dichten Baukörper denkbar, konnte aber bislang empirisch nicht belegt werden. Mit Bezug auf die vorliegende Untersuchung bedürfte ein Nachweis weiterer Messungen. Insgesamt, ohne diese Messungen, und anhand der Modellergebnisse, erscheint ein solches Phänomen im Bereich des Messpunktes M7 (vgl. Abb. 42) unwahrscheinlich, zumal eine vollständige Füllung der Straßenschluchten mit Kaltluft Voraussetzung wäre. Dafür geben die durchgeführten Ballonmessungen keinen Anhaltspunkt. Das Fließverhalten der Kaltluft im Bereich von M7 entspricht am ehesten der Darstellung [Bd] in Kombination mit [Cd] in Abb. 12.

6.2.6 Kaltluftabflussmenge

Die im Kannegießerbachtal auftretenden Kaltluftabflussmengen unterstreichen die Bedeutung des Tales für die städtische Belüftung und sollen an dieser Stelle exemplarisch für die Nacht des 13.06.2009 berechnet werden. Die Berechnung des Volumenstromes wird dabei anhand der in Kap. 3.1 definierten Gleichung $H_{KL} \times B_{KL} \times u_{KL}$ [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] vorgenommen. Als Eingangsgrößen müssen daher zunächst die Talbreite B_{KL} – genauer gesagt die Breite der abfließenden Kaltluft, die in der Regel durch die Talbreite definiert wird – die Kaltluftmächtigkeit H_{KL} und die Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft definiert werden. Bei der Berechnung des Volumens pro Nacht werden als weitere Variable die Zeit des Sonnenuntergangs und Sonnenaufgangs benötigt.

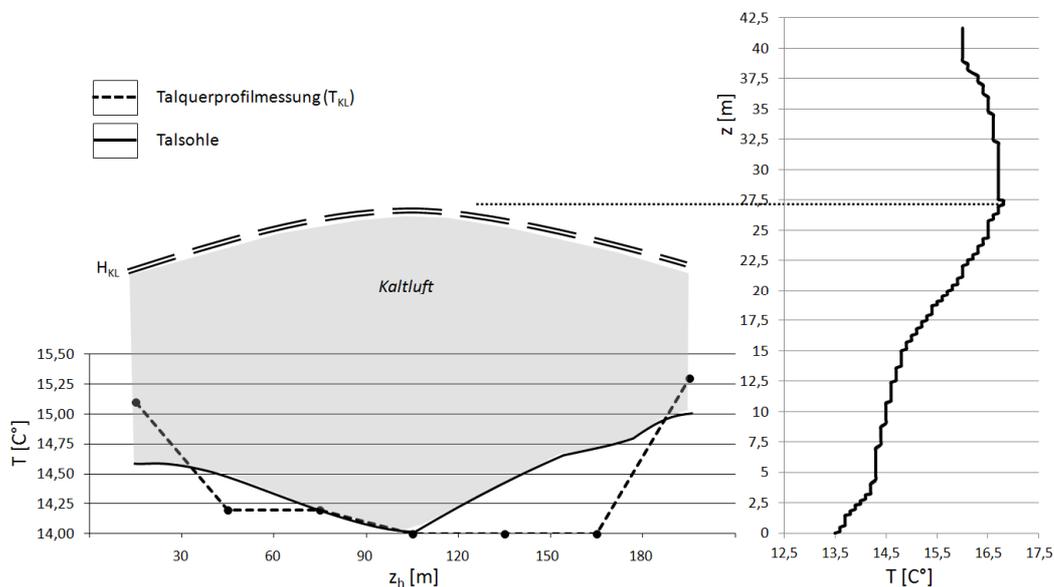


Abb. 75: Messung des Talquerprofils (links, 13.06.2009, 20:15 Uhr bis 20:35 Uhr MEZ) und Ballonsondierung (rechts, 13.06.2009, 20:26 Uhr bis 21:04 Uhr MEZ) zur Bestimmung der Kaltluftausbreitung und Kaltluftmächtigkeit (H_{KL}) (vgl. SACHSEN et al. 2011; SACHSEN et al. 2012).

Der Standort der durchgeführten und in Abb. 74 dargestellten Ballonsondierung am 13.06.2009 war der Messpunkt M2 (vgl. Abb. 42). Die zeitgleich durchgeführten Talquerprofilmessungen fanden in unmittelbarer Umgebung von Station KBR (M1) statt (vgl. Abb. 42). Mit Hilfe der Ballonsonde wurde

gegen 21:00 Uhr MEZ eine Kaltluftmächtigkeit von 27 m ermittelt, die im Temperaturprofil (Abb. 75, rechts) deutlich zu erkennen ist und zudem durch empirische Beobachtungen am Ballon (Turbulenz und Abdrift) bestätigt werden konnte. Zeitgleiche Messungen der Temperatur in einer Messhöhe von 2 m ü. Gr. entlang eines Querprofils (vgl. Abb. 33, M1) im Tal zeigten die niedrigsten Lufttemperaturen in der Talsohle (vgl. Kap. 5.2.3). Die Breite des Tales, in der die Kaltluft ungehindert fließen kann, variiert vegetationsbedingt – und weiter stadteinwärts bebauungsbedingt – stark. Für den Standort der Messungen kann jedoch eine Talbreite von etwa 150 m angenommen werden. Gestützt wird die Annahme durch die Talquerprofilmessung, die auf einer eben solchen Breite deutlich geringere Lufttemperaturen zeigt, was für den Abfluss von Kaltluft spricht (vgl. Abb. 75, links).

Wie aus Abb. 69 bekannt, beträgt die mittlere Abflussgeschwindigkeit der Kaltluft im Sommerhalbjahr an Station KBR (M1, vgl. Abb. 42) etwa $0,8 \text{ m s}^{-1}$. Die Berechnung der Kaltluftabflussmenge in der Nacht vom 13.6.2009 auf den 14.06.2009 lautet demnach wie folgt:

$$\begin{aligned} q_{KL} &= H_{KL} \times B_{KL} \times u_{KL} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \\ &\approx 27 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 0,8 \text{ m s}^{-1} \\ &= 3240 \text{ m}^3 \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

In einer durchschnittlichen Sommernacht wie der oben angegebenen, floss demnach eine Menge von 3240 m^3 Kaltluft pro Sekunde das Kannegießerbachtal auf Höhe von Station KBR herab.

Der Sonnenuntergang am 13.06.2009 fand um 20:50 Uhr MEZ statt, der Sonnenaufgang am 14.06.2009 gegen 04:22 Uhr MEZ. Wie in Abb. 65 dargestellt, erreicht die Kaltluft ca. 1 h nach Sonnenuntergang im Kannegießerbachtal ihre maximale Mächtigkeit, die während der Nacht nahezu konstant bleibt. Für die Nacht vom 13.6.2009 auf den 14.06.2009 kann daher unter Berücksichtigung der beschriebenen Faktoren eine Abflussdauer der Kaltluft mit Mächtigkeiten von etwa 27 m für einen Zeitraum von 6,5 h angenommen werden. Die Abflussmenge an Kaltluft, die in der betreffenden Nacht auf Höhe der Messstation KBR hangabwärts floss, betrug demnach $75.816.000 \text{ m}^3$.

Die errechnete Kaltluftabflussmenge wurde auch in früheren Untersuchungen bestätigt. So errechneten SCHNEIDER & KETZLER ein abfließendes Kaltluftvolumen von bis zu $80.000.000 \text{ m}^3$ pro Nacht für das Kannegießerbachtal (SCHNEIDER & KETZLER 2006), KETZLER errechnete einen Volumenstrom von $3168 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ (KETZLER 2002, HAVLIK & KETZLER 2000).

Vor der Betrachtung der modellierten Kaltluftabflussmengen ist Folgendes zu berücksichtigen: Die Berechnung geht von einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $0,8 \text{ m s}^{-1}$ über eine Talbreite von 150 m und einer Kaltluftmächtigkeit von 27 m aus. Nicht berücksichtigt sind in dieser Rechnung Hindernisse in Form von Bebauung und Vegetation, die die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft reduzieren. Ein zusätzlicher Gewinn an Kaltluftvolumen bei der Berechnung entsteht dadurch, dass in der Berechnung eine ebene Talsohle angenommen wird, was nicht der Realität entspricht. Da KLAM_21 diese Faktoren zu berücksichtigen vermag, sollen Modellergebnisse zur Plausibilitätsprüfung der errechneten Ergebnisse herangezogen werden.

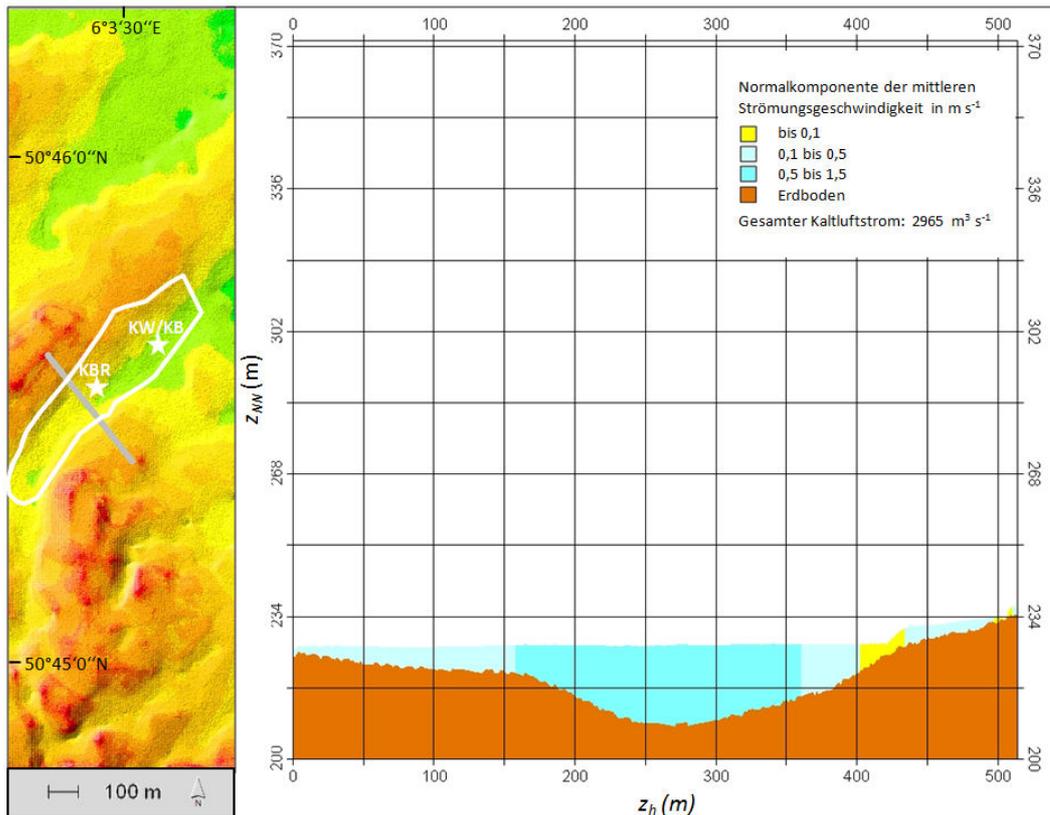


Abb. 76: Höhe H_{KL} und Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft entlang eines Geländeschnittes auf Höhe von Station KBR (rechts) sowie die Lage des Schnittes im Untersuchungsgebiet (links). Die Blickrichtung des Schnittes ist talaufwärts; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

Der in Abb. 76 dargestellte Geländeschnitt beinhaltet den gesamten Talquerschnitt des Kannegießerbachtals von der südöstlichen bis zur nordwestlichen Talschulter. Dabei zeigen sich Fließgeschwindigkeiten von bis zu $0,5 \text{ m s}^{-1}$ in den randlichen Talbereichen und Geschwindigkeiten von bis zu $1,5 \text{ m s}^{-1}$ in der Talsohle. Auf Höhe des Geländeschnittes im Untersuchungsgebiet, d.h. auf Höhe von Station KBR und M1 (vgl. Abb. 42), ist die Talsohle frei durchströmbar. Die randlichen Bereiche, die in Abb. 76 reduzierte Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft zeigen, sind dagegen mit Baumvegetation bestanden, oder im Falle niedrigster Geschwindigkeiten von bis zu $0,1 \text{ m s}^{-1}$ bebaut (Lütticherstraße, vgl. Abb. 20). Als Ergebnis aus Orographie, Fließgeschwindigkeit und Kaltluftmächtigkeit errechnet KLAM_21 einen Kaltluft-Volumenstrom von 2965 m^3 , der pro Sekunde den Geländeschnitt passiert, was bei einer 6,5 stündigen nächtlichen Abflussdauer einem Kaltluftvolumen von $69.381.00 \text{ m}^3$ entspricht. Auf Höhe des Geländeschnittes finden sich laut Abb. 76 maximale Kaltluftmächtigkeiten von 15 bis 19 m, was neben den bereits erörterten Faktoren ein weiterer Grund für die Abweichungen zur überschlägigen Berechnung der Kaltluftabflussmenge ist. Grundsätzlich sind auf Höhe des Profils geringere Kaltluftmächtigkeiten plausibel, da M2, an dem die Ballonsondierungen aus Abb. 65 stattfanden – wenn auch nur geringfügig – weiter talabwärts liegt (vgl. Abb. 42). Im Modelllauf (vgl. Abb. 66) sind ebenfalls geringere Kaltluftmächtigkeiten zu erkennen.

Die räumlichen Unterschiede abfließender Kaltluftmengen ist Inhalt von Abb. 77. Dabei zeigt sich das stetige Wachstum der Abflussmenge an Kaltluft in den oberen Talbereichen durch den Zusammen-

fluss von kleineren Kaltluftströmen. Das Einzugsgebiet des Kannegießerbachtals hat im Oberlauf zwei wesentliche Kaltlufteinzugsgebiete, die räumlich durch den Von-Halfern-Park getrennt werden. Etwa auf Höhe der südwestlichen Bebauungsgrenze in Abb. 77 beginnt der Bestand des Aachener Waldes. KLAM_21 erzeugt dort eine maximale Volumenstromdichte von $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in oder über bewaldetem Gebiet. Die Abflussmenge erhöht sich stark, sobald offenes Wiesengelände erreicht wird, das aufgrund der in Kap. 3.3 genannten Faktoren ein besserer Kaltluftbildner ist und zudem geringere Rauigkeiten aufweist. Etwa auf Höhe von Station KBR findet sich ein erstes Maximum abfließender Volumenstromdichten von $30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bis $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Auf Höhe von Station KW reduziert sich die Abflussmenge, da die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft durch Vegetation verringert ist und der Abflussbereich zudem stark eingengt ist. Weiter talabwärts, kurz vor der beginnenden innerstädtischen, dreistöckigen Bebauung, werden erneut Werte von bis zu $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ erreicht. Die Tatsache, dass unterhalb der Station KW dennoch erneut große Abflussmengen modelliert werden, liegt v.a. an einem weiteren Zufluss kalter Luft aus einem östlich angrenzenden Talbereich (Ponellbachtal).

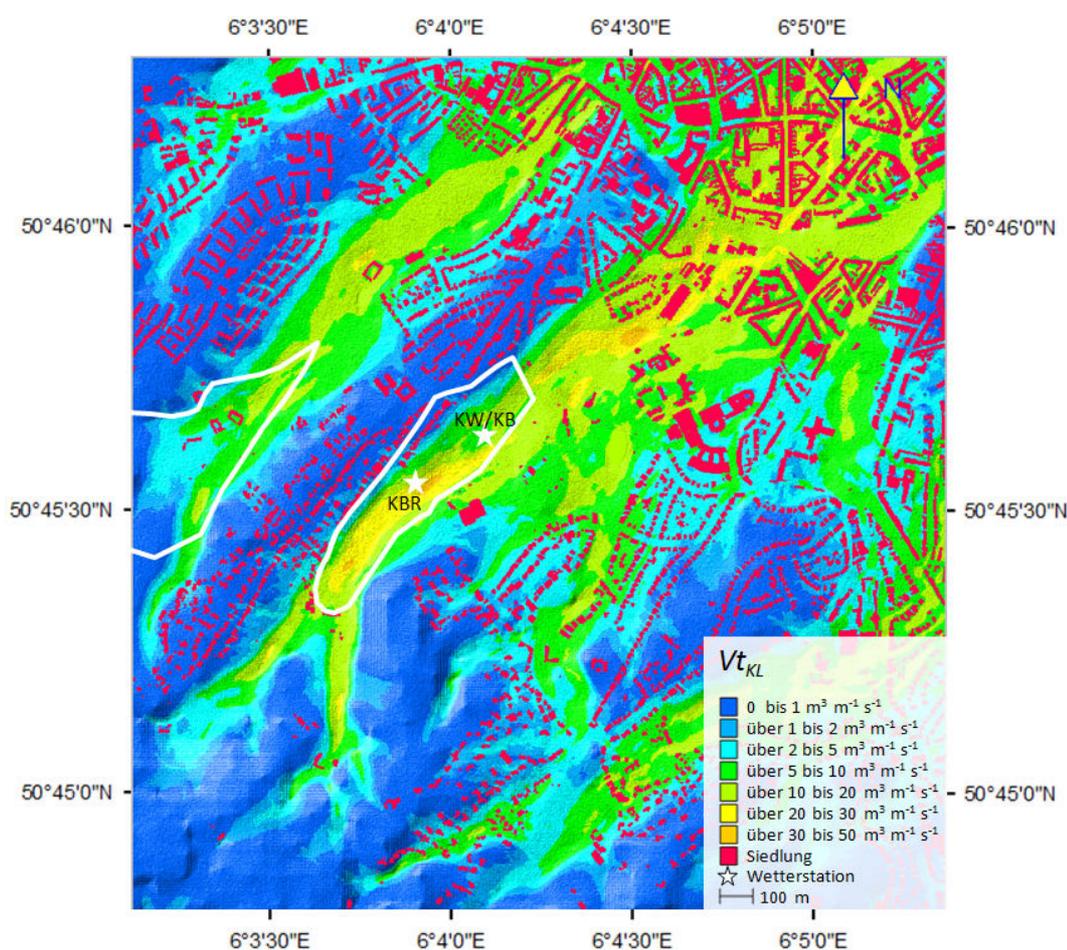


Abb. 77: Volumenstromdichte Vt_{KL} der Kaltluft nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

Als Anhaltspunkt zur Einordnung der im Kannegießerbachtal vorzufindenden Volumenstromdichten gibt GEO-NET in Anlehnung an WERNER et al. eine Klassifizierung an, die die Volumenstromdichte in

Zusammenhang mit der klimaökologischen Ausgleichsleistung der Kaltlufteinzugsgebiete setzt (WERNER et al. 1979). Demnach haben Kaltluft-Volumenstromdichten von bis zu $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ein geringes, von $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bis $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ein mittleres, von $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bis $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ein hohes und von über $50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ein sehr hohes Ausgleichspotenzial (GEO-NET 2002). Große Bereiche der Talsohle des Kannegießer- und auch Johannisbachtals haben demnach eine hohe klimaökologische Ausgleichsleistung.

6.2.7 Reichweite der Kaltluft

Wie aus Abb. 74 ersichtlich, wurde mittels einer Ballonsondierung am innerstädtischen Standort M7 (vgl. Abb. 42) Kaltluftabfluss nachgewiesen, die Kaltluft dringt folglich weit in bebautes Gebiet vor. Aufgrund der nachgewiesenen Kaltluftmächtigkeiten ist ein weiteres Vordringen der Kaltluft bis ins Stadtzentrum sehr wahrscheinlich. Weitere Ballonsondierungen oder Messgänge zum Nachweis von Kaltluft fanden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht statt. In diesem Fall soll daher auf Ergebnisse des Modells KLAM_21 sowie auf Daten der in Kap. 5.2.4 beschriebenen ASEAG-Messkampagne zurückgegriffen werden.

Im Rahmen der „ASEAG-Messungen“ führte die Wegstrecke der mit Sensortechnik bestückten Buslinie 2 durch das Kannegießerbachtal. Exemplarisch wurden die Lufttemperaturmittelwerte der am 16.03.2010, 24.03.2010 und 10.05.2010 nach 22:30 Uhr MEZ²³ aufgezeichneten Daten herangezogen, während deren Aufzeichnung im Kannegießerbachtal Kaltluftabfluss nachgewiesen werden konnte. Die Wegstrecke der Buslinie 2 ist in Abb. 78 dargestellt. Dabei folgen die Punkte 1 bis 8 nahezu exakt der Talsohle des Kannegießerbachtals, bevor die Wegstrecke in Folge im Bereich von Punkt 9 zunächst auf die östliche Talschulter des Kannegießerbachtals wechselt und schließlich bei den Punkten 10 bis 14 durch ein Nachbartal (Ponellbachtal) führt. Die Punkte 15 und 16 liegen schließlich wieder im Kannegießerbachtal, jedoch dort am höchsten Punkt des Aachener Waldes, wo nur geringe Mengen und Mächtigkeiten an Kaltluft zu erwarten sind.

Die Temperaturdifferenzen in Abb. 78 lassen Rückschlüsse auf die Struktur der Wärmeinsel der Stadt Aachen (unter Kaltluftabflussbedingungen) zu, die recht scharf begrenzt scheint. Der Streckenabschnitt von Punkt 1 bis 3 zeigt negative Temperaturdifferenzen der Messwerte zur Station HÖ, d.h. höhere städtische Temperaturen im Vergleich zur Station HÖ. Mit zunehmend aufgelockerter Bauungsstruktur, zunehmender Durchgrünung und zunehmendem Einfluss des Kaltlufteintrages in die Stadtluft, werden die Temperaturdifferenzen zwischen Station HÖ und den Messpunkten im randstädtischen Talbereich positiv. Im Bereich von Punkt 6 ist bereits eine deutliche positive Temperaturdifferenz von 1,6 K zu verzeichnen ist. Etwa auf Höhe von Messpunkt 7 endet stadteinwärts betrachtet die unbebaute, bzw. im randstädtischen Bereich lockere und in der Höhe reduzierte Be-

²³ Die Linie 2 der ASEAG stellt gegen 01:00 Uhr den Betrieb ein. Die Anzahl der den 16 Punkten aus Abb. 78 zugeordneten Werten beträgt 138.

bauung des Kannegießerbachtals. Frühere Untersuchungen zeigen eine deutliche Nachweisbarkeit von Kaltluft in diesem Bereich (vgl. Abb. 42, M13, SCHNEIDER & KETZLER 2005).

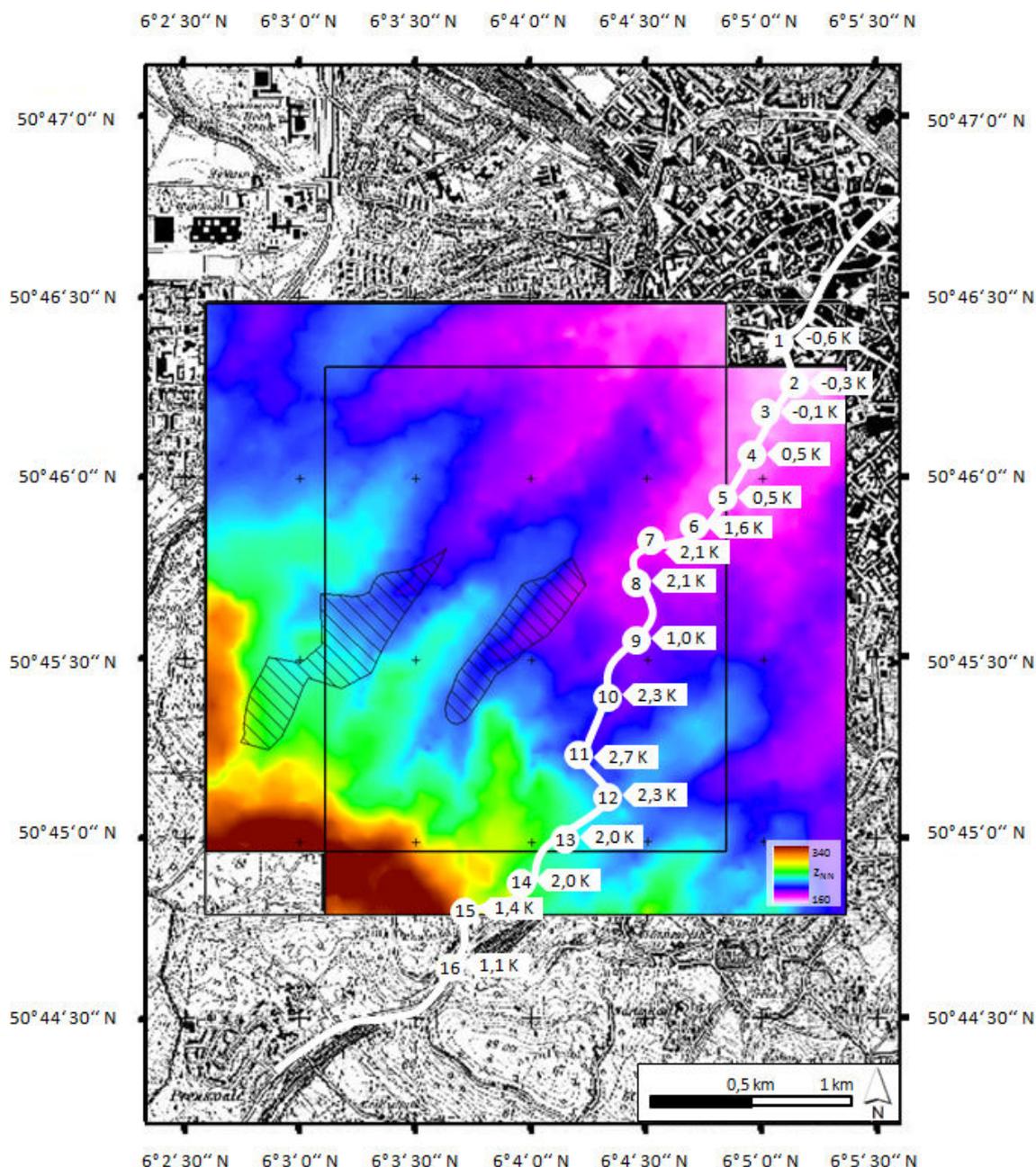


Abb. 78: Wegstrecke der ASEAG Buslinie 2 (weiße Linie) durch das Kannegießerbachtal mit den vordefinierten Punkten der Datenzuordnung und der jeweiligen, höhenkorrigierten Temperaturdifferenz zur Station HÖ (Kartengrundlage: HAVLIK & KETZLER 2000, LANDESVERMESSUNGSAMT NRW 1995a-e).

Im Bereich von Messpunkt 7 und 8 findet sich nahezu keine Bebauung in der Talachse, so dass die Kaltluft einzig durch Vegetation in ihrer Ausbreitung gehindert werden kann. Messpunkt 9, der weiter von der Talachse entfernt auf dem östlichen Höhenrücken des Kannegießerbachtals liegt und den Übergang zum Nachbartal (Ponellbachtal) bildet, zeigt höhere Lufttemperaturen als der vorangegangene Streckenabschnitt. Dies mag zum einen daran liegen, dass Punkt 9 nur randlich in kaltluft-

beeinflusstem Gebiet liegt, zum anderen findet sich in diesem Streckenabschnitt (wieder) mehrgeschossige, wenn auch lockere Wohnbebauung. Im Bereich der Punkte 11 bis 14 durchfährt die Linie 2 einen Talbereich des Ponellbachtals, in dem aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperaturen Kaltluftabfluss vermutet werden muss. Hinzu kommt eine in ihrer Dichte abnehmende Bebauung, einhergehend mit steigenden Anteilen von Grünflächen und Wald. Obwohl die Punkte 15 und 16 in der im Vergleich aller Punkte ruralsten Umgebung liegen („Aachener Wald“) zeigen sie steigende Temperaturen im Vergleich mit dem vorangegangenen Streckenabschnitt. Die beiden definierten Punkte liegen am höchsten Punkt des Aachener Waldes. Dort ist zwar eine hohe Temperaturabnahme aufgrund der kühlenden Wirkung von Wald und Grünflächen zu erwarten, gleichzeitig fehlt hier aber der starke Kaltlufteinfluss, der in tieferen Talbereichen aufgrund der größeren Kaltluftmächtigkeit gegeben ist.

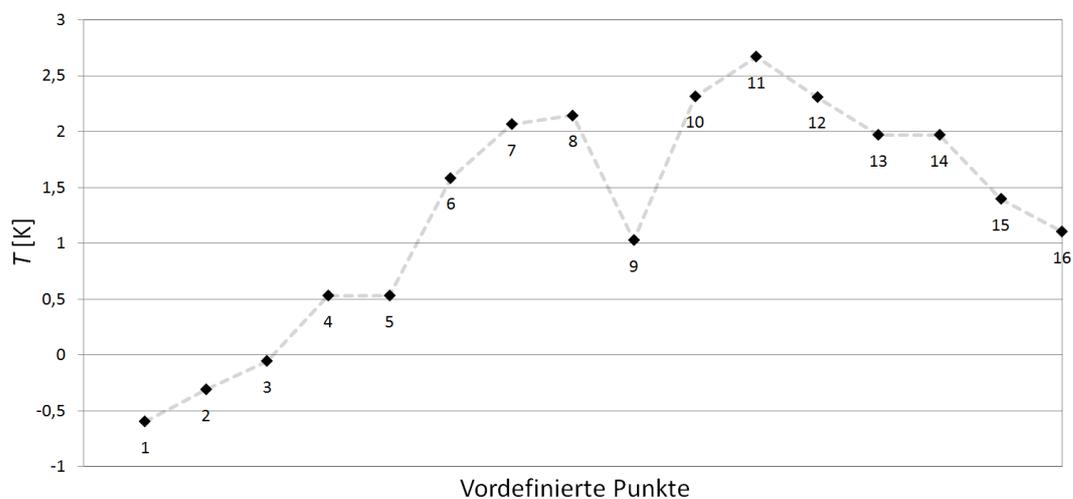


Abb. 79: Differenzwerte der mittleren Lufttemperatur T zwischen der Station HÖ und vordefinierten Punkten auf der ASEAG-Linie 2 (vgl. Abb. 78). Die Datenaufzeichnung erfolgte am 16.03.2010, 24.03.2010 und 10.05.2010.

Abb. 79 veranschaulicht die in Abb. 78 dargestellten Temperaturwerte an den einzelnen Messpunkten. Zu Beginn der Wegstrecke finden sich hohe innerstädtische Temperaturen, die im randstädtischen Bereich eine starke Beeinflussung durch Kaltluft erfahren und daher rasch sinken. Bis auf kurze Unterbrechungen finden sich fortan beim Durchfahren der randstädtischen Bachtäler Aachens (Kannegießer- und Ponellbachtal) bis zu 2,7 K niedrigere Temperaturen als an Station HÖ, die einen starken Kaltlufteinfluss anzeigen. Dieser nimmt erst auf dem Höhenzug des Aachener Waldes wieder ab.

6.2.8 Qualität der Kaltluft

Seit langem ist die Tatsache unbestritten, dass Kaltluftabflüsse tendenziell zur Verbesserung der innerstädtischen Luftqualität beitragen. Durch die Einmischung von kalter, unbelasteter Umgebungsluft in die Stadtluft verringern sich innerstädtische Konzentrationen gesundheitsschädlicher, anthropogen verursachter Gase (v.a. NO_2 , O_3) und Feststoffe (PM). Als problematisch ist der Eintrag von anthropogen verursachten Schadstoffen in die Kaltluft zu bewerten, da sich diese aufgrund der stabilen Inversionsschicht in der Kaltluft anreichern können (vgl. Kap. 3.6). Im Falle des vorliegenden

Untersuchungsgebietes spielt der Eintrag gasförmiger, aber auch partikulärer Schadstoffe durch verkehrliche Emissionen im Bereich des Kannegießerbachtals (Brüsseler Ring, vgl. Abb. 20) eine Rolle. Vor allem im Winterhalbjahr, aber auch im Sommerhalbjahr, setzt bereits am späten Nachmittag Kaltluftabfluss ein, der mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen („Berufsverkehr“) zusammenfällt. Schadstoffe die zu dieser Zeit emittiert werden, werden mit der Kaltluft talabwärts transportiert.

Am Abend des 19.09.2010 wurden unter Kaltluftabflussbedingungen im Kannegießerbachtal an drei Messpunkten (M4, M5, M6, vgl. Abb. 42) Feinstaubmessungen vorgenommen. Die Erfassung erfolgte an jedem der drei Punkte in einem Abstand von 60 min über ein Intervall von 10 min. Dabei wurde ein Querprofil im Kannegießerbachtal bemessen, dessen Ergebnisse in Abb. 80 dargestellt sind. Wie aus der Abbildung ersichtlich, lagen zwei Messpunkte (M5 und M6) im unmittelbaren Wirkungsbereich der Kaltluft, wohingegen Messpunkt 4 auf der westlichen Talschulter (Lütticherstraße, vgl. Abb. 20) lag. In Abb. 80 ist die vermutete Lage der Kaltluft als grau schraffierte Fläche eingezeichnet. Die Lage ergibt sich aus Erfahrungswerten, die auf verschiedenen Ballonsondierungen beruhen (vgl. Tab. 11). Zudem wird das Vorhandensein abfließender Kaltluft an den Messpunkten M6 und M5 (vgl. Abb. 42) durch die KLAM_21 Modellierung in Abb. 66 bestätigt. Für den Messpunkt M4, der auf der westlichen Talschulter des Kannegießerbachtals liegt (vgl. Abb. 42), zeigt KLAM_21 in Abb. 66 keine, bzw. sehr geringe Kaltluftmächtigkeiten.

Betrachtet man die Masse der gemessenen Partikel in Abb. 80 bis zu einer Größenordnung von $2,5 \mu\text{m}$, so zeigen alle drei Messpunkte einen ähnlichen Masseanstieg im Vergleich der beiden Messungen, wobei Messpunkt M4 (vgl. Abb. 42) insgesamt niedrigere Werte aufweist. Diese Tatsache verwundert zunächst, da Messpunkt M4 im Gegensatz zu den weiteren Messpunkten in bebauter Umgebung an einer Hauptverkehrsstraße liegt. Betrachtet man die Masse der gemessenen Partikel bis zu einer Größe von $10 \mu\text{m}$, so zeigt sich an Messpunkt M4 ein gleichbleibendes Massenniveau von etwa $21 \mu\text{g m}^{-3}$. Messpunkt M5 und M6 (vgl. Abb. 42) zeigen mit fortschreitender Tageszeit im gleichen Massespektrum (bis $10 \mu\text{m}$) steigende Werte, wobei Messpunkt M5 den größten Anstieg von etwa $10 \mu\text{g m}^{-3}$ aufweist. Berücksichtigt man die Tatsache, dass M5 in der Talsohle liegt und somit die stärkste Beeinflussung durch den Kaltluftabfluss erfährt, so liegt ein Zusammenhang zwischen steigender Partikelmasse in der Luft mit voranschreitender Tageszeit und fortschreitender Intensivierung des Kaltluftabflusses mit voranschreitender Tageszeit nahe. Gerade die Partikelmasse der oberen Größenfraktionen steigt mit zunehmender Ausprägung des Kaltluftstromes an. Dabei ist der Anstieg dort am höchsten, wo die höchsten Kaltluftabflussgeschwindigkeiten erreicht werden.

Da eine abschließende Bestimmung der registrierten Partikel im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht erfolgen konnte, muss eine Erklärung des Sachverhaltes durch Ausschluss verschiedener möglicher Ursachen vorgenommen werden. Eine dieser Möglichkeiten, basiert auf der Messmethodik des eingesetzten Gerätetyps. Luftfeuchtheitswerte über 90 % können bei dem angewandten Messverfahren zu einer steigenden Anzahl von registrierten Partikeln führen, da in einem optischen Verfahren (vgl. Kap. 5.2.5) größere Wassertröpfchen als Feinstaubpartikel registriert werden. Vor allem die Anzahl an gemessenen Partikeln der oberen Größenfraktionen steigt dann an. Luftfeuchtheitswerte von unter 80 % dagegen sind für die Messung als unkritisch zu betrachten. Um die so beschriebene

Beeinflussung des Messergebnisses auszuschließen, wurden die Werte der Luftfeuchtigkeit an der Station KBR und KW überprüft. Der Mittelwert der Relativen Feuchte lag im untersuchten Zeitraum an der Messstation KBR bei 74 %, an der Station KW in 2,5 m Messhöhe bei 75 %. Lediglich der Sensor an Station KW, der in 0,5 m Höhe in der Wiesenvegetation verortet war, registrierte maximale Werte von 81 % Relativer Luftfeuchte. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Feinstaubmessung durch Wassertröpfchen beeinflusst wurde, ist demnach als gering einzuschätzen.

Da zur Messzeit (und zur Zeit des Kaltluftabflusses) das Verkehrsaufkommen verhältnismäßig gering war, und zudem der am stärksten verkehrlich beeinflusste Messpunkt M4 (vgl. Abb. 42) die geringste Zunahme der Partikelmasse und das geringste Masseniveau der Vergleichsmessungen aufwies, ist die verkehrliche Komponente der gemessenen Partikel gering. Für diese Annahme spricht des Weiteren eine Zunahme der Partikelmasse an allen Messpunkten mit voranschreitender Tageszeit, wo im Normalfall das Verkehrsaufkommen geringer wird.

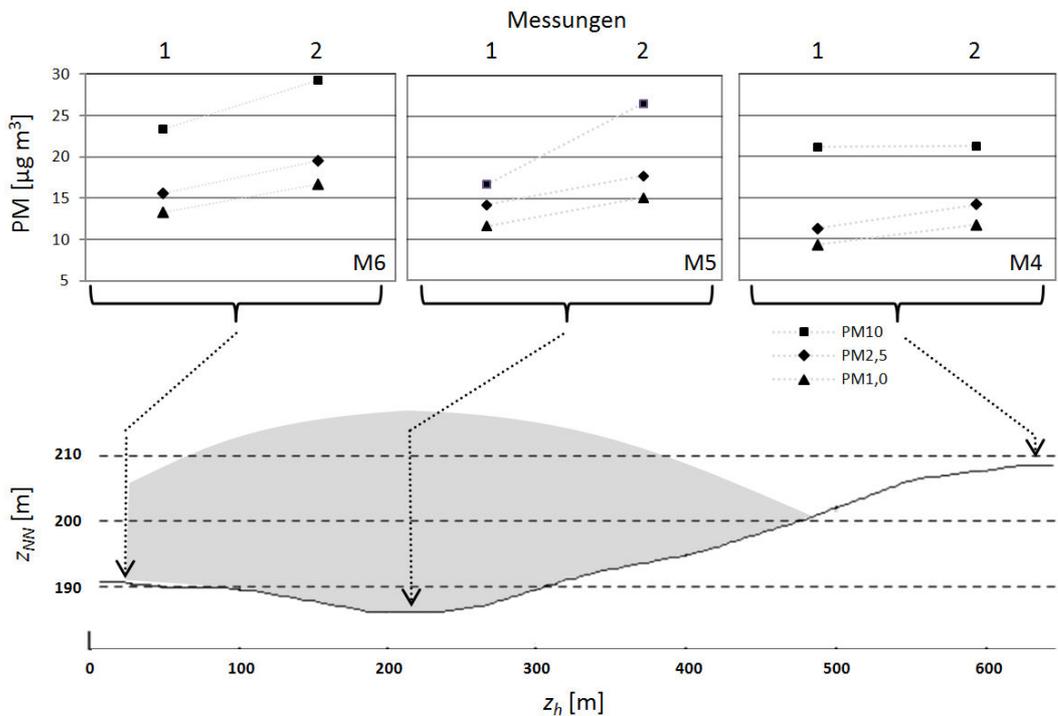


Abb. 80: Feinstaubkonzentrationen an den Messpunkten M4, M5 und M6 (vgl. Abb. 42) im Kannegießerbachtal während Kaltluftabfluss am 19.09.2010 (19:47 Uhr bis 22:34 Uhr MEZ). Die Erfassung erfolgte in einem Abstand von 60 min über ein Intervall von 10 min. Die Blickrichtung ist talaufwärts.

Betrachtet man die Kaltluftbahn „Kannegießerbachtal“ hinsichtlich der Oberflächenstruktur, so kennzeichnet sich diese durch eine vergleichsweise hohe Oberflächenrauigkeit. Wie in Kap. 3.4 beschrieben, erreichen Baumbestände höchste Rauigkeitswerte. Äste und Blätter führen zur Bildung von Wirbeln. Unterstützt wird die Bildung von Luv- und Leewirbeln durch die häufig wechselnde Höhe der unterschiedlichen Bestandstypen (vgl. Abb. 11, [Aa] und [Cb]). Im Kannegießerbachtal finden sich im oberen Bereich ausgeprägte Waldbestände und auch im Bereich der Messstationen kleinere Waldbestände, Baumgruppen und einzelne, freistehende Bäume. Vor allem aber findet sich ein häufiger Wechsel verschiedener Vegetationsformen, die sich sowohl in der Dichte als auch Höhe unterscheiden.

den. Da eine erhöhte Oberflächenrauigkeit den Turbulenzgrad der Kaltluft erhöht, ist für den Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal eine erhöhte Turbulenz anzunehmen. Gestützt wird diese Tatsache durch die in Abb. 73 beschriebenen Messungen. Am Wahrscheinlichsten ist daher als Ursache für steigende Partikelmassen in der Kaltluft die Turbulenz des Kaltluftabflusses im Kannegießerbachtal anzunehmen, da durch diese Partikel im Boden- und Vegetationsbereich aufgewirbelt und in die Kaltluft eingemischt werden. Im Hinblick auf die vorliegende Untersuchung und unter Berücksichtigung der Absicht, einen möglichst gesundheitsunbedenklichen stadteinwärts gerichteten Kaltluftabfluss vorzufinden, ist eine geringe Oberflächenrauigkeit im Kannegießerbachtal als vorteilhaft zu bewerten. Eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit wurde in der vorliegenden Untersuchung durch landschaftspflegerische Mäh- und Mulcharbeiten an der Wiesenvegetation erreicht sowie durch die Entnahme von Büschen und Bäumen aus der Talsohle. Da jedoch – wie häufig – selbst bei der disziplinären Betrachtung des Sachverhaltes ebenso Argumente zu finden sind, die den Eingriff in die Talvegetation nachteilig erscheinen lassen, ist keineswegs im Hinblick auf die Luftqualität ein Rückschnitt der Talvegetation zu empfehlen. Dies würde (z.B. im Hinblick auf den Erlenbestand) zu einer geringeren Partikeldeposition führen. Zudem zeigen Modellergebnisse in Abb. 109, dass ein durch Vegetation in der Geschwindigkeit verringertes Abfließen der Kaltluft zu einer Konzentrationsreduktion von Schadstoffen führen kann.²⁴

Da die Messung im September stattfand, liegt zudem die Vermutung nahe, dass die partikuläre Belastung möglicherweise zu einem Teil durch Pollen verursacht sein kann, die aus der Wald- und Wiesenvegetation stammen. Auch im Falle von Pollen führt eine erhöhte Turbulenz zu einer vermehrten Einmischung von Partikeln. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird es zukünftig zu einer Intensivierung dieser Problematik kommen, da höhere Temperaturen mit einer längeren Vegetationsperiode längere Pollenflugzeiten und höhere Pollenkonzentrationen verursachen (z.B. BENISTON & GARCIA-HERRERA 2008, JENDRITZKY 2007).

6.3 Vegetationseffekte auf das Mikroklima

In Kap. 6.3 liegt der Schwerpunkt der Betrachtung auf mikroklimatischen Effekten, die durch die Vegetation ausgelöst werden. Dabei spielt in der vorliegenden Untersuchung vor allem die Modifikation des Windfeldes, aber auch der Temperatur eine Rolle. Eine gesonderte Betrachtung der Vegetationseffekte auf den Kaltluftabfluss erfolgt in Kap. 6.4.

²⁴ Nicht in die Diskussion mit einbezogen sind an dieser Stelle weitere wichtige Funktionen der Aachener Bachtäler und städtischer Grünflächen, die diese neben den diskutierten klimatologischen Aspekten haben. Einer dieser Gesichtspunkte, der in der jüngeren Vergangenheit zunehmend mehr Beachtung erfährt ist die in den angesprochenen Bereichen vorhandene „urbane Biodiversität“. Die Sicherung von Biodiversität in urbanen Räumen gewinnt im Rahmen einer zunehmenden Verstädterung stark an Bedeutung (z.B. KOWARIK 2011, HALLEGATTE et al. 2010).

6.3.1 Modifikation des Windfeldes

Das sich am stärksten durch Eingriffe in die Vegetation verändernde Klimaelement in der vorliegenden Untersuchung ist die Windgeschwindigkeit. Abb. 81 zeigt die Windgeschwindigkeit an den Messstationen KBR, KW und KB im Kannegießerbachtal relativ zur Station HÖ außerhalb des Untersuchungsgebietes.

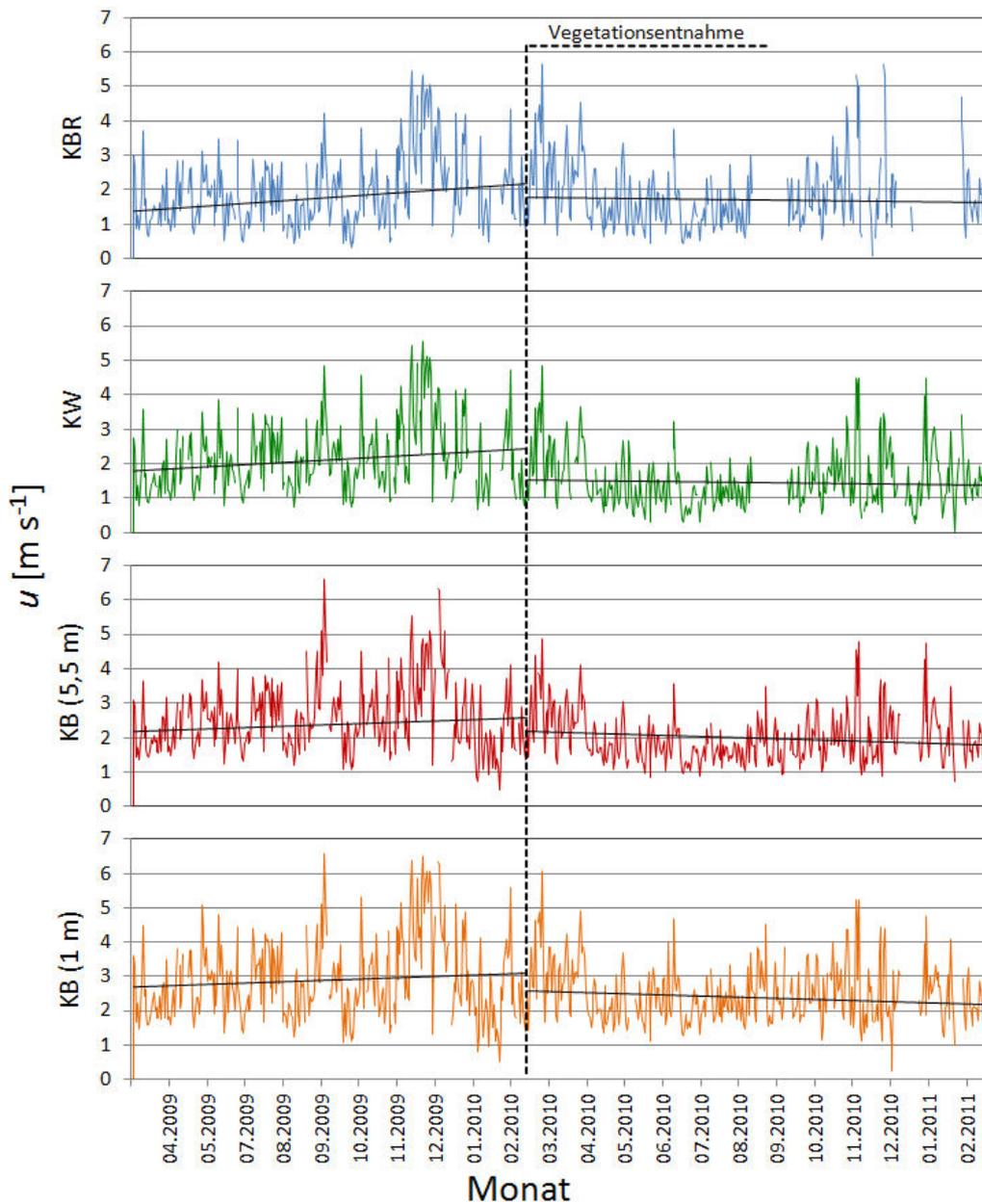


Abb. 81: Differenz der Windgeschwindigkeit u zwischen der Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 mit der jeweils dazugehörigen Trendlinie in MZ1 und MZ2 auf Basis von Tagesmittelwerten.

Bei der Ergebnisbetrachtung muss zunächst zwischen der Station KBR und den übrigen Stationen unterschieden werden. Station KBR zeigt in etwa gleichbleibende Differenzen der Windgeschwindigkeit zur Station HÖ, was der Erwartung an dieser Station entspricht und den Nutzen der Station als Referenzstation im Kaltluftabflussgebiet verdeutlicht. An der Station KBR fanden keine Veränderungen im Stationsumfeld statt, so dass Unterschiede ausschließlich witterungsbedingt begründet werden können. Im Umfeld der Stationen KW und KB wurde das Umfeld, wie in Kap. 5.1.2 beschrieben, modifiziert. Der Wind im Bereich dieser Stationen zeigt eine deutliche Abnahme der Geschwindigkeitsdifferenzen, was unter der Annahme gleichbleibend höherer Windgeschwindigkeiten an Station HÖ eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit an den Stationen KW und KB bedeutet.

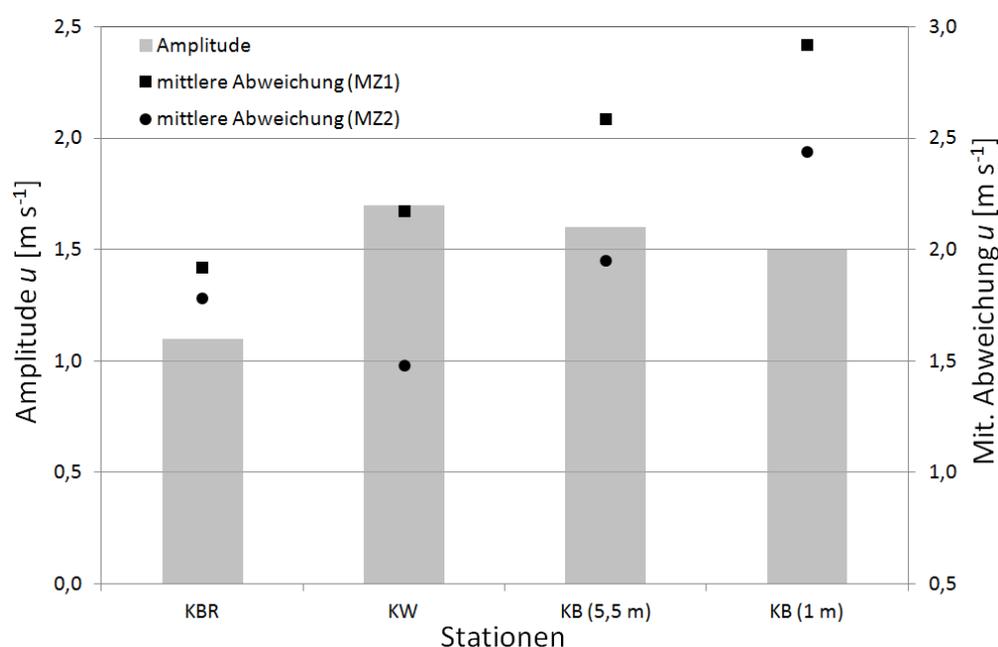


Abb. 82: Mittlere Abweichung der Windgeschwindigkeit u zwischen Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB sowie die Amplitude der Abweichung in MZ1 und MZ2 auf Basis von Tagesmittelwerten.

Die mittlere Abweichung der Windgeschwindigkeit an den Stationen KBR, KW und KB zur Station HÖ ist detailliert in Abb. 82 dargestellt. Station KW erfährt durch die Veränderung des Vegetationsbestandes die stärkste Annäherung an die Windgeschwindigkeitswerte der Referenzstation HÖ. Wohingegen in MZ1 im Mittel eine Differenz von $2,2 \text{ m s}^{-1}$ vorlag, verringert sich dieser Wert um $0,7 \text{ m s}^{-1}$ auf $1,5 \text{ m s}^{-1}$ (Abb. 82). Diese Tatsache lässt sich im Wesentlichen durch die entfernte Vegetationsstruktur erklären (vgl. Kap. 5.1.2). An Station KB (5,5 m) sank die Windgeschwindigkeitsdifferenz zur Station HÖ um $0,6 \text{ m s}^{-1}$ von $2,6 \text{ m s}^{-1}$ auf $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Station KB (1 m) erfuhr durch die Vegetationsentnahme ebenfalls eine deutliche, wenn auch vergleichsweise geringere Veränderung der mittleren Windgeschwindigkeiten. Die Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen Station KB (1 m) und Station HÖ betrug im Mittel in MZ1 $2,9 \text{ m s}^{-1}$ und in MZ2 immer noch $2,4 \text{ m s}^{-1}$. Dort spielt neben der veränderten Baumstruktur die Wiesenvegetation eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung des Windfeldes. Da die Wiesenvegetation im Bereich von Station KB strahlungsbedingt in MZ2 Höhen von bis zu 1,4 m erreichte, wurden die Windgeschwindigkeiten an Station KB (1 m) auch im Jahr 2011 deutlich vegetationsbedingt reduziert. Insgesamt ist die Differenz zwischen Station KB (1 m) und Sta-

tion HÖ sowohl in MZ1, als auch in MZ2 am Größten im Vergleich der Stationen. Die Veränderung der mittleren Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Station KBR und HÖ ist am geringsten im Vergleich der Stationen, an Station KBR fanden keine Veränderungen im Stationsumfeld statt.

Die beschriebenen Ergebnisse wurden mittels Student-t-Test auf Signifikanz der Mittelwerte der Grundgesamtheit geprüft (BAHRENBURG et al. 2010). Dabei zeigten sich vor allem an den Stationen, an denen die Vegetationsveränderungen vorgenommen wurden – Station KW, KB (5,5m) und KB (1 m) – signifikante Unterschiede in der Grundgesamtheit der Mittelwerte. An Station KBR unterschieden sich beide Stichproben signifikant auf dem 90 % Signifikanzniveau (t-Wert 1,75 / p-Wert 0,08). An Station KW war der Unterschied noch größer (t-Wert 9,3191 / p-Wert < 0,001). An Station KB (5,5 m) betrug der t-Wert 8,94 sowie der p-Wert < 0,001 und an Station KB (1m) betrug der t-Wert 5,60 bei einem p-Wert von < 0,001.

Wie auch in den vorangegangenen Auswertungen zeigt sich (vgl. Abb. 43), dass die Windgeschwindigkeit an Station KW in MZ2 über der von Station KBR liegt. Die durch Vegetation gebildete Engstelle im Talverlauf (vgl. Abb. 20) führt bei der Betrachtung des Windfeldes zu Düseneffekten (vgl. Abb. 12., [Bc]). In wie weit dies auch bei Kaltluftabfluss der Fall ist, muss in Kap. 6.4 geklärt werden, da sich das Fließverhalten von synoptischem Wind und Kaltluft erheblich unterscheidet. Bislang finden sich in Bezug zur Kaltluft keine Düseneffekte in der Literatur. Zudem bilden sich die Düseneffekte vor allem im bodennahen Bereich aus und sind an Station KB (5,5 m) in der Deutlichkeit nicht zu erkennen. Ein Grund könnte sein, dass in 5,5 m Höhe ü. Gr. bereits wieder eine Vergrößerung des Talquerschnittes in Kombination mit einer weniger dichten Vegetationsstruktur zu finden ist. Insgesamt zeigt Station KBR (5,5 m) in MZ2 dennoch deutlich gestiegene Windgeschwindigkeiten gegenüber MZ1.

Die Darstellung der Windgeschwindigkeitsklassen (Abb. 83) verdeutlicht die Verschiebung hin zu höheren Windgeschwindigkeiten beim Vergleich der beiden Untersuchungszeiträume an den Stationen KW und KB. Die Referenzstation HÖ außerhalb des Talbereiches und die Referenzstation KBR im Talbereich weisen vor allem in Geschwindigkeitsbereichen von etwa $0,3 \text{ m s}^{-1}$ bis 3 m s^{-1} Schwankungen auf, ein eindeutiges Klassenmaximum kann jedoch nicht festgestellt werden. Betrachtet man die Station KB (5,5 m) und KB (1 m) so zeigen die Werte einen ähnlichen Verlauf bei insgesamt höherem Niveau an Station KB (5,5 m). Die durchweg positiven prozentualen Veränderungen im Bereich zwischen den Klassen $0,3 \text{ m s}^{-1}$ und etwa 4 m s^{-1} zeigen eine Verschiebung zu höheren Windgeschwindigkeiten zu Gunsten von sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten. Der höchste prozentuale Zuwachs erfolgt im an Station KB (5,5 m) in der Klasse von 1 m s^{-1} (1,46 %), an Station KB (1 m) in der Klasse $1,3 \text{ m s}^{-1}$ (1,22 %). Abb. 83 zeigt für die Station KW eine Abnahme von Klassen mit Windgeschwindigkeiten kleiner als $1,4 \text{ m s}^{-1}$ zu Gunsten der Klassen im Bereich zwischen $1,5 \text{ m s}^{-1}$ und etwa 5 m s^{-1} . Den größten prozentualen Zuwachs verzeichnet dabei die Klasse 2 m s^{-1} (1,26 %). Ab der Windgeschwindigkeitsklasse von 5 m s^{-1} finden an allen Messstationen im Talbereich keine nennenswerten Häufigkeitsverschiebungen mehr statt, da Windgeschwindigkeiten in dieser Höhe ohnehin nur äußerst selten erreicht werden.

Bei der Analyse des Gesamtdatensatzes wurden eine Vielzahl von Nächten mit Kaltluftabfluss einbezogen wird, die in Kap. 6.4 noch genauer betrachtet werden. Da der Kaltluftabfluss vom synoptischen

Wind abgekoppelt ist und sich durch geringe Windgeschwindigkeiten charakterisiert, ist zu erwarten, dass die Differenzen zwischen den Stationen im Talbereich (KBR, KW und KB) eingeschränkt auf Zeiträume mit Kaltluftabfluss, eine noch stärkere Annäherung an die Werte der Station HÖ erfahren.

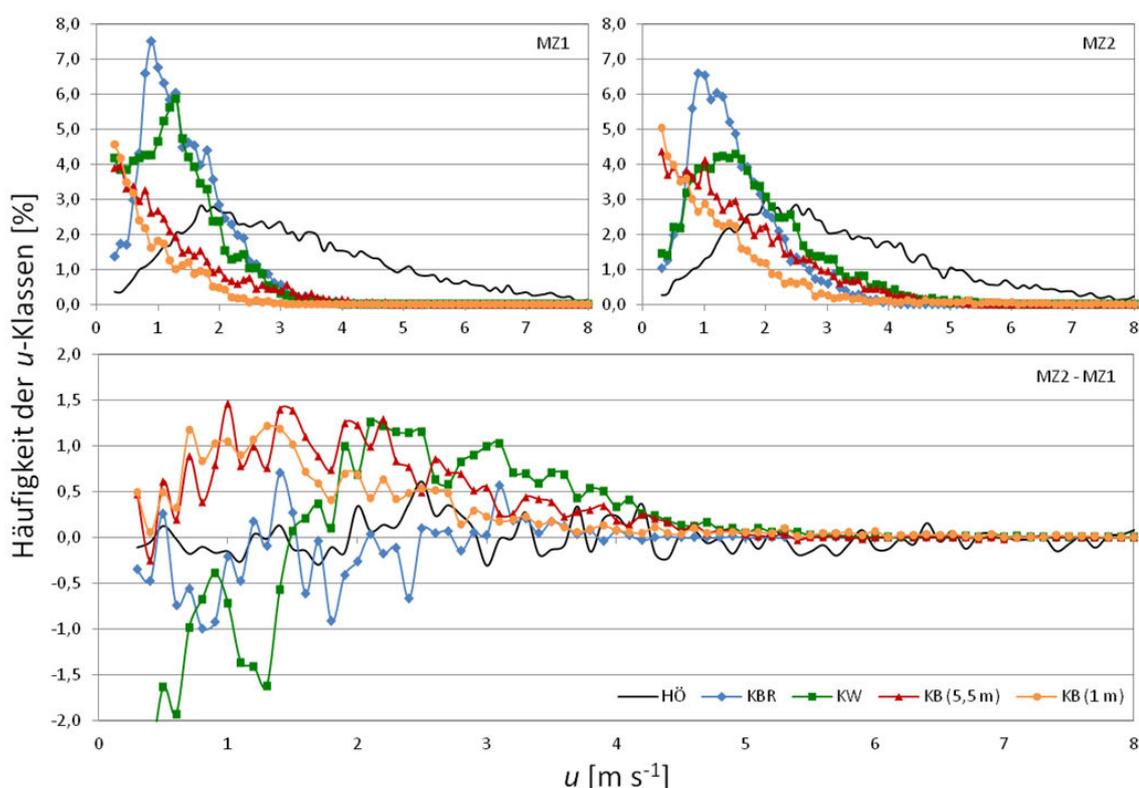


Abb. 83: Prozentuale Auftrittshäufigkeit unterschiedlicher Windgeschwindigkeitsklassen an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt, Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4).

Der diurnale Verlauf der Windgeschwindigkeit gibt Aufschluss darüber, zu welchen Tageszeiten die Windgeschwindigkeit die größte Veränderung – ausgelöst durch die Vegetationsentnahme – erfährt (Abb. 84). Betrachtet man zunächst Abb. 84 in MZ1, so zeigt diese die bekannten Niveaus der Windgeschwindigkeitsdifferenz zur Station HÖ. Die größten Unterschiede zeigen sich zwischen Station HÖ und Station KB (5,5 m), die geringsten zwischen Station HÖ und der frei anströmbaren Station KBR. Diese Verteilung erfährt durch die Vegetationsentnahme in MZ2 eine Veränderung in der Form, dass Station KW die Station KBR als Station mit der geringsten Geschwindigkeitsdifferenz zur Station HÖ ablöst (vgl. z.B. Abb. 82). Abb. 84 (unten) zeigt die Differenzen der Windgeschwindigkeit zwischen MZ2 und MZ1. Dort ist zu erkennen, dass Station KBR im Tagesmittel kaum Veränderungen in der Windgeschwindigkeitsdifferenz zur Station HÖ erfährt. Station KW verzeichnet eine mittlere Veränderung der Differenz der Windgeschwindigkeit von $-0,56 \text{ m s}^{-1}$, was bei gleich bleibenden Windgeschwindigkeiten an Station HÖ einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit um selbigen Wert entspricht. Die größte Veränderung wird an Station KB (1 m) gemessen ($\bar{x} = -5,9 \text{ m s}^{-1}$), Station KB (5,5 m) erfährt ebenfalls eine große Veränderung ($\bar{x} = -0,41 \text{ m s}^{-1}$). Bei der tageszeitlichen Betrachtung zeigt sich zudem an allen Stationen, dass die maximale Windgeschwindigkeitszunahme

während des Tages auftritt, wogegen diese in den Nachtstunden vergleichsweise gering ausfällt: In MZ1 war der größte Unterschied der Windgeschwindigkeiten zwischen der Station HÖ und den Talstationen am Tage, wo hohe Windgeschwindigkeiten im Talbereich durch den Vegetationsbestand reduziert wurden. In MZ2 steigen die Windgeschwindigkeiten am Tage deutlich an, so dass eine derart deutliche höhere Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen Station HÖ und den Talstationen am Tage nicht mehr zu erkennen ist (vgl. Abb. 84, MZ2).

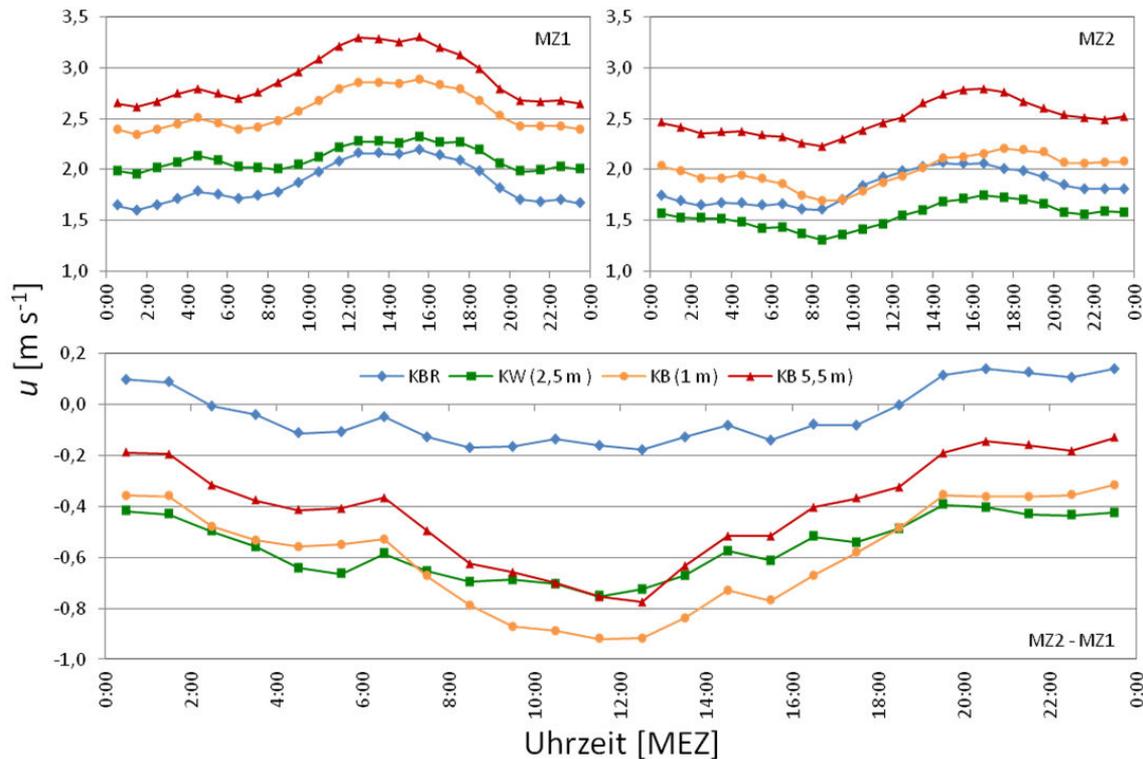


Abb. 84: Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit u zwischen der Station HÖ und den Stationen KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 im Tagesgang sowie deren Differenz (MZ2 - MZ1) auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Gerade bei der Betrachtung von Station KW wird deutlich, dass die bereits beschriebenen Düseneffekte eine Rolle spielen (vgl. Abb. 12., [Bc]). Diese Interpretation wird gestützt durch statistische Analysen, die eine leicht steigende positive Korrelation im Vergleich der beiden Messzeiträume (MZ1 und MZ2) zwischen Station KW und KB (5,5 m) (R^2 in MZ1 = 0,874, R^2 in MZ2 = 0,894) sowie zwischen Station KW und Station KB (1 m) (R^2 in MZ1 = 0,925, R^2 in MZ2 = 0,925) sehen (vgl. Abb. 85, links), im Vergleich der Stationen KBR und KW jedoch eine abnehmende positive Korrelation zeigen (R^2 in MZ1 = 0,92, R^2 in MZ2 = 0,64) (vgl. Abb. 85, rechts). Zu erwarten wäre zunächst ein stärkerer statistischer Zusammenhang zwischen Station KBR und KW, verursacht durch die entnommene Vegetation, da der Wind, wie Station KBR, nun auch Station KW ungehindert erreichen kann. Des Weiteren spricht für das Auftreten von Düseneffekten die Tatsache, dass die Windgeschwindigkeitsdifferenzen im Vergleich der beiden Messzeiträume an den Stationen KW und KB im Vergleich zu Station HÖ zwar vor allem am Tage geringer geworden sind, jedoch eine derartige Annäherung der Windgeschwindigkeit an die Station HÖ in der Nacht nicht zulassen. Hier kommen, neben ohnehin niedrigeren nächtlichen Windgeschwindigkeiten aufgrund verringerter konvektiver Durchmischung, nächtliche Kaltluftabflüs-

se zum Tragen, die aufgrund ihrer geringen Windgeschwindigkeit eine Fließgeschwindigkeitssteigerung von vergleichsweise geringem Umfang erfahren.

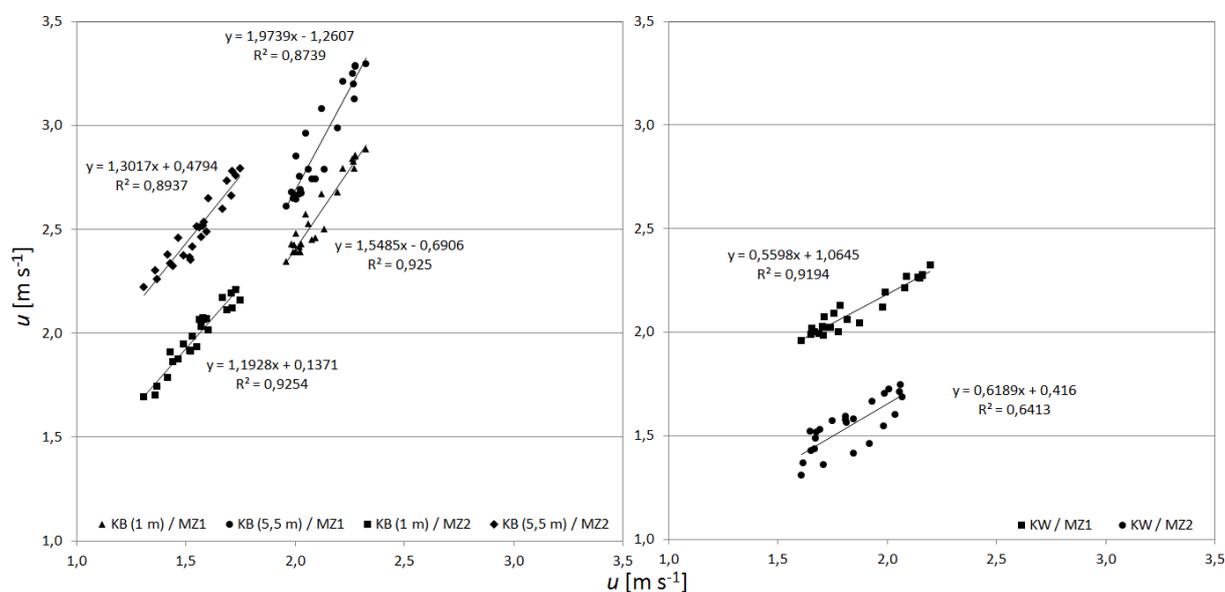


Abb. 85: Korrelationen (auf Basis der Differenzen der Windgeschwindigkeit zwischen Station KBR, KW, KB und Station Hö) der Differenz der Windgeschwindigkeit u zwischen der Station KW und den Stationen KB (5,5 m) und KB (1 m) (links) und Station KBR und Station KW (rechts) in MZ1 und MZ2 auf Basis von tageszeitlichen Mittelwerten.

In der Auswertung der Windrichtungshäufigkeiten (Abb. 86) sind die Veränderungen des Vegetationsbestandes im Kannegießerbachtal deutlich abzulesen. Durch die Entnahme von Vegetation kommen in MZ2 diejenigen Windrichtungen häufiger vor, die dem Talverlauf folgen (SW bis NE), da das Tal im Bereich der Stationen KW und KB frei durchströmt werden konnte. Die Station KBR zeigt in den beiden Messzeiträumen identische Windrichtungshäufigkeiten, ein Fakt der die Umfeldveränderungen als Ursache des Ergebnisses an den anderen Talstationen eindeutig manifestiert. Wohingegen Station Hö im MZ2 einen leichten Rückgang des südwestlichen Sektors zugunsten des westlichen Sektors verzeichnet (-4,3 %), bildet sich an den Stationen KW und KB der südwestliche Sektor deutlicher heraus. Dabei zeigen die Werte an Station KW, wie auch schon bei der Erhöhung der Windgeschwindigkeit (vgl. Abb. 84), die deutlichste Steigerung der Häufigkeit südwestlicher Windrichtungen (+10,8 %). Diese Steigerung geht im Wesentlichen zu Lasten des westlichen Sektors. Der entnommene Schwarzerlenbestand führte offensichtlich zu einer Umlenkung der Luftmassen, so dass diese Station KW vermehrt aus westlichen Richtungen anströmten. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 107 zu erahnen und zeigt sich vor Ort durch eine weniger dicht bewachsene, parallel zu Talachse verlaufende Schneise im ansonsten dicht bewachsenen Talbereich. An Station KB (5,5 m) findet sich ein ähnlicher, wenn auch weniger deutlicher Effekt, wobei die Ablenkung durch den Vegetationsbestand in MZ1 vermehrt nach Süden und Südosten erfolgte. Der westliche und südwestliche Sektor erfuhr an Station KB (5,5 m) in der Summe eine Steigerung um 10,6 %, der südöstliche und südliche Sektor im Gegenzug in der Summe Verluste der Häufigkeit von 11,6 %. Station KB (1 m) erfährt durch die Veränderung der Vegetationsstruktur im Stationsumfeld nur sehr geringe Veränderungen, die höchste Häufigkeitsänderung beträgt lediglich 2,6 %. Dies zeigt die bereits mehrfach angesprochene, vergleichs-

6. Ergebnisse

weise hohe Bedeutung des Wiesenbestandes auf die Charakteristika des Messtandortes im Vergleich zur Baumvegetation, die entnommen wurde. Die Wiesenvegetation erfuhr, bedingt durch die Entnahme des Baumbestandes und den daraus resultierenden Strahlungsgewinn in Bodennähe, zusätzlich ein verstärktes Wachstum im Sommer aufgrund der bei höherer Einstrahlung vermehrten Photosyntheseaktivität (z.B. FREY & LÖSCH 2010).

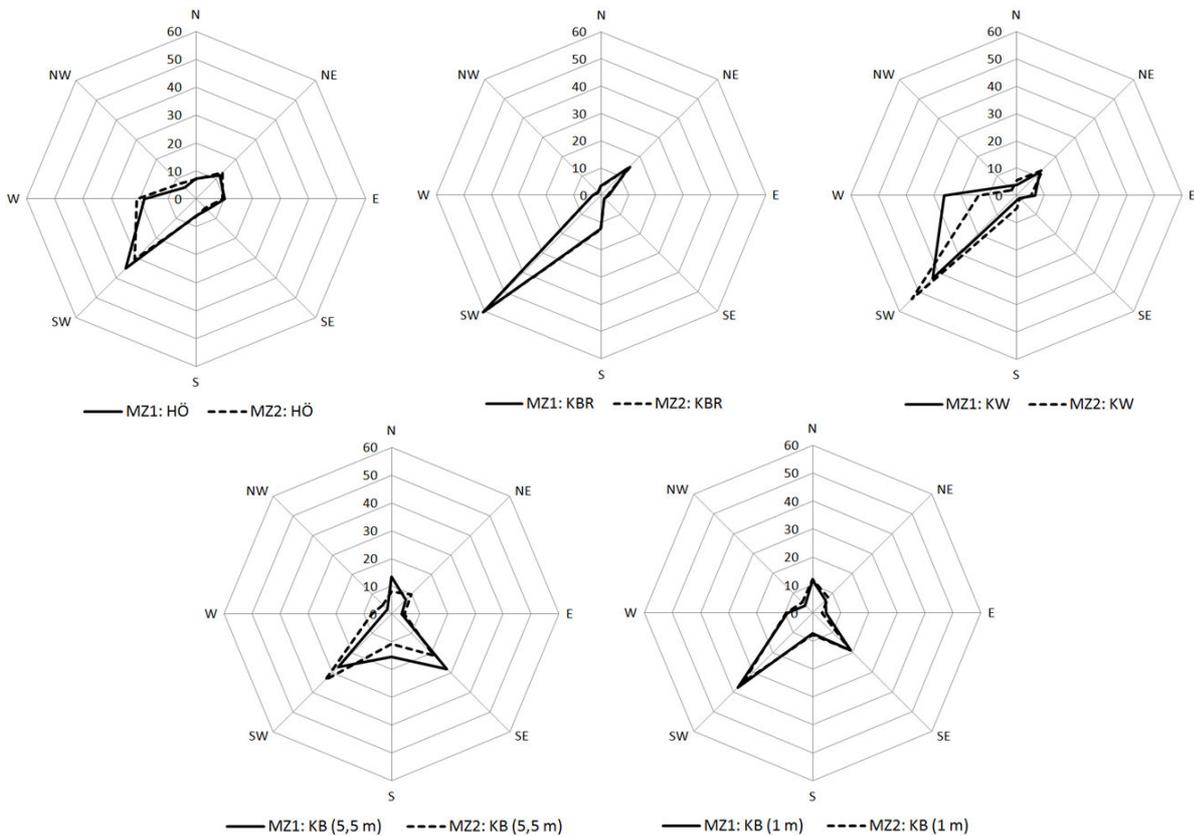


Abb. 86: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen HÖ, KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 auf der Basis von 10 min-Mittelwerten.

6.3.2 Modifikation von Temperatur und Feuchte

Abb. 87 zeigt die Differenz der Lufttemperatur zwischen der Station HÖ und den Stationen KBR und KW. Station KBR zeigt vergleichsweise leicht abnehmende Differenzen der Lufttemperatur zur Station HÖ. Da dort keine Vegetationsveränderung stattgefunden hat, sind diese Unterschiede unterschiedlichen Witterungsverläufen der Jahre geschuldet. Insgesamt betrachtet ändert sich die Lufttemperatur an Station KBR nur wenig. An Station KW (2,5 m) und KW (0,5 m) sind dagegen sinkende Differenzen zu erkennen, was bei gleichbleibenden Temperaturverhältnissen auf der HÖ steigenden Temperaturen an Station KW entspricht. Grund dieses Ergebnisses ist die durch die Vegetationsentnahme verringerte Verschattung des Talbodens. Der Talboden erfährt in Folge direkter solarer Einstrahlung eine stärkere Erwärmung am Tage. Dementsprechend erwärmt sich die bodennahe Luftschicht und führt zu höheren mittleren Lufttemperaturen an Station KW. An Station KW (0,5 m) ist erneut deutlich der Einfluss der Wiesenvegetation zu erkennen, die vor allem in den Sommermonaten zu großen Tempe-

raturunterschieden zwischen der Station KW (0,5 m) und der Station HÖ führt. Im Winter werden die Differenzen mit abnehmender Vegetationshöhe geringer (vgl. Abb. 30). Da die Talsohle des Kannegießerbachtals vor allem in den Sommermonaten stark vernässt ist, steht ausreichend Flüssigkeit für die Evaporation der Talvegetation zur Verfügung. Bei der Verdunstung von Wasser wird den Pflanzenoberflächen Energie entzogen, was zur Abkühlung führt. Wären diese kühlenden Effekte z.B. bei einem trockenen Talboden, weniger stark ausgeprägt, wäre eine weitere Verringerung der Lufttemperaturdifferenzen zwischen Station HÖ und Station KW zu erwarten.²⁵

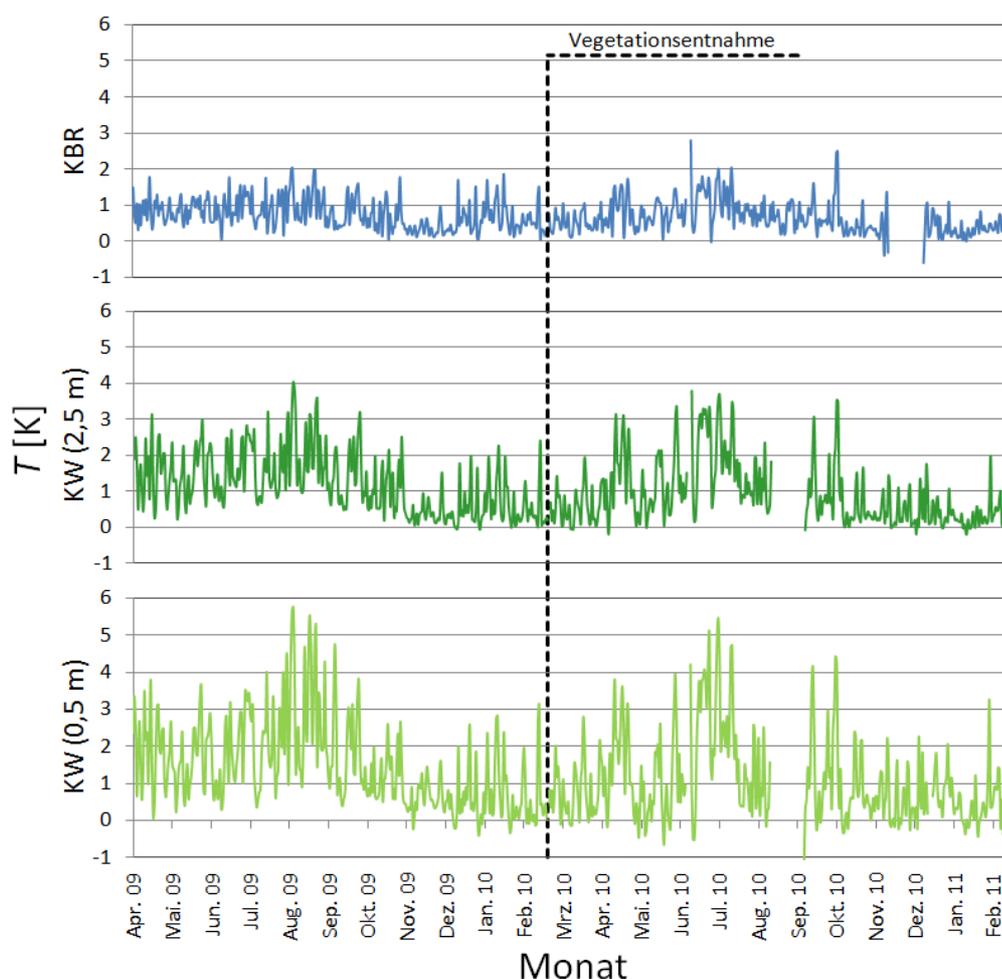


Abb. 87: Differenz der Lufttemperatur T zwischen den Stationen KBR und KW und der Station HÖ im Untersuchungszeitraum vom 01.04.2009 bis zum 28.02.2011 auf Basis von Tagesmittelwerten.

An der Tatsache, dass ein statistischer Zusammenhang zwischen der direkten solaren Einstrahlung Q_k und der Lufttemperatur T vorhanden ist, besteht wenig Zweifel. Als Nachweis dafür, wie dieser Zu-

²⁵ Es erfolgte eine Überprüfung der Ergebnisse auf Signifikanz der Mittelwerte der Grundgesamtheit mittels Student-t-Test (BAHRENBURG et al. 2010). Dabei wurden die folgenden Werte errechnet: Station KBR: t-Wert 3,76 / p-Wert; Station KW (2,5 m) t-Wert 5,53 / p-Wert < 0,001; Station KW (1 m) t-Wert 8,12 / p-Wert < 0,001.

sammenhang durch Vegetationseffekte beeinflusst wird, sind in Abb. 88 die Messwerte der direkten solaren Einstrahlung an Station BU und der Lufttemperatur an Station KW (0,5 m) dargestellt. Abgebildet ist der Zusammenhang der beiden Klimaelemente auf Basis der Gesamtdaten (① und ②), auf Basis von Tageswerten (③ und ④) und auf Basis von sommerlichen Tageswerten (⑤ und ⑥), jeweils in MZ1 und MZ2. In MZ1 zeigen sowohl die Gesamtdaten ($R^2 = 0,313$), als auch die Tageswerte ($R^2 = 0,359$) und die sommerlichen Tageswerte ($R^2 = 0,352$) einen deutlichen statistischen Zusammenhang zwischen der Strahlung und der Lufttemperatur. Dieser positive Zusammenhang erhöht sich durch die Entnahme von Vegetation vor MZ2 (R^2 der Gesamtdaten = 0,386) und erreicht bei der Betrachtung der sommerlichen Tagesdaten sein Maximum ($R^2 = 0,51$).

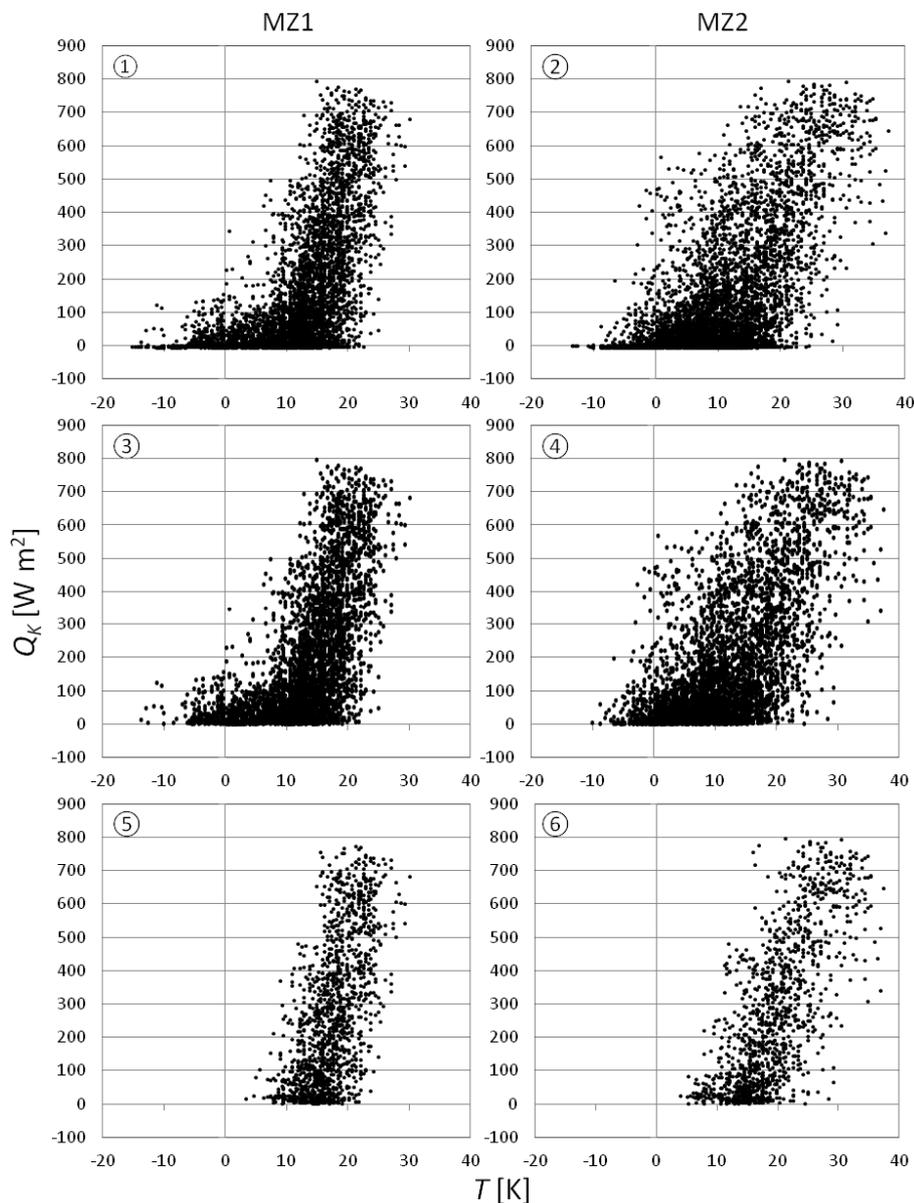


Abb. 88: Zusammenhang der kurzwelligen Strahlung Q_k an Station BU und der Lufttemperatur T an Station KW (0,5 m) auf Basis des Gesamtdatensatzes (oben), der Daten am Tag (06:30 Uhr bis 18:30 Uhr MEZ, Mitte) und der Daten am Tag im Sommer (Jun. bis Aug., unten) jeweils in MZ1 und MZ2. Die Auswertung erfolgte aus Basis von 60-min Mittelwerten.

Die Zusammenhänge lassen sich bei genauerer Betrachtung der Vegetationsänderungen im Teilbereich nachvollziehen. Im MZ1 fanden sich in direkter Umgebung von Station KW (0,5 m) hoch aufwachsende Baumbestände, die zudem in diesem Zeitraum ein Maximum an Belaubung aufwiesen. Der Teil an direkter solarer Einstrahlung der die Erdoberfläche in der Umgebung von Station KW (0,5 m) erreichte war gering, die Erwärmung der Erdoberfläche zugunsten der Erwärmung der Bestandsoberfläche stark reduziert. Dementsprechend wurde die bodennahe Luftschicht vergleichsweise gering erwärmt. In MZ2 waren die verschattenden Baumbestände aus der direkten Umgebung der Station KW entfernt. Der Talboden erfuhr abhängig von der Tageszeit und den Witterungsbedingungen größere Mengen direkter solarer Einstrahlung und wurde erwärmt, was zu einer Erwärmung der bodennahen Luftschicht und folglich zu höheren Temperaturwerten an Station KW (0,5 m) führte. Berücksichtigt man die Tatsache, dass die Wiesenvegetation in beiden Messzeiträumen unverändert blieb und evtl. durch eine höhere Einstrahlung die Biomasseproduktion der Wiesenvegetation in MZ2 gar erhöht war, so liegt die Annahme nahe, dass der positive statistische Zusammenhang alleine bei der Betrachtung der Baumvegetation ohne die Effekte der Wiesenvegetation höher ausgefallen wäre. Auf einen Eingriff in die Wiesenvegetation wurde in der vorliegenden Studie verzichtet. Die höchste Steigerungsrate der Korrelation ist konsequenterweise im Sommer am Tag zu verzeichnen, da die kurzweilige Einstrahlung aufgrund des Sonnenstandes am höchsten ist.

Wie bereits in Abb. 82 bezüglich der Windgeschwindigkeit bemerkt, so erfährt Station KW (0,5 m) auch hinsichtlich der Lufttemperatur die größten Veränderungen, da sich dort der Einfluss der entnommenen Vegetation am stärksten bemerkbar macht. Die Differenz der Mittelwerte der Lufttemperatur in Vergleich der beiden Messzeiträume bleibt nahezu gleich (1,4 K und 1,5 K). Allerdings finden sich in MZ2 größere Differenzen der mittleren Maxima und Minima, was sich in einer stark gestiegenen Differenz der Amplitude der Lufttemperatur ausdrückt (3,7 K). Die Differenz des mittleren Minimum steigt von 2,1 K auf 2,9 K. Die Differenz des mittleren Maximum sinkt von 0,9 K auf -0,8 K, wobei das negative Vorzeichen zugleich einen Anstieg des Temperaturniveaus an der Station KW (0,5 m) über das der Station HÖ impliziert.

Abb. 90, die die Differenzen der Lufttemperatur im diurnalen Verlauf zeigt, bestätigt einen Anstieg der mittleren Lufttemperatur an Station KW (0,5 m) im MZ2 in der Zeit zwischen 11:00 Uhr und 16:00 Uhr MEZ über die Werte von Station HÖ. Eine Erklärung dafür ist die durch die entfernten Bäume fehlende Verschattung der Station. Der Energieumsatz der durch die Vegetationsentnahme erhöhten Einstrahlung am Tag findet an der Bestandsoberfläche statt, die zumindest im Sommerhalbjahr mit der Höhe der Station KW (0,5 m) zusammenfällt. Eine Erklärung für steigende Differenzen der mittleren Lufttemperaturminima, d.h. niedrigere mittlere Temperaturniveaus an Station KW (0,5 m) in MZ2 im Vergleich zu MZ1, sprechen für eine stärkere Auskühlung der Erdoberfläche und einer damit einhergehenden Reduktion der bodennahen Lufttemperaturen. Abb. 90 zeigt, dass vor allem steigende nächtliche Differenzen der mittleren Lufttemperatur für diese Differenzsteigerung verantwortlich sind. Durch das Fehlen der Baumvegetation findet in MZ2 eine ungehinderte nächtliche Ausstrahlung an der Erd- bzw. Bestandsoberfläche statt, die in Abb. 89 zu einer um 1,7 K sinkenden Differenz der Lufttemperaturminima im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2 führt.

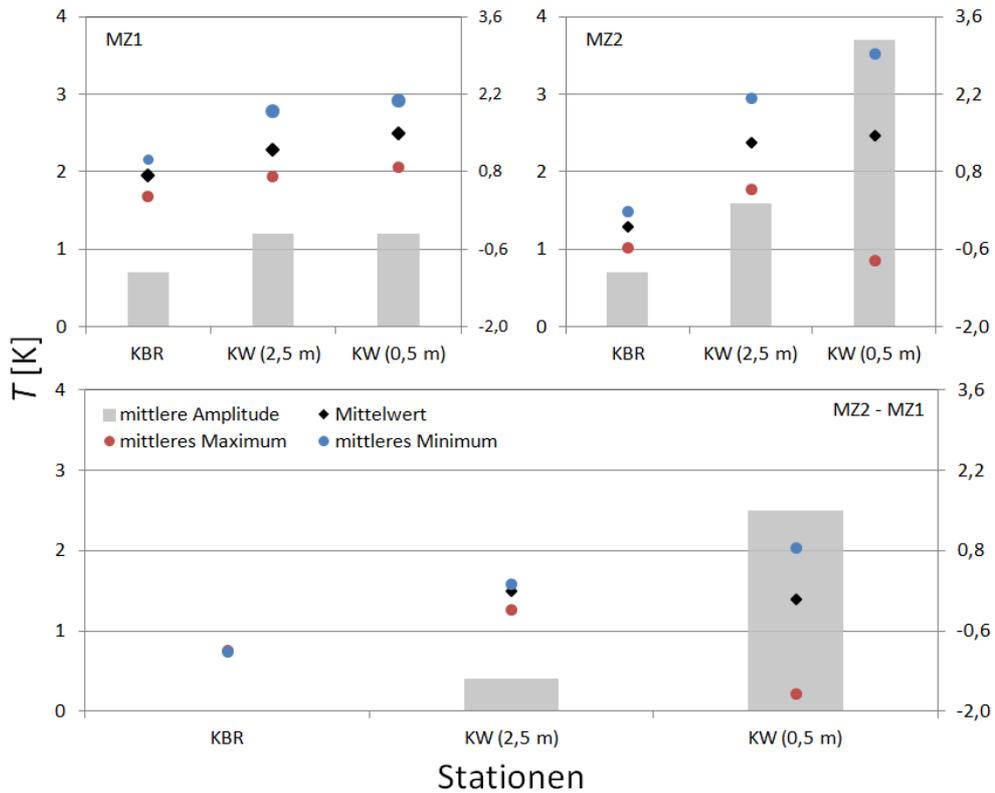


Abb. 89: Differenz des Mittelwertes, des mittleren Maximums, des mittleren Minimums und der Amplitude (Differenz aus den Differenzen von mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Lufttemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von Tagesmittelwerten.

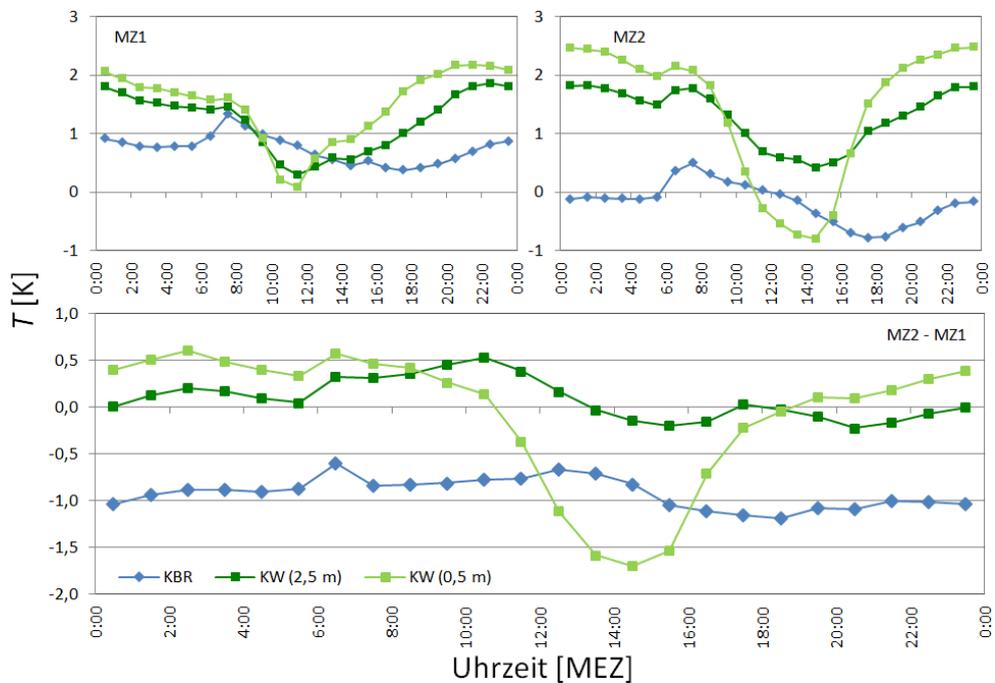


Abb. 90: Differenz der mittleren Lufttemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) im Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Die geringsten Differenzveränderungen des Lufttemperaturmittelwertes sowie der Maxima und Minima erfährt Station KW (2,5 m). Die Tendenzen, die an Station KW (0,5 m) noch so deutlich ausgefallen sind, sind hier nur andeutungsweise zu erkennen. Folgers lässt sich daraus ein deutlicher Effekt der entnommenen Vegetation auf die bodennahe Luftschicht, der sich aber nicht in der gesamten Talatmosphäre in Bezug auf die Lufttemperatur bemerkbar macht. Bereits in einer Höhe von 2,5 m ist er zwar noch nachweisbar, aber sehr gering. Bei der Betrachtung von Station KBR fällt auf, dass sich die Differenzen der mittleren Lufttemperatur in Bezug auf Maximum, Mittelwert und Minimum nahezu gleichmäßig verringert haben. Da die Station HÖ höhere mittlere Lufttemperaturen aufweist, hat sich die Temperatur an Station KBR demnach erhöht (0,9 K) und liegt in MZ2 vielfach über der an Station HÖ. Die Gründe dafür sind in witterungsbedingten Temperaturunterschieden der beiden Vergleichszeiträume zu suchen. Abb. 90 zeigt, dass die Temperaturen an Station KBR die ganze Nacht über sowie am Nachmittag höher sind als die an Station HÖ. Lediglich in der Zeit von 06:00 Uhr bis 12:00 Uhr MEZ liegt das Temperaturniveau an Station KBR tiefer.

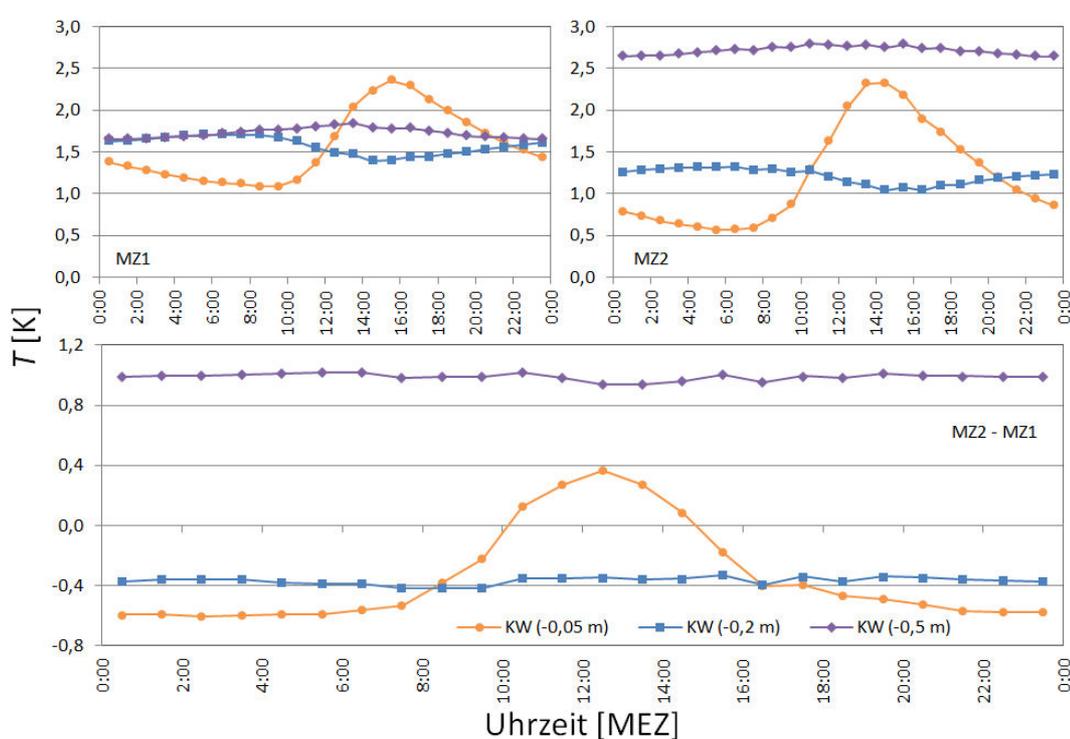


Abb. 91: Differenz der mittleren Bodentemperatur T zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Die Differenzen der mittleren Bodentemperaturen zwischen Station HÖ und Station KW im Vergleich der beiden Messzeiträume sind in Abb. 91 dargestellt. Wie bereits aus Abb. 52 bekannt ist der Tagesgang der meteorologischen Parameter außerhalb des Erdbodens an den Temperaturwerten der Stationen HÖ (-0,5 m) nicht und an der Station KW (-0,5 m) allenfalls andeutungsweise, aufgrund der hohen Bodenfeuchte und der damit einhergehenden guten Wärmeleitfähigkeit, zu erkennen. Auch in Abb. 91, bei Differenzierung von MZ2 und MZ1, ist lediglich ein sehr geringer Anstieg der Bodentemperatur in der Mittagszeit abgebildet. Insgesamt sind die Bodentemperaturen in einer Messtiefe von

-0,5 m im Vergleich der beiden Messzeiträume um etwa 1 °C gesunken. Auf den anderen Messniveaus (-0,2 m und -0,05 m) zeigen sich höhere Temperaturen im Vergleich von MZ2 und MZ1. Einzige Ausnahme ist die Zeit von ca. 10:00 Uhr bis 15:00 Uhr, in der die Temperatur an Station KW (-0,05) um bis zu 0,4 °C niedriger ist. Vor allem in der Nacht, fällt der Temperaturanstieg in einer Messtiefe von -0,05 m deutlich aus, obwohl man zunächst sinkende Bodentemperaturen aufgrund einer gesteigerten Ausstrahlung der Erdoberfläche im Rahmen der Entnahme der Baumvegetation erwarten würde. Hier scheint allerdings der Einfluss der Wiesenvegetation recht groß zu sein, die in MZ2 an Station KW um ein vielfaches höher wächst, als noch in MZ1. Auffällig ist ein insgesamt deutlich ausgeprägter Tagesgang – und damit eine ausgeprägtere Tagesamplitude - der Bodentemperatur in einer Messtiefe von -0,05 m in MZ2, der im Wesentlichen durch eine ungehinderte tägliche Ein- und nächtliche Ausstrahlung verursacht wird.

Bezüglich der Relativen Feuchte ergibt sich durch die Abhängigkeit dieser von der Lufttemperatur sowohl bezüglich der Differenzen zwischen Station HÖ und KW im Vergleich der Messzeiträume, als auch bezüglich der Differenzen zwischen Station HÖ und KBR keine neuen Erkenntnisse (vgl. Abb. 92 und Abb. 93).

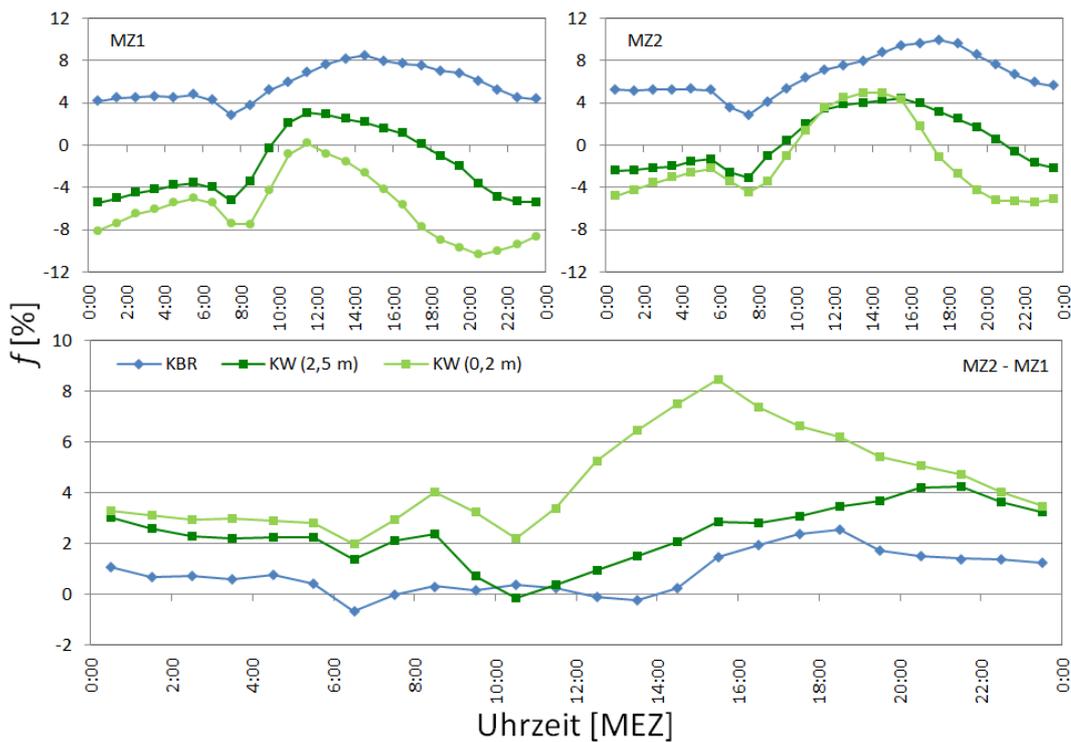


Abb. 92: Differenz der mittleren Relativen Feuchte f zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenzen (unten) im Tagesgang auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

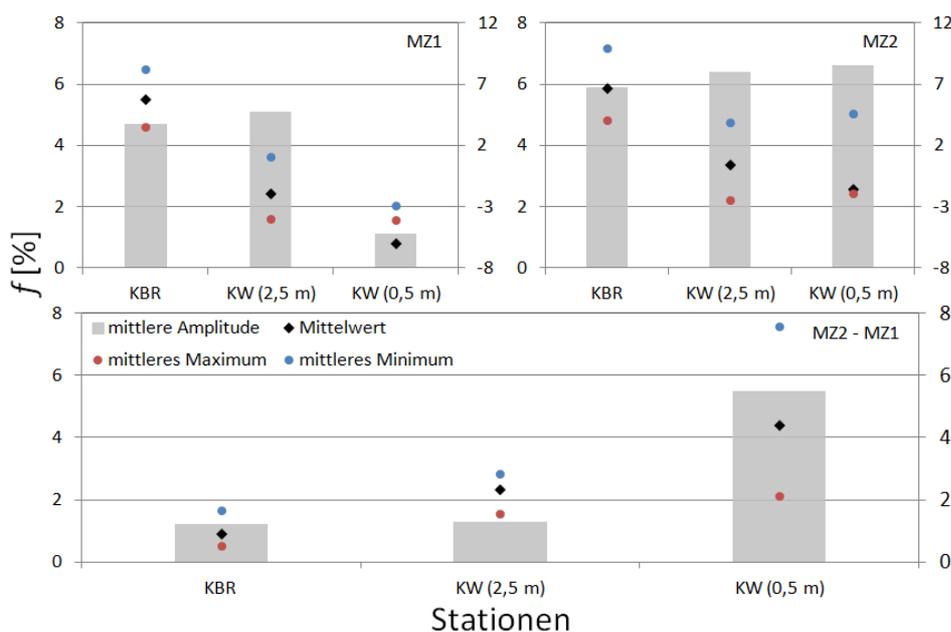


Abb. 93: Differenz des Mittelwertes, des mittleren Maximums, des mittleren Minimums und der Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Relativen Feuchte f zwischen Station HÖ und den Stationen KBR und KW in MZ1 (oben links) und MZ2 (oben rechts) sowie deren Differenz (unten) auf Basis von Tagesmittelwerten.

6.4 Vegetationseffekte auf den Kaltluftabfluss

6.4.1 Vorbemerkung

Da der Kaltluftabfluss im Kannegießerbachtal als Strömung vom synoptischen Wind im Idealfall vollständig abgekoppelt ist, muss zur Definition der Auswirkungen durch Vegetationsveränderungen eine Referenzstation im kaltluftbeeinflussten Talbereich herangezogen werden, in deren Umfeld keine Vegetationsveränderungen vorgenommen wurden. Die Station HÖ, die als Referenzstation für den Gesamtdatensatz diente, konnte in Bezug auf den Kaltluftdatensatz nicht als solche verwandt werden, da Veränderungen der Klimaelemente an der Station HÖ nach den angewandten Filterkriterien des Kaltluftdatensatzes nicht zwingend Auswirkungen auf den Kaltluftstrom haben. Erst bei großer Intensität der Veränderungen wird der Kaltluftstrom beeinflusst.

6.4.2 Modifikation der Fließgeschwindigkeit

Der Einfluss auf die Windgeschwindigkeit durch die Vegetationsentnahme im Umfeld der Stationen KW und KB (vgl. Kap. 5.1.2) wurde in Kap. 6.3.1 hinsichtlich des Gesamtdatensatzes untersucht. Dabei zeigten sich erwartungsgemäß steigende Windgeschwindigkeiten in MZ2 gegenüber MZ1. Bei der Betrachtung des Kaltluftdatensatzes in Abb. 94 bestätigt sich wie erwartet diese Annahme. Betrachtet man Station KB (5,5 m) so zeigen sich in beiden Messzeiträumen steigende Häufigkeiten mit abnehmender Fließgeschwindigkeit der Kaltluft. Im MZ1 liegt das Maximum der Fließgeschwindigkeiten in kaum messbaren Bereichen. In MZ2 ändert sich an dieser Tatsache nur wenig, allerdings steigen

die Auftrittshäufigkeiten der Fließgeschwindigkeiten im unteren Geschwindigkeitssektor ($0,3 \text{ m s}^{-1}$ bis $0,8 \text{ m s}^{-1}$) deutlich an, so dass etwa 10 % der Werte auf die Geschwindigkeitsklasse $0,3 \text{ m s}^{-1}$ entfallen. Deutlicher ist die Verschiebung hin zu höheren Geschwindigkeitswerten an Station KW zu erkennen. Lag im MZ1 die häufigste gemessene Windgeschwindigkeit in der Klasse $0,4 \text{ m s}^{-1}$ (13,3 %) so findet sich diese in MZ2 in der Klasse $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (15,9 %), die am häufigsten auftretende Geschwindigkeitsklasse stimmt an Station KW und KBR in MZ2 überein. Dies spricht für einen ungehinderten Abfluss der Kaltluft im Bereich von Station KW. Bereits in Kap. 6.1.1, bei der Betrachtung des Gesamtdatensatzes, lag die Vermutung nahe, dass an Station KW aufgrund des durch Vegetation eingegengten Talverlaufs Düseneffekte des synoptischen Windes auftreten können, da an Station KW höhere Windgeschwindigkeitsklassen verhältnismäßig häufiger auftreten als an Station KBR. Dies ist auch bei der Betrachtung des Kaltluftdatensatzes in Abb. 94 der Fall. Wohingegen an Station KBR das Auftreten von Fließgeschwindigkeiten $> 1,2 \text{ m s}^{-1}$ eine vernachlässigbare Häufigkeit zeigt, sind diese an Station KW deutlich zu verzeichnen. Dort treten Geschwindigkeiten von bis zu $1,5 \text{ m s}^{-1}$ auf.

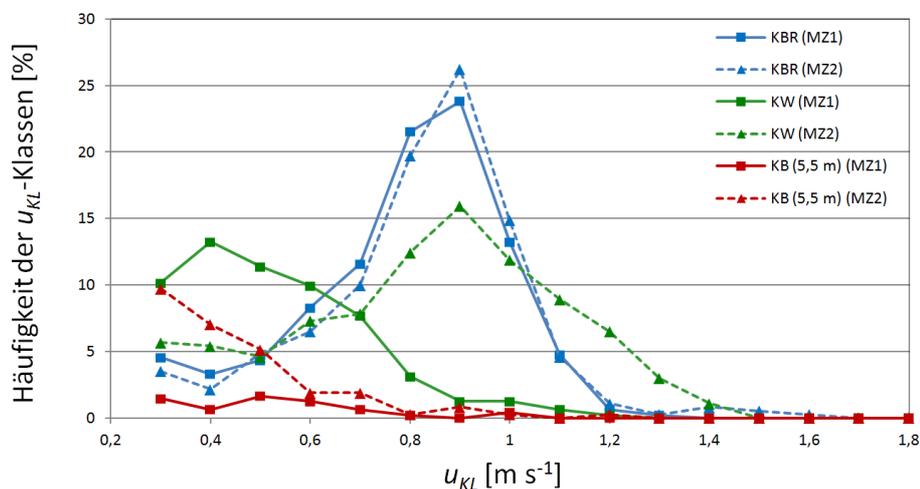


Abb. 94: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an den Stationen KBR, KW und KB in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt.

Auch wenn Düseneffekte in Bezug auf abfließende Kaltluft bislang nicht empirisch belegt wurden und das Fließverhalten der Kaltluft strikt von dem nicht katabatischer Winde abzugrenzen ist (vgl. Kap. 3.4), so deuten die an Station KW auftretenden Windgeschwindigkeitsklassen auf eine kleinräumig begrenzte Erhöhung der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft hin. Diese ist durch die Einengung des Kaltluftstromes zu begründen. Das beschriebene Phänomen ist in Abb. 11 [Bd / Cd] dargestellt. Station KBR zeigt im Vergleich der beiden Messzeiträume eine nahezu unveränderte prozentuale Verteilung der Windgeschwindigkeit in den einzelnen Klassen. Die in 23,8 % aller Fälle in MZ1 und in 26,2 % aller Fälle in MZ2 am häufigsten auftretende Windgeschwindigkeitsklasse liegt bei $0,9 \text{ m s}^{-1}$. Diese hohe Übereinstimmung unterstreicht noch einmal die gute Eignung der Station KBR als Kaltluft-Referenzstation im Kanneißerbachtal.

Betrachtet man die Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten im Verlauf der Nacht an Station KW relativ zu Station KBR im Vergleich der beiden Messzeiträume (vgl. Abb. 95), so ist das Ergebnis

für MZ1 eine nahezu gleichmäßige Differenz der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Nachtverlauf. An Station KW zeigen sich etwa $0,3 \text{ m s}^{-1}$ niedrigere Fließgeschwindigkeiten als an Station KBR. Im MZ2 hat sich die Fließgeschwindigkeit an Station KW, wie auch in Abb. 94 ersichtlich – der von Station KBR angenähert. In der ersten Nachthälfte bis 00:30 Uhr MEZ liegen die Windgeschwindigkeiten an Station KW über denen von Station KBR. In der zweiten Nachthälfte ab 01:30 Uhr MEZ ist die Differenz zu Station KBR zwar immer noch deutlich kleiner geworden, die aufgezeichneten Geschwindigkeiten der Kaltluft liegen aber über denen an Station KBR. Aus Abb. 70 ist ersichtlich, dass die Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft an Station KBR und KW im Verlauf der Nacht sinken, wobei der Rückgang an Station KW größere Schwankungen aufweist.

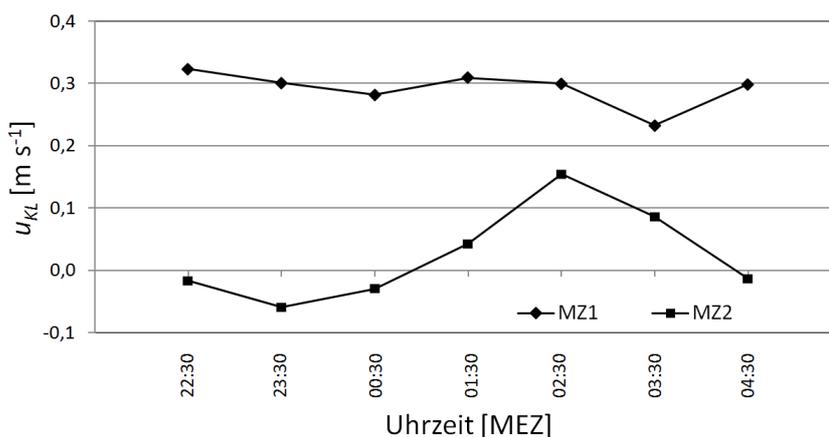


Abb. 95: Differenz der mittleren Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} im Nachtgang an den Stationen KBR und KW in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Bei der Differenzierung der Messzeiträume in Abb. 95 wird deutlich, dass die Schwankungen in der Abflussgeschwindigkeit in MZ2 deutlich größer sind, was sich einer größeren Amplitude der Fließgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Stationen KBR und KW zeigt. In MZ1 sickerte die Kaltluft im Nachtverlauf kontinuierlich durch den dichten Vegetationsbestand in der Umgebung von Station KW, in MZ2 zeigt sich ein eher intermittierender Fließvorgang mit hoher Turbulenz (vgl. Kap. 3.4). Die Amplitude der Differenz betrug in MZ1 lediglich $0,09 \text{ m s}^{-1}$. In MZ2 dagegen stieg die Amplitude auf $0,26 \text{ m s}^{-1}$ an.

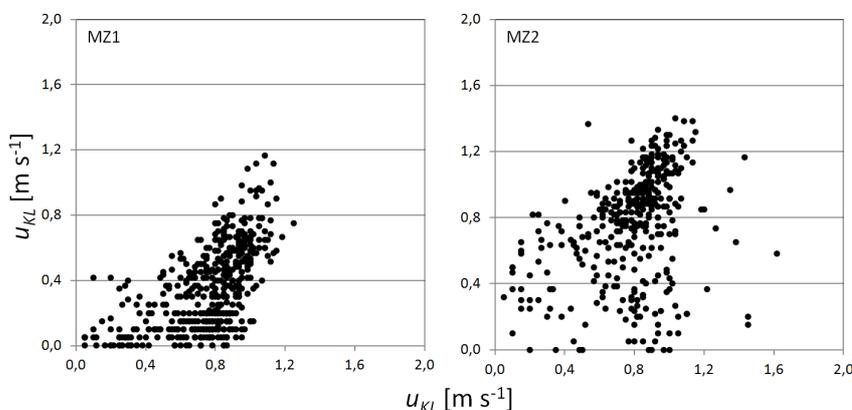


Abb. 96: Korrelation / Streudiagramm der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Eine deutlich größere Streuung, entsprechend der Vergrößerung der Amplitude der Fließgeschwindigkeit in Abb. 95, ist auch anhand der korrelierten Werte von Station KBR und KW in MZ2 zu erkennen (vgl. Abb. 96). In MZ1 ist eine Rechtsverschiebung der Punktwolke, aufgrund der im Mittel größeren Windgeschwindigkeiten an Station KBR im Vergleich zu Station KW, ersichtlich. In MZ2 nähern sich die Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft an Station KBR und KW deutlich an, wobei die Streuung zunimmt.

Bei der Auswertung der Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft im Jahresverlauf, findet sich das Ergebnis steigender mittlerer Fließgeschwindigkeiten im Vergleich der beiden Messzeiträume. Während in MZ1 im Mittel der Monate April bis Oktober 2009 eine Differenz von $0,41 \text{ m s}^{-1}$ zwischen den Stationen KBR und KW zu verzeichnen war, ist in MZ2 nahezu keine Differenz mehr feststellbar ($0,03 \text{ m s}^{-1}$). Betrachtet man die verschiedenen Monate, so zeigen sich an Station KW in MZ1 steigende positive Differenzen mit zunehmendem LAI (vgl. Kap. 5.1.2) der Baumvegetation und zunehmender Bestandshöhe der Wiesenvegetation. Die maximale Fließgeschwindigkeitsdifferenz der Kaltluft wird in den Monaten August und September erreicht. Im MZ2 dreht sich dieser Sachverhalt ins Gegenteil. Gerade in den Sommermonaten gleichen sich die an Station KBR und KW gemessenen Fließgeschwindigkeiten an, wobei mit zunehmend dichter Vegetation im Sommerverlauf die Windgeschwindigkeiten an Station KW die der Station KBR übersteigen, die Differenz der Windgeschwindigkeit im Vergleich der Stationen KBR und KW wird negativ (vgl. Abb. 97). Die Gründe hierfür wurden bereits ausführlich beschrieben und zeigten sich auch schon in Kap. 6.1.1.

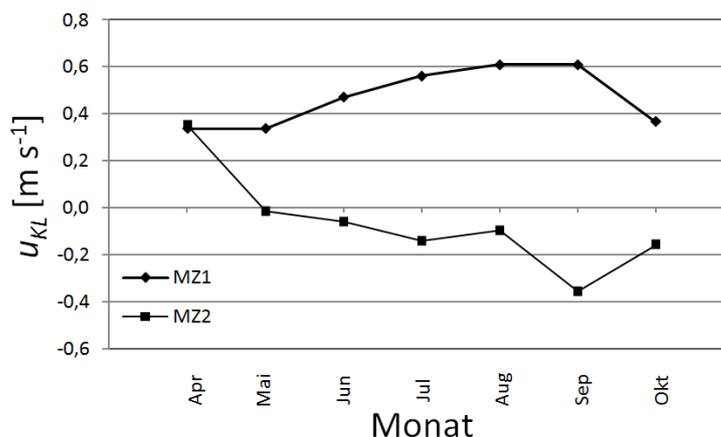


Abb. 97: Monatliche Differenzen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zwischen Station KBR und KW in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Um weitere Kenntnisse zur Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zu gewinnen, wurden neben der Datenauswertung der Stationen Talquerprofilmessungen vorgenommen. Die Messungen fanden an Messpunkt M3 (vgl. Abb. 33) statt, der im Lee der Stationen KB und KW liegt. Die Messungen wie in Abb. 98 dargestellt fanden in MZ1 (15.07.2009, 22.09.2009) statt, so dass der Großteil des Talquerschnitts von hoch aufwachsender dichter Vegetation bestanden war. Für die Messungen wurden Nächte mit idealtypischen Witterungsbedingungen ausgesucht, so dass hohe Abflussgeschwindigkeiten der Kaltluft zu erwarten waren. Dementsprechend erreicht die Kaltluft an Messpunkt 1 im Rahmen der Querprofilmessung in Abb. 98 eine mittlere Fließgeschwindigkeit von $1,3 \text{ m s}^{-1}$. Wie bereits im Zu-

sammenhang mit Abb. 94 erwähnt, erreicht die Kaltluft selbst im Bereich der frei anströmbaren Station KBR solche Werte nur in Ausnahmefällen, was erneut für das Auftreten von Kanalisierungseffekten im Bereich von Station KW spricht. Während der Messungen an Messpunkt 1 zeigen selbst die Minima der gemessenen Fließgeschwindigkeiten Werte von 1 m s^{-1} . Mit zunehmend dichter werdender Vegetation zur Talachse hin nimmt die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft kontinuierlich ab und erreicht dort, wo talaufwärts im Luv der Messung der dichteste Vegetationsbestand vorzufinden ist, einen Mittelwert von $0,3 \text{ m s}^{-1}$. Der dichte Baum, Busch und Wiesenbestand verursacht eine deutliche Reduktion der mittleren Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft von bis zu 1 m s^{-1} in der Profilmessung. Ohne die kanalisierende Wirkung der durch Vegetation hervorgerufenen Verringerung des Talquerschnitts würde die Differenz vermutlich geringer ausfallen, an deren Nachweisbarkeit besteht jedoch kein Zweifel. Betrachtet man den Talverlauf weiter talaufwärts so lassen sich unter Berücksichtigung des laminaren Kaltluftfließens zudem die höheren Fließgeschwindigkeiten an Messpunkt 1 im Vergleich zu Messpunkt 2 und 3 erklären. Die Kaltluft nimmt bei Ihrem Fluss talabwärts im Bereich der Profilmessung aus Abb. 98 eine Linkskurve, was zu einer höheren Kaltluftmächtigkeit an Messpunkt 1 führt. Diese Mächtigkeit wiederum bedingt laut Gl. 10 höhere Fließgeschwindigkeiten.

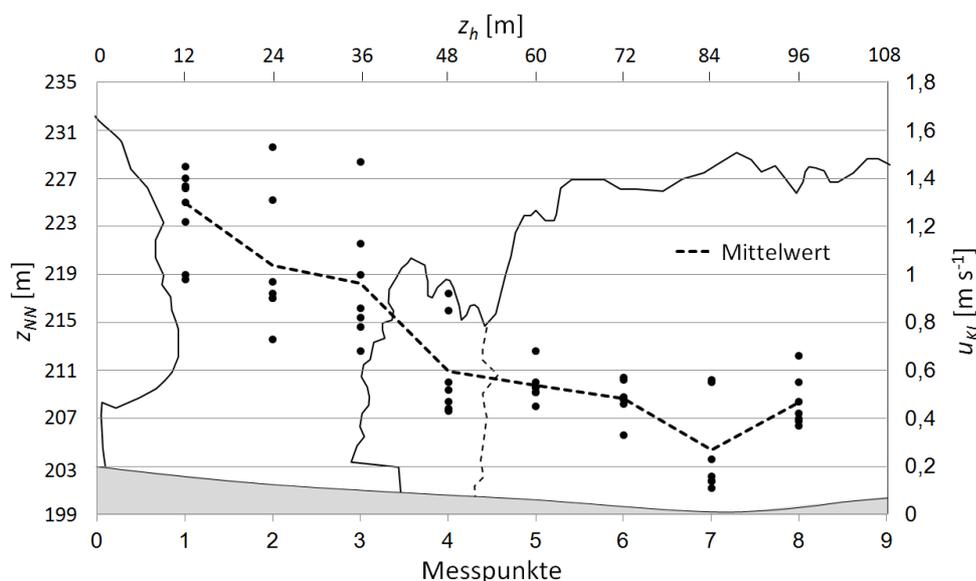


Abb. 98: Talquerprofilmessungen der Windgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Messhöhe an Messpunkt M3 (vgl. Abb. 33) und die dazugehörigen Mittelwerte (gestrichelte Linie). Die Blickrichtung ist talaufwärts. Die Messungen fanden am 15.07.2009 und 22.09.2009 statt. Der zwischen MZ1 und MZ2 entnommene Baumbestand ist in der Bildmitte zu erkennen (vgl. Abb. 27) (vgl. Sachsen et al. 2012).

Der Vegetationsbestand im Luv der Messpunkte 5 bis 8 stellt aufgrund seiner Dichte und aufgrund der Tatsache, dass er sich bis zu 130 m talaufwärts erstreckt (bei einer Fläche von etwa 7200 m^2) ein großes Hindernis für die abfließende Kaltluft dar. Dennoch bringt er (anders als Bebauung) den Kaltluftabfluss zu keiner Zeit der Messungen vollständig zum Erliegen. Diese Beobachtung wird durch Messungen gestützt (vgl. z.B. Abb. 99) und stellt eine wichtige Erkenntnis dar.

Neben den Messungen in 2 m Höhe ü. Gr. wurden weitere Messungen in abweichenden Messhöhen entlang des gleichen Profils auf Höhe von Messpunkt M3 durchgeführt (vgl. Abb. 33). Grund für diese Teiluntersuchung, ist die Vegetationsstruktur unmittelbar entlang des Messprofils. Wie im Luftbild in

Abb. 20 andeutungsweise und in Abb. 38 als kartierte Vegetation zu erkennen, befindet sich entlang des Messprofils an M3 Straßenbegleitgrün in Form von hoch aufwachsendem Ahorn (*Acer platanoides*) mit bis zu ca. 15 m Höhe, der bis in eine Höhe von ca. 4 m entastet ist (vgl. Abb. 42).²⁶ Anders als in Abb. 98 wurde so neben der horizontalen Veränderung der Fließgeschwindigkeit auch die vertikale Verteilung erfasst. Da die Baumkronen das Fließverhalten der Kaltluft beeinflussen, wurden diese in Abb. 99 in Abhängigkeit ihrer Größe als gestrichelte Kreise dargestellt. Die grau hinterlegte Fläche von Abb. 99 weist auf Strömungshindernisse im Luv des Messprofils hin. Weiße Flächen stehen demnach für eine talaufwärts betrachtete freie Anströmbarkeit des Messpunktes (vgl. Abb. 98). Die freie Anströmbarkeit im Bereich von Messpunkt 1 bis 3 lässt sich in der Gesamtheit der Windgeschwindigkeitskurven ablesen, die dort im Mittel die höchsten Geschwindigkeiten aufweisen. Im Bereich von Messpunkt 9 befindet sich eine als Parkplatz einer Kleingartenanlage genutzte Freifläche. Die angrenzende Kleingartenanlage kennzeichnet sich durch reduzierte Bestandshöhen der Lauben und Vegetation, was im Profil zu höheren mittleren Windgeschwindigkeiten führt.

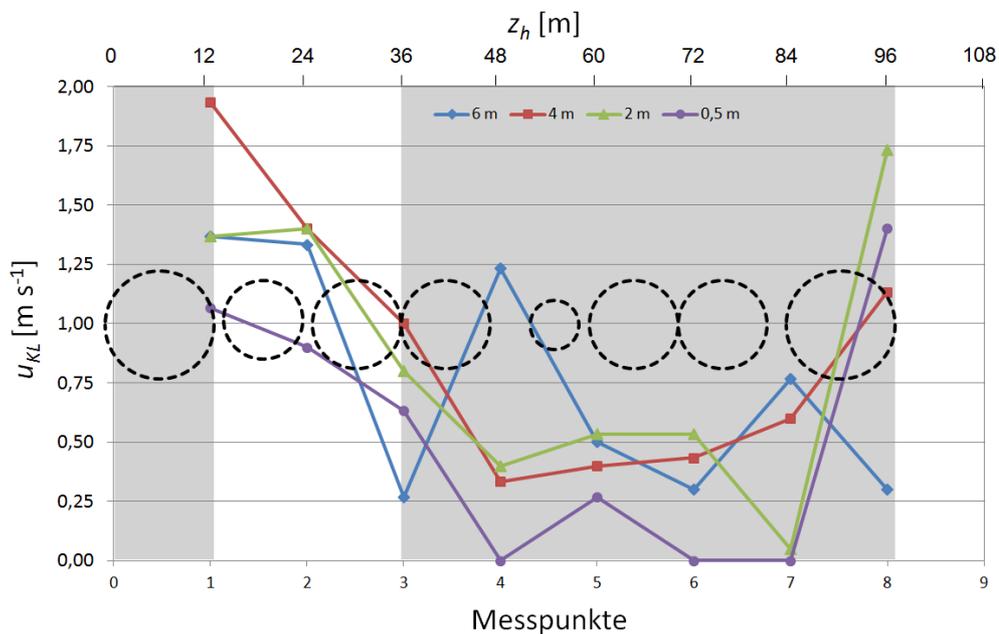


Abb. 99: Talquerfilmmessungen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} in 0,5 m, 2 m, 4 m und 6 m Höhe ü. Gr. am 15.07.2009. Die Kreise stellen den Kronendurchmesser von Straßenbegleitgrün auf Höhe von M3 dar (vgl. Abb. 33). Die graue Fläche stellt dichten Baumbestand im Luv der Messpunkte dar (vgl. Abb. 27). Die Blickrichtung ist talaufwärts.

In Folge sollen die unterschiedlichen Messhöhen differenziert betrachtet werden. Dabei finden sich im Kannegießerbach Merkmale des idealtypischen Windprofils abfließender Kaltluft wie in Abb. 7 dargestellt. Durch die jahreszeitlich bis zu 1,2 m hohe Wiesenvegetation (vgl. Abb. 30) liegt die mittlere Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in 2 m Messhöhe an allen Messpunkten über der in einer

²⁶ Die besondere Vegetationsstruktur des beschriebenen Straßenbegleitgrüns im Leebereich von Station KW und KB ist Grund für die Einteilung dieser Bäume in eine eigene KLAM_21 Klasse (Klasse 21: S-Laubgehölz) für die Modellierung des Kaltluftgeschehens im Kannegießerbachtal (vgl. Kap 5.5.2, Tab. 9).

Messhöhe von 0,5 m. Üblicherweise findet sich das Maximum der Fließgeschwindigkeit nach Faustformel etwa in einem Viertel der Höhe der Kaltluftschicht (vgl. Kap. 3.3), was im Kannegießerbachtal bei einer Kaltluftmächtigkeit von ca. 40 m einer Höhe von 10 m entspricht. In dieser Höhe wird die Kaltluft durch die Baumkronen des Straßenbegleitgrüns in ihrem Abfluss behindert (vgl. Abb. 99), so dass eine Abweichung des Fließgeschwindigkeitsmaximums nach oben und unten erfolgen muss. Ergänzend findet sich im Kannegießerbachtal aufgrund der Wiesenvegetation eine hohe Oberflächenrauigkeit, die zu einer Verlagerung des Kaltluftabflusses an die Bestandsoberfläche führt (vgl. z.B. Kap. 6.2.5, Abb. 9, und Abb. 11 [Cc] und [Ce]). Das Geschwindigkeitsmaximum der abfließenden Kaltluft findet sich entsprechend den vorherigen Ausführungen im Stammraum des Straßenbegleitgrüns, wie Abb. 99 zeigt.

Die in 2 m und 4 m Höhe gemessenen Fließgeschwindigkeiten entsprechen mit wenigen Abweichungen den Ergebnissen der Talquerprofilmessungen aus Abb. 98. Bei der Messung in 4 m Höhe liegt allerdings das Minimum der mittleren Fließgeschwindigkeit nicht im Bereich der Talsohle (M7) sondern im Bereich von M4. Die Ursache für die Reduktion der Fließgeschwindigkeit in diesem Bereich ist in der Struktur des Straßenbegleitgrüns zu finden. Der Baum zwischen Messpunkt 4 und 5 weist eine deutlich geringere Höhe als die restlichen Bäume auf, was die Ausbildung einer Krone mit geringerem Kronendurchmesser zur Folge hat (vgl. Abb. 99). An Messpunkt 4 findet demnach bereits in 4 m Messhöhe eine Beeinflussung des Kaltluftabflusses durch die Baumkrone statt, die bei allen anderen Messpunkten nicht gegeben ist. Die Messungen in Höhe von 6 m zeigen einen durch die Baumkronen beeinflussten Kaltluftabfluss. Die Fließgeschwindigkeiten schwanken über alle Messpunkte hinweg, wobei nach wie vor ein Maximum dort zu erkennen ist, wo talaufwärts eine freie Anströmbarkeit gegeben ist (Messpunkte 1 bis 3). Auf Höhe von Messpunkt 4 finden sich, anders als in der Auswertung der in 4 m Höhe gewonnenen Datenwerte, erhöhte Windgeschwindigkeiten, wonach der Messpunkt in 6 m Höhe offensichtlich weniger durch den geringeren Kronendurchmesser des angrenzenden Baumes, als durch den daraus resultierenden größeren Freiraum zwischen den zwei umgebenden Bäumen profitiert. Im Mittel liegen die Fließgeschwindigkeiten in 6 m Höhe ($\bar{x} = 0,76 \text{ m s}^{-1}$) unter denen in 4 m ($\bar{x} = 0,9 \text{ m s}^{-1}$) Messhöhe. Die Differenz zwischen Messhöhe 4 m ($\bar{x} = 0,9 \text{ m s}^{-1}$) und 2 m ($\bar{x} = 0,87 \text{ m s}^{-1}$) fällt dagegen nur sehr gering aus. In 0,5 m Messhöhe finden sich die geringsten mittleren Fließgeschwindigkeiten von $0,57 \text{ m s}^{-1}$. In den Messhöhen 6 m und 4 m muss demnach die größte Beeinflussung des Kaltluftabflusses durch Vegetation angenommen werden. Der verbleibende Freiraum zwischen Bestandsoberfläche und der beginnenden Ausbildung der Baumkronen des Straßenbegleitgrüns ist der Durchlass für die hangabwärts fließende Kaltluft. Da dieser Durchlass im Verhältnis zur abfließenden Kaltluftmenge und Mächtigkeit gering ist, sind die Strömungsgeschwindigkeiten in den Messhöhen 4 m und 6 m ähnlich groß.

Mit Hilfe einer Modellierung wurde das Fließverhalten der Kaltluft im Vergleich von MZ1 und MZ2 einer weiteren Betrachtung unterzogen. Dabei bestätigen sich die früheren Ergebnisse steigender Windgeschwindigkeiten im Bereich der Station KW in MZ2. Abb. 100 (oben) zeigt die modellierten Differenzen in der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft in 2 m ü. Gr. im Vergleich von MZ1 und MZ2. Zu Gunsten einer detaillierten Darstellung wurde nicht das gesamte Kannegießerbachtal abgebildet, sondern eine Referenzfläche in der Umgebung von Station KW, deren Lage in Abb. 100 ersichtlich ist.

Im Bereich der Vegetationsentnahme findet laut KLAM_21 eine Erhöhung der Fließgeschwindigkeit von bis zu $0,5 \text{ m s}^{-1}$ statt. Die größte Steigerung der Geschwindigkeit findet sich dabei im Zentrum des in MZ2 erweiterten, frei durchströmbaren Talabschnittes. Aufgrund der detaillierten Vegetationskartierung (vgl. Kap. 5.2.6 und Kap. 5.3.3), die die Grundlage der beiden Modellläufe in Abb. 100 bildet, und den modifizierten Modell-Eingabeparametern, stimmen die Veränderungen in der Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft nahezu exakt mit den empirisch gemessenen Werten überein. Bei Betrachtung des Kaltluftdatensatzes zeigte sich eine Verschiebung des Windgeschwindigkeitsmaximums an Station KW im Vergleich der beiden Messzeiträume um $0,5 \text{ m s}^{-1}$ von $0,4 \text{ m s}^{-1}$ auf $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (vgl. Abb. 94). Insgesamt bleibt die Veränderung der Fließgeschwindigkeit im Vergleich der beiden Messzeiträume kleinräumig, auf den Bereich der Vegetationsveränderungen begrenzt.

In Abb. 100 lässt sich neben der Fließgeschwindigkeitsdifferenz zwischen MZ1 und MZ2 (als flächige Darstellung) die Fließgeschwindigkeit in MZ2 ablesen. Dabei stellt die Länge der Pfeile die Fließgeschwindigkeit in 2 m ü Gr. und die Richtung der Pfeile die Abflussrichtung dar. Des Weiteren gibt die Farbe der Pfeile Aufschluss darüber, ob die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zur Zeit der Resultatsausgabe der Modellierung (90 min) in Veränderung begriffen war. Zu erkennen sind steigende Fließgeschwindigkeiten bereits etwa 100 m weiter talaufwärts, vor der Entnahmestelle der Vegetation. Die im Bereich von Station KW schneller abfließende Kaltluft führt dazu, dass Kaltluft aus den oberen Talbereichen schneller nachströmt. Die steigenden Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft in der Talsohle verursachen sinkende Geschwindigkeiten an den Talhängen nordwestlich und südöstlich der Entnahmestelle. Änderungen im Fließverhalten der Kaltluft machen sich talabwärts weniger weit bemerkbar als talaufwärts. Dies mag zum einen an zunehmender Oberflächenrauigkeit liegen – im Nordosten des Bereiches der Vegetationsentnahme, schließt sich eine Kleingartenanlage an, die durch Hecken eingefriedet ist. Zum anderen kann es in diesem Bereich aufgrund einer weniger durch Baumbestände eingegengten Talsohle mit freiem Abfluss zu einem Auseinanderströmen der Kaltluft kommen (vgl. Abb. 11, [Bd]).

Dass insgesamt eine größere Menge Kaltluft den Bereich der Vegetationsentnahme passiert, lässt sich anhand von Abb. 100 (oben) nicht eindeutig belegen, ist allerdings als sehr wahrscheinlich anzunehmen. Diese These unterstützend ist die Tatsache, dass bei der Betrachtung der Veränderung der Fließgeschwindigkeiten, wenn diese über die gesamte Kaltluftmächtigkeit gemittelt werden diese insgesamt im Mittel größer wird. Die über die gesamte Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Differenz der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zwischen MZ1 und MZ1 ist Inhalt von Abb. 100 (oben). Dabei zeigen sich, über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelt, in der Talsohle höhere Fließgeschwindigkeiten als in 2 m ü Gr. (84 oben). An den Talhängen ist der Sachverhalt genau umgekehrt. Dies liefert erneut Erkenntnisse über das in Abb. 7 schematisch dargestellte vertikale Fließgeschwindigkeitsprofil der Kaltluft. An den Talhängen, wo geringere Kaltluftmächtigkeiten zu finden sind, liegt das Maximum der Fließgeschwindigkeit näher an der in Abb. 100 (oben) dargestellten Höhe von 2 m ü. Gr. als in der Talsohle.

Abb. 101 zeigt einen Geländeschnitt auf Höhe der Station KW im Kannegießerbachtal, der die veränderten Fließbedingungen in Folge der Vegetationsentnahme beinhaltet. Da die Blickrichtung des Ge-

ländeschnittes (analog zu Abb. 98 und Abb. 99) talaufwärts ist, befindet sich der dichte Schwarzerlenbestand in der Talau etwa zwischen 140 m und 220 m (z_h) im Geländeschnitt.

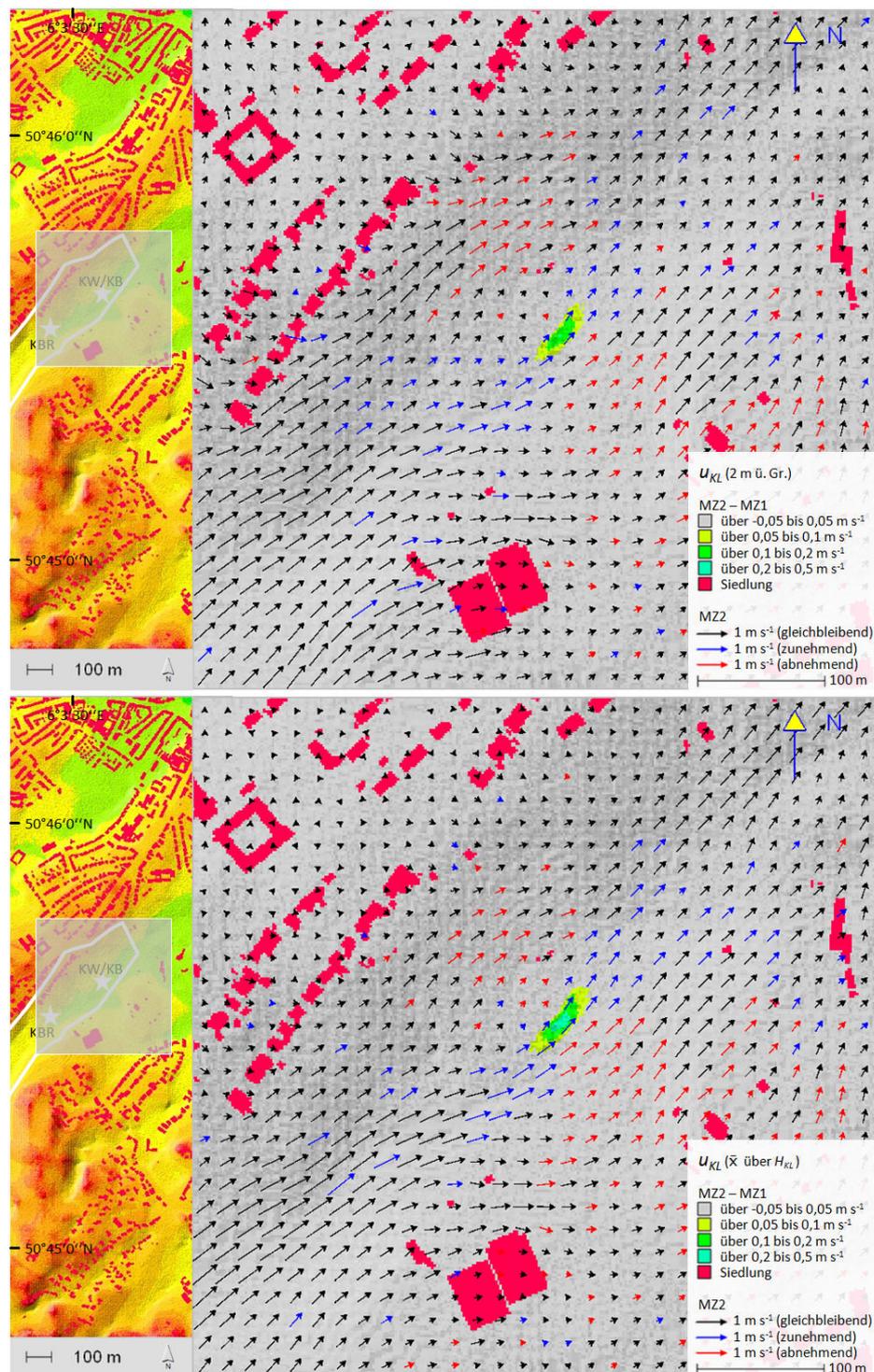


Abb. 100: Betragdifferenz und Vektoren der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m ü. Gr. (oben) und über die Kaltluftmächtigkeit gemittelt (unten) zwischen MZ2 und MZ1 nach 90 Minuten Modellierung. Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 13 / 15 (vgl. Tab. 10).

Die in den bisherigen Datenauswertungen erkennbare Zunahme der Fließgeschwindigkeit in Folge der Vegetationsentnahme ist demnach etwa zwischen 140 m und 150 m (z_h) zu verzeichnen. Wohingegen dort in MZ1 (Abb. 101, oben) Fließgeschwindigkeiten von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ bis $0,5 \text{ m s}^{-1}$ gemessen wurden, erhöhen sich diese in MZ2 (Abb. 101, unten) auf $0,5 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,5 \text{ m s}^{-1}$, eine Steigerung, die mit den empirisch erfassten Daten aus z.B. Abb. 94 übereinstimmt. Die steigenden Windgeschwindigkeiten in der Talsohle im Vergleich der beiden Messzeiträume führen dort zu größeren Kaltluftabflussmengen auf Höhe von Station KW (und zur Minderung eines eventuellen Kaltflurückstaus im Luv des Vegetationsbestandes). Dies wiederum hat zur Folge, dass geringere Kaltluftvolumina im Kannegießerbachtal den dichten Baumbestand und auch die höher gelegenen randlichen Talbereiche durchfließen, was dort zu sinkenden Fließgeschwindigkeiten führt. Diese sinkenden Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft sind in Abb. 99 im MZ2 zwischen etwa 0 und 90 m (z_h) zu erkennen. Dabei zeigt sich keine gleichmäßige Geschwindigkeitsabnahme im Geländeschnitt, sondern vielmehr eine vegetationsabhängige Reduktion der Geschwindigkeit je nach Lage an den Talhängen. Die Differenz des Kaltluftvolumenstromes im Vergleich der beiden Messzeiträume beträgt laut Modellrechnung $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In Kap. 6.4.5 (Abb. 107) wird die vegetationsbedingte Veränderung der Abflussmenge einer weiteren Betrachtung unterzogen, die die Größenordnung der von KLAM_21 ausgegebenen Volumenstromdifferenz zwischen MZ1 und MZ2 bestätigt.

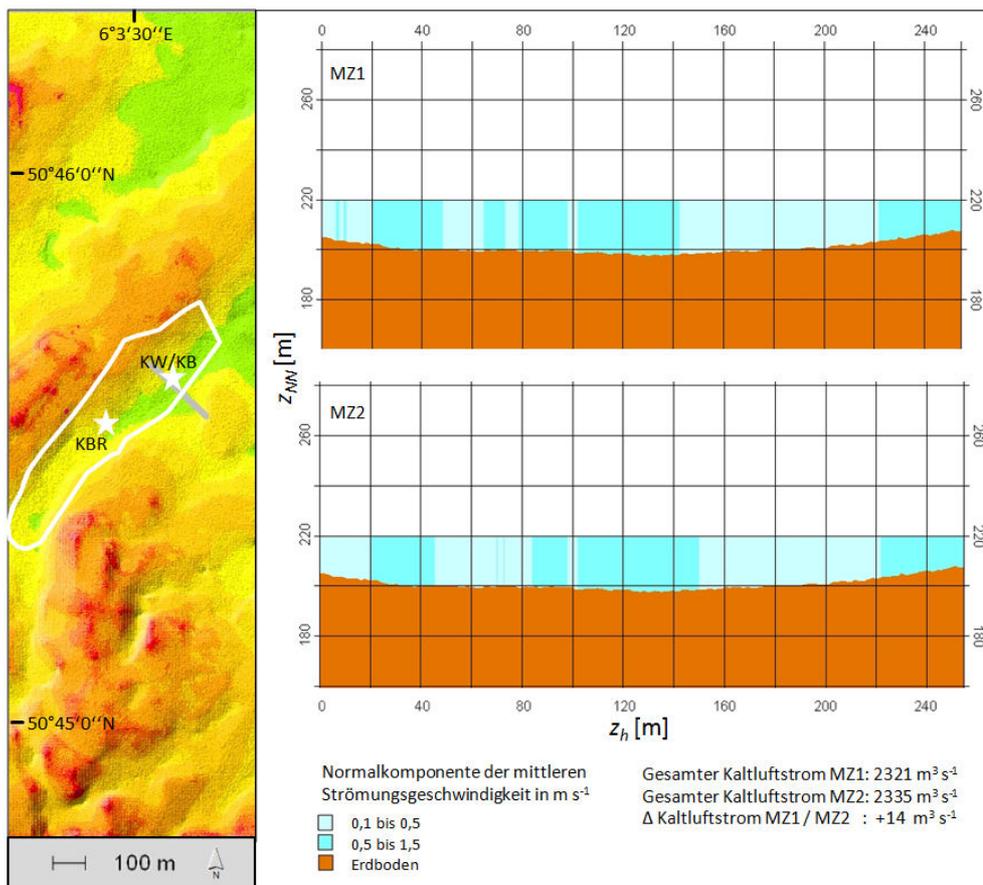


Abb. 101: Höhe H_{KL} und Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft entlang eines Geländeschnittes auf Höhe von Station KW in MZ1 (rechts oben) und MZ2 (rechts unten) sowie die Lage des Schnittes im Untersuchungsgebiet (links). Die Blickrichtung des Schnittes ist talaufwärts; Konfiguration: Lauf 13 (vgl. Tab. 10).

6.4.3 Ablenkung durch Vegetationsstrukturen

Die Windrichtung der abfließenden Kaltluft im Vergleich der beiden Messzeiträume MZ1 und MZ2 sind Gegenstand von Abb. 102.

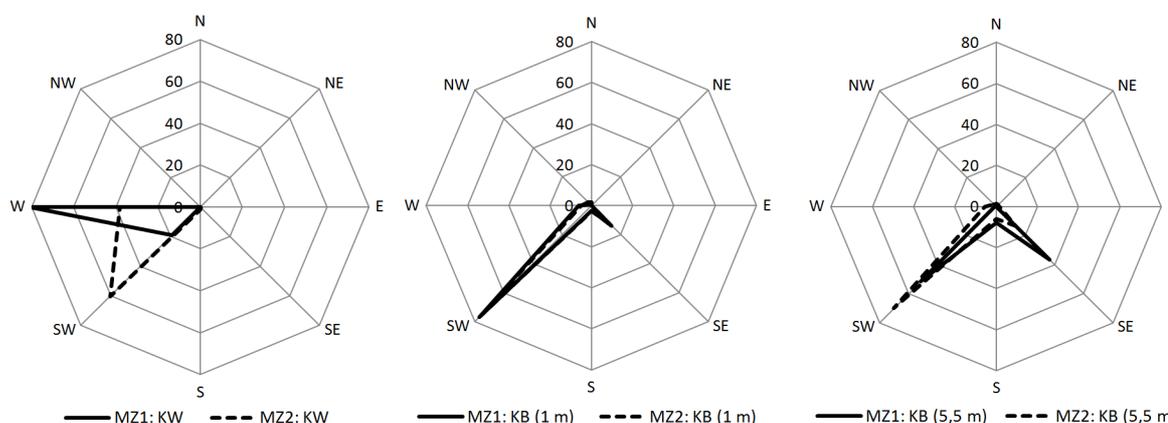


Abb. 102: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an den Stationen KW und KB in MZ1 und MZ2 im Kanneißerbachtal auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

An den Stationen KW und KB fällt im Umfeld des entnommenen Baumbestandes eine Tendenz zu steigenden Windrichtungshäufigkeiten auf, deren Richtung dem Talverlauf entspricht (SW). Wohingegen bei der Betrachtung der Station KW in MZ1 die mit Abstand am häufigsten gemessene Windrichtung W war (81,2 %), so verzeichnet diese im MZ2 Häufigkeitsverluste (43,1 %) zu Gunsten SW-Anströmung (60,3 %). Der luvseitige Baumbestand an Station KW im MZ1 verursacht vor allem unter Kaltluftabflussbedingungen vermehrt eine westliche Anströmung an Station KW, die bei der Betrachtung des Gesamtdatensatzes (vgl. Abb. 86) nicht zu erkennen ist. Dort liegt auch in MZ1 als häufigste Windrichtung an Station KW SW vor. Zur Erklärung dienen wie auch schon früher die unterschiedlichen Eigenschaften katabatischer und nicht katabatischer Winde. Die Kaltluft durchsickert den Baumbestand, erfährt jedoch durch diesen eine deutliche Ablenkung. Westliche Windrichtungen an Station KW in MZ1 sind nur dann möglich, wenn der Vegetationsbestand durchströmt wird. Diese Eigenschaft des Durchströmens ist offensichtlich bei der Kaltluft ausgeprägter als bei nicht-katabatischen Winden. Die Notwendigkeit für die Kaltluft den Vegetationsbestand zu durchströmen, wird in MZ2 deutlich reduziert, da der Querschnitt des frei durchströmbaren Talbereiches auf Höhe von Station KW deutlich vergrößert wurde. Die Folge ist, dass die Kaltluft vermehrt den nicht baumbestanden Talbereich hinabfließt und die Durchströmungshäufigkeit der Vegetation abnimmt. Abb. 100 bestätigt diese Annahme durch sinkende Fließgeschwindigkeiten im Baumbestand und steigende in der Talsohle. Die Stationen KB (5,5 m) und KB (1 m) wiesen bereits bei der Betrachtung des Gesamtdatensatzes SW als am häufigsten aufgezeichnete Windrichtung in MZ1 und MZ2 auf (vgl. Abb. 86). Durch die Entnahme der Vegetation erhöht sich die Häufigkeit dem Talverlauf folgender südwestlicher Windrichtungen unter Kaltluftabflussbedingungen im Vergleich der beiden Messzeiträume an Station KB (5,5 m) um 18,6 % auf 80,2 %. An Station KB (1 m) sind gleichbleibend hohe Häufigkeiten des südwestlichen Sektors von 76 % zu verzeichnen. Die Vegetationsveränderung fällt im Bodenbereich, in dem niedrigere Windgeschwindigkeiten aufgrund einer jahreszeitlich gleichblei-

gend hohen Wiesenvegetation vorherrschen, geringer aus als in 5,5 m Höhe, wo alle Änderungen der Anströmrichtung alleine dem Baumbestand zuzuschreiben sind.

6.4.4 Veränderungen von Temperatur und Feuchte

Inwieweit sich im Vergleich der beiden Messzeiträume MZ1 und MZ2 Veränderungen der Lufttemperatur ergeben, ist in Abb. 103 dargestellt, die die Differenz der Lufttemperatur zwischen Station KBR (Kaltluft-Referenzstation) und den Stationen KW (2,5 m) und KW (0,5 m) im Verlauf der Nacht zeigt.

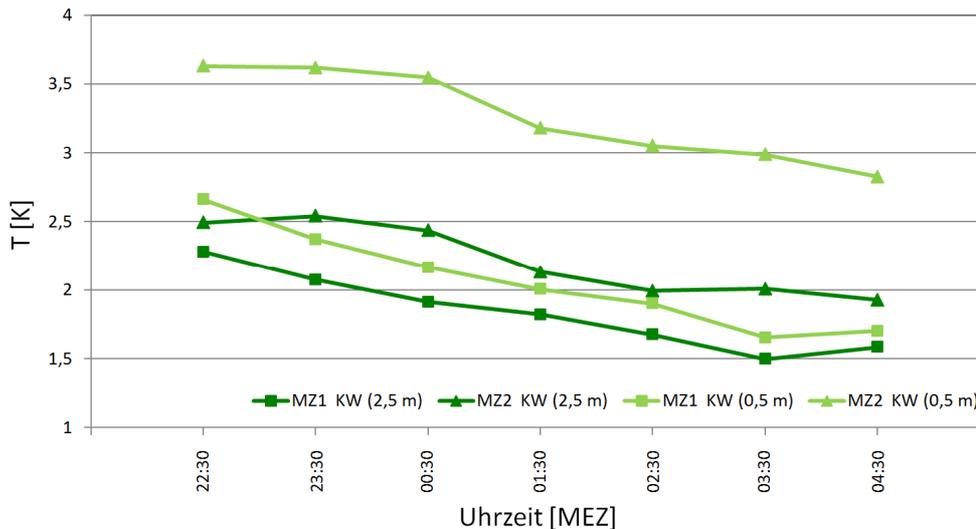


Abb. 103: Nachtgang der Temperaturdifferenz der Kaltluft T_{KL} zwischen Station KBR und den Stationen KW (2m) und KW (0,5 m) in MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min Mittelwerten.

Durch die Entnahme von Vegetation steigen sowohl an Station KW (2,5 m) als auch an Station KW (0,5 m) die Lufttemperaturdifferenzen zur Station KBR an. Diese steigenden Differenzen drücken sich – bei bereits in MZ1 geringeren absoluten Lufttemperaturen an der Station KW im Vergleich zu Station KBR – in verringerten Lufttemperaturen an der Station KW in beiden Messhöhen im Vergleich der beiden Messzeiträume aus. Betrug die Differenz an Station KW (2,5 m) im Mittel im MZ1 noch 1,8 K so beträgt sie in MZ2 2,1 K. Die geringeren Lufttemperaturen können dabei nicht in der besseren Anströmbarkeit der Station KW (2,5 m) mit Kaltluft begründet liegen. Die Kaltluft fließt durch den Vegetationsbestand hindurch (vgl. z.B. Kap. 6.4.3). Zudem würde dies den durchgeführten Talquerprofilmessungen (vgl. Tab. 11) in Abb. 58 widersprechen. Im Bereich des Vegetationsbestandes findet nach dessen Entnahme (vgl. Kap. 6.1.3) eine nahezu ungehinderte nächtliche Ausstrahlung statt, die zu sinkenden Oberflächen- und damit auch Lufttemperaturen beiträgt. Auffällig im Vergleich der beiden Messzeiträume ist ein ähnlicher nächtlicher Temperaturverlauf mit dem Trend abnehmender Differenzen mit fortschreitender Zeit. Die an Station KW in beiden Messhöhen erfassten Werte und die an Station KBR gemessenen Werte nähern sich im Verlauf der Nacht an. Bei der Betrachtung der absoluten Werte wird klar, dass dies nicht alleine in der besseren ausstrahlungsbedingten Abkühlung der bodennahen Luft in MZ2 an Station KW liegt, sondern auch durch erheblich niedrigere Temperaturen im Bereich von Station KBR verursacht wird. Dort spielt u.U. die versiegelte Stationsumgebung

in der ersten Nachthälfte eine Rolle, die durch Wärmeabgabe zu verzögert sinkenden Lufttemperaturen beiträgt (vgl. Kap. 5.1.1).

Die Differenzunterschiede zwischen MZ1 und MZ2 an Station KW (2,5 m) betragen maximal 0,5 K und im Mittel 0,4 K. Die Differenzunterschiede an Station KW (0,5 m) fallen demgegenüber wesentlich größer aus. Während in MZ1 an Station KW (0,5 m) die Lufttemperaturdifferenz zur Station KBR noch 2,1 K betrug, beträgt diese in MZ2 nach der Vegetationsentnahme 3,1 K. Die Annahme stärkerer Abkühlung der Erd- bzw. Bestandsoberfläche durch nächtliche Ausstrahlung wird durch die starke Differenzsteigerung gestützt. Ein insgesamt geringeres Temperaturniveau an Station KW (0,5 m) als an Station KW (2,5 m) lässt sich durch die physikalische Eigenschaft erklären, dass sich die kälteste Luft in Bodennähe befindet (vgl. Kap. 3). Ergänzend spielt in MZ2 eine im Vergleich zum MZ1 strahlungsbedingt höher aufwachsende Wiesenvegetation an Station KW (0,5 m) eine Rolle.

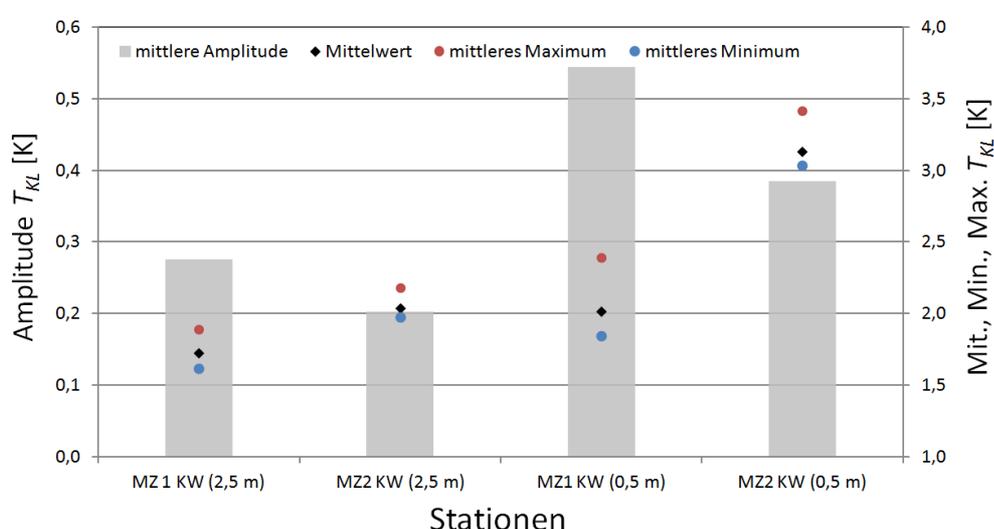


Abb. 104: Mittelwert, mittleres Maximum, mittleres Minimum und die Amplitude (Differenz aus mittlerem Maximum und mittlerem Minimum) der Temperaturdifferenz der Kaltluft T_{KL} zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2 auf Basis von nächtlichen Mittelwerten.

Der statistische Zusammenhang zwischen den Werten der Station KW in 0,5 m und 2,5 m Messhöhe und der Station KBR weist trotz größerer Temperaturdifferenzen in MZ2 eine gleichbleibend hohe positive lineare Korrelation auf (R^2 in MZ1 = 0,990, R^2 in MZ2 = 0,989).

Betrachtet man die Differenzen des mittleren Maximums und Minimums der Lufttemperatur im Vergleich der Stationen KBR und KW auf Basis von nächtlichen Mittelwerten (Abb. 104), so werden die Unterschiede zwischen den Messzeiträumen, aber auch Messstationen noch einmal deutlich. In allen Fällen sind die Temperaturdifferenzen gestiegen, wobei der größere Anstieg an Station KW (0,5 m) zu verzeichnen ist. Im Vergleich zu Station KW (2,5 m), die einen Differenzanstieg des nächtlichen Mittelwertes von 0,3 K verzeichnet, findet an Station KW (0,5 m) eine Differenzsteigerung von 1,1 K statt. Die ungehinderte nächtliche Ausstrahlung in MZ2 führt wie bereits in Abb. 103 erkannt, zu einer erheblichen Abkühlung der Erdoberfläche und der bodennahen Luftschicht. Zudem ist sie Beleg dafür, dass im Bereich der Station KW in MZ2 mehr Kaltluft produziert wird.

Unter dem Aspekt der Optimierung stadtnaher Kaltluftströme zur Reduktion der städtischen Wärmeinsel, spielt die Art der Vegetation demnach eine wichtige Rolle. Bei der Betrachtung der Lufttemperatur und Kaltluftproduktion als Folge der Oberflächentemperatur im Zusammenhang mit der langwelligeren Ausstrahlung sind demnach Wiesenbestände Waldbeständen gegenüber zu bevorzugen. Diese Erkenntnis wurde bereits in Kap. 3.4 ausführlich beschrieben. Dennoch werden bisher hoch aufwachsende Baumbestände immer in erster Linie als Abflusshindernis und nicht als nachteilig für die Kaltluftproduktion angesehen.

Anders als bei der Windgeschwindigkeit (vgl. Kap. 6.4.2), kommt es durch die Entnahme des Schwarzerlenbestandes nicht zu Annäherungen, sondern zu zunehmenden Abweichungen der Lufttemperatur zwischen den Stationen KBR und KW. Um diesen Zusammenhang statistisch zu erfassen wurde die Lufttemperatur an Station KBR mit der an Stationen KW (2,5 m) und KW (0,5 m) für beide Messzeiträume in Abb. 105 korreliert. Insgesamt werden dabei in beiden Messzeiträumen hohe Korrelationen erreicht. In MZ1 beträgt das Bestimmtheitsmaß R^2 zwischen Station KBR und Station KW (2,5 m) 0,97 und zwischen Station KBR und Station KW (0,5 m) 0,96. Diese Werte sinken für den MZ2 zwar auf 0,96 und 0,92, deuten aber nach wie vor einen hohen statistischen Zusammenhang, wenn auch mit minimal geringeren Zusammenhängen, an.

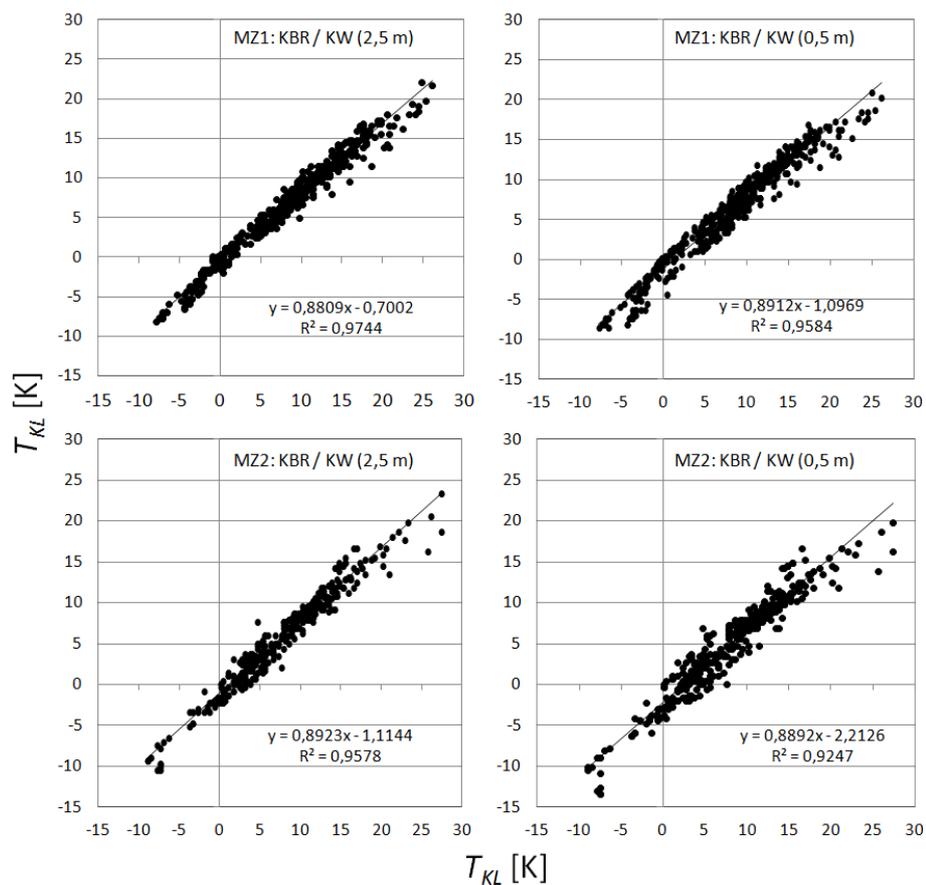


Abb. 105: Korrelation der Lufttemperatur T_{KL} zwischen Station KBR und Station KW (2,5 m) bzw. Station KBR und Station KW (0,5 m) in MZ1 und in MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Beim Vergleich der Bodentemperaturen der beiden Messzeiträume vor dem Hintergrund der Vegetationsmodifikation bleibt ausschließlich die Betrachtung der absoluten Werte, da Referenzwerte der Bodentemperatur im Kannegießerbachtal nicht vorliegen. In Abb. 106 ist der nächtliche Temperaturverlauf in den beiden Messzeiträumen dargestellt. Auffällig ist ein wesentlich stärkerer Rückgang der Bodentemperatur – ausgedrückt in einem steileren Kurvenverlauf – in allen drei Messtiefen in MZ2. Die größte Temperaturamplitude weist dabei die der Erdoberfläche am nächsten gelegene Temperatursonde in der Tiefe von -0,05 m auf. Zur Veranschaulichung wurde für die Messtiefe von -0,05 m die Trendlinie in Abb. 106 ergänzt. Die stärkere Abkühlung des Bodens beruht dabei auf der durch die Vegetationsentnahme erhöhten nächtlichen Ausstrahlung, da keine Gegenstrahlung der langwelligen Strahlung vom Ast- und Blattwerk stattfindet. In der Konsequenz führt dies in der Theorie zur vermehrten Kaltluftbildung im Bereich der Vegetationsentnahme, die jedoch aufgrund der Kleinräumigkeit in der vorliegenden Untersuchung nicht nachgewiesen werden konnte. Der stärkere Temperaturrückgang an der Erdoberfläche ist in den Messtiefen von -0,2 m und -0,5 m ebenfalls zu erkennen. Begünstigt wird die Abkühlung des Bodens bis in tiefere Bereiche durch die starke Vernässung der Talaua, die eine gute Wärmeleitfähigkeit zur Folge hat.

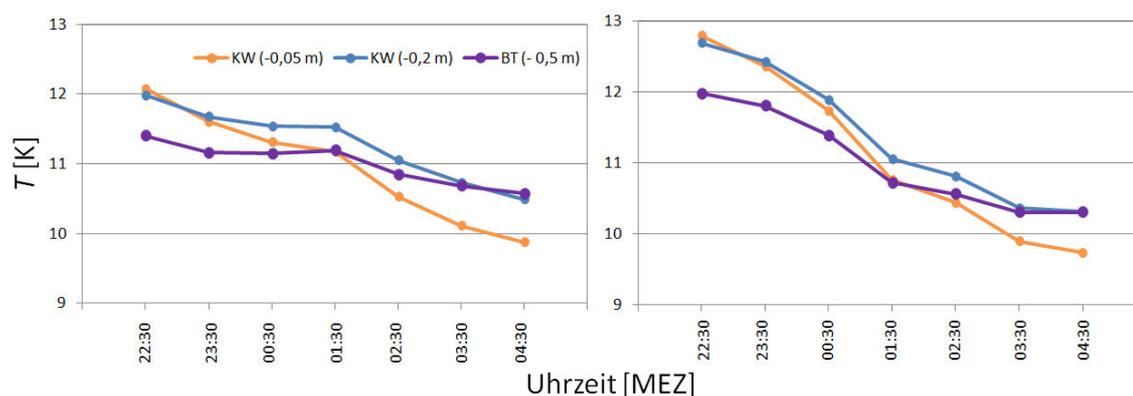


Abb. 106: Nächtlicher Verlauf der Bodentemperatur während Kaltluftabfluss in MZ1 (links) und MZ2 (rechts) an Station KW auf Basis von 60-min Mittelwerten.

6.4.5 Veränderung der Abflussmenge

Da bei Vegetationsveränderungen in Kaltluftbahnen nicht immer ein Kaltluftabflussmodell wie KLAM_21 zur Verfügung steht, wurde am Beispiel der Vegetationsentnahme in der vorliegenden Untersuchung getestet, in wie weit sich Veränderungen der Abflussmenge rechnerisch und empirisch erfassen lassen. In umgekehrter Weise lässt sich die modellierte Kaltluftabflussmenge mit Hilfe der rechnerisch-empirischen Bestimmung validieren.

Zur überschlägigen theoretischen Berechnung der Abflussmenge, die durch die entnommene Vegetation in MZ1 im Abfluss behindert wird, wurde die Talfläche in ihrer Höhe und Breite in ein Raster eingepasst. Die Rasterung ist in Abb. 107 ersichtlich, die Größe der Rasterzellen beträgt 2,5 m x 5 m. Grün dargestellt ist die Querschnittsfläche des Schwarzerlenbestandes, der zwischen MZ1 und MZ2 aus dem Tal entnommen wurde. Für diese Referenzfläche wurde in der Folge die Auswertung vorgenommen. Basis der Auswertung waren ein vertikales Geschwindigkeitsprofil der Kaltluft als Ergebnis

einer Ballonsondierung am 22.06.2009 sowie die Talquerprofilmessungen aus Abb. 98. Für jede Rasterzelle der Referenzfläche wurde in Folge die höhenabhängige Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} in MZ1 und MZ2 bestimmt sowie die durch Vegetation in MZ1 „verstellte“ Fläche $H_{KL} \times B_{KL}$. Das Ergebnis der Berechnung ist die Abflussmenge an Kaltluft in MZ1 und MZ2. Der Berechnung nach passieren in MZ2 $16,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ mehr Kaltluft die ausgewählte Talquerschnittsfläche. Dies wiederum entspricht 386.100 m^3 Kaltluft pro Nacht und macht damit etwa 12 % des gesamten nächtlichen Abflusses im Kannegießerbachtal in MZ2 aus. Da die Ballonsondierungen und Talquerprofilmessungen in den Sommermonaten stattfanden, zeigen die Kaltluftvolumenunterschiede den Vergleich zwischen sommerlich belaubter Vegetation mit hohem LAI und der Situation ohne Baumbestand. Bei einem Vergleich in unbelaubtem Zustand der Bäume wäre das reduzierte Kaltluftvolumen dementsprechend kleiner, da durch die höhere Porosität des Baumes in MZ1 höhere Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft erreicht werden.

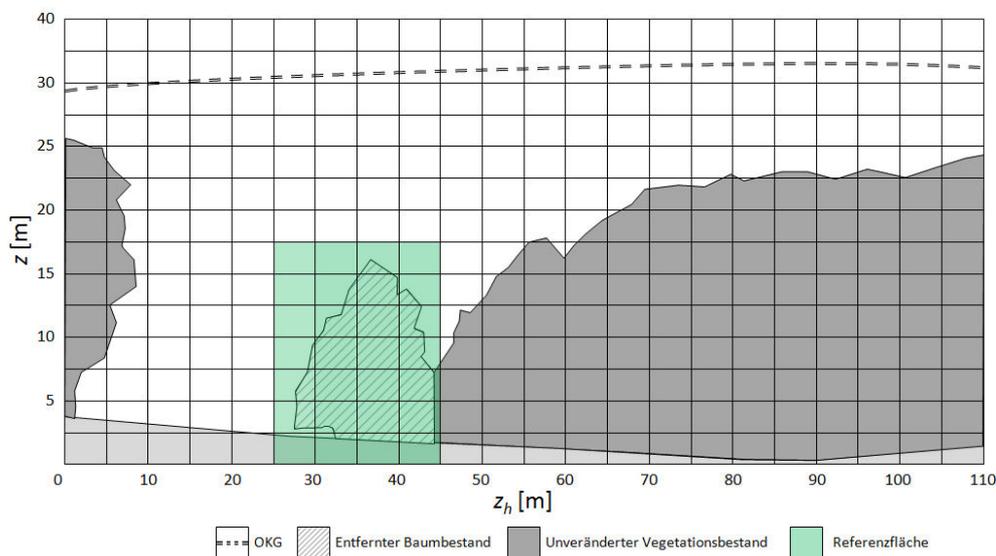


Abb. 107: Rasterung des Talquerschnitts auf Höhe der Stationen KW und KB. Die schraffierte (Baum-)Fläche markiert den nach MZ1 entnommenen Baumbestand. Die grüne Fläche bildet als Referenzfläche die Grundlage für die Datenauswertung in Tab. 12. Die Blickrichtung ist talaufwärts.

Abb. 101 (vgl. Kap. 6.4.2) zeigt eine Veränderung des Volumenstromes im Vergleich von MZ1 und MZ2 auf Basis von Geländeschnitten von $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Die in Tab. 12 vorgestellte Berechnung ($u_{KL} \times (H_{KL} \times B_{KL}) = q_{KL}$) ergibt eine Veränderung des Volumenstromes von $16,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, womit das rechnerische und modellierte Ergebnis $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ voneinander abweichen. Berücksichtigt man, dass der Geländeschnitt in Abb. 101 zwar insgesamt reduzierte, aber punktuell bei der Modellierung der Abflussvolumina erhöhte Abflussgeschwindigkeiten in den randlichen Talbereichen zeigt, so gleichen sich die Ergebnisse aus Abb. 101 und Abb. 107 weiter an. Eine Unsicherheit der vorgestellten Berechnung der Abflussvolumina liegt in der Übertragung sowohl horizontal (Querprofilmessung), als auch vertikal (Ballonsondierung) punktuell erhobener Werte in das in Abb. 107 dargestellte Raster mittels Interpolation. Das Fließverhalten der Kaltluft weist sowohl räumliche (vgl. Abb. 71) als auch zeitliche Schwankungen (vgl. Abb. 73) auf, die die vorgestellte Berechnung nicht zu berücksichtigen vermag.

Tab. 12: Auswertung der Referenzfläche aus Abb. 107 hinsichtlich der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft u_{KL} , der durch Vegetation "verstellten" Abflussfläche $H_{KL} \times B_{KL}$ sowie den sich daraus ergebenden Abflussmengen q_{KL} an Kaltluft pro Zeiteinheit in MZ1 und MZ2. Die zu Grunde liegenden Annahmen stammen aus einer Ballonsondierung vom 22.06.2009 (vgl. Kap. 6.2.3) sowie Talquerprofilmessungen (vgl. Abb. 98).

	MZ1				MZ2			
u_{KL} [m s ⁻¹]	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0
	0,0	0,8	0,8	0,8	0,0	0,9	0,9	0,9
	0,0	0,8	0,7	0,8	0,0	0,9	0,9	0,9
	0,8	0,7	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9
	0,8	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	0,7	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
	0,0	0,5	0,4	0,4	0,0	0,6	0,6	0,6
	$H_{KL} \times B_{KL}$ [m ²]	0,0	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	3,8
0,0		2,5	12,5	2,5	0,0	2,5	12,5	2,5
0,0		9,4	12,5	6,3	0,0	9,4	12,5	6,3
2,5		12,5	12,5	7,5	2,5	12,5	12,5	7,5
5,0		12,5	12,5	10,0	5,0	12,5	12,5	10,0
6,3		12,5	12,5	10,0	6,3	12,5	12,5	10,0
0,0		2,5	3,8	3,1	0,0	2,5	3,8	3,1
q_{KL} [m ³ s ⁻¹]		0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	3,4
	0,0	2,0	10,0	2,0	0,0	2,3	11,3	2,3
	0,0	7,5	8,8	5,0	0,0	8,4	11,3	5,6
	2,0	8,8	7,5	5,3	2,3	11,3	11,3	6,8
	4,0	8,8	6,3	6,0	3,0	7,5	7,5	6,0
	4,4	7,5	6,3	5,0	3,8	7,5	7,5	6,0
	0,0	1,3	1,5	1,2	0,0	1,5	2,3	1,9
		MZ1	MZ2	Δ MZ2 / MZ1				
q_{KL} s ⁻¹	114	130,5	16,5					
q_{KL} m ⁻¹	6.840	7.830	990					
q_{KL} h ⁻¹	410.400	469.800	59.400					
q_{KL} n ⁻¹	2.667.600	3.053.700	386.100					

In Abb. 108 ist die Volumenstromdichte als Differenz zwischen MZ1 und MZ2 dargestellt. Im Bereich des entnommenen Vegetationsbestandes findet laut KLAM_21 eine Steigerung der Volumenstromdichte um bis zu $2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ im zentralen Bereich des frei durchströmbaren Bereiches und von $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bis $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ in den Randbereichen der Vegetationsentnahme statt. Unter Berücksichtigung der entnommenen Vegetation ergibt sich in etwa eine Breite von 15 m (vgl. Abb. 26) auf der im Talquerschnitt Baumvegetation entnommen wurde. Da sich die Volumenstromdichte überschlägig im Mittel um etwa $1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ erhöht hat, ergibt sich laut Berechnung eine Erhöhung des abfließenden Kaltluftvolumens von etwa $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Dies entspricht von der Größenordnung sowohl der modellierten Abflussmenge anhand des Geländeschnittes in Abb. 101, als auch dem Ergebnis auf Basis der empirischen Daten (vgl. Tab. 12).

Neben der Differenz der Volumenstromdichte im Vergleich zwischen MZ1 und MZ2 ist Abb. 108 die Volumenstromdichte in MZ2 zu entnehmen sowie, ob diese sich nach 90 min Modelllaufzeit in Steigerung oder Reduktion befindet. In MZ1 (vgl. Abb. 77) war eine deutliche Reduktion der Volumenstromdichte im Bereich von Station KW im Vergleich mit höher gelegenen Talbereichen zu erkennen. Trotz der Vegetationsentnahme auf einer Talbreite von etwa 15 m bleibt dieser Sachverhalt auch in MZ2 deutlich erkennbar. Wohingegen südwestlich von Station KW (und auch in Höhe von Station

KBR) in der Talsohle Volumenstromdichten von etwa $25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ vorzufinden sind, verringern sich diese im Bereich von Station KW, aufgrund der Einengung der Abflussbahn und der reduzierten Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft im Vegetationsbestand auf etwa $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Im Kartenausschnitt von Abb. 108 ist in Folge der Vegetationsentnahme nur eine leichte Steigerung der Volumenstromdichten nordöstlich von Station KW erkennbar. Erst weiter talabwärts, außerhalb des Kartenausschnittes, kommt es erneut zu Steigerungen der Kaltluft-Volumenstromdichte und der Fließgeschwindigkeit beim Zusammenfluss der Kaltluft aus Kannegießer- und Ponellbachtal (vgl. Abb. 77). Aufgrund zunehmender Oberflächenrauigkeit mit zunehmender Annäherung an das Stadtzentrum, wäre eine Steigerung der Volumenstromdichte ohne weiteren Kaltluftzufluss nicht denkbar. Die Kaltluft aus dem Kannegießerbachtal erfährt demnach, ohne Berücksichtigung weiterer Nachbartäler, eine erhebliche Beeinflussung durch den Vegetationsbestand auf Höhe der Stationen KW und KB.

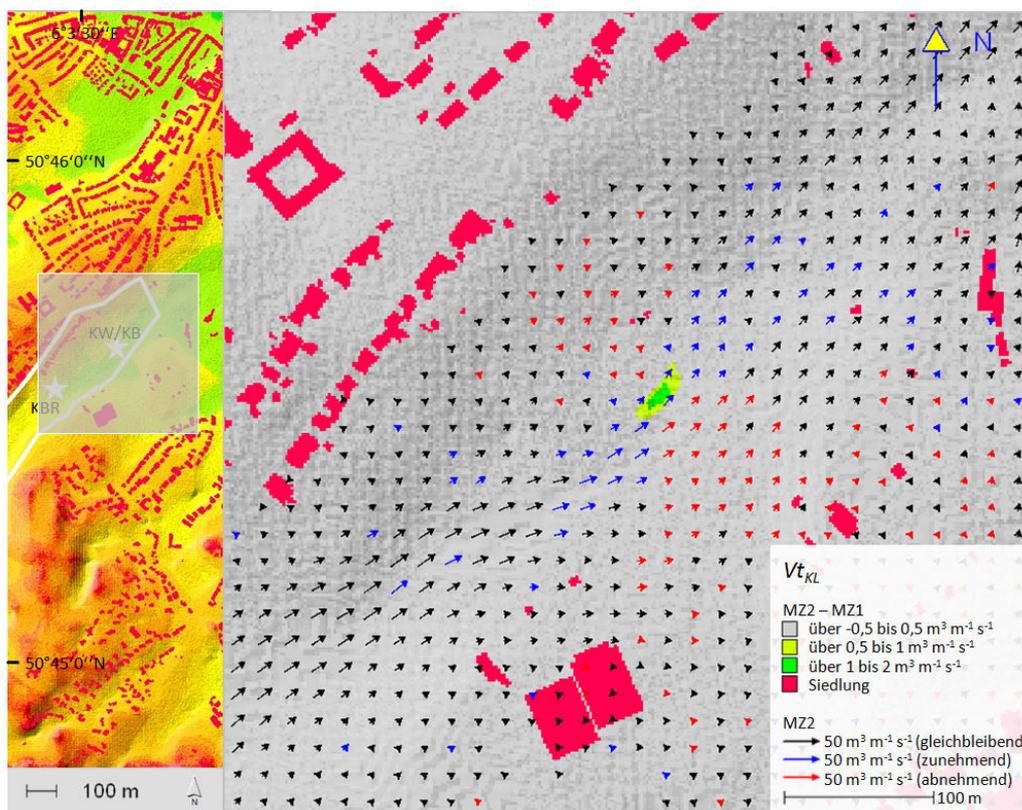


Abb. 108: Betragsdifferenz und Vektoren der Kaltluft-Volumenstromdichte Vt_{KL} nach 90 min Modellierung in 2 m ü. Gr.. Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 13 / 15 (vgl. Tab. 10).

Eine Beeinflussung der Kaltluftobergrenze durch die Vegetationsveränderungen im Kannegießerbachtal wurde empirisch nicht bemessen. Die Modellierung mit KLAM_21 ergab unveränderte Kaltluftmächtigkeiten im Vergleich der beiden Messzeiträume MZ1 und MZ2.

6.4.6 Einflüsse auf die Qualität der Kaltluft

Zur Modellierung des Schadstofftransportes in der Kaltluftbahn, wurde anhand der DTV-Verkehrszahlen (Prognose 2010) eine Linienquelle von 150 m Länge auf dem Brüsseler Ring generiert

(vgl. Abb. 20). Die Annahmen, die dabei dem Modelllauf zu Grunde liegen sind in Kap. 5.3.4 beschrieben. Das Modellergebnis zu verschiedenen Zeitschritten ist in Abb. 109 dargestellt.

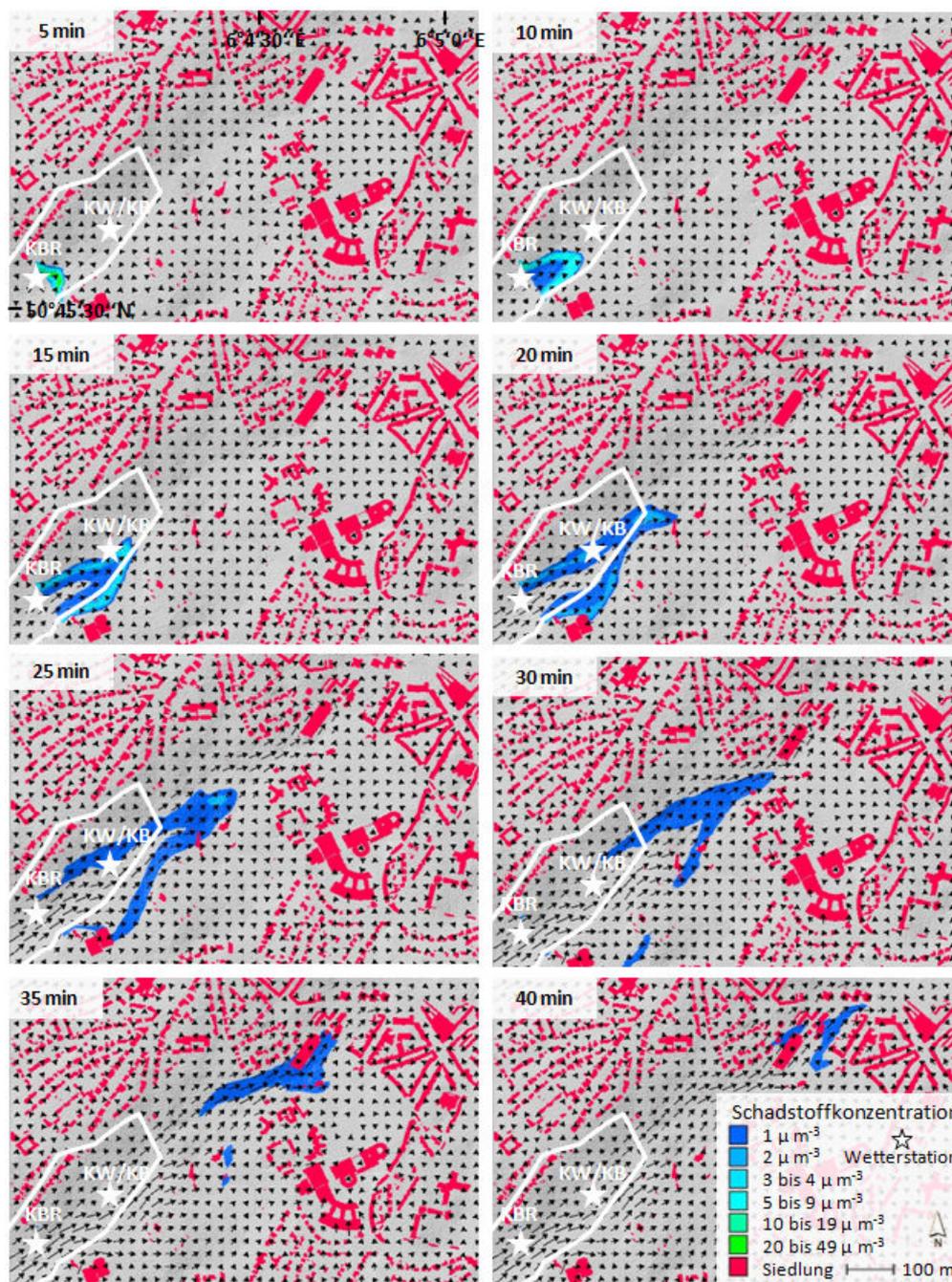


Abb. 109: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Schadstoffkonzentration und das Strömungsfeld zu unterschiedlichen Modelllaufzeiten im Kannegießerbachtal; Konfiguration: Lauf 19 (vgl. Tab. 10).

Auffällig ist eine rasche, flächige Ausbreitung der Schadstoffe mit der Kaltluft, die zu einer Reduktion der anfänglich emittierten Konzentrationen führt, insofern keine dauerhaften Emissionen gegeben sind. Dabei erreicht die mit Schadstoffen angereicherte Luft bei Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 1 m s^{-1} bereits nach weniger als 15 min Station KW. Die Kaltluft strömt dabei im Hinblick auf die Stationsumgebung südlich an der Station KW entlang, wo sich der Teil der Kaltluftbahn befindet, der

nicht durch hoch aufwachsende Baumvegetation bestanden ist (vgl. Abb. 20 und Abb. 27). Dieser weist dementsprechend höhere Fließgeschwindigkeiten auf. Eine Durchströmung des Vegetationsbestandes nördlich von Station KW findet zu diesem Zeitpunkt nicht statt.

Erst etwa 25 min nachdem die Kaltluft im Bereich höchster Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe der Station KW durch nachströmende Kaltluft ohne Schadstoffe ersetzt wurde, erreicht schadstoffangereicherte, den Vegetationsbestand durchströmende Kaltluft die Umgebung von Station KW. Durch die langsame Fließgeschwindigkeit hat zudem eine flächige Ausbreitung zugunsten der Verringerung der Schadstoffkonzentrationen stattgefunden. Die Konzentrationen im Bereich der schneller fließenden Kaltluft sind zu diesem Zeitpunkt wesentlich höher. Berücksichtigt man die Tatsache, dass im Modell KLAM_21 die emittierten Schadstoffe in der Kaltluft bleiben und deren Gesamtmasse nicht durch Deposition verringert wird, so ist in der Realität von weiter verringerten Schadstoffkonzentrationen in der Kaltluft im Vegetationsbestand auszugehen (vgl. Kap. 5.2.6). Bei der schnell fließenden Kaltluft dagegen ist u.a. aufgrund der höheren dynamischen Turbulenz (vgl. Kap. 3.2) von keiner Schadstoffverringerung aufgrund der genannten Vorgänge auszugehen, vielmehr werden dort zusätzlich Partikel im Bodenbereich aufgewirbelt. Unter Umständen kommt es jedoch zu einer stärkeren vertikalen Verteilung der Emissionen. Feinstaubmessungen, die im erweiterten Umfeld von Station KW durchgeführt wurden, bestätigen diese Annahme und zeigen steigende Konzentrationen mit zunehmender Fließgeschwindigkeit der Kaltluft (vgl. Kap. 6.2.8, Abb. 80).

Nach etwa 30 min erreicht die schadstoffangereicherte Luft den Übergang zwischen dem nahezu un bebauten Talbereich und der dichteren randstädtischen Bebauung und fließt in Folge durch die Straßenschluchten weiter stadteinwärts. Im Hinblick auf die Ausbreitung und Konzentration von in den Kaltluftstrom abgegebenen Luftschadstoffen und Partikeln, ist das beschleunigte Abfließen der Kaltluft durch die Entnahme von Vegetation als kritisch zu bewerten. Zum einen bleiben die Schadstoffe räumlich stark begrenzt und zeigen nur eine geringe flächige Ausbreitung in der Kaltluft, zum anderen finden sich auch nach längerem Transportweg in der Kaltluft hohe Konzentrationswerte. Anzumerken sei an dieser Stelle, dass die Schadstoffe in der Modellierung zwar linienhaft, aber kurzzeitig emittiert wurden. Punktuelle, hohe Emissionswerte (z.B. durch Industrie und Gewerbe, oder aber auch durch Einzelereignisse wie z.B. Brände) verursachen aufgrund der stabilen Schichtung der Kaltluft v.a. in Kaltluftstaugebieten, aber auch in Abflussgebieten große Probleme (vgl. KETZLER 2009). In Staugebieten kommt es zu einer schnellen Anreicherung von Schadstoffen in der Kaltluft. In Abflussgebieten findet eine rasche Verlagerung der schadstoffbelasteten Luft in andere Gebiete statt. Dieser Sachverhalt sollte in der Planung durchaus Berücksichtigung finden.

6.4.7 Jahreszeitliche Vegetationseinflüsse

Bei der bisherigen Auswertung und Modellierung wurde eine Unterscheidung zwischen MZ1 und MZ2 vorgenommen, nicht aber jahreszeitliche Unterschiede der Kaltluftbeeinflussung durch Vegetationsbestände untersucht. Hinzu kommt eine überwiegende Erfassung von Kaltluftdaten während mobiler Messungen in den Sommermonaten. Um dennoch die jahreszeitlichen Unterschiede der Kaltlufterigenschaften abzubilden, folgen an dieser Stelle Auswertungen, bei denen der Kaltluftdaten-

satz (vgl. Kap. 5.1.6) jahreszeitlich differenziert wurde. Zudem finden sich ergänzend entsprechende Ergebnisse des Modells KLAM_21.

In Folge wird bezüglich der jahreszeitlichen Datendifferenzierung, die in 5.1.3 eingeführte Nomenklatur verwandt (MZ1-S, MZ1-W, MZ2-S, MZ2-W). Da im Winter bei den im Talbereich vorkommenden Laubgehölzen die Effekte der Belaubung nicht zum Tragen kommen, diese Effekte im Sommer dagegen ihr Maximum erreichen, wurden zunächst Werte verglichen die im meteorologischen Sommer 2009 (MZ1) und 2010 (MZ2) aufgezeichnet wurden. Diese zeigen hinsichtlich der Vegetationsentnahme in Kannegießerbachtal die größten Differenzen.

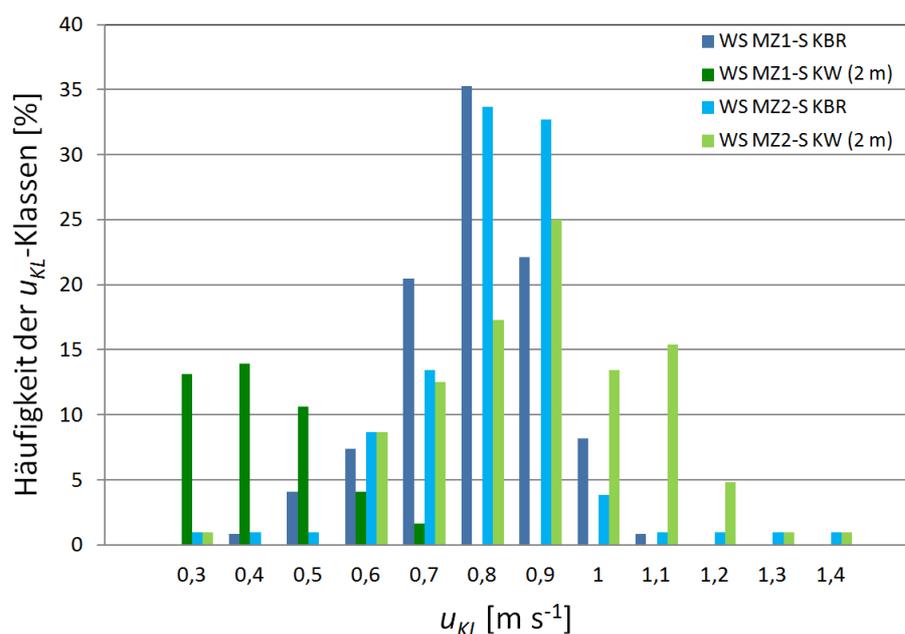


Abb. 110: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an den Stationen KBR und KW im meteorologischen Sommer von MZ1 und MZ2 auf Basis von 60 min-Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,3 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt (vgl. Kap. 5.1.4).

Bei der Betrachtung der Fließgeschwindigkeitsklassen der Kaltluft (Abb. 110) zeigen sich an Station KBR, die nicht durch hohe Vegetationsbestände umgeben ist, wie erwartet ähnliche Verteilungen im Vergleich der Sommer in MZ1-S und MZ2-S. Dabei entfallen etwa 33 % bzw. 35 % der Datenwerte auf die Geschwindigkeitsklasse von $0,8 \text{ m s}^{-1}$. Bei der Betrachtung aller Kaltluftdaten in MZ1 lag die häufigste Geschwindigkeitsklasse an Station KBR bei $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (vgl. Abb. 94), die leichte Reduktion bei alleiniger Betrachtung der Sommermonate ist zum einen einer insgesamt erhöhten Oberflächenrauigkeit durch die Wiesenvegetation zuzuschreiben, zum anderen wirkt die insgesamt dichte Baumvegetation im Tal verlangsamernd auf den Kaltluftabfluss. An Station KW lässt sich die Veränderung der Talvegetation im Vergleich der beiden Messzeiträume deutlich ablesen. Im Sommer von MZ1-S liegt die häufigste u -Klasse noch bei $0,4 \text{ m s}^{-1}$, im Sommer im MZ2-S dagegen ist diese auf $0,9 \text{ m s}^{-1}$ gestiegen. Damit entspricht die häufigste Windgeschwindigkeitsklasse an Station KW der an Station KBR. Insgesamt geht diese prozentuale Auftritts-Steigerung der Klasse $0,9 \text{ m s}^{-1}$ an Station KW im MZ2-S vor allem zu Lasten niedrigerer Klassen. Die prozentuale Häufigkeit des Auftretens der maxi-

malen Windgeschwindigkeitsklasse an Station KW nimmt dabei von etwa 14 % auf 25 % zu, d.h. in MZ2-S kommt es zu einem insgesamt homogeneren Fließverhalten der Kaltluft bei vergleichsweise hohen Fließgeschwindigkeiten an Station KW. Die abfließende Kaltluft im Sommer von MZ2-S zeigt zudem höhere mittlere Fließgeschwindigkeiten, als es noch die Auswertung aller Kaltluftabflusssituationen in MZ2 gezeigt hat. Eine Betrachtung der Sommermonate zeigt demnach deutlichere Unterschiede im Fließverhalten der Kaltluft im Vergleich der Messzeiträume MZ1-S und MZ2-S, als die Betrachtung des Gesamtdatensatzes.

Höhere Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft im Vergleich der Messzeiträume MZ1-S und MZ2-S zeigen sich zudem bei der Differenzbetrachtung der Fließgeschwindigkeit der Stationen KW und KBR. In MZ1-S wurden an Station KW im Mittel $0,4 \text{ m s}^{-1}$ geringere Windgeschwindigkeiten aufgezeichnet als an der Station KBR. Im MZ2-S dagegen liegen die Fließgeschwindigkeiten an Station KW im Mittel um $0,1 \text{ m s}^{-1}$ höher als an Station KBR, was einer mittleren Steigerung der Fließgeschwindigkeit um $0,5 \text{ m s}^{-1}$ entspricht.

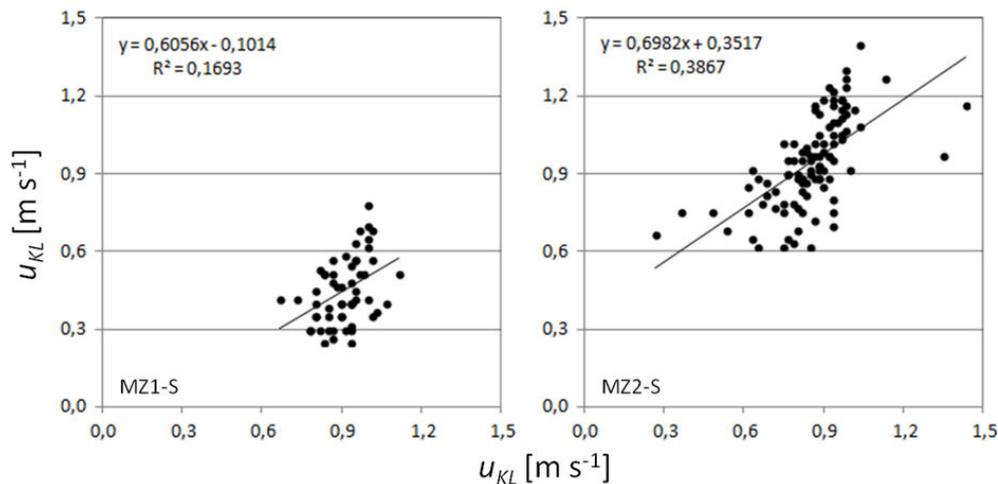


Abb. 111: Korrelation der Fließgeschwindigkeit u_{KL} der Kaltluft zwischen den Stationen KBR und KW im Vergleich der Messzeiträume MZ1-S und MZ2-S auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Bei der statistischen Beziehung der Windgeschwindigkeitswerte von Station KBR in Relation zu Station KW ist in MZ1-S ein recht kompaktes Wertecuster zu erkennen. Windgeschwindigkeiten von mehr als $0,8 \text{ m s}^{-1}$ und weniger als $0,2 \text{ m s}^{-1}$ sind an Station KW nicht zu erkennen. An Station KBR liegen alle Werte zwischen $0,6 \text{ m s}^{-1}$ und $1,1 \text{ m s}^{-1}$. Das Niveau der Werte in MZ2-S an Station KW ist insgesamt wesentlich höher und zeigt eine breitere Streuung als in MZ1-S ($0,6 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,4 \text{ m s}^{-1}$), die Daten von Station KBR streuen in einem Wertebereich von etwa $0,3 \text{ m s}^{-1}$ bis $1,4 \text{ m s}^{-1}$. Hohe Windgeschwindigkeiten an Station KBR, die in MZ1-S noch durch den Vegetationsbestand im Bereich von Station KW verlangsamt wurden, treten nun auch an Station KW auf. Das höhere Bestimmtheitsmaß in MZ2-S ($R^2 = 0,39$) gegenüber MZ1-S ($R^2 = 0,17$) zeigt eine Annäherung der Fließgeschwindigkeit der Stationen KBR und KW in MZ2-S.

Bereits Abb. 102 in Kap. 6.4.3 zeigte eine Veränderung in der Häufigkeit der aufgezeichneten Windrichtungen im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2, von ehemals überwiegend westlichen

Richtungen, hin zu südwestlichen Anströmungen. Da eine südwestliche Anströmung exakt dem Talverlauf des Kannegießerbachtals entspricht, lag schon in Kap. 6.4.3 die Vermutung nahe, dass die westliche Anströmung in MZ1 durch die die Station KW umgebenden Bäume verursacht wurde. Da bei der Betrachtung der sommerlichen Windrichtungsverteilung sowohl im MZ1-S eine weitere prozentuale Steigerung westlicher Anströmungen, als auch in MZ2-S eine Steigerung südwestlicher Anströmungen zu erkennen ist, wird die Annahme einer Beeinflussung durch die Vegetationsstruktur erhärtet. Die Struktur der Schwarzerlen im Luv der Station KW führte in MZ1-S in 77 % aller Zeiten zu einer westlichen Ablenkung der Kaltluft. Nach der Vegetationsentnahme in MZ2-S fallen Ablenkungseffekte durch die Vegetation weg und der südwestliche Sektor zeigt mit 74 % die größte Häufigkeit.

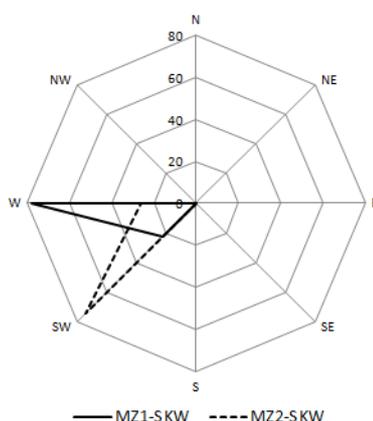


Abb. 112: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an der Station KW in MZ1-S und MZ2-S auf Basis von 60 min-Mittelwerten.

Neben der bislang erfolgten Betrachtung einzelner Jahreszeiten im Vergleich der Messzeiträume MZ1 und MZ2, geben die folgenden Modellergebnisse Aufschluss über die jahreszeitlichen Veränderungen des Kaltluftabflusses innerhalb von MZ1. Nicht berücksichtigt werden dabei jahreszeitliche Unterschiede in Ein- und Ausstrahlung. Vielmehr zeigen die Ergebnisse einzig die Unterschiede, die aufgrund modifizierter Blattflächenindizes (LAI) als Eingabeparameter des Modells KLAM_21 entstehen. So wurde, wie in Kap. 5.3.2 beschrieben, der LAI für sommerliche Laubgehölze von 5,88 auf einen winterlichen Wert von 0,72 reduziert. Im Falle eines Nadelgehölzes erfolgte eine Reduktion von 4,96 auf 1,95. Eine genaue Beschreibung der verwandten Eingabeparameter findet sich in Tab. 9. Alle weiteren Eingabeparameter für die Modellläufe in KLAM_21 blieben unverändert. Dies wiederum führt dazu, dass aufgrund der Modellkonfiguration im Sommer wie Winter gleiche Kaltluftmengen im Untersuchungsgebiet produziert werden, die lediglich im Fließverhalten beeinflusst werden.

Die Veränderungen der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft zwischen belaubtem und unbelaubtem Zustand der Vegetation im Untersuchungsgebiet sind Inhalt von Abb. 113. Dabei treten im Bereich der Stationen KBR und KW im Winter über die Kaltluftmächtigkeit gemittelt bis zu $0,5 \text{ m s}^{-1}$ höhere Windgeschwindigkeiten auf als im Sommer, was durch die Auswertung empirischer Daten bestätigt wird (vgl. Abb. 113). Dadurch, dass in der Talsohle größere Mengen an kalter Luft aufgrund einer höheren Fließgeschwindigkeit abfließen, zeigen die Talhänge sinkende Windgeschwindigkeiten im Winter. Höhere Windgeschwindigkeiten im Winter gegenüber dem Sommer sind in nahezu allen Höhenstu-

fen des Kannegießerbachtals in der Talsohle erkennbar und setzen sich bis in die innerstädtischen Straßenschluchten fort.

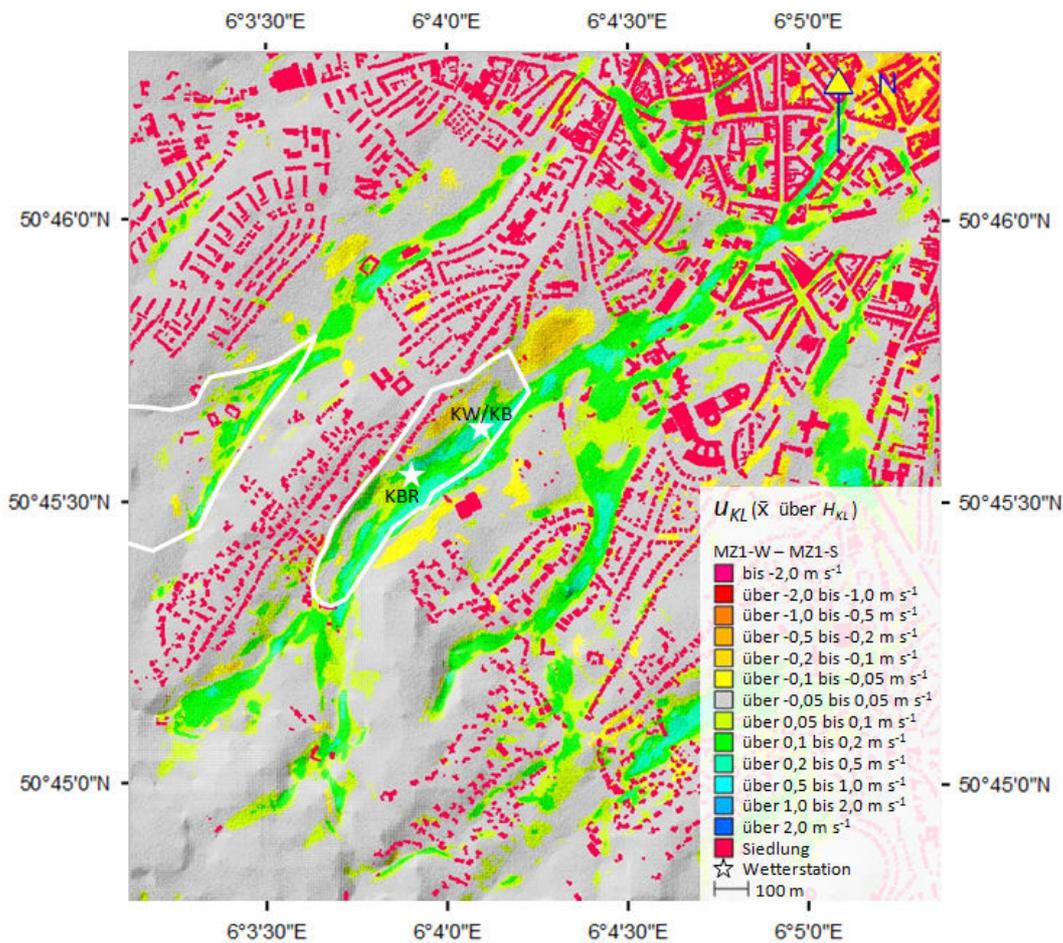


Abb. 113: Über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelte Differenz der Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10).

Bei der Betrachtung der Differenzen der Volumenstromdichte (Abb. 114) konzentrieren sich die Unterschiede zwischen belaubtem und unbelaubtem Zustand der Baumvegetation stärker auf die Talsohle. Da die Volumenstromdichte zur planerischen Betrachtung der städtischen Belüftung herangezogen wird (vgl. Kap. 3.1), deutet eine gestiegene Volumenstromdichte bei unbelaubtem Zustand der Bäume einen stadtklimatischen Vorteil an, da im Hinblick auf die Vegetationsentnahme, oder die Freihaltung der Talsohle von Baumbeständen in den Sommermonaten²⁷, ähnliche Effekte zu erwarten sind. In den Wintermonaten ist eine höhere Kaltluft-Volumenstromdichte für das innerstädtische Temperaturniveau insgesamt nicht erwünscht. Steigende Volumina von Kaltluftabflüssen

²⁷ Wie Abb. 108 zeigt, ist die Reduktion der Vegetation, wie sie in der vorliegenden Untersuchung vorgenommen wurde, nicht ausreichend, da die Volumenstromdichte auf Höhe der Station KW nach wie vor erheblich, im Vergleich mit den höher gelegenen Talbereichen, reduziert ist. Zur Steigerung des Kaltluftvolumenstromes, ohne die Beachtung weiterer Belange, wäre ein flächigerer Rückschnitt von hoch aufwachsender Vegetation nötig.

sind bei niedrigen Lufttemperaturen klimatologisch gar als nachteilig anzusehen. Durch dichte oder immergrüne Vegetation versucht man vielfach die Abflussmengen zu begrenzen, um beispielsweise die Frostgefährdung von Obst- und Weingehölzen zu minimieren (vgl. Kap. 3.4). Dem Abfluss von Kaltluft im Winterhalbjahr kommt allerdings eine lufthygienische Bedeutung zu, da durch winterliche, städtische Emissionen (Hausbrand o.ä.) und vermehrt auftretende Inversionswetterlagen lufthygienische Belastungssituationen bei Städten in Tallage, wie Aachen, häufig auftreten. Die Nachteile von Schadstoffanreicherung in der Kaltluft bei lang anhaltenden Inversionswetterlagen wurden an anderer Stelle beschrieben (vgl. Kap. 3.6).

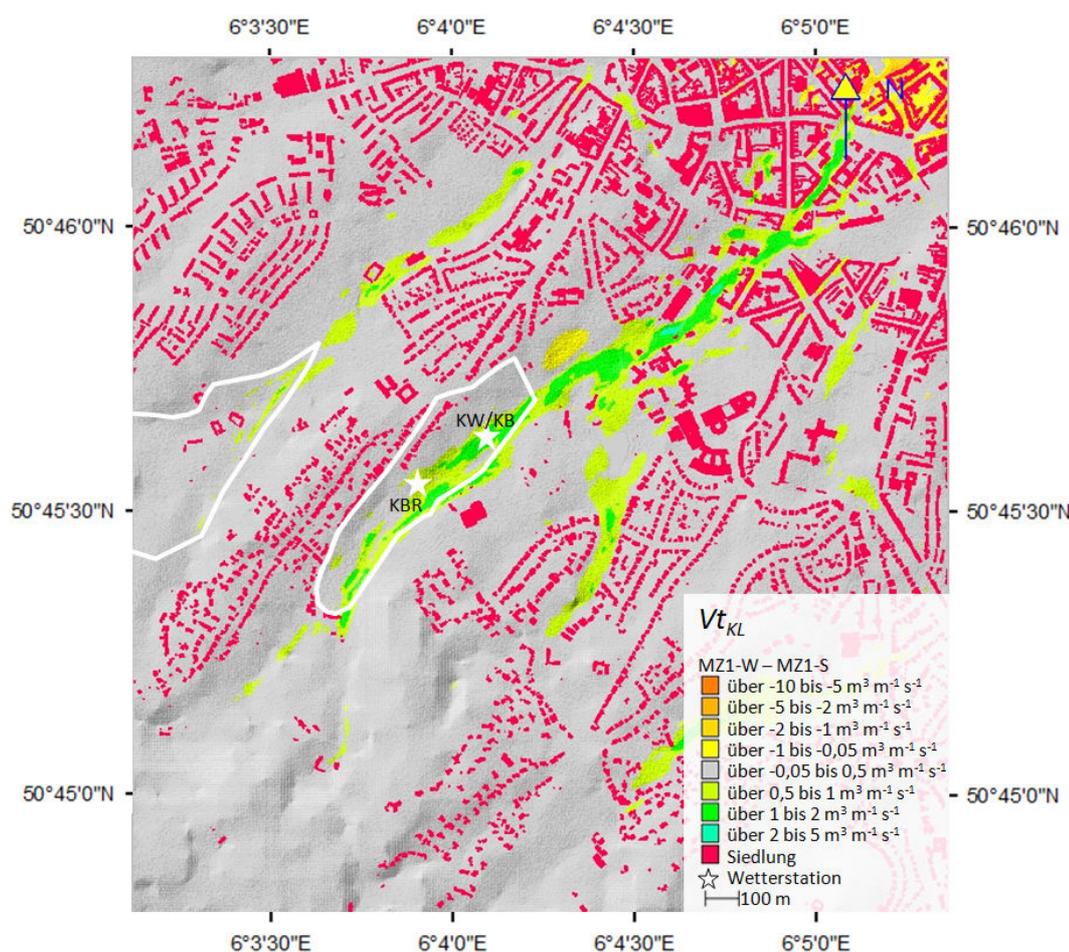


Abb. 114: Differenz der Volumenstromdichte $V_{t_{KL}}$ zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung; Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10).

Das schnelle Abfließen der Kaltluft bewirkt bei gleichen Kaltluftproduktionsraten im Kannegießerbachtal eine Reduktion der Kaltluftmächtigkeit in weiten Teilen des Talbereiches (vgl. Abb. 115). Dabei verringert sich die Höhe der Kaltluft im Kernbereich des Tales um bis zu 4 m. Eine im Vergleich zum belaubten Vegetationszeitraum geringere Kaltluftmächtigkeit findet sich im gesamten Talverlauf bis hin zum Übergang zur innerstädtischen Bebauung. Steigende Kaltluftmächtigkeiten sind nur im Innenstadtbereich Aachens zu verzeichnen. Begründet sind diese im schnelleren Zufluss der Kaltluft aus dem randstädtischen Kaltlufteinzugsgebiet bei gleichbleibender Reduktion dieser durch die städtische Überwärmung.

Zusammenfassend zeigen sich große Unterschiede der Kaltluftabfluss-Eigenschaften bei Betrachtung der unterschiedlichen Jahreszeiten. Der Winter zeigt höhere Abflussmengen mit größerer Reichweite bei reduzierter Kaltluftmächtigkeit. Nimmt man alleine das Kriterium größerer Abflussvolumina als Idealfall für den Sommer, so scheint eine flächige Verringerung des LAI durch Vegetationsentnahme als sinnvoll. In den vorangegangenen Kapiteln wurde jedoch deutlich, dass die Betrachtung eines Einzelkriteriums nicht ausreicht, um eine Vegetationsreduktion stimmig zu begründen. Hierzu sei an dieser Stelle sei auf Kap. 8 verwiesen.

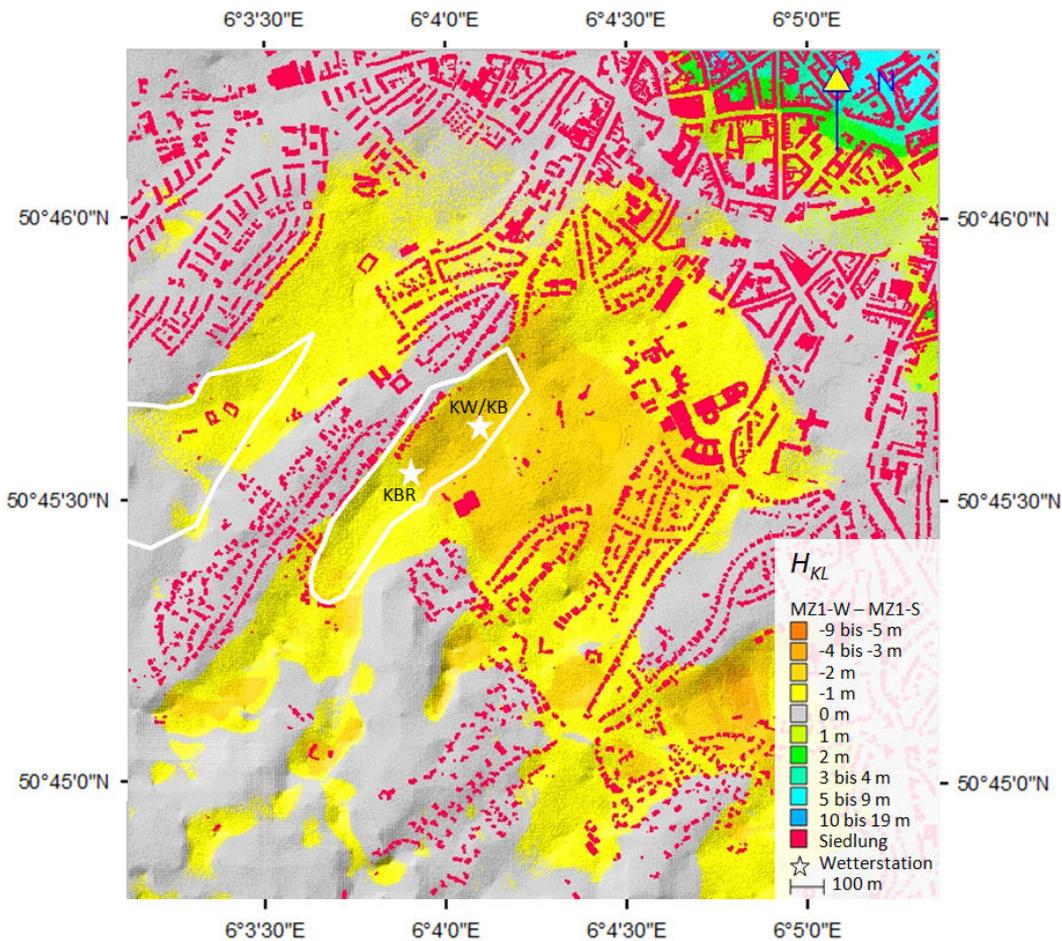


Abb. 115: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen unbelaubtem und belaubtem Zustand der Baumvegetation in MZ1 nach 90 min Modellierung (Konfiguration: Lauf 13 / 14 (vgl. Tab. 10).

6.4.8 Vegetationsspezifische Auswertungen im Johannisbachtal

Bislang wurden zur Beschreibung von Vegetationseinflüssen auf den Kaltluftabfluss hauptsächlich im Kannegießerbachtal aufgezeichnete Daten verwandt. Der Hauptgrund dafür liegt vor allem darin begründet, dass im Kannegießerbachtal mit der Station KBR Daten aufgezeichnet wurden, die den Kaltluftstrom unabhängig von einer unmittelbaren Vegetationsbeeinflussung zeigen. Die Station KBR konnte somit als Referenzstation für den Kaltluftabfluss herangezogen werden. Da im Johannisbachtal eine vergleichbare Referenzstation nicht verfügbar war, ließ sich zwar ein Kaltluftdatensatz ent-

sprechend der Kriterien in Kap. 5.1.6 aus dem Gesamtdatensatz extrahieren, die aufgezeichneten Werte an Station JH konnten jedoch nicht als Differenzen, sondern lediglich als absolute Werte betrachtet werden. Die mobile Bemessung der einzelnen Parameter, die neben den Stationsdaten erfasst wurden, hatte zudem, wie aus Tab. 11 ersichtlich, einen räumlichen Schwerpunkt im Kannegießerbachtal. Grund dafür war die teilweise aufwendige Vorbereitung der Messungen, die Abhängigkeit von der vorherrschenden Wetterlage sowie das Bestreben, eines der beiden Täler hinsichtlich der Kaltlufteigenschaften möglichst detailliert und umfassend abzubilden. Hierfür war das Kannegießerbachtal, u.a. aufgrund der zahlreichen Voruntersuchungen und der umfassenderen Vegetationsveränderung, geeigneter.

In Folge werden daher neben Auswertungen der Aufzeichnungswerte hauptsächlich Modellläufe zur Beschreibung der Abflusssituation und der Veränderungen durch die Vegetationsentnahme verwendet. Hinzu kommen Beobachtungen und Messungen die während der Geländearbeit aufgezeichnet wurden (vgl. Tab. 11).

Insgesamt sind bei der Betrachtung im Johannisbachtal bezüglich der Kaltlufteigenschaften nicht derart große Unterschiede im Vergleich der beiden Messzeiträume zu erwarten, wie das im Kannegießerbachtal der Fall ist. Grund ist die wesentlich dichtere und höhere Vegetationsstruktur im Kannegießerbachtal. Das Johannisbachtal ist im Bereich der Station JH bis auf den Heckenbestand in Form von Windschutzstreifen zur Geländegliederung frei von Gehölzen und wird als Weideland bewirtschaftet (vgl. Abb. 21). Der Heckenbestand, der im MZ1 im Luv der Station JH stand, wies zudem aufgrund der heterogenen Pflanzensammensetzung eine erhöhte Porosität auf, die nicht mit der Dichtigkeit des Schwarzerlenbestandes im Kannegießerbachtal vergleichbar war. Der Durchmesser der Hecke betrug im Mittel 3 m bis 5 m (vgl. Abb. 26).

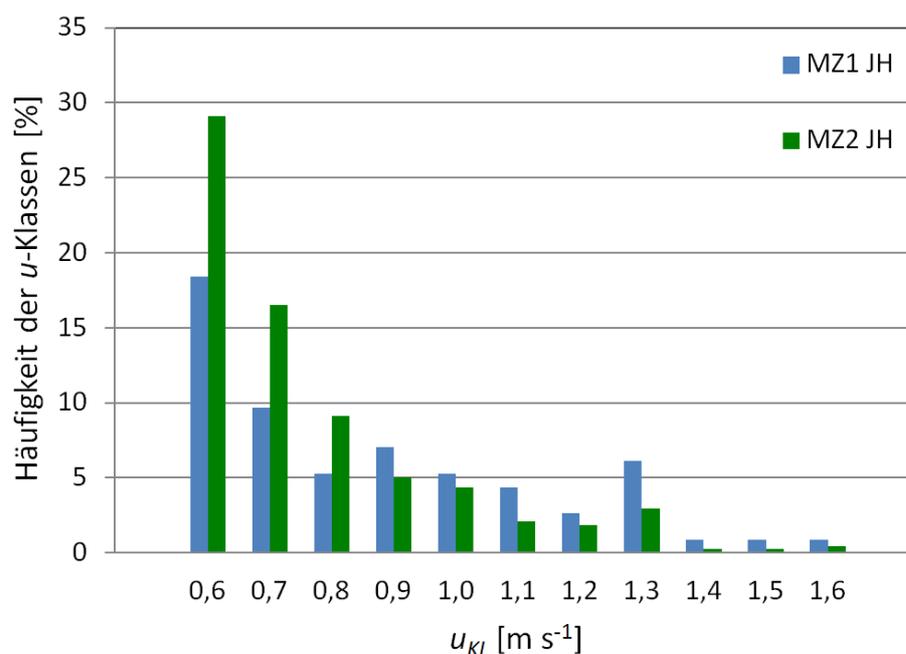


Abb. 116: Prozentuale Verteilung der Kaltluftabflussgeschwindigkeitsklassen an der Station JH in MZ1 und MZ2 auf Basis von 30-min Mittelwerten. Die Windgeschwindigkeit u_{KL} wurde in $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Klassen aufgeteilt. Klassen $< 0,5 \text{ m s}^{-1}$ wurden nicht dargestellt.

Wie auch schon in Bezug auf den Gesamtdatensatz beeinflusst die Vegetation des Tales im Wesentlichen das Fließverhalten der Kaltluft. Zur Veranschaulichung der Veränderungen der Fließgeschwindigkeit wurden die Werte von Station JH in Abb. 116 in Windgeschwindigkeitsklassen eingeteilt. Beide Messzeiträume zeigen ein übereinstimmendes Auftrettsmaximum in der Klasse $0,6 \text{ m s}^{-1}$, wobei diese Klasse in MZ1 in ca. 18 % und in MZ2 in 29 % aller Fälle aufgezeichnet wurde. Die Steigerung der Abflussklasse $0,6 \text{ m s}^{-1}$ in MZ2 gegenüber MZ1 findet vor allem zu Lasten höherer Windgeschwindigkeiten statt, die in MZ2 seltener auftreten. So finden sich Windgeschwindigkeitsklassen ab $0,9 \text{ m s}^{-1}$ in MZ1 häufiger als in MZ2. Auch wenn diese Tatsache unterschiedlichen Witterungsverhältnissen in MZ1 und MZ2 geschuldet sein kann, spricht dies dennoch für einen gleichmäßigeren Kaltluftabfluss in MZ2. Wenn Kaltluftabfluss an der Station JH nach den Kriterien in Kap. 5.1.6 gemessen wurde, fanden sich sowohl im MZ1 als auch in MZ2 keine Ausflussgeschwindigkeiten unter $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Bedingt wird dies vornehmlich durch die nahezu optimalen Kaltluftabfluss- und Produktionseigenschaften des Tales. Die bewirtschafteten Wiesen sind gute Kaltluftbildner, die vergleichsweise geringe Oberflächenrauigkeit behindert den Abfluss kalter Luft kaum (vgl. Kap. 3.3).

Die vorhandenen Gehölzbestände im Johannisbachtal sind wenig flächig und porös. Verdeutlicht wird dies, neben der Auswertung der Windgeschwindigkeitsklassen (vgl. Abb. 116), durch Abb. 117. Diese zeigt die Abflussgeschwindigkeit der Kaltluft im Johannisbachtal, die kleinräumig im Kerngebiet höhere Fließgeschwindigkeiten erreicht als dies im Kannegießerbachtal der Fall ist.

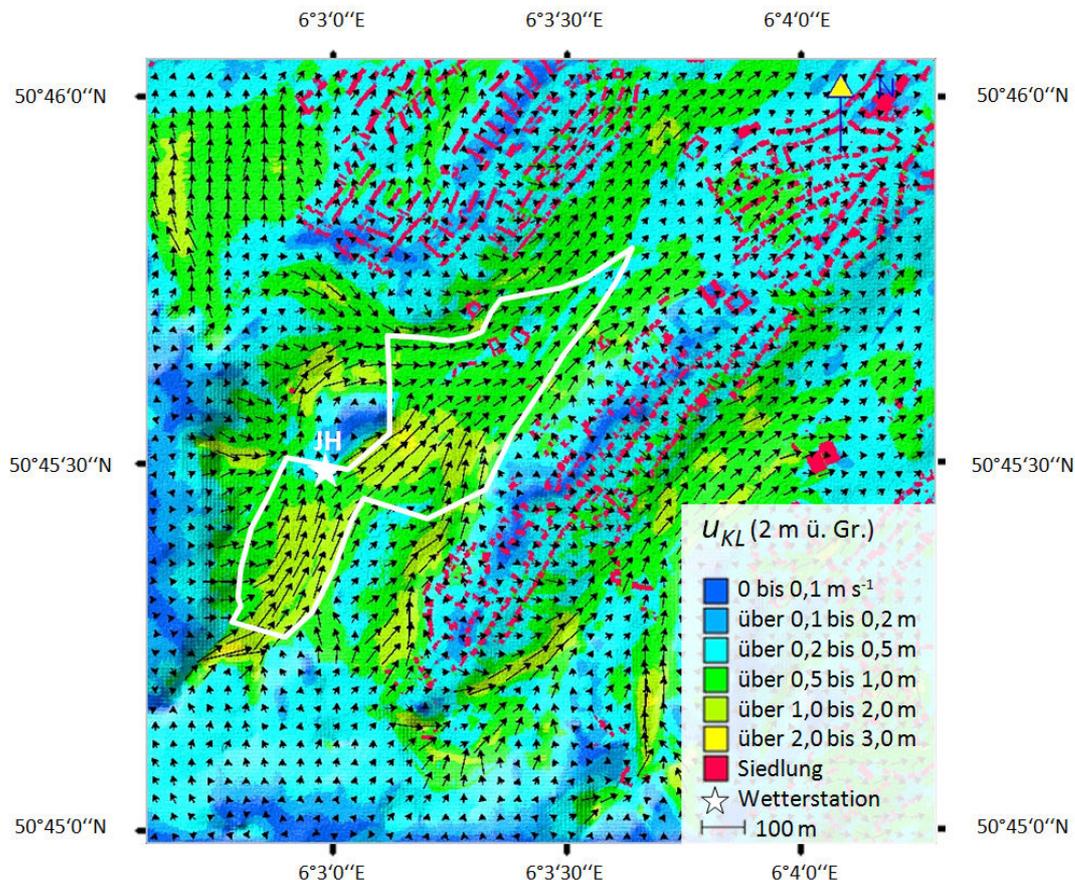


Abb. 117: Betrag und Richtung (Pfeile) der Fließgeschwindigkeit u_{KL} in 2 m Höhe nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10).

Bei einer Talquerprofilmessung am 04.09.2010 wurden an Messpunkt M9 (vgl. Abb. 42) Windgeschwindigkeiten von bis zu 2 m s^{-1} gemessen, dieser Bereich hoher Geschwindigkeiten ist in Abb. 117 nordöstlich von Station JH zu erkennen. Im Bereich von JH dagegen, nur etwa 100 m entfernt, liegen die modellierten Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft unter 1 m s^{-1} . Der Mittelwert der Windgeschwindigkeit an Station JH unter Kaltluftabflussbedingungen beträgt in MZ1 $0,7 \text{ m s}^{-1}$ und in MZ2 $0,6 \text{ m s}^{-1}$. Aufschluss über die Gründe dieser kleinräumig stark unterschiedlichen Abflussgeschwindigkeiten gibt die Orographie des Tales.

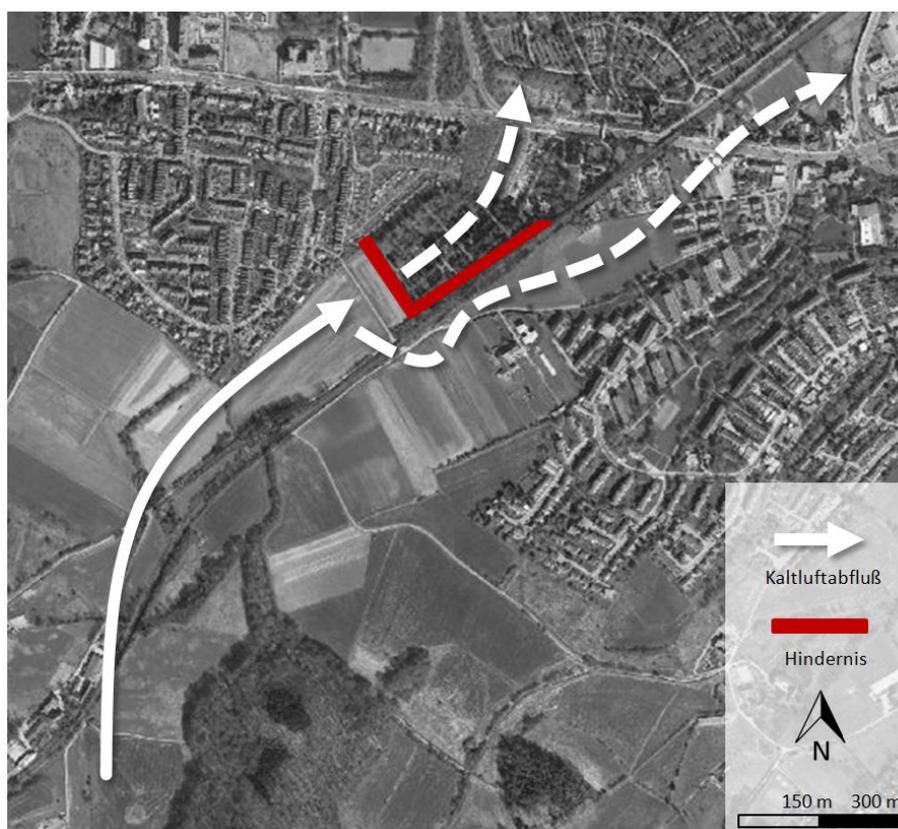


Abb. 118: Lenkung eines Kaltluftstromes als Folge eines Kaltluftstaus im Luv hoch aufwachsender Baumvegetation im Dorbachtal.

Nördlich von Station JH befindet sich eine waldbestandene Anhöhe. Der Orographie folgend umfließt die Kaltluft einen etwa 100 m breiten Talbereich westlich des angesprochenen Waldgebietes (vgl. Abb. 37). Dieser Talabschnitt ist jedoch auf etwa 100 m Länge von einem dichten, ca. 5 m hohen Busch- und Baumbestand verstellt, so dass die Kaltluft im Abfluss behindert wird, was Abb. 117 belegt. Die Kaltluft wird aufgestaut, fließt nach Nordwesten, um schließlich östlich des Waldes abzufließen. Dort trägt sie aufgrund steigender Abflussmengen zu einer Geschwindigkeitssteigerung des Kaltluftabflusses bei. Belegt wurde diese Umlenkung bei einer Ballonsondierung am 04.09.2010, bei der an Messpunkt M8 (vgl. Abb. 42) Kaltluftabfluss aus dem westlichen Sektor zu verzeichnen war. Zudem stieg die Geschwindigkeit im bodennahen Bereich an M8 (vgl. Abb. 42) mit zunehmender Höhe an ($5 \text{ m ü. Gr.} = 0,2 \text{ m s}^{-1}$; $10 \text{ m ü. Gr.} = 0,4 \text{ m s}^{-1}$; $15 \text{ m ü. Gr.} = 0,5 \text{ m s}^{-1}$). Ähnliche Effekte wurden bei einer weiteren Messung im westlich des Johannisbachtals gelegenen Nachbartal (Dorbachtal) empirisch erfasst. Dort führte eine Reihe von Bäumen zu einem Kaltluftstau, so dass die Kaltluft einen

Bahndamm überfloss und den eigentlichen Talverlauf verließ (vgl. Abb. 118). Die Umlenkung erfolgt in diesem Fall in Richtung der Aachener Innenstadt. Für die Stadtplanung ergeben sich folglich Möglichkeiten, durch die gezielte Einbringung von Vegetation in die Kaltluftbahn Lenkungseffekte zu erzielen.

Bei der Auswertung der Windrichtungshäufigkeiten zeigt sich neben einem südlichen Sektor, mit maximaler prozentualer Auftretshäufigkeit in beiden Messzeiträumen (57 % in MZ1 und 47 % in MZ2), ein starker südwestlicher Sektor, der die Umlenkung der Kaltluft im Staubereich und Luv des beschriebenen Waldbestandes andeutet. Gerade in MZ2, wo Ablenkungseffekte durch die Entnahme der in MZ1 talaufwärts gelegenen Hecke minimiert wurden (vgl. Abb. 26), wird Station JH in 42 % aller Fälle aus Südwest angeströmt.

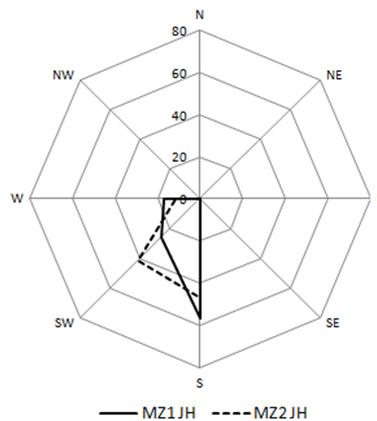
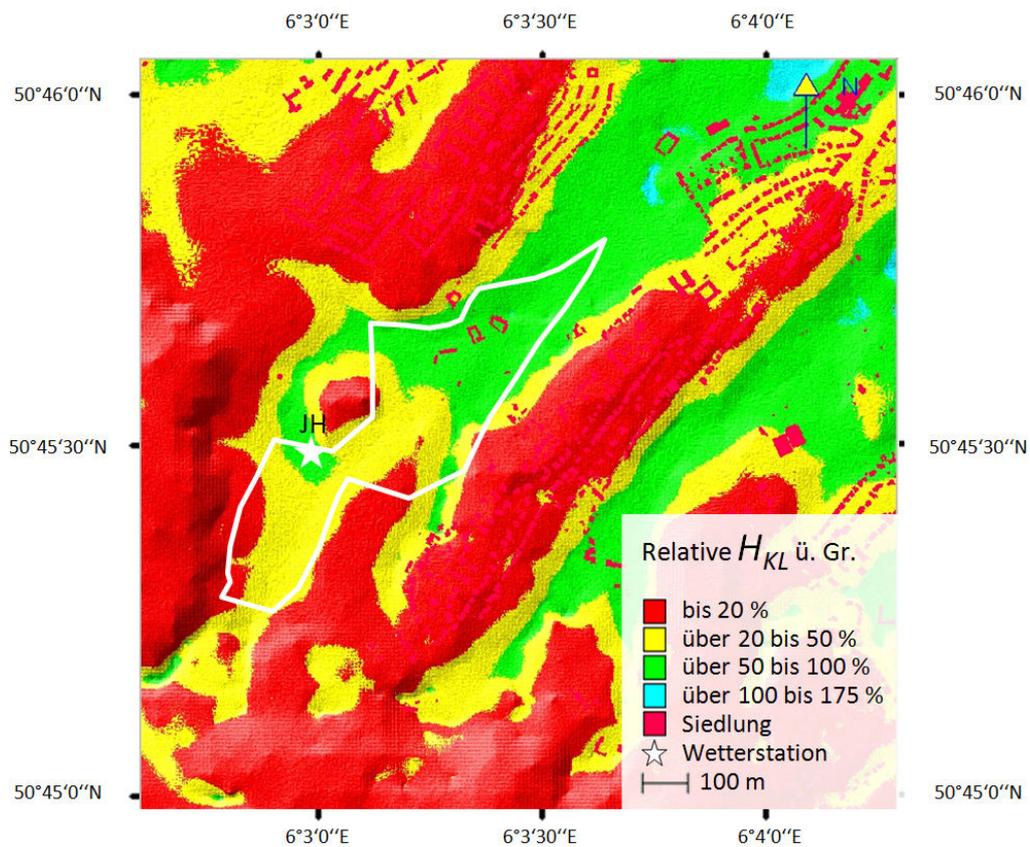
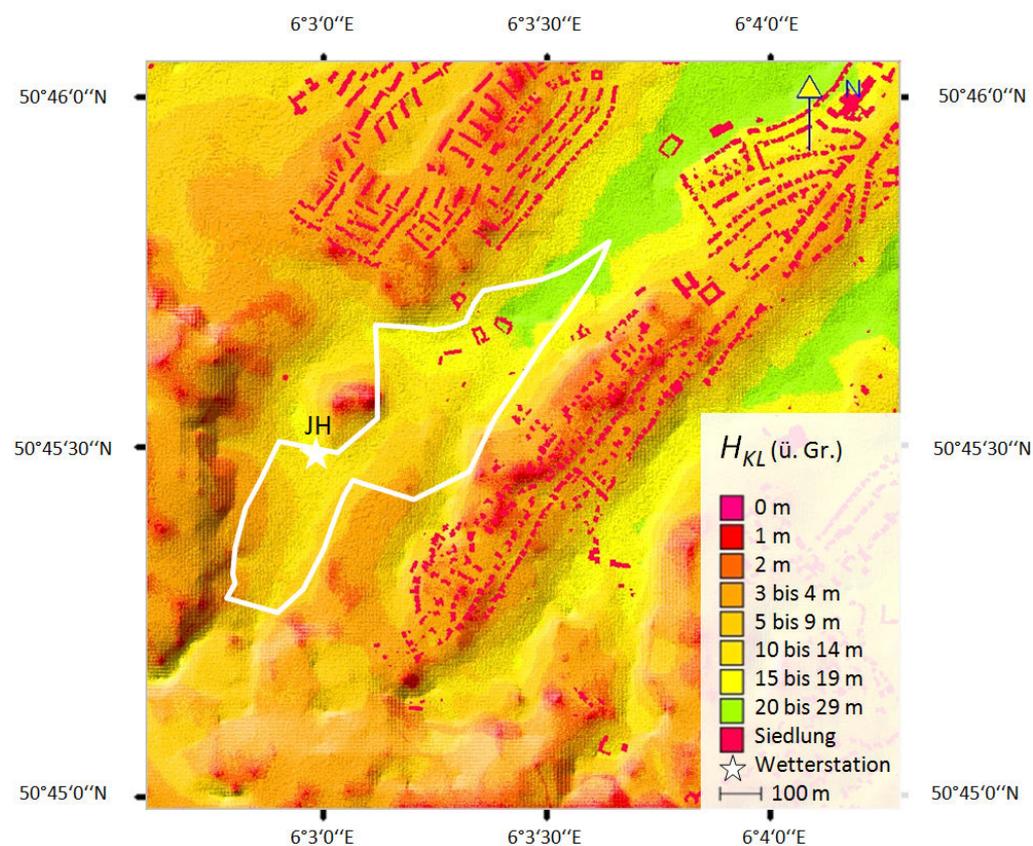


Abb. 119: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Windrichtung ϕ an der Station JH in MZ1 und MZ2 auf der Basis von 30 min-Mittelwerten.

Die Behinderung des Abflusses der Kaltluft durch den nördlich von Station JH gelegenen Waldbestand ist in Abb. 121 bis in die Stationsumgebung von Station JH zu erkennen. Dennoch ist die Stationsumgebung von Station JH eindeutig ein Kaltluftabflussgebiet, da dort weniger als 100 % der Kaltluftmächtigkeit erreicht werden, die unter optimalen Bedingungen ohne Zu- und Abfluss dort nachzuweisen wären. Im Bereich höherer Abflussgeschwindigkeiten nordöstlich von Station JH werden bezüglich der relativen Kaltluftmächtigkeit maximal 50 % erreicht. Die vergleichsweise guten Kaltluftabflussbedingungen im Johannisbachtal gegenüber dem Kannegießerbachtal tragen dazu bei, dass die Kaltluftmächtigkeiten im Johannisbachtal allgemein niedriger sind. So betragen die maximalen Kaltluftmächtigkeiten im Kerngebiet des Kannegießerbachtals bis zu 29 m. Im überwiegenden Kerngebiet des Johannisbachtals werden Höhen von 10 bis 20 m erreicht.

Abb. 120: Relative Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10).Abb. 121: Kaltluftmächtigkeit H_{KL} nach 90 Minuten Modellierung; Konfiguration: Lauf 40 (vgl. Tab. 10).

7. Modellierte Vegetationsszenarien

7.1 Allgemeine Betrachtung modellierter Vegetationsszenarien

In den vorherigen Kapiteln wurden bereits Modellläufe bei der Identifizierung von Kaltluftcharakteristika zur Hilfe genommen. In Kap. 7 werden verschiedene Vegetationsszenarien modelliert, bei denen jeweils die Vegetationsstrukturen im Kerngebiet des Kannegießer- und Johannisbachtals verändert wurden. Dabei wurde keine Vegetation entnommen, sondern lediglich verschoben oder hinzugefügt. Eine genaue Darstellung der modellierten Vegetationsstruktur sowie die jeweilige Nomenklatur ist Kap. 5.3.3 zu entnehmen. Die Beschreibung der jeweiligen, modelllaufspezifischen Parameter findet sich in Tab. 10.

Die Darstellung von Szenarien für die weitere Entwicklung der in den Talbereichen vorzufindenden Vegetationsstruktur ist für stadt- und landschaftsplanerische Fragestellungen von besonderem Interesse (vgl. Kap. 3.7). In der vorliegenden Arbeit wurden zum Zwecke der empirischen Datenerhebung und Modellkalibrierung Vegetationsbestände im Talbereich entnommen. Eine solch detaillierte Untersuchung ist in der Praxis meist nicht möglich und mit hohen Kosten verbunden. Eine modellhafte Darstellung veränderter Strukturen ist zeit- und kostensparender und macht zudem einen Eingriff in die Talvegetation, ohne vorherige Kenntnisse des Nutzens, überflüssig. Die hohe Übereinstimmung der Modellergebnisse aus KLAM_21 mit den empirischen Daten lassen den Schluss zu, dass die Ergebnisse der folgenden Modellläufe, die ohne einen Datenvergleich auskommen müssen, als realistisch betrachtet werden können.

7.2 Fließgeschwindigkeit

7.2.1 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur

Abb. 122 zeigt die Differenz der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit für das Szenario einer reduzierten, kaltluftoptimierten Vegetationsstruktur (VS2-SZ1) im Vergleich zum Talzustand in MZ2 (VS1) im Kannegießerbachtal. Gut ersichtlich sind deutliche Steigerungen der Kaltluft-Fließgeschwindigkeit im Bereich der Vegetationsveränderungen. Durch das Verschieben der Baumvegetation aus der Talsohle steigen die Fließgeschwindigkeiten dort um bis zu $0,5 \text{ m s}^{-1}$ im Vergleich der beiden Modellläufe, und befinden sich zum Zeitpunkt der Resultatsausgabe (90 min) noch in Steigerung. Die erhöhten Fließgeschwindigkeiten in der Talsohle bedingen einen Geschwindigkeitsrückgang der fließenden Kaltluft an den Talschultern in etwa gleicher Größenordnung. Die Geschwindigkeitszunahme bleibt insgesamt auf den Bereich begrenzt, in dem die Vegetation verändert wurde und reicht nur wenige 10 m bis 100 m weiter talauf- oder abwärts. Eine Veränderung der Windgeschwindigkeiten weiter talabwärts in Richtung Innenstadt ist nicht zu erkennen. Bei der vorangegangenen Auswertung empirischer Daten ließ diese Steigerung der Windgeschwindigkeit in der Talsohle – wie sie auch schon im Vergleich der beiden Messzeiträume MZ1 und MZ2 bei Betrachtung des synoptischen Windes zu verzeichnen war – auf Düseneffekte schließen (vgl. Abb. 81 und Abb. 84). Ins-

gesamt kommt das Fließverhalten der Kaltluft in seinen Eigenschaften diesem Effekt auch nahe, allerdings ist es wesentlich großräumiger (vgl. Abb. 11, [Bd]). Ein kleinräumiger Durchlass hätte in Bezug auf Kaltluft nach der Betrachtung der Untersuchungsergebnisse in Kap. 6 nicht derartige Auswirkungen, wie sie bei Luftströmungen zu finden sind. In dem Falle würden die Eigenschaften des Kaltluftstaus überwiegen. Auch wenn ein erheblicher Teil der Vegetation aus der Talsohle verschoben wurde, findet noch eine Ablenkung der Kaltluft statt. Dies ist zum einen ein Indiz für die großen Mengen abfließender Kaltluft im Kannegießerbachtal, zum anderen für den Bedarf an einer ausreichend großen Talsohle ohne hoch aufwachsende Vegetation, wenn Einflüsse auf den Kaltluftabfluss minimiert werden sollen.

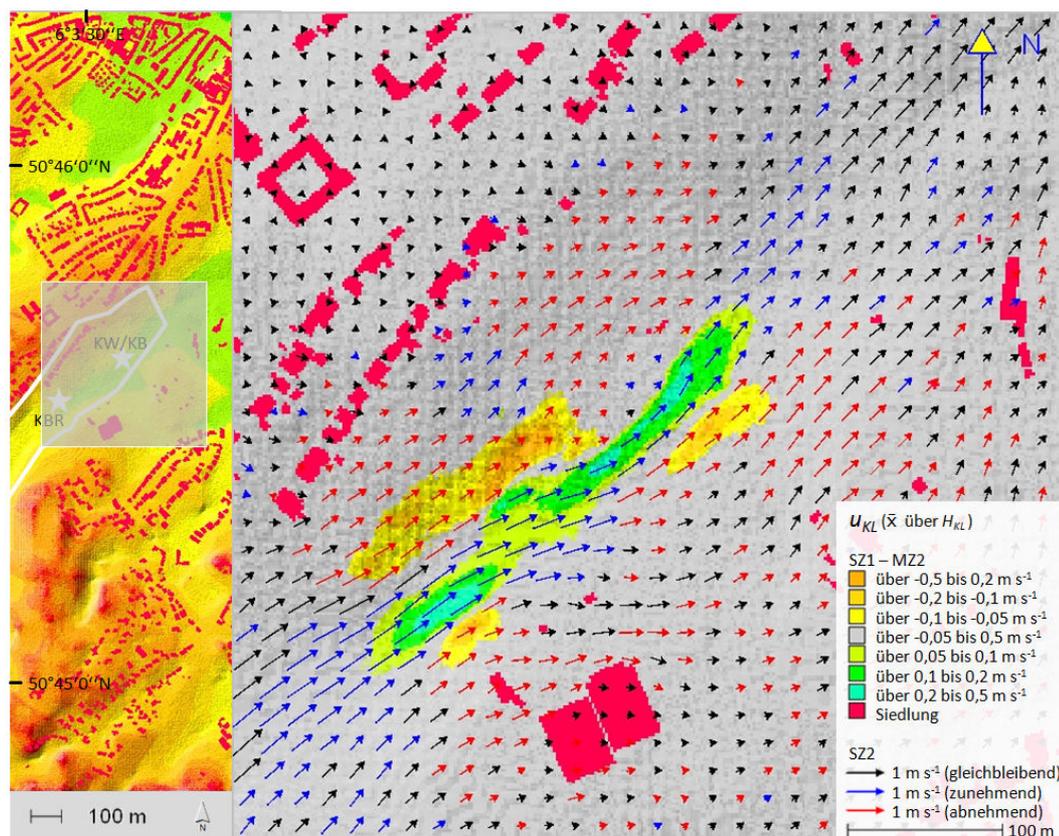


Abb. 122: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-M22 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10).

Die Unterschiede bei der Betrachtung der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft im Johannisbachtal bei einer Reduktion der Hindernisse für den Kaltluftabfluss sind nicht so stark ausgeprägt wie im Kannegießerbachtal (Abb. 123). Steigende Fließgeschwindigkeiten sind punktuell nur dort zu erkennen, wo unmittelbar Vegetation verschoben wurde und betragen im Maximum 0,1 m s⁻¹. Gut zu erkennen ist zudem, dass ein Teil der quer zum Tal verlaufenden Heckenabschnitte die verschoben wurden, dazu führen, dass sich die Abflussgeschwindigkeit der Kaltluft in seitlich angrenzenden Heckenabschnitten verringert. Die bodennahe Kaltluft ist demnach nicht mehr gezwungen, bestehende Freiräume in der Hecke zu durchfließen, sondern nimmt die nächst mögliche, der Orographie folgende, Leitbahn. Zu

beachten ist bei allen Darstellungen der Fließgeschwindigkeit in Kap. 7, dass diese jeweils über die Kaltluftmächtigkeit gemittelte Werte abbilden, um nach Möglichkeit das Verhalten der gesamten Kaltluftschicht darzustellen. Im Falle des Johannisbachtals beträgt die empirisch und modellhaft ermittelte Kaltluftmächtigkeit etwa 20 m (an M8 und M10, vgl. Tab. 11, vgl. Abb. 42), so dass die Veränderungen der Heckenvegetation über die Höhe gemittelt geringer ausfallen als in 2 m ü. Gr. Dennoch wurden die gemittelten Werte als Darstellungsform in Kap. 7 gewählt, da diese für planerische Zwecke ein realistischeres Bild liefern. Selbiges gilt für das Kannegießerbachtal, wo die Kaltluftmächtigkeit bis zu 40 m beträgt. Allerdings findet sich dort eine in der Fläche und Höhe stärker modifizierte Vegetationsstruktur, so dass die Auswirkungen dieser auf die über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Werte größer sind.

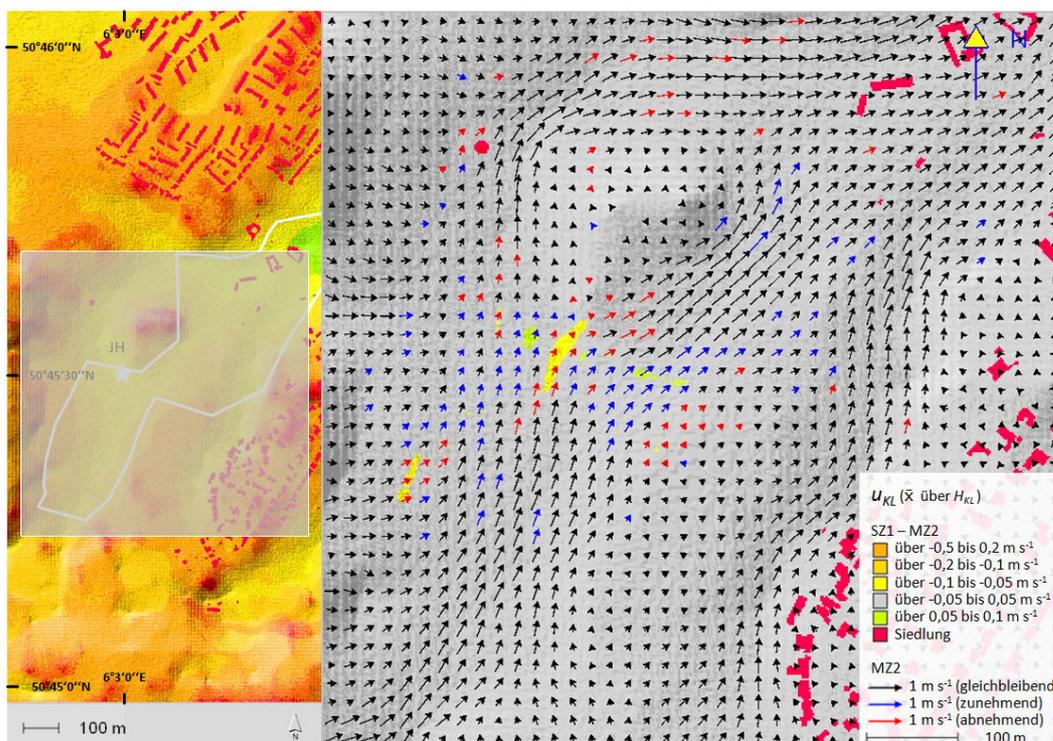


Abb. 123: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 44 (VS4-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 44 / 42 (vgl. Tab. 10).

7.2.2 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur

Umgekehrte Effekte als die in Kap. 7.2.1 beschriebenen finden sich in Abb. 124, die die Unterschiede zwischen einer für den Kaltluftabfluss nachteiligen Vegetationsstruktur (VS2-SZ2) und der Vegetationsstruktur aus MZ2 (VS1-MZ2) zeigt. Der Abfluss der Kaltluft in der Talsohle wird um bis zu $1 m s^{-1}$ verlangsamt, die Geschwindigkeit an den Talschultern erhöht sich um maximal $0,2 m s^{-1}$. Die Effekte dichter Vegetation haben laut KLAM_21 offensichtlich großflächigere Auswirkungen auf die Fließgeschwindigkeit, als dies bei einer Geschwindigkeitserhöhung im reduzierten Vegetationsbestand der Fall war (Abb. 122). Die räumliche Auswirkung der Fließgeschwindigkeits-Veränderungen ist ebenfalls

auf den Talabschnitt beschränkt, der der Vegetationsveränderung unterzogen wurde. Auch über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelt, ist ein deutliches „Umfließen“ der Vegetationsbestände in der Talsohle zu erkennen. Zum Zeitpunkt der Resultatsausgabe (90 min) wird deutlich, dass der Kaltluftstrom im Kartenausschnitt insgesamt einer stärkeren Veränderung unterliegt, als dies in Abb. 122 zu erkennen ist. Eine Modifikation des Kaltluftabflusses hin zu reduzierten Fließgeschwindigkeiten geht demnach „schneller“ von Statten, als die Schaffung einer Kaltluftabfluss-optimierten Luftleitbahn. In Bezug auf das Kannegießerbachtal ist ein weiterer zukünftiger Bewuchs mit Baumvegetation ohne verstärkte anthropogene Eingriffe, sehr wahrscheinlich. Die Entwicklung des Kannegießerbachtals entspricht folglich eher SZ2 als SZ1.

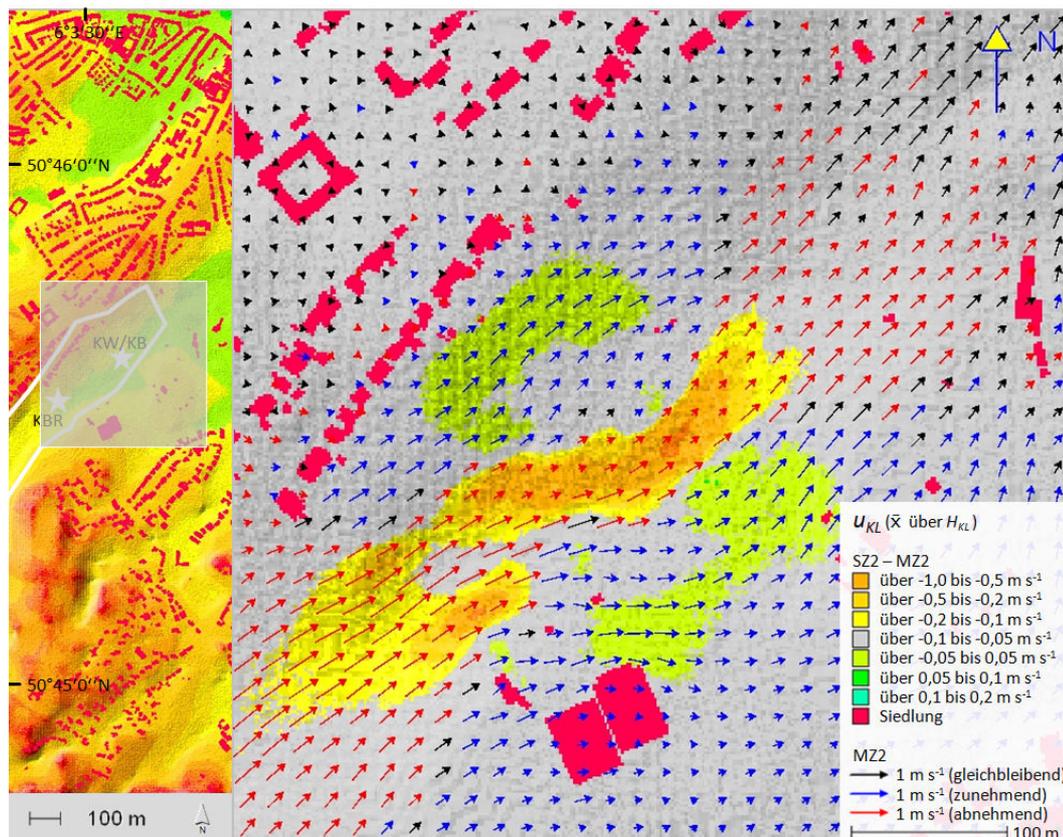


Abb. 124: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10).

Auch im Johannesbachtal zeigen sich deutliche Differenzunterschiede der Fließgeschwindigkeit zwischen SZ2, mit einer erweiterten Vegetationsstruktur (VS4-SZ2), und dem heutigen Talzustand (VS3-MZ2). Die zusätzlich in das Tal eingebrachte Heckenvegetation, die zudem so platziert wurde, dass sie überwiegend quer zum Tal verläuft, verringert deutlich die Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft in den entsprechenden Talbereichen um bis zu $0,5 m s^{-1}$. So kommt es vor allem in der Talsohle zu einem deutlich erkennbaren Kaltluftstau im Luv der Hecken, der in KLAM_21 teilweise hangaufwärts in 50 m bis 100 m Entfernung abgebildet wird.

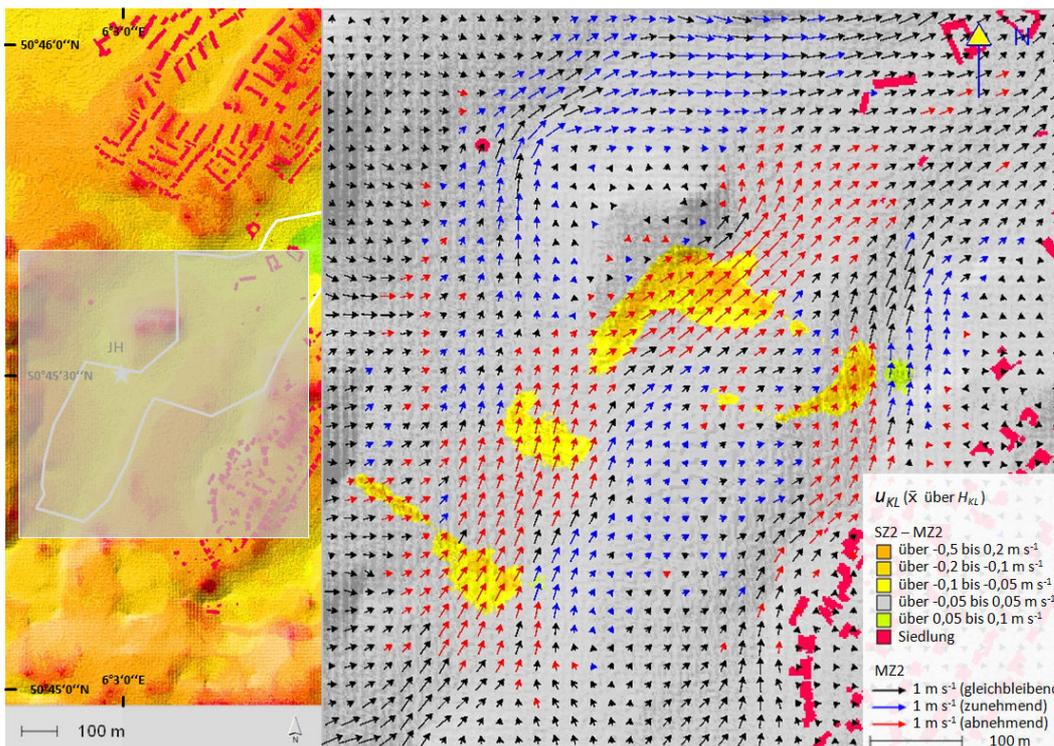


Abb. 125: Betragsdifferenz und Vektoren der über die Höhe der Kaltluftschicht gemittelten Fließgeschwindigkeit u_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 46 / 42 (vgl. Tab. 10).

7.3 Kaltluftmächtigkeit

7.3.1 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur

Die in Abb. 122 aufgrund reduzierter Vegetationsstrukturen schneller abfließende Kaltluft, bewirkt keine nennenswerten Unterschiede im Vergleich der Kaltluftmächtigkeiten beider Messzeiträume (VS2-SZ1 und VS1-MZ2). Allenfalls punktuell findet eine leichte Reduktion der Kaltluftmächtigkeit (bis zu 1 m) statt, die bei Mächtigkeiten von bis zu 40 m empirisch kaum nachweisbar sein dürfte. Offensichtlich ist die nachströmende Kaltluftmenge groß genug, um die größeren Abflussvolumina aufgrund der Geschwindigkeitssteigerung der abfließenden Kaltluft zu kompensieren. Insgesamt stimmt dies mit Beobachtungen auf Höhe der Stationen KB / KW und KBR überein, die eine sehr stabile Kaltluftschicht im gesamten Nachtverlauf zeigen (vgl. Abb. 65). Ein intermittierendes Verhalten der Kaltluft war in diesem Talabschnitt, anders als an weiter innerstädtisch gelegenen Standorten (vgl. Abb. 74) nicht zu erkennen.

Auf eine Darstellung der Kaltluftdifferenz im Johannisbachtal im Vergleich zwischen einem Kaltluftabfluss-optimierten Vegetationsbestand (VS4-SZ1) und dem heutigen Bestand (VS3-MZ2) wurde verzichtet, da keine Differenzen durch KLAM_21 abgebildet wurden.

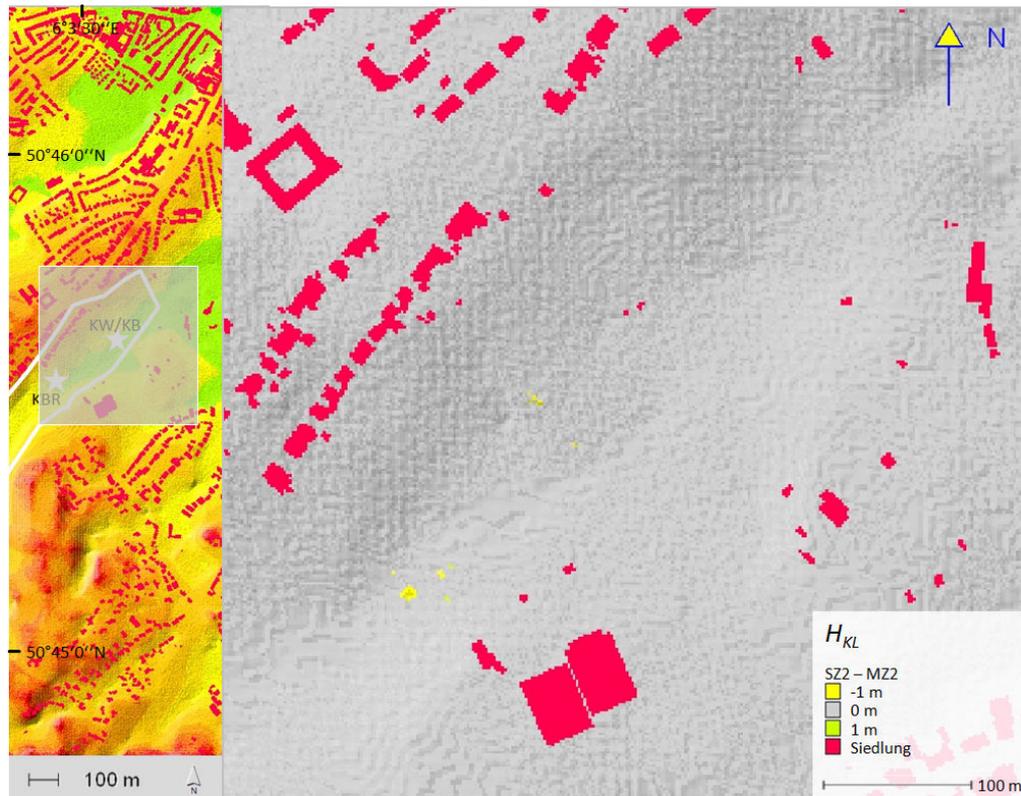


Abb. 126: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10).

7.3.2 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur

Im Falle des Vergleichs der erweiterten Vegetationsstruktur (VZ2-SZ2) und dem heutigen Talzustand (VS1-MZ2) ist eine deutliche Steigerung der Kaltluftmächtigkeit im Kannegießerbachtal zu erkennen, die bis zu 2 m beträgt. Diese findet sich im Wesentlichen im LUV der Vegetationsmodifikation und lässt auf einen Kaltluftstau schließen. Insgesamt erstreckt sich die Höhenzunahme über die gesamte Talbreite und erreicht die Bebauung im Bereich der Lütticherstraße. Die Lütticherstraße liegt auf der westlichen Talschulter des Kannegießerbachtals und bildet die Grenze zum benachbarten Johannisbachtal (vgl. Abb. 20). Bei einer weiteren Modifikation der Vegetationsstruktur im Kannegießerbachtal durch das Einbringen weiterer und höherer Bäume ist ein Überfließen der Talschulter anzunehmen. Ein Teil der Kaltluft würde dann durch Nachbartäler – wie das Johannisbachtal – in Richtung Innenstadt fließen. Da dieses Tal ebenfalls die Aachener Innenstadt mit Kaltluft versorgt, wäre ein Verlust an abfließendem Kaltluftvolumen im Kannegießerbachtal zwar nicht wünschenswert, im Hinblick auf stadtklimatische Belange aber wenig nachteilig. Anders ist dies, wenn ein Talbereich, in den Kaltluft überströmt, nicht dorthin abschüssig verläuft, wo ein Bedarf an Kaltluft besteht. In diesem Falle ginge Kaltluft „verloren“. Im umgekehrten Fall könnte auch erwünscht sein, dass geringere Kaltluftmengen talabwärts strömen (vgl. Kap. 3.4). Dichte Vegetationsstrukturen sind folglich in der Lage Lenkungseffekte bis hin zu Überströmsituationen zu verursachen, was in der Planung intentional eingesetzt werden kann.

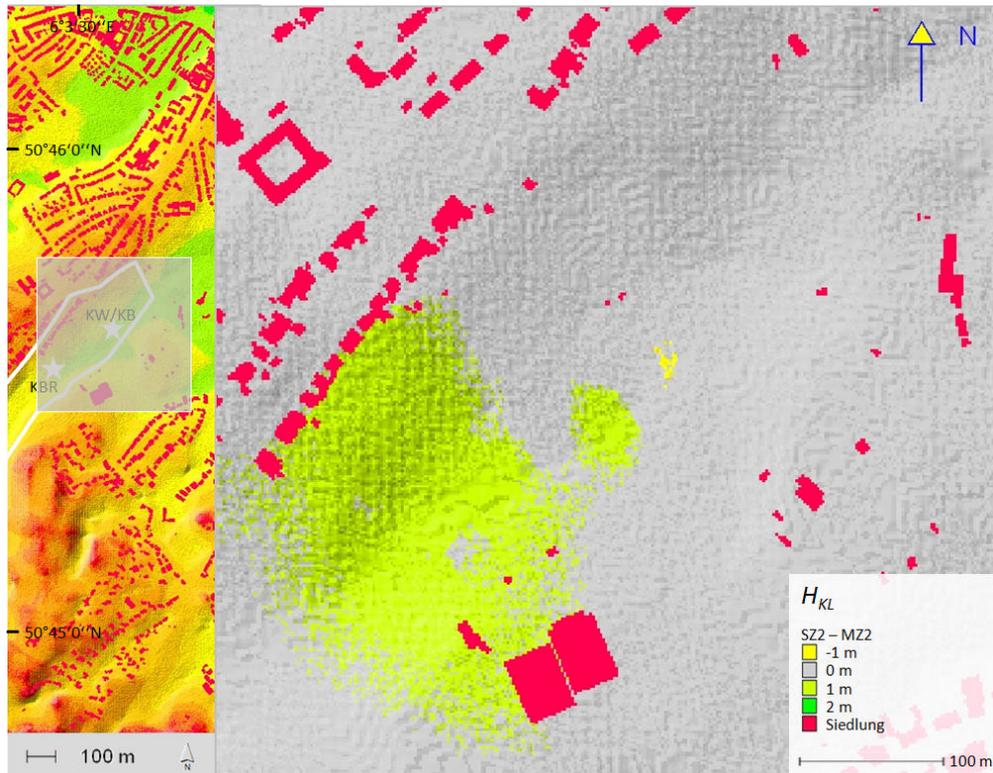


Abb. 127: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10).

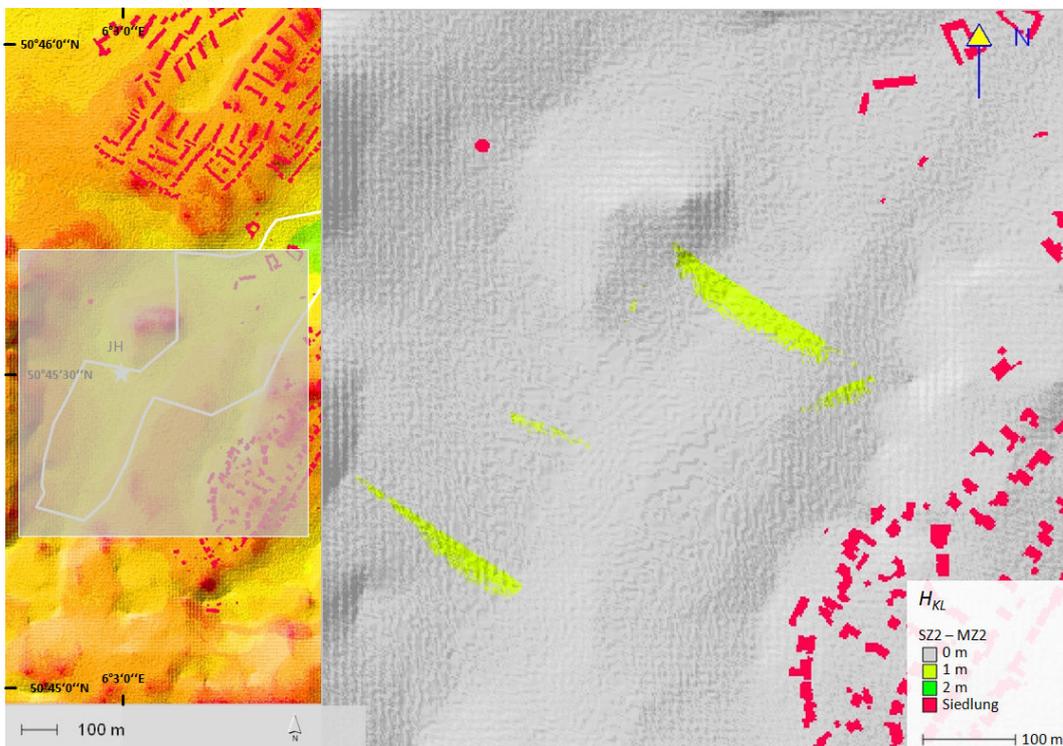


Abb. 128: Differenz der Kaltluftmächtigkeit H_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 46 / 42 (vgl. Tab. 10).

Im Johannisbachtal sind trotz kleinräumiger Veränderungen der Fließgeschwindigkeit Unterschiede in der Kaltluftmächtigkeit im Vergleich zwischen dem Modelllauf mit erweitertem Vegetationsbestand (VS4-SZ2) und dem heutigen Talzustand (VS3-MZ2) zu erkennen (Abb. 128). Durch den Stau der Kaltluft im Luv der eingebrachten Vegetationsbestände erreicht die Kaltluft eine bis zu 2 m größere Mächtigkeit. Die größte Steigerung der Kaltluftmächtigkeit ist im Bereich größter Abflussgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 117) zu verzeichnen. Die Hecke östlich der waldbestandenen und in Abb. 128 erkennbaren Geländeerhebung führt in der Empirie und laut der theoretischen Betrachtung in Kap. 3.5 zu einem Kaltluftstau und an der Oberkante der Hecke zu vermehrter Turbulenz (vgl. Abb. 11, [Ca]). Beide Effekte können zu steigenden Kaltluftmächtigkeiten führen, wobei die vermehrte Turbulenz eher zu einer Störung der Inversionsobergrenze führen würde, in deren Folge sich die Kaltluft und die darüber liegende Luftschicht ineinander einmischen.

7.4 Volumenstromdichte

7.4.2 Effekte einer reduzierten Vegetationsstruktur

Abb. 129 zeigt die Differenz der Volumenstromdichte im Vergleich einer reduzierten, kaltluftoptimierten Vegetationsstruktur (VS2-SZ1) und dem Zustand der Talvegetation in MZ2 (VS1-MZ2).

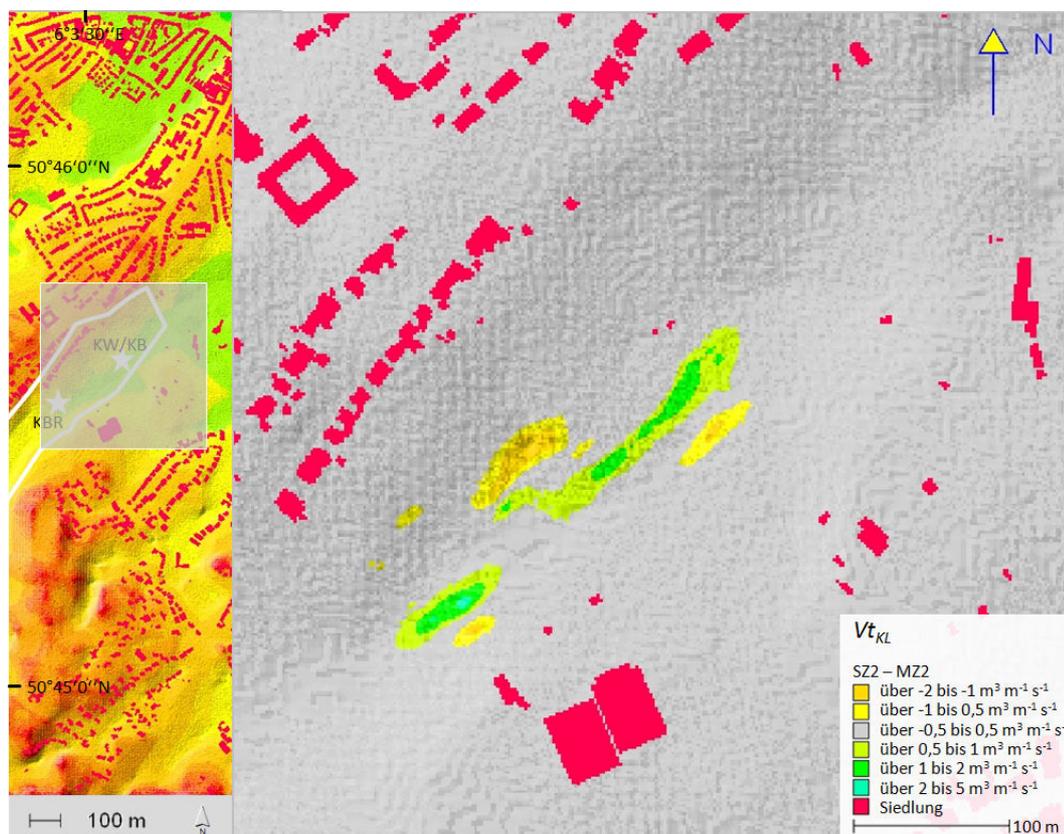


Abb. 129: Differenz der Volumenstromdichte $V_{t_{KL}}$ zwischen Lauf 25 (VS2-SZ1 / reduzierte Vegetationsstruktur) und Lauf 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10).

Im Kannegießerbachtal sind Unterschiede im Abflussvolumen der Kaltluft zu erkennen. In der Talsohle findet sich eine steigende Volumenstromdichte mit Steigerungsraten von bis zu $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, an den Talhängen sinken die Volumenstromdichten kleinräumig um bis zu $2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Die Veränderungen bleiben, wie in den Auswertungen vorher, auf den Talbereich in dem die Vegetationsveränderung vorgenommen wurde, beschränkt. Da im Johannisbachtal im Falle von Szenario 1 (SZ1) in Kombination mit Vegetationsstruktur 4 (VS4) nur geringe Unterschiede der Fließgeschwindigkeit gegenüber der Vegetationsstruktur in MZ2 (VS3-MZ2) zu verzeichnen waren (vgl. Abb. 123) und zudem die Kaltluft keine Unterschiede bezüglich ihrer Höhe im Vergleich der Modellläufe zeigte, zeigt der Modelllauf zur Berechnung der Volumenstromdichte keine Unterschiede im Vergleich der genannten Modellläufe. Auf eine Darstellung wurde verzichtet.

7.4.1 Effekte einer erweiterten Vegetationsstruktur

Durch die Einbringung von dichter Baumvegetation in die Talsohle des Kannegießerbachtals kommt es zu verringerten Fließgeschwindigkeiten und zu erhöhten Mächtigkeiten der Kaltluft (Abb. 124 und Abb. 127). Im Staubereich hat dies zur Folge, dass die Volumenstromdichte, wie in Abb. 130 ersichtlich, um bis zu $5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ sinkt. Eine Kompensation durch steigende Abflussvolumina an den Talhängen ist nicht erkennbar.

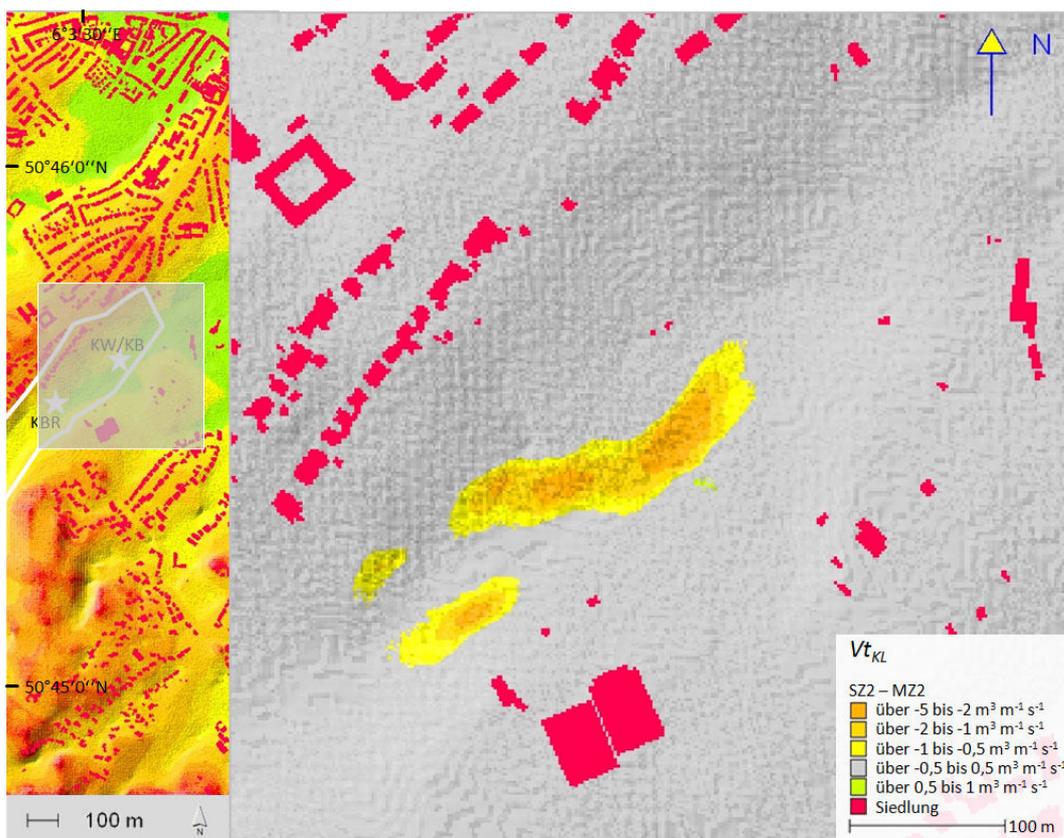


Abb. 130: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen Lauf 27 (VZ2-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und 15 (VS1-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Kannegießerbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 27 / 15 (vgl. Tab. 10).

Ein ähnliches Muster, wenn auch wesentlich kleinräumiger, ist in Abb. 131 erkennbar. Dort ist der Differenzbetrag der Volumenstromdichte im Vergleich der Modellläufe mit erweitertem (VS4-SZ2) und aktuellem Baumbestand (VS3-MZ2) im Johannisbachtal ablesbar. Veränderungen der Volumenstromdichte finden ausschließlich im Bereich höchster Fließgeschwindigkeiten der Kaltluft statt. In den anderen Talbereichen, wo bei der Betrachtung der Fließgeschwindigkeit und Kaltluftmächtigkeit Veränderungen zu erkennen waren (vgl. Abb. 125 und Abb. 128) liegt die Veränderung der Volumenstromdichte in einem Bereich $< 0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Insgesamt haben die Veränderungen der Vegetationsstruktur im Johannisbachtal nur sehr kleinräumige Auswirkungen auf die Volumenstromdichte.

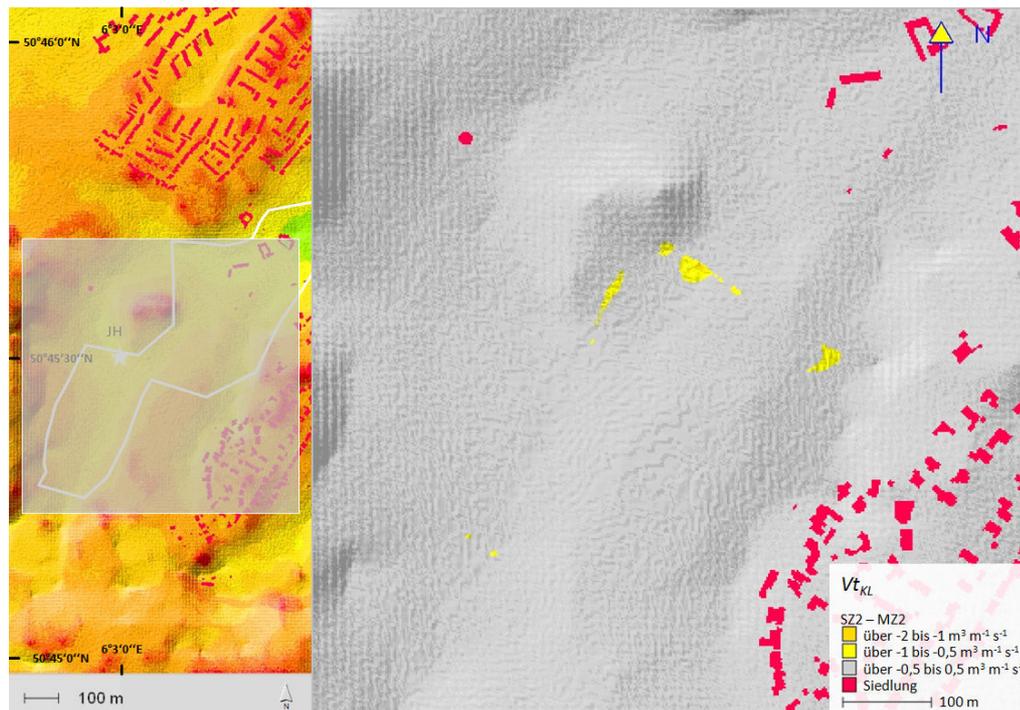


Abb. 131: Differenz der Volumenstromdichte Vt_{KL} zwischen Lauf 46 (VS4-SZ2 / erweiterte Vegetationsstruktur) und Lauf 42 (VS3-MZ2 / Ist-Zustand der Vegetation) im Johannisbachtal; Die Lage der Referenzfläche im Untersuchungsgebiet ist links dargestellt; Konfiguration: Lauf 25 / 15 (vgl. Tab. 10).

7.5. Kaltluftabflussmengen unterschiedlicher Vegetationsstrukturen

Zur Veranschaulichung der Modellergebnisse aus Kap. 7.2, Kap. 7.3 und Kap. 7.4 dient Tab. 13. Dort sind die Abflussmengen q_{KL} der Kaltluft in Abhängigkeit von der jeweiligen Vegetationsstruktur der verschiedenen Modellläufe aufgelistet. Lauf 13 zeigt dabei die ursprüngliche Talvegetation in MZ1 (VS1-MZ1) im Kannegießerbachtal. Lauf 40 zeigt selbigen Modelllauf für das Johannisbachtal in MZ1 (VS3-MZ1). Die errechneten Differenzen der Kaltluftvolumina Δq_{KL} beziehen sich jeweils auf den Ursprungszustand der Talvegetation. Die Lage der Geländeschnitte im Kannegießer- und Johannisbachtal zur Berechnung der Abflussvolumina sind in Abb. 132 dargestellt.

Durch die Vegetationsentnahme erhöht sich der Kaltluft-Volumenstrom im Kannegießerbachtal in MZ2 um $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Eine weitere Steigerung kann durch das „Verschieben“ hoch aufwachsender Baumvegetation aus der Talsohle in die randlichen Talbereiche erreicht werden (Lauf 25 – Lauf 13

7. Modellierte Vegetationsszenarien

= $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Trotz des modellhaften, umfangreichen Eingriffs in die Baumvegetation der Talae im Bereich von Station KW fällt die Steigerung der Abflussvolumina recht moderat aus. Stärker sind die Veränderungen im Falle einer erweiterten Vegetationsstruktur (vgl. Abb. 39). Durch die eingebrachte Baumvegetation wird die Kaltluft aufgestaut, was zu einer Reduktion der Abflussvolumina um $71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ im Vergleich zu MZ1 führt.

Tab. 13: Übersicht über die Kaltluftabflussmengen q_{KL} in Abhängigkeit der Vegetationsstruktur.

Lauf	Modellgebiet	Vegetationsstruktur	q_{KL} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]	Δq_{KL} [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]
13	Kannegießerbachtal	VS1-MZ1	2799	
15	Kannegießerbachtal	VS1-MZ2	2812	13
25	Kannegießerbachtal	VS2-SZ1	2824	25
27	Kannegießerbachtal	VS2-SZ2	2728	-71
40	Johannisbachtal	VS3-MZ1	3825	
42	Johannisbachtal	VS3-MZ2	3825	0
44	Johannisbachtal	VS4-SZ1	3825	0
46	Johannisbachtal	VS4-SZ2	3823	-2

Das Johannisbachtal ist in weiten Teilen frei von Vegetation und eine kaltluftstauende Wirkung wird durch Hecken erreicht (vgl. Abb. 40). Da diese insgesamt geringere Einflüsse auf das Fließverhalten der Kaltluft haben, als dies im Kannegießerbachtal der Fall ist, sind Veränderungen der Abflussvolumina kaum zu erkennen. In der Summe sind nur bei einer starken Erweiterung des Heckenbestandes im Tal (vgl. Abb. 41) gering sinkende Volumina zu erkennen (Lauf 46 – Lauf 40 = $-2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Das Ergebnis macht erneut deutlich, dass ein Stau der Kaltluft einfacher herbeizuführen ist, als steigende Kaltluftabflussvolumina durch eine reduzierte Vegetationsstruktur.

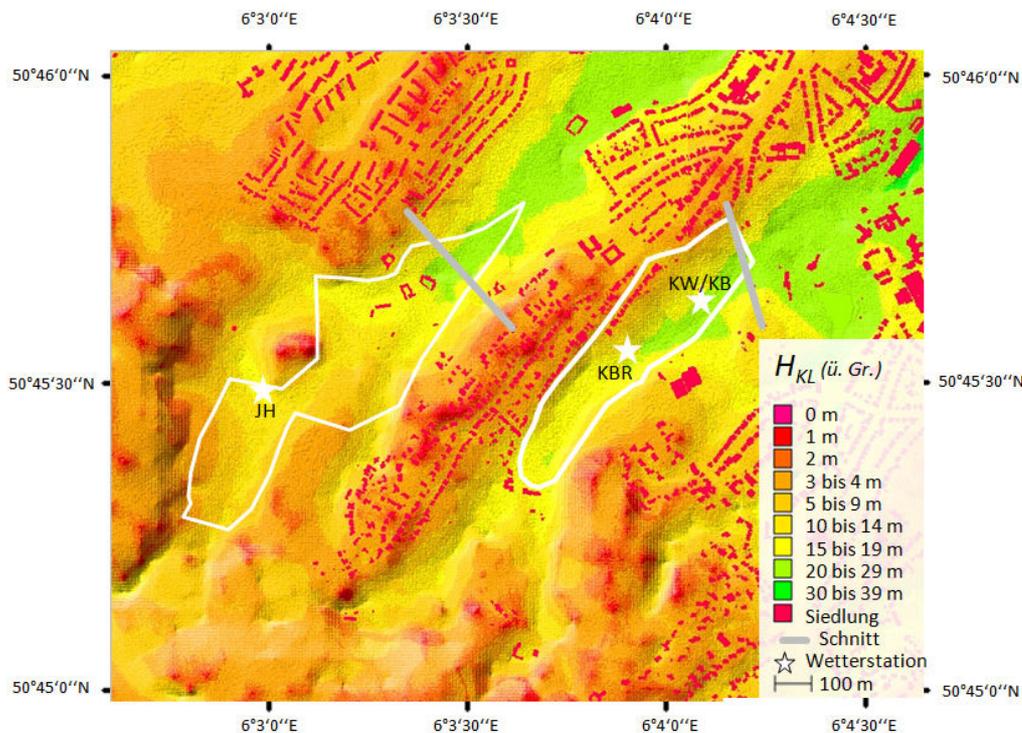


Abb. 132: Lage der Geländeschnitte im Kannegießer- und Johannisbachtal zur Errechnung der Kaltluftabflussmengen in Tab. 13.

8. Diskussion

In den vorangegangenen Kapiteln wurde an entsprechender Stelle bereits auf Besonderheiten der Datenerfassung und Bearbeitung hingewiesen sowie über Ergebnisse diskutiert. In Kap. 8 erfolgt eine weitere Diskussion hinsichtlich der Kriterien, denen eine besondere Bedeutung für die vorliegende Arbeit zukommt.

Datenerhebung

- Bei der Erfassung von Vegetationseinflüssen auf Klimaelemente findet per se ein Eingriff in den Vegetationsbestand statt. So wurden beispielsweise Messgeräte in der Wiesenvegetation aufgestellt und in Bäumen installiert. Bei der Montage wurde darauf geachtet, dass die Vegetation weitestgehend intakt blieb, um ein unverfälschtes Bild der Vegetationsbeeinflussung zu erfassen. Nicht zu vermeiden war dabei der gelegentliche Freischnitt von beispielsweise Anemometern, die in direkten Vegetationskontakt kamen.
- Da unterschiedliche Messgeräte verwandt wurden, wurde bei der Datenbearbeitung darauf geachtet, dass die jeweiligen Besonderheiten des Messinstrumentes berücksichtigt wurden. Eine solche Besonderheit war z.B. die unterschiedliche Anlaufgeschwindigkeit der Schalensternanemometer.

Datenbearbeitung

- Die an den verschiedenen Messstationen aufgezeichneten Daten lagen in unterschiedlichen Messintervallen und Aufzeichnungszeiträumen vor, die in einer Vielzahl von Arbeitsschritten vereinheitlicht werden mussten (vgl. Tab. 6). Gelegentliche Rundungsfehler sind dabei nicht auszuschließen, diese sind jedoch bis auf wenige Ausnahmen, bei Ergebnissen mit sehr geringer Betragsdifferenz im Ergebnis, unkritisch.
- Dadurch, dass nicht alle Parameter, die eine eindeutige Kaltluftidentifizierung zulassen, im Talbereich erfasst werden konnten, mussten bei der Filterung des Kaltluftdatensatzes strenge Kriterien angelegt werden. Diese führten im Ergebnis dazu, dass auch Nächte aus dem Datensatz entnommen wurden, in denen Kaltluftabfluss stattfand. Nur so konnte sichergestellt werden, dass ausschließlich Kaltluftdaten erhalten blieben, was für detaillierte Auswertungen hinsichtlich der Veränderung des Kaltluftabflusses unabdingbar war. Für zukünftige Messungen empfehlen sich Strahlungsbilanzmessungen im Talbereich.

Datenqualität

- Ein Problem bei derartigen geländeklimatologischen Erhebungen ist die gelegentliche Einmischung des synoptischen Windes in die Talatmosphäre, der zur Auflösung der Kaltluftinversion führen kann. Für den Kaltluftdatensatz kann dies weitestgehend, aufgrund definierter Höchstgeschwindigkeiten an Station HÖ als Eingangskriterium der Daten in den Kaltluftdatensatz, für die mobilen Messungen mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden.
- In Bezug auf das Windfeld stellt sich die Frage, ob eine Erfassung der verschiedenen Windkomponenten, beispielsweise mit Hilfe von Ultraschallanemometern, im Vegetationsbestand

sinnvoll erscheint. Zu Gunsten der geringeren Gerätegröße und des geringeren Verlustrisikos aufgrund von Vandalismus, wurde in der vorliegenden Untersuchung darauf verzichtet.

- Für die Bemessung der durch Vegetation hervorgerufenen Änderungen Klimaelemente, war das Vorhandensein einer Referenzstation im Kaltluftgebiet äußerst hilfreich. Umgekehrt führte das Fehlen einer solchen Station im Johannisbachtal zu einer geringeren Aussagekraft bei der Datenauswertung, da die Veränderungen durch unterschiedliche nächtliche Witterungsbedingungen hervorgerufen sein können. Insgesamt besteht die Möglichkeit, die im Johannisbachtal erhobenen Kaltluftdaten in Relation zur Kaltluft-Referenzstation KBR des Kannegießerbachtals zu setzen. Die beiden Täler liegen in unmittelbarer Nachbarschaft (vgl. Abb. 17, so dass sich die nächtlichen Voraussetzungen für die Kaltluftbildung von Kaltluft in beiden Talbereichen zu gleichen Zeiten nicht erheblich unterscheiden. Ein solches Unterfangen erscheint jedoch nur dann sinnvoll, wenn alle Faktoren, die die Kaltluftbildung beeinflussen konstant sind. Aufgrund von anthropogenen Einflüssen wie der Beweidung durch Vieh, Mäharbeiten kann dies v.a. im Johannisbachtal nicht ausgeschlossen werden.
- Mehrfach angesprochen wurde die Tatsache, dass die Wetterstation HÖ des Geographischen Instituts der RWTH Aachen als Referenzstation für die vorliegende Untersuchung geeignet ist, bei der Betrachtung der Stadt-Umland Unterschiede aber nicht für alle Klimaelemente herangezogen werden kann. So fanden sich im Rahmen der vorliegenden Arbeit z.B. Anzeichen für eine Beeinflussung der Temperatur durch umgebende Gebäude und Vegetation, die die Station je nach Sonnenstand, Tages- und Jahreszeit verschatten (vgl. Kap. 6.1.2). Die Station befindet sich zudem zwar im Aachener Kessel auf einer relativen Höhenlage, ist aber keineswegs von der städtischen Wärmeinsel unbeeinflusst. Für die Berechnung der Wärmeinselintensität T_{u-r} eignet sich die Station folglich nicht.
- Bei den Untersuchungen hinsichtlich der Luftqualität in Kap. 6.2.8 ist eine eindeutige Zuordnung nach der Herkunft der Partikel nicht möglich, da diese zwar in einem optischen Verfahren erfasst, aber nicht chemisch bestimmt wurden. Eine Unterscheidung nach anthropogenen und der Wald- und Wiesenvegetation entstammenden Partikeln, war demnach nicht möglich. Da Pollen und anthropogen verursachte Feinstäube unterschiedliche gesundheitliche Wirkungen haben, wäre eine weitere Unterscheidung wünschenswert. In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die Partikel anhand eines Ausschlussverfahrens zu identifizieren. Vor den Hintergrund des Klimawandels und einer Veränderung der Artenzusammensetzung spielen zunehmend gasförmige Schadstoffe in der Kaltluft eine Rolle, die nicht ausschließlich aus dem Straßenverkehr stammen. Während anthropogene, flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) als Vorläufersubstanz des bodennahen Ozons bekannt sind, erfüllen der Vegetation entstammende Kohlenwasserstoffe (BVOC) die gleiche Funktion. BVOCs werden während hoher Lufttemperaturen von Laub-, Nadelbäumen und Sträuchern abgegeben (z.B. KUTTLER 2011a, SHARKEY & YEY 2001). An heißen Sommertagen ist demnach – zumindest in den ersten Stunden nach Sonnenuntergang – eine Einmischung von BVOCs in die Kaltluft zu erwarten. Diese werden mit der Kaltluft in bebaute Bereiche transportiert und stehen dort (u.U. am nächsten Tag) für die Bildung von Ozon zur Verfügung.

Ausblick

- Insgesamt bietet der erhobene Datensatz eine Vielzahl weiterer Auswertungsmöglichkeiten. So wurde u.a. keine jahreszeitliche Auswertung hinsichtlich der Wiesenvegetation mit unterschiedlichen Höhen und Rauigkeiten vorgenommen. Des Weiteren bietet der Datensatz die Möglichkeit, neben dem Vergleich sommerlicher Belaubungszustände, die winterliche, unbelaubte Vegetationszeit einer Auswertung zu unterziehen.

9. Zusammenfassungen

9.1 Zusammenfassung

In einer zweijährigen Messkampagne wurden von Februar 2009 bis Februar 2011 die Eigenschaften der nächtlichen Kaltluftdynamik in zwei stadtnahen Bachtälern Aachens untersucht. Dabei war vor allem die Klärung der folgenden Fragestellungen Ziel der Untersuchung:

1. Welche Eigenschaften und Besonderheiten haben die Aachener Bachtäler hinsichtlich der darin abfließenden Kaltluft?
2. Welche Einflüsse haben Vegetationsbestände – v.a. Baumbestände – auf den Kaltluftabfluss?
3. Lassen sich diese Einflüsse mit Hilfe einer Modellierung nachvollziehen und werden diese korrekt abgebildet?

Die Datenerhebung in den Bachtälern erfolgte an 4 Wetterstationen, die jeweils unterschiedliche Standorte im Talbereich repräsentierten. Eine Station war so platziert, dass sie den Kaltluftabfluss ohne den unmittelbaren Einfluss von Vegetation zeigte und diente folglich als Kaltluft-Referenzstation. Die weiteren Stationen waren im Vegetationsbestand platziert, eine davon im Lee einer Hecke, zwei im Lee einer Gruppe von ca. 10 m bis 15 m hohen Schwarzerlen. Ein Teil der Hecke und ein Bestand von Schwarzerlen, wurde zur Hälfte der Messperiode entnommen, so dass zwei Vergleichsdatensätze gewonnen werden konnten. Zusätzlich wurde die Datenaufzeichnung der Wetterstationen von mobilen Messungen begleitet. So fanden ergänzend Fesselballonsondierungen, Luftqualitätsmessungen und Talquerprofilmessungen statt, um ein möglichst detailliertes Bild des Kaltluftabflusses zu zeichnen. Bei der Datenauswertung erfolgte eine Auswertung hinsichtlich der jährlichen und jahreszeitlichen Veränderungen des Kaltluftabflusses mit Bezug zur Talvegetation. Als Basis der Modellierung mit dem numerischen Kaltluftabflussmodell KLAM_21 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden die Kernbereiche der Bachtäler einer detaillierten Vegetationskartierung unterzogen. Die Ergebnisse der Modellierung und der Datenaufzeichnung wurden verglichen und so die Eingabedaten des Modells kalibriert.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen deutliche Einflüsse der Vegetation auf den Kaltluftabfluss, die je nach Klimaelement und Standort sehr unterschiedlich ausfallen:

Hinsichtlich der **Fließgeschwindigkeit** der Kaltluft findet durch dichte Vegetationsbestände eine Reduktion dieser statt, die je nach Standort und Messhöhe variiert. So zeigen sich unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten je nach Durchmesser der Vegetation und in Abhängigkeit von deren Dichte. Eine Veränderung erfolgt zum Teil auf kurzen Distanzen. Von Bedeutung ist zudem die Flächigkeit der Vegetation. Weniger flächige Bestände haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit der Kaltluft. Durch die Veränderung der Oberflächenrauigkeit lässt sich die Fließgeschwindigkeit in erheblichem Maße steuern. So trägt eine erhöhte Oberflächenrauigkeit durch Bäume, Hecken oder auch hohe Wiesenvegetation zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeit bei.

Durch die gezielte Entnahme von Vegetation sind Steigerungen der Fließgeschwindigkeit zu erreichen, die in ihrer Struktur den Düseneffekten des synoptischen Windes nahe kommen. Insgesamt wird das vertikale Windprofil durch die Oberflächenbeschaffenheit stark verändert. Zudem konnte eine starke jahreszeitliche Veränderung der Fließgeschwindigkeit belegt werden. Die **Fließrichtung** der Kaltluft wird ebenfalls durch die Talvegetation beeinflusst. So konnten am gleichen Standort unterschiedliche Windrichtungen in Abhängigkeit von der Messhöhe aufgezeichnet werden. Zudem zeigen sich bei großflächigen, dichten Beständen durch den Stau der Kaltluft Umlenkungseffekte, bis hin zum Überströmen von Talschaltern. Die Vegetation nimmt im Wesentlichen durch Verschattung Einfluss auf die Oberflächen- und Bodentemperaturen und damit auch in Folge auf die **Lufttemperatur**. In der Konsequenz verändern sich damit Kaltluftproduktionsraten. Die mengenmäßige Reduktion der abfließenden Kaltluft wurde sowohl rechnerisch, auf Basis von mobilen Messungen, als auch modellhaft erfasst. Dabei zeigten sich Veränderungen des Volumenstromes, die von der Größenordnung her geringer waren, als dies durch die Einengung der Abflussbahn zunächst angenommen werden musste. Untersuchungen der **Luftqualität** zeigten, dass diese in Bezug auf Kaltluft differenziert zu betrachten ist. Durch den Eintrag von kalter Luft, lässt sich das Temperaturniveau in der Stadt positiv beeinflussen, im Falle von unbelasteter Luft lässt sich die Schadstoffkonzentration senken. Werden jedoch mit der Kaltluft Schadstoffe in die Stadtluft eingebracht, wirkt sich dies nachteilig aus. Im Falle der untersuchten Bachtäler konnten erhöhte Konzentrationen partikulärer Schadstoffe in der Kaltluft nachgewiesen werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit der Wald- und Wiesenvegetation entstammen. Zudem wurde aufgezeigt, dass durch die Vegetationsentnahme eine weniger flächige Verteilung von Schadstoffen in der Kaltluft stattfindet, und somit Luft mit höheren Schadstoffkonzentrationen die Stadtgrenze erreicht.

In Bezug auf den Untersuchungsstandort, zeigt sich trotz strenger Kriterien bei der Datenfilterung, eine große Auftrittshäufigkeit nächtlicher Kaltluftabflüsse. Dabei charakterisiert sich die Kaltluft durch konstante Mächtigkeiten. Große Mengen Kaltluft werden entlang der Luftleitbahn in die Stadt transportiert, wo die Kaltluft nachgewiesen werden konnte. Zudem wurde eine Messmethodik entwickelt, bei der mit Hilfe des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) die räumliche Verteilung der Kaltluft, ebenfalls mit Reichweiten bis in die Innenstadt aufgezeichnet wurde. Kleinräumig betrachtet konnte der Nachweis erbracht werden, dass auch bei dichtester Talvegetation, diese von der Kaltluft durchflossen wird. Zwar wird durch den Vegetationsbestand eine Reduktion der Fließgeschwindigkeit, einhergehend mit reduzierten Abflussmengen, verursacht. Vegetation in der Kaltluftbahn ist jedoch in keinem Fall, auch nicht bei hoher Dichte, mit Bebauung gleichzusetzen. Die Vegetationsentnahme zeigte zudem, dass die Verbreiterung des frei durchströmbaren Talquerschnittes Wirkungen auf den Kaltluftabfluss hat. Um deutliche Unterschiede der Abflussmengen zu erreichen, bedarf es jedoch größerer Eingriffe, die u.U. durch einen Zugewinn an Abflussmenge nicht gerechtfertigt werden können.

Durch die Modellkalibrierung und die Einbringung hoch aufgelöster Flächennutzungsdaten konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen aus KLAM_21 und den empirisch gemessenen Daten erreicht werden, so dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Talbereiche möglich ist. Die empirischen und modellierten Ergebnisse wurden in Kombination mit bekannten

Sachverhalten in eine theoretische Systematik eingeordnet, die zeigt, wie sich die abfließende Kaltluft in Bezug auf Hindernisse verhält.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein Vegetationsbestand aus dem Bachtal entnommen, um die Veränderungen auf den Kaltluftabfluss empirisch zu belegen. Unter rein klimatischen Gesichtspunkten ist dabei eine kritische Betrachtung von Bestandshöhe und –dichte der Vegetation im Talbestand sinnvoll. Durch gezielte Eingriffe, im Hinblick auf erwünschte steigende Kaltluftabflussvolumina zur Reduktion innerstädtischer thermischer Belastung, lässt sich der Kaltluftabfluss gezielt beeinflussen. Der bewusste Umgang mit in das Tal eingebrachter Vegetation ist dabei dringend zu empfehlen. Dennoch können stadtnahe Täler, wie das Kannegießer- und Johannisbachtal, nicht ausschließlich nach klimatologischen Eigenschaften beurteilt werden, denn diese disziplinäre Betrachtung würde ihren vielfältigen Funktionen nicht gerecht. Vielmehr empfiehlt sich eine interdisziplinäre Betrachtung unter Einbeziehung der verschiedenen Talfunktionen, wie z.B. Aspekten der Biodiversität oder Naherholungsfunktionen.

9.2 Summary

The aspects of nocturnal cold air drainage flow were investigated in two suburban valleys of the city of Aachen, Germany, during a two year measurement period – from February 2009 to February 2011. The investigation intended to answer the following questions:

1. What are the characteristics of cold air drainage flow in the suburban valleys of the city of Aachen?
2. How does vegetation – especially trees and hedges – affect the cold air drainage flow?
3. Can these effects be reproduced by a model, calibrated with the collected data?

In 2009 four weather stations were set up, each of them representing different locations within the valleys. One of them collected data of cold air drainage without being influenced by vegetation. The data of this station was used as a reference for a comparative analysis. The other three stations were placed within vegetation stands, one at the lee side of a hedge and two at the lee side of a grove of alders with a height of up to 15 m. Halfway through the measurement period a section of the hedge and several alders were cut down, in order to get two data sets for comparison. This data was complemented by mobile cross valley section and tethered balloon measurements, as well as by air quality measurements and measurements taken from busses carrying GPS equipment and temperature sensors. Data evaluation took account of annual and seasonal variations in regard to changing vegetation structures. In order to improve the input detail for modeling and model calibration further, the vegetation in two larger areas within the valleys was mapped. Modeling was done by the numerical cold air drainage flow model KLAM_21 from the DWD (Deutscher Wetterdienst / German Weather Service).

The results show that vegetation has a considerable effect on cold air drainage, differing for each location and climatic element measured:

The **wind speed** of cold air is reduced by vegetation structures and influenced by the density and diameter of the vegetation and the vegetated surface. Therefore wind can vary over short distances. A large expanse of vegetation has a large effect on wind speed. Increased surface roughness, e.g. caused by hedges or trees, reduces wind speed. Wind speed can be directly impacted by changing surface roughness, for instance by reducing tree coverage. Additionally wind speed shows annual and seasonal variations. **Wind direction** as well as wind speed is influenced by the vegetation within the valley. Thus different wind directions were measured at different heights but in the same location. Large expanses of dense vegetation can block and deviate cold air, which can even result in an overflow into surrounding valleys. Vegetation shades the valley surface, influencing surface and soil temperatures and consequently **air temperature**. Therefore cold air production rates change. This was proved by calculation, mobile measurements and modeling. **Air quality** has to be considered carefully, taking account of the origin of cold air. In case of clean air, e.g. originated from non-industrialized areas with less traffic, air quality can be improved by cold air drainage. In case of noxious substances polluting the cold air, air quality can be decreased. The area of investigation shows increased amounts of (presumably biogenic) particulate matter within the drainage flow, derived from the valley vegetation.

A good match between modeled and measured data was achieved by calibrating the cold air drainage flow model with high-resolution land use data. This allows the results to be transferred to surrounding valleys. Modeled and measured results are presented in a diagram showing cold air drainage behavior related to obstacles.

The investigated area shows, although a severe data filtering process has been carried out, a high frequency of nocturnal cold air drainage flow with cold air at high altitudes. The presence of cold air within urban areas was proved, by setting up, amongst others, a measurement system carried by public transport busses. At a small scale it was proved, that even vegetation with the highest density is permeable to cold air drainage. Vegetation is not able to cause effects like buildings.

In order to increase the amount of cold air drainage considerably, major changes in vegetation structures have to be carried out. A critical review on height and density within suburban valleys can be helpful to city planners, especially in light of rising urban temperatures due to climate change. Nevertheless, suburban valleys cannot be characterized solely by climatological factors, as this single-disciplinary view on their functions would be inadequate. An interdisciplinary assessment in due consideration of all functions, like biodiversity, local recreation, is advisable.

10. Literaturverzeichnis

- ALLEX, B., ARNBERGER, A., WANKA, A., EDER, R., HUTTER, H.-P., KUNDI, M., WALLNER, P., KOLLAND, F., BLÄTTNER, B., GREWE, H. A. (2013): The Elderly under Urban Heat Pressure – Strategies and Behaviours of Elderly Residents against Urban Heat; In: Proceedings REAL CORP 2013 Rome.
- AMANATIDIS, G. T., PAPADOPOULOS, K. H., BARTZIS, J. G., HELMIS, C. G. (1992): Evidence of Katabatic Flows Deduced from a 84 m Meteorological Tower in Athens, Greece; In: Boundary-Layer Meteorology; 58; S. 117-132.
- AMBIMET (2000): Simulation der regionalen und bodennahen lokalen Kaltluftabflüsse und Massenströme in Thüringen auf der Grundlage der TK25; Projektbericht; München.
- ARL - AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (Hrsg.) (2009): Klimawandel als Aufgabe der Regionalplanung - Positionspapier aus der ARL; 81; Hannover.
- ARRITT, R. W., PIELKE, R. A. (1986): Interactions of nocturnal slope flows with ambient winds; In: Boundary-Layer Meteorology; 37; S. 183-195.
- ASNER, G. P., SCURLOCK, J. M. O., HICKE, J. A. (2003): Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies; In: Global Ecology & Biogeography; 12; S. 191-205.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E., MEVENKAMP, N., NIPPER, J. (2010): Statistische Methoden in der Geographie – Band 1; Stuttgart.
- BAI, K., MENEVEAU, C., KATZ, J. (2012): Near-Wake Turbulent Flow Structure and Mixing Length Downstream of a Fractal Tree; In: Boundary-Layer Meteorology; 143; S. 285-308.
- BALDOCCI, D. D., MEYERS, T. P. (1989): The effects of extreme turbulent events on the estimation of aerodynamic variables in a deciduous forest canopy; In: Agricultural and Forest Meteorology; 48; S. 117-134.
- BANTA, R. M., GANNON, P. T. (1995): Influence of Soil Moisture on Simulations of Katabatic Flow; In: Theoretical and Applied Climatology; 52; S. 85-94.
- BARLAG, A.-B. (1993): Planungsrelevante Klimaanalyse einer Industriestadt in Tallage; Essener ökologische Schriften; 8; Magdeburg.
- BARLAG, A.-B. (1997): Möglichkeiten der Einflussnahme auf das Stadtklima; In: VDI-Berichte; 1330; S. 127-146.
- BARR, S., ORGILL, M. M. (1989): Influence of external meteorology on nocturnal valley drainage winds; In: Journal of Applied Meteorology; 28; S. 497-517.
- BauGB – Baugesetzbuch vom 22.07.2011; BGBl. I; S. 1509.
- BauGB – Baugesetzbuch vom 23.09.2004; BGBl. I; S. 2414.
- BauGB – Baugesetzbuch vom 31.12.1976; BGBl. I; S. 2221.
- BAUMGARTNER, A. (1956): Untersuchungen über den Wärme- und Wasserhaushalt eines jungen Waldes; Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 28 (5); Bad Kissingen.
- BAUMÜLLER, J. (2008): Stadtklima und Stadtplanung im Klimawandel; In: UVP-report; 22 (5); S. 205-214.
- BAUMÜLLER, J. (2012): The Planning of Stuttgart 21 on the background of climate change; Proceedings of ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.

- BEAN, A., ALPERI, R. A., FEDERER, C. A. (1975): A method for categorizing shelterbelt porosity; In: Agricultural Meteorology; 14; S. 417-429.
- BENDIX, J. (2004): Geländeklimatologie; Berlin / Stuttgart.
- BENISTON, M., GARCIA-HERRERA., R. (2008): Climate Change and health; In: Thomson, M. C., Garcia-Herrera., R., Beniston, M.: Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health; S. 131-141.
- BERGEN, J. D. (1969): Cold air drainage on a forsted mountain slope; In: Journal of applied Meteorology; 8; S. 884-895.
- BERNHOFER, C., GRÜNWARD, T., SPANK, U., CLAUSNITZER, F., EICHELMANN, U., FEGER, K. H., KÖSTNER, B., PRASSE, H., MENZER, A., SCHWÄRZEL, K. (2011): Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenhydrologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen des Tharandter Waldes; In: Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz; 11; S. 17-28.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN - Abteilung Geobasis NRW (2012): Topographisches Informationsmanagement Nordrhein-Westfalen; www.tim-online.nrw.de; abgerufen am 16.10.2012.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2009): Integrierter Luftreinhalte- und Aktionsplan der Bezirksregierung Köln - für das Stadtgebiet Aachen vom 01.01.2009; Köln.
- BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (Hrsg.) (2011): Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem Nordrhein-Westfalen (ALKIS); www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/liegenschaftsinformation/katasterinformation/alkis/nrw/index.html; abgerufen am 05.02.2013.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2012): Flussauen in Deutschland - Kartendienst; www.geodienste.bfn.de/flussauen; abgerufen am 15.10.2012.
- BFN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2013): Schutzgebiete in Deutschland - Kartendienst; www.geodienste.bfn.de/schutzgebiete; abgerufen am 19.02.2013.
- BIGG, G. R., WISE, S. M., MANSELL, E. H. D., BRYANT, R. G., HOWARD, A. (2012): Synoptic climatology of cold air drainage in the Derwent Valley, Peak District, UK; In: Meteorological Applications; online.
- BOOTSMA, A. (1976): Estimating minimum temperature and climatological freeze risk in hilly terrain; In: Agricultural Meteorology; 16 (3); S. 425-443.
- BRAUERS, T., KETZLER, G. (1988): Bedeutung der im Landschaftsplan festgesetzten Bachtäler des Aachener Kessels für die Klimahygiene des Innenstadt-Bereichs von Aachen; Klimatologisches Gutachten im Auftrag der Stadt Aachen (unveröffentlicht); Aachen.
- BREUER, L., ECKHARDT, K., FREDE, H.-G. (2003a): Plant parameter values for models in temperate climates; In: Ecological Modelling; 169; S. 237-293.
- BREUER, L., FREDE, H.-G. (2003b): PlaPaDa - an online plant parameter data drill for eco-hydrological modelling approaches; www.uni-giessen.de/~gh1461/plapada/plapada.html; abgerufen am 05.02.2013.
- BULCOCK, H. H., JEWITT, G. P. W. (2010): Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception; In: Hydrology and Earth System Sciences; 14; S. 383-392.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., MERBITZ, H., SCHNEIDER, C. (2010a): Innerstädtische Temperaturverteilung in Aachen; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.); Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 61-69.

- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., MERBITZ, H., SCHNEIDER, C. (2011): A new approach for highly resolved air temperature measurements in cities. *Atmospheric Measurement Techniques Discussion*; 4; S. 1001-1019.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010b): Urban temperature distribution and detection of influencing factors in urban structure; 17th Conference International Seminar on Urban Form "Formation and Persistence of Townscape"; Hamburg; S. 24.
- BUTTSTÄDT, M.; KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010c): Ergebnisse aus 30 Jahren Klimamessungen an der Klimamessstation Aachen-Hörn; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.); *Aachener Geographische Arbeiten*; 47 ; S. 1-10.
- CARLSON, T. N., DAVID, A. (1997): On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index; In: *Remote Sensing of Environment*; 62 (3); S. 241-252.
- CHOW, W. T. L., POPE, R. L., MARTIN, C. A., BRAZEL, A. J. (2011): Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts; In: *Theoretical and Applied Climatology*; 103; S. 197-211.
- CHOW, W. T. L., ROTH, M. (2006): Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore; In: *International Journal of Climatology*; 26; S. 2243-2260.
- CHRISTEN, A., VOGT, R. (2004): Energy and radiation balance of a Central European City; In: *International Journal of Climatology*; 24; S. 1395-1421.
- CORNFORD, C.E. (1938): Katabatic Winds and the prevention of frost damage; In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*; 64; S. 553-592.
- COUTTS, A. M., BERINGER, J., TAPPER N. J. (2007): Impact of increasing urban density on local climate: spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia; In: *Journal of Applied Meteorology*; 46; S. 477-493.
- COUTTS, A. M., BERINGER, J., TAPPER, N. J. (2008): Investigating the climatic impact of urban planning strategies through the use of regional climate modelling: a case study for Melbourne, Australia; In: *International Journal of Climatology*; 28; S. 1943-1957.
- CURDES, G. (1997): *Stadtstruktur und Stadtgestaltung*; 2. Auflage; Stuttgart.
- CURDES, G. (2010): *Stadtmorphologie und Klimawandel – Welche Morphologie kann überleben*; Vortrag im Rahmen des Projektes City2020+ / Aachen; 13.12.2010.
- CURDES, G., HELMER, P., KRANEFELD, A., KUMMER, H., WESTERHEIDE, R. (1989): *Städtebauliches Entwicklungskonzept zur Erneuerung des Aachener Raumes – Pilotstudie*; Aachen.
- DALY, D., CONKLIN, D. R., UNSWORTH, M. H. (2010): Local atmospheric decoupling in complex topography alters climate change impacts; In: *International Journal of Climatology*; 30; S. 1857-1864.
- DEFANT, F. (1933): Der Abfluss schwerer Luftmassen auf geneigtem Boden nebst einigen Bemerkungen zur Theorie stationärer Luftströme; In: *Sitzungsberichte der preußischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse* 18; S. 624-635.
- DELLA-MARTA, P. M., HAYLOCK, M. R., LUTERBACHER, J., WANNER, H. (2007): Doubled length of Western European summer heat waves since 1880; In: *Journal of Geophysical Research*; 112; online.
- DEVITO, A. S., MILLER, D. R. (1983): Some effects of corn and oak forest canopies in cold air drainage; In: *Agricultural Meteorology*; 29; S. 39-55.

- DRAUTZ, S., REUTER, U. (2011): Stadtklima Stuttgart – Der Rahmenplan Halbhöhenlagen als Beispiel eines klimarelevanten Planungsinstruments; In: UVP-Report; 25 (2+3); S. 160-165.
- DUPONT, S., BRUNET, Y., FINNEGAN, J. J. (2008): Large-eddy simulation of turbulent flow over a forested hill: Validation and coherent structure identification; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 134; S. 1911-1929.
- DÜTEMEYER, D. (2000): Urban-orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns; Essener Ökologische Schriften; 12; Hohenwarsleben.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2012a): Deutscher Klimaatlas; www.dwd.de; abgerufen am 16.09.2012.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2012b): Stationsinformationen; www.dwd.de; abgerufen am 17.10.2012.
- DWD (Hrsg.) (2006): Kurzinformation zum Kaltluftabflussmodell KLAM_21 - Klimasimulation für die Stadt- und Regionalplanung; Offenbach.
- EGGERT, A. W. K. (1999): Dreidimensionale SF6-Tracergasmessung als Methodik zum Nachweis von lokalen Luftströmungen für die planungsorientierte Stadtklimatologie; Dissertation; Trier.
- ELIASSON, E., UPMANIS, H. (2000): Nocturnal airflow from urban parks – implications for city ventilation; In: Theoretical and Applied Climatology; 66; S. 95-107.
- EMONS, H. (1986): Klimatologische Beurteilungsgrundlagen zur Berücksichtigung der Luftreinhaltung bei der städtebaulichen Planung in Tallagen; Habilitation; Aachen.
- ENDLICHER, W., KRESS, A. (2008): "Wir müssen unsere Stadt neu erfinden". Anpassungsstrategien für Stadtregionen; In: Informationen zur Raumentwicklung; 6/7; S. 437-445.
- ERIKSSON, H., EKLUNDH, L., HALL, K., LINDROTH, A. (2005): Estimating LAI in deciduous forest stands; In: Agricultural and Forest Meteorology; 129; S. 27–37.
- ESCOBEDO, F. J., KROEGER, T., WAGNER, J. E. (2011): Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices; In: Environmental Pollution; 159; S. 2078-2087.
- EßER, K. (2010): Hintergründe der klimatologischen Messungen in Aachen im 19. Jahrhundert; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 31-33.
- FERRERO, E., QUAN, L., MASSONE, D. (2011): Turbulence in the Stable Boundary Layer at Higher Richardson Numbers; In: Boundary-Layer Meteorology; 139; S. 225-240.
- FEZER, F. (1995): Das Klima der Städte; Gotha.
- FLEAGLE, R. G. (1950): A theory of air drainage; In: Journal of Meteorology; 7; S. 227-232.
- FOKEN, T. (2006): Angewandte Meteorologie; Berlin/Heidelberg/New York.
- FOURTEC – FOURIER TECHNOLOGIES (2013): MicroLog Pro; Bedienungsanleitung.
- FRANKE, J., TEZLAFF, G. (1987): Zum Auftreten interner Schwerewellen im Kaltluftabfluss; In: Meteorologische Rundschau; 40; S. 118-126.
- FRERICHS, S., HINZEN, A., SCHÜLE, R., (2011): Klimaschutz in der Raum- und Siedlungsplanung; In: UVP-report; 25 (1); S. 4-10.
- FREY, W., LÖSCH, R. (2010): Geobotanik – Pflanze und Vegetation in Raum und Zeit; Heidelberg.
- GABRIEL, K., ENDLICHER, W. R. (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany; In: Environmental Pollution; 159; S. 2044-2050.

- GEIGER, R. (1950): The climate near the ground; Havard University Press; Cambridge.
- GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht; Braunschweig.
- GEO-NET (2002): GIS-basierte Aufbereitung der Modellergebnisse zur Kaltluftsimulation für die Nutzung im Rahmen der Landes- und Regionalplanung in Thüringen; Abschlussbericht; Hannover.
- GOLDEN, J. S. (2004): The Built Environment Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions – A Sustainable Urban Engineering Complexity; In: Environmental Sciences; 1 (4); S. 321-349.
- GOLDREICH, Y. (1984): Urban Topoclimatology; In: Progress in Physical Geography; 8; S. 336-364.
- GONG, P., PU, R., BIGING, G. S., LARRIEU, M. R. (2003): Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data; In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing; 41 (6); S. 1355-1362.
- GOSSMANN, H. (1984): Satelliten-Thermalbilder. Ein neues Mittel für die Umweltforschung; In: Fernerkundung in Raumordnung und Städtebau; 16; Bonn.
- GREIVING, S., FLEISCHAUER, M. (2008): Raumplanung: in Zeiten des Klimawandels wichtiger denn je!; In: Raumplanung; 137; S. 61-66.
- GRIMM AEROSOL TECHNIK GMBH & Co. KG (2013): Grimm EDM 107; www.grimm-aerosol.com/downloads/datasheets/en/GrimmAerosolTechnik_Enviro_EDM107.pdf; abgerufen am 06.02.2013.
- GRIMMOND, C. S. B., POTTER, S. K., ZUTTER, H. N., SOUCH, C. (2001): Rapid methods to estimate sky-view-factors applied to urban areas; In: International Journal of Climatology; 21; S. 903-913.
- GROMKE, C. (2009): Einfluss von Bäumen auf die Durchlüftung von innerstädtischen Straßenschluchten; In: Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe (TH) – Heft 2008/2; Karlsruhe.
- GROSS, G. (1986): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flow and local climate: A numerical study; In: Boundary-Layer Meteorology; 28 (4); S. 315-337.
- GROSS, G., ETLING, C. (2003): Numerische Simulationsmodelle; In: promet; 30 (1/2); S. 28-38.
- GUDIJKSEN, P. H., SHEARER, D. L. (1988): The dispersion of atmospheric tracers in nocturnal drainage flows; In Journal of Applied Meteorology; 28; S. 602-608.
- HÄCKEL, H. (1999): Meteorologie; Stuttgart.
- HALLEGATTE, S., HENRIET, F., CORFEE-MORLOT, J. (2010): The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework; Climatic Change; online.
- HAMDI, R., SCHAYES, G. (2008): Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics; In: International Journal of Climatology; 28; S. 973-982.
- HÄMMERLE, M., GÁL, T., UNGER, J., MATZARAKIS, A. (2011): Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations; In: Theoretical and Applied Climatology; 105; S. 521-527.
- HARTENSTEIN, M. (2000): Analyse eines Bergwindsystems im Nordschwarzwald (Michelbachtal bei Gaggenau) unter Berücksichtigung seiner stadtklimatisch-lufthygienischen Bedeutung; In: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie; 11; Karlsruhe.

- HAVLIK, D. (2002): Das Klima von Aachen, In: Juchelka, R., Koch, A.; Aachener Geographische Arbeiten; 36; S. 1-20.
- HAVLIK, D., KETZLER G. (2000): Gesamtstädtisches Klimagutachten Aachen; Stadt Aachen (Hrsg.), Aachen.
- HAVLIK, D., KETZLER, G. (1993): Klimatologische Untersuchungen im Bereich Gillesbachtal-Moltkebahnhof – Endbericht; Aachen.
- HAVLIK, D., KETZLER, G. (1995): Klimatologische Untersuchungen im unteren Kannegießer-Ponellbachtal sowie Stellungnahme zu einem geplanten Bauvorhaben aus klimatologischer Sicht; Aachen.
- HAVLIK, D., KETZLER, G. (1996): Stadtökologischer Fachbeitrag - Klima/Lufthygiene; Aachen.
- HAVLIK, D., KETZLER, G., PESCHEL, G., STEINICKE, W. (2000): Thermalkarte Aachen; In: Informationen und Materialien zur Geographie – Euregio Maas-Rhein; 47; S. 21-34.
- HECKER, U. (2008): Bäume und Sträucher; München.
- HEYWOOD, G. S. P. (1933): Katabatic winds in a valley; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 59; S. 47-58.
- HOFMANN, W. (1953): Die städtebauliche Entwicklung der Badebezirke in Aachen und Burtscheid 1656 – 1950; In: Huyskens, A. (Hrsg.): Das alte Aachen. Seine Zerstörung und sein Wiederaufbau. Aachen.
- HOLDEN, J. J., DERBYSHIRE, S. H., BELCHER, S. E. (2000): Tethered balloon observations of the nocturnal stable boundary layer in a valley; In: Boundary-Layer Meteorology; 97; S. 1-24.
- HORBERT, M. (2000): Klimatologische Aspekte der Stadt- und Landschaftsplanung; In: Landschaftsentwicklung und Umweltforschung; Schriftenreihe im Fachbereich Umwelt und Gesellschaft; Nr. 113; Berlin.
- HORLACHER, V., OSBORNE, S., PRICE J. D. (2012): Comparison of Two Closely Located Meteorological Measurement Sites and Consequences for Their Areal Representativity; Boundary-Layer Meteorology; 142; S. 469-493.
- HORST, T. W., DORAN, J. C. (1986): Nocturnal drainage flow on simple slopes; In: Boundary-Layer Meteorology; 34 (3); S. 263-286.
- HUNT, A., WATKISS, P. (2010): Climate change impacts and adaptation in cities: a review of the literature; In: Climatic Change; online.
- HUPFER, P., KUTTLER, W. (Hrsg.) (2005): Witterung und Klima; Stuttgart.
- IJIYAMA, Y., SHINODA, M. (2000): Seasonal changes in the cold-air pool formation in a subalpine hollow, Central Japan; In: International Journal of Climatology; 20; S. 1471-1483.
- IZIOMONA, M. G., MAYER, H., MATZARAKIS, A. (2003): Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization; In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics; 65; S. 1107-1116.
- JENDRITZKY, G. (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit; In: Endlicher, W., Gerstengarbe, F.-W.: Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke; Berlin; S. 108-118.
- KETZLER, G. (1989): Geländeklimatologische Untersuchungen über die Bildung eines Kaltluftsees am Beispiel der Aachener Soers; unveröffentl. Magisterarbeit; Aachen.

- KETZLER, G. (1997): Vergleichende Untersuchungen der Temperaturverhältnisse in Städten unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturänderungsraten; In: Aachener Geographische Arbeiten; 31; Aachen.
- KETZLER, G. (2002): Untersuchungen an Kaltluftströmen in kleinen stadtnahen Tälern, In: Juchelka, R., Koch, A.; Aachener Geographische Arbeiten; 36; S. 21-64.
- KETZLER, G. (2009): Der CO₂-Unfall von Gütterath 2008 - geländeklimatische Aspekte des Umgangs mit Gasen hoher Dichte; In: Tagungsband des 28. Jahrestreffen des AK Klima; Hamburg; S. 42.
- KETZLER, G., EBER, K., PAFFEN, M. (2010c): Chronik der klimatologischen Messungen in Aachen; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 24-30.
- KETZLER, G., EBER, K., SACHSEN, T. (2010a): Veränderung von Belüftungsfunktionen durch lokalen Kaltluftabfluss im Zuge historischer Stadtentwicklung - eine Modellstudie Aachen 1810-2010; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 77-96.
- KETZLER, G., SACHSEN, T., SCHNEIDER, C. (2010b): Untersuchung zu Kaltluftabflüssen im Bereich Vaalserstraße (Aachen); Gutachten; Aachen.
- KETZLER, G., SACHSEN, T., SCHNEIDER, C. (2012): Cold air Drainage Flow in Different Building Structures; Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.
- KING, E. (1973): Untersuchungen über kleinräumige Änderungen des Kaltluftflusses und der Frostgefährdung durch Straßenbauten; In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes 130; 17; Offenbach.
- KOMATSU, H., YOSHIDA, N., WA, H. T., KOSAKA, I., TANTASIRIN, C., SUZUKI, M. (2003): Seasonal trend in the occurrence of nocturnal drainage flow on a forested slope under a tropical monsoon climate; In: Boundary-Layer Meteorology; 106; S. 573-592.
- KOPPE, C., KOVATS, S., JENDRITZKY, G., MENNE, B. (2004): Heat waves: Risks and responses; Kopenhagen.
- KÖPPEN, W., GEIGER, R. (1936): Handbuch der Klimatologie; Band 1; Teil C; Das Geographische System der Klimate; Berlin.
- KOßMANN, M., SIEVERS, U. (2007): KLAM_21 drainage wind modelling of wintertime air pollution events in Christchurch, New Zealand, Proc. 29th International Conference on Alpine Meteorology, Chambéry, France, 1; S. 29-32.
- KOßMANN, M., SIEVERS, U. (2009): Modelling of nocturnal drainage winds at Meteor Crater, Arizona using KLAM_21; In: Annalen der Meteorologie; 44; S. 182-183.
- KOTTEK, M., GRIESER, G., BECK C., RUDOLF, B., RUBEL, F. (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated; In: Meteorologische Zeitschrift; 15 (3); S. 259-263.
- KOWARIK, I. (2011): Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation; In: Environmental Pollution; 159; S. 1974-1983.
- KRATZER, A. (1937): Das Stadtklima; Braunschweig.
- KRAUS, H. (2008): Grundlagen der Grenzschichtmeteorologie; Berlin, Heidelberg, New York.
- KRAUTZBERGER, M. (2012): Klimaschutz bei städtebaulichen Planungen und Maßnahmen. Zur BauGB Novelle 2011; In: UVP-report; 26 (2); S. 59-64.
- KUTTLER, W. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen; Climate change in urban areas, Part 1, Effects; In: Environmental Sciences Europe (ESEU); 23; S. 1-12.

- KUTTLER, W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen; Climate change in urban areas, Part 2, Measures; In: Environmental Sciences Europe (ESEU); 23; S. 1-15.
- KUTTLER, W., BARLAG, A.-B. (2003): Angewandte Stadtklimaforschung im Ruhrgebiet. In: Chmielewski, F.-M., Foken, T. (Hrsg.): Beiträge zur Klima- und Meeresforschung. Aus Anlass des 70. Geburtstages von Peter Hupfer; Berlin und Bayreuth; S. 91-101.
- KUTTLER, W., BARLAG, A.-B., ROßMANN, F. (1996): Study of the thermal structure of a town in a narrow valley; Atmospheric Environment; 30; S. 365-378.
- KUTTLER, W.; ROßMANN, F.; BARLAG, A.-B. (2007): UVP-integrierte immissionsklimatische Untersuchung für einen geplanten Deponiestandort; Essener ökologische Schriften; 8; Hohenwarsleben.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1995a): Topographische Karte 1:25000 5202 Aachen.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1995b): Topographische Karte 1:25000 5102 Herzogenrath.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1995c): Topographische Karte 1:25000 5103 Eschweiler.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1995d): Topographische Karte 1:25000 5203 Stolberg.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (1995e): Topographische Karte 1:25000 5303 Roetgen.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (2005): Top50 NRW; Version 4; Amtliche Topographische Karte – Die digitale Kartenserie der deutschen Landesvermessung.
- LANDSBERG, H. E. (1981): The Urban Climate; New York.
- LAPWORTH, A. (2006): The morning transition of the nocturnal boundary layer; In: Boundary-Layer Meteorology; 119; S. 501-526.
- LI, B., SAIN, S., MEARNS, L. O., ANDERSON, H. A., KOVATS, S., EBI, K. L., BEKKEDAL, M. Y. V., KANAREK, M. S., PATZ, J. A. (2012): The impact of extreme heat on morbidity in Milwaukee, Wisconsin; In: Climatic Change; 110; S. 959-976.
- LITSCHKE, T, KUTTLER, W. (2008): On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review; In: Meteorologische Zeitschrift; 17(3); S. 229-240.
- LOEFFLER, A. E., GORDON, A. M., GILLESPIE, T. J. (1992): Optical porosity and windspeed reduction by coniferous windbreaks in Southern Ontario; In: Agroforestry Systems; 17; S. 119-133.
- LOHMEYER, A., SCHÄDLER, G. (1998): Das Kaltluftabflußmodell KALM, Karlsruhe.
- MAHRT, L. (1986): Nocturnal topoclimatology; WMO – World climate applications programme; S. 117; Genf.
- MAHRT, L. (2011): The Near-Calm Stable Boundary Layer; In: Boundary-Layer Meteorology; 140; S. 343-360.
- MAHRT, L., SUN, J., BLUMEN, W., DELANEY, A., MCCLEAN, G., ONCLEY, S. (1998): Nocturnal Boundary-Layer Regimes; In: Boundary-Layer Meteorology; 88; S. 255-278.
- MAHRT, L., VICKERS, D. (2002): Contrasting vertical structures of the stable boundary layer; In: Boundary-Layer Meteorology; 105; S. 351-363.
- MAHRT, L., VICKERS, D., NAKAMURA, R., SOLER, M. R., SUN, J., BURNS, S., LENSCHOW, D. H. (2001): Shallow Drainage Flows; In: Boundary-Layer Meteorology; 101; S. 243-260.
- MATZARAKIS, A., DE ROCCO, M. (2009). Thermal bioclimate in Strasbourg - the 2003 heat wave; In: Theoretical and Applied Climatology; 98; S. 209-220.

- MATZARAKIS, A., MATUSCHEL, O. (2011): Sky view factor as a parameter in applied climatology – rapid estimation by the SkyHelios model; In: Meteorologische Zeitschrift; 20 (1); S. 39-45.
- MEARNS, L. O. (2010): The drama of uncertainty; In: Climatic Change; 100; S. 77-85.
- MEEHL, G. A., TEBALDI, C. (2004): More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century; In: Science; 305; S. 994-997.
- MERBITZ, H. (2010): Feinstaubbelastung in Aachen und der Euregio Maas-Rhein; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.); Aachener Geographische Arbeiten; 47 ; S. 48-60.
- MERBITZ, H., BUTTSTÄDT, M., MICHAEL, S., DOTT, W., SCHNEIDER, C. (2012): GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas; In: Applied Geography; 33; S. 94-106.
- MET OFFICE (2012): The Cold-air Pooling Experiment (COLPEX); www.metoffice.gov.uk/research/news/colpex; abgerufen am 16.09.2012.
- MILIONIS, E., DAVIES, T. D. (2008): The effect of the prevailing weather on the statistics of atmospheric temperature inversions; In: International Journal of Climatology; 28; S. 1385-1397.
- MILLS, G. (2008): Luke Howard and The Climate of London; In: Weather; 63(6); S. 153-157
- MILLS, G. (2011): Cubes and canyons: Different perspectives on the urban climate; Proceedings of City Weathers: Meteorology and urban design 1950-2010; Manchester; S. 21-24.
- MKULNV NRW - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2010): Handbuch Stadtklima – Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel; Düsseldorf.
- MOBILE ACTION TECHNOLOGY INC. (n.d.): USB GPS Logger GT-120; Bedienungsanleitung.
- MÜLLER, M. (2004): Auswirkungen von Änderungen der Landnutzung auf das lokale Klima in Räumen mit unterschiedlichem Relief - Der nächtliche Strahlungshaushalt historischer Landnutzungsmuster im Bereich südlicher Oberrhein, Schwarzwald und Baar; Dissertation; Freiburg.
- MUNLV - MINISTERIUM FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (Hrsg.) (2009): Anpassung an den Klimawandel. Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen.
- MVI BW – MINISTERIUM FÜR VERKEHR UND INFRASTRUKTUR BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.) (2013): Städtebauliche Klimafibel Online; www.staedtebauliche-klimafibel.de; abgerufen am 01.06.2013.
- NAPPO, C. J., RAO, K. S. (1987): A model study of pure katabatic flows; In: Tellus; 39A; S. 61-71.
- NELIßEN, M. (2009): Freier (Durch-)Fluss für einen kleinen Bach - Renaturierungsaktion am Kannegießerbach; In: Aachener Umwelt Rundbrief; 65; S. 4-6.
- NIEDERAU, A., SCHNEIDER, C., NACKEN, M., PELZER, M. (2011): Aktualisierung des landesweiten Emissionskatasters Kfz-Verkehr NRW in Bezug auf HBEFA3.1, Analysejahr 2007 und Prognose 2010 und 2015; AVISO GmbH; Aachen.
- NKEMDIRIM, L. (1980): Cold air drainage and temperature fields in an urban environment: a case study of topographical influence on climate; In: Atmospheric Environment; 14; S. 375-381.
- OERTEL, H. (Hrsg.) (2008): Prandtl – Führer durch die Strömungslehre – Grundlagen und Phänomene; Wiesbaden.

- OKE, T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 108; S. 1-24.
- OKE, T. R. (2006a): Boundary layer climates; London.
- OKE, T. R. (2006b): Towards better scientific communication in urban climate; In: Theoretical and Applied Climatology; 84; S. 179-190.
- ÖKOLOGIEZENTRUM AACHEN (Hrsg.) (1991): Bäche erkunden in Aachen – Hintergründe und Materialien; In: Ökologie Hefte Aachen; Aachen.
- ONSET, COMPUTER CORPORATION (2009): HOBO ProV2; Bedienungsanleitung.
- PAPADOPOULOS, K. H., HELMIS, C. G. (1999): Evening and morning transition of katabatic flows; In: Boundary-Layer Meteorology; 92; S. 195-227.
- PAPADOPOULOS, K. H., HELMIS, C. G., SOILEMES, A. T., KALOGIROS, J., PAPAGEORGAS, P. G., ASIMAKOPOULOS, D. N. (1997): The structure of katabatic flows down a simple slope; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 123; S. 1581-1601.
- PARDYJAK, E. R., FERNANDO, H. J. S., HUNT, J. C. R., GRACHEV, A. A., ANDERSON, J. (2009): A case study of the development of nocturnal slope flows in a wide open valley and associated air quality implications; In: Meteorologische Zeitschrift; 18 (1); S. 85-100.
- PESCHEL, G. / Fachbereich Umwelt der Stadt Aachen (2013): Mündliche Mitteilung vom 18.06.2013 zu UVP und Fachprüfungen in der Stadt Aachen.
- PFLUG, W., BIRKIGT, H., BRAHE, P., HORBERT, M., VOB, J., WEDECK H., WÜST, S. (1978): Landschaftsplanerisches Gutachten Aachen; Aachen.
- POGGI, D., KATUL, G. G., FINNIG, J. J., BELCHER, S. E. (2008): Analytical models for the mean flow inside dense canopies on gentle hilly terrain; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 134; S. 1095-1112.
- PRTENJAK, M. T., SRNEC, L., PETERNEL, R., MADŽAREVIĆ, V., HRGA, I., STJEPANOVIĆ, B. (2012): Atmospheric conditions during high ragweed pollen concentrations in Zagreb, Croatia; In: International Journal of Biometeorology; 56; S.1145-1158.
- PRYOR, S. C., GALLAGHER, M., SIEVERING, H., LARSEN, S. E., BARTHELMIE, R. J., BIRSAN, F., NEMITZ, E., RINNE, J., KLUMALA, M. (2008): A review of measurement and modelling results of particle atmosphere–surface exchange; In: Tellus; 60b; S. 42-75.
- PYPKER, T. G., UNSWORTH, M. H., LAMB, B., ALLWINE, E., EDBURG, S., SULZMAN, E., MIX, A. C., BOND, B. J. (2007): Cold air drainage in a forested valley: Investigating the feasibility of monitoring ecosystem metabolism; In: Agricultural and Forest Meteorology; 145; S. 149-166.
- QUENOL, H., BELTRANDO, G. (2008): Impact of a new railway line embankment (Mediterranean TGV) on the frequency of spring frosts in a fruit-growing area of the Durance Valley (south of France); In: Meteorological Applications; 15; S. 389-398.
- REIL, A., DICKMANN, N., FRITZ, S., HAGEMANN, N., OVERS, C., PRÖSCHEL, B. (2010): Kaltluftabflüsse an Stadtrand – Einflussfaktoren und Messergebnisse am Beispiel zweier Täler im Stadtgebiet Aachen; unveröff. Bericht zum Geländepraktikum „Stadtklima“; Aachen.
- REN, C., NG, E.; KATZSCHNER, L. (2011): Urban Climate Map Studies: A review; In: International Journal of Climatology; 31 (15); S. 2213-2233.

- REUTER, U. (2011): Implementation of Urban Climatology in City Planning in the City of Stuttgart; Proceedings of City Weathers: Meteorology and urban design 1950-2010; Manchester; S. 157-163
- RINGHOF, E., HENNINGER, S. (2010): Verbesserung der thermischen Behaglichkeit innerhalb dichter Wohnkomplexe am Beispiel einer südkoreanischen Stadt; In: Schrenk, V. Popovich, D., Zeile, P. (Hrsg.): REAL CORP 2010-CITIES FOR EVERYONE: Liveable, prosper, healthy; S. 889-897.
- ROBINE, J. M., CHEUNG, S. L., LE ROY, S., VAN OYEN, H., GRIFFITHS, C., MICHEL, J. P., HERRMANN, F. R. (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003; In: Comptes Rendus Biologies; 331(2); S. 171-178.
- ROG – Raumordnungsgesetz vom 22.12.2008; BGBl. I; S. 2986.
- ROST, J., MAYER, H. (2006): Comparative analysis of albedo and surface energy balance of a grassland site and an adjacent Scots pine forest; In: Climate Research; 30; S. 227-237.
- ROTACH, M. W., VOGT, R., BERNHOFER, C., BATCHVAROVA, E., CHRISTEN, A., CLAPPIER, A., FEDDERSEN, B., GRYNING, S.-E., MARTUCCI, G., MAYER, H., MITEV, V., OKE, T. R., PARLOW, E., RICHNER, H., ROTH, M., ROULET, Y.-A., RUFFIEUX, D., SALMOND, J. A., SCHATZMANN, M., VOOGT, J. A. (2005): BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project; Theoretical and Applied Climatology; 81; S. 231-261.
- RWTH AACHEN (2012): HumTec; www.humtec.rwth-aachen.de; abgerufen am 16.09.2012.
- SACHSEN, T., BUTTSTÄDT, M., MERBITZ, H., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010): Die räumliche Verteilung thermischer und lufthygienischer Belastungen unterschiedlicher Stadtteile am Beispiel Aachens; DACH Meteorologentagung 2010; Bonn.
- SACHSEN, T., BUTTSTÄDT, M., MERBITZ, H., PESCHEL, G., SCHNEIDER, C. (2011): City2020+: Interdisziplinäre Stadtforschung vor dem Hintergrund klimatischen und demographischen Wandels und als Entscheidungshilfe in der kommunalen Planung; In: UVP Report 25 (2+3); S. 166-171.
- SACHSEN, T., KETZLER, G., KÄSMACHER, O. (2010): Stadt- und geländeklimatologische Untersuchungen in Aachen und Umgebung; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 39-47.
- SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2012): The reduction of urban heat stress by optimized vegetation structures; Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.
- SAVIJÄRVI, H., LIYA, J. (2001): Local winds in a valley city; In: Boundary-Layer Meteorology; 100; S. 301-319.
- SCHÄDLER, G., LOHMEYER, A. (1996): Kaltluft- und Windfeld-Berechnungen für den Raum Stuttgart im Zusammenhang mit der Planung für das Projekt „STUTTGART 21“; In: Untersuchungen zur Umwelt „Stuttgart 21“; 1; Stuttgart.
- SCHÄR, C., JENDRITZKY, G. (2004): Hot news from summer 2003; In: Nature; 432; S. 559-560.
- SCHNEIDER, C., BALZER, C., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., GINSKI, S., HAHMANN, J., KETZLER, G., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A., WEISHOFF-HOUBEN, M., BRUNK, M. F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K. (2011): "CITY 2020+": Assessing climate change impacts for the city of Aachen related to demographic change and health – a progress report; In: Advances in Science and Research; 6; S. 261-270.
- SCHNEIDER, C., BRUNK, M. F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K., WACHTEN, K., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., HÜLSMEIER, L., KETZLER, G., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): "City 2020+" - Assessing climate and

- demographic change impacts for the City of Aachen; Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology Freiburg; S. 491-496.
- SCHNEIDER, C., KETZLER, G. (2005): Klimagutachten AMB-Campus; Aachen.
- SCHNEIDER, C., KETZLER, G. (2006): Entwicklungsvorhaben Sonderuntersuchungsgebiet Goethestrasse / Hangeweiher; Aachen.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2003): Klimatologie; Stuttgart.
- SCHWAB, A. (2000): Reliefanalytisches Verfahren zur Abschätzung nächtlicher Kaltluftbewegungen; In: Freiburger Geographische Hefte; 61; Freiburg.
- SCHWAB, A., ZACHENBACHER, D. (2009): REKLIBO - Regionale Klimaanalyse Bodensee-Oberschwaben, Wissenschaftlicher Abschlussbericht, Regionalverband-Bodensee-Oberschwaben; 1-4; Weingarten.
- SCHWARTZ, R. C., FRYREARB, D. W., HARRISA, B. L., BILBROB, J. D., JUOA, A. S. R. (1995): Mean flow and shear stress distributions as influenced by vegetative windbreak structure; In: Agricultural and Forest Meteorology; 75; S. 1-22.
- SHAPIRO, A., FEDOROVICH, E. (2008): Coriolis effects in homogeneous and inhomogeneous katabatic flows; In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society; 134; S. 353-370.
- SHARKEY, T. D., YEH, S. (2001): Isoprene emission from plants; In: Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology; 52; S. 407-436.
- SHAW, R. H., DEN HARTOG, G., KING, K. M., THURTELL, G. W. (1974): Measurements of mean wind flow and three-dimensional turbulence intensity within a mature corn canopy; In: Agricultural Meteorology; 13, S. 419-425.
- SIEVERS, U. (2005): Das Kaltluft-Abfluss-Modell KLAM_21. Theoretische Grundlagen, Anwendungen und Handhabung des PC-Modells; In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 227; Frankfurt am Main.
- SIEVERS, U. (2008): Das Kaltluft-Abfluss-Modell KLAM_21. Theoretische Grundlagen und Handhabung des PC-Modells; Offenbach am Main.
- SIMPSON, J. R., MCPHERSON, E. G. (2011): The tree BVOC index; In: Environmental Pollution; 159; S. 2088-2093.
- SIUDA, A., HAHMANN, J., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C. (2010): Hitzegefährdete Bevölkerungsgruppen in Aachen; In: SCHNEIDER, C., KETZLER, G. (Hrsg.); In: Aachener Geographische Arbeiten; 47 ; S. 69-76.
- SMITH, S. A., BROWN, A. R., VOSPER, S. B., MURKIN, P. A., VEAL, A. T. (2010): Observations and Simulations of Cold Air Pooling in Valleys; In Boundary-Layer Meteorology; 134; S. 85-108.
- SMOYER-TOMIC, K. E., KUHN, R., HUDSON, A. (2003): Heat Wave Hazards: an overview of heat wave impacts in Canada; In: Natural Hazards; 28: S. 463-485.
- SÖDERSTRÖM, M., MAGNUSSON, B. (1995): Assessment of local agroclimatological conditions – a methodology; In: Agricultural and Forest Meteorology; 72; S. 243-260.
- SOLER, M. R., INFANTE, C., BUENESTADO, P, MAHRT, L. (2002): Observations of nocturnal drainage flow in a shallow gully; In: Boundary-Layer Meteorology; 105; S. 253-273.
- SONG, Y. (2003): Kaltluft du Kaltluftschneisen als Planungsfaktor zur Verbesserung der Umweltqualität; Berlin.

- STADT AACHEN (2001): Gesamtstädtisches Klimagutachten Aachen – Kurzfassung und Bürgerinformation; Aachen.
- STADT AACHEN (2006): Wohnungsmarktbericht. Aachen.
- STADT AACHEN (2012a): Euregio Maas-Rhein; www.aachen.de; abgerufen am 14.10.2012.
- STADT AACHEN (2012b): Aachen2030 – Masterplan – Flächennutzungsplan; www.aachen.de/aachen2030; abgerufen am 15.10.2012.
- STATISTISCHES BUNDESAMT, Gemeinden in Deutschland nach Bevölkerung am 31.12.2011 auf Grundlage des Zensus 2011 und früherer Zählungen; www.destatis.de; abgerufen am 01.06.2013.
- STENDEL, M., MOGENSEN, I. A., CHRISTENSEN, J. H. (2006): Influence of various forcings on global climate in historical times using a coupled atmosphere–ocean general circulation model; In: *Climate Dynamics*; 26; S. 1-15.
- STEWART, I. D. (2011): A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature; In: *International Journal of Climatology*; 31; S. 200-217.
- STULL, R. B. (2000): *Meteorology for scientists and engineers*; Belmont.
- SWINBANK, W.C. (1963): Long-wave radiation from clear skies; In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*; 89; S. 339-348.
- THAMM, H.-P. (2000): Modellierung von Flächendatensätzen der Oberflächentemperatur, Strahlungsbilanz und Kaltluftproduktion in Strahlungsnächten; Dissertation; Freiburg.
- THIES CLIMA (1989): Windrichtungsgeber; Bedienungsanleitung, Göttingen.
- THIES CLIMA (2009): Combined Wind Transmitter, Bedienungsanleitung; Göttingen.
- THIES CLIMA (2013): Pers. Mitteilung durch W. Kulp im Telefonat vom 05.06.2013.
- THIES CLIMA (o.J.a): Hygro-Thermo Transmitter, Bedienungsanleitung, Göttingen.
- THIES CLIMA (o.J.b): Weather- and Thermal Radiation Shield; Bedienungsanleitung, Göttingen.
- THIES CLIMA (o.J.c): Windgeber; Bedienungsanleitung, Göttingen.
- TRACHTE, K., NAUSS, T., BENDIX, J. (2010): The Impact of Different Terrain Configurations on the Formation and Dynamics of Katabatic Flows: Idealised Case Studies; In: *Boundary-Layer Meteorology*; 134; S. 307-325.
- UNGER, J. (2004): Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach; In: *Climate Research*; 27; S. 253-264.
- UNSWORTH, M. H., BOND, B. J., MIX, A. C., PYPKER, T. G., MAHRT, L. (2004): Nocturnal air drainage in forest canopies: A new way of studying physiological responses to the weather?; *Proceedings of 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*; Vancouver
- UPMANIS, H., CHEN, D. L. (1999): Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences – a case study of summer 1995 in Göteborg, Sweden; In: *Climate Research*; 13; S. 125-139.
- UVPG - Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung vom 18.06.2002; BGBl. I; S. 1921.
- VAN DEN HURK, B. J. J. M., VITERBO, P., LOS, S. (2003): Impact of Leaf Area Index seasonality on annual land surface evaporation in a Global Circulation Model; In: *Journal of Geophysical Research*; 108, S. 4191-4199.

- VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2003): Umweltmeteorologie – Lokale Kaltluft; =VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5.
- VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2004): Umweltmeteorologie – Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen; =VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9.
- VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2006): Umweltmeteorologie – Anforderungen an die atmosphärischen Umweltbedingungen im Bereich der Erholung, Prävention, Heilung und Rehabilitation; =VDI-Richtlinie 3787; Blatt 10.
- VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) (1988): Stadtklima und Luftreinhaltung – Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung; Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo.
- VOGT, J. (2001): Lokale Kaltluftabflüsse; In: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie; 14; Karlsruhe.
- VOGT, J., LAUERBACH, H., MEURER, M., LANGNER, M. (2003): The Influence of Urban Vegetation on Air Flow; In: Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate; Lodz; S. 471-474.
- VON KOPPEN, B. (1996): Alt-Aachener Gärten; Aachen.
- VOSPER, S., BROWN, A. (2008): Numerical simulations of sheltering in valleys: the formation of night-time cold-air pools; In: Boundary-Layer Meteorology; 127; S. 429-448.
- WARNECKE, G. (1997): Meteorologie und Umwelt – Eine Einführung; Berlin/Heidelberg/New York.
- WEBER, S. (2004): Energiebilanz und Kaltluftdynamik einer urbanen Luftleitbahn; Essener Ökologische Schriften; 21, Hohenwarsleben.
- WEBER, S., KUTTLER W. (2004): Cold-air ventilation and the nocturnal boundary layer structure above an urban ballast facet; In: Meteorologische Zeitschrift; 13 (5); S. 413-420.
- WEBER, S., KUTTLER, W. (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und –qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn; In: Gefahrstoffe, Reinhaltung der Luft: air quality control; 63 (9); S. 381-386.
- WEISCHET, W., ENDLICHER, W. (2008): Einführung in die Allgemeine Klimatologie; Berlin/Stuttgart.
- WERNER, G., KRESS, R., MAI, H., REUTER, W., ROTH, D., SCHULZ, V. (1979): Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung; In: Schriftenreihe Raumordnung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Bonn.
- WETZEL, G. (2008): Die Berücksichtigung von Kaltluftabflüssen in der Bauleitplanung als bedeutender Beitrag zur Sicherung der Luftqualität, dargestellt an Beispielen aus Baden-Württemberg; In: UVP-report; 22 (5); S. 225-228.
- WHITEMAN, C. D. (1988): Morning Transition Tracer Experiments in a deep narrow valley; In: Journal of applied meteorology; 28; S. 626-635.
- WILBY, R. L. (2008): Constructing climate change scenarios of urban heat island intensity and air quality; In: Environment and Planning B: Planning and Design; 35; S. 902-919.
- YANG, B., RAUPACH, M. R., SHAW, R. H., PAW, K. T., MORSE, A. P. (2006): Large-eddy simulation of turbulent flow across a forest edge. Part1: Flow characteristics; In: Boundary-Layer Meteorology; 120; S. 377-412.
- YE, Z. J., SEGAL, M., GARRATT, J. R., PIELKE, R. A. (1989): On the impact of cloudiness on the characteristics of nocturnal downslope flows; In: Boundary Layer Meteorology; 49; S. 23-51.

- YI, C. (2009): Instability Analysis of Terrain-Induced Canopy Flows; *Journal of Atmospheric Sciences*; 66; S. 2134-2142.
- YOSHINO, M. M. (1984): Thermal Belt and Cold Air Drainage on the Mountain Slope and Cold Air Lake in the Basin at Quiet, Clear Night; In: *GeoJournal*; 8 (3); S. 235-250.
- YOSHINO, M. M., TANAKA, M., NAKAMURA, K. (1981): Formation of the cold air lake and its effects on the agriculture; *Journal of Natural Disaster Science*; 3 (2); S. 1-14.
- YU, Y., CAI, X.-M. (2006): Structure and dynamics of katabatic flow jumps: Idealised simulations; In: *Boundary-Layer Meteorology*; 118 (3); S. 527-555.
- ZÄNGL, G. (2005): Formation of extreme cold-air pools in elevated sinkholes: an idealised numerical process study; In: *Monthly Weather Review*; 133; S. 925-941.
- ZENGER, A. (1998): Analyse und Bewertung von Kaltluftabflüssen; In: *Immissionsschutz – Zeitschrift für Luftreinhaltung, Lärmschutz, Anlagensicherheit, Abfallverwertung und Energienutzung*; 4; S. 150-155.

11. Anhang

11.1 Formelverzeichnis

Strahlungsbilanz der Erdoberfläche:

$$Q = \underbrace{(D + H - R)}_{Q_K} + \underbrace{(AG - A)}_{Q_L} \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Q	Gesamtstrahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_K	Kurzwellige Strahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_L	Langwellige Strahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
D	Direkte Sonneneinstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
H	Himmelsstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
R	Reflexstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
AG	Atmosphärische Gegenstrahlung	$[\text{W m}^{-2}]$
A	Ausstrahlung der Oberfläche	$[\text{W m}^{-2}]$

Energiebilanz der Erdoberfläche

$$Q + Q_H + Q_E + Q_B = 0 \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Q	Gesamtstrahlungsbilanz	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_H	Sensibler Wärmestrom	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_E	Latenter Wärmestrom	$[\text{W m}^{-2}]$
Q_B	Bodenwärmestrom	$[\text{W m}^{-2}]$

Die Längen-Froude-Zahl

$$Fr_L = \frac{v_s}{N \times L} \quad \text{mit} \quad N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \times \frac{d\theta}{dz}} \quad [-]$$

Fr_L	Längen-Froude-Zahl	$[-]$
v_s	Mittlere Windgeschwindigkeit der synoptischen Strömung über dem Tal	$[\text{m s}^{-1}]$
N	Brunt-Väisälä-Frequenz	$[\text{s}^{-1}]$
L	Halbweite der Randhöhen	$[\text{m}]$
θ	Potenzielle Temperatur	$[\text{K}]$
$d\theta / dz$	Potenzieller Temperaturgradient	$[\text{K m}^{-1}]$

Tatsächliche Höhe der ungestörten Talatmosphäre:

$$\frac{H_s}{H_0} = 1 - 0,068v \quad \sim \quad (1 - 0,068v)H_0 \quad [m]$$

H_s	Tatsächliche Mächtigkeit der synoptisch ungestörten Talatmosphäre	[m]
H_0	Höhe des Tales	[m]

Richardson-Zahl:

$$Ri = \frac{1}{Fr_d^2} \quad [-]$$

Ri	Richardson-Zahl	[-]
Fr_d	Densimetrische Froude-Zahl	[-]

Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{H_{KL} \times u_{KL}}{v} \quad [-]$$

Re	Reynolds-Zahl	[-]
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	[m]
u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft	[m s ⁻¹]
v	Mittlere kinematische Zähigkeit der Kaltluft	[m ³ s ⁻¹]

Abkühlung eines Kaltluftpaketes während des Fließvorganges

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\left(\frac{dp}{dt} - \frac{dQ_H}{dxy} - \frac{dQ}{dxy} \right)}{\rho \times c_p} \quad [K s^{-1}]$$

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$	Abkühlung eines Kaltluftpaketes während des Fließvorganges	[K s ⁻¹]
p	Luftdruck	[hPa]
t	Zeit	[s]
Q_H	Sensibler Wärmestrom,	[W m ⁻²]
dxy	Länge der Fließstrecke in horizontaler Richtung	[m]
Q	Gesamtstrahlungsbilanz	[W m ⁻²]
ρ	Luftdichte	[kg m ⁻³]
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]

Geschwindigkeitsprofil abfließender Kaltluft

$$u_{KL} = u \sin \left(\pi \frac{z-z_0}{H_{KL}} \right) \exp \left[-n \left(\frac{z-z_0}{H_{KL}} \right) \right] \quad [m s^{-1}]$$

u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft	[m s ⁻¹]
z	Höhe über Grund	[m]
z_0	aerodynamische Rauigkeitslänge	[m]
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	[m]

Fließgeschwindigkeit der Kaltluft

$$u_{KL} = \sqrt{\frac{g \times H_{KL}}{\mu}} \times \frac{T_U - T_{KL}}{T_U} \sin \alpha \quad [\text{m s}^{-1}]$$

u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft	$[\text{m s}^{-1}]$
g	Schwerebeschleunigung	$[\text{m s}^{-2}]$
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	$[\text{m}]$
μ	Reibungskonstante	$[-]$
T_U	Umgebungslufttemperatur der Kaltluft	$[\text{K}]$
T_{KL}	Temperatur der Kaltluft	$[\text{K}]$
α	Neigung der Fläche	$[\text{°}]$

Kaltluftmächtigkeit

$$H_{KL} = 0,0375 \times \sin \alpha^{\frac{2}{3}} \times x_{KL} \quad [\text{m}]$$

H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft	$[\text{m}]$
α	Neigung der Fläche	$[\text{°}]$
x_{KL}	Zurückgelegte Fließstrecke der Kaltluft	$[\text{m}]$

Berechnung des Kaltluftvolumens

$$V_{KL} = \frac{\alpha_{ST} \times \varepsilon \times (a - b \times 10^{-c \times e}) \times (T_{KL} - T_B) \times \Delta t_Q \times A_F}{\rho \times c_p \times \Delta T_R} \quad [\text{m}^3]$$

V_{KL}	Kaltluftvolumen	$[\text{m}^3]$
ε	Emissionsgrad der Oberfläche	$[-]$
α_{ST}	Wärmeübergangskoeffizient	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
a, b und c	Empirische Konstanten	$[-]$
e	Dampfdruck	$[\text{hPa}]$
T_{KL}	Temperatur der Kaltluft	$[\text{K}]$
T_B	Temperatur in Bodennähe	$[\text{K}]$
Δt_Q	Dauer der negativen Strahlungsbilanz	$[\text{s}]$
A_F	Ausstrahlungsfläche	$[\text{m}^2]$
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	$[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$
ρ	Luftdichte	$[\text{kg m}^{-3}]$
ΔT_R	Abkühlungsbetrag der Luft durch Strahlung	$[\text{K}]$

Wärmeinselintensität

$$\Delta T = T_u - T_r \quad [\text{K}]$$

ΔT	Wärmeinselintensität	$[\text{K}]$
T_u	Temperatur der städtischen Luft	$[\text{K}]$
T_r	Temperatur der Luft in ländlicher Umgebung	$[\text{K}]$

11.2 Tabellenanhang

Tab. A 1: Umsetzung der ALKIS-Gebäudedaten in KLAM_21 Klassen

Nutzung	Schlüssel	KLAM-Klasse
Gebäude (allgemein)	1001	1
Wohn-oder öffentliches Gebäude (allgemein)	1003	1
Wirtschafts-oder Industriegebäude (allgemein)	1004	5
Unterirdisches Gebäude	1005	8
Kleines, untergeordnetes Gebäude	1006	1
öffentliches Gebäude (allgemein)	1101	1
Rathaus	1112	1
Postamt	1113	1
Zollamt	1114	1
Gericht	1115	1
öffentliche Verwaltung (allgemein)	1118	1
Allgemeinbildende Schule	1121	1
Berufsschule, Fachschule, Volkshochschule	1122	1
Fachhochschule, Universität	1123	1
Forschungsinstitut	1124	1
Bildungs-, Forschungseinrichtung (allgemein)	1128	1
Schloss, Burg	1131	1
Theater, Oper	1132	1
Museum	1134	1
Bibliothek, Bücherei	1137	1
Kulturelle Einrichtung (allgemein)	1138	1
Christliche Kirche	1141	1
Synagoge	1142	1
Kapelle	1143	1
Gemeindehaus, Küsterei	1144	1
Gotteshaus einer anderen Religionsgemeinschaft	1145	1
Kirchliche Einrichtung (allgemein)	1148	1
Krankenhaus	1151	1
Heilanstalt, Pflegeanstalt	1152	1
Gesundheitseinrichtung (allgemein)	1158	1
Jugendfreizeitheim	1161	1
Freizeitheim, Dorfgemeinschaftshaus, Bürgerhaus	1162	1
Kindergarten, Kindertagesstätte	1165	1
Sozialeinrichtung (allgemein)	1168	1
Polizei	1171	1
Feuerwehr	1172	1
Kaserne	1173	1
Schutzbunker	1174	1
Justizvollzugsanstalt	1175	1
Sicherheitseinrichtung (allgemein)	1178	1
Trauerhalle	1181	1
Krematorium	1182	1
Friedhofsgebäude (allgemein)	1188	1
Empfangsgebäude für Verkehrsteilnehmer (allgemein)	1198	1
Wohnhaus in Reihe	1211	1
Freistehender Wohnblock	1221	1
Wohnblock in geschlossener Bauweise	1231	1
Wohnhaus (allgemein)	1301	1
Einzelhaus	1311	2
Doppelhaus	1321	2
Reihenhaus	1331	2

Gruppenhaus	1341	1
Hochhaus	1361	1
Kinderheim	1371	1
Seniorenwohnhaus, Seniorenheim	1372	1
Arbeitnehmerwohnheim, Schwesternwohnheim	1373	1
Studentenwohnheim, Schülerwohnheim	1374	1
Wohnheim (allgemein)	1378	1
Behelfsmäßiges Wohngebäude	1381	1
Wohngebäude	1399	1
Gebäude für Handel und Dienstleistungen (allgemein)	1401	1
Verwaltungsgebäude, Bürogebäude	1411	1
Kreditinstitutsgebäude, Bankgebäude	1421	1
Versicherungsgebäude	1431	1
Kaufhaus	1441	1
Einkaufszentrum	1442	1
Ladengebäude	1444	1
Kiosk	1445	1
Handel (allgemein)	1448	1
Gebäude für Messe, Ausstellung	1451	1
Hotel, Pension	1461	1
Beherbergung (allgemein)	1468	1
Gaststätte	1471	1
Kantine	1474	1
Restauration (allgemein)	1478	1
Festsaal	1481	1
Kino	1482	1
Kegelhalle, Bowlinghalle	1483	1
Spielkasino	1484	1
Gebäude für Gewerbe und Industrie (allgemein)	1701	2
Fabrik	1711	2
Werkstatt	1721	2
Tankstelle	1731	2
Kühlhaus	1741	2
Speicher	1742	2
Lagerhalle	1743	2
Lagerung (allgemein)	1748	2
Transportgebäude	1751	2
Forschungsgebäude	1761	2
Betriebliche Sozialeinrichtung (Gebäude)	1781	1
Wassermühle, Schöpfwerk	1913	1
Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnungen	2101	1
Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	2121	1
Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	2131	1
öffentliches Gebäude mit Wohnungen	2141	1
Gebäude für Verkehr (allgemein)	2301	1
Straßenmeisterei	2311	1
Wartehalle	2312	1
Fahrzeughalle	2313	1
Straßenverkehrsgebäude (allgemein)	2318	1
Bahnwärterhaus	2321	1
Lokschuppen, Wagenhalle	2322	1
Stellwerk, Blockstellengebäude	2323	1
Schienenverkehrsgebäude (allgemein)	2328	1
Gebäude für Seilbahn (allgemein)	2358	1
Parkhaus	2361	1
Parkdeck	2362	1

Tiefgarage	2363	1
Sammelgarage	2364	1
Doppelgarage	2365	1
Einzelgarage	2366	1
überdachter Stellplatz	2367	1
Gebäude für Parken (allgemein)	2368	1
Gebäude für Versorgung (allgemein)	2501	1
Wasserwerk	2511	1
Pumpwerk	2512	1
Wasserbehälter	2515	1
Gebäude für Wasserversorgung	2518	1
Elektrizitätswerk	2521	2
Umspannwerk	2522	2
Umformer	2523	2
Gebäude für Elektrizitätsversorgung (allgemein)	2528	1
Sendeturm, Fernmeldeturm	2541	1
Gebäude für Funk-und Fernmeldewesen (allgemein)	2548	1
Öltank	2551	2
Gaswerk	2571	2
Heizwerk	2581	2
Pumpwerk (nicht für Wasserversorgung)	2591	1
Gebäude für Entsorgung (allgemein)	2601	2
Kläranlage	2611	2
Bedürfnisanstalt	2612	1
Abwasserbeseitigung	2619	1
Abfall (Lagergebäude)	2621	2
Abfallverbrennungsanlage	2622	1
Betriebsgebäude einer Abfalldéponie	2623	1
Gebäude für Abfallbeseitigung (allgemein)	2628	1
Gebäude für Land-und Forstwirtschaft (allgemein)	2701	1
Landwirtschaftliches Wohngebäude	2711	1
Scheune	2721	2
Schuppen	2723	2
Stall	2724	2
Futtersilo	2725	2
Scheune und Stall	2726	2
Gebäude für Tiergroßhaltung	2727	2
Landwirtschaftliches Betriebsgebäude (allgemein)	2728	1
Landwirtschaftliches Wohn-und Betriebsgebäude	2731	1
Forsthaus	2736	1
Landwirtschaftliches Wohn-und Betriebsgebäude (allgem.)	2738	1
Gewächshaus, Treibhaus	2741	1
Gewächshaus (allgemein)	2748	1
Gebäude für Erholung (allgemein)	2801	1
Sporthalle	2811	1
Sportplatzgebäude	2812	1
Gebäude für Sport (allgemein)	2818	1
Hallenbad	2821	1

Tab. A 2: Umsetzung der ALKIS Flächendaten in KLAM_21 Klassen

Nutzung	Schlüssel	KLAM
Gebäude-und Freifläche -öffentliche Zwecke	1100	8
Verwaltung	1110	8
Bildung und Forschung	1120	8
Kultur	1130	8

Kirche	1140	8
Gesundheit	1150	8
Soziales	1160	8
Sicherheit und Ordnung	1170	8
Friedhof	1180	6
Andere öffentliche Einrichtung	1190	4
Wohnhaus in Reihe	1210	4
Freistehender Wohnblock	1220	4
Wohnblock in geschlossener Bauweise	1230	4
Gebäude und Freifläche -Wohnen	1300	4
Einzelhaus	1310	7
Doppelhaus	1320	7
Reihenhaus	1330	7
Gruppenhaus	1340	4
Hochhaus	1360	4
Andere Wohnanlage	1390	4
Gebäude-und Freifläche -Handel und Dienstleistungen	1400	8
Verwaltung, freie Berufe	1410	8
Bank, Kredit	1420	8
Versicherung	1430	8
Handel	1440	8
Messe, Ausstellung	1450	8
Beherbergung	1460	8
Restauration	1470	4
Vergnügung	1480	4
Gebäude-und Freifläche -Gewerbe und Industrie	1700	8
Produktion	1710	8
Handwerk	1720	8
Tankstelle	1730	8
Lagerung	1740	8
Transport	1750	8
Forschung	1760	8
Gebäude-und Freifläche, Mischnutzung mit Wohnen	2100	8
Wohnen mit Handel und Dienstleistungen	2120	4
Wohnen mit Gewerbe und Industrie	2130	4
öffentlich mit Wohnen	2140	4
Andere Mischnutzung mit Wohnen	2190	4
Gebäude-und Freifläche zu Verkehrsanlagen	2300	8
Straße	2310	8
Schiene	2320	4
Parken	2360	8
Parken, öffentlich zugänglich	2370	8
Parken, privat	2380	8
Gebäude-und Freifläche zu Versorgungsanlagen	2500	8
Wasser	2510	8
Elektrizität	2520	8
Funk-und Fernmeldewesen	2540	8
Gas	2570	8
Wärme	2580	8
Gebäude-und Freifläche zu Entsorgungsanlagen	2600	8
Abwasserbeseitigung	2610	8
Abfallbeseitigung	2620	8
Gebäude-und Freifläche -Land-und Forstwirtschaft	2700	4
Wohnen	2710	4
Betrieb	2720	8
Wohnen und Betrieb	2730	4

Gewächshaus	2740	4
Andere Einrichtung der Land-und Forstwirtschaft	2790	4
Gebäude-und Freifläche -Erholung	2800	4
Sport	2810	4
Bad	2820	4
Kur	2840	4
Camping	2850	7
Wochenendhaus	2860	7
Zoologie	2870	7
Gebäude-und Freifläche, ungenutzt	2900	4
Bauplatz	2910	7
Fläche mit ungenutztem Gebäude	2920	4
Andere Freifläche	2990	4
Betriebsfläche Abbauand	3100	7
Gestein	3140	4
Betriebsfläche Halde	3200	7
Erde	3210	7
Schlacke	3230	4
Betriebsfläche Lagerplatz	3300	4
Baustoffe	3330	8
Schrott, Altmaterial	3340	8
Ausstellung	3350	8
Betrieb	3360	8
Betriebsfläche Versorgungsanlage	3400	8
Wasser	3410	9
Öl	3460	8
öffentlich mit Wohnen	3500	8
Abwasser	3530	4
Betriebsfläche, ungenutzt	3600	8
Erweiterung, Neuansiedlung	3610	4
Sportfläche	4100	4
Sportplatz (Ball sport)	4110	4
Golfplatz	4120	7
Reitplatz	4140	7
Schießstand	4150	7
Tennisplatz	4180	7
Grünanlage	4200	6
Park	4210	6
Spielplatz, Bolzplatz	4220	6
Zoologischer Garten	4230	6
Kleingarten	4260	6
Garten	4280	6
Campingplatz	4300	6
Straße	5100	8
Straße, Fußgängerzone	5130	8
Weg	5200	8
Fahrweg	5210	4
Fußweg	5220	4
Fuß-und Radweg	5250	4
Platz	5300	8
Parkplatz	5310	8
Rastplatz	5320	8
Marktplatz	5330	8
Mehrzweckplatz	5340	8
Bahngelände	5400	4
Eisenbahn	5410	4

Landeplatz	5520	4
Verkehrsfläche, ungenutzt	5800	8
Verkehrsbegleitfläche an Straße	5910	8
Verkehrsbegleitfläche an Bahngelände	5920	8
Ackerland, allgemein	6100	7
Ackerland	6110	7
Streuobstacker	6120	7
Grünland, allgemein	6200	7
Grünland	6210	7
Streuobstwiese	6220	6
Gartenland, allgemein	6300	6
Gartenland	6310	6
Baumschule	6320	6
Heide	6600	6
Obstanbaufläche	6700	6
Obstbaumanlage	6710	6
Landwirtschaftliche Betriebsfläche	6800	4
Laubwald	7100	3
Nadelwald	7200	3
Mischwald	7300	3
Gehölz	7400	3
Fluss, allgemein	8100	9
Bach	8400	9
Graben	8500	9
Natürlicher See	8610	9
Stausee	8620	9
Speicherbecken	8640	9
Teich, Weiher	8800	9
Sumpf	8900	9
Verkehrsübungsplatz	9110	8
Dressurplatz	9120	4
TP (Marksteinschutzfläche)	9220	4
Rückhaltebecken	9230	7
Historische Anlage	9300	4
Denkmal	9330	4
Bildstock	9340	4
Ruine	9350	4
Friedhof, allgemein	9400	6
Friedhof (Park)	9420	6
Unland	9500	7
Stillgelegtes Abbauand	9530	7

11.3 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

A	Ausstrahlung der Oberfläche
Abb.	Abbildung
a, b und c	Empirische Konstanten
A_F	Ausstrahlungsfläche
AG	Atmosphärische Gegenstrahlung
Bft	Beaufort
B_{KL}	Mittlere Breite der Kaltluft
ca.	cirka
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
D	Direkte Sonneneinstrahlung
DHM	Digitales Höhenmodell
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
dxy	Länge der Fließstrecke in horizontaler Richtung
$d\theta / dz$	Potenzieller Temperaturgradient
E	Osten
E	Strahlungsflussdichte
e	Dampfdruck
f	Relative Luftfeuchtigkeit
Fa.	Firma
Fr_d	Densimetrische Froude-Zahl
Fr_L	Längen-Froude-Zahl
g	Schwerebeschleunigung
GIS	Geographisches Informationssystem
Gl.	Gleichung
H	Himmelsstrahlung
h	Stunde
H_0	Höhe des Tales
H_{KL}	Mittlere Höhe der Kaltluft
H_s	Tatsächliche Mächtigkeit der synoptisch ungestörten Talatmosphäre
H_{VEG}	Mittlere Bestandshöhe
J	Abgegebener Strahlungsstrom der Oberfläche

K	Kelvin
Kap.	Kapitel
<i>L</i>	Halbweite der Randhöhen eines Tales
LAD	Blattflächendichte (leaf area density)
LAI	Blattflächenindex (leaf area index)
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Max.	Maximum
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
Min.	Minimum
Mit.	Mittel
MZ1	Messzeitraum 1
MZ1-S	Messzeitraum 1 - Sommer
MZ1-W	Messzeitraum 1 - Winter
MZ2	Messzeitraum 2
MZ2-S	Messzeitraum 2 - Sommer
MZ2-W	Messzeitraum 2 – Winter
<i>N</i>	Brunt-Väisälä-Frequenz
N	Norden
neg.	negativ
NO ₂	Stickstoffdioxid
O ₃	Ozon
OKG	Obere Kaltluftgrenze
<i>p</i>	Luftdruck
pers.	persönlich
PM	Feinstaub
PM10	Partikel mit einem Durchmesser <= 10μ
PM2,5	Partikel mit einem Durchmesser <= 2,5μ
PM5	Partikel mit einem Durchmesser <= 5μ
pos.	positiv
<i>Q</i>	Gesamtstrahlungsbilanz
<i>Q_{anthr}</i>	anthropogener Wärmestrom

Q_B	Bodenwärmestrom
Q_E	Latenter Wärmestrom
Q_H	Sensibler Wärmestrom,
Q_K	Kurzwellige Strahlungsbilanz
Q_{KL}	Kaltluftabflussmenge
Q_L	Langwellige Strahlungsbilanz
Q_{met}	metabolischer Wärmestrom
R	Reflexstrahlung
R^2	Bestimmtheitsmaß
Re	Reynolds-Zahl
Re_{kr}	Kritische Reynolds-Zahl
Ri	Richardson-Zahl
s	Sekunde
S	Süden
SA	Sonnenaufgang
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SO ₂	Schwefeldioxid
SU	Sonnenuntergang
T	Temperatur
t	Zeit
Tab.	Tabelle
T_B	Temperatur in Bodennähe
T_{KL}	Temperatur der Kaltluft
T_{min}	Temperaturminimum
T_r	Temperatur der Luft in ländlicher Umgebung
T_U	Umgebungslufttemperatur der Kaltluft
T_u	Temperatur der städtischen Luft
u	Windgeschwindigkeit
ü. Gr.	über Grund
UHI	Urban heat island (Städtische Wärmeinsel)
ü. NN	über Normal Null
u_{KL}	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Kaltluft
ν	Mittlere kinematische Zähigkeit der Kaltluft

v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
V_{KL}	Kaltluftvolumen
v_s	Mittlere Windgeschwindigkeit der synoptischen Strömung über dem Tal
VS1 (2,3,4)	Vegetationsstruktur 1 (2,3,4)
Vt_{KL}	Volumenstromdichte der Kaltluft
W	Westen
x_{KL}	Zurückgelegte Fließstrecke der Kaltluft
\bar{x}	Mittelwert
z	Höhe über Grund
z.B.	zum Beispiel
z_0	aerodynamische Rauigkeitslänge
z_h	Strecke
z_{NN}	Höhe über Normal Null
$\frac{\Delta T}{\Delta t}$	Abkühlung eines Kaltluftpaketes während des Fließvorganges
Φ_{KL}	Fließrichtung der Kaltluft
Ψ_s	Sky-view-factor / Himmelsicht
α_{ST}	Wärmeübergangskoeffizient
$ r $	Korrelationseffizient
ΔT_R	Abkühlungsbetrag der Luft durch Strahlung
Δt_Q	Dauer der negativen Strahlungsbilanz
Δt_Q	Dauer der negativen Strahlungsbilanz
Δt_{SU}	Zeitdifferenz zum Sonnenuntergang
ΔT	Wärmeinselintensität
°C	Grad Celsius
Φ	Windrichtung
Φ_{VEG}	Kronendurchmesser
α	Neigung der Fläche
ε	Emissionsgrad der Oberfläche
θ	Potenzielle Temperatur
μ	Reibungskonstante
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante

12. Veröffentlichungen

Im Folgenden findet sich eine Liste mit Veröffentlichungen, die im Laufe der Dissertation entstanden sind und deren Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden. Erfolgte eine Übernahme von Inhalten wurde dies an entsprechender Stelle kenntlich gemacht.

Publikationen

- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., MERBITZ, H., SCHNEIDER, C. (2010): Innerstädtische Temperaturverteilung in Aachen; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.); Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 61-69.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010): Urban temperature distribution and detection of influencing factors in urban structure; 17th Conference International Seminar on Urban Form "Formation and Persistence of Townscape"; Hamburg; S. 24.
- BUTTSTÄDT, M., T. SACHSEN, G. KETZLER, H. MERBITZ, C. SCHNEIDER (2011): A new approach for highly resolved air temperature measurements in cities. Atmospheric Measurement Techniques Discussion; 4; S. 1001-1019.
- KETZLER, G., EBER, K., SACHSEN, T. (2010): Veränderung von Belüftungsfunktionen durch lokalen Kaltluftabfluss im Zuge historischer Stadtentwicklung - eine Modellstudie Aachen 1810-2010; In: Schneider, C., Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 77-98.
- KETZLER, G., SACHSEN, T., SCHNEIDER, C. (2012): Cold air Drainage Flow in Different Building Structures; Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.
- SACHSEN, T. (2009): Zum Einfluss von geänderter Bebauung auf das Lokalklima Aachens. Ein Vergleich innerstädtischer und randstädtischer Standorte; In: Fromhold-Eisebith, M., Gräf, P., Lehmkuhl, F., Pfaffenbach, C., Schneider, C., Wieger, A. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten, 46, S. 107-120.
- SACHSEN, T., BUTTSTÄDT, M., MERBITZ, H., PESCHEL, G., SCHNEIDER, C. (2011): City2020+: Interdisziplinäre Stadtforschung vor dem Hintergrund klimatischen und demographischen Wandels und als Entscheidungshilfe in der kommunalen Planung; In: UVP Report 25 (2+3); S. 166-171.
- SACHSEN, T., KETZLER, G., KÄSMACHER, O. (2010): Stadt- und geländeklimatologische Untersuchung in Aachen und Umgebung. - In: Schneider, C. & Ketzler, G. (Hrsg.): Aachener Geographische Arbeiten; 47; S. 39-47.
- SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2012): The reduction of urban heat stress by optimized vegetation structures; Proceedings of the 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.
- SCHNEIDER, C., BALZER, C., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., GINSKI, S., HAHMANN, J., KETZLER, G., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A., WEISHOFF-HOUBEN, M., BRUNK, M. F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K. (2011): "CITY 2020+": Assessing climate change impacts for the city of Aachen related to demographic change and health – a progress report; In: Advances in Science and Research; 6; S. 261-270.
- SCHNEIDER, C., M. F. BRUNK, W. DOTT, H. HOFMEISTER, C. PFAFFENBACH, C. ROLL, K. SELLE, K. WACHTEN, M. BUTTSTÄDT, K. EBER, J. HAHMANN, L. HÜLSMEIER, G. KETZLER, M. KLEMME, A. KRÖPELIN, H. MERBITZ, S. MICHAEL, T. SACHSEN, A. SIUDA (2010): "City 2020+" - Assessing climate and demographic change impacts for the City of Aachen; Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology Freiburg; S.491-496.

Konferenzbeiträge

- BUTTSTÄDT, M., H. MERBITZ, T. SACHSEN, G. KETZLER, C. SCHNEIDER (2011): Lufttemperatur & Feinstaub – räumliche Risikoabschätzung und Untersuchung zum Minderungspotenzial durch Kaltluftabflüsse; Geotag 2011; Aachen.
- BUTTSTÄDT, M., MERBITZ, H., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): City2020+ – Lebensqualität für die Zukunft. Demographische und klimatische Herausforderungen für die Entwicklung der Stadt; Geotag 2010; Aachen.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., KRÖPELIN, A. (2011): Heiße Zeiten in der Stadt – wie Aachen einen kühlen Kopf behält; City 2020+-Tagung "Demographische und klimatische Herausforderungen in der Stadt", Aachen.
- BUTTSTÄDT, M., SACHSEN, T., SAUTER, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010): Urban temperature development, influencing factors and associated health risks – a case study for the city of Aachen. - Adaptation and Mitigation: Responses to Climate Change; 9th International NCCR Climate Summer School; Grindelwald.
- BUTTSTÄDT, M., T. SACHSEN, G. KETZLER, C. SCHNEIDER (2010): Abschätzung gesundheitlicher Risiken durch die räumliche Verteilung thermischer Ungunstsituationen anhand GIS-gestützter Modellierung; 4. Jahrestagung der Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin (GHUP); Aachen; S. 277.
- DOTT, W., SCHNEIDER, C., BRUNK, M., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K., WACHTEN, K., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): "City2020+" – The city under global demographic and climate changes. An interdisciplinary assessment of impacts, needs and strategies; 4. Jahrestagung der Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin (GHUP); Aachen.
- KETZLER, G., SACHSEN, T., EBER, K., DUNKERT, M., SCHNEIDER, C. (2012): Effects of Suburban Valleys on Urban Air Quality – a Case Study in Climatology and Urban Planning in Past and Present; IGC Cologne 2012; Köln.
- MERBITZ, H., BUTTSTÄDT, M., KNÖRCHEN, A., SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2012): Intra-Urban Variability of Temperature and Pollutants - Results from the City2020+ and PM-Lab Project; 8th International Conference on Urban Climates; Dublin.
- SACHSEN, T., BUTTSTÄDT, M., MERBITZ, H., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010): Die räumliche Verteilung thermischer und lufthygienischer Belastungen unterschiedlicher Stadtteile am Beispiel Aachens; DACH Meteorologentagung 2010; Bonn.
- SACHSEN, T., BUTTSTÄDT, M., PESCHEL, G., SCHNEIDER, C. (2010): City2020+: Interdisziplinäre Stadtforschung vor dem Hintergrund klimatischen und demographischen Wandels und als Entscheidungshilfe in der kommunalen Planung (Flächennutzungsplan/Klimagutachten); 10. UVP-Kongress 2010; Schwäbisch Hall.
- SACHSEN, T., C. SCHNEIDER & G. KETZLER (2008): Zum Einfluss von geänderter Bebauung auf das Lokalklima Aachens - Ein Vergleich innerstädtischer (Reihstraße) und randstädtischer Standorte (Soers); 27. Jahrestreffen des AK-Klima 2008; Aachen; S. 55.
- SACHSEN, T., C. SCHNEIDER & G. KETZLER (2009): Klimawirkung von Hindernissen in Kaltluftbahnen - Projekt Kannegießerbach 2020+ - Erste Ergebnisse der Untersuchung stadtnaher Kaltluftströme in der Region Aachen; 28. Jahrestreffen des AK Klima; Hamburg; S. 50 .

- SACHSEN, T., G. KETZLER, C. SCHNEIDER (2010): Die kleinräumige Betrachtung von Kaltluftabflüssen in veränderten Vegetationsbeständen (Projekt Kannegießerbachtal 2020+); DACH Meteorologentagung 2010; Bonn.
- SACHSEN, T., KETZLER, G., SCHNEIDER, C. (2010): Optimizing suburban vegetation structures for better cold air drainage flow and maximum airquality; International Congress "Cracks in the Concrete Jungle: New Perspectives on Urban Ecology"; Berlin.
- SCHNEIDER, C., BRUNK, M. F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K., WACHTEN, K., BALZER, C., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): City2020+: The City under global demographic and climate changes, An interdisciplinary assessment of impacts, needs and strategies; Internationaler Kongress "Cracks in the Concrete Jungle: New Perspectives on Urban Ecology"; Berlin.
- SCHNEIDER, C., BRUNK, M. F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K., WACHTEN, K., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): Project City2020+ - Assessing risks, challenges and opportunities for the City of Aachen resulting from demographic and climate change; Conference on the Occasion of the 200th Anniversary of the Humboldt-Universität zu Berlin "Continents under Climate Change"; Berlin.
- SCHNEIDER, C., BRUNK, M.F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SELLE, K., WACHTEN, K., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., KLEMME, M., KRÖPELIN, A., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., SIUDA, A. (2010): "City 2020+" - Assessing Risks, Challenges and Opportunities for the City of Aachen Resulting from Demographic and Climate Change; PIK Report No. 115; Berlin.
- SCHNEIDER, C., M. BRUNK, W. DOTT, C. PFAFFENBACH, C. ROLL, K. SELLE, K. WACHTEN, M. BUTTSTÄDT, K. ESSER, J. HAHMANN, M. KLEMME, A. KRÖPELIN, H. MERBITZ, S. MICHAEL, T. SACHSEN & A. SIUDA (2009): City 2020+ - an assessment of risks, challenges and opportunities for the City of Aachen resulting from demographic and climate change; 28. Jahrestreffen des AK-Klima 2009; Hamburg.
- SIUDA, A., GINSKI, S., KRÖPELIN, A., BUTTSTÄDT, M., EBER, K., HAHMANN, J., MERBITZ, H., MICHAEL, S., SACHSEN, T., BRUNK, M.F., DOTT, W., HOFMEISTER, H., PFAFFENBACH, C., ROLL, C., SCHNEIDER, C., SELLE, K. (2012): City2020+ - The City under Global Demographic and Climate Challenges: An Interdisciplinary Assessment of Impacts, Needs, and Strategies; IGC Cologne 2012; Köln.



Abb. 133: Station JH im jahreszeitlichen Wechsel