

Im Auftrag des Magistrates der Landeshauptstadt Linz
Amt für Natur- und Umweltschutz

ERICH MURSCH-RADLGRUBER

WÄRMEINSEL LINZ UND BELÜFTUNGSRELEVANTE STRÖMUNGSSYSTEME

(89 Abbildungen, 14 Tabellen)

Manuskript eingelangt im Dezember 1999

Anschrift der Verfasser:

Institut für Meteorologie und Physik
Universität für Bodenkultur
Türkenschanzstr. 18
A-1180 Wien

Projektleiter

Ao. Univ.Prof. Dr. Erich MURSCH-RADLGRUBER

Sachbearbeiter:

Mag. Bettina LANGER
Dipl.-Ing. Mag. Wolfgang GEPP
Dr. Thara PRABA
Mag. Gregori STANZER

Messtechnik

Dipl.-Ing. Georg MURSCH-RADLGRUBER
Meteo Science, Brodschildstr. 31, 2000 Stockerau

HEAT ISLAND LINZ AND VENTILATION RELEVANT FLOWSYSTEMS

SUMMARY

The urban heat island and flow systems as a consequence of the urban structure and surrounding terrain are important factors for ventilation of cities. Based on more than 10 years of data from the environmental measurement network of the city of Linz, as well as intensive measurement periods with addition special measurements – vertical sounding with tethered balloons, mini SODAR, mobile temperature traces with cars and train, the spatial structure of the urban boundary layer was analysed. Ventilation relevant flow systems were simulated for cases with high immission concentration by use of a diagnostic flow field model and an 'Eulerian' transport and diffusion model. Special attention was given to the 'Haselgraben' wind as a source of ventilation for the city. As a consequence of the terrain structure the 'Haselgraben' wind has a very unusual behavior with high wind speed during the first half of the night, but with nearly no flow and therefor no relevant ventilation during the second half of the night. During the morning hours long periods of calm wind condition with thermal mixing from the surface are important processes leading to high immission concentration in the urban structure. Since solar radiation is a major forcing for many processes, specially the morning mixing of the boundary layer and the simultaneous slow drift of pollution loaded air mass toward the south facing slopes are important for high concentration levels. A major result of the studies are three maps with schematics with zones of relevant ventilating processes.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	143
2	Das Untersuchungsgebiet	145
2.1	Einleitung	145
2.2	Die Topographie	145
2.3	Strömungsklimatologie	146
2.3.1	Die Daten	146
2.3.1.1	Bestimmung der Stabilität	146
2.3.1.2	Kalmen	147
2.3.2	Klimatologie des mittleren Windes	148
2.3.2.1	Wechselwirkungen mit synoptischen Strömungen	149
2.3.2.2	Einfluss der Topographie	150
2.3.2.3	Einfluss der Stabilität	151
2.3.2.4	Tagesgang der Windrichtung	153
2.3.3	Die Verteilung von SO_2	157
2.4	Modellrechnungen	160
2.4.1	Überblick	160
2.4.2	Die Daten	161
2.4.3	Das Modellkonzept	161
2.4.4	Ergebnisse	162
2.4.4.1	Gradientenschwache Wetterlage	162
2.4.4.2	Einfluss einer Kaltfront	166
2.4.4.3	Östliche Strömungslage	169
2.4.4.4	Nordwestliche Strömungslage	169
2.5	Zusammenfassung	169
3	Die Wärmeinsel	170
3.1	Einleitung	170
3.2	Zur Theorie der städtischen Wärmeinsel	171
3.3	Beschreibung der Messverfahren	171
3.4	Überprüfung der Existenz einer Wärmeinsel in Linz	173
3.5	Die Intensität der städtischen Wärmeinsel im Tagesgang	177
3.6	Die Linzer Wärmeinsel im Profil	183
3.7	Entstehung und Abklingen der städtischen Wärmeinsel im Zeitverlauf	187
3.8	Verknüpfung Temperaturverteilung – Bebauungsstruktur	190
4	Kaltluftströmungen	199
4.1	Einleitung	199
4.2	Die Topographie des Haselgrabens	200
4.3	Zur Theorie der lokalen Strömungen	201
4.4	Die Messungen	201
4.5	Die vertikale Struktur der Haselgrabenströmung	202
4.6	Die zeitliche Struktur der Haselgrabenströmung	206
4.7	Die horizontale Struktur der Haselgrabenströmung	210
4.8	Weitere Aspekte des Haselgrabenwindes	214
4.9	Hypothesen zum Haselgrabenwind	217
5	Weitere Messungen und Analysen	220
5.1	Einleitung	220
5.2	Kontinuierliche Vertikalsondierungen	220
5.3	Wind- und Temperaturmessungen in der Bebauung	223
5.4	Katzbach	227
5.5	Messfahrten	228
6	Strahlung	229

6.1	Einleitung	229
6.2	Die Albedo unterschiedlicher Oberflächen	229
6.3	Die flächenhafte Verteilung der Albedo im Großraum Linz	231
6.4	Die Sonnenscheindauer	233
6.5	Die Globalstrahlung	234
6.6	Die kurzwellige Strahlungsbilanz	237
6.7	Die Bedeutung der relativen Sonnenscheindauer	241
6.8	Die Bedeutung der Transmission bei unterschiedlicher Bewölkung	241
6.9	Die Bedeutung des zirkumsolaren Koeffizienten	243
6.10	Vergleich mit Messungen verschiedener Strahlungsgrößen	243
6.10.1	Bewölkung	243
6.10.2	Die Globalstrahlung in Linz	246
7	Folgerungen und Planungshinweise	248
7.1	Kriterien für die Belüftung	248
7.2	Einteilung der Strömungssituationen	250
7.3	Betrachtung der planungsrelevanten Situation	251
8	Literatur	256

1 EINLEITUNG

Die Lage der oberösterreichischen Landeshauptstadt Linz in topographisch komplexem Gelände (Abb. 1) und die Vielzahl der daraus resultierenden Einflüsse auf die Strömungssituation machen eine Beurteilung der Belüftungssituation des Stadtgebietes zu einer anspruchsvollen Fragestellung. Wie sich schon in vorangegangenen Studien gezeigt hat, sind nicht jede Wetterlage und die damit verbundenen Strömungsmuster in gleichem Maße dazu geeignet, hohe Schadstoffkonzentrationen in Teilen der Stadt zu generieren. Es zeigt sich vielmehr, wie zu Beginn dieses Berichtes noch einmal dargestellt werden wird, dass nur bestimmte Situationen zu hohen Immissionen in gewissen Bereichen führen.

In diesen Fällen werden kleinräumige, lokale Phänomene vorherrschend, die die Strömungsmuster in den kritischen Situationen bestimmen und somit auf die Verteilung der Schadstoffe im Stadtgebiet und durch die Belüftung einzelner Stadtteile auf die Immissionsbelastung und die Verdünnung der Schadstoffe Einfluss nehmen. Zu diesen Phänomenen zählen vor allem die durch die städtische Wärmeinsel verursachten

Flurwinde und nächtliche Kaltluftströmungen wie Hangabwinde oder Talauswinde.

Um die wesentlichen Faktoren erfassen zu können, war eine Reihe von eigenständigen Untersuchungen notwendig, deren Ergebnisse sich zu einem Gesamtbild für das Verständnis der meteorologischen Vorgänge zusammensetzen lassen. Die behandelten Themen reichten von einer genauen Vermessung und Analyse der städtischen Wärmeinsel bis zur Betrachtung der eindrucksvollsten thermisch induzierten Strömung, die im Linzer Becken zu verzeichnen ist, des Haselgrabenwindes.

Im Zuge der Bearbeitung der einzelnen Teile musste neben der Analyse der Daten der bestehenden Messstellen des Landes Oberösterreich im Linzer Stadtgebiet - sie wurden uns für diese Studie zur Verfügung gestellt - eine Vielzahl von eigens betriebenen Messungen vorgenommen werden. Die genauen Beschreibungen aller Messungen werden bei der Besprechung der jeweiligen Teilgebiete geliefert. Natürlich finden bei den Analysen auch die bereits vorhandenen Ergebnisse aus vorangegangenen Studien Eingang.

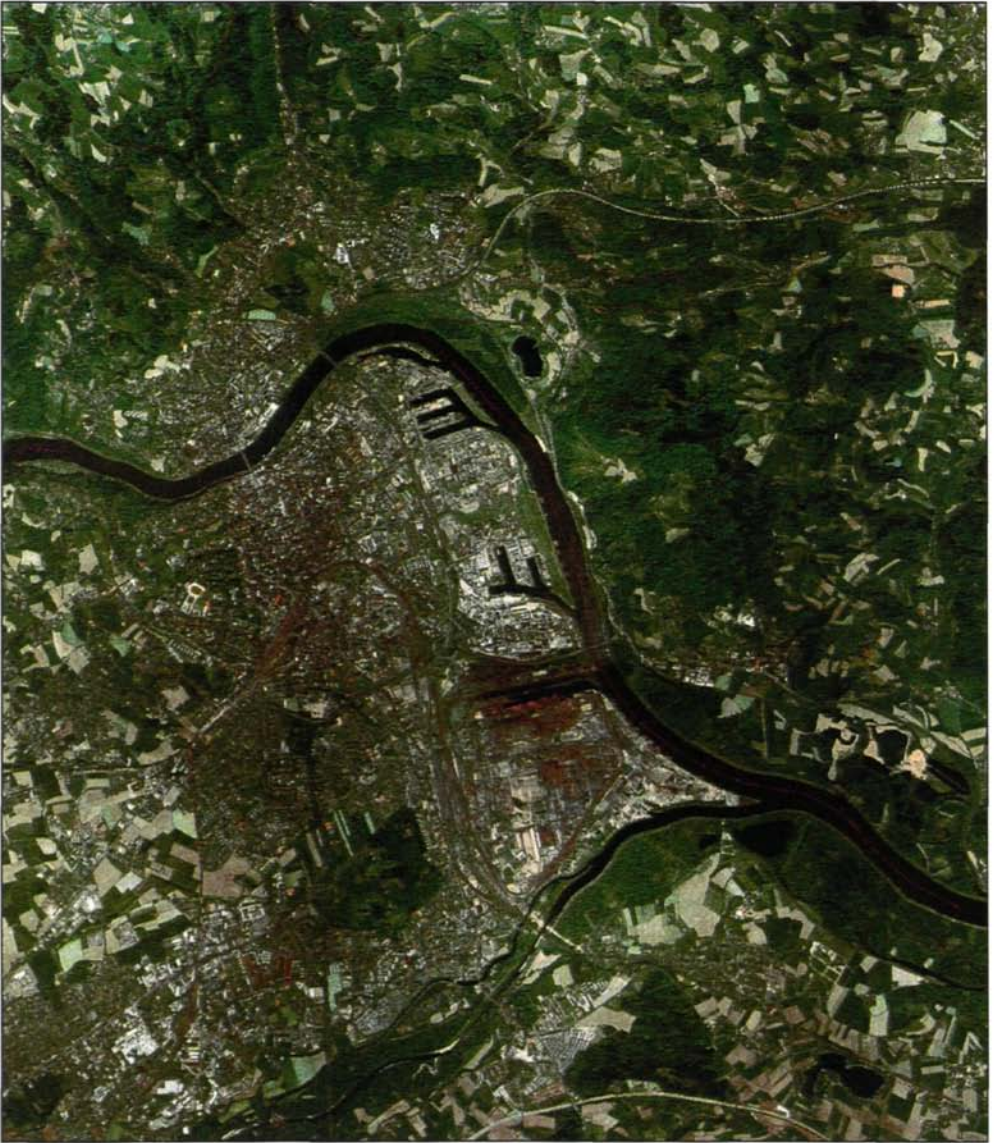


Abb. 1: Lage der Stadt Linz im Linzer Becken (Orthofoto Linz)

In der abschließenden Zusammenfassung der Ergebnisse soll versucht werden, ein Gesamtbild zu konstruieren. Dieses soll helfen, die gefundenen Resultate einerseits für die Stadtplanung zugänglich zu machen und Planungshinweise zu geben, andererseits aber auch den zukünftigen Forschungsbedarf zu markieren. Die

Ergebnisse werden den Verantwortlichen auch in Form einer graphischen Darstellung zugänglich gemacht. Es werden darin Gebiete ausgewiesen, in denen sich Neubauten oder Änderungen der Flächenwidmung unter Umständen nachteilig auf die Schadstoffbelastung im Stadtgebiet auswirken würden.

durchbruch sind in diesem Zusammenhang zu nennen. Während der Graben des Dießenleitenbaches schon etwa zwei Kilometer von seiner Einmündung entfernt beginnt, sich im Hinterland zu verlieren, ist der Haselgraben jedenfalls bis zur Ortschaft Hellmonsödt, die gut vierzehn Kilometer nördlich des Linzer Stadtzentrums liegt, erkennbar. Der Haselgraben ist nach dem Donaudurchbruch, die auffälligste Einkerbung im die Stadt umgebenden Relief.

2.3 Strömungsklimatologie

Dieser Abschnitt basiert im Wesentlichen auf den Darstellungen in der Dissertation von PRABHA (1996), die der Klimauntersuchung Linz - Basisstudie beiliegt und der auch die strömungsklimatologischen Aussagen der Basisstudie entnommen sind.

Für die Strömungsklimatologie des Linzer Raumes wurden die Daten der Landesmessstellen des gesamten Jahres 1991 analysiert. Da die wesentlichen Merkmale der Strömungen in den Jahren 1991 und 1993 ähnlich waren, die Daten aus 1991 aber vollständig verfügbar waren, wurden diese für die Analyse gewählt. Zu Beginn wird durch Vergleich von vier möglichen Methoden eine zur Beschreibung der Stabilität eingeführt. Damit sollen die mittleren Strömungsmuster bei unterschiedlichen Stabilitätsverhältnissen beschrieben werden. Auch die Wechselwirkung zwischen der großräumigen Strömung und den lokalen Windsystemen und die Rolle der Wärmeinsel des Linzer Stadtgebietes bei der Induzierung lokaler Strömungen sollen näher betrachtet werden. Dabei ist der Beitrag dieser Strömungen zu den Episoden hoher Luftverschmutzung von besonderem Interesse. Abschließend soll eine Klassifikation der Strömungsmuster hinsichtlich des Temperaturprofils über der Stadt vorgenommen werden.

2.3.1 Die Daten

Da die Messstationen des Landes Oberösterreich das Linzer Stadtgebiet räumlich gut

abdecken, können die Daten herangezogen werden, um Stadtteile zu definieren, die von Faktoren wie Geländeform, lokale Rauigkeit und anderen beeinflusst werden. Weiters ist es wichtig, die Wirkung der thermischen und dynamischen Effekte zu kennen, die für die Verteilung der Schadstoffe im Stadtgebiet und für deren Transport aus der Stadt verantwortlich sind. Die thermisch angetriebenen Strömungen belüften Teile des Stadtgebietes, die Reibung, die durch die Rauigkeit der Oberfläche im städtischen Bereich infolge der Bebauung auftritt, wirkt dem entgegen.

2.3.1.1 Bestimmung der Stabilität

Die Werte in Tabelle 1 dienen als Basis für die Klassifizierung der Schichtung der Atmosphäre in stabil, neutral und labil. Die Stabilitätsklassen 2 und 3 aus der Tabelle gelten als labil, 4 und 5 als neutral, die Klassen 6 und 7 kennzeichnen die stabilen Fälle.

Tab. 1: Stabilitätsklassen (Prabha 1996)

Stability	Stability Class	Value of Monin-Obukhov length
Unstable	2	-200 < L < 0
Slightly Unstable	3	-1000 < L < -200
Neutral	4	-1000 < L
Slightly Stable	5	L > 1000
Medium Stable	6	200 < L < 1000
Strongly Stable	7	0 < L < 200

Die Stabilitätsklassen für das ganze Jahr wurden unter Verwendung der Nettostrahlung und der Windgeschwindigkeit an der Station Berufsschulzentrum berechnet. Der Prozentsatz des Vorkommens der verschiedenen Stabilitätsklassen im Tagesverlauf ist in Abbildung 2 dargestellt. In der Mittagszeit waren 60 % der Fälle stark stabil, 20 % leicht instabil und 20 % neutral. Die Übergangszeiten werden von neutralen (60 %) und leicht oder mäßig stabilen Fällen bestimmt. In der Nacht treten zu etwa 58 % stabile Fälle auf, gefolgt von leicht oder mäßig stabilen Fällen zu 20 %.

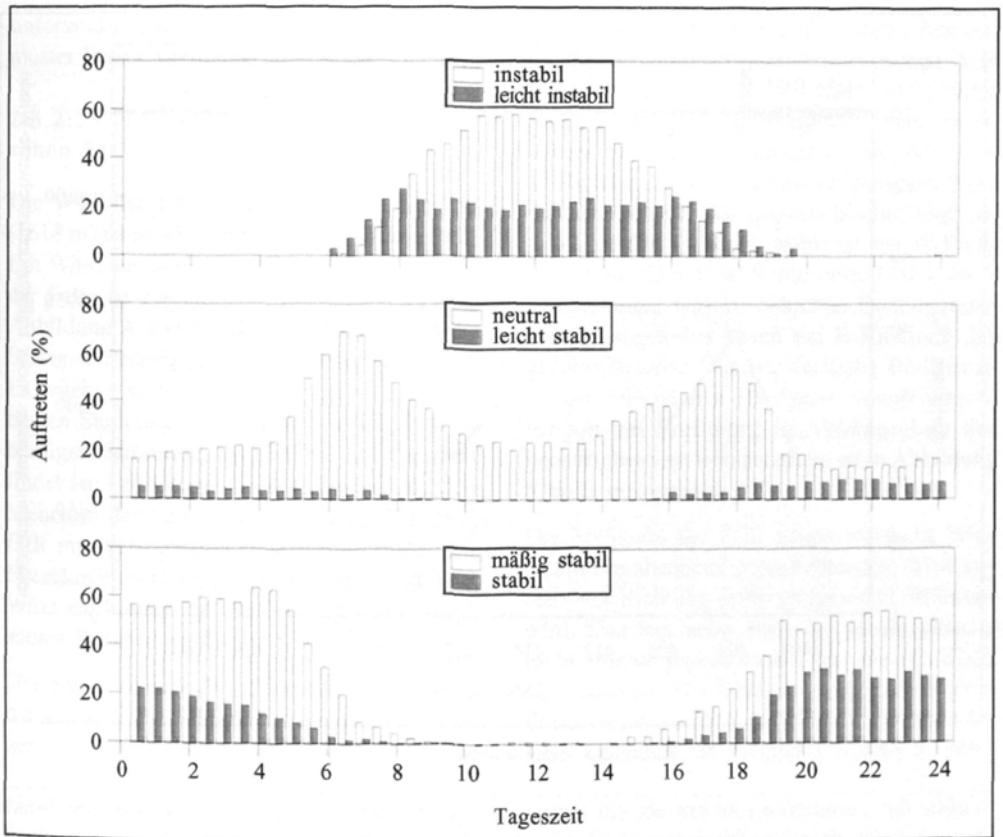


Abb. 2: Tagesgang der Häufigkeitsverteilung verschiedener Stabilitätsklassen

2.3.1.2 Kalmen

Die Gesamtzahl der verfügbaren Windinformationen für jede Station ist in Abbildung 3 eingetragen. Ebenso ist die Anzahl der Kalmen (Windgeschwindigkeit $< 0,5 \text{ m/s}$) an den einzelnen Stationen verzeichnet. Das gibt Aufschluss über den Stadteffekt in verschiedenen Stadtteilen. Die höchste Kalmenrate weist mit etwa 40 % die Station Traun auf, rund 38 % Kalmen wurden in Kleinmünchen und beim ORF-Zentrum beobachtet; die hangnahen Stationen zeigen verhältnismäßig wenige Kalmen im Vergleich zu Traun oder Kleinmünchen. Das kann auf die Instabilität infolge des Kaltluftabflusses von den Hängen zurückgeführt werden. Am 24er-Turm treten wegen des Haselgrabenwindes weniger Kalmen auf (ca. 20 %), an der Station Hauserhof

wegen ihrer Lage in 40 m Höhe. Die Station Steyregg befindet sich ebenfalls in exponierter Lage, steht unter Einfluss der Topographie und zeigt daher ebenfalls weniger Kalmen.

Der Prozentsatz der Kalmen bei verschiedenen Stabilitätsverhältnissen kann auch aus Abbildung 3 entnommen werden. An allen Stationen ergab sich die höchste Kalmenrate in stabilen Situationen, also meistens nachts. An den innerstädtischen Stationen überstieg die Kalmenhäufigkeit in den stabilen Fällen die 60 %-Marke. Etwa 20-30 % der Kalmen traten während neutraler Situationen auf. Bei instabilen Verhältnissen waren nur noch 10-15 % Kalmen festzustellen.

Kalmen bei stabiler Schichtung weisen auf negativen Wärmefluss ohne Scherung hin. Die

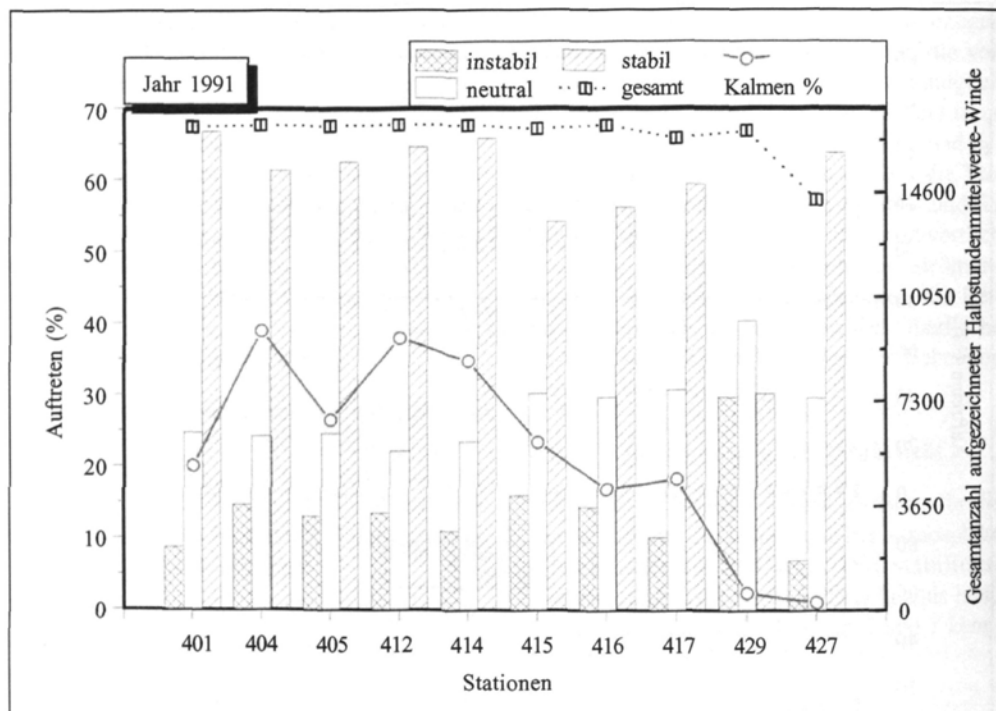


Abb. 3: Relative Häufigkeit des Auftretens von Kalmen

Größe der Turbulenzen nimmt ab, ein Impulstransport von oben und Dissipation finden statt. Die Strömung in Bodennähe ist laminar, was den Transport von oben verhindert. Schwerkwellen formieren sich, die die Flüsse von Impuls, Wärme und Schadstoffen abtransportieren. In den instabilen Fällen hingegen tritt positiver Wärmefluss ohne Scherung bei freier Konvektion auf. Die großskaligen konvektiven Bewegungen bewirken horizontale Strömungen. Unter diesen Bedingungen können die Schwankungen der Windrichtung groß sein, stärkere horizontale Dispersion und ein Mäandrieren der Strömung sind die Folge. Daher tragen die in größeren Höhen freigesetzten Schadstoffe auch zu einer Belastung der bodennahen Schicht bei.

Die Daten sind repräsentativ für die verschiedenen Strukturen innerhalb des Stadtgebietes und die Rolle der geländeinduzierten Strömungen bei der Belüftung der Stadt wird evident. Die Bildung einer Wärmeinsel wird qualitativ

gezeigt, da die Anzahl der Kalmen eine direkte Funktion geringer Belüftung bestimmter Stadtteile ist. Die Kaltluftflüsse spielen eine wichtige Rolle in der Belüftung der hangnahen Bereiche, da sie die Kalmenhäufigkeit herabsetzen. Fälle mit geringer Windgeschwindigkeit machen zudem die Anwendung der Grenzschichttheorien schwierig, da diese für Fälle mit zumindest mäßigen Windgeschwindigkeiten entwickelt wurden.

2.3.2 Klimatologie des mittleren Windes

Die Analyse erfolgt zunächst in Hinblick auf die synoptischen Strömungen; die topographischen Einflüsse werden anschließend betrachtet. Die Berücksichtigung des Tagesganges der Windrichtung hilft, die Ursprünge der thermisch induzierten Windsysteme in und um Linz zu identifizieren. Die Wechselwirkungen zwischen den lokalen und den synoptischen Strömungen wird bei verschiedenen Schichtungen

untersucht, um die komplexen Strömungsmuster besser verstehen zu können.

2.3.2.1 Wechselwirkungen mit synoptischen Strömungen

Die Windrose für die Bergstation Feuerkogel (1618 m) ist in Abbildung 203 links dargestellt. Ein Wind aus NNW bis W ist in der Mehrzahl der Fälle zu verzeichnen. Im rechten Teil der Abbildung 4 werden die Windrichtungen der Stationen Feuerkogel und Freinberg verglichen. Es ergeben sich vier Strömungstypen. Der an beiden Stationen auftretende NW-Wind ist die häufigste Strömung, der E-Wind am Freinberg findet am Feuerkogel keine Entsprechung. Die Mehrzahl der Fälle mit E-Wind am Freinberg fällt mit verschiedenen Windrichtungen am Feuerkogel zusammen. Entgegengesetzter W-Wind am Feuerkogel ist jedenfalls ein interessantes Strömungsmuster.

Der geostrophische Wind wurde unter Verwendung von Luftdruckinformationen verschiedener synoptischer Stationen berechnet, um die

Wechselwirkungen zwischen synoptischen und lokalen Strömungsmustern festzumachen. Acht Werte pro Tag waren vorhanden. Sie wurden linear interpoliert, um stündliche Werte zu erhalten. Ein Vorherrschen der E- bis ENE- bzw. W-Richtungen war beim geostrophischen Wind festzustellen. Da der geostrophische Wind parallel zu den Isobaren weht, ist bei W-Richtung hoher Druck im S und tiefer Druck im N anzunehmen, was zu östlichen Bodenwinden führt. Umgekehrt treten bei E-Richtung des geostrophischen Windes westliche Bodenwinde auf. Die relative Häufigkeit von Windrichtungen am Freinberg in Abhängigkeit der geostrophischen Windrichtung ist in Abbildung 5 links eingetragen.

Die Mehrzahl der Fälle zeigte westliche Winde am Freinberg bei geostrophischem Wind aus östlicher Richtung (entgegengesetzte Strömungen). Das legt nahe, dass der geostrophische nicht immer repräsentativ für das Windfeld über Linz ist. Die häufigen entgegengesetzten Winde unterstreichen auch die Wichtigkeit lokaler Einflüsse.

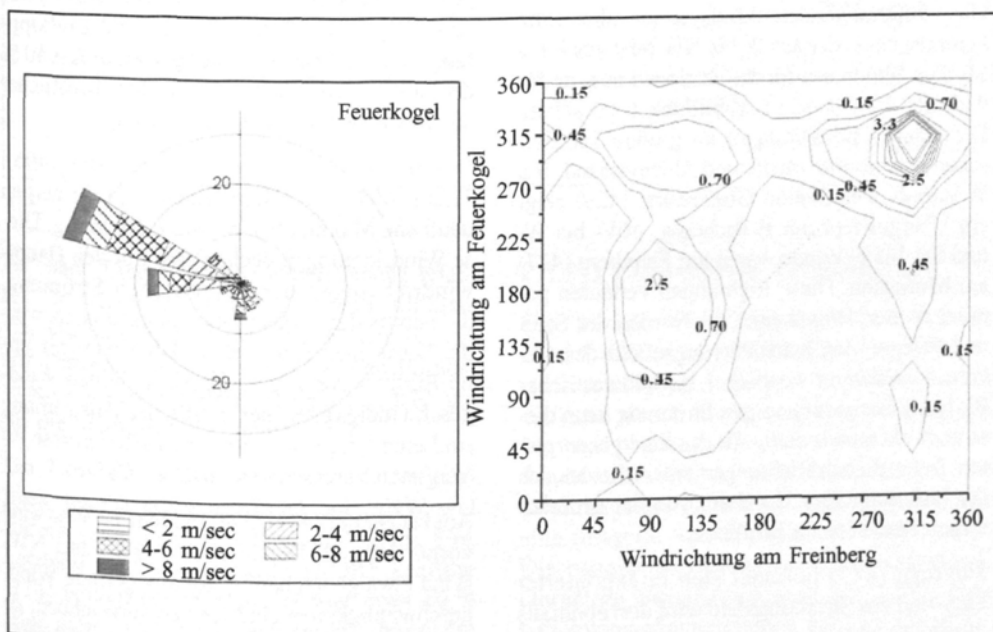


Abb. 4: Windrose Feuerkogel (links) und Vergleich der Windrichtungen von Feuerkogel und Freinberg (rechts)

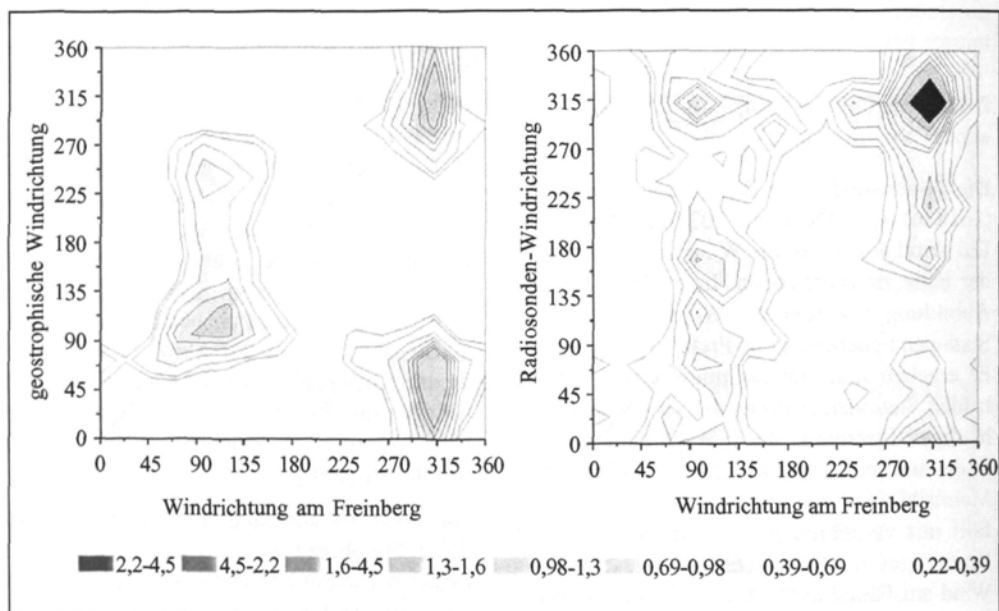


Abb. 5: Vergleich der geostrophischen Windrichtung (links) und der Radiosonden-Windrichtung (rechts) mit jener am Freinberg (PRABHA 1996)

2.3.2.2 Einfluss der Topographie

Die vorherrschenden Windsysteme über Linz kommen entweder aus W bis NW oder aus E bis SE. Die Windrosen für die Stationen in Linz für das Jahr 1991 sind in Abbildung 6 zu sehen. Die Hauptwindrichtungen im großen Tal zwischen Böhmischer Masse und Alpenvorland sind W oder E. Die Station Giselawarte (429) zeigt ein Übergewicht der E-Richtung. NW- bis W- und SE- bis E-Winde waren am Freinberg (427) am häufigsten. Diese Richtungen verlaufen parallel zu den Hügelketten im Norden der Stadt und belegen den Kanalisierungseffekt des Geländes. Während westlicher bis südwestlicher Richtung der großräumigen Strömung kann diese auch als repräsentativ für das Stadtgebiet gelten. Bei östlichen Richtungen unterscheidet sich die Strömung über der Stadt von der großräumigen durch lokale Einflüsse.

Steyregg (417) befindet sich in exponierter Lage und das Strömungsfeld wird dort ebenfalls durch die Topographie bei beiden Hauptwindrichtungen abgeändert. Die NE- bis SE-

Richtungen sind durch relativ hohe Windgeschwindigkeiten von 2-6 m/s gekennzeichnet, eine Folge von Hangabflüssen und Entkopplungseffekten über dem Stadtgebiet. In fast 40 % der Fälle wird die Station aus westnordwestlicher bis westlicher Richtung angeströmt.

Die Stationen im großen Tal wie Asten (405), Traun (404) und Kleinmünchen (412) zeigen deutliche Maxima bei W- und E-Richtung. Diese Windrichtungen decken sich mit den Hauptwindrichtungen der synoptischen Strömung, die bereits durch das große Tal kanalisiert wurde. Diese Stationen stehen daher weniger unter Einfluss der Topographie; die hohen Windgeschwindigkeiten bei westlicher Anströmung sind eine Folge der geringeren Hindernisse im Vergleich zum innerstädtischen Gebiet.

Am Hauserhof (401) in 40 m Höhe ist Westwind vorherrschend. Daneben sind SW- und NW-Wind etwa gleich häufig. Relativ geringe Windgeschwindigkeiten sind hier zu verzeichnen, da die Station unter Einfluss der Hügel im Westen steht. Von Osten her wirkt der Reibungseinfluss

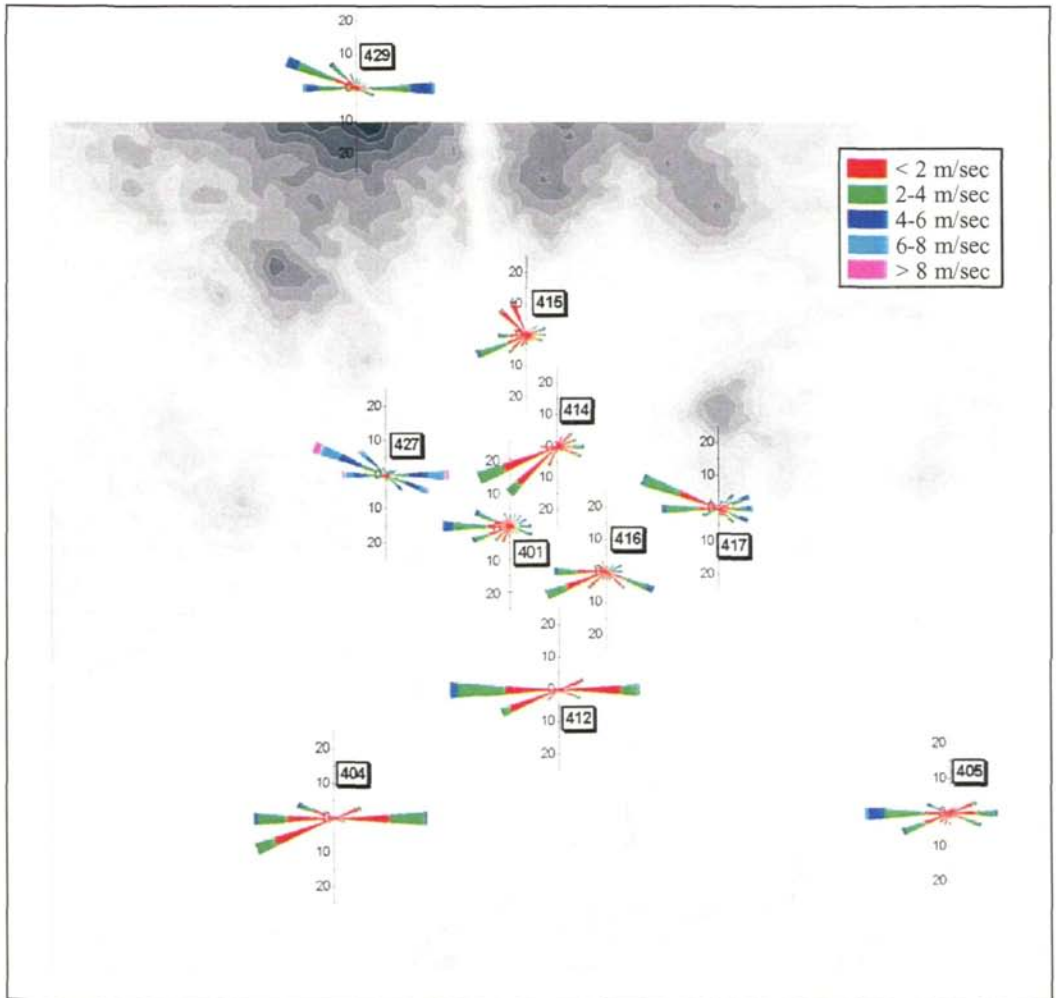


Abb. 6: Windrosen für Linz (Angaben in %)

der Stadt. Eine eventuelle Unterstützung erfahren die westlichen Richtungen durch Abflüsse von den Hängen im Westen. Die Station Berufsschulzentrum (416) weist die gleichen Einflüsse auf mit dem Unterschied, dass hier SW und SE die häufigsten Richtungen sind.

Der 24er-Turm (415) zeigt einerseits den Einfluss des Haselgrabenwindes aus NNW und andererseits jenen des Donautales aus SW. Letzterer macht sich auch beim ORF-Zentrum (414) bemerkbar, SW macht hier etwa 40 % aller Fälle aus. Die Kanalisierung durch das Donautal wird deutlich sichtbar.

2.3.2.3 Einfluss der Stabilität

Die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an allen Stationen in Abhängigkeit der Stabilität ist in Abbildung 7 dargestellt. Daraus lassen sich die durch die Topographie bewirkten Strömungsmuster ablesen. Während stabiler Situationen bilden sich Inversionen, das Strömungsfeld darunter koppelt sich ab, und eine instabile Schicht bildet sich am Boden. Die hangnahen Bereiche bleiben eher stabil. Derartige Situationen sind oft durch eine Geschwindigkeitszunahme entlang der seitlichen Gebirgsbarrieren gekennzeichnet. Das

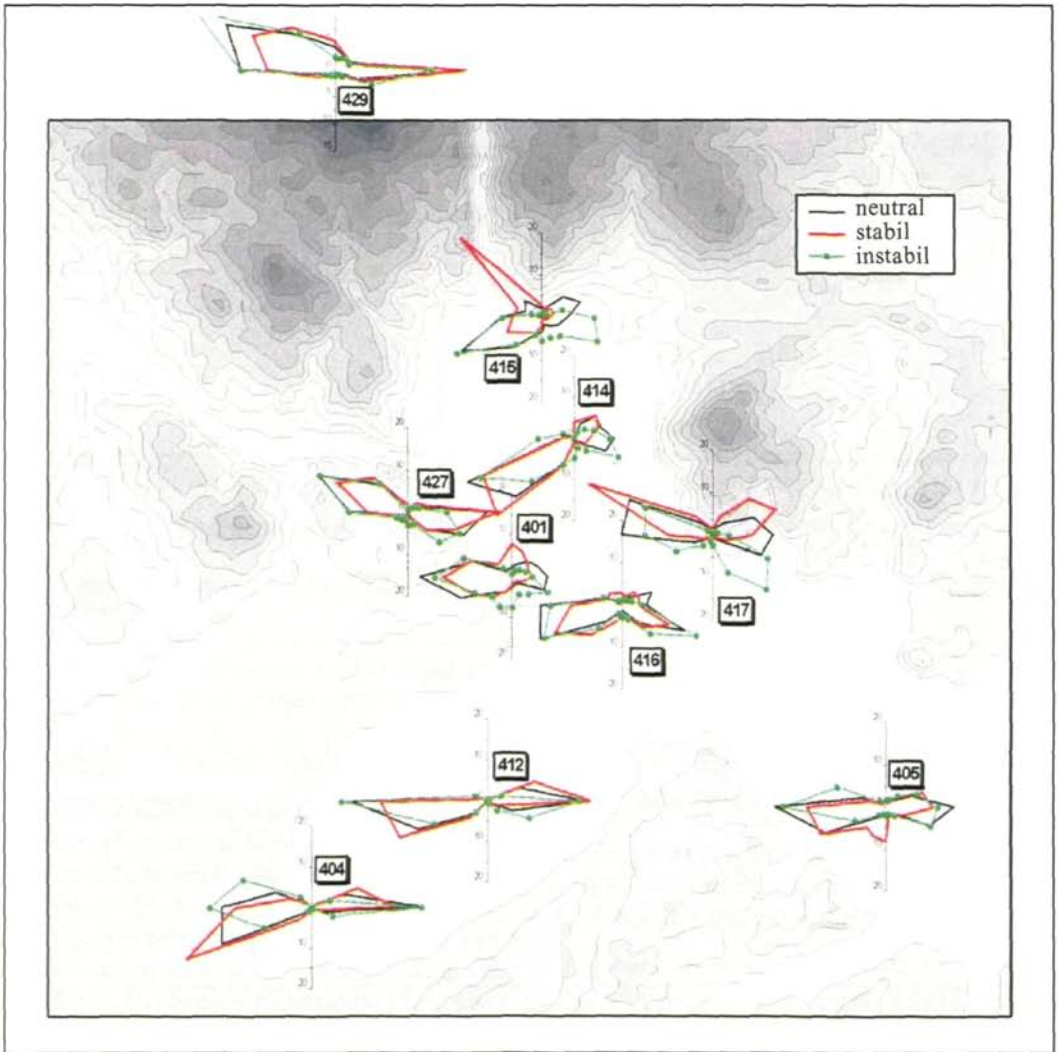


Abb. 7: Verteilung der Windrichtung bei unterschiedlicher Stabilität (Angaben in %)

Auftreten der Kaltluftabflüsse an den Hängen (Steyregg) oder aus dem Haselgraben (24er-Turm) sind ein wichtiges Merkmal der stabilen Situationen. Die Kaltluftströmungen sind auch an den Stationen Hauserhof und ORF-Zentrum nachweisbar, was etwa durch die nördliche Komponente am Hauserhof zum Ausdruck kommt. Die Häufigkeit solcher Fälle ist allerdings gering. Da die stabilen Fälle meistens nachts auftreten, werden vor allem die hangnahen Bereiche in der Nacht durch die Kaltluftflüsse belüftet. Die Stationen im SW und SE

des Untersuchungsgebietes zeigen ebenfalls das geländefolgende Verhalten der Windrichtungen. Die Station Asten wird auch durch Hangabflüsse aus S charakterisiert.

Ist die Schichtung neutral, treten die topographischen Einflüsse zurück. Neutrale nordöstliche Strömungen am 24er-Turm sind ein ausgeprägtes Merkmal. Diese werden auch beim ORF-Zentrum verzeichnet.

Während der instabilen Situationen folgen die Windsysteme dem synoptischen Muster. Als

Folge der lokalen Vermischung treten höhere Windgeschwindigkeiten auf, die durch die Erwärmung der Hänge noch unterstützt werden. Die Luft bewegt sich entlang des Donautales in beiden Hauptwindrichtungen, was sich auch mit den Windrichtungsverteilungen in Steyregg und beim ORF-Zentrum deckt.

Die instabilen Fälle treten vornehmlich tagsüber in Erscheinung, womit sich für diese Tageszeiten eine Strömung entlang des Donautales mit geringem topographischen Einfluss erwarten lässt. Außerdem kann ein Mitwirken der westlichen bis nordwestlichen Strömungen an der Bildung eines antizyklonalen Wirbels im Stadtgebiet festgestellt werden. Dies drückt sich durch die vorherrschende SW-Richtung bei 24er-Turm und ORF-Zentrum in diesen Fällen aus. Bei östlichen Strömungen tritt hingegen ein zyklonaler Wirbel auf, dessen Entstehung noch nicht vollständig geklärt ist. Zwei Mechanismen kommen dafür in Frage: die thermische Induzierung durch die Wechselwirkung zwischen großräumiger Strömung und lokalen Effekten bei der Erwärmung der Hänge und eine rein mechanische Generierung durch die Geländeform, wobei in beiden Fällen die Kanalisierung durch das Donautal mitwirkt. Die Wirbelbildung ist ein wichtiger Faktor für die Frage der Schadstoffverteilung.

2.3.2.4 Tagesgang der Windrichtung

Die Häufigkeitsverteilung der täglichen Schwankungen der Windrichtungen an verschiedenen Stationen wird untersucht, um einerseits die Herkunft der Luftmassen analysieren zu können und andererseits Licht in die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Scales zu bringen, da der Tagesgang die wichtigste davon ist. Die Abbildungen 8-10 zeigen die Häufigkeit der Windrichtung abhängig von der Tageszeit. Bevor man mit der detaillierten Analyse beginnt, sollte man sich vor Augen halten, dass alle Kalmen wegen der fehlenden Richtungsinformation in den Abbildungen fehlen. Da Kalmen vor allem nachts auftreten, fehlt eine Vielzahl der nächtlichen Fälle.

Auf Freinberg und Giselawarte (Abb. 8) dominieren NW-Winde tagsüber und E-Winde in der Nacht in 30 % der Fälle. Dies ist der mesoskalige Einfluss des Tales zwischen Böhmischer Masse und Alpenvorland. Die Existenz eines derartigen mesoskaligen Windsystems mit tageszeitlichen Änderungen wurde im Alpenvorland bisher nicht dokumentiert. Der östliche Wind am Freinberg dreht am Vormittag auf SE. Eine ähnliche Richtungsänderung in die entgegengesetzte Richtung tritt auch bei Sonnenuntergang auf. Diese Drehungen sind Zeichen des lokalen Einflusses am Freinberg. Durch die Lage in der Nähe der Berge und des Stadtgebietes herrscht dieser während der Übergangsperioden vor.

Die Bodenstation Traun (Abb. 8) im SW der Stadt weist nachts vorherrschende westliche Winde auf, die tagsüber mehr nach N drehen. Der Wärmeinseleffekt verstärkt die nächtlichen W-Winde. Die E-Richtung tritt etwa gleich häufig auf. Die stärkere Streuung der westlichen Winde am Nachmittag ist eine Folge der zunehmenden lokalen Durchmischung. Das schmale Tal der Traun beeinflusst diese Station ebenfalls. Die Station Kleinmünchen (Abb. 8) zeigt überwiegend westliche bis nordwestliche Anströmung tagsüber und östliche Winde während der Nachtstunden. Dies ist mit der mesoskaligen Höhenströmung vergleichbar. Da mehr als 40 % der Fälle an dieser Station Kalmen sind, fehlen viele Fälle in der Analyse, um eine Erklärung für diesen Effekt geben zu können. Er hängt wahrscheinlich mit dem beschriebenen mesoskaligen Einfluss zusammen. An beiden Stationen wirken zudem lokale Faktoren, die das Windfeld in diesem Bereich besonders während der Nacht mitbestimmen.

Am Hauserhof ist die N- bzw. NW-Richtung den ganzen Tag über dominant, östliche Richtungen tragen nur zu 10-15 % zum Gesamtbild bei. In diesen Situationen dreht während der Morgenstunden der Wind im Uhrzeigersinn nach SE infolge der Erwärmung der Hänge; der Stadteffekt ist zu dieser Zeit noch nicht vorhanden. Am Nachmittag dominiert die Strömung im Donautal, da der Temperaturgradient zwischen Hängen und Stadt abnimmt. Eine instabile Schichtung ge-

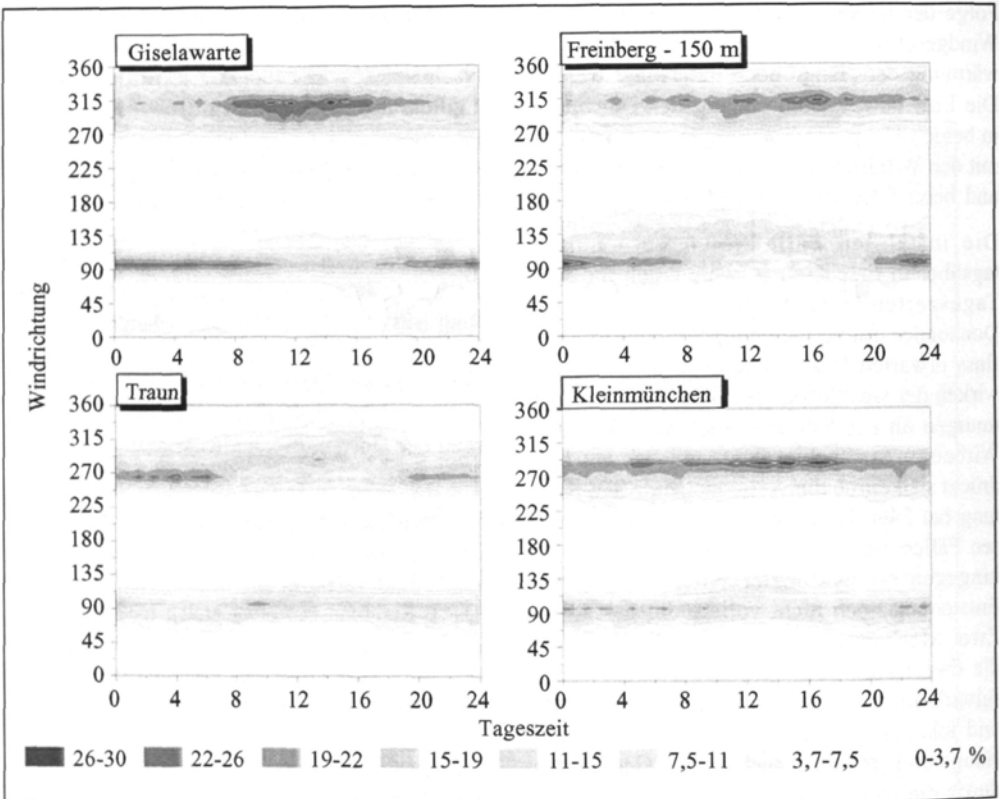


Abb. 8: Tagesgang der Windrichtungsverteilung für Giselowarte, Freinberg, Traun und Kleinmünchen (PRABHA 1996)

winnt die Oberhand, womit die topographischen Einflüsse in den Hintergrund treten.

In den Abendstunden bis etwa 20 Uhr dreht die Windrichtung auf NE bis N. Dies steht mit der Abkühlung der Hänge und den Kaltluftflüssen in Richtung Stadtzentrum in Verbindung. Da das Stadtgebiet wärmer als die Umgebung ist und während der ersten Nachthälfte eine instabile Schichtung herrscht, hält die Vertikalbewegung über der Stadt an. Das verstärkt die bodennahe Konvergenz und somit die Kaltluftströmungen. In Abbildung 9 lässt sich sehen, dass in der zweiten Nachthälfte die Kaltluftflüsse aus N oder NE nachlassen. Dies wird durch die Ausbildung einer stabilen Schicht über der Stadt und Reibungseinflüsse bewirkt. Da sich die Station Hauserhof in 40 m Höhe befindet, gibt sie Aufschluss über das Ausmaß des Vordringens der Kaltluft-

strömungen. Bei schwachem synoptischem Einfluss wird die Strömung in der gesamten städtischen Grenzschicht durch thermisch induzierte Windsysteme und Stadteffekte bestimmt.

Beim ORF-Zentrum (Abb. 9) überwiegen westliche Winde und die östlichen Strömungen (10-15 %) zeigen einen ähnlichen Tagesgang der Windrichtung wie beim Hauserhof. Die Station zeigt um Mittag einen deutlichen Einfluss des Donautales bei E-Strömung. In der Nacht machen sich die nordöstlichen Hangabwinde mit einem Maximum gegen 20 Uhr bemerkbar. Der 24er-Turm (Abb. 9) wird von der Haselgrabenströmung während der ersten Nachthälfte dominiert. Die Existenz der Kaltluftabflüsse ist an dieser Station zum Unterschied von Hauserhof und ORF-Zentrum bis in die Morgenstunden feststellbar. Die Abnahme der Häufigkeit in der

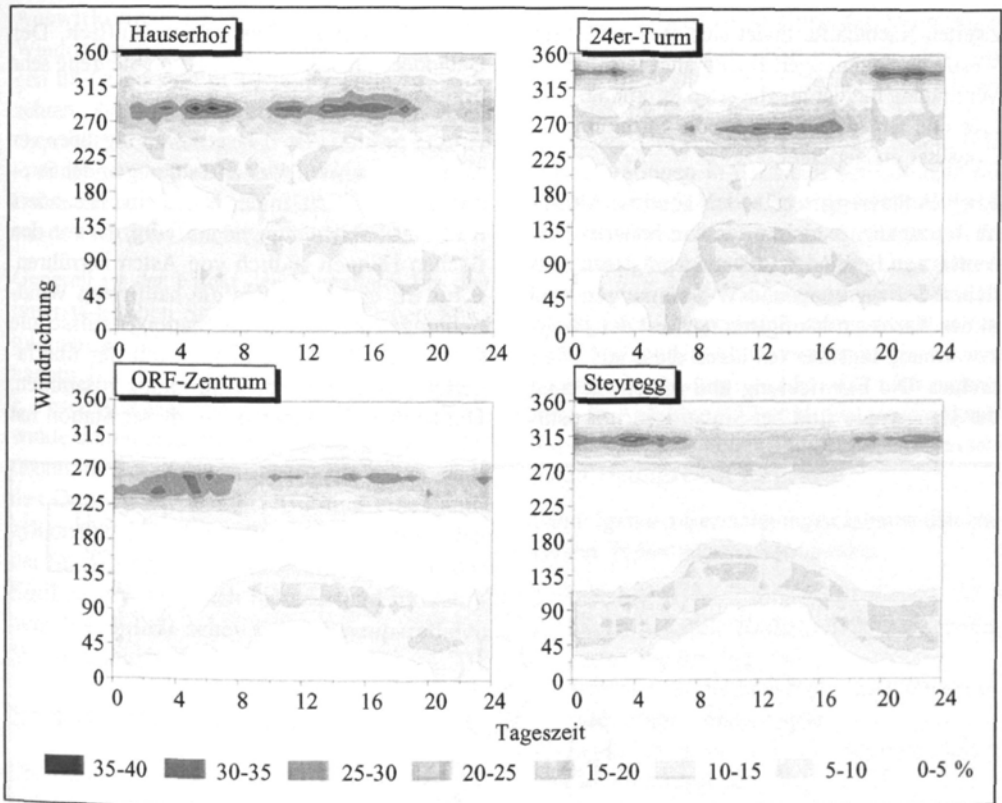


Abb. 9: Tagesgang der Windrichtungsverteilung für Hauserhof, 24er-Turm, ORF-Zentrum und Steyregg (PRABHA 1996)

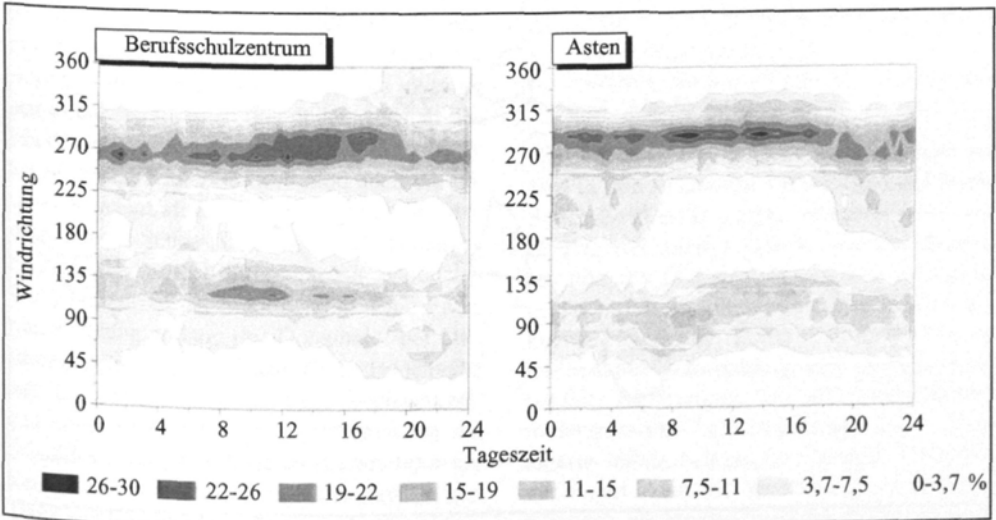


Abb. 10: Tagesgang der Windrichtungsverteilung für Berufsschulzentrum und Asten (PRABHA 1996)

zweiten Nachthälfte findet sich aber auch hier. Westliche Strömungen finden sich tagsüber in Verbindung mit der überlagerten Strömung. Mit tags und am Nachmittag ist die Strömung am Donautal ausgerichtet.

Auch in Steyregg zeigen sich ähnliche Muster im Tagesgang, jedoch mit einem höheren Prozentsatz an E-Winden und ausgeprägteren zeitlichen Schwankungen. NW-Strömungen sind in der Nacht am häufigsten und mit der Hang-erwärmung tagsüber tendieren diese auf W zu drehen. Die Entwicklung und Abschwächung der Hangwinde sind bei Situationen mit östli-

chen Strömungen besonders deutlich. Der Geländeeinfluss ist an der Station Steyregg sehr prägnant.

An der Station Asten lassen sich tagsüber vor allem N- bis NW- oder E-Richtungen der Strömung beobachten. In der Nacht sind besonders die S- bis SW-Richtungen auffällig, die von den flachen Hängen südlich von Asten herrühren. E bis SE und W heißen die häufigsten Windrichtungen tagsüber an der Station Berufsschule (Abb. 10). W-Winde hängen mit der überlagerten großskaligen NW-Strömung zusammen. Die leichte Hangneigung an dieser Station hat

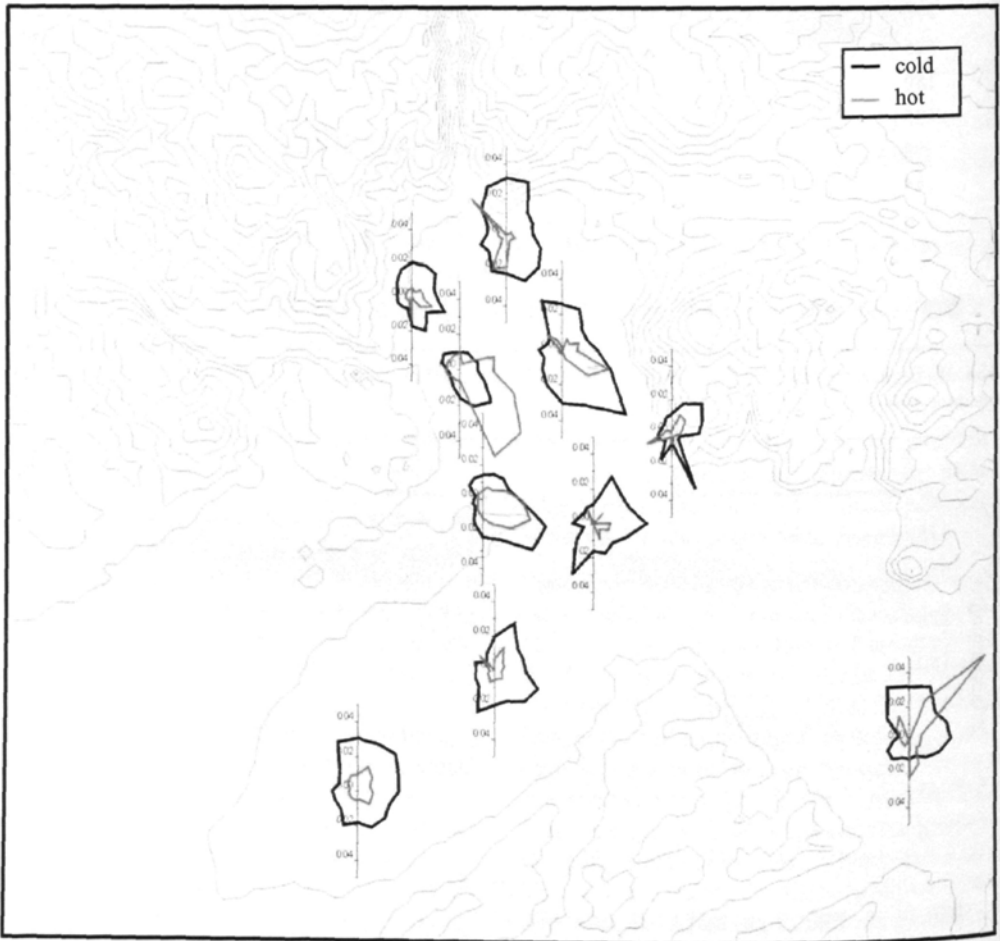


Abb. 11: Mittlere Verteilung von SO₂ (mg/m³) an allen Stationen für die Heizperiode (cold) und die restliche Zeit (hot) (PRABHA 1996)

Auswirkungen auf beide vorherrschenden Windrichtungen. Hangabwinde von den Hängen im Osten sind in 10 % der Fälle zu beobachten. Sie setzen um etwa 16 Uhr ein, erreichen ihr Maximum gegen 20 Uhr und bleiben in einigen Fällen bis nach Mitternacht aufrecht. Dabei übertreffen sie den Effekt der Hangabwinde von den Hängen im N und NW.

Generell ist der Effekt des Donautales bei den innerstädtischen Stationen bei östlichen Strömungen auffällig. Ebenso ist die Ausbildung nächtlicher thermisch induzierter Strömungen ein wichtiges Merkmal dieser Situationen. Westwinde dominieren tagsüber an den meisten Stationen im Stadtgebiet insbesondere in der Nähe des Donautales, was die Bildung eines antizyklonalen Wirbels im Bereich der Donau über der Stadt bestätigt. Ostströmungen zeigen den Einfluss der thermisch induzierten Zirkulationen. Instabilität scheint die donauparallelen Strömungen zu unterstützen.

2.3.3 Die Verteilung von SO₂

Die Hauptemittenten von SO₂ in Linz sind die Industrie und der Hausbrand. Abbildung 11 zeigt die mittleren SO₂-Verteilungen an den einzelnen Stationen für Sommer (hot, April - September) und Winter (cold, Oktober - März). Die Wintermonate zeigen dabei deutlich höhere Werte, was einerseits am häufigeren Auftreten von Inversionen in dieser Jahreszeit und andererseits an den verstärkten Emissionen während der Heizperiode liegen dürfte. Bemerkenswert sind auch die höheren Konzentrationen im Stadtgebiet bei Anströmung aus Südost. Dies sind jene Situationen, in denen die östliche Strömung zur zyklonalen Wirbelbildung in der Stadt beiträgt. Eine starke Kanalisierung entlang des Donautales bei Ostströmung treibt die Schadstoffe in Bodennähe zum ORF-Zentrum. Ausgeprägte Westlagen zeigen keine so hohen Konzentrationen, da die Schadstoffe aus dem Stadtgebiet abtransportiert werden. Die Stationen Asten, Kleinmünchen und Traun werden vornehmlich durch Quellen außerhalb des Linzer Stadtgebietes beeinflusst.

Bei der bisherigen Analyse der Strömungen wurden die Kalmen nicht berücksichtigt. Damit wurden aber einige der in Hinblick auf Schadstoffe kritischen Situationen außer Acht gelassen. Um die Existenz hoher Schadstoffkonzentrationen in der Stadt bei Ostlagen mit einer stabilen Schicht über einer instabilen städtischen Grenzschicht, wurde ein Kriterium für die Strömungsklassifikation festgelegt. Dieses basiert auf dem Temperaturprofil über dem Stadtgebiet. Temperaturmessungen an vier Stationen (Ursulinenhof, Freinberg in 90 und 150 m, Giselawarte) wurden dafür herangezogen. In Abbildung 12 sind die verschiedenen Typen von gemessenen Temperaturprofilen und deren Häufigkeiten dargestellt.

Die folgenden Bezeichnungen können den einzelnen Typen zugewiesen werden:

1. Instabil
2. Dicke instabile Bodenschicht mit überlagerter stabiler Schicht
3. Stabile Schicht innerhalb einer instabilen städtischen Grenzschicht
4. Stabile Bodenschicht mit einer überlagerten Mischungsschicht
5. Stabil
6. Dicke stabile Bodenschicht mit überlagerter instabiler Schicht
7. Instabile Schicht innerhalb einer stabilen städtischen Grenzschicht
8. Instabile Bodenschicht mit überlagerter stark stabiler Schicht

Die östlichen und westlichen Strömungen liefern in den genannten Fällen unterschiedliche Schadstoffverteilungen. Speziell Fälle mit überlagerter stabiler Schicht sind von häufigeren höheren SO₂-Konzentrationen und geringeren mittleren Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet (Abb. 12). Dies sind die Fälle mit bodennaher Vermischung und geringer horizontaler Ausbreitung. Die Schadstoffe bleiben in der instabilen Schicht gefangen, da die überlagerte stabile Schicht die vertikale Diffusion verhindert. Auch die Anströmung der Gebirgsbarrieren im Norden verhindert eine horizontale Verteilung. Das Vorhandensein zweier ent-

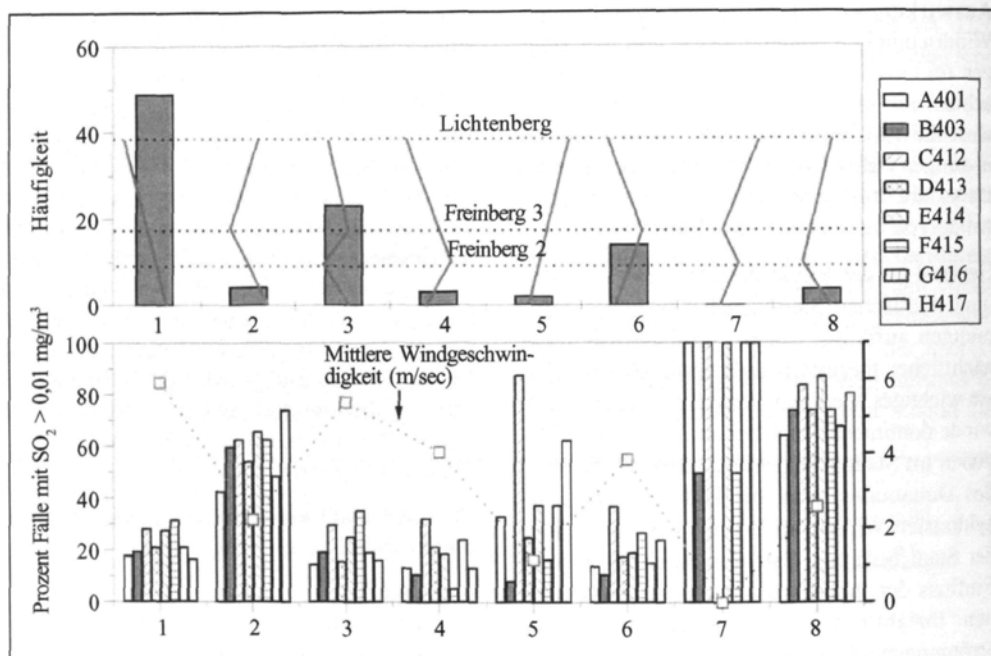


Abb. 12: Häufigkeit verschiedener vertikaler Temperaturprofile (PRABHA 1996)

gegengesetzter Strömungen (Ost am Boden, West in der Höhe) sorgt hingegen für eine bessere horizontale Verbreitung.

Mit Hilfe der bereits besprochenen Temperaturprofile über der Stadt lassen sich nun verschiedene Strömungsmuster klassifizieren. Es wird unterschieden, ob die Schichtung stabil oder instabil ist, die Strömung aus östlicher (von NE bis SW) oder westlicher (von SW bis NE) Richtung kommt und ob eine der folgenden Situationen vorliegt:

1. Situation mit Kaltluftfluss aus dem Haselgraben
2. Situation mit entgegengesetzten Strömungen (Wind auf Freinberg und Giselowarte aus verschiedenen Richtungen)
3. Situation mit gleichgerichteten Strömungen (Wind auf Freinberg und Giselowarte aus der gleichen Richtung)

Die definierten Strömungsmuster sollen nun im Einzelnen beschrieben werden.

a) Ostströmung am Freinberg, Situation 1

Im instabilen Fall wird die Strömung hauptsächlich durch östliche Winde ($> 2 \text{ m/s}$) auf Freinberg und Giselowarte charakterisiert, wobei an den ländlichen Stationen E- bis SE-Winde oder Kalmen auftreten. Der Kaltluftfluss in Richtung des Stadtzentrums ist deutlich ausgeprägt, abhängig von der Stärke der Wärmeinsel. Die Mehrzahl dieser Fälle sind von Kalmen im Stadtzentrum während der zweiten Nachthälfte geprägt. Die Station Steyregg zeigt eine merkliche Kanalisierung und nordöstliche Hangabwinde. Ist die Schichtung stabil, so ist die Kaltluftströmung nicht so stark wie im instabilen Fall (Abb. 13). Dieser Vergleich ist ein Hinweis auf die Rolle, die die Wärmeinsel beim Antrieb der Kaltluftströmungen einnimmt. Stabile Fälle sind außerdem von östlichen Winden mit geringen Windgeschwindigkeiten oder Kalmen im Stadtzentrum gekennzeichnet. Auch an der Station Steyregg sind Kanalisierung und Hangwinde nicht so prägnant.

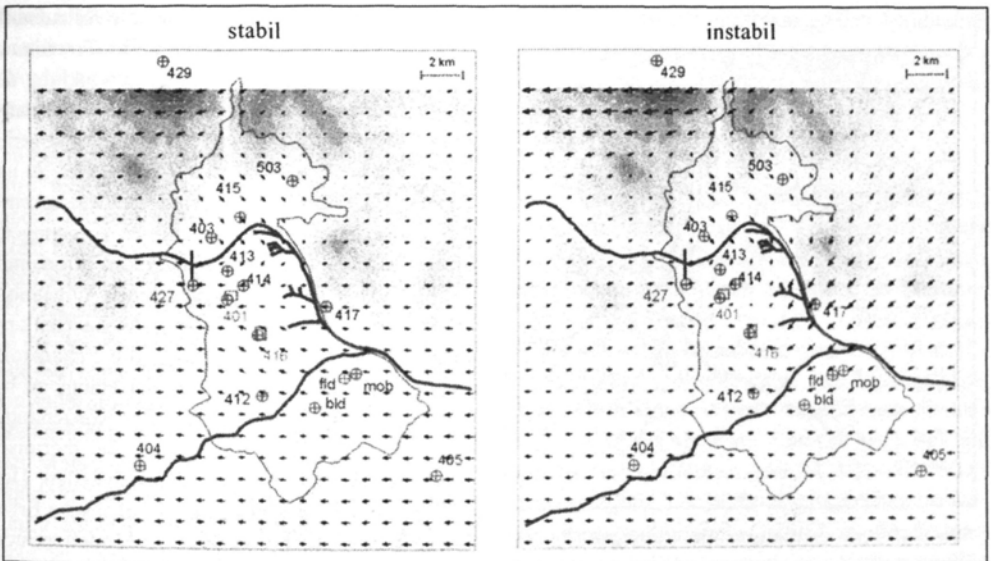


Abb. 13: Vorherrschende mittlere bodennahe Strömungsmuster bei Ostlagen (PRABHA 1996)

b) Ostströmung am Freinberg, Situation 2

Während instabiler Situationen sind die Hangabwinde an der Station Steyregg und der Haselgrabenwind ziemlich ausgeprägt. Südliche bis nordwestliche Winde sind am Hauserhof und beim Berufsschulzentrum vorherrschend, der Effekt der leichten Hangneigung ist bei letzterem offenkundig. Kalmen sind im Stadtzentrum in etwa gleich häufig. Im stabilen Fall treten im Wesentlichen die gleichen Strömungsmuster, allerdings mit geringeren Windgeschwindigkeiten, auf.

c) Ostströmung am Freinberg, Situation 3

Die östlichen bis südöstlichen Winde an den Stationen Freinberg, Giselawarte und Steyregg sind im instabilen Fall so wie die östlichen Winde am Hauserhof und beim Berufsschulzentrum stärker ausgeprägt. Innerhalb der Stadt ist eine Kanalisierung entlang des Donautales festzustellen. Die Kalmenhäufigkeit ist im Vergleich zu den vorigen Fällen reduziert. In stabilen Situationen treten am Freinberg, in Steyregg und Asten vornehmlich starke südöstliche Winde auf. Ansonsten unterscheidet sich das Strömungsmuster kaum vom instabilen Fall.

d) Westströmung am Freinberg, Situation 1

Liegt instabile Schichtung vor, so ist NW die vorherrschende Windrichtung am Freinberg. Hauserhof, Steyregg und Berufsschulzentrum zeigen dieses Merkmal ebenfalls; an den ländlichen Stationen treten W-Winde auf (Abb. 14). Kalmen oder sehr geringe Windgeschwindigkeiten konnten im Stadtzentrum beobachtet werden.

Bei stabilen Verhältnissen weisen die von Berghängen umgrenzten Stationen innerhalb des Stadtgebietes südwestliche Windrichtung auf. Das gilt auch für Asten, Traun und Kleinmünchen. Zudem steigt die Kalmenhäufigkeit an. Die Kaltluftabflüsse erreichen keine so hohen Geschwindigkeiten wie im Fall a.

e) Westströmung am Freinberg, Situation 2

Nur schwache Kaltluftströmungen konnten sowohl bei stabiler als auch bei instabiler Schichtung festgestellt werden. Letztere ist durch eine Kanalisierung entlang der Donau charakterisiert. In der Mehrzahl der Fälle treten im Stadtzentrum nordöstliche bis südöstliche Winde mit geringen Windgeschwindigkeiten auf. Stabile

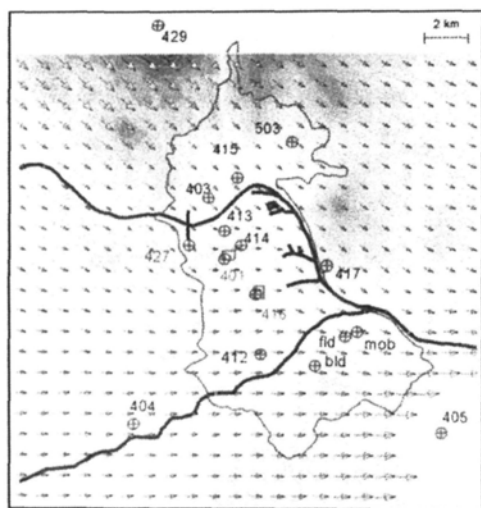


Abb. 14: Strömungsmuster für Westlagen (PRABHA 1996)

Fälle zeigen eine wohl definierte SW-Strömung mit Kaltluftabflüssen an den städtischen Stationen.

f) Westströmung am Freinberg, Situation 3

Starke W- bis NW-Winde prägen das Bild an den Stationen Freinberg, Giselawarte und Steyregg im instabilen Fall. Stabile Schichtung führt zu keinen höheren Windgeschwindigkeiten, aber zu variablen Windrichtungen im Bereich der Hänge.

2.4 Modellrechnungen

2.4.1 Überblick

Mit einem diagnostischen Strömungs- und Ausbreitungsmodell wurden vier Fallstudien durchgeführt (MURSCH-RADLGRUBER u. PRABHA 1996). Die gewählten Fälle repräsentieren vorherrschende Episoden hoher Schadstoffkonzentrationen im Linzer Raum. Zu den untersuchten Fällen gehören das Vorhandensein thermisch induzierter Windsysteme, der Durchgang einer Kaltfront, eine östlich-südöstliche Strömungslage und eine westlich-nordwestliche Strömungslage. Im Falle der thermisch induzierten Windsysteme treten komplexe Strömungsmuster auf, die fla-

che Mischungsschicht erhöht die Schadstoffkonzentrationen im Stadtgebiet. Der Frontdurchgang bietet Möglichkeit, die Entwicklung der Schadstoffverteilung in der Stadt bei Vorhandensein flacher Inversionen in Verbindung mit geringen bodennahen Windgeschwindigkeiten zu untersuchen. Die niedrigen Windgeschwindigkeiten in der bodennahen Schicht führen zu geringerer mechanischer Turbulenz. Die beiden Strömungslagen stellen jene meteorologischen Verhältnisse dar, die in Linz am häufigsten zu beobachten sind. Das Modell ist in der Lage, die Schadstoffverteilung auch in der Nähe der Hänge zu berechnen. Eine Überschätzung der Konzentrationen innerhalb des Stadtgebietes bei thermisch induzierten Strömungen ist festzustellen. Dies dürfte auf die ungenügende physikalische Erfassung konvektiver Vorgänge im Modell zurückzuführen sein.

In der vorliegenden Studie wurde die Entwicklung eines Strömungs- und Ausbreitungsmodells für die Berechnung der Schadstoffbelastung in komplexem Gelände angestrebt. Das Diffusionsmodell basiert auf dem K-Ansatz für die Diffusion; das Diffusionsmodell ist mit einem massenkonsistenten Strömungsmodell gekoppelt, welches das dividing-streamline-Konzept bei stabiler Schichtung beinhaltet. Ein Turbulenzmodul leitet die Ausbreitungsparameter aus den aktuellen meteorologischen Verhältnissen ab.

In Linz wird das lokale Windfeld in großem Ausmaß durch Stadteffekte und die Geländeerhebungen, die das Stadtgebiet von drei Seiten umgeben, beeinflusst. Frühe Studien von WEISS u. FRENZEL (1961) zeigen verschiedene komplexe Strömungsmuster in Linz und deren Wechselwirkung mit der überlagerten Strömung. Sie beobachteten mehrere Strömungsmuster mit Wirbelbildung über der Stadt. Modellstudien (PECHINGER 1990, MURSCH-RADLGRUBER 1989) stellten höher reichende Konzentrationen von Schadstoffen im Sommer in Stagnationsperioden fest. Die Strömungsklimatologie zusammen mit der Betrachtung der Episoden höherer Konzentrationen zeigt zwei spezifische Situationen, bei welchen sich höhere Schadstoffmengen in der

Stadt bilden können. Eine derartige Situation tritt bei Vorhandensein thermisch induzierter Windsysteme auf, die andere vor dem Durchgang einer Kaltfront.

Im ersten Fall dominieren die lokal induzierten Strömungen bei schwachen Druckgradienten über Mitteleuropa. Die Berge im Norden der Stadt tragen gemeinsam mit dem Donautal und dem Stadteffekt zur Bildung thermisch induzierter Zirkulation bei. Diese spielt eine große Rolle bei der Belüftung der hangnahen Stadtteile. Die Strömung über der Stadt entkoppelt sich, Geländeeinflüsse sind in größerem Umfang im Stadtgebiet und in Hangnähe merkbar. Während der Morgenstunden dominieren die Hangaufwinde in den Stadtteilen nahe der Hänge. Gleichzeitig entwickelt sich eine Mischungsschicht über der Stadt, welche flacher als über den Berggipfeln ist. Die Schadstoffe, die in diese Mischungsschicht eindringen, werden dort gefangen, da die horizontale Dispersion durch die Gebirgsbarriere und die vertikale Dispersion durch die überlagerte stabile Schicht verringert werden. Die Anreicherung mit Schadstoffen geht so lange weiter, bis sich die Mischungsschicht vergrößert, der vertikale Austausch verbessert wird und sich der Effekt der Hangaufwinde abgeschwächt hat.

Im Fall der Frontannäherung herrscht dichte stratiforme Bewölkung. Diese verhindert die vertikale Dispersion der Schadstoffe und bewirkt somit eine Stagnation der Schadstoffe in tiefen Schichten. Die horizontale Verteilung wird wiederum durch die Geländeform behindert. Vor dem Frontdurchgang findet sich über den ländlichen Gebieten ein stabiles Temperaturprofil; zur selben Zeit liegt über der Stadt eine konvektive Schicht. Abkopplungseffekte über der Stadt tragen zu einer Strömung bei, die zum Stadtzentrum hin gerichtet ist und der umgebenden synoptischen Strömung entgegengerichtet ist. Dieser Vorgang transportiert Schadstoffe ins Stadtzentrum und die dort vorherrschenden schwachen Winde können einer Anreicherung nicht entgegenwirken. Neben diesen thermodynamischen Effekten

kann es zu Rezirkulationen in den hangnahen Bereichen kommen, wenn die Schadstoffwolke auf die Gebirgsbarriere im Nordosten auftrifft.

2.4.2 Die Daten

Die Daten, die für die Studie verwendet wurden, stammen von Stationen, die von der Linzer Stadtverwaltung betreut werden und von einem speziell eingerichteten Meßnetz im Sommer 1995. Gemessen wurden dabei Windgeschwindigkeit und Windrichtung im 10 m Niveau, sowie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit in 2 m Höhe. Weiters standen noch die Daten von Messungen auf Hausdächern und auf einem Turm in Höhen von 50, 100 und 150 m zur Verfügung. Die Turmmessungen standen wegen eines technischen Gebrechens für die ersten beiden Fallstudien nicht zur Verfügung. Für die beiden anderen Fälle wurden Daten aus dem Jahr 1991 herangezogen, wo Turmmessungen zur Verfügung standen. Die Beobachtung der Luftverschmutzung wurde für SO_2 an verschiedenen Punkten im Stadtgebiet durchgeführt.

Das speziell eingerichtete Messnetz befand sich im Wesentlichen südöstlich des Industriegebietes von VA Stahl und Chemie Linz im Bereich von Pichling. Es bestand aus zwei Maststationen am Boden und einer auf dem Dach eines 60 m hohen Wohnhauses und wurde vor allem für die klimatologische Begleitplanung zur geplanten Solar City in Betrieb genommen. Ein mobile Messstelle wurde ebenfalls in diesem Gebiet stationiert, die Wind- und Temperaturinformationen sowie SO_2 -Konzentrationen lieferte. Halbstündliche Emissionswerte von den neun größten Quellen in 30-200 m Höhe werden ebenfalls verwendet. Für die Fälle aus 1991 werden auch die Emissionen aus dem Hausbrand berücksichtigt.

2.4.3. Das Modellkonzept

Das verwendete K-Modell (MURSCH-RADLGRUBER 1984) basiert auf der Gleichung für Advektion und Diffusion für einen passiven Schadstoff, dessen Konzentration C durch $C =$

$\langle C \rangle + C'$ gegeben ist und für die umgebende Strömung $U = (u + u', v + v', w + w')$. Die Geschwindigkeitskomponenten und die Konzentration werden durch mittlere und turbulente Anteile ausgedrückt. Bei der Annahme einer inkompressiblen Atmosphäre ergibt sich somit:

$$\frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + u \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial x} + v \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial y} + w \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial z} + \frac{\partial \langle u' C' \rangle}{\partial x} + \frac{\partial \langle v' C' \rangle}{\partial y} + \frac{\partial \langle w' C' \rangle}{\partial z} = \langle Q \rangle$$

Die turbulenten Terme werden durch den K-Ansatz parametrisiert, indem die turbulenten Flüsse durch Gradienten der mittleren Konzentration ausgedrückt werden.

2.4.4 Ergebnisse

Die Modellrechnungen wurden für vier Fälle durchgeführt. Diese sind a) gradientschwache Wetterlage, b) Annäherung einer Kaltfront, c) östliche Strömungslage und d) nordwestliche Strömungslage. Die Fälle a und b sind, wie in der Einleitung schon erwähnt wurde, typisch für vorherrschende thermische und dynamische Einflüsse in den hangnahen Bereichen der Stadt. Fall c und Fall d repräsentieren die beiden vorherrschenden Strömungslagen im Stadtgebiet. Die Daten für diese beiden Fälle stammen aus dem Jahr 1991.

2.4.4.1 Gradientschwache Wetterlage

Die detaillierte Analyse der Strömungsmuster über der Stadt während des Jahres 1991 und des Sommers 1995 zeigt eine typische Variation der Windrichtung im Tagesgang in Zusammenhang mit schwachen nördlichen bis nordöstlichen Winden und keiner oder nur geringer Bewölkung. Solche Tage sind auch durch hohe Schadstoffkonzentrationen im Stadtzentrum gekennzeichnet. Thermisch induzierte Windsysteme sind bei diesen schwachen synoptischen Druckgradienten gut entwickelt. Daher bestimmen die lokalen, thermisch in-

duzierten Strömungen die Schadstoffverteilung im Stadtgebiet.

Die Tage 29. und 30. Juni 1995, für die das Modell angewandt wurde, wiesen eine derartige Wetterlage mit schwachen nördlichen bis nordöstlichen synoptisch-skaligen Winden auf. Ein Hochdrucksystem befand sich an diesen Tagen über Nordeuropa, das trockene und warme kontinentale Luft in das Untersuchungsgebiet transportierte. Diese Situation dauerte drei Tage lang an. Der bodennahe Wind kam in der Nacht aus Richtung Ost und drehte tagsüber allmählich auf Südwest bis West, wie Abbildung 15 zeigt.

Diese Richtungsänderungen gehen Hand in Hand mit der Änderung der Stabilität. Während der Nachtstunden ist die Luftschichtung stabil, in der städtischen Grenzschicht ist die Luftzirkulation gering und in Bodennähe befindet sich eine abgekoppelte Schicht. Dass sich thermisch induzierte Strömungen entwickelt haben, zeigt die Station 24er-Turm durch den starken Talauswind aus dem Haselgraben in der ersten Nachthälfte (Abb. 15). Auf den Haselgrabenwind als wichtige, thermisch induzierte Luftströmung für die Belüftung des Stadtgebietes wird später genauer eingegangen.

Im Tagesverlauf weisen sowohl das Stadtzentrum als auch die ländlichen Gebiete im Südosten und die nördlichen Teile der Stadt ähnliche Richtungsänderungen auf. Die Station Asten, eine Station in ländlicher Umgebung etwa 5 km südöstlich der Stadt gelegen, weist während der Nacht generell südliche bis südwestliche Winde auf. Dabei handelt es sich um Hangabwinde von den Hängen südlich der Station. An der Station Traun, die 6 km südwestlich des Stadtzentrums liegt, wurden schwache südöstliche Winde registriert, die auf den städtischen Wärmeinsellekt zurückgeführt werden können.

Südöstliche bis südwestliche Winde treten in den Morgenstunden in verschiedenen Höhen über der Stadt auf. Dies zeigt deutlich die Hangaufwinde und ihre vertikale Erstreckung. Am Nachmittag, wenn die Atmosphäre instabil wird, dre-

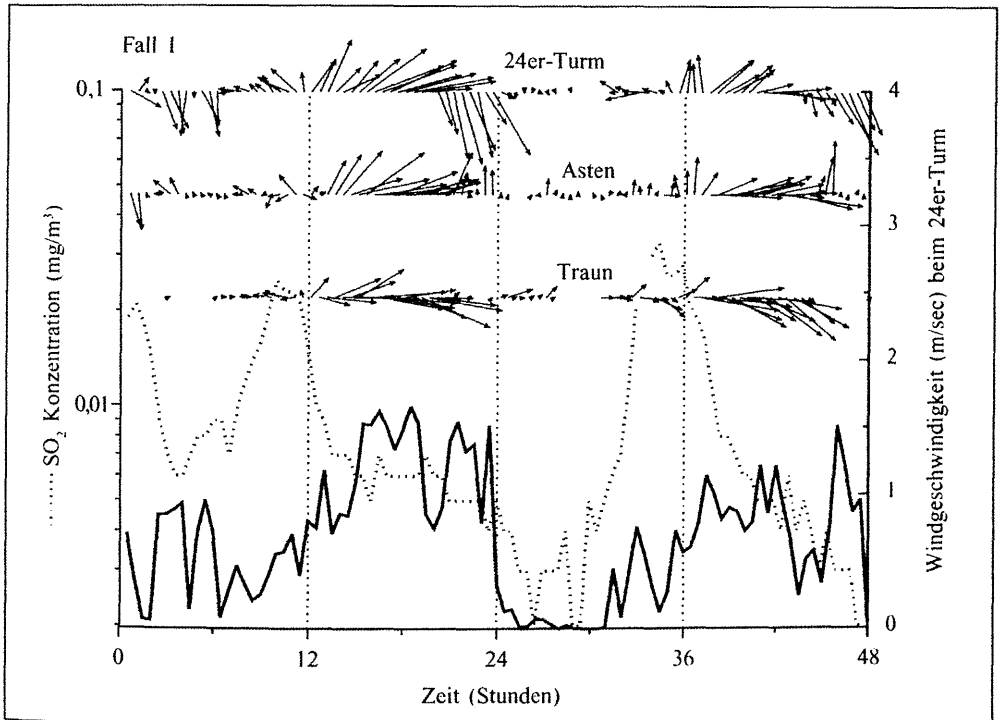


Abb. 15: SO_2 - Konzentration, Windgeschwindigkeit und -richtung für 24er-Turm, Asten und Traun

hen diese Windsysteme mehr auf westliche Richtung. Zwischen 20 Uhr und Mitternacht wehen nordwestliche Hangwinde gegen das Stadtzentrum. Diese werden in der zweiten Nachthälfte schwächer, da sich Wärmeinselleffekt und Hangwindeffekt aufheben. Die Bildung einer neutralen oder leicht stabilen Schicht über der Stadt erleichtert die Abnahme der Temperaturdifferenz zwischen dem Stadtzentrum und den Hängen. Zusätzlich behindert natürlich die erhöhte Rauigkeit über der Stadt die Strömung. Die Intensität der Wärmeinsel sowie der Temperaturgradient im Umland und die Konvergenz sind in Abbildung 16 zu sehen.

Die höhere Wärmeinselintensität während der stabilen Situationen am späten Abend und in der Nacht steht in Zusammenhang mit einer Zunahme der Konvergenz. Dies bedeutet einen Nettofluss in Richtung der Stadt, die Druckgradienten zwischen der Stadt und den Hängen sind in dieser Periode größer und sorgen daher

für einen stärkeren Abfluss. Auch ein schwacher Zufluss von Luft aus den Vorstädten im Süden trägt zur Konvergenz bei. Diese bleibt die ganze Nacht über bis in die Morgenstunden aufrecht; eine Abnahme der Konvergenz am Morgen erfolgt wegen der einsetzenden Hangaufwinde.

Die Schadstoffkonzentrationen in der Stadt sind bei starker Konvergenz höher, das sind auch die Situationen mit höherer Instabilität. Die Schadstoffwolke trifft auf die Hügel im Norden, über der Stadt liegt eine instabile Schicht mit überlagerter stabiler Schicht. Diese stabile Schicht verhindert den vertikalen Abtransport von Schadstoffen aus den von Bergen umgrenzten Bereichen der Stadt. Der horizontale Transport wird durch die Berge selbst behindert. Die Schadstoffkonzentration erhöht sich durch verstärktes Heruntermischen aus der gefangenen Schadstoffwolke. In der Zwischenzeit wächst die instabile Schicht an, und die Schadstoff-

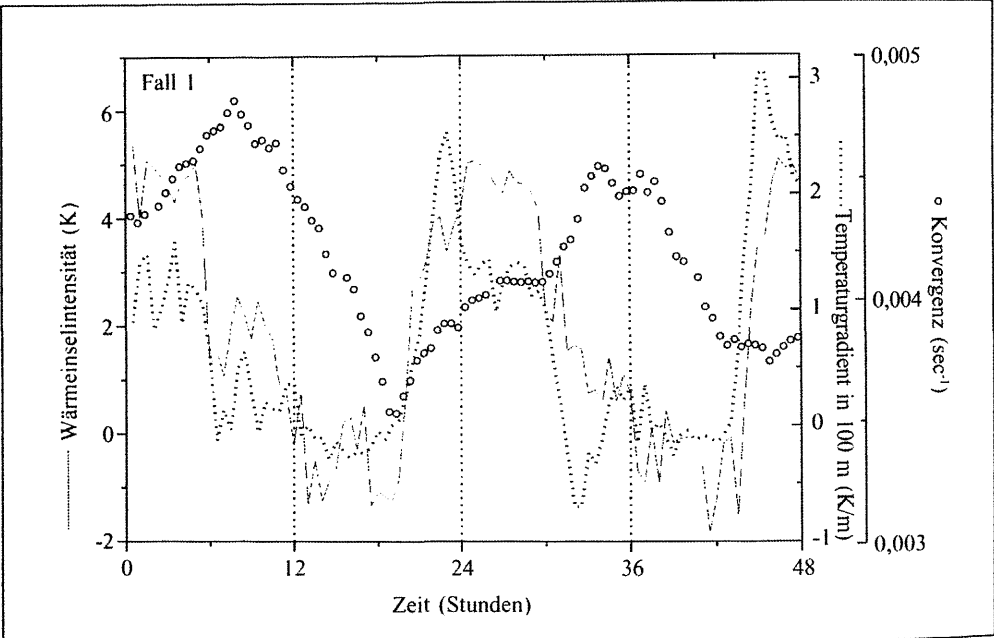


Abb. 16: Wärmeinselintensität, vert. T-Gradient und Konvergenz im Tagesgang für Fall 1

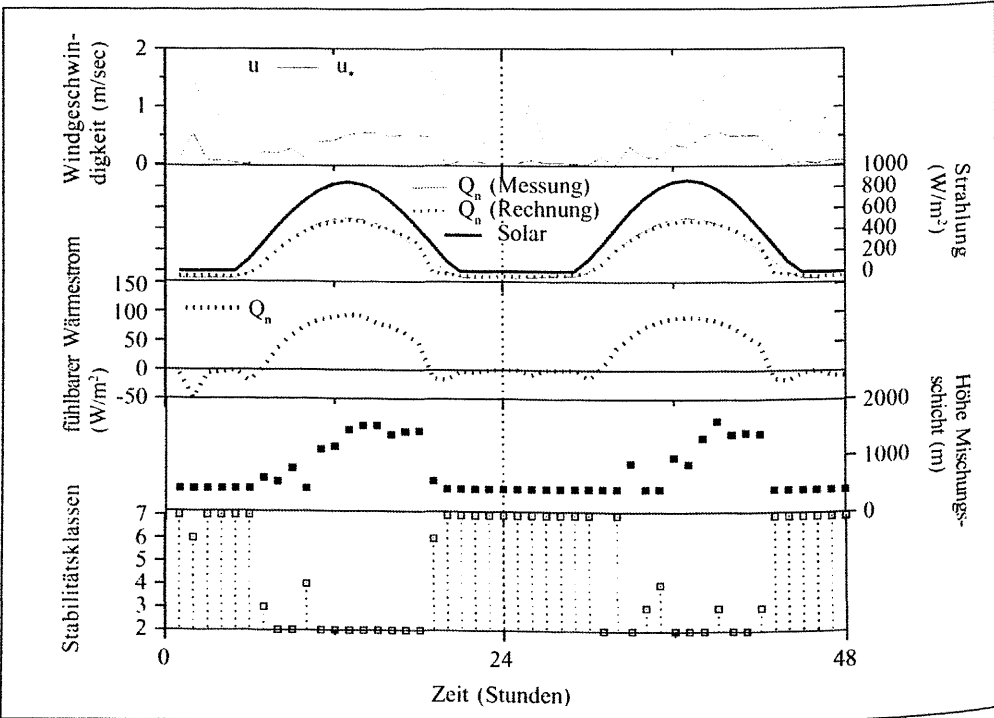


Abb. 17: Grenzschichtparameter (Rechnung und Messung) für Fall 1

wolke gelangt in die Mischungsschicht. Eine weitere Vergrößerung der Mischungsschicht unterstützt nun den Abtransport der Schadstoffe aus dem Stadtgebiet und verringert somit die Konzentrationen in der Stadt. Die maximal erreichbaren Konzentrationen hängen demnach vom Grad der Instabilität und von der mittleren Windgeschwindigkeit ab.

Die Parameter der Grenzschicht für diesen Fall wurden mit Hilfe der Turbulenzroutine berechnet und sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Messungen der Nettostrahlung passen sehr gut mit den Berechnungen zusammen und werden für die Parametrisierung des fühlbaren Wärmestromes verwendet, wenn keine Messungen vorliegen. Die Darstellung der Stabilitätsklassen zeigt hohe Stabilität während der Nacht und hohe Instabilität tagsüber.

In Abbildung 18 werden simulierte und gemessene SO_2 -Konzentrationen für die Stationen BH-Urfahr, ORF-Zentrum, Hauserhof und 24er-Turm

Turm verglichen. Das Mäandrieren der Konzentrationen im Tagesgang wird vom Modell gut erfasst, die Höhe der Konzentrationen wird aber vom Modell deutlich überschätzt. Lediglich beim 24er-Turm stimmen die errechneten Werte auch tagsüber mit den gemessenen überein. Ein Grund für die Überschätzung kann das Vorhandensein von Jetströmen über der Stadt vor allem nachts sein, die im Modell nicht erfasst werden. Dies würde auch die bessere Übereinstimmung bei den hangnahen Stationen speziell während der Nacht erklären. Tagsüber liegen die Überschätzungen am Fehlen von vertikalen Strömungsinformationen.

Die erste Spitze in den Konzentrationen tritt infolge der Anströmung der Hänge im Norden auf, wo die Schadstoffe durch die Barriere aufgestaut werden, wie schon erläutert wurde. Bei weiterer Drehung der Windrichtung im Uhrzeigersinn werden die Schadstoffe aus dem Stadtgebiet abtransportiert.

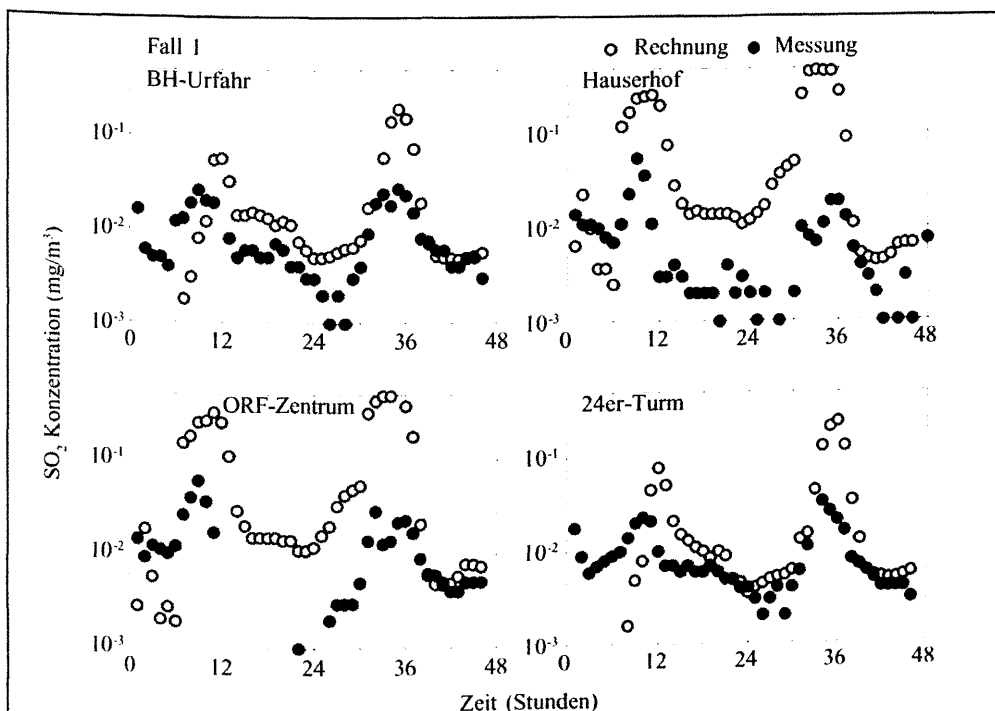


Abb. 18: SO_2 -Konzentration (Messung und Rechnung) für verschiedene Stationen (Fall 1)

Am frühen Abend setzen die thermisch induzierten Hangabwinde und Talauswinde ein, welche vorerst einen Teil der Schadstoffe durch die Umkehr der Windrichtung wieder zurückbringen. Zusätzlich herrschen im Stadtgebiet vergleichsweise geringe Windgeschwindigkeiten. Alles zusammen bewirkt dann die zweite Spitze in den Abendstunden. Die Verstärkung der thermisch induzierten Windsysteme führt in weiterer Folge zu guter Durchlüftung des Stadtgebietes und somit zu einer Absenkung der Konzentrationen. Die anschließende stabile, fast windstille Phase in der Nacht verhindert ein Heruntermischen der Schadstoffe.

2.4.4.2 Einfluss einer Kaltfront

Für die Betrachtung dieses Falles wurde der 20. Mai 1995 ausgewählt. Westliche bis nordwestliche Winde waren an diesem Tag im synoptischen Scale bis Mittag vorherrschend, danach gelangte das Untersuchungsgebiet in den Einfluss einer Kaltfront, die in den Nachmittagsstunden durchzog. Der Einfluss der Front war bis in die Morgenstunden des 22.

Mai vorhanden. Der Himmel an diesem Tag war mit tiefen Wolken bedeckt.

Wie schon im ersten Fall sind in Abbildung 19 wiederum Wärmeinseleffekt, vertikaler Temperaturgradient im ländlichen Bereich in den untersten 100 m und die Konvergenz in der Grenzschicht über der Stadt dargestellt. Vor dem Durchzug der Front bildet sich eine tief liegende Inversion in den untersten 60 m, was mit der östlichen Einströmung aus den Vororten in das Stadtzentrum zusammenfällt. Positive Anomalien beim Wärmeinseleffekt hängen mit der Zunahme bei Konvergenz und Stabilität zusammen. Während der zweiten Nachthälfte baut sich eine stabile Schicht auf und die Konvergenz geht zurück. Dies hängt mit der Hypothese zusammen, derzufolge die Wärmeinsel die Kaltluftströmungen unterstützen bzw. bremsen kann. Das Stadtgebiet und die hangnahen Bereiche kühlen sich unterschiedlich schnell ab, das Stadtzentrum bleibt wärmer als die Randgebiete. Somit entstehen thermisch induzierte Strömungen in Richtung des Zentrums. In der ersten Nachthälfte ist die

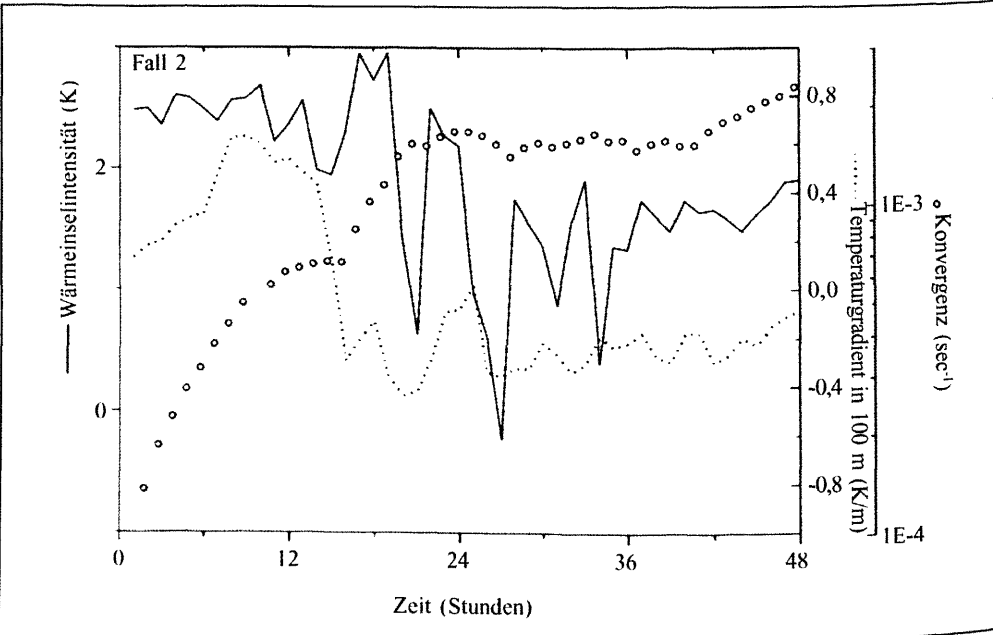


Abb. 19: Wärmeinselintensität, vert. T-Gradient und Konvergenz im Tagesgang für Fall 2

Grenzschicht über der Stadt instabil, warme Luft kann daher aufsteigen, was durch ein Absinken im Bereich der Hänge und des Stadtrandes ausgeglichen wird. Das bewirkt eine Unterstützung der Kaltluftströmungen.

Kühlt sich das Stadtzentrum jedoch weiter ab, wird mehr Wärme nach oben transportiert und allmählich bildet sich eine stabile Schicht über der Stadt aus. Dadurch wird die vertikale Bewegung behindert oder gänzlich unmöglich, was zum Verlust des zusätzlichen Antriebs für die Kaltluftströmungen führt. Diese werden abgeschwächt und das Strömungsfeld in der Stadt wird lediglich von Reibungseffekten aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt.

Die späten Vormittagsstunden vor der Frontpassage sind von hohen SO_2 -Konzentrationen gekennzeichnet, die an allen Messstellen verzeichnet werden konnten. Dies ist auf das gemeinsame Wirken der folgenden Effekte zurückzuführen: In Quellhöhe bildet sich eine dünne Mischungsschicht mit östlichen bis südöstlichen Winden, in der Stadt und im Umland besteht nur eine schwache Zirkulation und es herrschen bedeckte Verhältnisse mit tiefen stratiformen Wolken. Das Vorhandensein tief liegender Bewölkung (350 m) unter dem Kammniveau der umgebenden Berge (850 m im Norden, 400 m im Westen und Osten) verhindert den Vertikaltransport der Schadstoffe von den Quellen. Zusätzlich erzeugen die geringen Windgeschwindigkeiten kaum mechanische Turbulenz und horizontalen Transport.

Die hohen Konzentrationen blieben über vier Stunden hinweg aufrecht. Die Gründe dafür liegen im Heruntermischen der Schadstoffe von den Quellen und in der steigenden horizontalen Verteilung infolge des Anwachsens der Windgeschwindigkeit unter Einfluss der Kaltfront. Der West- bis Südwestwind und dessen Tendenz in den von Bergen umgrenzten Stadtgebieten nach Südwest zu drehen, zeigt die Dominanz des mechanischen Einflusses bei Aufprägung einer synoptischen Strömung. Die Schadstoffwolke trifft auf die Steyregger Hän-

ge, was zu Problemen führen kann. Die Strömung kann sich teilen und eine Rezirkulationszone im Industriegebiet bilden. Dabei muss auch bezweifelt werden, ob das lokale Umweltmessnetz dieses Merkmal erfassen kann. Am späten Nachmittag bewirkt der Frontdurchgang höhere Windgeschwindigkeiten, bessere horizontale Verteilung und somit geringere Konzentrationen.

Abbildung 20 zeigt wiederum die Parameter für die Grenzschicht unter diesen Bedingungen. Die Nachtstunden sind durch die stark stabilen Klassen, der Tag durch die neutralen Klassen charakterisiert. Die berechnete Nettostrahlung passt gut zu den gemessenen Werten. Eine geringe Höhe der Mischungsschicht ist insbesondere während der Mittagszeit feststellbar, wenn auch hohe Konzentrationen von Schadstoffen auftreten. Diese Abschätzungen werden für die Ermittlung der Wind- und Ausbreitungsprofile verwendet. Geschätzte Halbstundenwerte der SO_2 -Emissionen der neun größten Quellen werden in das Modell einbezogen. Die Quellen werden als kontinuierliche Emittenten mit konstanter Emissionsrate angesehen und befinden sich in Höhen zwischen 30 m und 200 m über Grund. Es wird mit einem horizontalen Gitterpunktabstand von 500 m gearbeitet, in der Vertikalen ist der Gitterpunktabstand variabel.

Die Modellergebnisse und die SO_2 -Messwerte sind in Abbildung 21 zu sehen. Der Anstieg der Konzentrationen während der ersten Stunden, bevor die Front das Untersuchungsgebiet erreicht hat, wurde vom Modell simuliert. Kurz nach dem Durchzug der Front fielen die berechneten Konzentrationen Hand in Hand mit dem einsetzenden starken Südwestwind an der Oberfläche. Die Messungen zeigten jedoch ein langsames Abfallen der Konzentrationen. Dies kommt dadurch zustande, dass im Modell die Schadstoffe aus der Stadt transportiert wurden, während die verschmutzte Luft in Wirklichkeit in den umgrenzten Bereichen des Stadtgebietes stagnierte. Die Windrichtung in der Stadt zeigt eine Tendenz zum Drehen auf Südwest, was

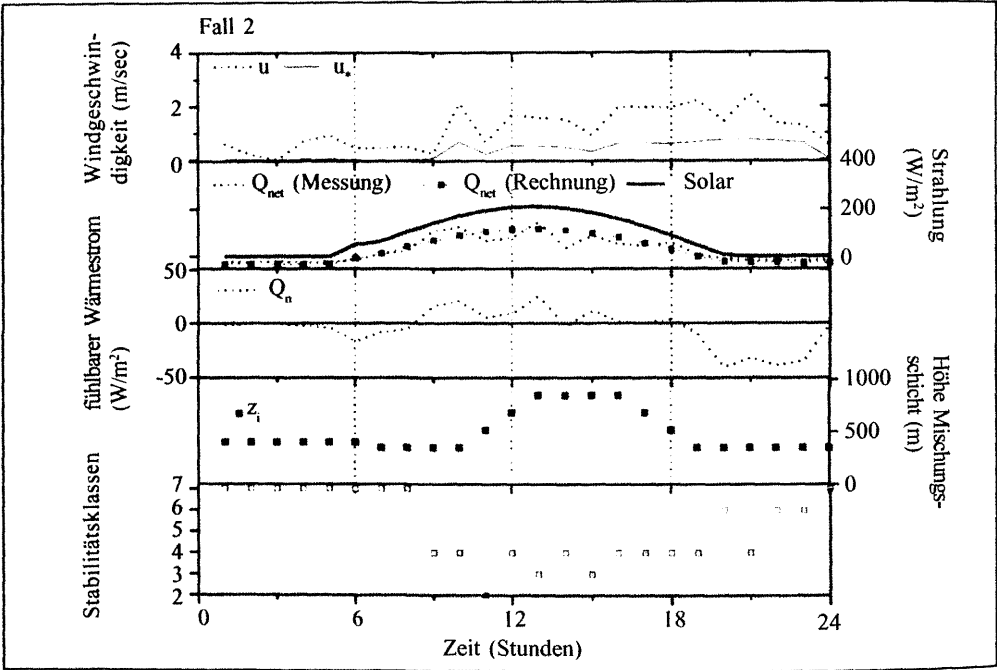


Abb. 20: Grenzschichtparameter (Messung und Rechnung) für Fall 2

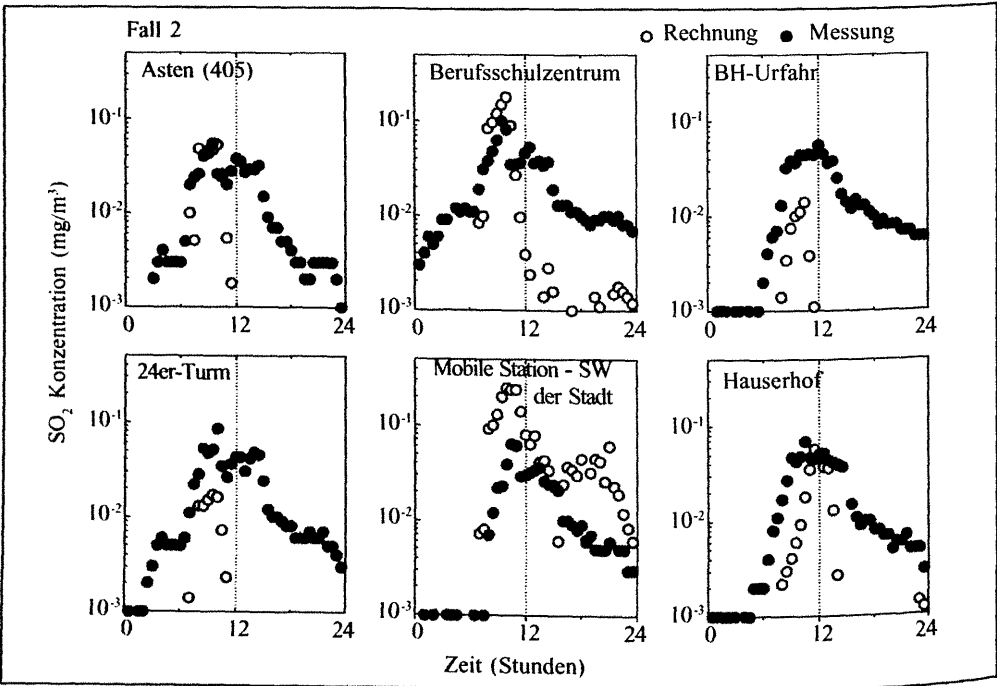


Abb. 21: SO₂-Konzentration (Messung und Rechnung) für verschiedene Stationen (Fall 2)

wiederum ein Indiz für den starken mechanischen Einfluss in den Industriegebieten der Stadt ist. Unter südwestlicher Anströmung der Steyregger Hänge können die Schadstoffe, wie schon erwähnt wurde, in einem Rezirkulationswirbel im Stadtgebiet gefangen werden.

2.4.4.3 Östliche Strömungslage

Strömungen aus östlicher oder südöstlicher Richtung tragen die Schadstoffe aus den Industriegebieten gegen die Berge im Norden und Nordwesten von Linz. Zusätzlich lenken Hangaufwinde die östlichen Winde nach Südosten ab. Der Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen für den 1. Februar 1991 ist in Abbildung 22 dargestellt. An der Station Hauserhof passen Modellergebnis und Messung gut zusammen, in der Nähe der Hänge unterschätzt das Modell in den Morgenstunden.

2.4.4.4 Nordwestliche Strömungslage

Ist eine starke nordwestliche Strömung vorhanden, unterscheiden sich die Windrichtungen an den einzelnen Messstationen im Stadtgebiet nur wenig. Die Schadstoffe werden vorzugsweise aus dem Stadtgebiet hinaus befördert. Abbildung 23 zeigt eine Simulation für sechs Stationen für zwölf Stunden. Bei den Stationen Berufsschulzentrum und ORF-Zentrum stimmen Rechnung und Messung weitgehend überein. An den anderen Stationen findet eine Unterschätzung der Konzentrationen statt.

2.5 Zusammenfassung

Die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutung der thermisch induzierten Strömungssysteme und damit der lokalen Effekte im Linzer Becken. Das Auftreten

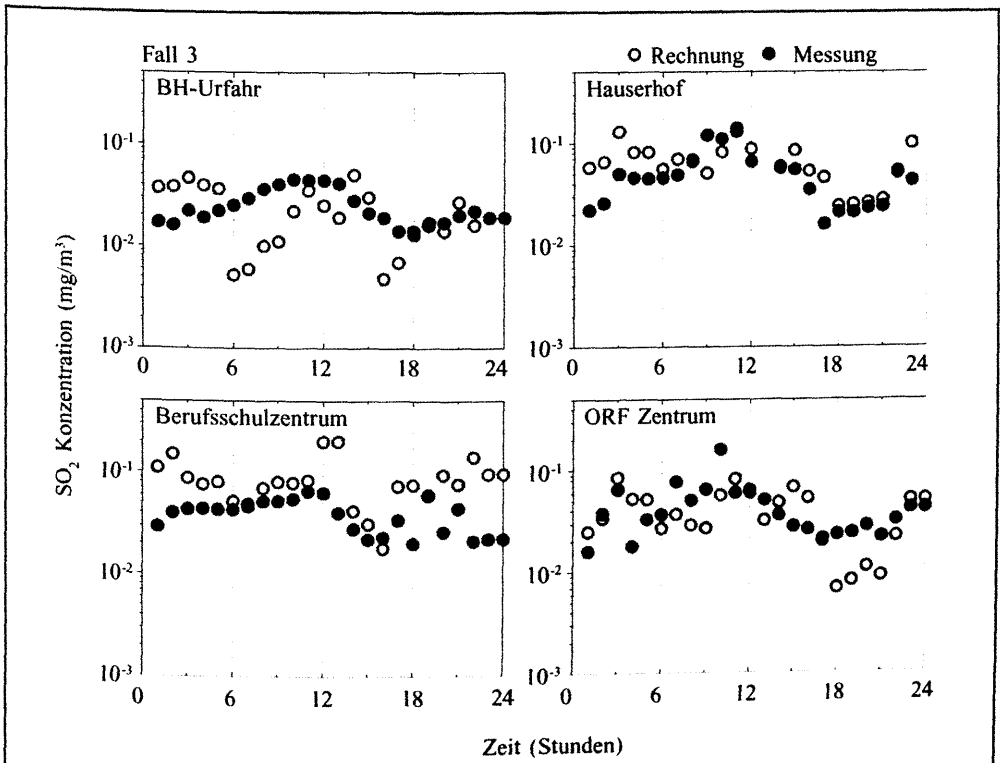


Abb. 22: SO₂-Konzentration (Messung und Rechnung) für verschiedene Stationen (Fall 3)

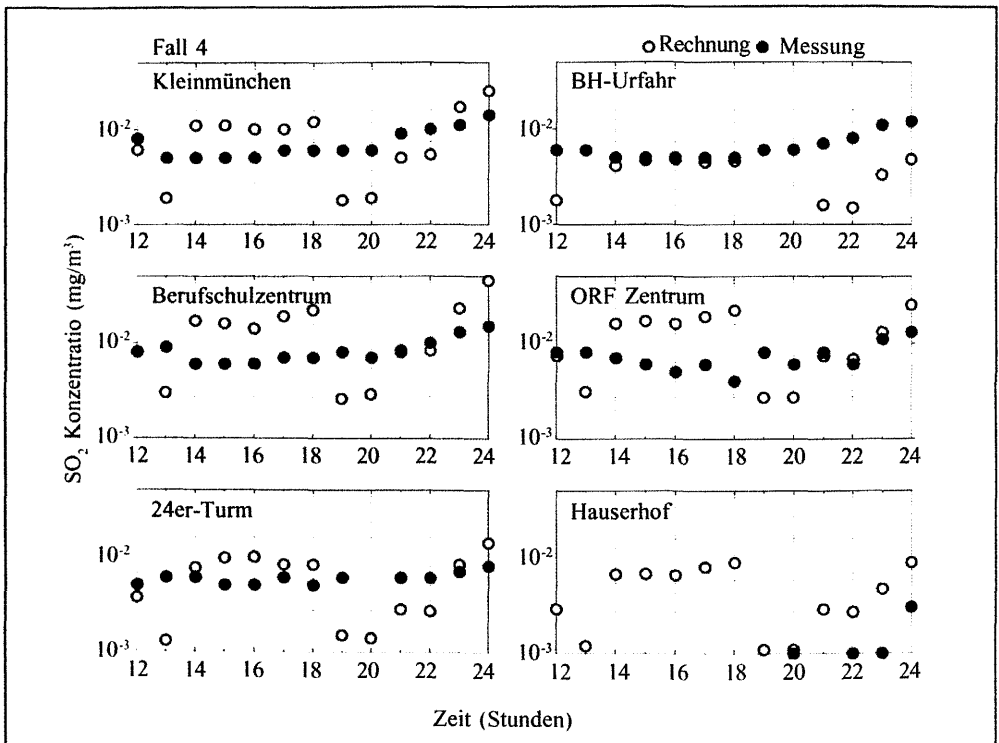


Abb. 23: SO_2 -Konzentration (Messung und Rechnung) für verschiedene Stationen (Fall 4)

dieser Phänomene bei Wetterlagen mit geringem synoptischen Einfluss macht sie unentbehrlich für die Belüftungsverhältnisse im Stadtgebiet. Denn gerade in diesen Situationen fehlt eine reinigende großskalige Strömung, die für eine ausreichende Frischluftzufuhr sorgen könnte.

Um Ursache, Struktur und Wirkungsweise der kleinräumigen Strömungen erfassen und sie so

aktiv im Planungsprozess berücksichtigen zu können, sollen in den nächsten Kapiteln einerseits die thermischen Verhältnisse im Linzer Becken, die als primäre Antriebsmechanismen für die Strömungen dienen und andererseits einige markante Kaltluftströmungen vermessen und analysiert werden.

3 DIE WÄRMEINSEL

3.1 Einleitung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Ausprägung bzw. der Intensität des Wärmeinseleffektes im Linzer Stadtgebiet. Als Grundlage dienen die Daten der permanenten Messstellen, die durch temporäre Messnetze, Messfahrten, gelände-

klimatische Kartierungen, Feldexperimente usw. wesentlich ergänzt werden mussten, um Darstellungen in großmaßstäblichen Karten zu ermöglichen. Die Kenntnis der Strukturen der Wärmeinsel dient vor allem dem besseren Verständnis der durch diese hervorgerufenen kleinräumigen Windfelder, die den Luftwechsel in

der Stadt in gradientschwachen Perioden entscheidend mitgestalten. Die Auswertung der Daten und Beschreibung der auftretenden Strukturen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit (LANGER 1999) vorgenommen, der große Teile dieses Kapitels entnommen worden sind.

Zunächst soll überprüft werden, ob im Stadtgebiet von Linz die Ausprägung einer städtischen Wärmeinsel beobachtet werden kann. Kann diese grundsätzliche Frage mit „Ja“ beantwortet werden, so gilt es folgende Themen näher zu behandeln:

- * Beschreibung der Linzer Wärmeinsel, ihre Ausprägung, Intensität etc. unter Berücksichtigung von tageszeitlich und jahreszeitlich bedingten Unterschieden sowie unter Berücksichtigung von variierenden Wetterlagen.

- * Beschreibung der Bildung sowie dem Abklingen einer städtischen Wärmeinsel unter besonderer Berücksichtigung der dafür notwendigen Zeitspanne.

- * Analyse bezüglich eines möglichen Zusammenhangs zwischen der vor Ort vorherrschenden Temperaturverteilung und Bebauungsstruktur. Hier ist insbesondere interessant, ob Aussagen bezüglich der Festlegung der Intensität der Wärmeinsel anhand von Stadtstrukturen getroffen werden können.

Weiters soll näher auf die im Zuge dieser Untersuchung gewählten Messmethoden zur Erfassung einer städtischen Wärmeinsel eingegangen werden. Grundsätzlich werden zur umfangreichen Beschreibung der Linzer Wärmeinsel Daten aus vier unterschiedlichen Messverfahren herangezogen:

- * Daten der Einzelmessstationen des Landes Oberösterreich
- * Daten aus PKW-Messfahrten
- * Daten aus Straßenbahn-Messfahrten
- * Daten aus einem Thermalsatellitenbild

Diese einzelnen Messverfahren sollen auf ihre Eignung für die Erfassung einer Temperaturverteilung innerhalb der Stadt kritisch beleuch-

tet und geprüft sowie Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

3.2 Zur Theorie der städtischen Wärmeinsel

In Städten kann die Temperatur, abhängig von Tages- und Jahreszeit, um einige °C höher als in der Umgebung sein. Dazu trägt einerseits die erhöhte Strahlungsaufnahme durch verstärkte Gegenstrahlung bzw. Eigenstrahlung der Dunstschicht und teilweise geringe Albedo der Stadt bei, andererseits der geringe Anteil der Flächen mit Vegetation, folglich geringere Kühlwirkung der Wasserverdunstung von den Pflanzen und die anthropogene Wärmezufuhr durch Industrie, Verkehr und Heizung. Die höheren Temperaturen über dem Stadtzentrum, die bei Vorhandensein einer städtischen Wärmeinsel im Vergleich zum weniger dicht bebauten Umland herrschen, bewirken konvektive Verhältnisse über dem innerstädtischen Bereich. Diese sind speziell während der Abend- und frühen Nachtstunden, wenn der Temperaturunterschied in der Regel am größten ist, besonders ausgeprägt.

Als Folge davon steigt über dem Stadtzentrum die erwärmte, spezifisch leichtere Luft auf, über dem kälteren Umland sinkt die abgekühlte, spezifisch schwerere Luft ab. In Erdbodennähe bildet sich eine Ausgleichsströmung vom kalten zum warmen Teilgebiet. In der Höhe besteht umgekehrt eine Ausgleichsströmung vom wärmeren zum kälteren Gebiet. Grenzen also unterschiedlich warme Gebiete aneinander, wie dies bei einer Wärmeinsel der Fall ist, so entstehen thermische Windsysteme. Das Stadtzentrum saugt sozusagen die Luft aus dem Umland an. Das Abführen der Luft infolge des Aufsteigens über dem Zentrum und das Nachströmen der Luft aus dem Umland bewirken einen Luftaustausch im Stadtgebiet.

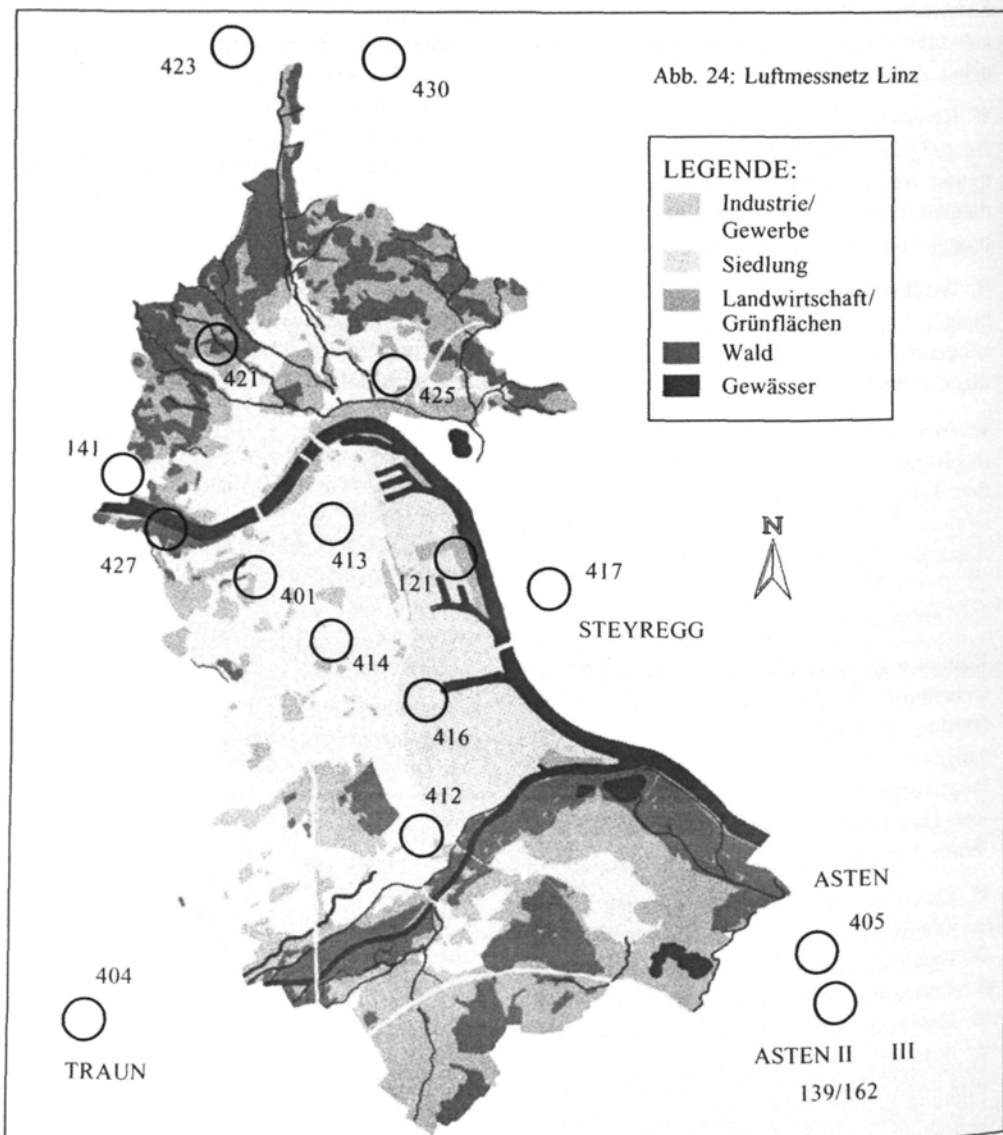
3.3 Beschreibung der Messverfahren

Für die Erfassung und Beurteilung der städtischen Wärmeinsel wurden die Daten der Messstellen des Landes Oberösterreich im Linzer

Stadtgebiet, die auch für die bisherigen Analysen verwendet wurden, herangezogen und durch weitere Messungen, welche aus Messfahrten mit PKW und Straßenbahn bestanden, ergänzt. Als weiteres Hilfsmittel diente ein Thermalsatellitenbild. Die Basis für die Auswertung der Temperaturmessfahrten mit Straßenbahn und PKW bildeten die im Jahr 1997 aufgezeichneten Werte der Einzelmessstationen des Luftmessnetzes Linz (Abb. 24).

Bei den PKW-Messfahrten wurde ein Thermoelement mit feiner Spitze vom Typ K in ca. 25 cm Entfernung zur Motorhaube an der Beifahrerseite an einer Stange montiert. Alle 10 Sekunden wurde ein Temperaturwert aufgezeichnet, die Ortszuordnung erfolgte händisch. Die Fahrtroute lehnte sich einerseits an den Verlauf der Straßenbahnmessfahrt an und führte andererseits - um einen Ost-West-Querschnitt des Temperaturprofils zu erstellen - vom Freinberg im Westen

Abb. 24: Luftmessnetz Linz



der Stadt durch das Industriezentrum bis nach Steyregg im Osten. Teilweise musste von der vor Fahrtantritt festgelegten Fahrtroute abgewichen werden, da nicht einkalkulierbare Umleitungen, aber auch Einbahnsysteme eine planmäßige Fahrt verhinderten.

Bei den Messfahrten mit einer Straßenbahn wurde ein Thermoelement mit feiner Spitze (Typ K bzw. Nickel-Chrom-Nickel-Element) am Dach einer Straßenbahngarnitur der Linie 1 oberhalb des Führerhauses vor den Heizelementen installiert. Die Fahrt führte von der Universität im Norden der Stadt über die Donau nach Auwiesen. Das Stadtgebiet wurde dabei in einem annähernd Nord-Süd verlaufenden Profil durchkreuzt. Eine Aufzeichnung der Werte der Lufttemperatur erfolgte alle 10 Sekunden, die jeweilige Ortszuordnung konnte nur mittels eines allgemein gültigen Fahrplanes erfolgen.

Mit der Infrarot-Thermographie erhält man ein Bild der momentanen Temperaturverteilung an der Erdoberfläche. Das Messprinzip beruht darauf, dass die Oberflächentemperatur eines Körpers berührungslos aus der Ferne durch Messung seiner infraroten Wärmestrahlung ermittelt werden kann. Der Einsatz eines Messflugzeuges bzw. wie in vorliegendem Fall eines Satelliten mit einem Scanner als Detektor für das thermische Infrarot ermöglicht die Aufnahme hoch aufgelöster Wärmebilder für ganze Regionen. Die digitalen Bilddaten werden von Scannern erhoben, die die Erdoberfläche zeilenweise abtasten und dabei in kleinen quadratischen Bildausschnitten (Pixel) die von der Erdoberfläche reflektierte oder emittierte Strahlung aufnehmen. Jedes Pixel entspricht dabei einem bestimmten Geländeausschnitt, in vorliegender Aufnahme einer quadratischen Fläche mit einer Seitenlänge von 120 m. Es erscheint bei Schwarzweißaufnahmen als ein bestimmter Grauwert, bei farbigen Satellitenbildern als Farbwert. Allgemein handelt es sich um ein optomechanisches Aufnahmesystem (Landsat TM), welches eine spektrale Auflösung bietet, in der Wellenbereiche auch außerhalb des sichtbaren Bereiches visualisiert werden können.

Vorliegendes Thermalsatellitenbild spiegelt die Wärmeverteilung an der Erdoberfläche Österreichs wieder. Es wurde in der Nacht vom 9. 10. auf 10. 10. 1986 aufgenommen. Da es sich um eine bereits mehrere Jahre zurückliegende, nicht vollständig katalogisierte Aufnahme handelt, ist die Uhrzeit der Aufnahme leider nicht bekannt. Die Auflösung beträgt bei einer Satellitenhöhe von 705 km über Grund 120 m mal 120 m bzw. 6000 Pixel pro Scan. Es wird vorausgesetzt, dass die Messanordnung Temperaturdifferenzen der Erdoberfläche von 0,5 K in einer 17stufigen Temperaturfarbskala erfasst.

3.4 Überprüfung der Existenz einer Wärmeinsel in Linz

Bevor näher auf die eigentliche Fragestellung der Analyse der Wärmeinsel eingegangen werden kann, muss zunächst untersucht werden, ob im Bearbeitungsgebiet - dem Großraum Linz - das Phänomen einer städtischen Wärmeinsel nachgewiesen werden kann und - wenn ja - wie intensiv diese ausgeprägt ist. Als Datengrundlage werden die einer Datenkorrektur unterworfenen Halbstundenmittelwerte der Lufttemperatur der Einzelmessstationen des Landes Österreichs aus dem Jahr 1996 und 1997 herangezogen.

Zunächst werden aus den zur Verfügung stehenden Messdaten aus dem Jahr 1997 die Tagesmittelwerte pro Messstation aus den Temperaturwerten der Messtermine 7 Uhr und 14 Uhr plus zweimal 21 Uhr, dividiert durch vier (Tagesmittelwertbildung durch WMO festgelegt) ermittelt. Anschließend werden aus der Summe der Tagesmittel pro Station und Monat, dividiert durch die Anzahl der Tage pro Monat die Monatsmittelwerte sowie Jahresmittelwerte (Summe der Monatsmittelwerte dividiert durch Anzahl der Monate) der Lufttemperatur errechnet. Diese Jahres- bzw. Monatsmittelwerte der einzelnen Messstationen sollen im Folgenden miteinander verglichen werden, wobei - ebenfalls zu Vergleichszwecken - auch die Jahres- bzw. Monatsmittelwerte aus dem Vorjahr herangezogen werden.

Als Bezugspunkt wird in beiden Jahren die Station S405-Asten gewählt, da diese - trotz ihrer Lage in der Hauptwindrichtung von Linz - kaum vom Ballungsgebiet beeinflusst wird und inmitten eines vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebietes außerhalb der Stadt liegt.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass vorläufig nur jene Stationen zur Berechnung des Jahresmittels der Lufttemperatur herangezogen werden, die einerseits im Stadtgebiet von Linz liegen und andererseits in gleicher Höhenlage (± 50 m) wie die Bezugsstation Asten (255 m) angebracht sind. Infolge nur unvollständig vorliegender Daten aus dem Jahr 1997 ist das Jahresmittel nur aus Werten der Monate Jänner bis Oktober berechnet. Um einen gleichwertigen Vergleich darstellen zu können, wird im Jahr 1996 ebenfalls nur diese Zeitspanne zur Errechnung der Jahresmittelwerte herangezogen. Auch bei der Berechnung des Monatsmittels werden nur die Daten jener Stationen berücksichtigt, die bereits bei der Errechnung des Jahresmittels hinzugezogen worden sind.

Die dadurch erhaltenen Ergebnisse sollen einerseits die Aussage über die Existenz einer

städtischen Wärmeinsel in Linz bekräftigen und andererseits Informationen über den Jahresgang der städtischen Wärmeinsel liefern und jene Monate mit dem Hauptmaximum bzw. dem Zweitgipfel der Wärmeinselintensität ausweisen. Darauf aufbauend kann im Folgenden auf die weiteren Fragestellungen besser eingegangen werden, da sich die Untersuchungen im Wesentlichen auf die Daten jener Monate mit aufgezeigtem Wärmeinselmaximum beschränken können.

Bei der näheren Analyse der Lufttemperaturdaten der Einzelmessstationen im Stadtgebiet von Linz zeigt sich, dass die Jahresmittelwerte der Stadtstationen der Jahre 1996 und 1997 im Durchschnitt um 1,2 K höher liegen als jene Werte der Freilandstation Asten (siehe auch Abb. 25 bzw. Tab. 2). Dies lässt - in Anlehnung an die oben erwähnte Definition einer Wärmeinsel - darauf schließen, dass in Linz grundsätzlich die Existenz einer städtischen Wärmeinsel nachgewiesen werden kann.

Um jene Monate hervorheben zu können, in denen die Wärmeinsel ihre maximal mögliche Intensität erreicht, wird im Weiteren näher auf die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur der

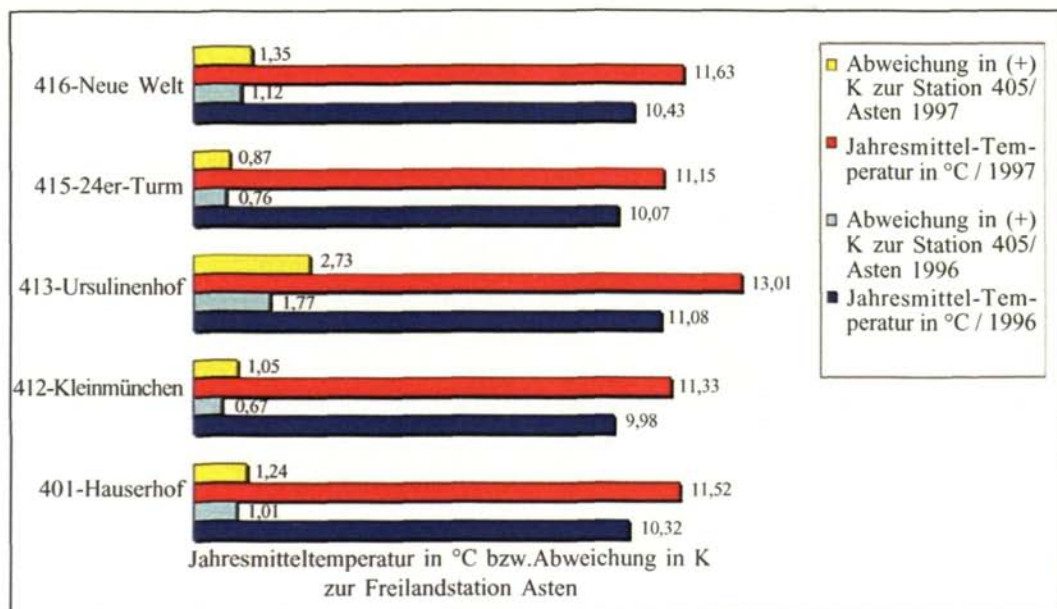


Abb. 25: Übersicht der errechneten Jahresmittelwerte der Einzelmessstationen der Stadt Linz

Tab. 2: Errechnete Jahresmittelwerte 1996 und 1997 aus den Daten der Einzelmessstationen

Station	Jahresmittelwert in °C / 1996	Abweichung der Lufttemp. in K zur Basis- station (1996)	Jahresmittelwert in °C / 1997	Abweichung der Lufttemp. in K zur Basis- station (1997)
401 Hauserhof (290m)	10,32	1,01	11,52	1,24
412 Kleinmünchen (258m)	9,98	0,67	11,33	1,05
413 Ursulinenhof (262m)	11,08	1,77	13,01	2,73
415 24er-Turm (255m)	10,07	0,76	11,15	0,87
416 Neue Welt (265m)	10,43	1,12	11,63	1,35
Bezugsstation Asten (255m)	9,31		10,28	
Durchschnittliche Abwei- chung in K pro Jahr		1,07		1,45
Durchschnittliche Abwei- chung in K gesamt		1,26		

Tab. 3: Monatsmitteltemperaturdifferenzen in K 1996 zur Freilandstation Asten

Station	Jän.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okto.	Nov.	Dez.
401	1,20	1,40	0,90	1,10	0,80	0,90	0,90	1,10	0,70	1,10	1,20	1,10
412	1,10	1,20	0,80	0,50	0,40	0,40	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,90
413	2,30	2,70	-	-	-	-	2,40	2,40	4,90	2,20	2,20	2,20
415	0,60	1,10	0,80	0,80	0,70	0,80	0,70	0,80	0,50	0,80	0,90	1,90
416	0,90	1,10	0,80	1,10	1,10	1,40	1,40	1,40	0,90	1,10	1,10	1,00
Ø Temp. Dif- ferenz in K	1,22	1,50	0,83	0,88	0,75	0,88	1,18	1,26	1,52	1,16	1,22	1,42

Einzelmessstationen der Jahre 1996 und 1997 eingegangen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass der Jahresgang einer städtischen Wärmeinsel in mitteleuropäischen Breiten ein Hauptmaximum im Februar und einen Zweitgipfel im Juni bis August aufweist (FEZER 1995).

Bei der Betrachtung der einzelnen Monatsmittelwerte pro Station kann über den Jahresgang der Wärmeinsel keine konkrete Aussage gemacht werden, da die aufgezeigten maximalen Temperaturunterschiede - angegeben in K zur Freilandstation Asten - über die gesamte Untersuchungsperiode verstreut liegen (Tab. 3) und der Nachweis eines Hauptmaximums somit nicht erbracht werden kann. Daher wird in weiterer Folge die durchschnittliche Differenz der Lufttemperatur der einzelnen Stadtstationen Linz-Hauserhof (S401), Linz-Kleinmünchen (S412), Linz-Ursulinenhof (S413), Linz-24er Turm (S415) und Linz-Neue Welt

(S416) zur Messstation Asten ermittelt und darauf aufbauend das arithmetische Mittel errechnet. Für das Jahr 1996 ergibt sich dadurch ein eindeutiges Lufttemperaturdifferenz-Maximum zur Station Asten im Februar und September, wie auch aus Abb. 26 ersichtlich ist.

Im Jahr 1997 liegt das Maximum der Temperaturdifferenz zur Station Asten eindeutig im September, gefolgt vom Sommermonat Juli. Das bedeutet, dass auch im Jahr 1997 die Intensität der Wärmeinsel im September am stärksten ausgebildet ist (Abb. 27). Im Februar werden gegenüber der unmittelbar angrenzenden Monate höhere Werte gemessen, jedoch kann die durchschnittliche Temperaturdifferenz zur Station Asten insgesamt gesehen nur an sechster Stelle nach den Sommermonaten eingereiht werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die zuvor getätigte Aussage im Kontext mit der Intensität der städtischen Wärmeinsel (Haupt-

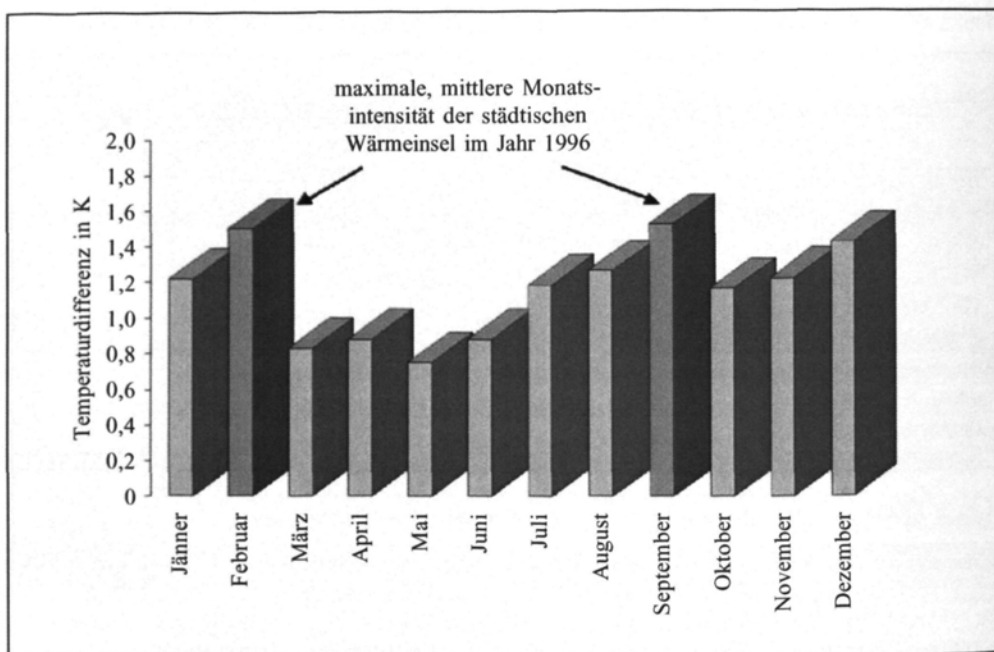


Abb. 26: Monatsmittelwertdifferenz in K zur Freilandstation Asten 1996

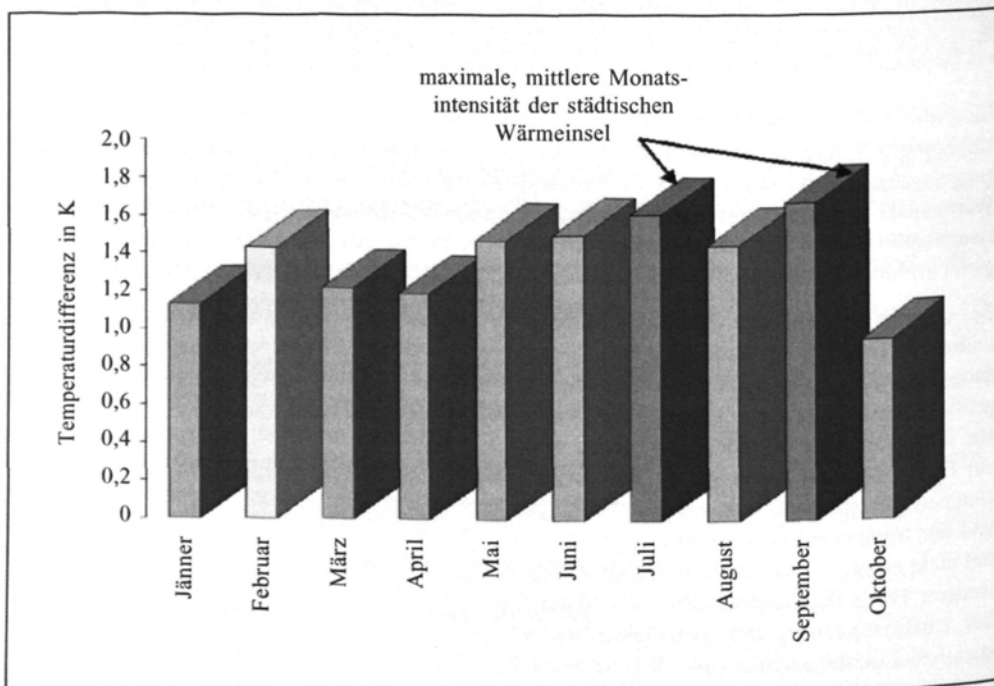


Abb. 27: Monatsmittelwertdifferenz in K zur Freilandstation Asten 1997

maximum im Februar, Zweitgipfel von Juni bis August) zumindest auf die herangezogene Untersuchungsperiode 1996 und 1997 nur zum Teil zutrifft. Das Hauptmaximum wird in beiden Jahren - wenngleich auch nicht sehr eindeutig zu anderen Monaten differenziert - im September, der Zweitgipfel vor allem im Jahr 1996 im Februar erreicht. Bei weiterführenden Untersuchungen sollte daher im Folgenden ein besonderes Augenmerk auf die Sommermonate, insbesondere den September sowie den Wintermonat Februar gelegt werden.

3.5 Die Intensität der städtischen Wärmeinsel im Tagesgang

Um im Folgenden näher auf die tageszeitliche Intensität der städtischen Wärmeinsel einzugehen, ist es zunächst von Interesse, die täglichen, maximal bzw. minimal sowie durchschnittlich verzeichneten Temperaturunterschiede zwischen dem Stadtgebiet und dem Freiland innerhalb einer Häufigkeitsverteilung darzustellen. Dazu werden vorläufig wieder die einer Datenkorrektur unterzogenen Werte jener Einzelmessstationen des Landes Oberösterreich herangezogen, die bereits bei vorangegangener Fragestellung Verwendung gefunden haben.

Zunächst wird pro Tag und Messstation wiederum der Tagesmittelwert errechnet, welcher anschließend dem Tagesmittelwert der Station Asten gegenübergestellt wird. Dadurch können die Werte der Lufttemperaturdifferenz zur Freilandstation abgelesen und miteinander verglichen werden. Pro Tag werden Maximum, Minimum und Mittelwert der ausgewiesenen Temperaturdifferenzen gebildet und innerhalb der Häufigkeitsverteilung dargestellt. Die Urliste der Häufigkeitsverteilung enthält insgesamt $n = 302$ Werte, bei der Klasseneinteilung wird der allgemein gültige Richtwert $\bar{O}_n$ berücksichtigt und die Klassenbreite d mit 1K festgelegt. Die relative Häufigkeit wird in die Tabelle aufgenommen und bestimmt das Verteilungsmuster.

Anschließend werden einzelne Fälle aufgegriffen und näher analysiert, um Aussagen über

das Zusammenspiel der meteorologischen Parameter bezogen auf die Intensität der Wärmeinsel treffen zu können. Wie bereits festgestellt wurde, ist die jahreszeitliche Intensität der städtischen Wärmeinsel innerhalb der Untersuchungsperiode 1997 im Monat September am stärksten ausgeprägt. Die gewählten Beispiele einer maximalen bzw. minimalen Temperaturdifferenz sind deshalb vorrangig in diesem Monat zu suchen. Zunächst werden aus den zur Verfügung stehenden, korrigierten meteorologischen Daten der Einzelmessstationen Mittelwerte errechnet und die einzelnen Ergebnisse innerhalb einer Übersichtstabelle miteinander verglichen. Tage, an denen die Werte der einzelnen Parameter nur maximal 10 Prozent voneinander abweichen und überdies eine Extremsituation aufweisen - das sind Tage mit ausgewiesenem Maximum bzw. Minimum eines meteorologischen Parameters - werden zur näheren Analyse aufgegriffen und auf Regelmäßigkeiten bzw. Gemeinsamkeiten in Bezug auf meteorologische Bedingungen untersucht. Dadurch soll das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren besser erläutert werden.

Die tageszeitliche Intensität einer städtischen Wärmeinsel ist unter anderem von verschiedenen meteorologischen Gegebenheiten abhängig. Beispiele sind, dass Wolken - zumindest bei Tag - die Bildung einer Wärmeinsel verhindern und dass geringe Windgeschwindigkeiten die Intensität der Wärmeinsel erhöhen (FEZER 1995). Somit sei dargelegt, dass die unmittelbar vorherrschende Wettersituation einen wesentlichen Einfluss auf den Tagesgang der Lufttemperatur nimmt. Bei Strahlungswetterlage wird ein stark ausgeprägter Tagesgang der Lufttemperatur erwartet; die Temperaturdifferenzen der Stadtstationen zur Freilandstation werden höher ausfallen, als bei Wetterlagen mit geringer Einstrahlung bzw. höherem Bedeckungsgrad.

Ein Vergleich der Tagesmittelwerte der Stadtstationen Linz-Hauserhof (S401), Linz-Kleinmünchen (S412), Linz-Ursulinenhof (S413), Linz-24er-Turm (S415) und Linz-Neue Welt (S416) zur

Freilandstation Asten zeigt, dass die maximal erreichten Temperaturdifferenzen innerhalb der Messperiode 1997 bis 5,10 K betragen. In Abbildung 27 ist die Häufigkeitsverteilung der maximal sowie minimal und durchschnittlich verzeichneten Temperaturdifferenzen zwischen den Stadtstationen und der Freilandstation Asten dargestellt.

Abbildung 28 zeigt, dass die Spannweite der maximalen Temperaturdifferenz von 0,33 K bis 5,10 K reicht. Die im Beobachtungszeitraum am häufigsten vorkommenden Temperaturdifferenzen liegen in jener Klasse mit einer Temperaturdifferenz von 2 K bis 3 K. Die minimalen Temperaturdifferenzen bewegen sich von -2,10 K bis 2,08 K, liegen daher zum Teil unterhalb der in der Freilandstation Asten verzeichneten Temperaturwerte. Die größte, relative Häufigkeit wird in Klasse 4 mit einer Temperaturspanne von 0 K bis 1 K registriert. Bei den durchschnittlichen Temperaturdifferenzen fallen 169 der insgesamt 302 Werte in die Klasse mit der Spannweite von 1 K bis 2 K, allgemein werden Temperaturdifferenzen von -0,43 K bis 3,67 K registriert.

Bei der genaueren Analyse ausgewählter Tage des Monats September, jenem Monat, in dem die Intensität der Wärmeinsel ein Maximum erreicht, werden zunächst alle registrierten, meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Strahlungsbilanz, Globalstrahlung, relative Feuchte und Regenmenge) der in annähernd gleicher Höhenlage befindlichen Einzelmessstationen in Linz ausgewertet und in der Übersichtstabelle (Tab. 4) miteinander verglichen.

Da die Tage 15. und 16. September maximale Werte aufweisen und überdies nur durch Abweichungen von höchstens 10 Prozent zueinander gekennzeichnet sind, werden die ausgewählten Tagesgänge der Lufttemperatur als Vertreter von „Schönwettertagen des Septembers 1997“ auf eventuelle Regelmäßigkeiten bzw. Gesetzmäßigkeiten untersucht. Ebenso wird mit den minimalen Werte aufweisenden Schlechtwettertagen - 13. 9. 1997 und 30. 9. 1997 - verfahren.

Nach (FEZER 1995) wird der typische Tagesgang einer Wärmeinsel folgendermaßen beschrieben: Die Tagesgang-Linien der Stadt- und Umge-

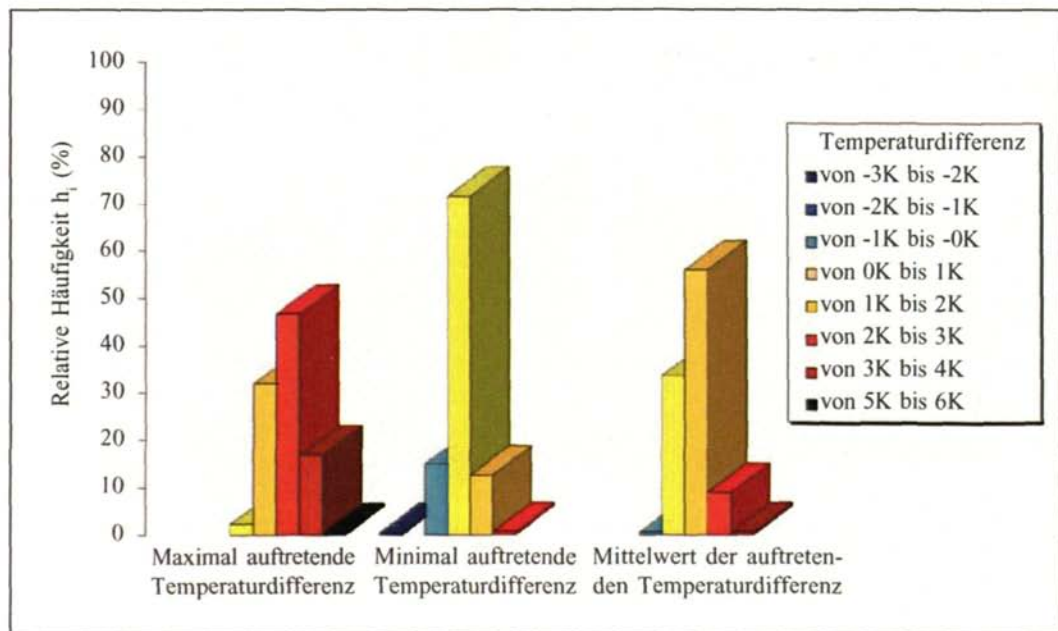


Abb. 28: Häufigkeitsverteilung der innerhalb der Messperiode 1997 auftretenden maximalen, minimalen und durchschnittlichen Temperaturdifferenzen der Stadtstationen zur Freilandstation Asten

Tab. 4: Mittelwerttabelle - meteorologische Parameter, Einzelmessstationen Stadt Linz, Messperiode September 1997

Datum	Sonnenscheindauer in Stunden	Regenmenge in mm	Globalstrahlung	Strahlungsbilanz	Windgeschwindigkeit	relative Feuchte	Temperatur Tagesmittel
97 09 01	8,20	0,00	223,17	128,00	0,91	77,64	20,49
97 09 02	12,00	0,00	226,72	122,95	0,84	74,36	21,87
97 09 03	10,70	0,00	200,43	110,33	0,74	75,65	22,26
97 09 04	9,80	0,00	195,09	105,43	1,04	79,67	22,80
97 09 05	7,90	0,00	173,00	98,52	0,56	77,35	22,05
97 09 06	4,90	1,20	135,61	74,49	0,93	81,68	20,89
97 09 07	0,80	6,75	74,03	28,52	1,30	90,42	17,27
97 09 08	11,00	0,00	221,96	123,81	1,41	77,83	17,07
97 09 09	7,20	0,00	181,42	87,82	2,58	70,40	18,33
97 09 10	9,40	0,00	205,63	93,25	2,36	62,85	13,08
97 09 11	11,80	0,00	225,57	117,60	1,15	69,28	15,42
97 09 12	11,60	0,00	202,88	107,52	0,44	73,35	18,96
97 09 13	0,20	6,95	51,65	19,99	1,27	87,74	15,47
97 09 14	8,90	0,00	198,65	101,26	1,32	77,03	12,92
97 09 15	11,60	0,00	215,17	107,26	0,89	70,84	13,44
97 09 16	11,60	0,00	216,13	106,52	0,87	68,90	14,96
97 09 17	11,40	0,00	201,86	105,13	0,61	76,55	15,53
97 09 18	6,10	0,00	186,22	103,82	0,43	78,16	16,81
97 09 19	7,50	17,25	164,90	89,15	1,32	83,09	16,19
97 09 20	10,90	0,00	209,82	100,22	1,05	74,79	11,96
97 09 21	11,10	0,00	209,49	94,65	0,98	72,04	11,70
97 09 22	10,60	0,00	198,20	96,49	0,66	76,78	12,13
97 09 23	11,10	0,00	188,76	94,02	0,37	80,28	13,47
97 09 24	6,50	0,00	136,90	63,96	0,96	78,96	12,74
97 09 25	11,00	0,00	190,15	90,89	1,05	75,17	13,31
97 09 26	10,90	0,00	182,94	86,43	0,52	77,09	13,52
97 09 27	10,60	0,00	176,55	81,60	0,74	77,58	14,20
97 09 28	8,50	0,00	144,07	59,52	0,54	81,98	12,41
97 09 29	10,70	0,00	172,50	74,32	0,40	82,42	12,58
97 09 30	0,30	2,00	51,32	22,95	0,99	86,43	15,40

bungstemperatur laufen am Vormittag dicht beieinander und die Wärmeinsel ist zu diesem Zeitpunkt mit 1,5 K nur schwach entwickelt. Nach Sonnenuntergang klaffen die Linien dann weit auseinander, um Mitternacht ist die Stadt am stärksten überwärmt. In den Abbildungen 29 und 30 ist der Tagesgang der Lufttemperatur von typischen Schönwettertagen im September 1997 dargestellt. Die Sonnenscheindauer (11,6 Stunden pro Tag) sowie die Strahlungsbilanz (durchschnittlich 106 W/m²) und Globalstrahlung (durchschnittlich 215 W/m²) liegen nahe den im September erreichten Maximalwerten. Windgeschwindigkeit (durchschnittlich 0,88m/

s) sowie relative Feuchte (durchschnittlich 69 Prozent) bewegen sich nahe der minimalen Grenzwerte des Septembers.

Bei näherer Betrachtung des Tagesganges der Lufttemperatur der Schönwettertage der einzelnen Messstationen wird in Abb. 29 sowie in Abb. 30 festgestellt, dass die Lufttemperaturwerte der Stadtstationen zur Freilandstation Asten (S405) - je nach Tageszeit und Station unterschiedlich - mehr oder weniger stark voneinander abweichen. Vergleicht man jene Station in Innenstadtlage mit sehr dichter Bebauungsstruktur - Messstation S413-Linz Ursulinenhof - mit der Freilandstation Asten, so wird die aufgestellte

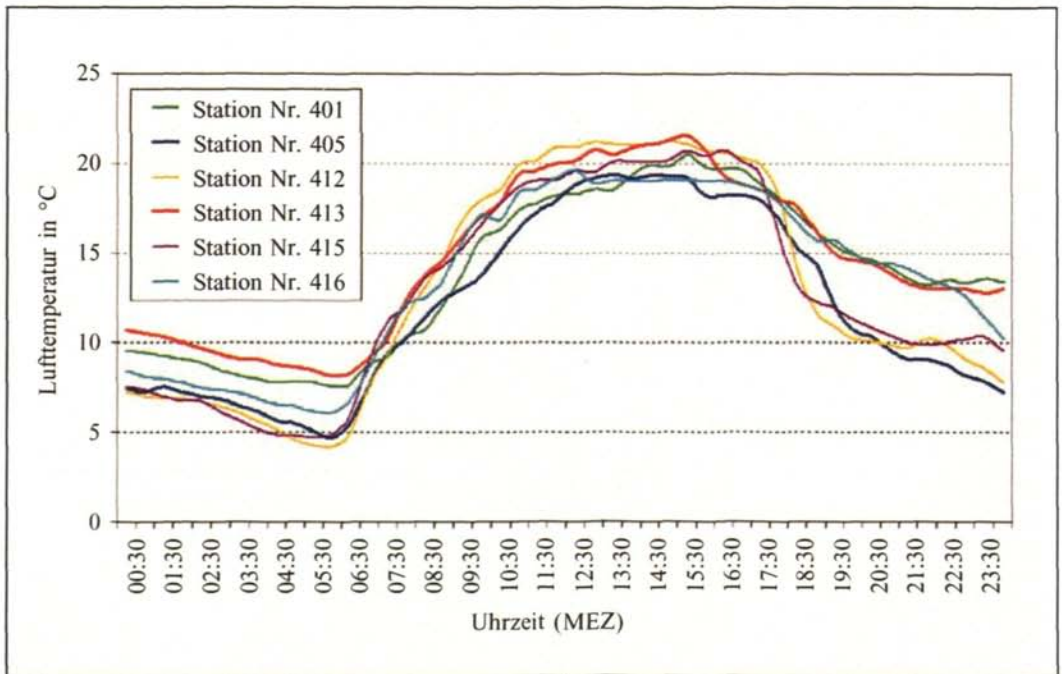


Abb. 29: Beispiel einer maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Stadtstationen und der Freilandsstation Asten (15. 09. 1998)

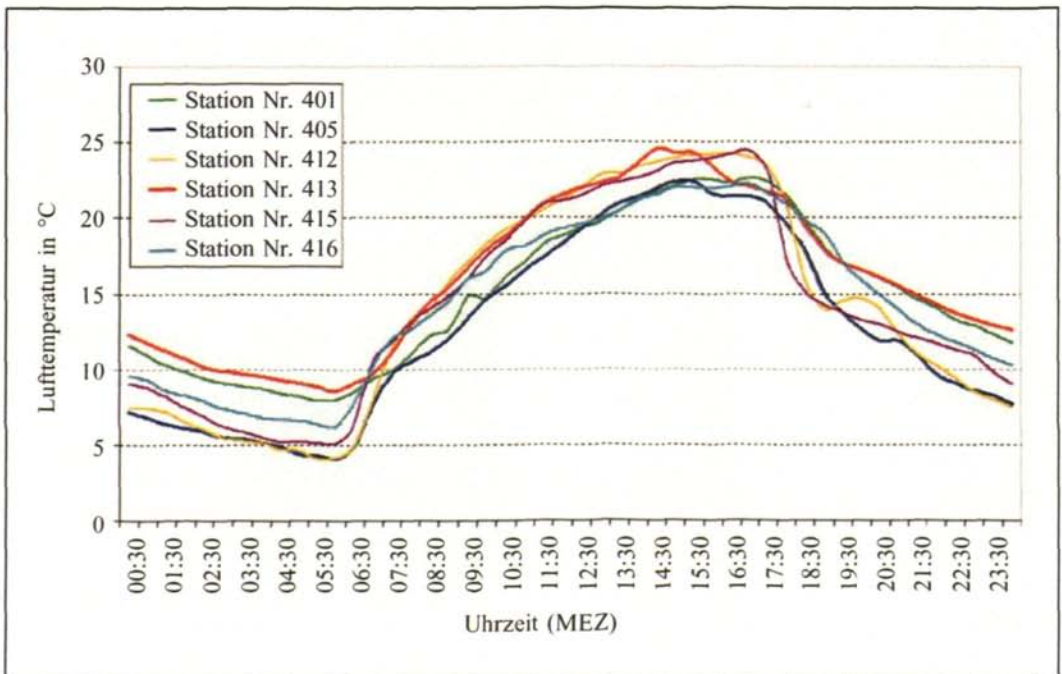


Abb. 30: Beispiel einer maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Stadtstationen und der Freilandsstation Asten (16. 09. 1998)

Behauptung über den Tagesgang der Wärmeinsel (FEZER 1995) bestätigt.

Die Lufttemperaturwerte in den Stunden vor Sonnenaufgang (bis ca. 6:30 / 7:00 Uhr) sowie in den Abendstunden nach 19:30 Uhr weichen stark voneinander ab (Abweichung um ca. 3 K bis 4 K); das Maximum der Temperaturdifferenz zur Station Asten wird gegen Mitternacht erreicht. Untertags laufen die beiden Tagesganglinien annähernd parallel und dicht beieinander mit ca. 1 K bis 2 K Temperaturdifferenz.

Die Intensität der Wärmeinsel ist zu diesem Zeitpunkt eindeutig schwächer entwickelt als vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang. Die Schönwetter-Tagesgänge der Stationen S412 und S415 - beide Stationen befinden sich in sehr locker bebautem Gebiet mit einem hohen Grünflächenanteil - zeigen einen zur Station S413 gegenteiligen Temperaturverlauf. Während das Temperaturniveau in den Stunden kurz vor und kurz nach Mitternacht annähernd in gleicher Höhe zur Freilandstation Asten liegt (teilweise werden sogar Werte unterhalb jener der Freilandstation ausgewiesen), verläuft die Tagesgangkurve untertags ab ca. 8:30 Uhr nach einem steilen Anstieg im Bereich des Temperaturniveaus der Innenstadtstation S413, um ab ca. 18:30 Uhr wieder stark auf das Niveau der Freilandstation abzufallen.

Das Freiland bzw. Grünland kühlt am späten Nachmittag stärker aus, ein Phänomen, welches auch bei den Stationen S412 und S415 bemerkbar ist. Da man es hier jedoch mit Messstationen innerhalb des Stadtgebietes zu tun hat, ist die Kategorisierung der Stationen S412 und S415 als Freilandstationen nicht optimal. Günstiger erscheint es, die angesprochenen Stadtstationen als Referenzstationen für städtische Grünflächen anzusehen. Die Transpiration der Grünflächen senkt die Temperatur um bis zu einige K, wobei die Kühlwirkung in derjenigen Jahres- und Tageszeit am stärksten ist, in der man sie am nötigsten braucht (FEZER 1995).

Die Lufttemperaturwerte der Station S401 (Einzelmessstation inmitten eines Gebietes mit

mittlerer Bebauungsdichte) und der Station S416 (Station westlich der Industrie sowie unmittelbar neben dem Gleiskörper) bewegen sich innerhalb der ausgewerteten Einzelmessstationen meist im Mittelfeld wobei die Station S401 bis auf die Zeit zwischen 7:30 Uhr und 14:00 Uhr höhere Temperaturwerte als die Station S416 aufweist. In Bezug auf die Bebauungsdichte wird die Ursache darin gesehen, dass der südlich der Innenstadt angrenzende Bereich gegenüber der Station S416 einen stärkeren Verbauungsgrad aufweist und somit auch durch höhere Temperaturwerte gekennzeichnet ist. Um die Mittagszeit (gegen 13:30 bis 14:30 Uhr) weisen beide Temperaturkurven annähernd gleich hohe Werte wie die Freilandstation Asten auf.

Die Abbildungen 31 und 32 demonstrieren den Tagesgang der Lufttemperatur von typischen Schlechtwettertagen im September 1997. Die Sonnenscheindauer (0,25 Stunden pro Tag), sowie die Strahlungsbilanz (durchschnittlich 20 W/m²) und Globalstrahlung (durchschnittlich 51 W/m²) liegen nahe den im September erreichten Minimalwerten. Windgeschwindigkeit (durchschnittlich 1,10 m/s) sowie relative Feuchte (durchschnittlich 86 Prozent) bewegen sich nahe den maximalen Grenzwerten des Septembers. Weiters ist zu erwähnen, dass der Vortag jeweils durch schönes Wetter gekennzeichnet war, was die hohen Temperaturdifferenzen kurz nach Mitternacht zwischen den Stadtstationen zur Freilandstation Asten erklärt.

Auch bei den Schlechtwettertagen werden Phänomene ähnlich den zuvor beschriebenen Vorkommnissen festgestellt, obwohl die Temperaturabweichungen der einzelnen Stationen zueinander bei dieser Wettersituation nicht sehr stark ausgeprägt sind. Die höchsten Temperaturwerte werden eindeutig bei Station S413 ausgewiesen, gefolgt von Station S401 und S416.

In Abb. 31 liegen die einzelnen Tagesgangkurven dicht beieinander und weisen im Allgemeinen nur Temperaturdifferenzen von 1-2 K auf. Der um 7:30 Uhr erkennbare steile Anstieg der Temperatur um ca. 5 K sowie der um 11 Uhr folgende, etwas schwächer ausfallende

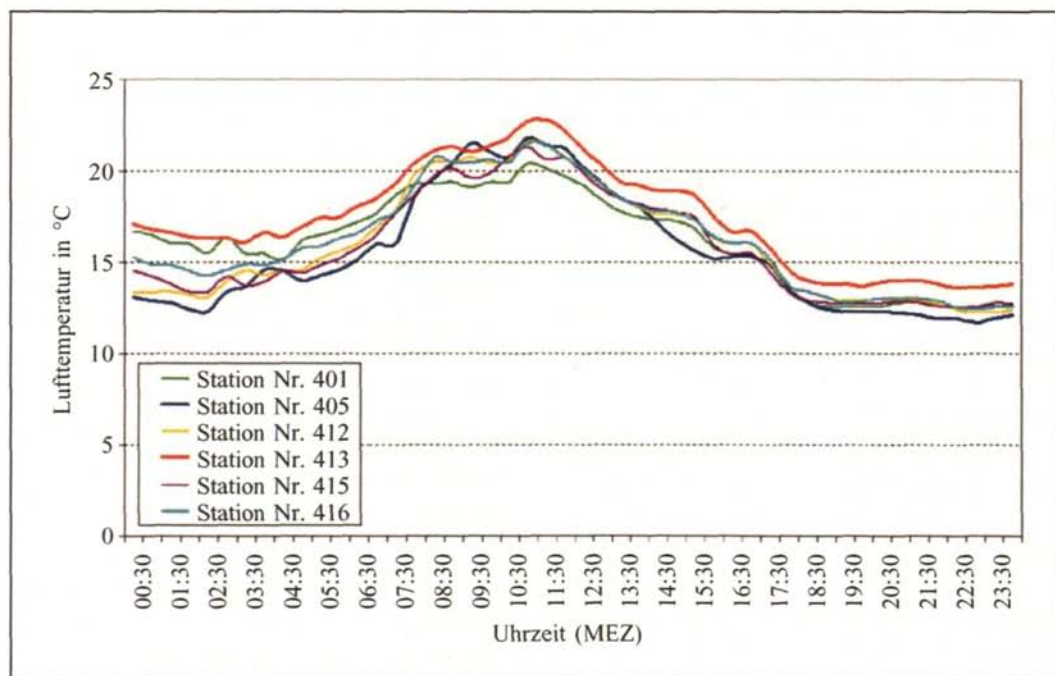


Abb. 31: Beispiel einer minimalen Temperaturdifferenz zwischen den Stadtstationen und der Freilandstation Asten (13. 09. 1998)

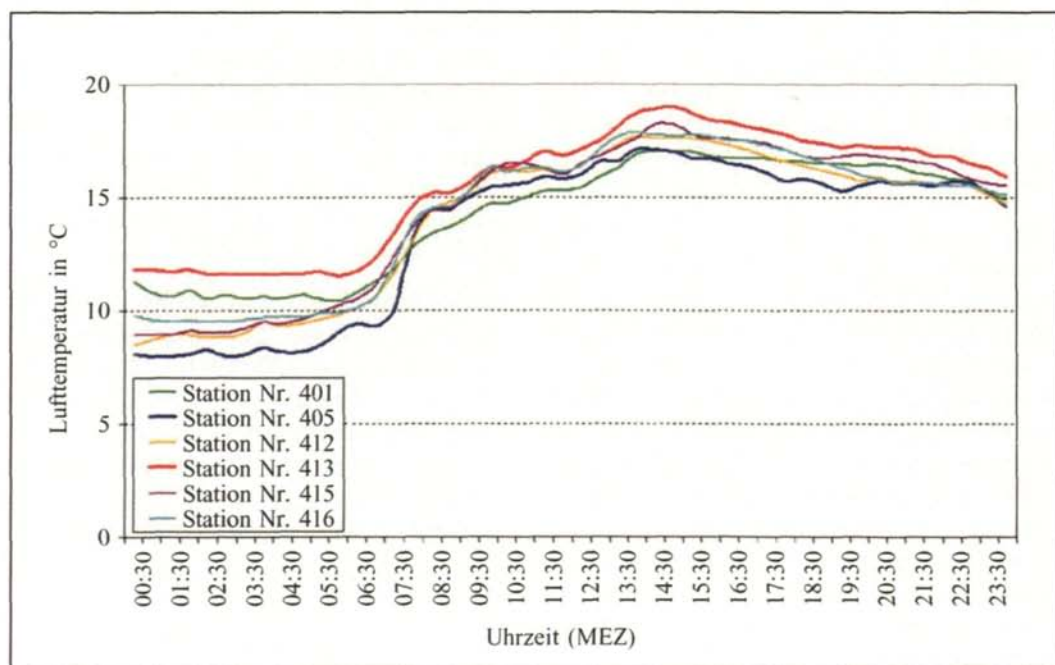


Abb. 32: Beispiel einer minimalen Temperaturdifferenz zwischen den Stadtstationen und der Freilandstation Asten (30. 09. 1998)

Anstieg der Lufttemperatur zeugen von einer kurzfristig aufgeklärten Wetterlage und einem damit verbundenen, ebenfalls kurzfristigen Anstieg der Strahlungsbilanz. Dieses Phänomen ist auch in Abb. 32 ersichtlich. Hier zieht sich der Himmel erst gegen 8:30 Uhr zu, davor ist - wie bei den Schönwettertagen - ein steiler Anstieg der Lufttemperatur nach Sonnenaufgang zu bemerken.

Solange die Wolken nur 1/8 bis 3/8 des Himmels bedecken, werden Ein- und Ausstrahlung kaum behindert, die Strahlungsbilanz steigt sogar leicht an (KESSLER 1985). Aber bei zyklonalen Wetterlagen ist ein viel größerer Teil der Himmelsfläche bedeckt; ab 5/8 fallen Ein- und Ausstrahlung rapid ab, dann ist die Wärmeinsel ganztägig schwach entwickelt. Im Freiland bremsen Nebel die abendliche Ausstrahlung in ähnlicher Weise, die Abkühlung gleicht sich der städtischen an, die Wärmeinsel ist schwach (FUKUOKA u. a. 1989).

Die geringe Intensität einer Wärmeinsel kann auch in Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit erklärt werden. Nach FEZER (1995) zerstreut starker Wind die Warmlufthaube der Stadt und jede Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 1 m/s schwächt die Wärmeinsel um ca. 0,3 K. Bei den dargestellten Tagesgängen der Lufttemperatur an Schlechtwettertagen (Abb. 31 und 32) werden folgende Vorkommnisse beobachtet: Während kurz nach Mitternacht der vorangegangene Schönwettertag ausklingt und durchwegs hohe Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Messstationen verzeichnet werden, sind auch die registrierten Windgeschwindigkeiten minimal. Ab ca. 8 Uhr morgens kommt es bei den betreffenden Tagen zu einem Anstieg der Windgeschwindigkeit, was zu einer Abnahme der Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Messstationen führt.

3.6 Die Linzer Wärmeinsel im Profil

Da die städtische Wärmeinsel ihre stärkste Ausprägung an einem heiteren Sommertag erreicht, ist es zunächst unabdingbar, die Schönwetter-

tage innerhalb der Messperiode 1997 zu ermitteln. Ausgegangen wird von der Station S415 - Linz 24-er Turm - da sie innerhalb des Messprogramms des Landes Oberösterreich die Basisstation zur Berechnung des Temperaturprofils der Stadt Linz darstellt und vergleichsweise zu anderen Stadtstationen mit weiteren Messgeräten zur Erfassung meteorologischer Parameter ausgestattet ist.

Zunächst werden die vorliegenden Daten der Station S415 auf Messfehler untersucht und - wenn notwendig - korrigiert. Bei der Strahlungsbilanz ist innerhalb der Messperiode von 1. 1. 1997 bis 31. 10. 1997 kein Datenausfall zu verzeichnen, die aufgezeichneten Werte liegen innerhalb des Optimalbereiches. Bei der Globalstrahlung werden teilweise Datenausfälle registriert. Da es sich im Allgemeinen um sehr kurzfristige Ausfälle handelt, werden zum Schließen der Lücken in den Beobachtungsreihen die Daten in Anlehnung an angrenzende Werte gemäß einer kontinuierlichen Fortsetzung der Tagesgangkurve ergänzt bzw. die Werte jener Tagesgangkurven übernommen, an denen die Globalstrahlung ähnlich verlaufen ist.

Nach BAUMGARTNER (1956) geht man davon aus, dass unter mitteleuropäischen Bedingungen das sommerliche Tagesmittel der Strahlungsbilanz auf einer Wiese bei 120 W/m² und das sommerliche Tagesmittel der Globalstrahlung auf einer Wiese bei 230 W/m² liegt. Im Winter bewegt sich das Tagesmittel der Globalstrahlung bei 35 W/m² und das Tagesmittel der Strahlungsbilanz bei -10 W/m². Weiters besteht die Annahme, dass diese Werte in der Stadt für gewöhnlich eine leichte Reduktion erfahren. Innerhalb der Messperiode von 1. 1. 1997 bis 31. 10. 1997 werden somit jene Sommer- und Wintertage eruiert, an denen die oben angeführten Werte in Linz erreicht bzw. überschritten werden. Dadurch ist es möglich, eine Anzahl von Tagen zu ermitteln, deren Lufttemperaturwerte in Bezug auf das Profil der Wärmeinsel näher analysiert werden sollen.

Anhand des Studiums der Topographie des Großraumes Linz kann eine Wärmeinsel-Höhen-

profil anhand der in die Untersuchung einfließenden Einzelmessstationen in unterschiedlichen Höhenlagen erstellt werden. Daran anschließend werden die Tagesgangreihen der Sommer- und Wintertage des Jahres 1997 pro Station von den übrigen Daten abgegrenzt und die Tagesgänge in 2-Stunden-Intervalle zerlegt. Pro Intervall wird der entsprechende 2-Stunden-Mittelwert errechnet, wobei die Mittelwerte jener Stationen, die in annähernd gleicher Höhenlage installiert sind, zusammengefasst werden und in der Höhenprofilardarstellung nur durch einen Punkt symbolisiert werden.

Zunächst wird kurz dargestellt, wie aus den Einzelmessstationen das vertikale Temperaturprofil der Wärmeinsel konstruiert werden kann. Tiefstes Niveau des Profils stellt das Stadtniveau dar. Innerhalb dieses Höhenabschnittes befinden sich insgesamt sechs Einzelmessstationen - die Stadtstationen S401, S405, S412, S413, S415 und S416 - deren gemittelte 2-Stunden-Temperatur-Intervalle durch eine weitere Mittelwertbildung zu einem Referenzpunkt zusammengefasst werden. Alle übrigen Einzelmessstationen werden für sich ausgewertet und in die Graphik eingebunden.

Der über Stadtniveau nächst höher gelegene Messpunkt des Profils liegt in 335 m Seehöhe (Station Steyregg S417). Daran anschließend fließen die Messdaten der Stationen Freinberg I (S425) und Freinberg II (S426) in die Erstellung des Temperaturprofils ein. In ungefähr 660 m Höhe ist die Einzelmessstation Magdalenaberg montiert, die den vorletzten Bezugspunkt des Profils widerspiegelt. Den obersten, das Temperaturprofil abschließenden Punkt bildet die Station S429 - Giselawarte in 950 m Seehöhe.

Zusammenfassend sollte das Phänomen einer Inversionswetterlage für die Stadt Linz näher untersucht werden. Dazu werden insgesamt je zwanzig sommerliche sowie winterliche Schönwettertage aufgrund der Strahlungsbilanz und Globalstrahlung ermittelt (Tab. 5 und 6). Die insgesamt vierzig ausgewählten Tage weisen sowohl bei der Strahlungsbilanz wie auch bei der Globalstrahlung Werte über den angenommenen Grenzwerten auf. Als Kontrolle ist in den Tabellen auch der Bewölkungsgrad der Station Linz-Hörsching (Flughafen Linz) des jeweiligen Tages angeführt.

Nach Erstellung des winterlichen Temperaturprofils erkennt man, dass sich die Inversions-

Tab. 5:
Strahlungsbilanz,
Globalstrahlung
sowie Bewölkungs-
grad der sommerli-
chen Schönwetter-
tage der Mess-
periode 1997

Datum	Strahlungsbilanz in W/m ²	Globalstrahlung in W/m ²	Bewölkungs- grad „N“
03. 05. 1997	155,96	281,04	53%
14. 05. 1997	158,38	274,17	40%
16. 05. 1997	158,21	287,88	23%
15. 05. 1997	161,46	291,00	20%
19. 05. 1997	159,17	300,21	27%
25. 05. 1997	162,19	313,73	27%
01. 06. 1997	164,15	295,75	53%
04. 06. 1997	155,42	283,17	10%
05. 06. 1997	165,33	300,00	57%
07. 06. 1997	176,58	307,04	17%
09. 06. 1997	174,31	304,58	37%
10. 06. 1997	174,04	309,00	27%
11. 06. 1997	177,71	302,50	47%
21. 06. 1997	181,29	297,71	60%
25. 06. 1997	162,83	281,04	35%
28. 06. 1997	174,92	284,56	43%
29. 06. 1997	170,94	273,19	53%
02. 07. 1997	160,75	300,08	40%
09. 07. 1997	156,27	287,33	20%
30. 07. 1997	159,60	285,94	17%

Tab. 6:
Strahlungsbilanz,
Globalstrahlung
sowie Bewölkungs-
grad der winterli-
chen Schönwetter-
tage der Mess-
periode 1997

Datum	Strahlungsbilanz in W/m ²	Globalstrahlung in W/m ²	Bewölkungs- grad „N“
07. 02. 1997	25,44	78,15	23%
09. 02. 1997	83,17	29,38	30%
10. 02. 1997	85,63	23,40	13%
14. 02. 1997	97,96	41,96	80%
19. 02. 1997	83,85	20,96	70%
20. 02. 1997	80,00	28,92	70%
23. 02. 1997	109,25	34,88	33%
24. 02. 1997	96,81	37,00	73%
25. 02. 1997	90,79	41,92	90%
28. 02. 1997	133,17	44,33	67%
02. 03. 1997	139,44	54,02	20%
08. 03. 1997	178,71	63,85	3%
09. 03. 1997	172,33	62,98	10%
10. 03. 1997	165,00	60,69	0%
11. 03. 1997	166,33	67,15	0%
12. 03. 1997	176,10	64,96	0%
13. 03. 1997	112,83	48,98	60%
14. 03. 1997	168,35	76,69	50%
18. 03. 1997	117,71	50,83	90%
19. 03. 1997	88,48	43,15	87%

untergrenze, nach Abbildung 33 bei den gemittelten 2-Stunden-Intervallen von 20 Uhr bis 10 Uhr morgens in Höhe des Erdbodens befindet. Die Obergrenze der Inversion liegt hier bei den ausgewerteten zwanzig Wintertagen in ca.

600 m Höhe, die Quellhöhe von Emittenten befindet sich somit innerhalb der Inversionsschicht, was zur Anreicherung der Atmosphäre mit Aerosolen und sonstigen Luftschadstoffen führt.

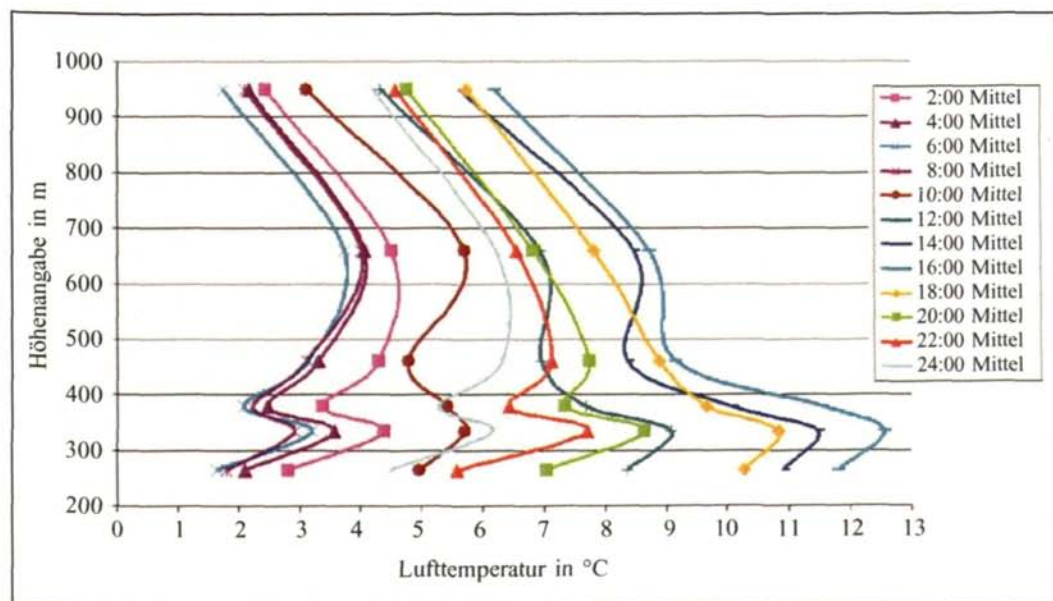


Abb. 33: Tagesgang des vertikalen Temperaturprofils der Wintertage

Ein Maximum der Bodeninversion wird gegen Mitternacht verzeichnet, ein Minimum bei Sonnenhöchststand gegen 14 bis 16 Uhr. Letzteres wird in Abb. 33 auch dadurch bestätigt, dass von 12 Uhr bis 18 Uhr nicht eindeutig von einer stark ausgeprägten Bodeninversion gesprochen werden kann, sieht man die Temperaturwerte der Station Steyregg in 335 m Höhe als „Ausreißer“ im winterlichen Temperaturprofil an. In diesem Zusammenhang hat man es vielmehr mit einer Höheninversion zu tun, deren untere Grenze in ca. 500 m und obere Grenze in ca. 650 m anzusetzen ist.

Die Inversionswetterlage ist im Winter den ganzen Tag über - mehr oder weniger stark ausgeprägt - vorhanden. Wie aus Abb. 34 ersichtlich ist, kann sich jedoch ebenfalls an sommerlichen Schönwettertagen in den Abendstunden eine Bodeninversion ausbilden, die ihre maximale Intensität eindeutig zwei Stunden vor bis zwei Stunden nach Mitternacht aufweist. Ab den frühen Morgenstunden beginnt sich die Bodeninversion mit beginnender Sonneneinstrahlung vom Talboden her aufzulösen, um gegen die Mittagszeit vollständig aufgehoben zu sein.

Allgemein sollte bei den sommerlichen sowie winterlichen Schönwettertagen der Temperaturwert in 335 m Höhe über Meeresniveau (Einzelmessstation S417 - Steyregg-Weih) nochmals kontrolliert und wenn nötig korrigiert werden. In diesem Zusammenhang sollte auch die Lage der Messstation dahingehend näher betrachtet werden, ob am gewählten Messstandort aufgrund lokaler Gegebenheiten höhere Lufttemperaturwerte angetroffen werden können. (Prallhanglage der Station Steyregg-Weih nordöstlich von Linz, Lage innerhalb der Abgasfahne von Linz, Lage in der Hauptwindrichtung etc.).

Die Datenauswertung der sommerlichen Schönwettertage der Messperiode 1998 bestätigen zuvor getätigte Aussagen in Bezug auf die im Linzer Stadtgebiet anzutreffenden Inversionswetterlagen. Bei Betrachtung der Abbildung 35 ist - wie bereits im Zuge der Auswertung der Messperiode 1997 beschrieben - zwischen 20 Uhr abends und 6 Uhr morgens eindeutig eine Bodeninversionswetterlage zu erkennen, deren Obergrenze ebenfalls in ungefähr 600 m anzusetzen ist. Ab ca. 10 Uhr morgens wird diese Wetterlage von einer Höheninversion abgelöst,

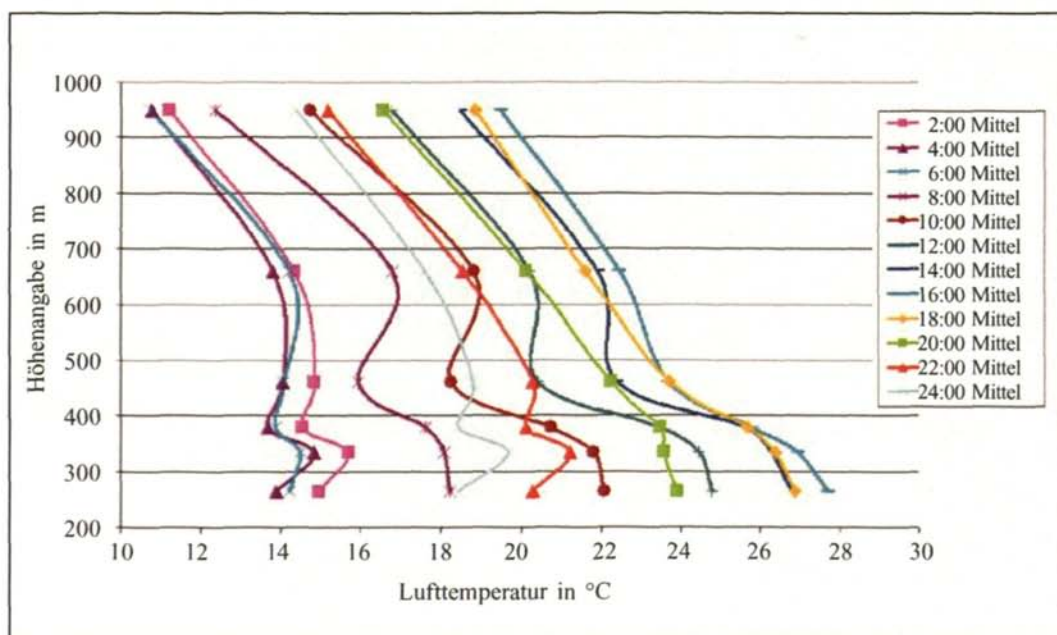


Abb. 34: Tagesgang des vertikalen Temperaturprofils der Sommertage

deren Untergrenze in ca. 450 m und deren Obergrenze in ca. 650 m zu suchen ist. Auch in dieser Auswertung darf die anfängliche, sehr starke Temperaturzunahme ausgehend vom Stadtniveau bis ungefähr 335 m Seehöhe (Station Steyregg-Weih) nicht - ohne weitere Untersuchungen anzustellen - mit dem Vorkommen einer Bodeninversion erklärt werden, da die Station Steyregg-Weih - wie bereits erwähnt - eine Sonderstellung innerhalb der Einzelmessstationen einnimmt. Hierzu besteht die Überlegung, dass die Station aufgrund ihrer Lage nordöstlich von Linz an einem Prallhang ca. 80 m über dem Donautal durch den Abtransport der warmen Stadtluft beeinträchtigt wird (Stationslage innerhalb der Abgasfahne von Linz), was auch durch die bei den Messstationen S401 und S416 vorherrschenden Hauptwindrichtungen „West“ und „Südwest“ unterstrichen wird.

Wird die Station Steyregg-Weih in dem Lufttemperatur-Höhenprofil nicht berücksichtigt und greift man in Abb. 34 das 14:00 Uhr-Mittel zur näheren Untersuchung auf, so wird - vom Talboden ausgehend - eine Temperaturabnahme von 0,8 K bis 380 m Seehöhe festgestellt. Um-

gerechnet auf 100 m wären dies durchschnittlich 0,69 K, eine Temperaturdifferenz, die auf die vertikale Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe rückzuführen ist. Grundsätzlich beträgt diese - wie bereits in Kapitel erwähnt - im Mittel 0,65 K pro 100 m, kann aber je nach vorherrschender Wetterlage auch höher oder geringer ausfallen.

3.7 Entstehung und Abklingen der städtischen Wärmeinsel im Zeitverlauf

Aufgrund der größtenteils schlechten Wetterlage mit nur kurzfristig andauernden Schönwetterperioden im Jahr 1997 wurden für die Untersuchung die Daten der Einzelmessstationen aus dem Sommer 1998 herangezogen. Zunächst wurde in Anlehnung an die Strahlungsbilanzwerte und Globalstrahlungswerte jene Zeitperiode gewählt, die anfänglich ausgehend von einem Schlechtwettertag durch eine länger andauernde Hochdrucklage gefolgt von einem Tiefdruckgebiet über dem Großraum Linz gekennzeichnet ist. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die mindestens drei aufeinanderfolgenden

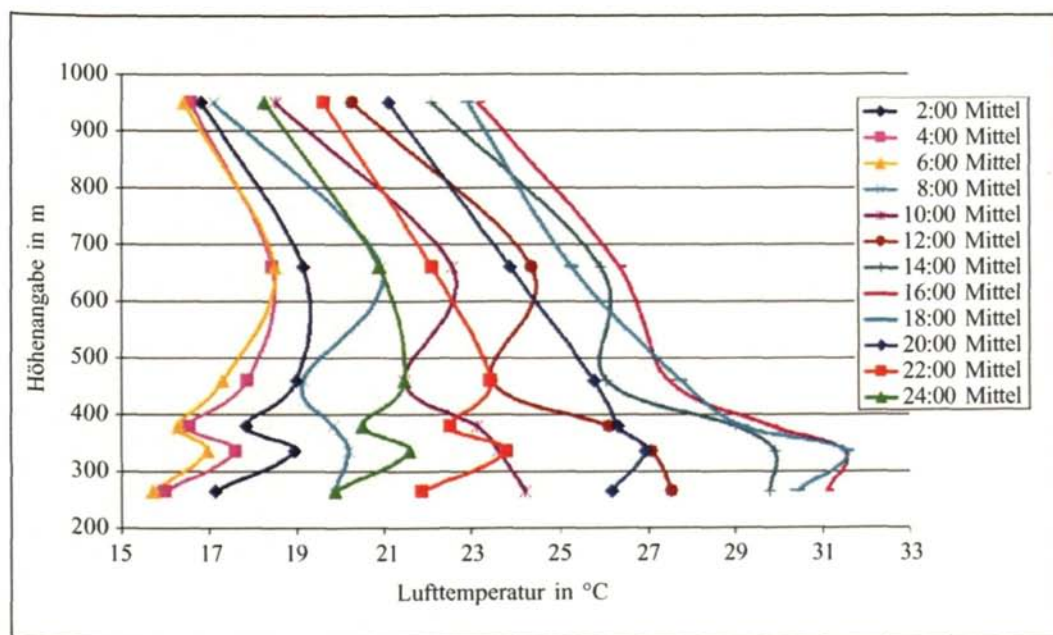


Abb. 35: Tagesgang des vertikalen Temperaturprofils der Sommertage 1998

Tage mit annähernd gleicher Wetterlage gelegt. Die Entstehung sowie die Intensivierung bzw. Verstärkung des städtischen Wärmeinseleffektes mit zunehmender Anzahl an aufeinanderfolgenden Schönwettertagen, aber auch ihr allmähliches Abklingen sollen durch eine Gegenüberstellung der Lufttemperaturdaten unter Berücksichtigung weiterer meteorologischer Parameter wie zum Beispiel Windgeschwindigkeit, Bewölkungsgrad, Strahlungsbilanz und Globalstrahlung näher erläutert werden.

Die Halbstundenmittelwerte der Lufttemperatur dienen zur graphischen Auswertung der Tagesgänge der Temperatur an den Einzelmessstationen S401, S405, S412, S415 und S416. Pro Einzelmessstation wird das täglich registrierte Maximum, Minimum und das Tagesmittel der Lufttemperatur nach WMO ermittelt. Anhand dieser Daten ist ersichtlich, ob sich die Temperaturamplitude mit zunehmender Abfolge von Schönwettertagen verändert.

Eine mögliche Intensivierung der Ausprägung der städtischen Wärmeinsel hängt von unter-

schiedlichen meteorologischen Parametern ab und kann nicht ausschließlich durch eine Zunahme der Lufttemperaturamplitude erklärt werden. Daher wird weiters die prozentuelle Differenz der Lufttemperatur der Freilandstation Asten zur Messstation S412 - Linz-Kleinmünchen um 6:00 Uhr, 14:00 Uhr, 21:00 Uhr und im Tagesmittel errechnet, da eine prozentuelle Steigerung des Temperaturunterschiedes zwischen Freiland und Stadtgebiet am ehesten auf eine Intensivierung des Wärmeinseleffektes mit zunehmender Aufeinanderfolge von Schönwettertagen schließen lässt.

Bei der Auswertung der Strahlungsbilanz sowie Globalstrahlung wird eine länger anhaltende Schönwetterperiode vom 6. 8. 1998 bis 11. 8. 1998 verzeichnet.

Die in Abbildung 36 dargestellten Tagesgänge vom 6. 8. 1998 bis 11. 8. 1998 zeigen allgemein einen deutlichen Anstieg der Lufttemperatur mit zunehmender Anzahl an Schönwettertagen. Beginnend am 6. 8. 1998 wird das zuvor herrschende, kühle und regnerische Wetter (am 5. 8. 1998 wird eine Niederschlagshöhe von 9,8 mm

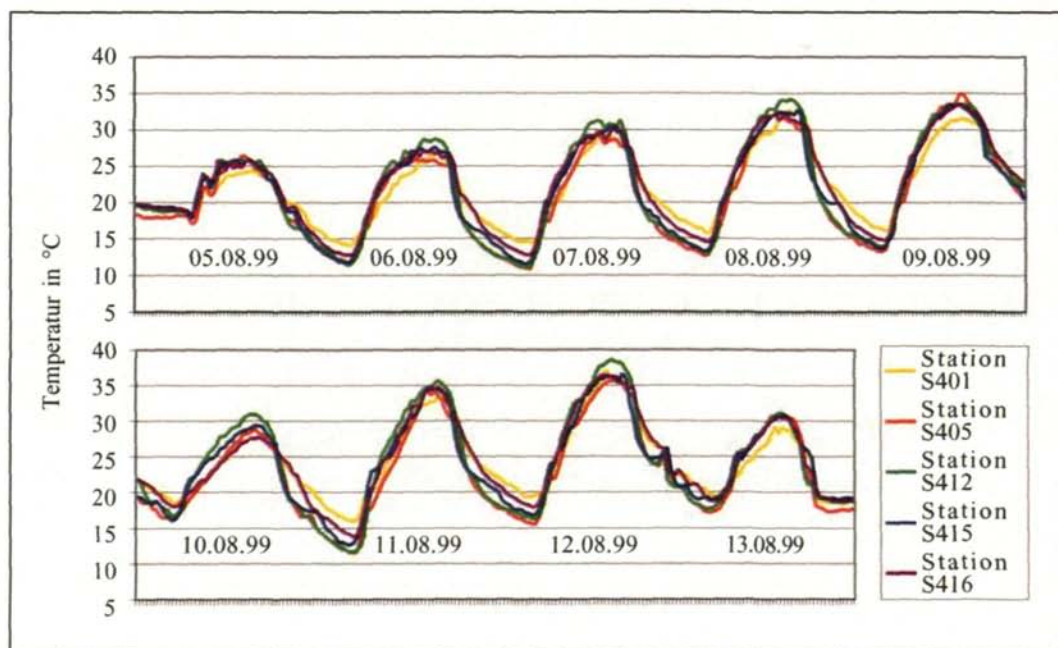


Abb. 36: Entstehung und Abklingen der städtischen Wärmeinsel vom 6. 08. 1998 bis 11. 08. 1998

registriert) von einer 6-tägigen Schönwetterperiode abgelöst. Innerhalb dieser Zeitperiode (6. 8. 99 bis 11. 8. 99) wird ein Temperaturanstieg von insgesamt 6,9 K - berechnet aus den registrierten Tageshöchstwerten des ersten und letzten Tages der Schönwetterperiode - verzeichnet, was umgerechnet auf den einzelnen Tag eine Zunahme der Lufttemperatur um durchschnittlich 1,15 K bedeutet. Anhand dieses Ergebnisses kann jedoch nicht eindeutig festgestellt werden, dass eine länger anhaltende Schönwetterperiode auch zu einer Verstärkung des städtischen Wärmeinselleffektes führt.

Bei Betrachtung der Lufttemperaturamplitude (Abb. 37) wird - ausgehend vom Schlechtwettertag am 5. 8. 1998 - eine starke Zunahme der Temperatur bis einschließlich 9. 8. 1999 verzeichnet. Am 10. 8. 1999 kommt es wider Erwarten zu einem Einbruch in Bezug auf die Temperaturamplitude, deren Ursache jedoch durch vorliegende Parameter nicht erklärt werden kann.

Bei einem prozentuellen Vergleich der Lufttemperatur der Stadtstation Kleinmünchen mit

jener der Freilandstation Asten zeigt sich, dass die Lufttemperaturdifferenz zwischen Stadtgebiet und Freiland besonders um die Mittagszeit (14:00 Uhr-Auswertung) stark ausgeprägt ist. Mit zunehmender Aufeinanderfolge von Schönwettertagen wird eine prozentuelle Zunahme der Lufttemperaturdifferenz registriert, welche auf eine Verstärkung des Wärmeinselleffektes rückschließen lässt.

Insbesondere kann der prozentuelle Anstieg der Lufttemperaturdifferenz bei der Auswertung der Tagesmittellufttemperatur nach WMO verdeutlicht werden. Beginnend mit 5. 8. 1998, wo das Tagesmittel der Lufttemperatur in Kleinmünchen niedriger ausfällt, als im angrenzenden Freiland, kommt es mit zunehmender Aufeinanderfolge von Schönwettertagen bis 13. 8. 1998 zu einer Zunahme der prozentuellen Temperaturdifferenz zwischen Stadtgebiet und Freiland. Das Freiland kühlt sich gegen Abend rascher ab als die Stadtluft. Erst bei Morgendämmerung kommt es zu einer allmählichen Temperaturannäherung zwischen Freiland und Stadt, die städtische Wärmeinsel schwächt sich ab.

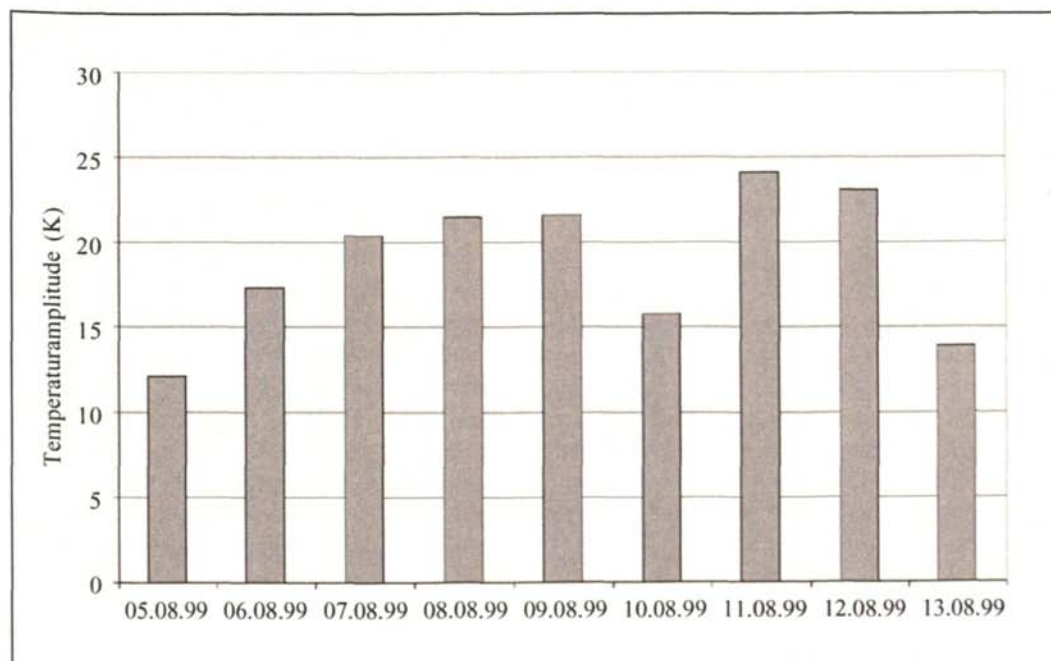


Abb. 37: Lufttemperaturamplitude der einzelnen Tage der ausgewerteten Schönwetterperiode

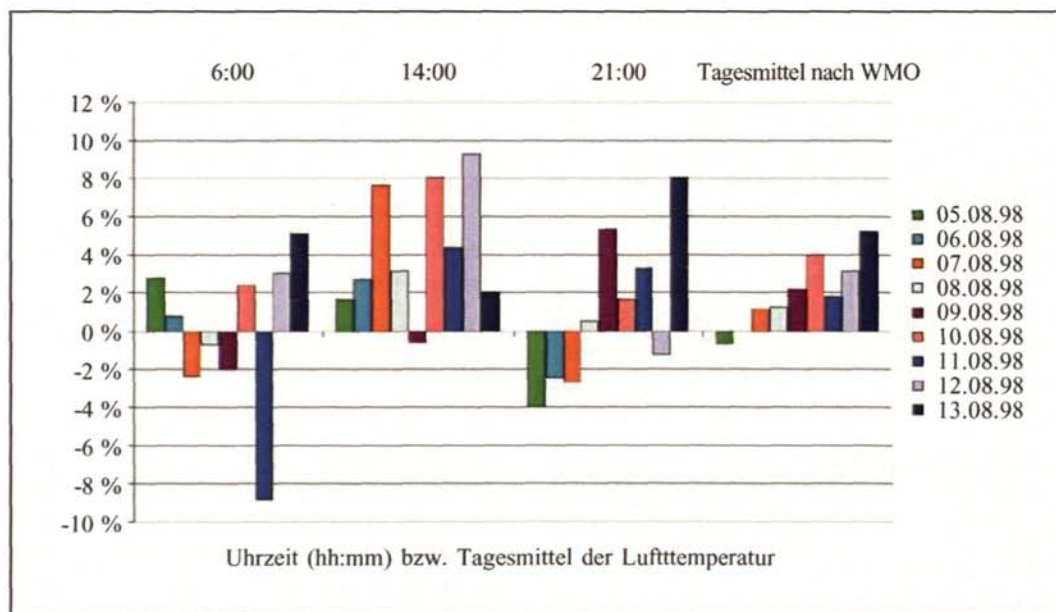


Abb. 38: Prozentuelle Lufttemperaturdifferenz zwischen Kleinmünchen und Asten

In Abb. 38 verzeichnet man trotz täglicher Temperaturannäherung zwischen Stadtgebiet und Freiland eine prozentuelle Temperaturzunahme zwischen den beiden ausgewiesenen Stationen. Dies lässt darauf schließen, dass es mit zunehmender Tagesabfolge zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Verstärkung des Wärmeinseleffektes kommt.

3.8 Verknüpfung Temperaturverteilung - Bebauungsstruktur

Abschließend soll untersucht werden, ob die in den einzelnen Stadtteilen registrierten Temperaturverteilungen mit der jeweils vorherrschenden Bebauungsstruktur in Zusammenhang gebracht werden können. In der Theorie geht man davon aus, dass Stadtteile mit sehr dichter Bebauung eine durchschnittlich höhere Temperatur aufweisen als jene Gebiete mit geringer Bebauungsdichte und/oder hohem Grünflächenanteil.

Es werden zunächst die vier unterschiedlichen Messmethoden und die dabei erzielten Ergebnisse miteinander verglichen. Dabei wird darauf geachtet, dass jene Tage bzw. Messfahrten

ausgewählt werden, an denen die städtische Wärmeinsel gut sichtbar ist. Mit den Temperaturwerten der PKW-Messfahrt lässt sich eine Temperaturverteilungskarte erstellen, indem die gemessenen Temperaturwerte über die vorherrschende Bebauungsstruktur gelegt werden. Darauf aufbauend wird versucht, in gleicher Weise mit den Temperaturdaten der Straßenbahnmessfahrt sowie den punktuellen Daten der umliegenden Einzelmessstationen zu verfahren.

Weiters wird ein Stadtteil - vorzugsweise die Innenstadt - ausgewählt und näher untersucht. Dabei wird natürlich darauf geachtet, dass das abgesteckte Gebiet eine Einzelmessstation des Landes Oberösterreich aufweist, und Temperaturdaten aus der PKW- bzw. Straßenbahnmessfahrt vorliegen. Auch hier wird wieder aufgrund der PKW-Messdaten eine Temperaturverteilungskurve ermittelt, die anschließend mit den Daten der übrigen Messmethoden verglichen wird.

Grundsätzlich sollten sich die Temperaturverteilungsmuster der PKW-Messfahrt mit den Verteilungsmustern der Straßenbahnmessfahrt decken. Ebenfalls sollte eine gewisse Korrela-

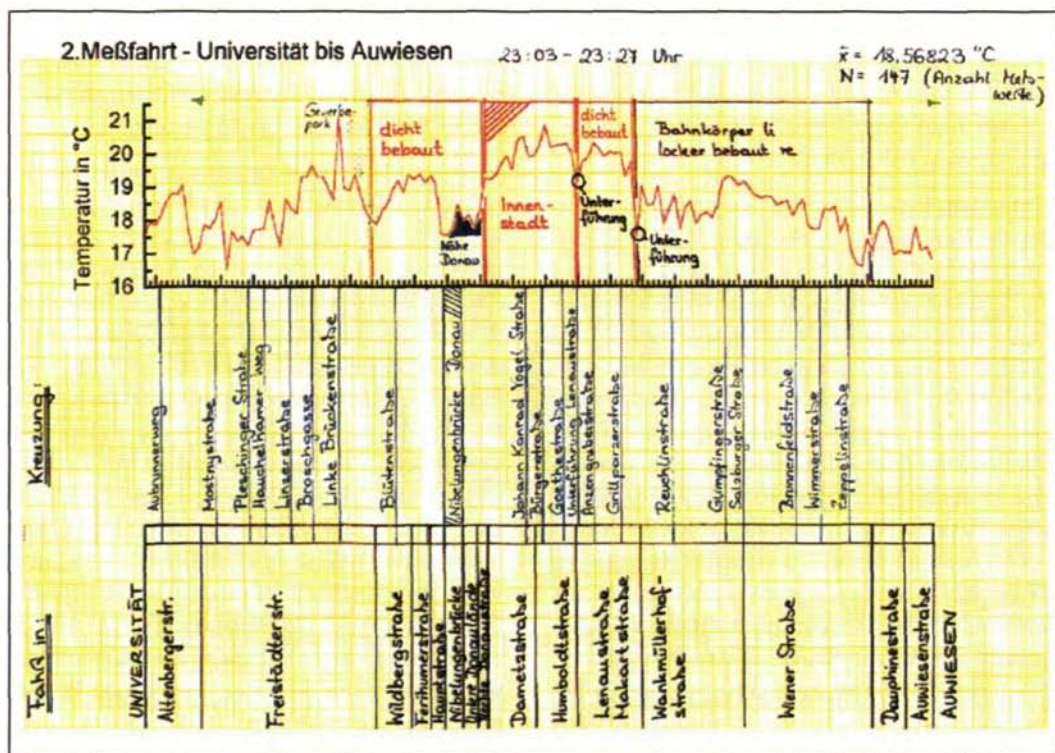


Abb. 40: PKW-Messfahrt am 27. 08. 1997 von Universität bis Auwiesen / 23:03 bis 23:27 Uhr

in der Stadt festgehaltene, wärmere Luft durchmischen und somit zu einer rascheren Abkühlung im Bereich der Straßenkreuzungen führen.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Straßenbahnmessfahrten, so wird man einen ähnlichen Kurvenverlauf erkennen, obwohl die ausgewertete Messfahrt nicht in den Sommer sondern in einen Wintermonat fällt. Wieder findet man im Allgemeinen eine Temperaturzunahme zur Stadtmitte; die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland kann bis zu 3,5 K betragen. Auffällig sind die meistens sehr markant ausgeprägten Temperaturläufige, bedingt durch eine hohe Streuung der nebeneinanderliegenden Messwerte. Als mögliche Ursache wird die Beeinflussung des Temperaturelements durch die unmittelbar neben der Messeinheit vorhandenen Heizschlangen angesehen, die im Falle eines Aufenthalts der Straßenbahngarnitur die Temperaturmessung durch Fehlen des Fahrtwindes beeinflussen können.

Nachdem die Einteilung der einzelnen Stadtgebiete innerhalb der Straßenbahn-Messfahrt nur nach einem allgemein gültigen Fahrplan erfolgen kann, sind die in Abbildung 41 eingezeichneten Stadtgebiete - Vorort, dicht bebautes Gebiet, Innenstadt und Gewerbegebiet - mit den in der PKW-Messfahrt eingezeichneten Gebieten nicht deckungsgleich. Mit Hilfe der Beobachtungen innerhalb der PKW-Messfahrt können anhand des Temperaturbildes der Straßenbahn-Messfahrt der Bereich der Donauüberquerung aber auch jene Stellen wie Unterführungen markiert werden. Diese, wie auch alle weiteren Aussagen in Bezug auf die Straßenbahnmessfahrt beruhen jedoch nur auf Spekulationen, da zu den einzelnen Messwerten keine eindeutige Ortszuordnung erfolgen kann und somit nicht definiert ist, wo sich die Straßenbahngarnitur befindet und ob und wie lange sie sich in einer Station aufhält. Letzteres wäre zur Klärung der Temperaturläufige wichtig.

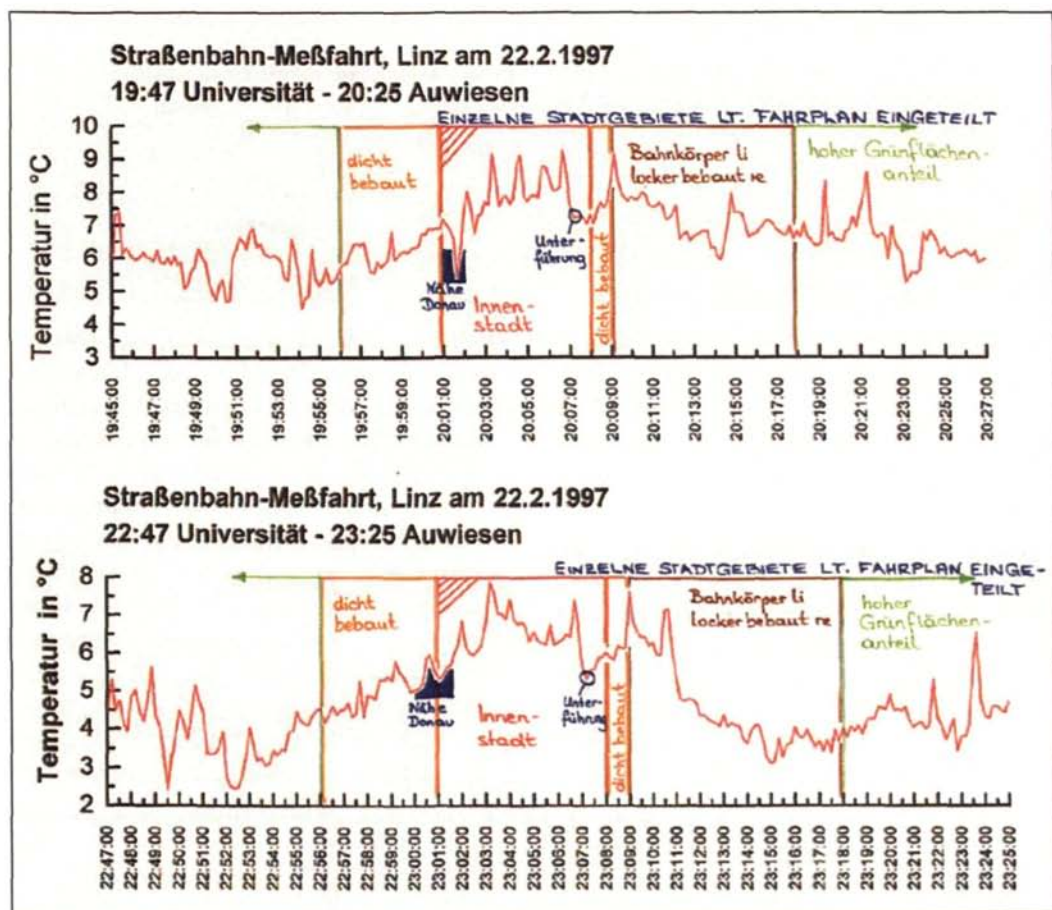


Abb. 41: Straßenbahn-Messfahrt am 22. 02. 1997 von Universität bis Auwiesen / 19:47 bis 20:25 Uhr und 22:47 bis 23:25 Uhr

Zur Einbindung der Messwerte der Einzelmessstationen werden die Ergebnisse der PKW-Messfahrt und Straßenbahn-Messfahrt mit den Punktmessungen im Stadtgebiet verglichen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Lufttemperaturwerte nahezu deckungsgleich sind, wenn es innerhalb der einzelnen Messmethoden zu einer örtlichen und tageszeitlichen Übereinstimmung kommt.

Zunächst werden die Messstationen des Luftmessnetzes Oberösterreichs einzelnen Stadtteilen zugeordnet. Die Station S413 repräsentiert die Temperaturwerte der Innenstadt, S401 liegt an der Grenze der Innenstadt zu dicht bebautem Gebiet. Die Stationen S412 und S415 spie-

geln jene Gebiete mit hohem Grünflächenanteil wider (Auwiesen und Universität) und S416 ist eine Referenzstation für das Gewerbegebiet, welches sich einerseits durch den Bahnkörper und andererseits durch locker bebautes Gebiet auszeichnet.

Vergleicht man die Lufttemperaturwerte der Einzelmessstationen mit beiden Messfahrten gegen 20 Uhr (Tab. 7), so zeigt sich, dass die Werte der Punktmessungen größtenteils in dem Temperaturbereich der Messfahrten liegen. Einzig die Messwerte um 20 Uhr der Station S415 und S412 weichen etwas von den Werten der beiden Messfahrten ab. Dies kann jedoch dadurch erklärt werden, dass sich beide

Tab. 7: Messwertvergleich Einzelmessstation, PKW-Messfahrt und Straßenbahnmessfahrt gegen 20 Uhr

Mess-Station	PKW-Messfahrt 19:48 bis 20:16 Uhr / 27. 8. 97	Einzelmessstationen 20:00 Uhr / 27. 8. 97	Straßenbahn-Messfahrt 19:47 bis 20:25 Uhr / 22. 2. 97	Einzelmessstationen 20:00 Uhr / 22. 2. 97
S415	21K	19,9K	5,5-6K	5,9K
S413	23K	23K	7,5-8K	8,10K
S401	23K	22,9K	7,5K	7,8K
S416	22K	22,9K	7K	7,3K
S412	20K	18,9K	6,5K	5,10K

Einzelmessstationen inmitten eines Grünstreifens befinden und die Aufzeichnungen 300 m bis 500 m abseits der PKW- sowie Straßenbahn-Messfahrt liegen.

Vergleicht man die Messfahrten gegen 23 Uhr mit den Werten der Einzelmessstationen (Abb. 42, Tab. 8), so erzielt man gleiches Ergebnis. Wieder sind die Randzonen der Messfahrt dadurch gekennzeichnet, dass ihre Temperaturwerte etwas höher ausfallen als jene der zugehörigen Einzelmessstationen, was wieder auf die Entfernung der Messstation zur Fahrtroute und die damit verbundene Änderung in der Flächenzusammensetzung rückgeführt werden kann.

Zuletzt wird das Datenmaterial des Thermal-satellitenbildes (Abb. 43) mit den Ergebnissen der anderen Messmethoden verglichen. Schon bei erster Betrachtung wird deutlich, dass die Aufnahme zeitlich - vor allem jahreszeitlich - in einen anderen Bereich als die übrigen ausgewerteten Messreihen fällt. Dies erkennt man vor allem anhand des deutlich sichtbaren Wärmeschwerpunktes entlang der Flüsse Donau und Traun. Leider kann aufgrund einer unzureichenden Katalogisierung des Thermalbildes die exakte Uhrzeit der Aufnahme nicht angegeben werden. Da sich jedoch in der Abbildung das Umland in seiner Oberflächentemperatur stark

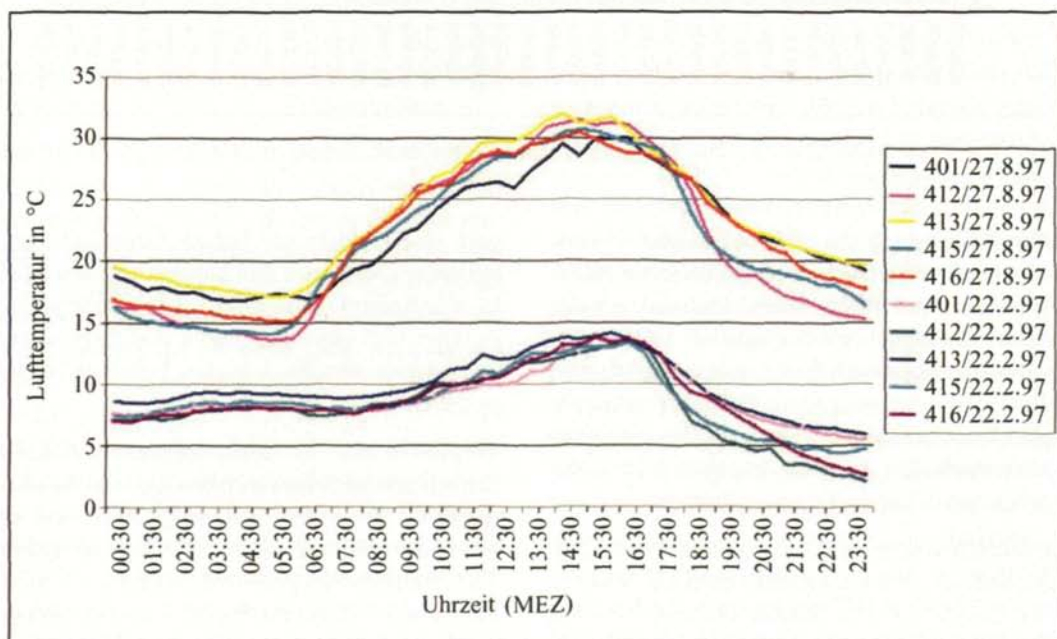


Abb. 42: Einzelmessstationen - Lufttemperaturwerte vom 22. 02. 1997 und 27. 08. 1997 der Messstationen 401, 412, 413, 415 und 416

Tab. 8: Messwertvergleich Einzelmeßstation, PKW-Messfahrt und Straßenbahnmessfahrt gegen 23 Uhr

Messstation	PKW-Messfahrt 23:03 bis 23:27 Uhr / 27. 8. 97	Einzelmessstationen 23:00 Uhr / 27. 8. 97	Straßenbahn-Messfahrt 22:47 bis 23:25 Uhr / 22. 2. 97	Einzelmessstationen 23:00 Uhr / 22. 2. 97
S415	19K	18K	4K	4,4K
S413	20K	20,3K	6,5K	6,4K
S401	19,5-20K	20,1K	6K	5,9K
S416	18,5K	18,5K	3,5-4K	3,3K
S412	17,5K	15,8	4-4,5K	2,6K

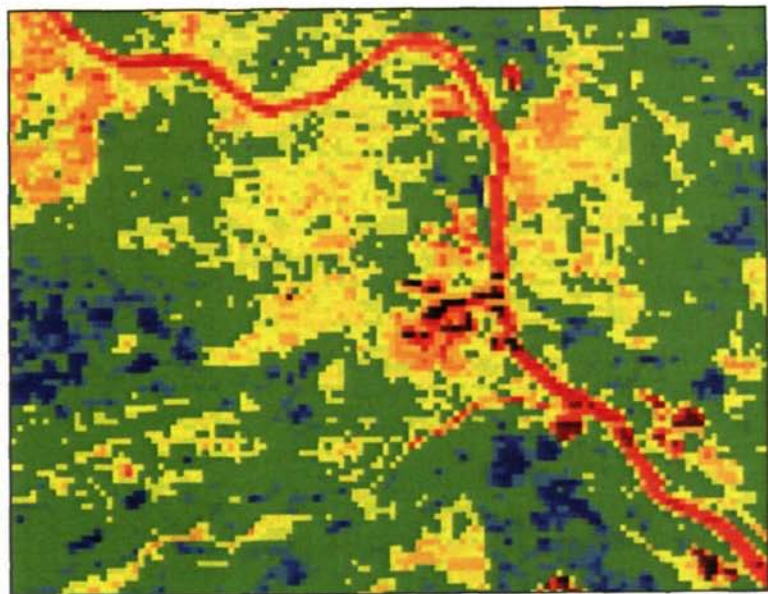
von jener der Stadtlandschaft abhebt, wird davon ausgegangen, dass die Aufnahme nach Sonnenuntergang und vor Sonnenaufgang entstanden sein muss, voraussichtlich kurz vor Mitternacht, jenem Zeitpunkt, wo eine deutliche Ausprägung der Wärmeinsel sichtbar ist.

Allgemein wird auch bei dieser Messmethode festgestellt, dass die Temperaturwerte der Randzonen Auwiesen und Universität am niedrigsten ausfallen. Ebenfalls wird eine kontinuierliche Temperaturzunahme von den locker bebauten Stadtgebieten zur Stadtmitte von insgesamt 3 bis 5 K registriert. Die bereits bei der Straßenbahnmessfahrt erwähnte Beobach-

den Straße unterbrochen wird, zeigt sich ansatzweise auch in vorliegendem Thermalsatellitenbild. Die einzelnen, voneinander abgrenzbaren Wärmeschwerpunkte in der Nähe des Donauknies weisen ebenfalls eine Nordost-Südwest-Erstreckung auf.

Maximale Oberflächentemperaturen herrschen einerseits im Bereich der Flussverläufe Donau und Traun und andererseits im Industriegebiet vor. Flüsse, gute Energiespeicher, vollziehen die tageszeitlichen Temperaturschwankungen nicht mit und präsentieren sich - je nach Jahreszeit - als einheitlich wärmste oder gemäßigte Bildelemente. Der Wärmeschwerpunkt im Bereich

Abb. 43:
Thermalsatellitenbild
vom Großraum Linz



tung, dass Temperaturabfälle an jenen Kreuzungen verzeichnet werden, wo die Fahrtroute von einer nahezu nordost-südwest verlaufenden

der Industrie ist auf einen grundlegenden Faktor der Verursachung von Wärmeinseln zurückzuführen. Durch die vermehrte Emission von

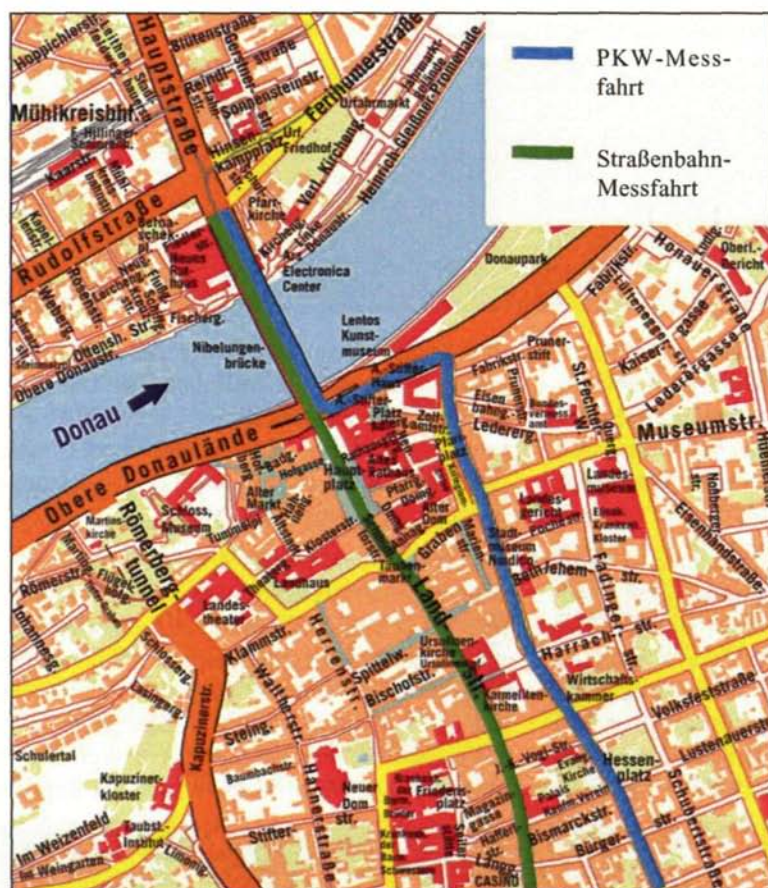


Abb. 44:
Fahrtroute für
Messfahrten

Abgasen, Aerosolen und Abwärme kommt es über einen verunreinigungsbedingten Dunst zu verändertem Strahlungs- und Energiehaushalt, was zu einem Wärmestau führen kann.

Allgemein wird festgestellt, dass vorliegendes Thermalsatellitenbild eine deutliche Abgrenzung der einzelnen Stadtbereiche widerspiegelt. Die locker bebauten Gebiete mit hohem Grünflächenanteil - vorwiegend an den Randzonen der Stadt anzutreffen - sind markant von jenen Flächen abgegrenzt, die eine hohe Bebauungsdichte und geringen Grünflächenanteil aufweisen. Auch lässt sich der Verlauf des Bahnkörpers sowie die Lage der Industrie anhand der Thermal Aufnahme eindeutig bestimmen.

Anschließend soll - ausgehend von den Temperaturdaten der PKW-Messfahrt - der Teilbereich Nibelungenbrücke und Altstadtviertel genauer

ausgewertet werden. Insgesamt werden die Daten von drei PKW-Messfahrten - zwei am 27. 8. 1997 und eine am 5. 10. 1997 - herangezogen und der Temperaturverlauf entlang der Hauptstraße beginnend von der Kreuzung Ferihumerstraße über die Nibelungenbrücke (Donauüberquerung) und dann weiter von der rechten Donaustraße über den Pfarrplatz und die Dametzstraße bis zur Kreuzung Mozartstraße ermittelt (Abb. 44).

Sobald sich die gewählte Fahrtroute der Donau von Seiten der Ferihumerstraße annähert, wird ein allgemeiner Temperaturabfall in Richtung Fluss bemerkt. Die wichtigste Wirkung der Flüsse besteht darin, mitten in der Stadt den verschiedenen Luftströmungen eine breite Bahn zu bieten. Gewässer sind bei Tag relativ kühl, bei Nacht mild. Im Bereich der Donauüberquerung

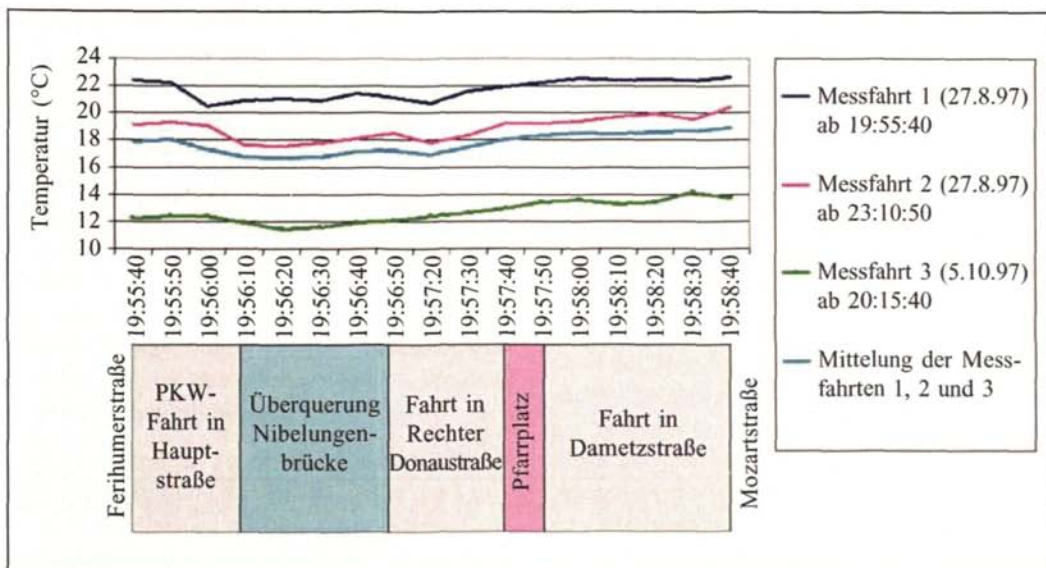


Abb. 45: Lufttemperaturauswertung der PKW-Messfahrt im Bereich Nibelungenbrücke und Altstadt

liegt die Lufttemperatur um ca. 1,5 bis 2 K niedriger als in den an die Donau angrenzenden Stadtteilen, wobei zu bemerken ist, dass die Temperatur mit zunehmender Annäherung an den Fluss kontinuierlich absinkt (Abb. 45). Zu erwähnen ist auch, dass der tiefste Lufttemperaturwert nicht in der Mitte des Flusses liegt, sondern an einer der beiden Uferseiten.

Die Donau bildet somit einerseits eine Luftschneise für verschiedene Luftströmungen, wodurch die erwärmten Luftpakete leichter abtransportiert bzw. zerstreut werden können. Andererseits ist Wasser ein guter Energiespeicher, die über der Wasseroberfläche vorhandene Luftsäule wird nur wenig erwärmt.

Mit dem Pfarrplatz erreicht man bei der PKW-Messfahrt das Altstadtviertel. Ab diesem Zeitpunkt kommt es zu einer stetigen Zunahme der Lufttemperatur bis zur Kreuzung Dametzstraße/Mozartstraße um insgesamt 1 bis 1,5 K. Bemerkenswert sind zwei in der Auswertung der PKW-Fahrt schwach ausgeprägte, gegen 20:00 Uhr positive und gegen 23:00 Uhr negative Temperaturläufer. Einer befindet sich unmittelbar nach Eintritt in den Bereich des Pfarrplatzes und einer in der Dametzstraße in Höhe der Kreuzung Harrachstraße.

Beide Stellen zeichnen sich durch einen der Baufluchtlinie vorgelagerten Grünstreifen zur Dametzstraße aus. Daraus ist zu schließen, dass die hohen Gebäude entlang der Dametzstraße den Straßenraum vor starker Ein- und Ausstrahlung abschirmen. Nur an jenen Stellen, wo vorgelagerte Grünstreifen die nahezu durchgehende, enge Straßenschlucht unterbrechen, dringt die Sonnenstrahlung gegen Mittag bis zum Boden vor, die Plätze werden sehr heiß und kühlen gegen Abend rasch wieder aus. Letzteres ist in Abbildung (Abb. 45, 46) durch eine eindeutige Abnahme der Lufttemperatur gegen 23 Uhr im Bereich der zuvor beschriebenen Plätze ersichtlich. Natürlich kann der Temperaturabfall im Bereich der Harrachstraße auch durch die zuvor beschriebene Wirkung der nordost-südwest-verlaufenden Straßenzüge hervorgerufen werden.

Die Auswertung der Straßenbahnmessfahrt erfolgt wieder anhand eines allgemein gültigen Fahrplanes und anhand der Temperaturkurve. Innerhalb der Temperaturläufer der Straßenbahn-Messfahrt ist die Wirkung von nordost-südwest verlaufenden Straßenzügen deutlich zu erkennen (Abb. 47). Nach der Donauüberquerung, welche deutlich durch eine Tem-

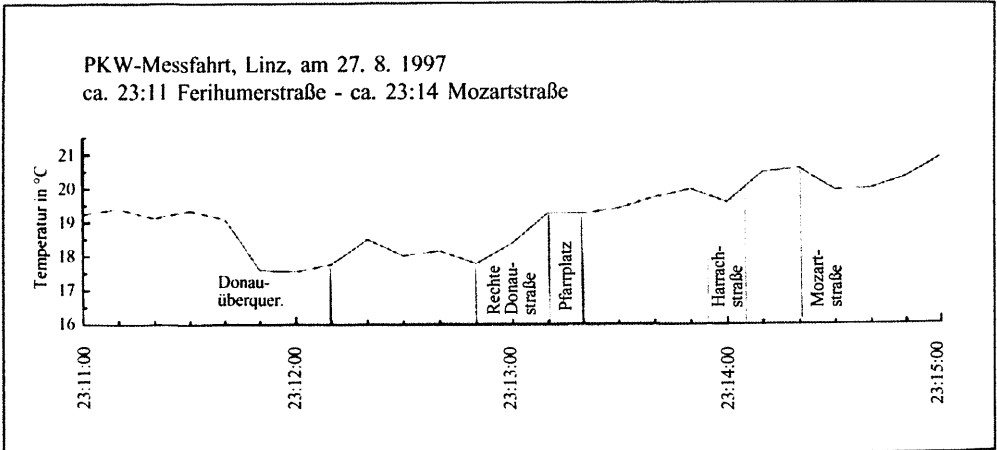


Abb. 46: Lufttemperaturauswertung der PKW-Messfahrt im Bereich Nibelungenbrücke und Altstadtviertel

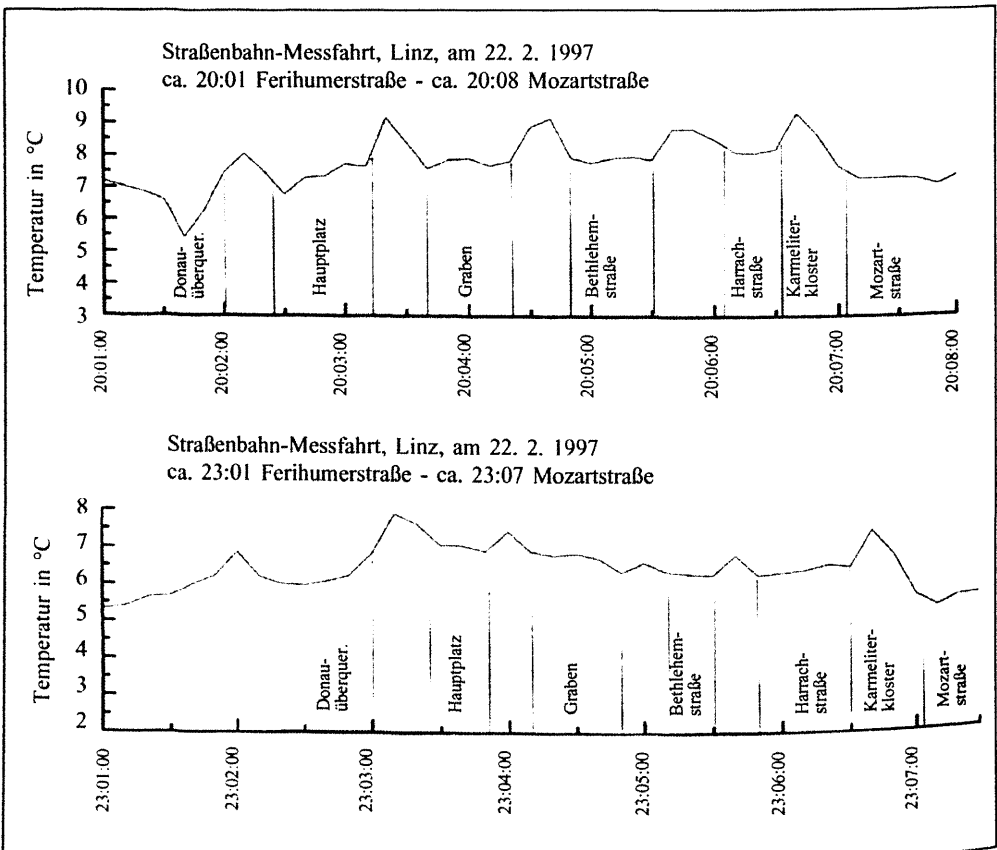


Abb. 47: Lufttemperaturauswertung der Straßenbahn-Messfahrt im Bereich Nibelungenbrücke und Altstadtviertel

peraturabnahme gekennzeichnet ist, tritt die Straßenbahn in den Hauptplatz ein. Der Hauptplatz ist durch eine ihn nahezu durchgehend umfassende Häuserzeile gekennzeichnet; der Zutritt wird nur durch enge Durchgänge bzw. Durchfahrten gewährt. Dies wird innerhalb der Temperaturkurve durch eine allgemeine Zunahme der Lufttemperatur unmittelbar vor dem Eintritt in den Hauptplatz, wie auch unmittelbar nach dem Austritt sichtbar. Auch wird festgestellt, dass die Lufttemperatur im Bereich von Kreuzungen mit den oben erwähnten Straßenzügen deutlich abnimmt.

An jenen Stellen, wo die Straßenbahngarnitur enge Straßenräume durchfährt, steigt die Lufttemperatur und es werden stets Temperaturspitzen registriert. Bekräftigt wird diese Aussage dadurch, dass die Anzahl der passierten

Kreuzungen auf dem Übersichtsplan mit jener der auf dem Temperaturbild beider Straßenbahn-Messfahrten ersichtlichen übereinstimmt.

Die präzisere Auswertung des Altstadtviertels mit Hilfe des Thermalsatellitenbildes erfolgt unter Verwendung eines Stadtplanes. Beginnend vom nördlich gelegenen Stadtteil Urfahr, der im Thermalbild infolge der lockeren Bebauung und des hohen Grünflächenanteils durch niedrige Oberflächentemperaturen gekennzeichnet ist, führt der Weg durch ein um 2 bis 3 K wärmeres, dichter bebautes Gebiet zur Donauüberquerung im Bereich der Nibelungenbrücke. Diese Flussstelle kennzeichnet sich durch ein kurzfristiges Ansteigen der Temperatur um weitere 2 bis 3 K, um anschließend im unmittelbar angrenzenden Altstadtviertel wieder auf das vorherige Temperaturniveau abzusinken.

4 KALTLUFTSTRÖMUNGEN

4.1 Einleitung

Die im vorigen Kapitel vorgestellten Untersuchungen haben die Existenz einer Wärmeinsel in Linz bestätigt und deren Verhalten unter verschiedenen Rahmenbedingungen beschrieben. Der Wärmeinseleffekt generiert direkt Flurwinde durch das Nachströmen von Luft aus dem Umland in das Stadtzentrum, um den Abfluss von Luftmassen infolge der konvektiven Bewegungen über dem Stadtzentrum zu kompensieren. Diese Luftströmungen sind aber nicht die einzigen, die als Folge von unterschiedlichen Temperaturverhältnissen in kleinräumigen Strukturen hervorgerufen werden.

Auch Temperaturunterschiede der Atmosphäre in topographisch uneinheitlichem Gelände, wie sie etwa beim Übergang von den Ausläufern der Böhmisches Masse im Norden von Linz zum Linzer Becken auftreten, bewirken Strömungen. Es wirken zwar in beiden Fällen unterschiedliche Mechanismen, aber auch diese Strömungen können sich nur bei schwachem synoptischem Einfluss richtig entwickeln. So-

wohl bei den Flurwinden als auch bei den topographisch induzierten Strömungen spielen die Strahlungsverhältnisse und damit die thermischen Bedingungen die zentrale Rolle.

Als auffallendstes Beispiel einer derartigen thermisch induzierten Strömung in Linz gilt der bei Vorherrschen der genannten günstigen Bedingungen auftretende Kaltluftfluss aus dem Haselgraben, der aufgrund seiner Mächtigkeit in der Lage ist, in weiten Teilen der Stadt Luftwechsel zu bewirken. Vor allem die Gebiete nördlich der Donau, die, wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, bei der Schadstoffbeaufschlagung in kritischen Situationen unter Umständen einer höheren Immissionsbelastung ausgesetzt sind, sind von dieser Strömung betroffen. Somit kommt dem Haselgrabenwind eine große Bedeutung in der Versorgung des Linzer Stadtgebietes mit Frischluft zu, was auch den Grund für eine eingehende Untersuchung dieses Phänomens darstellt. Außerdem lassen sich aus der Untersuchung auch Aussagen für andere ähnliche, aber schwächer ausgeprägte thermische Strömungen im Linzer Becken treffen, die

aufgrund ihrer Vielzahl nicht alle im Rahmen dieser Studie einzeln analysiert werden konnten. Die Untersuchung des Haselgrabenwindes wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (GEPP 1999) durchgeführt und die in den nächsten Abschnitten dargestellten Ergebnisse daraus entnommen.

4.2 Die Topographie des Haselgrabens

Der Haselgraben beginnt sich im Gebiet der Ortschaft Hellmonsödt zu formieren und verläuft dann nahezu genau in südlicher Richtung, bis er etwa zehn Kilometer weiter im Süden im Bereich von St. Magdalena, einem Stadtteil von Linz, in das Linzer Becken einmündet. Im Mündungsbereich beginnt auch die städtische Bebauung. In seinem Verlauf senkt sich der Talboden des Haselgrabens von einer Höhe von knapp 700 Metern im Bereich von Hellmonsödt auf etwa 300 Meter im Mündungsbereich ab. Diese Absenkung ist im nördlichen Teil des Grabens stärker ausgeprägt als in den südlicheren

Teilen, sodass schon bald ein markanter Einschnitt vorhanden ist. Entlang des Grabens befinden sich mehrere Zuflüsse, von denen die markantesten im Bereich Hochbuchedt und Speichmühle in den Haselgraben einmünden.

Der Querschnitt des Haselgrabens kann über weite Strecken als keilförmig bezeichnet werden. Dies zeigen die schematischen Darstellungen von mehreren Querschnitten in Abb. 48. Es handelt sich um Ost-West-Schnitte, der Ursprung der horizontalen Entfernungsangabe ist mit der Lage des Haselbaches im Mündungsquerschnitt (0 km) identisch, das Profil des Grabens ist zu beiden Seiten des Baches dargestellt.

Aus den Beispielen lässt sich die starke Neigung der Seitenhänge des Haselgrabens erkennen, ebenso zeigt sich die geringe Breite des Talbodens von stellenweise weniger als 50 Metern. Auch in breiten Abschnitten wie zum Beispiel im Mündungsbereich beträgt die Breite in Bodenhöhe nur um die 100 Meter. Selbst in Kammhöhe, die sich insbesondere im südlichen

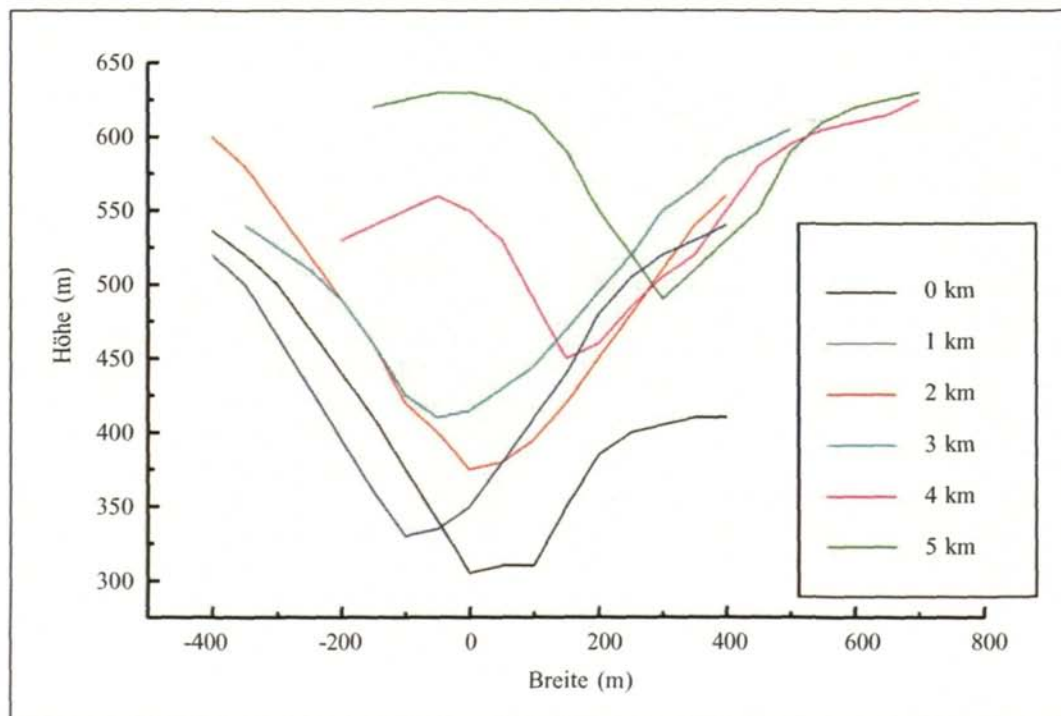


Abb. 48: Querschnitte des Haselgrabens an verschiedenen Positionen (GEPP 1999)

Bereich mehr als 200 Meter über dem Talboden befindet, ist der Graben nicht einmal einen Kilometer breit. Die Hänge an der Westseite des Grabens sind im Allgemeinen stärker geneigt als jene an der Ostseite. An den Querschnitten in Abbildung 48 ist auch das ausgeprägte Nord-Süd-Gefälle des Talbodens gut sichtbar. Die leichte Verschwenkung des Grabenverlaufs im Mittelteil und die damit verbundene Abweichung von der Nord-Süd-Ausrichtung in diesem Bereich ist ebenfalls deutlich zu sehen.

4.3 Zur Theorie der lokalen Strömungen

Aufgrund der Lage der Stadt Linz in einem Becken, das in weitem Bogen von markanten Hängen umgeben ist und in welches ebenso Taleinschnitte aus dem Plateau der Böhmisches Masse einmünden, treten sowohl so genannte Hangwinde als auch Talwinde im Untersuchungsgebiet auf. Es ist offensichtlich, dass von diesen lokalen thermisch induzierten Windsystemen in erster Linie die hangnahen Stadtteile betroffen sind. Als Hangwinde wird eine Luftströmung bezeichnet, die entlang der Hänge auftritt. Die Richtung, also hangauf- oder hangabwärts wird durch die thermischen Verhältnisse bestimmt. Wenn die Hänge am Vormittag aufgrund der höheren Einstrahlung stärker erwärmt werden als der Beckenboden, stellt sich eine hangaufwärts gerichtete Strömung ein. In der Nacht, wenn sich die thermischen Strukturen umkehren, die Luft über Bergkuppen und Hängen stärker abkühlt als das Becken, dann dreht sich die Strömungsrichtung um, und kalte Luft fließt die Hänge hinab ins Tal.

Bei Talwinden ist die Strömungsrichtung nun entlang einer Talachse orientiert. Durch das kleinere Luftvolumen im Tal verglichen mit jenem über dem vorgelagerten Becken erwärmt sich die Luft im Tal tagsüber rascher als über dem Becken und es beginnt sich eine Strömung von der Ebene in das Tal hinein auszubilden, man spricht von einem Talaufwind oder Bergwind. Am Abend und in der Nacht sind die

thermischen Bedingungen umgekehrt; die Talatmosphäre kühlt sich rascher ab als die Luft über dem flacheren Becken, was zu einer talauswärts gerichteten Strömung führt. Der Haselgraben stellt genau so ein Tal dar, der Haselgrabenwind entspricht dem nächtlichen Talauswind.

Bei Hangabwinden wirkt das größere Gewicht der kalten Luft als Antrieb, die Antriebskraft ist die Gravitation. Talwinde hingegen benötigen für ihren Antrieb einen mehr oder weniger stark ausgebildeten Druckgradienten entlang der Talachse. Nach der Stärke des Gradienten richtet sich dann auch die Stärke der Strömung. Hangwinde erreichen daher in der Regel keine sehr großen Geschwindigkeiten (bis etwa 2 m/s) und besitzen auch keine sehr große vertikale Ausdehnung (bis einige Meter über dem Boden). Talwinde können jedoch bei Vorliegen günstiger Bedingungen in großen alpinen Tälern Geschwindigkeiten von über 10 m/s erreichen, aber auch im Fall des vergleichsweise kleinen Haselgrabens wurden Werte bis 7 m/s festgestellt. Die Strömung erreicht beim Haselgraben eine vertikale Erstreckung von etwa 200 m im Graben und über 100 m außerhalb, wobei ein Jet in etwa der halben Höhe ausgebildet wird.

Diese Angaben zeigen, dass Hangwinde nicht weit in die Bebauung vorstoßen können, sofern keine Luftleitbahnen vorhanden sind, da ihre Bewegungsenergie in Bodennähe von der hohen Rauigkeit sehr bald aufgebraucht ist. Talwinde hingegen können infolge ihrer größeren Höhe und höheren kinetischen Energie weit über das Stadtgebiet hinweg wirken.

4.4 Die Messungen

Im Haselgraben selbst war von 14. 08. 1997 bis 18. 10. 1997 und von 03. 08. 1998 bis 09. 09. 1998 ein Mastsystem in Betrieb. Außerdem wurde am 10. 08. 1998 ein Fesselballonaufstieg innerhalb des Grabens vorgenommen. Der Aufstellungsort des Mastsystems sowie der Ort des Ballonaufstieges können aus Abbildung 49 entnommen werden.



Abb. 49: Standort Haselgraben (Orthofoto)

Im Nahbereich der Mündung des Haselgrabens in das Linzer Becken waren die Messungen dem Ziel des Projektes entsprechend allerdings um einiges umfangreicher als im Haselgraben, was sich auch in der verfügbaren Datenmenge widerspiegelt. Die Aktivitäten reichten vom Betrieb eines Mastsystems am Sportplatz in St. Magdalena bis zu Fesselballonmessungen beim Petrinum im Nordwesten der Stadt und auf dem Heilhamer Feld, einer großen Grünfläche im unmittelbaren Einzugsbereich des Haselgrabenwindes, die etwa 1500 Meter vom Ausgang des Haselgrabens entfernt liegt.

Die Fesselballonmessungen wurden, wie jene im Haselgraben, am 10. 08. 1998 im Rahmen eines Intensivmesstages vorgenommen. Der Mast am Sportplatz wurde im Zuge dieses Messtages in Betrieb genommen und am 18. 02. 1999 wieder abgebaut. Durch eine technische Störung sind allerdings von 28. 12. 1998 bis 15. 01. 1999 keine Daten vorhanden. Zu-

sätzlich liegen auch noch Daten von Ballonaufstiegen auf dem Heilhamer Feld vom Morgen des 23. 09. 1998 vor.

Eine weitere temporäre Messstation wurde auf dem Dach des Brucknerhauses im Donaupark am Südufer der Donau eingerichtet. Diese Station war insofern von Interesse, als das Brucknerhaus einerseits in ziemlich genau südlicher Richtung von der Mündung des Haselgrabens liegt und nach Norden hin nicht von anderen Gebäuden umgeben ist, sodass eine aus Norden kommende Strömung, die die Donau überquert, ohne Hindernisse bis dorthin vordringen kann. Andererseits bietet die direkte Lage am Donautrom die Möglichkeit, die im Donautal auftretenden Strömungen zu erfassen. Die Station wurde am 17. 09. 1998 installiert und war bis 15. 01. 1999 in Betrieb.

Aus dem Jahr 1997 stammen Daten eines Intensivmesstages im Sommer mit Fesselballonaufstiegen an mehreren Stellen des Stadtgebietes. Damit lässt sich das Vordringen des Haselgrabenwindes in das Stadtgebiet recht gut zeigen. Diese Messkampagne wurde am 27. 08. 1997 abgehalten. Es kamen zwei Fesselballonsysteme zum Einsatz. Während mit einem Ballon beim 24er-Turm zwischen 17:30 und 24:00 jede halbe Stunde ein Aufstieg durchgeführt wurde, kam der andere Ballon zweimal beim Wirtschaftshof und je einmal in Ebelsberg (Solar-City) und im Wasserwald zum Einsatz.

Alle temporären Stationen waren mit Sensoren zur Messung von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur ausgerüstet. Bei den beiden Mastsystemen wurde die Temperatur in zwei Niveaus, zwei und zehn Meter, gemessen; die Windmessung erfolgte in zehn Meter Höhe. Die Messung auf dem Brucknerhaus erfolgte etwa zwei Meter über dem Dachniveau.

4.5 Die vertikale Struktur der Haselgrabenströmung

Um ein erstes Bild von der Struktur des Haselgrabenwindes zu bekommen, sollen die Fesselballonmessungen, die am 10. 08. 1998

sowohl im Haselgraben als auch auf dem Heilhamer Feld durchgeführt wurden, analysiert werden. Die in diesen Messungen ermittelten Profile von Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind in den Abbildungen 50 und 51 zu sehen. Daraus lassen sich bereits einige wichtige Merkmale der Strömung ablesen.

Im Haselgraben erstreckt sich die Schicht mit nördlicher Windrichtung bis knapp über 200 Meter Höhe, also ziemlich genau bis zur Kammhöhe, wie aus Abbildung 48 entnommen werden kann. Die Nordrichtung ist nicht weiter überraschend; die durch den Graben hervorgerufene Kanalisierung lässt kaum eine andere Richtung erwarten.

Darüber ist aus dem Profil der Windrichtung deutlich die überlagerte Strömung aus Osten zu erkennen. Im Übergangsbereich, also in jenem Höhenintervall, in dem die Winddrehung stattfindet, weist die Windgeschwindigkeit ein Minimum auf. Die Enge des Höhenintervalls signalisiert einen markanten Übergang, was die

Entkopplung der beiden Strömungen unterstreicht. Die Jetachse befindet sich über dem Messpunkt auf etwa 130 Meter Höhe. Ein genauerer Vergleich zwischen der Obergrenze der Nordströmung und der Topographie des Haselgrabens zeigt ein schwaches Eindringen der Ostströmung in den Graben, was durch die an seiner Ostseite flachere Ausbildung ermöglicht wird. Ein tieferes Eindringen wird durch die unten durchströmende Kaltluft verhindert, auf der die Ostströmung aufgleitet.

Über dem Heilhamer Feld hat die Jetachse allerdings ein tieferes Niveau als im Haselgraben und kommt bei etwas über 50 Metern Höhe zu liegen, was sich im Laufe des Abends nicht verändert. Weiters ist die vertikale Erstreckung der Strömung innerhalb des Grabens bedeutend größer als hier. Es herrscht eine vergleichsweise flache Strömung mit einer Obergrenze von lediglich 80 bis 90 Metern, welche ungefähr NNW-Richtung aufweist. Wenn die Lage der Mündung des Haselgrabens relativ zur Wiese

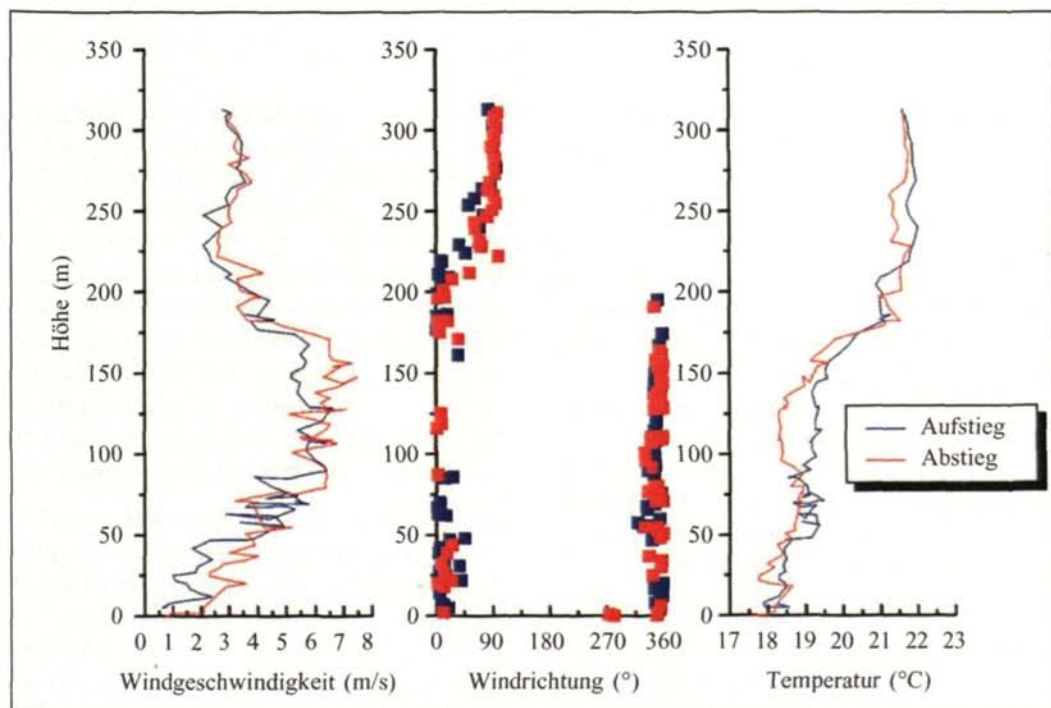


Abb. 50: Fesselballonaufstieg im Haselgraben vom 10.08.1998

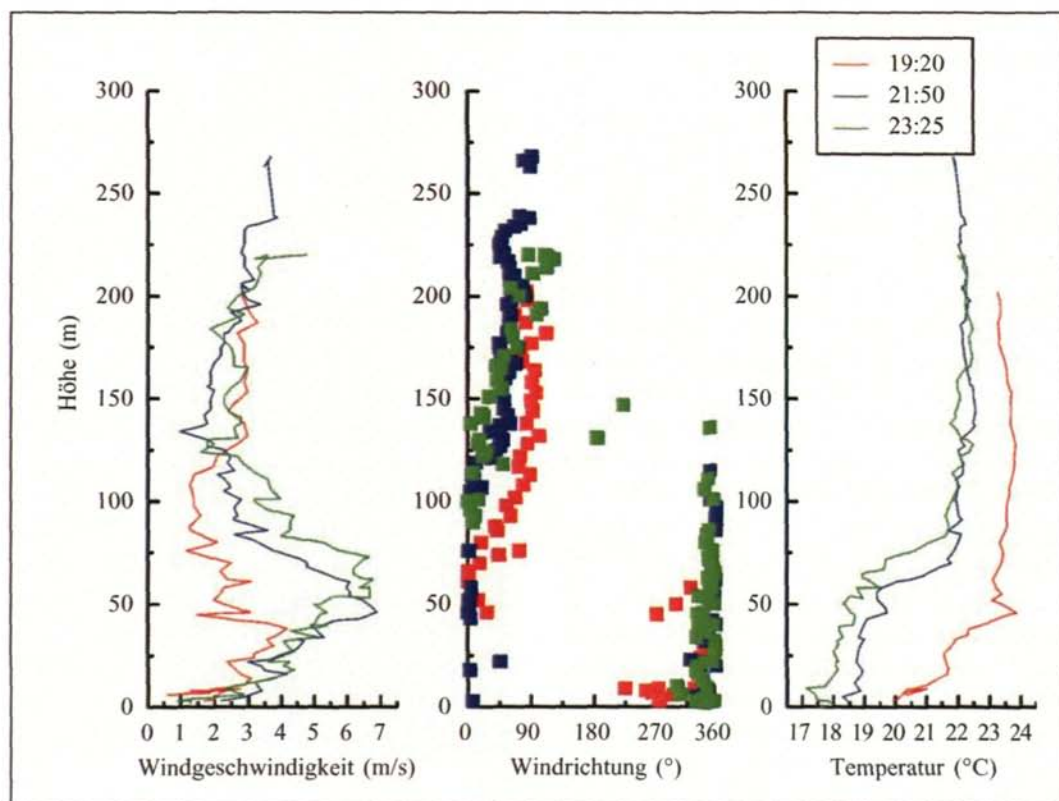


Abb. 51: Fesselballonaufstiege über dem Heilhamer Feld vom 10. 08. 1998

betrachtet wird, die sich ebenfalls in dieser Richtung befindet, so liegt der Schluss nahe, dass die bodennahe Strömung aus dem Haselgraben kommt. Das wird durch die Ähnlichkeit der Wind- und Temperaturprofile von Wiese und Graben untermauert. Die Wiese liegt demnach gänzlich im Einflussbereich des Haselgrabenwindes und wird von den aus dem Graben ausströmenden Luftmassen überstrichen. Wie schon beim Haselgraben, kann auch über dem Heilhamer Feld über der Schicht mit der nördlichen Strömungsrichtung ein Drehen der Windrichtung auf die im mesoskaligen Bereich an ungestörten Tagen vorherrschende Nordostbis Ostrichtung beobachtet werden.

Die Entkopplung zwischen der Strömung aus nördlicher Richtung und der überlagerten Ostströmung ist ebenso aus dem Temperaturprofil ersichtlich, welches über der Nordströmung eine eindeutige Inversion zeigt, also den Übergang

zur gut vier Grad wärmeren Ostströmung. Daher kann im Falle der Grabenströmung von einer Kaltluftströmung gesprochen werden. Diese Inversion sinkt Hand in Hand mit der Achse der Kaltluftströmung beim Austritt aus dem Haselgraben nach unten. Auf der Wiese macht sich in der Folge eine ähnlich ausgeprägte Inversion wie im Graben bemerkbar. Diese ist aber aufgrund der tiefer liegenden Achse der Kaltluftströmung schon in einer Höhe von 50 bis 60 Metern zu finden, ist aber ebenso Indikator für eine ähnliche Entkopplung der Strömungen.

Die Änderung der Temperatur über dem Heilhamer Feld während des Abends - die Strömung ist bei der ersten Messung deutlich wärmer als bei den späteren Aufstiegen - ist zunächst auf den normalen Tagesgang der Temperatur zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der ersten Messung ist die Kaltluftströmung über der Wiese noch nicht voll ausgebildet, das

Geschwindigkeitsprofil zeigt im Vergleich zu den beiden anderen noch keinen ausgeprägten Jet, die höchsten Geschwindigkeiten betragen etwa 4 m/s. Das Temperaturprofil weist noch nicht die typische Inversion auf, die auf eine sich unter der Ostströmung befindende Kaltluftströmung hinweisen würde. Da sich der Einfluss der Haselgrabenströmung erst im Laufe des Abends bemerkbar macht, führt die einströmende Kaltluft erst mit fortschreitender Zeit zu einer Abkühlung der untersten fünfzig bis einhundert Meter, was die Ausbildung der Inversion verzögert und zu der beobachteten Abkühlung während des Abends einen Beitrag leistet.

Die überlagerte Ostströmung, die von der Kaltluft aus dem Haselgraben unbeeinflusst bleibt, kühlt sich zwischen erstem und zweitem Aufstieg um ungefähr zwei Grad ab, die bodennahe Luft, die unter dem Einfluss der Kaltluft steht, erfährt eine Abkühlung von drei bis vier Grad. Somit kann davon ausgegangen werden,

dass der Beitrag der zugeführten Kaltluft zur abendlichen Abkühlung etwa ein bis zwei Grad ausmacht. Die Temperaturprofile der beiden späteren Aufstiege liegen dann auf dem Temperaturniveau des Haselgrabens, was ein weiteres Indiz für die Herkunft der Luft über der Wiese ist.

Wie vehement die Kaltluftströmung aus dem Haselgraben tatsächlich ist, wird gut erkennbar, wenn die bei den Ballonaufstiegen gemessenen Windprofile analysiert werden. Sowohl über der Position Haselgraben als auch über der Wiese sind im Bereich der Achse der Kaltluftströmung Windgeschwindigkeiten um 7 m/s zu beobachten. Der Vergleich mit der Geschwindigkeit des mesoskaligen Ostwindes, die um die 2 m/s beträgt, macht deutlich, wie leicht es dem Haselgrabenwind fällt, sich gegenüber den großräumigeren Zirkulationen in seinem Einflussbereich durchzusetzen. Die Tatsache, dass die Windgeschwindigkeiten bei

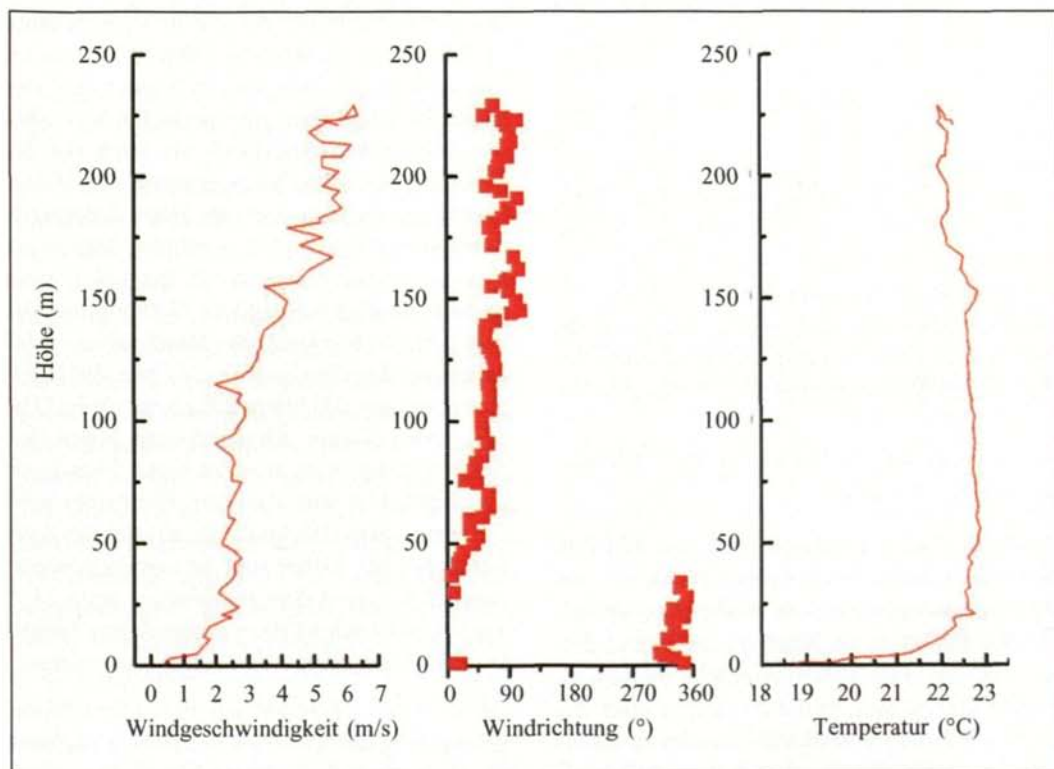


Abb. 52: Fesselballonmessung beim Petrinum vom 10. 08. 1998

voll ausgebildeter Strömung zwischen Haselgraben und Wiese kaum Unterschiede aufweisen, also keine Abnahme der Geschwindigkeit erfolgt, obwohl die Strömung nach dem Austritt aus dem Haselgraben jedenfalls 1,5 km bebautes Gebiet zu passieren hat, bis sie sich über der Wiese befindet, kann auf die Kompensation des Verlustes an kinetischer Energie infolge der erhöhten Oberflächenreibung durch eine Zunahme der kinetischen Energie am Grabenaustritt durch umgewandelte potentielle Energie zurückgeführt werden, wie dies im vorigen Kapitel beschrieben wurde. Darauf deutet auch die beobachtete Absenkung der Jetachse hin.

Wie beschränkt allerdings die Auswirkungen des Haselgrabenwindes in diesem Teil der Stadt Linz noch sind, mit anderen Worten, wie ausgezeichnet und klar definiert die Strömung in diesem Bereich ist, demonstriert eine Fesselballonmessung, die am selben Abend wie die anderen Messungen beim Petrinum westlich des Heilhamer Feldes stattgefunden hat (Abb. 52). Wegen eines Ausfalls der Messsonde während des Aufstieges sind nur die Daten des Abstieges vorhanden. Hier ist von der Nordströmung nichts zu sehen, in den untersten 70 Metern herrscht eine Nordwestströmung, eine Kaltluftströmung, die aus dem Graben, durch den der Dießenleitenbach fließt, auszutreten scheint. Darüber macht sich die oben beschriebene wärmere Ostströmung bemerkbar. Die Windgeschwindigkeiten zeigen klar, dass die hier verzeichnete Kaltluftströmung nicht mit der Haselgrabenströmung vergleichbar ist.

4.6 Die zeitliche Struktur der Haselgrabenströmung

Die bisher dargestellten Messungen und ihre Ergebnisse haben einen Eindruck von der vertikalen Struktur und dem räumlichen Verhalten der Strömung im Haselgraben und in dessen näherer Umgebung vermitteln können. Es lassen sich jedoch keine Aussagen über das zeitliche Verhalten der Kaltluftströmung daraus ableiten. Dazu sind zeitlich höher auflösende Messungen erforderlich, die zumindest einige

Stunden abdecken. Die Fesselballonaufstiege, die beim 24er-Turm im Jahr 1997 vorgenommen wurden, erfüllen diese Bedingungen. Die ermittelten Profile sind in Abbildung 53 zu sehen. Um die Übersichtlichkeit der Abbildung nicht zu beeinträchtigen, sind nur Aufstiege ohne die dazugehörigen Abstiege zu einigen ausgewählten Zeitpunkten dargestellt.

Da sich der 24er-Turm bekanntlich außerhalb des Haselgrabens befindet, stellt sich zunächst die Frage, ob durch Messungen an dieser Position eigentlich über den Haselgrabenwind Aussagen gemacht werden können. Wie sich schon im zweiten Kapitel gezeigt hat, deutet einiges darauf hin, dass die Messstelle des Landes Oberösterreich, die sich bekanntlich ebenfalls dort befindet, die Strömung aus dem Haselgraben bei deren Vorhandensein sehr gut erfassen kann. Die Lage der Position 24er-Turm und die gemessenen Windrichtungen aus Nordwest zeichnen ein eindeutiges Bild.

Bei der Betrachtung der Profile in Abbildung 53 fällt sofort die schon von den Aufstiegen im Haselgraben und über dem Heilhamer Feld vertraute Form auf. Dies gilt sowohl für die Profile der Windgeschwindigkeit als auch für die Temperaturprofile. Ebenso bietet die Windrichtungsverteilung über der Höhe den bereits gewohnten Anblick. Die nördliche Strömungsrichtung in den untersten 100 bis 120 Metern und die darüber vorhandene Drehung auf Ost sind typische Merkmale des Haselgrabenwindes außerhalb des Haselgrabens, da hier die Obergrenze um gut 100 Meter tiefer liegt, als im Graben selbst. Diese Ähnlichkeiten legen den Schluss nahe, dass man es beim 24er-Turm gleichermaßen wie über dem Heilhamer Feld mit der aus dem Haselgraben ausfließenden Kaltluft zu tun hat. Daher sind die vorgenommenen Sondierungen mit dem Fesselballon beim 24er-Turm ausgezeichnet dazu geeignet, das Verhalten der Haselgrabenströmung wiederzugeben.

Beim ersten dargestellten Profil der Windgeschwindigkeit in Abbildung 53 um 18 Uhr kann der beginnende Kaltluftfluss schon erkannt werden. Eine Strömung aus nördlicher Richtung bis

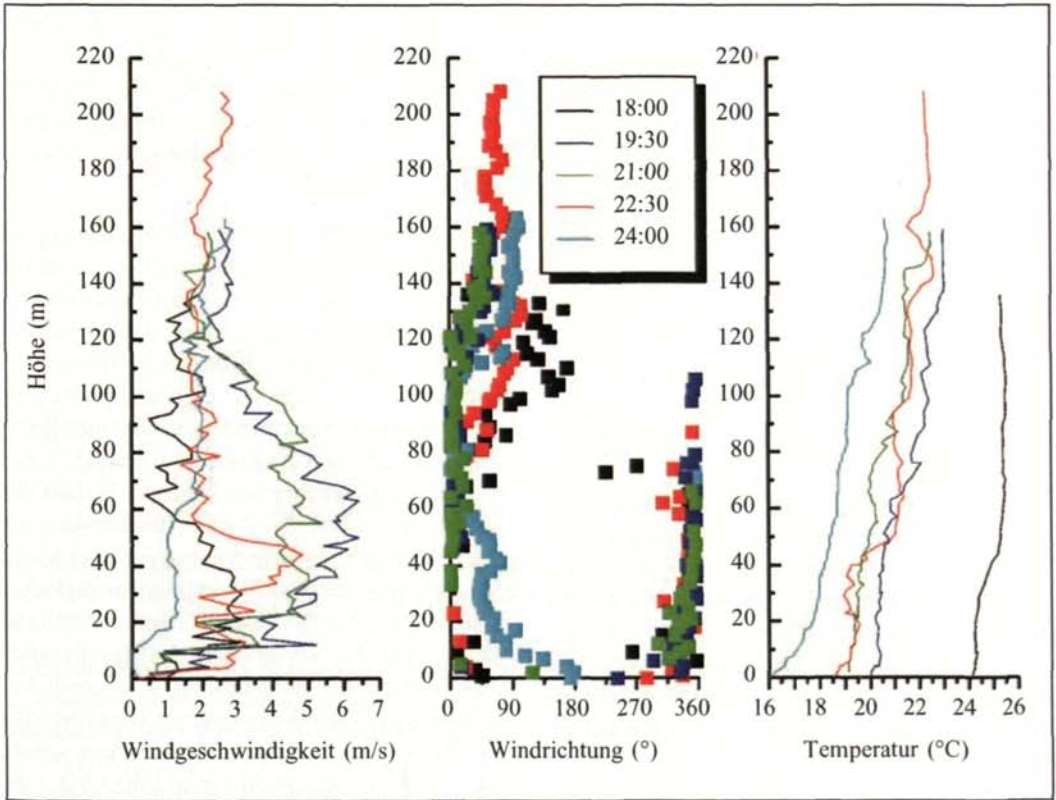


Abb. 53: Fesselballonmessungen beim 24er-Turm vom 27. 08. 1997

etwa 60 Meter Höhe, die ein Maximum von 3 m/s in halber Höhe, also bei 30 bis 40 Metern aufweist und darüber eine Drehung der Windrichtung auf Südost und Windgeschwindigkeiten, die zwischen 1 und 1,5 m/s schwanken, prägen dieses erste Profil. Die Temperatur zu diesem früh-abendlichen Zeitpunkt liegt mit 24°C am Boden und 25°C im Bereich der Südostströmung noch deutlich höher als zu den späteren Messzeitpunkten infolge des normalen Tagesganges der Temperatur, da es sich, wie gesagt, um einen ungestörten Hochsommertag gehandelt hat. Der Südostwind ist eine schon aus Kapitel 2 bekannte, an derartigen Tagen im Linzer Becken tagsüber häufig auftretende Erscheinung. Das Temperaturprofil zeigt bereits eine schwache Inversion im Bereich der höchsten Geschwindigkeiten. Die niedrigere Temperatur am Boden weist auf eine sich unter dem Wind aus Südost entwickelnde Kaltluftströmung hin.

Um 19 Uhr 30 ist die Strömung aus dem Haselgraben voll ausgebildet. Während die Abkühlung in den Höhen über der Kaltluftströmung seit der 18 Uhr-Messung etwa 3°C betragen hat, war sie darunter mit ungefähr 4°C deutlicher ausgeprägt. Die Mächtigkeit der Kaltluft ist gestiegen und reicht zu diesem Zeitpunkt schon in eine Höhe von über 100 Meter. Dies ist aus dem Geschwindigkeitsprofil und dem Profil der Windrichtung zu ersehen, denn erst über dieser Höhe findet das Drehen auf die Ostrichtung statt und die Geschwindigkeit weist ein Minimum auf. Im Temperaturprofil ist keine so deutliche Inversion zu erkennen, wie dies in den in Abbildung 50 und 51 gezeigten Profilen für den Haselgraben und das Heilhamer Feld der Fall war. Über dem Heilhamer Feld und im Haselgraben war die Kaltluftströmung nahezu isotherm, beim 24er-Turm hat die Temperaturzunahme eher einen kontinuierlichen Charakter.

Bei genauerem Hinsehen zeigt sich aber auch hier eine ähnliche Inversion, die zwischen 60 und 80 Metern zu liegen kommt, also knapp oberhalb des Jets. Der Temperaturunterschied zwischen dem Boden und der Obergrenze der Strömung beträgt fast 3°C , was den im Haselgraben beobachteten Werten entspricht. Die kontinuierliche Temperaturzunahme dürfte einerseits auf die Erwärmung der aus dem Haselgraben ausströmenden Luft auf ihrem Weg zum 24er-Turm zurückzuführen sein, zum anderen ist, wie das Geschwindigkeitsprofil zeigt, die Ausbildung des Jets nicht so markant wie im Haselgraben, was durch das Überströmen von Gebieten mit erhöhter Reibung seit dem Austritt aus dem Haselgraben bewirkt wird und ebenfalls zu einem fließenderen Übergang zur überlagerten Strömung beiträgt. Ein direkter Vergleich der Messungen im Haselgraben und über dem Heilhamer Feld einerseits und dem 24er-Turm andererseits, besonders was die Absolutwerte anbelangt, ist problematisch, da die Messungen an verschiedenen Tagen stattgefunden haben.

Die Messung um 21 Uhr bietet in allen Profilen ein ähnliches Bild wie der Aufstieg um 19 Uhr 30. Lediglich die Zone der höheren Geschwindigkeiten hat sich etwas nach oben ausgedehnt, die Geschwindigkeiten sind praktisch gleichgeblieben. Die Geschwindigkeit der überlagerten Ostströmung hat sich dagegen etwas verringert. Um 22 Uhr 30 liegen die höchsten Werte der Windgeschwindigkeit noch immer auf dem Niveau von 21 Uhr, die Dicke der Schicht der Kaltluftströmung ist aber merkbar kleiner geworden. Bereits in einer Höhe von unter 60 Metern fällt die Geschwindigkeit von ihrem Maximalwert (rund 4 m/s) rapide auf die Geschwindigkeit der überlagerten Ostströmung von etwa 2 m/s ab. Dass sich der Übergang zur Ostströmung tatsächlich gesenkt hat, ist aus dem Profil der Windrichtung zu ersehen. Der Wind beginnt sich bei knapp über 60 Metern Höhe von der herrschenden Nordrichtung darunter kontinuierlich auf Ost zu drehen. Das Temperaturprofil zeigt wiederum das gewohnte Aussehen, eine deutliche Inversion im Jetniveau, die den Wechsel von

der kälteren Luft aus dem Haselgraben zur wärmeren Luft der großräumigen Strömung markiert. Der nahezu sprunghafte Anstieg der Temperatur in 40 bis 50 Metern Höhe dürfte an der Beschränkung des Kaltluftjets auf eine vergleichsweise dünne Schicht liegen.

Die Tatsache, dass die überlagerte Strömung aus Osten in tiefere Bereiche vordringen und die Kaltluftströmung in eine dünne, bodennahe Schicht zurückdrängen kann, deutet auf ein Abnehmen der Intensität des Haselgrabenwindes im Vergleich zu den vorhergehenden Aufstiegen hin. Besonders interessant wird der zeitliche Verlauf der Haselgrabenströmung, wenn man die Entwicklung im weiteren Verlauf des Abends betrachtet. Die Profile der Messung um 24 Uhr zeigen nämlich eine nur noch schwache Kaltluftströmung mit Windgeschwindigkeiten um $1,5\text{ m/s}$, die zwar nach wie vor Kaltluft zuführt, was die kontinuierliche Temperaturzunahme mit der Höhe bewirkt, aber verglichen mit den am Abend gemessenen Geschwindigkeiten ziemlich verhalten wirkt. Zudem weisen das Profil der Windrichtung und die Größe der Windgeschwindigkeit eher auf hangab fließende Kaltluft von den umgebenden Hängen hin, als auf einen Talauswind aus dem Haselgraben, da die am Abend in den untersten 100 Metern vorherrschende nordwestliche Richtung von vornehmlich nordöstlichen Richtungen abgelöst wurde.

Der zeitliche Verlauf des Haselgrabenwindes, wie er zunächst aus der beschriebenen Messserie beim 24er-Turm abgeleitet werden kann, zeigt ein Einsetzen der Strömung vor 18 Uhr und ein stetiges Anwachsen in den folgenden Stunden, bis um spätestens 21 Uhr die stärkste Ausprägung sowohl was die Geschwindigkeit als auch die vertikale Ausdehnung betrifft, erreicht ist. Gegen Mitternacht macht sich dann ein Abflauen der Strömung bemerkbar, die dann innerhalb der nächsten Stunde weitgehend zum Erliegen kommt und in den vorhandenen Hangabwinden aufgeht. Diese Darstellung ist wegen ihrer Ableitung aus einem Einzelfall dahingehend zu korrigieren, dass die Zeitpunkte

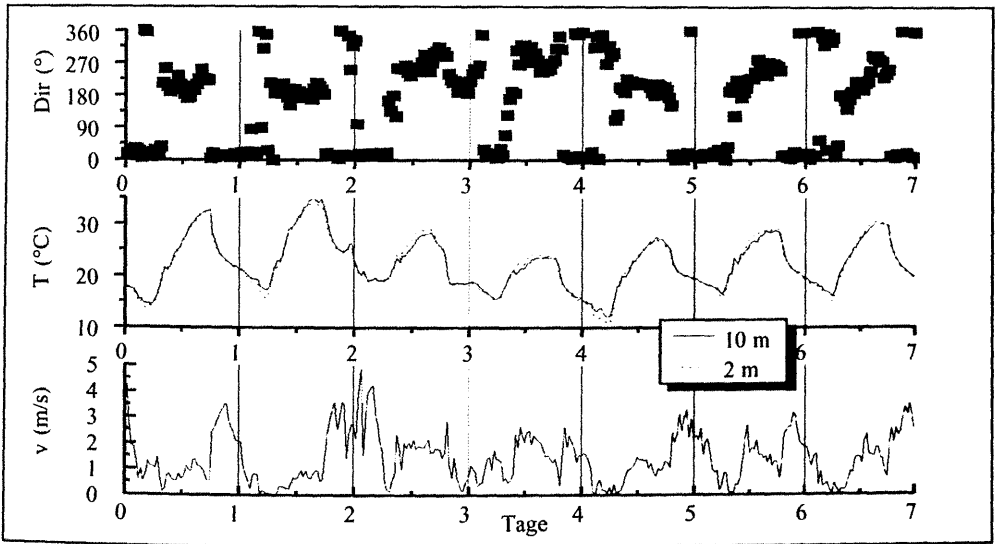


Abb. 54: Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperaturen an der Station Sportplatz vom 11. 08. bis 17. 08. 1998

des Einsetzens und des Stagnierens ebenso wie das Andauern der Strömung innerhalb einiger Stunden variieren können. Die Feststellung, dass die Strömung aber für ein so kleines Tal wie den Haselgraben beachtliche Geschwindigkeiten erreicht und mitten in der Nacht innerhalb kurzer Zeit einschläft, bleibt davon unberührt.

Die Zeitreihen aus den Daten der Maststationen bestätigen das bei den Fesselballonmessungen festgestellte zeitliche Verhalten des Haselgrabenwindes. In den Abbildungen 54 und 55 sind beispielhaft eine Woche im August 1998 an den Stationen Haselgraben und Sportplatz gezeigt.

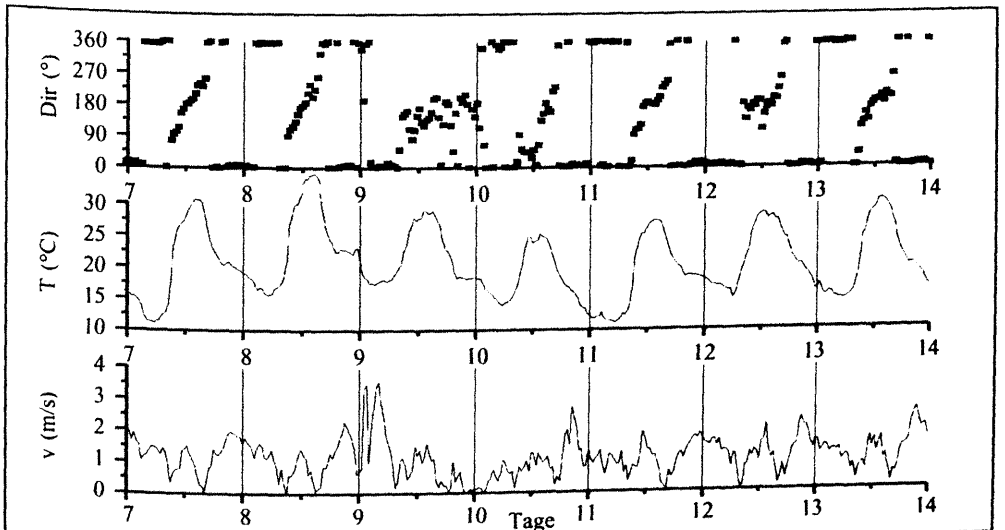


Abb. 55: Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperaturen an der Station Haselgraben vom 11. 8. bis 17. 08. 1998

Da für die Entstehung des Haselgrabenwindes optimale Bedingungen nicht so häufig herrschen, können in einem kürzeren Zeitraum, wie er in den obigen Abbildungen gewählt wurde, kaum mehrere Tage mit entsprechenden Witterungsverhältnissen gefunden werden. So ist auch in den Abbildungen nur der 11.08. wirklich ungetrüb, was nicht heißt, dass der Wind nicht auch an anderen Tagen aufgetreten wäre, wie die Abbildungen zeigen.

In der Nacht vom 12. auf den 13.08. verläuft die Abkühlung nicht ganz ungestört, was auf das Aufziehen von Bewölkung schließen lässt, die dann an den Folgetagen zu den reduzierten Temperaturen führt. All das steht mit einem Frontdurchgang in Zusammenhang. Die Windrichtung dreht am 13. 08. im Tagesverlauf auf West bis Nordwest und am Abend bildet sich auch kein Haselgrabenwind aus. Am Tag darauf verläuft die Abkühlung am Abend trotz der tagsüber gedämpften Temperaturen wieder weitgehend ungestört, und es ist auch wieder ein leichter Wind aus nördlicher Richtung vorhanden. In den restlichen Tagen ist ebenfalls eine Strömung aus dem Haselgraben vorhanden.

Grundsätzlich lassen sich somit auch aus den Daten der Maststationen wesentliche Verhaltensmuster des Haselgrabenwindes erkennen. Der Verlauf der Windgeschwindigkeit gibt sehr gut deren Anwachsen in den Abendstunden wieder. Selbstverständlich kann die Station in 10 Metern Höhe nicht die Geschwindigkeiten im Jet des Haselgrabenwindes wiedergeben, da dieser bekanntlich weiter oben zu liegen kommt. In der zweiten Nachthälfte kommt es außerhalb des Grabens zu einer Stagnationsphase, während im Graben bis zum Morgen noch ein leichter Talaswind aufrecht bleibt.

Bei Sonnenaufgang, wenn sich das Talwind-system umkehrt, geht auch die Windgeschwindigkeit im Haselgraben auf verschwindend kleine Werte zurück, um anschließend mit dem aufkommenden Taleinwind wieder anzuwachsen. Dieser erreicht aber nicht die Geschwindigkeiten des Talaswindes und bleibt auch nur bis kurz nach Mittag aufrecht.

Dann beginnt sich die Windrichtung bereits umzukehren und es folgt nach einer kurzen Stagnationsphase der starke Geschwindigkeitsanstieg des Talaswindes, der nach Mitternacht wieder an Stärke verliert.

4.7 Die horizontale Struktur der Haselgrabenströmung

Zeitgleich zu den Messungen beim 24er-Turm wurden Messungen an verschiedenen Punkten im Stadtgebiet durchgeführt, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben. Der Wirtschaftshof liegt im innerstädtischen Bereich, der Wasserwald im Süden und Ebelsberg im Südosten des Stadtgebietes. Um die beiden letztgenannten Punkte zu erreichen, muss die Strömung einen Großteil des Stadtgebietes überqueren. In den Abbildungen 56 und 57 sind die Profile für die beiden Messungen beim Wirtschaftshof im Vergleich zu den entsprechenden Profilen beim 24er-Turm zu sehen. Die Abbildungen 58 und 59 bieten das Gleiche für Ebelsberg und Wasserwald.

Der Station 24er-Turm am nächsten und bereits im bebauten Gebiet liegt der Wirtschaftshof. Der Haselgrabenwind hat bis zu diesem gegen eine erhöhte Bodenrauigkeit anzukämpfen und auch das Donautal zu überwinden. Wie Abbildung 54 zeigt, führt dies zu einer Reduktion der Windgeschwindigkeit in den untersten 100 Metern. Während beim 24er-Turm der Jet mit Spitzengeschwindigkeiten über 6 m/s noch voll ausgeprägt ist, kann man diesen beim Wirtschaftshof nicht mehr so deutlich erkennen. Zwar zeigt sich ein Maximum mit etwas über 4 m/s, ansonsten ist die Windgeschwindigkeit bis ungefähr 100 Meter Höhe ziemlich gleichmäßig verteilt, was eine direkte Folge der Wirkung der erhöhten Bodenrauigkeit vor allem in den unteren Schichten des Windes ist.

An der Obergrenze der Strömung in etwa 120 Metern Höhe weisen beide Standorte das gleiche Geschwindigkeitsniveau auf, da der Einfluss der Bodenreibung bis in diese Höhe nicht mehr vordringt. Auffällig ist jedoch die weitere Abnahme der Windgeschwindigkeit beim Wirtschaftshof im Bereich der überlagerten

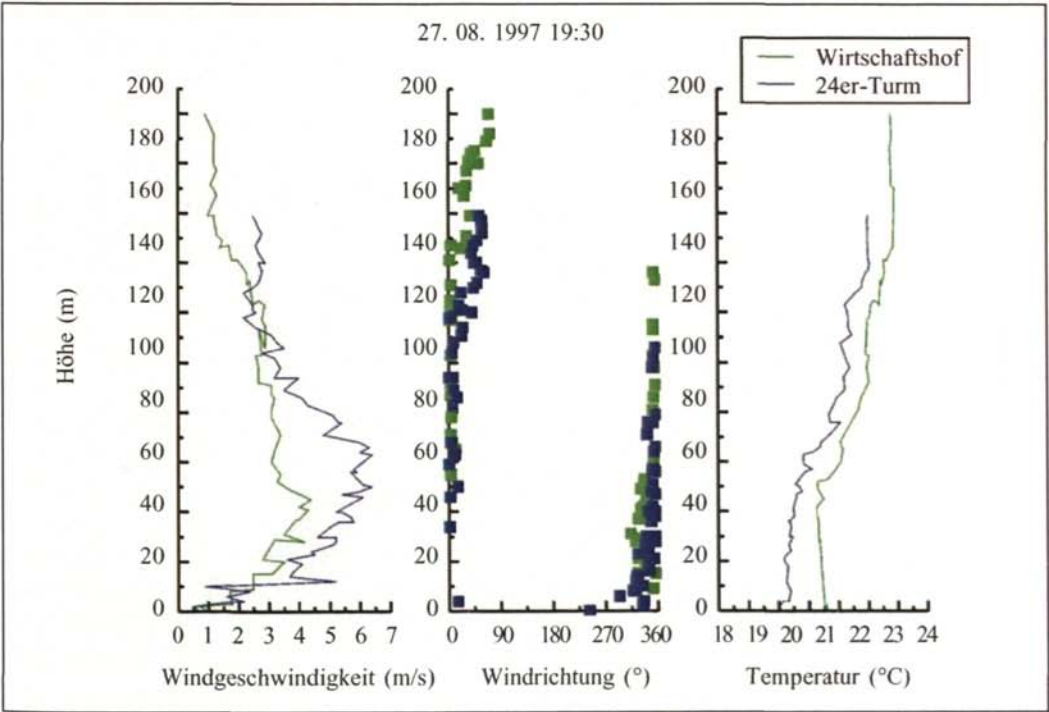


Abb. 56: Vergleich Wirtschaftshof - 24er-Turm um 19:30

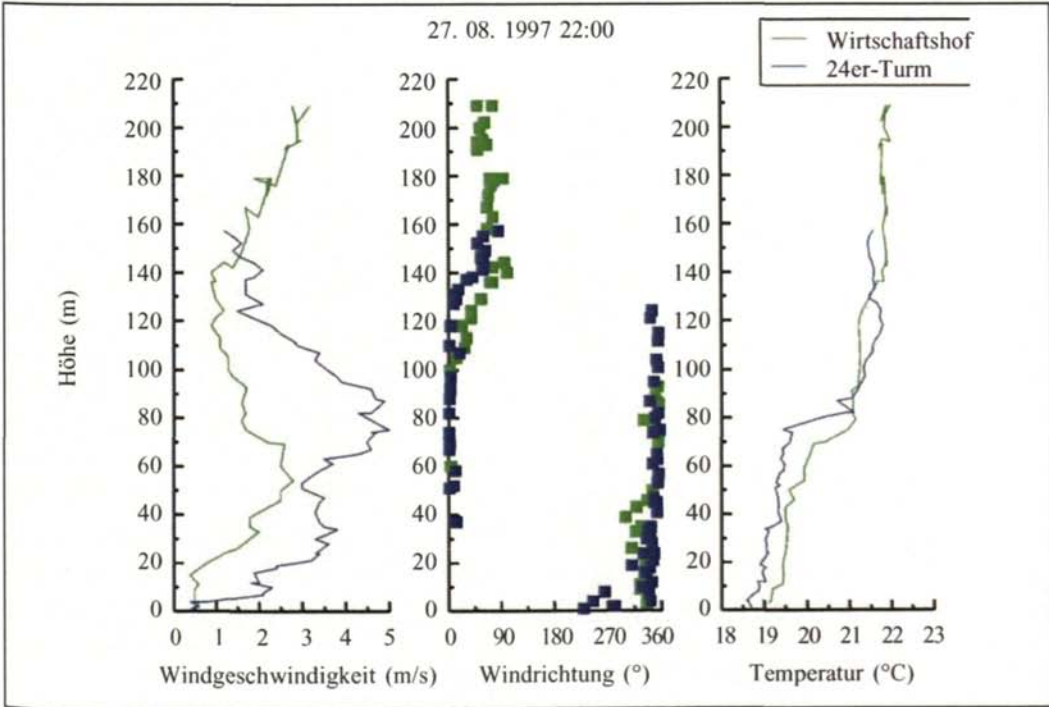


Abb. 57: Vergleich Wirtschaftshof - 24er-Turm um 22:00

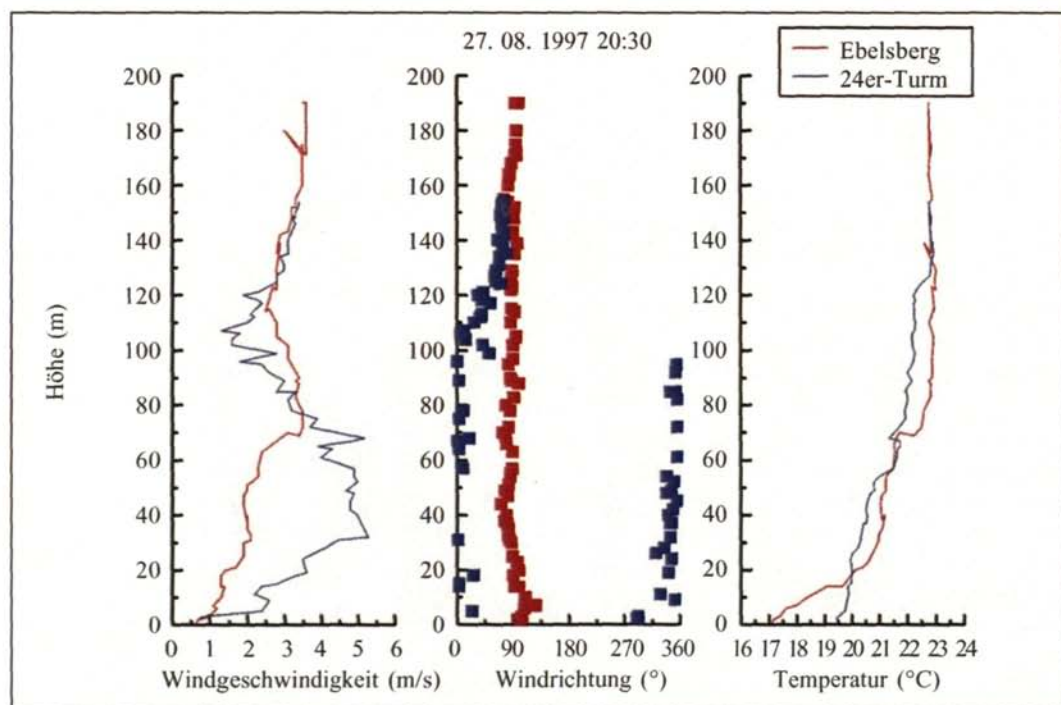


Abb. 58: Vergleich Ebelsberg - 24er-Turm um 20:30

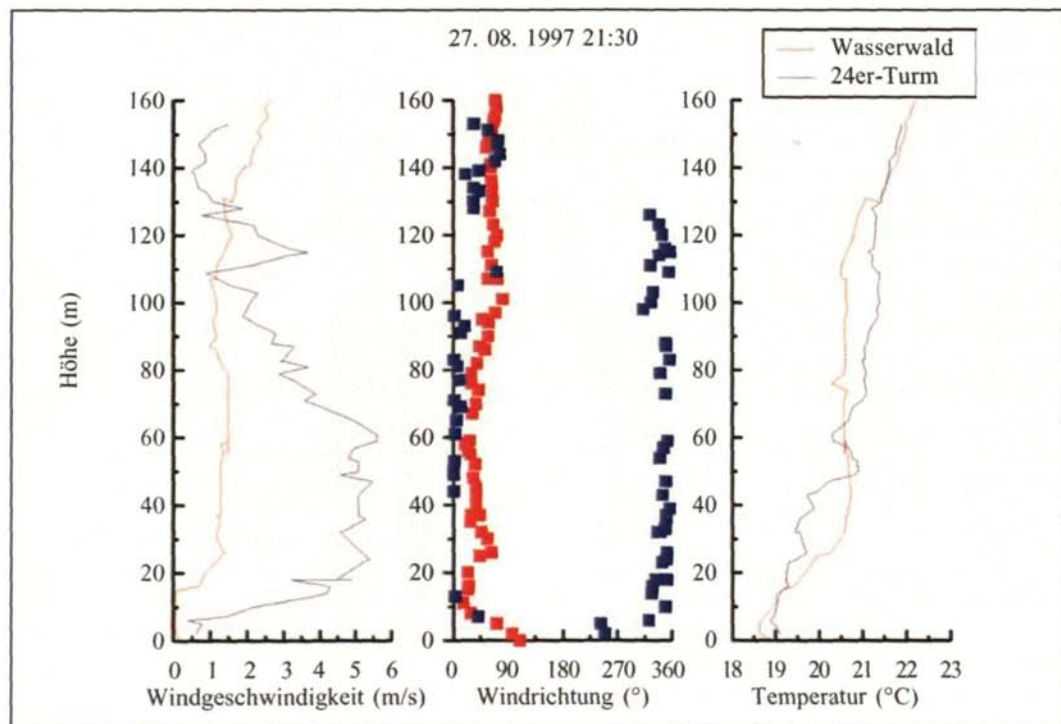


Abb. 59: Vergleich Wasserwald - 24er-Turm um 21:30

Ostströmung, während beim 24er-Turm in Ansätzen ein Gleichbleiben der Geschwindigkeit zu erkennen ist.

Die Temperaturprofile an beiden Standorten verlaufen abgesehen von der bodennahen Schicht nahezu parallel. Das ist jedenfalls ein guter Indikator für das Vorhandensein derselben Luftmasse in beiden Fällen. Lediglich in Bodennähe macht sich die innerstädtische Lage des Wirtschaftshofes durch eine um 1,5 Grad höhere Temperatur gegenüber dem 24er-Turm bemerkbar. In der Höhe verringert sich die Differenz auf etwa 0,5 Grad. Auch die schon bekannte deutliche Temperaturinversion von nahezu 2,5 Grad ist in beiden Profilen gut zu erkennen. All das zeigt somit, dass der Haselgrabenwind im Laufe seiner Reise zum Wirtschaftshof zwar durch die Bebauung an Kraft einbüßt, sein Vorhandensein in dieser Umgebung aber außer Frage steht.

Bei der zweiten Vergleichsmessung beim Wirtschaftshof zweieinhalb Stunden später bietet sich über weite Strecken ein ähnliches Bild (Abb. 57). Die Windgeschwindigkeiten sind generell geringer als bei der ersten Messung, das Jetprofil ist bei beiden Aufstiegen nach wie vor gut zu sehen. Jetzt erfährt die Geschwindigkeit im Bereich der überlagerten Strömung über dem Wirtschaftshof eine deutliche Zunahme, während über dem 24er-Turm geringere Werte als vorhin auftreten. Die Ostströmung scheint sich demnach erst im Laufe des Abends über dem städtischen Gebiet zu etablieren. Bei den Temperaturprofilen ist eine Annäherung feststellbar; die vordringenden Luftmassen aus dem Haselgraben führen offenbar zu einer Angleichung des Temperaturniveaus mit zunehmender Dauer der Strömung.

Anders als beim Wirtschaftshof sieht es bei der Station Ebelsberg aus (Abb. 58). Dieser Standort liegt wesentlich weiter von der Mündung des Haselgrabens entfernt und auch nicht direkt südlich davon, wie dies beim Wirtschaftshof der Fall ist. Wie aus dem Profil der Windrichtung zu entnehmen ist, herrscht dort in der

gesamten Höhe eine östliche Strömung. Die Spitze im Geschwindigkeitsprofil in etwa 80 Metern Höhe rührt aus diesem Grund keineswegs vom Haselgrabenwind her. Bemerkenswert ist, dass diese Ostströmung zweigeteilt ist. Der obere überlagernde Teil ist der auch an allen anderen Stationen als überlagerte Ostströmung auftretende Wind, was durch die nahezu perfekte Übereinstimmung sowohl zwischen den beiden Wind- als auch Temperaturprofilen in der Höhe belegt wird. Die darunter liegende Ostströmung in Ebelsberg stellt sich als von der Höhenströmung teilweise entkoppelt dar, was sich auch am Rückgang der Geschwindigkeit im Niveau von ungefähr 120 Metern und an der beachtlichen Inversion im Temperaturprofil ausdrückt.

Der Aufstieg im Wasserwald (Abb. 58) zeigt ebenfalls keine Spur vom Haselgrabenwind. Die auftretenden Strömungen kommen aus nordöstlicher Richtung und weisen nur geringe Geschwindigkeiten auf. In der Höhe findet sich wiederum der Übergang zur überlagerten Ostströmung, der von einer deutlichen Zunahme von Windgeschwindigkeit und Temperatur gekennzeichnet ist. Darunter findet sich im Temperaturprofil eine hervorstechende isotherme Schicht mit einer vertikalen Erstreckung von nahezu 80 Metern, die sich über einer Bodeninversion, welche wahrscheinlich auf die Lage des Standortes in bewaldetem Gebiet zurückzuführen ist, aufgebaut hat.

Es bedarf sicher genauerer Untersuchungen, um die Strömungsvorgänge in den untersten 100 Metern am Standort Wasserwald zu erklären, wichtig ist jedoch, dass sich offenbar über dem gesamten Stadtgebiet eine stabile Schicht mit einer Höhe von annähernd 120 Metern ausbildet, die von der darüber liegenden Ostströmung zumindest einigermaßen abgekoppelt ist und ein Eigenleben führt. Der Haselgrabenwind seinerseits schafft es nicht, das gesamte Stadtgebiet zu erreichen, in einem großen Teil der Stadt bis weit nach Süden ist er jedoch feststellbar und besitzt in diesen Gebieten für die Belüftung große Bedeutung.

4.8 Weitere Aspekte des Haselgrabenwindes

Die vorherrschende Rolle, die der Haselgrabenwind in seinem Einflussgebiet einnimmt, wird auch in Abbildung 60 deutlich, die den Verlauf von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur von 24. 09. 1998 Mittag bis 25. 09. 1998 Mittag für die Stationen Sportplatz und Brucknerhaus zeigt.

An der Station Sportplatz (rot) ist das Einsetzen des Haselgrabenwindes um etwa 18 Uhr sehr gut zu erkennen. Innerhalb kurzer Zeit wächst die Windgeschwindigkeit deutlich an, die Windrichtung dreht auf Nord. Mit bis zu 3 m/s liegt die Windgeschwindigkeit bei einer Höhe des Messpunktes von zehn Metern etwa in dem Bereich, den auch die Windprofile der Ballonmessungen zeigen. Daraus folgt, dass in diesem Zeitraum in Höhen von 50 bis 70 Metern bereits

Windgeschwindigkeiten von bis zu 7 m/s geherrscht haben. Die Station Brucknerhaus zeigt zu dieser Zeit schwächere Winde, die mit Einsetzen der Strömung aus dem Haselgraben ebenfalls auf Nord drehen. Wenn dies unter der Tatsache betrachtet wird, dass diese Position unter dem Einfluss des Donautales steht und somit einer vorherrschend südwestlichen bis westlichen Strömung unterliegt, wie dies auch in Abbildung 60 für die Nachmittagsstunden oder dann wieder für die Nachtstunden zu sehen ist, ist das zweifelsohne bemerkenswert.

Schon vor Mitternacht bricht die Nordströmung ziemlich abrupt zusammen. Ein fast vollkommenes Stagnieren der Zirkulation im Bereich des Heilhamer Feldes ist in den Stunden danach zu verzeichnen, bis nach Sonnenaufgang die Hangaufwinde einsetzen und zu einer südöstlichen bis südwestlichen Strömung führen. Nach dem Ende der Haselgrabenströmung kann sich

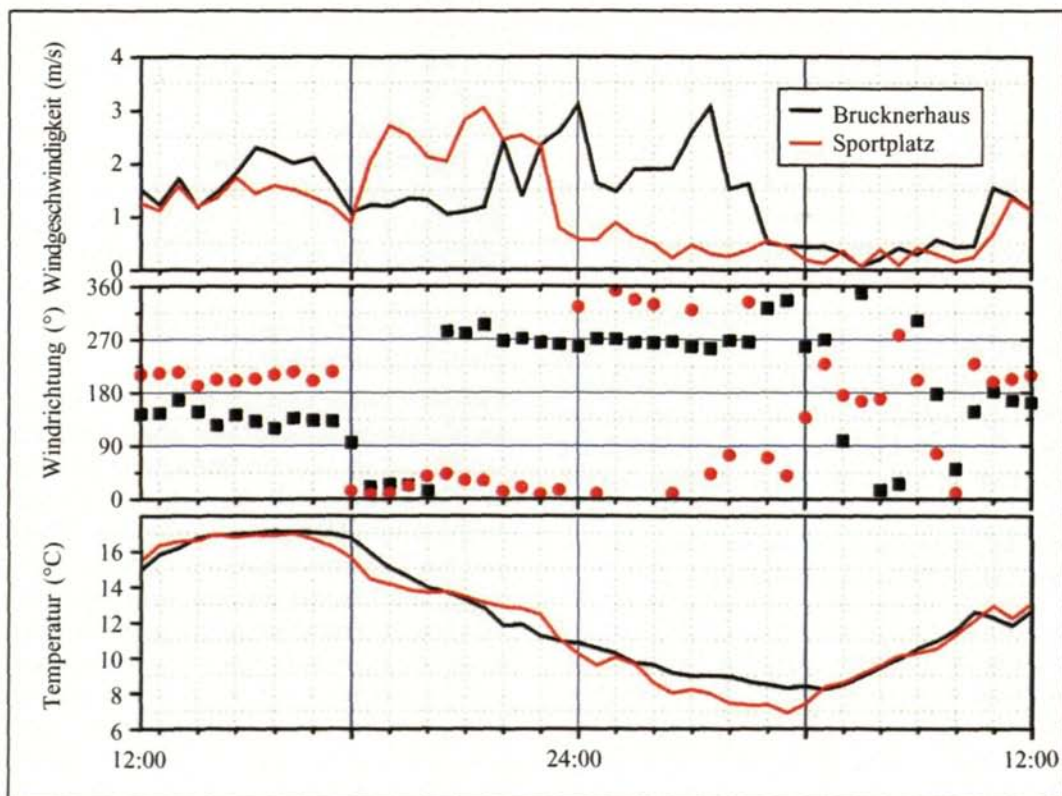


Abb. 60: Sportplatz und Brucknerhaus 24. 09. 1998 - 25.09.1998

an der Station Brucknerhaus wieder die Westströmung durchsetzen, während am Sportplatz St. Magdalena die Windgeschwindigkeit gegen Null geht. Das geschilderte zeitliche Verhalten findet sich bei den Messstationen mit einer überzeugenden Regelmäßigkeit. Lediglich die Zeitpunkte des Einsetzens bzw. des Stagnierens der Strömung können an den einzelnen Tagen um einige Stunden differieren.

Abschließend sollen noch die Ergebnisse der Fesselballonaufstiege auf dem Heilhamer Feld vom 23. September 1998 betrachtet werden. Es wurden drei Aufstiege in den frühen Morgenstunden durchgeführt, wobei der erste noch vor Sonnenaufgang stattfand. Die Profile der drei Aufstiege sind in Abbildung 61 zu sehen.

Die Nacht vom 22. 09. auf 23. 09. 1998 war, zumindest was den Haselgrabenwind betrifft, eine ungewöhnliche Nacht. Das Einsetzen des Windes konnte erst gegen 21:30 Uhr verzeich-

net werden und von einem Abflauen nach Mitternacht konnte keine Rede sein. Dies mag damit zusammenhängen, dass der Sonnenschein am 22. 09. nicht ganz ungetrübt war und somit die Einstrahlung tagsüber nicht voll wirksam war. Insofern können die Aufstiege nicht als repräsentativ für den Haselgrabenwind gewertet werden.

Sie legen jedoch eine Art Umkehrschluss nahe, wie etwas später noch erläutert wird. Der ursprüngliche Zweck der Messungen war, das Vorhandensein einer stabilen Schicht nach dem Abflauen des Haselgrabenwindes nachzuweisen, was natürlich, wie die Umstände vermuten lassen und die Abbildungen auch zeigen, nicht möglich war.

Es lässt sich nur beim ersten Aufstieg noch vor Sonnenaufgang eine Inversion in Bodennähe feststellen, die aber mit der noch vorhandenen Kaltluftströmung direkt in Verbindung steht

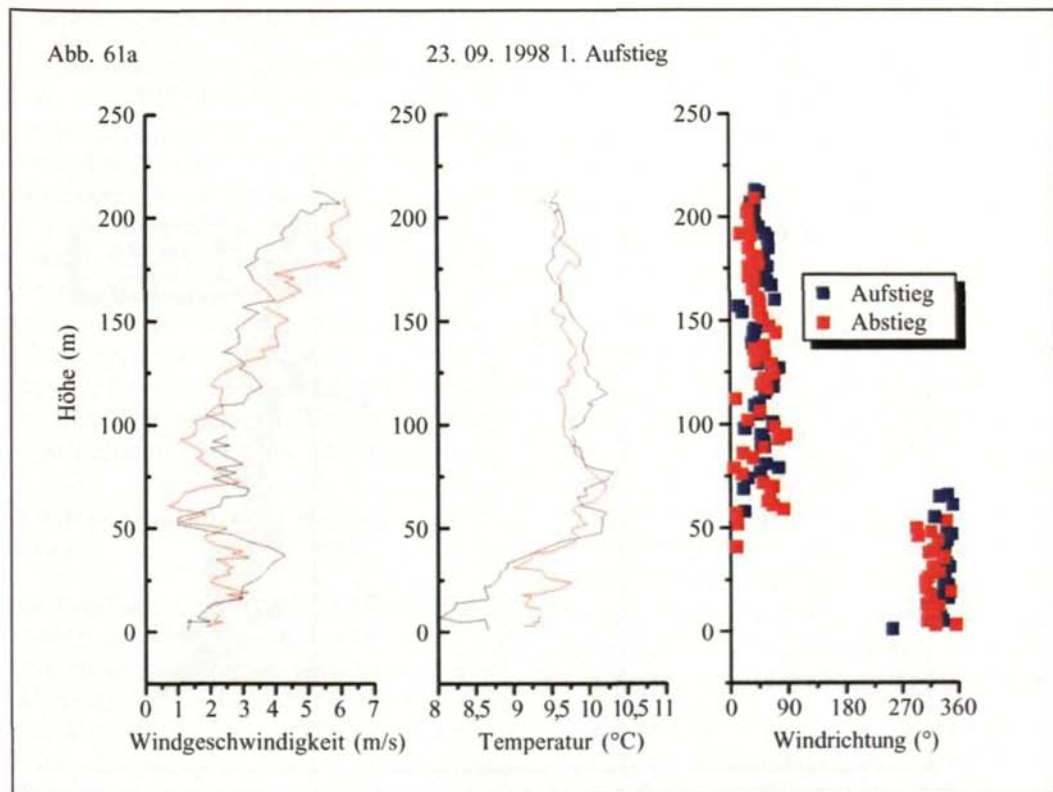
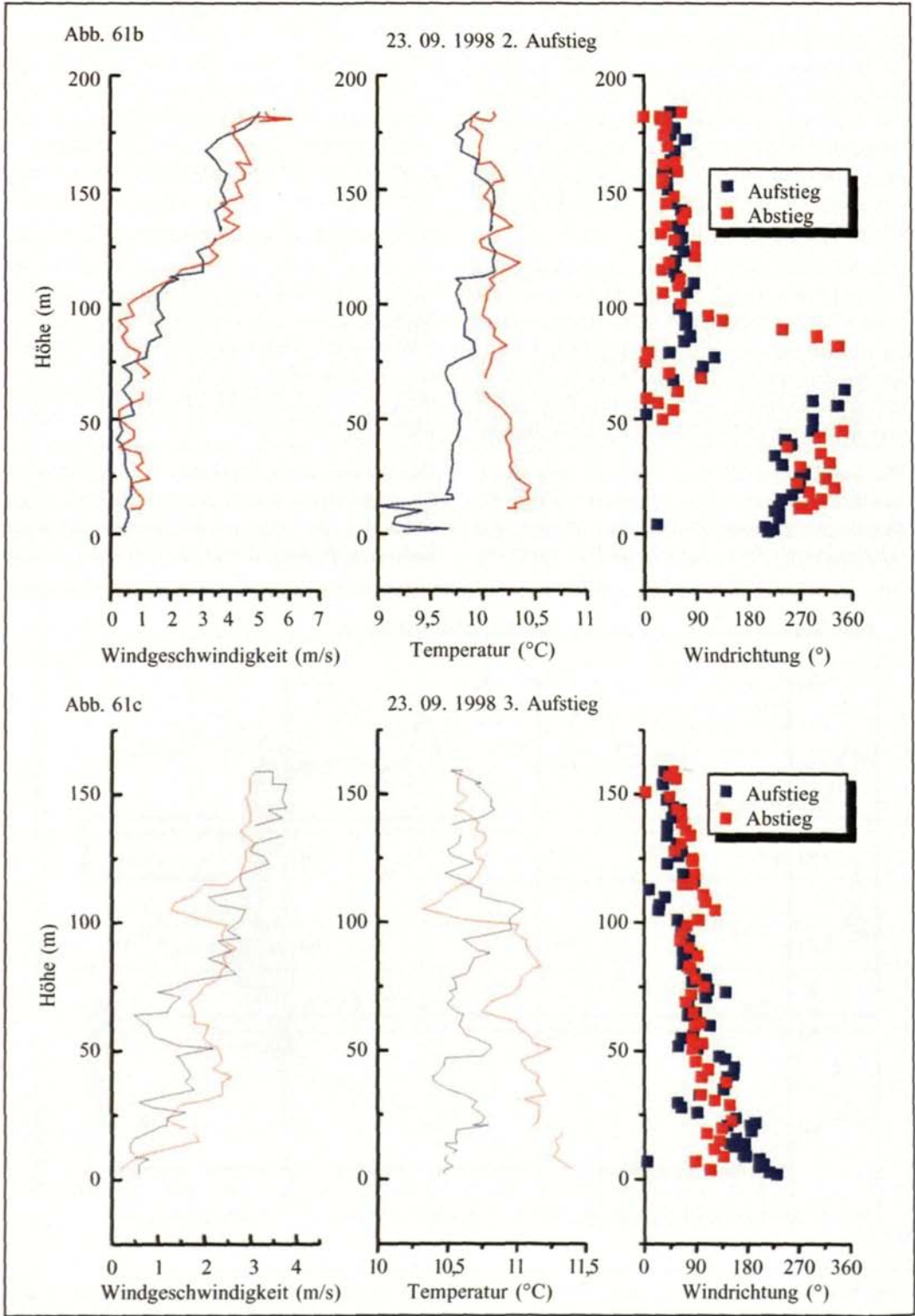


Abb. 61a-61c: Fesselballonmessung Heilhamer Feld am 23. 09. 1998 (Abb. 61b und 61c nächste Seite)



und auf keine stabile Schicht über dem Stadtgebiet schließen lässt. Darüber herrscht nahezu Isothermie. Beim Abstieg macht sich schon der Einfluss der aufgehenden Sonne bemerkbar. Der Temperaturunterschied am Boden beträgt zwischen Beginn des Aufstieges und Ende des Abstieges fast ein Grad. Die Inversion verschwindet Hand in Hand mit der abnehmenden Windgeschwindigkeit aus Nord.

Die zweite Messung weist auf weitgehende Stagnation in den untersten 100 Metern, eine isotherme Schichtung über die gesamte Höhe und eine Drehung der Windrichtung auf Süd hin. Der Wechsel zwischen nächtlichem Talauswind und dem Taleinwind nach Sonnenaufgang ist voll im Gange. Die kräftige Erwärmung führt zu deutlichen Temperaturunterschieden zwischen Auf- und Abstieg. Im dritten Bild ist der Übergang abgeschlossen, die einheitlichen Profile von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperatur deuten auf eine gute Durchmischung der Atmosphäre hin.

Die charakteristischen Eigenschaften des Haselgrabenwindes zeigen also ein von den gewohnten Vorstellungen eines Berg-Tal-Windsystems abweichendes Bild. Der zeitliche Verlauf mit dem raschen Aussetzen der Luftströmung in der Zeit um Mitternacht ist ziemlich untypisch für einen Talauswind. Ebenso verhält es sich mit den für ein Tal mit der Größe des Haselgrabens überaus hohen Windgeschwindigkeiten im Jet-niveau. Auch die Tatsache, dass ein Taleinwind tagsüber kaum zu verzeichnen ist, widerspricht der gängigen wissenschaftlichen Auffassung vom Verhalten eines derartigen Windsystems.

4.9 Hypothesen zum Haselgrabenwind

Zur Erklärung des eigenwilligen Verhaltens des Haselgrabenwindes konnte in GEPP (1999) eine Hypothese ausgearbeitet werden. Der Antrieb der Strömung geschieht durch rein thermische Faktoren. Die Struktur der Gleichzeitigkeit der Windrichtungen am Freinberg und beim 24er-Turm weist das dafür typische Aussehen auf (Abb. 62).

Bei Auftreten des Haselgrabenwindes an der Station 24er-Turm, was vor allem bei stabiler Schichtung der Fall ist, ist deutlich das von der synoptischen Windrichtung unabhängige Verhalten der Windrichtung am Boden an der horizontalen Struktur des Diagramms zu erkennen. Der Wind strömt die Station aus etwa 340° an, was der relativen Position des 24er-Turmes zum Haselgraben entspricht. Nach den theoretischen Diagrammen von WEBER u. KAUFMANN (1998) unterliegt der Haselgraben somit eindeutig einem thermischen Antrieb. Das Fehlen der zweiten horizontalen Linie beim realen Diagramm weist auf das bereits erwähnte Ausbleiben des Taleinwindes tagsüber hin.

Da der 24er-Turm selbst aber nicht im Haselgraben liegt, sondern außerhalb im freieren Gelände, findet sich dort auch das Schema aus Abbildung 63 wieder, das den Impulstransport nach unten beschreibt. In jenen meist neutralen oder instabilen Fällen nämlich, in denen der Haselgrabenwind nicht auftritt, lässt sich gut die diagonale Struktur erkennen, auch die leichte Abweichung von der 45° -Diagonalen ist zu sehen. Diese Abweichung bedeutet eine durch Reibungseffekte bewirkte Drehung des Windes gegen den Uhrzeigersinn von oben nach unten (GEPP 1999).

Allein aus dem Unterschied der Volumina zwischen Haselgraben und Linzer Becken lässt sich das Verhalten der Strömung nicht erklären. Am 11. 08. 1998 betrug die Temperaturschwankung in der Talatmosphäre 20°C , im Linzer Becken nur 19°C (Abb. 64). Es zeigt sich also nur sehr schwach der Volumeneffekt, die Temperaturschwankung in der Talatmosphäre ist nur unwesentlich größer als im Linzer Becken. Der sich daraus ergebende Temperaturgradient reicht für die Generierung eines Talwindes nicht aus. Diese Verhältnisse werden auch durch Vergleiche der Stationen an anderen Tagen bestätigt.

Der wesentliche Effekt für das Zustandekommen des nötigen Temperaturunterschiedes zwischen Linzer Becken und Haselgraben ist die zeitliche Verschiebung der Temperaturkurven. Diese wird

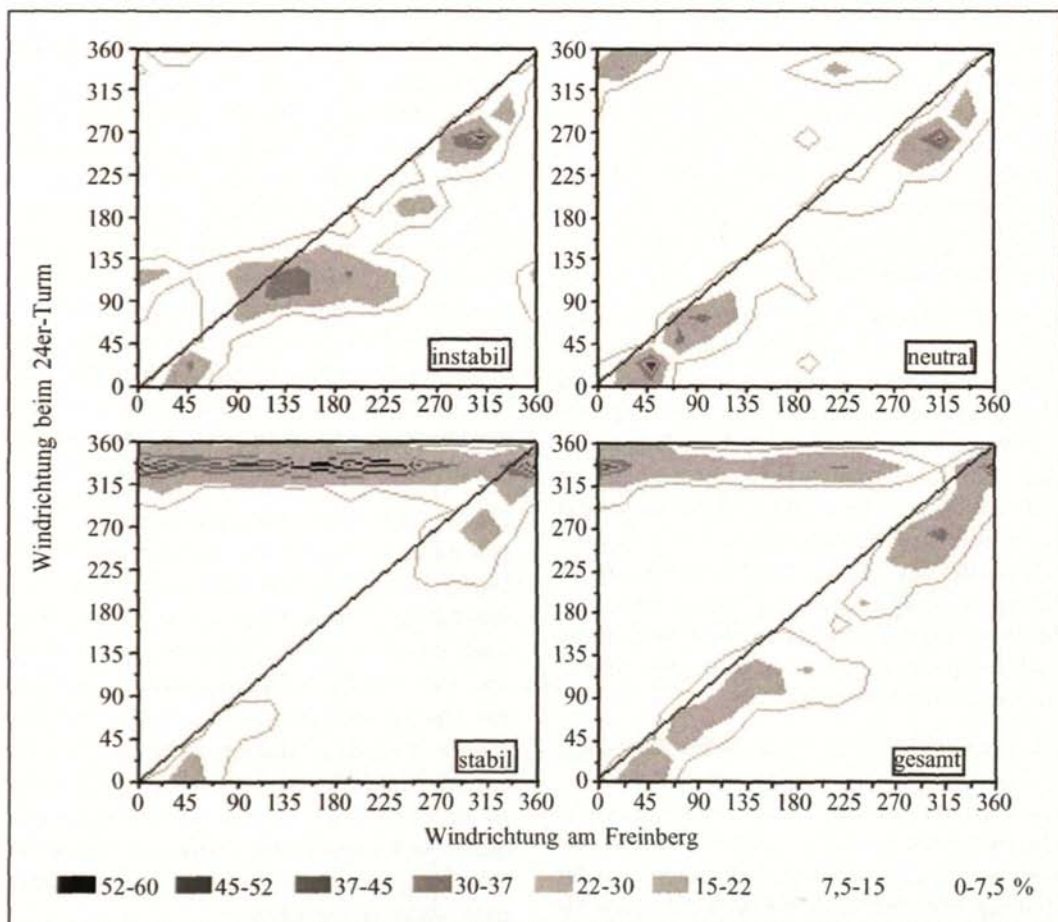


Abb. 62: Vergleich zwischen der Störung am 24er-Turm und am Freinberg bei unterschiedlicher Stabilität (PRABHA 1996)

durch den unterschiedlichen Strahlungsgenuss der Atmosphäre im Haselgraben und im Linzer Becken bewirkt.

Die fast exakte Nord-Süd-Ausrichtung des Haselgrabens und sein tiefer V-förmiger Querschnitt bewirken eine sehr kurze Periode direkter Einstrahlung. Die Talatmosphäre erwärmt sich zwar wegen ihres geringen Volumens ziemlich rasch, der Erwärmungsvorgang wird aber vorzeitig abgebrochen. Die Atmosphäre im Linzer Becken erwärmt sich langsamer, die Einstrahlung bleibt aber dort länger aufrecht, so dass sich die Maxima der Temperaturen kaum von jenen im Haselgraben unterscheiden. Während jedoch im Becken die

Erwärmungsphase noch andauert, beginnt die Luft im Haselgraben, der bereits im Schatten liegt, abzukühlen. Die Abkühlung im Becken beginnt erst mit einiger zeitlicher Verzögerung. Dadurch entsteht in den späten Nachmittagsstunden ein beachtlicher Temperaturunterschied, der einen kräftigen Talwind induzieren kann. Die Temperaturdifferenz beträgt in typischen Fällen bis zu 10 °C (Abb. 64).

Im Laufe des Abends verringert sich dieser Temperaturunterschied auf ein auch aus anderen Untersuchungen bekanntes Niveau von 2 bis 3 °C, was für die Aufrechterhaltung des Windes ausreicht. Die städtische Wärmeinsel wirkt sicher unterstützend für den Haselgraben-

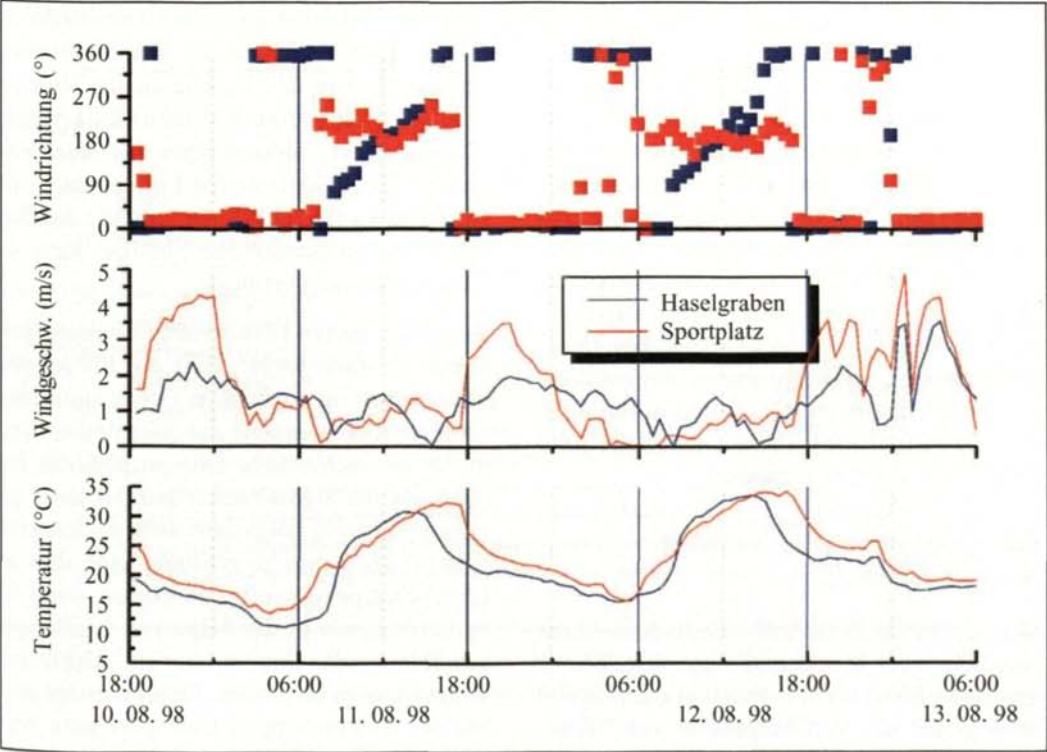
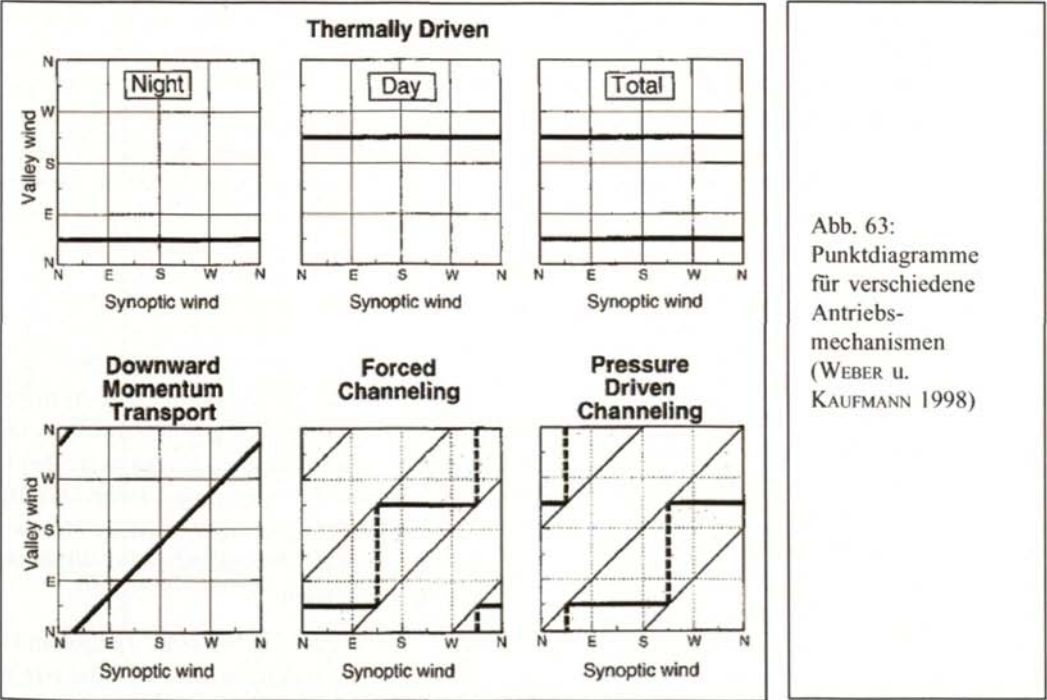


Abb. 64: Haselgraben und Sportplatz 10. 08. 1998 18:00 - 13. 08. 1998 06:00

wind, kann aber nicht als dessen primäre Antriebskraft gelten. Die zweite Nachthälfte ist dann jene Zeit, in der sich über dem Linzer Becken eine stabile Schicht aufzubauen beginnt (PRABHA 1996). Diese kann gemeinsam mit dem dann nur noch schwach wirksamen Temperaturgradienten eine Erklärung für das

ziemlich rasche Einschlafen des Haselgrabenwindes liefern. In dieser Periode, die aufgrund der geringen Austauschvorgänge für Schadstoffanreicherungen kritisch sein kann, ist nur noch eine schwache Strömung mit maximal 1 bis 2 m/s vorhanden, die in der selben Größenordnung wie die Hangabwinde liegt.

5 WEITERE MESSUNGEN UND ANALYSEN

5.1 Einleitung

Im Rahmen dieser Studie wurde versucht, neuartige Messinstrumente einzusetzen, um deren Vor- und Nachteile bei der Erfassung der vorliegenden Fragestellung bloßzulegen. Da die herkömmlichen Messmethoden nicht bei allen auftretenden Phänomenen zufriedenstellende Ergebnisse liefern, ist es erforderlich, geeignete Messsysteme neu zu entwickeln oder bestehende Instrumente umzubauen und diese so den Bedürfnissen anzupassen. Aber nicht nur die Geräte selbst, auch deren Einsatzmöglichkeiten konnten abgeschätzt werden. Der Einsatz der Instrumente lieferte bei der vorliegenden Studie nur lückenhafte Ergebnisse, was auf den Testcharakter der Messungen und die damit verbundenen technischen und anwendungsspezifischen Probleme zurückzuführen ist. Trotzdem konnten die Messdaten ergänzende Informationen bereitstellen, die auch in die momentanen Überlegungen einbezogen wurden. Vor allem war es aber möglich, zukünftige Einsatzmöglichkeiten im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen oder Detailplanungen zu erkunden.

5.2 Kontinuierliche Vertikalsondierungen

Das am IMP der BOKU entwickelte Mini-Sodar wurde in zwei Messserien eingesetzt. Ein so genanntes Sodar (Sound detection and ranging) ermöglicht es, Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit und Windrichtung zu messen. Dies geschieht bei herkömmlichen Sodar-Systemen bis in eine Höhe von bis zu 800 m mit

einer vertikalen Auflösung von etwa 50 m. Die in dieser Studie eingesetzte Variante Mini-Sodar ist zwar nur in der Lage, Höhen bis 200 m zu vermessen, hier aber in Abständen von nur 5 m Windgeschwindigkeit und Windrichtung zu bestimmen.

Das Gerät sendet in bestimmten Zeitabständen (typisch 10 Sekunden) akustische Pulse mit einer Frequenz von 4,3 kHz aus, die von der Atmosphäre reflektiert und vom Gerät wieder erfasst werden. Aufgrund der atmosphärischen Bewegungen in den verschiedenen Niveaus ergeben sich kleine Frequenzänderungen (Dopplereffekt), anhand derer die Geschwindigkeit des reflektierenden Luftpakets ermittelt werden kann. Durch die Laufzeit des Signals zwischen Senden und Empfang kann die Höhenzuordnung erfolgen.

Aus dieser kurzen Funktionsbeschreibung geht bereits deutlich hervor, dass ein Einsatz des Mini-Sodars im städtischen Gebiet problematisch ist. Die Frequenz der Signale liegt im für das menschliche Ohr gut hörbaren Bereich. Da die Signale außerdem mit einer gewissen Intensität ausgesandt werden, um noch auswertbare Echos zu erhalten, kann dies als Lärmbelästigung empfunden werden, wenn der Aufstellungsort in der Nähe von Siedlungen gewählt wurde. Das ist aber im städtischen Raum kaum zu vermeiden. Daher mussten auch bei der Anwendung in Linz geeignete Aufstellungsorte gefunden werden, die einerseits eine möglichst uneingeschränkte Vermessung

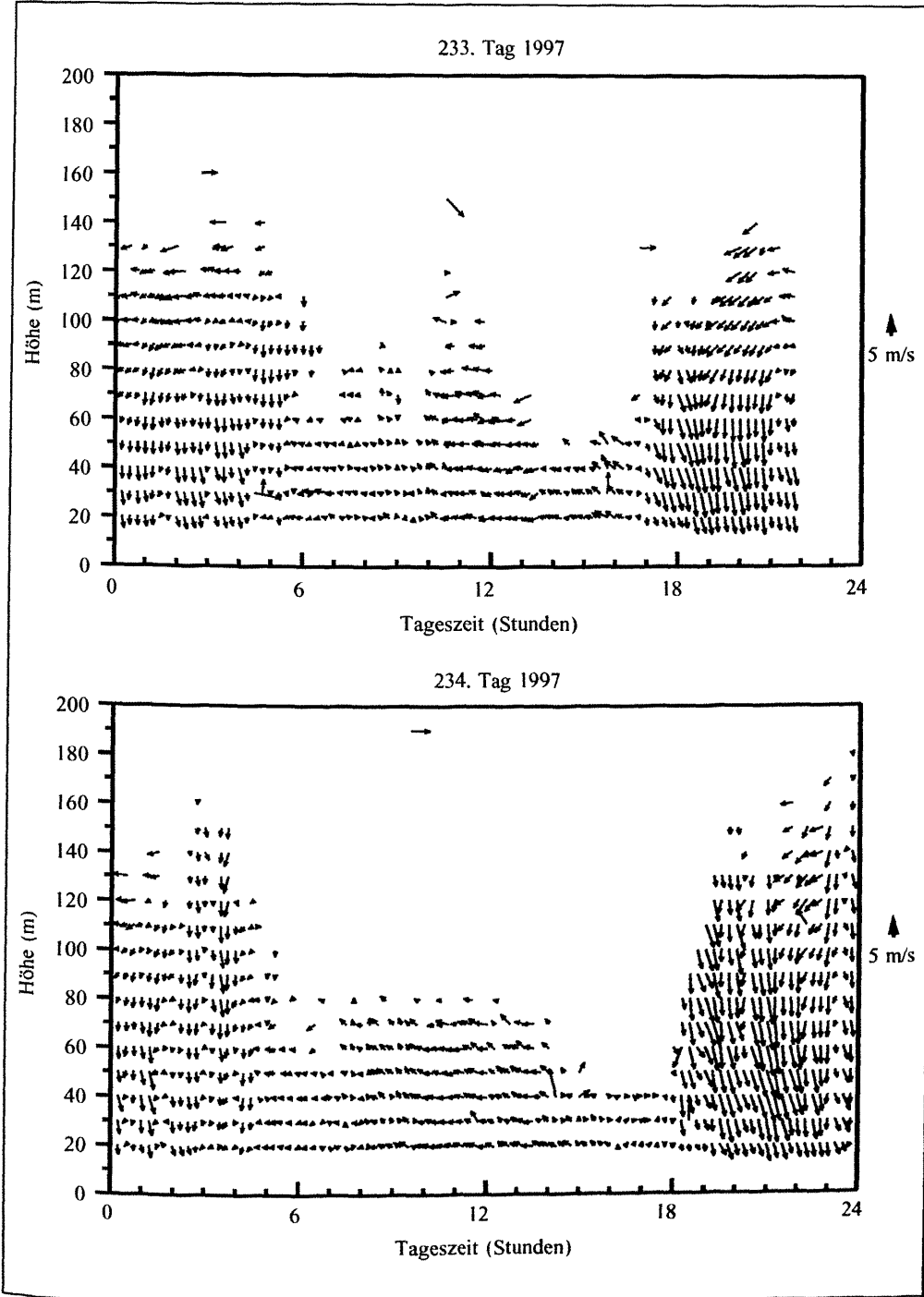


Abb. 65: Mini-Sodar Profile beim 24er-Turm

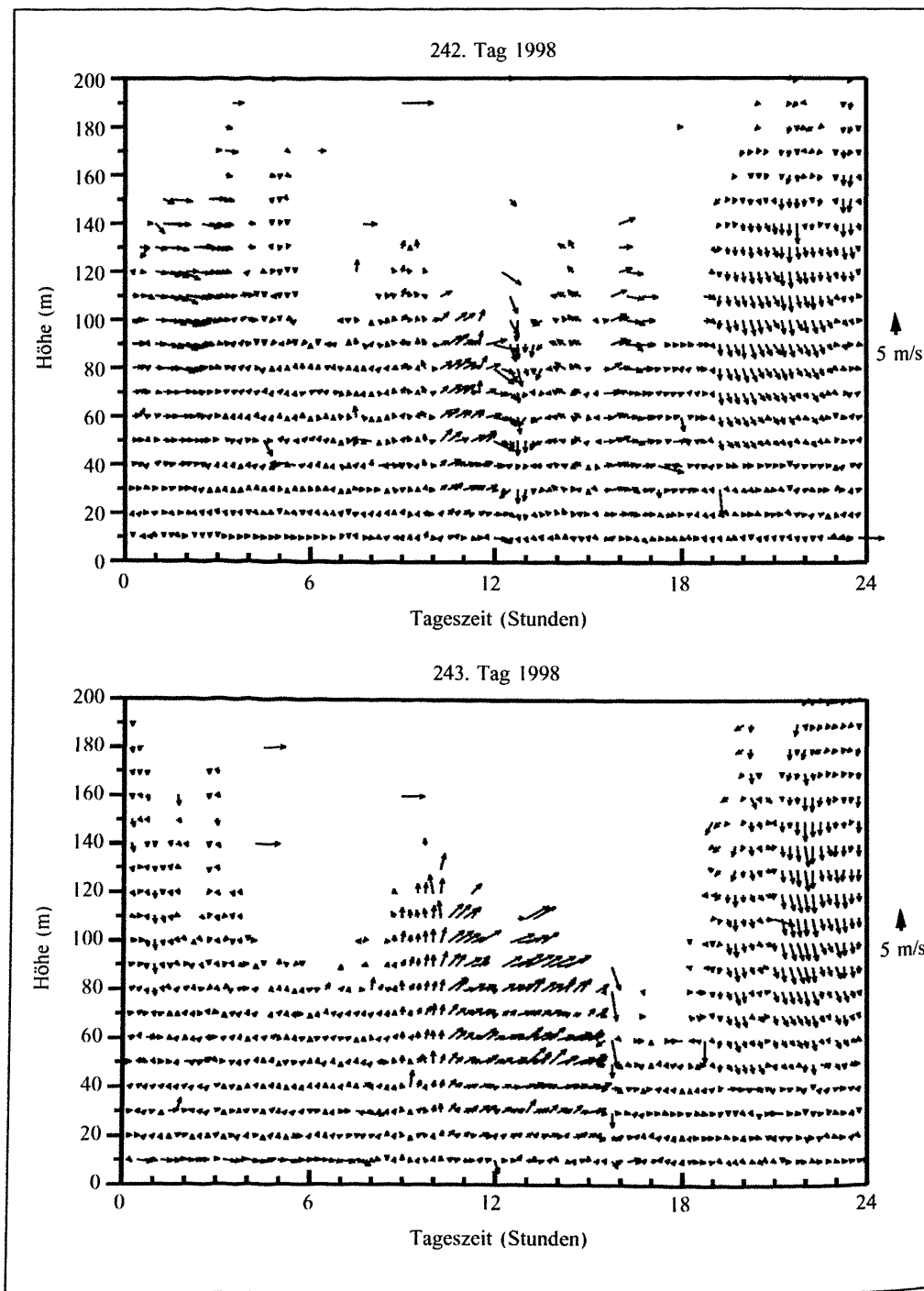


Abb. 66: Mini-Sodar Profile im Wasserwerk

der interessierenden Strömungen möglich machen, andererseits jedoch eine Lärmbelastigung für die Bevölkerung hintanhaltend.

Nicht zuletzt muss auch darauf geachtet werden, dass der Betrieb des Gerätes störungsfrei ablaufen kann. Das bedeutet, dass keine unerwünschten Signale von außen mit den Signalen des Gerätes in Wechselwirkung stehen. Eine Störquelle kann etwa Lärm in ähnlichem Frequenzbereich sein. Außerdem muss bei längerem Betrieb (über mehrere Wochen) eine externe Energieversorgung verfügbar sein.

Da der Haselgrabenwind eine deutliche Vertikalstruktur aufweist und auch durch seinen zeitlichen Verlauf für eine derartige Sondierung interessant ist, wurde versucht, das Mini-Sodar bei der Erkundung des Vertikalprofils dieser Kaltluftströmung im städtischen Umfeld einzusetzen. Dazu konnten nördlich der Donau im Einflussbereich der Strömung zwei nach den genannten Kriterien geeignete Standorte gefunden werden einer beim 24er-Turm und der andere im Wasserwerk neben dem Urnenhain am Süden des Heilhamer Feldes. Im innerstädtischen Gebiet konnte das Gerät wegen der Lärmerregung nicht betrieben werden. Gerade eine Einbeziehung von Vertikalprofilen der städtischen Atmosphäre in Strömungs- und Ausbreitungsmodelle würde jedoch eine wesentliche Verbesserung der Modellergebnisse bringen. Hier muss noch nach Lösungen gesucht werden.

Die Messungen waren von im Wesentlichen zwei technischen und systemimmanenten Problemen überschattet. Dennoch konnten im Jahr 1997 beim 24er-Turm vom 13. 08. bis 18. 10. Daten generiert werden. Im Wasserwerk, wo von 10. 08. bis 23. 10. 1998 gemessen wurde, ist die Serie von Tagen mit brauchbaren Daten aufgrund eines schwer wiegenden technischen Gebrechens (zu spät erkannter Wasserschaden) leider wesentlich kürzer, obwohl das Gerät mindestens genauso lang in Betrieb war.

Ein zweites Problem, das im Messprinzip und in der Geräteausführung begründet liegt, ist die

erreichbare Höhe der Vertikalsondierung. Es zeigte sich, dass diese bei unterschiedlicher Schichtung der Atmosphäre nicht in allen Fällen ausreicht, um ein Phänomen wie den Haselgrabenwind vollständig zu erfassen. Vor allem in den Übergangsperioden am Vormittag bei Ausbildung einer Mischungsschicht bricht die Messhöhe drastisch ein. Stabile Schichtung begünstigt eine größere erreichbare Höhe, wie die Profile in den Abend- und Nachtstunden zeigen (Abb. 65). Dies ist aber auch jene Zeit, in der die Kaltluftströmungen wirken. Somit konnten mit dem Mini-Sodar in Hinblick auf den betrachteten Haselgrabenwind Ergebnisse erzielt werden, die für zukünftige Einsätze in dieser Fragestellung optimistisch stimmen.

Die Profile in Abbildung 65 zeigen sehr gut das in Kapitel 4 vom Haselgrabenwind gezeichnete Bild. Der Zeitpunkt des Einsetzens, die Höhe der Jetachse und auch das Abflauen sind deutlich zu erkennen. Eine derartige Darstellung, die jede halbe Stunde ein gemitteltes Windprofil bietet, kann in der Analyse von Strömungen sehr weiterhelfen oder eben gefundene Erkenntnisse bestätigen und erweitern. Bei den Messungen im Wasserwerk konnten erst ab einer Höhe von 40 m brauchbare Profile erzielt werden, da das Wasserwerk nach Norden zum Heilhamer Feld hin durch hohe Bäume abgetrennt wird und somit Nordströmungen unter diesem Niveau von den Bäumen abgeblockt werden. Durch den frühen Ausfall des Systems finden sich leider nur wenige Tage, die den Haselgrabenwind gut zeigen (Abb. 66).

5.3 Wind- und Temperaturmessungen in der Bebauung

In der Bebauung wurden an vier Stellen kleine Messstationen auf Beleuchtungsmaste montiert, um die Wirkung von belüftungsrelevanten Strömungen erfassen zu können. Die Geräte bestehen aus einem Windgeschwindigkeitsgeber und einem Temperaturgeber, die Daten an einen im Gerät installierten Mikrologger senden, der diese aufzeichnet. Der Mikrologger

kann nur über zwei Kanäle Daten aufnehmen, wodurch eine Messung der Windrichtung nicht möglich war. Er ist aber sehr platz sparend und kann daher direkt am Gerät ohne Verlegen von Zuleitungen angebracht werden. Aufgrund der gewählten Aufstellungsorte ist dies ein großer Vorteil. Das Messgerät selbst wurde jedoch so entwickelt, dass es auch Informationen über die Windrichtung bereitstellt, die mit einer geeigneten Datenaufzeichnung erfasst werden können.

In dieser Studie wurde versucht, mit Hilfe des Gerätes die Belüftungsverhältnisse in bebauten Bereichen zu erkunden. Zu diesem Zweck war eine Messung der Windrichtung nicht erforderlich, da der Luftaustausch in einem bestimmten Gebiet über die Windgeschwindigkeit beschrieben werden kann. Insgesamt wurden vier derartige Sensoren an folgenden vier Punkten im Stadtgebiet angebracht:

- * Hausengutweg
- * Reindlstraße
- * Lederergasse
- * Autobahn (Heilham/im Bereich Lindengasse)

Die Stationen in der Lederergasse, der Reindlstraße und bei der Autobahn waren vom 10. September 1998 bis 17. Februar 1999 in Betrieb, die Station am Hausengutweg wurde am 23. September 1998 installiert und bis 2. November 1998 betrieben. Alle Stationen waren in derselben Höhe von etwa 5 bis 6 m über Grund angebracht.

Da sich die Messgeräte noch in der Testphase befanden, war leider bei den durchgeführten Messungen eine Reihe von Datenausfällen zu beklagen. So liegen etwa von der Station Lederergasse zwar Temperaturdaten über den gesamten Messzeitraum, aber von Anfang an keine Windinformationen vor, womit diese Messstelle für die Analyse der Belüftungssituation von geringem Wert war. Nicht viel besser verliefen die Messungen der Windgeschwindigkeit an der Station Autobahn. Hier fiel nach nur zwei Tagen die Erfassung der

Geschwindigkeitsdaten aus, wodurch ebenfalls nur über einen kurzen Zeitraum Werte vorliegen. Die Temperaturmessungen verliefen hingegen auch hier problemlos.

An den Stationen Reindlstraße und Hausengutweg waren die Messungen erfolgreicher. An beiden Punkten konnten über die gesamte Messperiode hinweg sowohl Windgeschwindigkeit als auch Temperatur erfasst werden. Durch den kürzeren Messzeitraum am Hausengutweg konnte allerdings nur diese Periode für Vergleiche der Windgeschwindigkeiten genutzt werden. Zusätzlich wurde zu einem derartigen Vergleich auch noch die Maststation am Sportplatz St. Magdalena hinzugezogen, die zu dieser Zeit ebenfalls in Betrieb war. Trotz der genannten Probleme konnten einige interessante Beobachtungen gemacht werden.

Wenn zunächst die Temperaturwerte an den einzelnen Messpunkten einer Betrachtung unterzogen werden, so zeigt sich, dass die Temperaturen im Wesentlichen parallel verlaufen, auffällige Abweichung einzelner Stationen gibt es nicht. In der Abbildung 67 sind exemplarisch die Temperaturkurven von 7 Tagen dargestellt. Die Temperaturen an der Station Hausengutweg erreichen in der Nacht die tiefsten Werte aller Stationen. Dieses Verhalten ist gut mit der Lage der Station in der Nähe des Heilhamer-Feldes, das bekanntlich unter dem direkten Einfluss des Haselgrabenwindes steht, erklärbar. Besonders deutlich tritt dies an Tagen mit einem ausgeprägten Tagesgang der Temperatur in Erscheinung. An solchen Tagen war die Bewölkung gering und damit die Ausbildung von Kaltluftströmungen begünstigt.

Die Station Autobahn zieht weitgehend mit dem Hausengutweg mit, der Einfluss der Kaltluft aus dem Norden macht sich also auch in der Bebauung südlich des Heilhamer-Feldes noch bemerkbar. Natürlich darf man nicht vergessen, dass in den genannten Gebieten die Bebauung relativ locker ist, sodass auch die strahlungsbedingte Abkühlung in der Nacht stärker zu Tage tritt. Im Vergleich zu den Stationen, die mehr in dichter bebauten Stadtteilen liegen, wie Reindlstraße

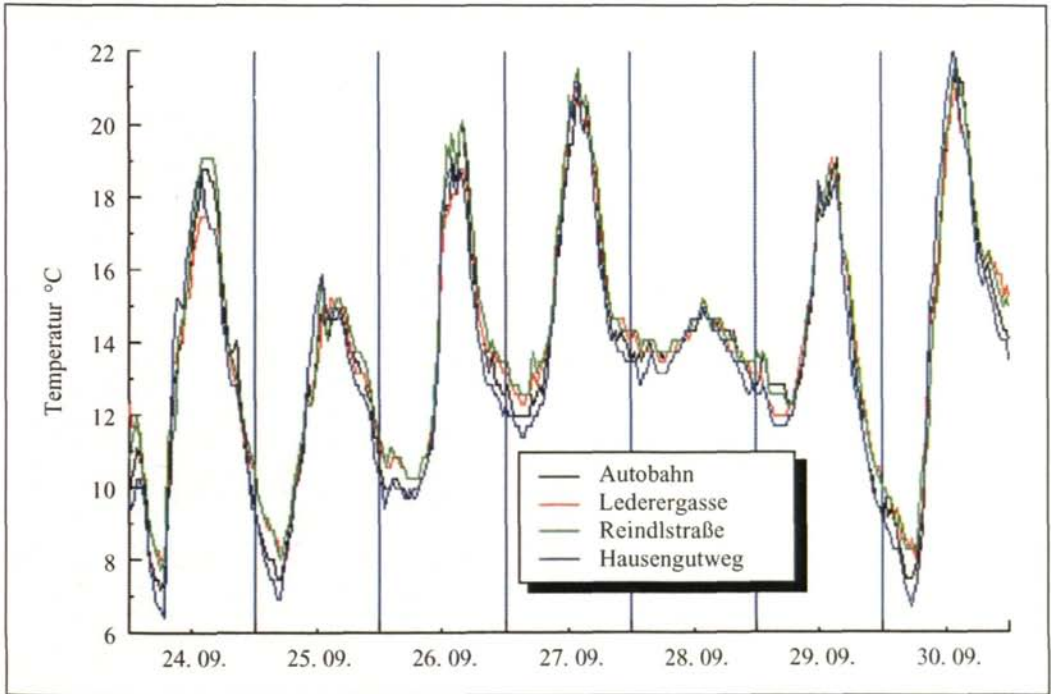


Abb. 67: Temperaturkurven 24. 09.-30. 09. 1998

und besonders Ledererstraße, macht sich dieser Effekt deutlich bemerkbar. Die Temperaturwerte an den beiden Punkten liegen nachts klar über jenen von Hausengutweg und Autobahn. Zum einen hängt das mit der Ausbildung der städtischen Wärmeinsel zusammen, aber eben auch das Fehlen oder zumindest schwächere Auftreten einer Kaltluftströmung verhindert ein weiteres Absinken der Temperaturen. Welcher Effekt dabei überwiegt bzw. wie stark die einzelnen Effekte zu den gemessenen Temperaturwerten beitragen, lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht ohne weitere Untersuchungen ableiten. Ein Eindruck vom Vordringen belüftungsrelevanter Strömungen kann jedoch gewonnen werden.

Tagsüber zeigt sich ein etwas anderes Bild. Die Stationen erreichen in der Regel ziemlich ähnliche Maximumtemperaturen. Der Hausengutweg zeigt dabei ebenso wie die Reindlstraße die Tendenz, die Oberhand zu gewinnen. Die Ledererstraße tendiert zu den relativ tiefsten Werten. Dies kann mit unterschiedlichen Ein-

strahlungsverhältnissen an den Messpunkten zusammenhängen, indem in der Ledererstraße eine Abschattung durch Gebäude eintritt. Bei Tagen mit gestörtem Tagesgang zeigt die Ledererstraße dieses Verhalten nämlich nicht. Eine andere mögliche Erklärung wäre auch durch das Fehlen der nächtlichen Kaltluftströmungen gegeben, die in den Nachtstunden die Temperaturen bei Hausengutweg und Autobahn verhältnismäßig stärker absinken.

Die leider nur bruchstückhaft vorhandenen Winddaten vermögen trotzdem einige interessante Aspekte über das Verhalten belüftungsrelevanter Strömung offenzulegen. In Abbildung 68 sind die Kurven der Windgeschwindigkeit an den Stationen Sportplatz, Reindlstraße und Hausengutweg über eine Periode von 10 Tagen gezeigt. Die Kurve für den Hausengutweg setzt am 22. 09. nach der Installation der Station ein. Anhand der Station Sportplatz ist gut zu erkennen, an welchen Tagen es zu einer Kaltluftströmung aus dem Haselgraben gekommen ist und wie lange die-

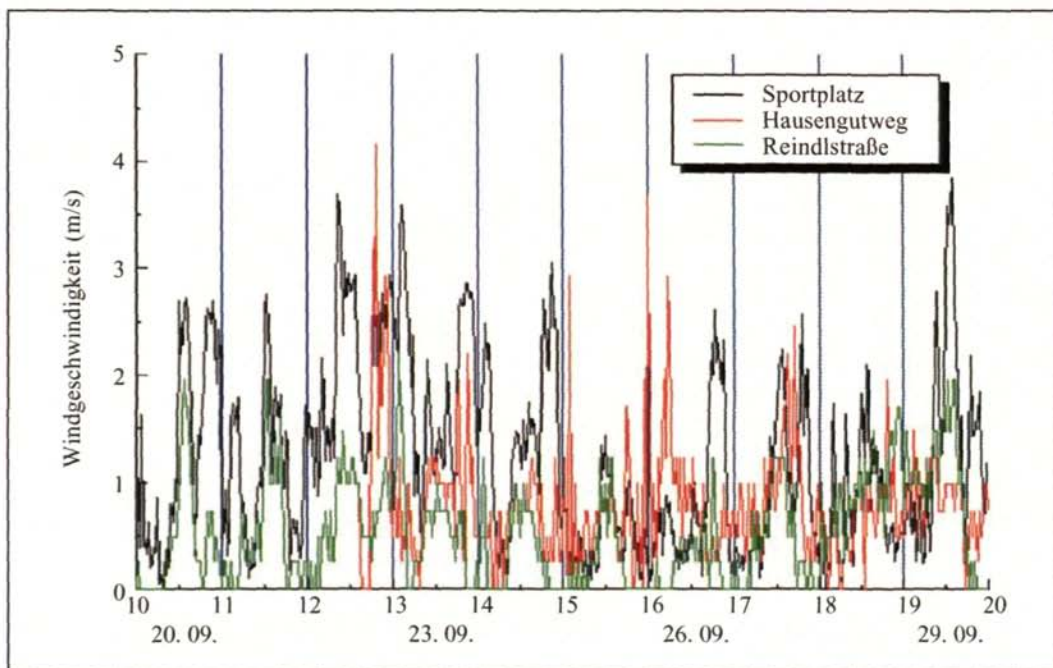


Abb. 68: Wind 20.-29. 09. 1998

se vorhanden war. Demnach sind zum Beispiel der 23. 09. und der 24. 09. Tage mit einem sehr ausgeprägten Haselgrabenwind, die Windspitzen vor Mitternacht belegen dies klar. Aber auch der 26. 09. entspricht diesem Bild. Auffällig ist, dass die drei betrachteten Stationen keineswegs ähnliche Kurvenverläufe aufweisen, wie es bei den Temperaturen der Fall ist.

Vielmehr zeigen sich zeitweise nahezu gegenläufige Tendenzen. Während die Station Sportplatz bei einsetzendem Haselgrabenwind eine Zunahme der Windgeschwindigkeit verzeichnet, sinkt diese vor allem bei der Station Reindlstraße und gelegentlich auch beim Hausengutweg deutlich ab. Im Falle der Reindlstraße ist über kürzere Zeiträume hinweg sogar ein gänzlich Aussetzen des Windes festzustellen. Die Kurvenverläufe am Abend des 23. 09. und des 24. 09. geben dieses Verhalten gut wieder. Der umgebende Wind kommt in diesem Zeitraum weitgehend zum Erliegen und die Strömung aus dem Haselgraben scheint die Station Reindlstraße offenbar nicht zu erreichen, was auch mit den relativ höheren Temperaturwerten gut überein-

stimmt. Entweder liegt die Station nicht im Einflussbereich des Haselgrabens oder der Haselgrabenwind wird durch die Bebauung am Durchdringen gehindert. Wenn man die Lage der Station betrachtet, scheint Letzteres die wahrscheinlichere Erklärung zu sein.

Generell lässt sich eine Verringerung der Windgeschwindigkeit durch die Bebauung feststellen. Dies gilt nicht nur für den Haselgrabenwind; die Kurven von Reindlstraße und Hausengutweg liegen bis auf wenige Ausnahmen im gesamten Zeitraum unter jener der Station Sportplatz. Die Spitzen, die die Windgeschwindigkeit an der Station Hausengutweg zu manchen Zeitpunkten aufweist, bedürfen noch einer genaueren Untersuchung. Sie treten manchmal in der zweiten Nachthälfte oder in den Morgenstunden auf, wenn kein Haselgrabenwind wirkt. Es ist eher unwahrscheinlich, dass es sich dabei um Kaltluftströmungen handelt, eher ist ein synoptischer Einfluss anzunehmen. Am 28. 09. liegt ein solcher jedenfalls vor, und es zeigt sich, dass in diesem Fall die Stationen in der Bebauung auch die Oberhand gewinnen können. Das

auffällige Verhalten der Station Hausengutweg in der Nacht vom 25. auf den 26. 09. ist nicht so ohne weiteres erklärbar. Während die anderen Stationen den Großteil der Nacht über Geschwindigkeiten unter 1 m/s verzeichnen, erreicht der Wind am Hausengutweg Spitzen von über 3 m/s.

Es lassen sich schon mit wenigen Messungen in der Bebauung viele Phänomene erkennen und analysieren, es werden aber auch wiederum neue Fragen aufgeworfen, die es mit verbesserten Messungen zu beantworten gilt. Messungen, wie die in diesem Abschnitt beschrieben, sollten mit etwa 10 bis 12 Messgeräten, die in vielen Teilen der Stadt mit unterschiedlicher Bebauung verteilt sind, durchgeführt werden. Dies könnte zu einem besseren Verständnis der Strömungsvorgänge in der Bebauung beitragen. Um Datenausfälle in Zukunft weitgehend vermeiden zu können, stehen in der Zwischenzeit bereits verbesserte Stationen zur Verfügung.

5.4 Katzbach

Seit 17. 09. 1999 ist am östlichen Ende von Katzbach eine meteorologische Station mit Erfassung der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und der Temperatur an einem Tele-

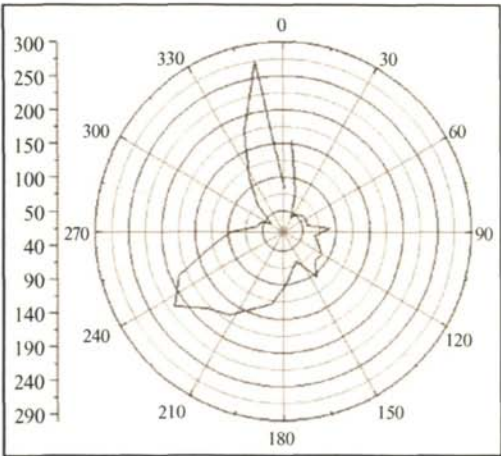


Abb. 69: Verteilung der Windrichtung für die Station Katzbach

graphenmast installiert. Zusätzlich wurde am gleichen Tag die Station Brucknerhaus wieder aktiviert. Die Abbildung 69 zeigt die Verteilung der Windrichtung an dieser Station für die Zeit von 17. 09. bis 26. 11. 1999.

Das Schwergewicht der Windrichtungen entfällt auf NNW und SW, wobei die südwestlichen Richtungen mehr streuen. Die Einheitlichkeit der NNW-Richtung ergibt sich aus den topographischen Gegebenheiten vor Ort. Die Station befindet sich in Hanglage auf einem

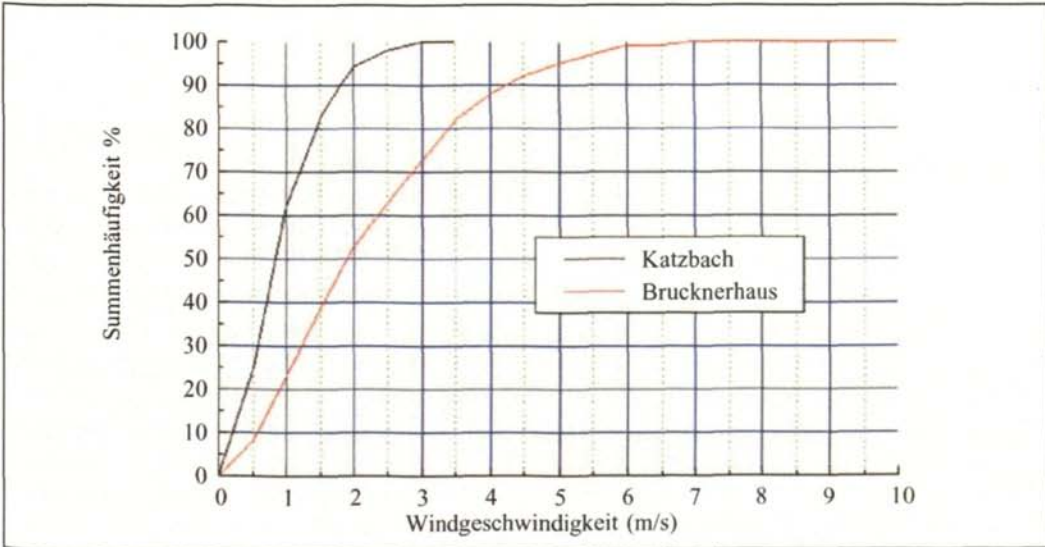


Abb. 70: Summenhäufigkeiten der Windgeschwindigkeiten in Katzbach und am Brucknerhaus.

Nordhang, der von einem Taleinschnitt nord-nordwestlich der Station unterbrochen ist. Die synoptischen Strömungen können aus allen Seiten außer von Nord an die Station ungehindert herangeführt werden. In der Nacht bewirkt der Kaltluftabfluss, der im erwähnten Taleinschnitt konzentriert wird, die gerichtete NNW-Strömung. Wie Abbildung 70 zeigt, handelt es sich beim Untersuchungsgebiet um eine Zone mit geringen Windgeschwindigkeiten.

Der Vergleich im selben Zeitraum mit der Station Brucknerhaus, die aufgrund ihrer Dachlage frei angeströmt werden kann und somit als Richtwert für die erreichbaren Windgeschwindigkeiten verwendet werden kann, macht den hohen Anteil an wind-schwachen Situationen in Katzbach deutlich.

5.5 Messfahrten

Wie schon erwähnt wurde, spielen unter Stagnationssituationen kleinräumige, lokale Temperaturunterschiede eine entscheidende

Rolle für die Luftbewegung durch Druckunterschiede und in der Folge für eventuellen Luftwechsel. Um solche Strukturen in einem lokal begrenzten Gebiet zu verifizieren, wurden Temperaturmessfahrten im Gebiet um das Heilhamer-Feld durchgeführt. Abbildung 71 zeigt die Route, welche mit dem Messauto zurückgelegt wurde. Dabei wurde die Strecke durch markante Punkte geteilt, um eine Zuordnung der Messdaten zu ermöglichen.

Es wurden mehrere Messfahrten durchgeführt. In Abbildung 72 finden sich die Ergebnisse für den 22. 9. 1998; gezeigt werden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte (in 2 m gemessen). Die erste Fahrt führte vom Urnenhain (1) über die Freistädter-Str. zur Wiese (2) und anschließend über die Leonfeldner-Str. (3) in den Haselgraben (4). Man sieht deutlich den starken Temperaturabfall bei Eintritt in den Haselgraben und zuvor zwei Temperatureinbrüche von ca. 1 °C. Diese Einbrüche werden durch die Freiflächen östlich des Urnenhaines bewirkt.



Abb. 71: Messstrecken der Temperaturmessfahrten

- 1...Urnenhain
- 2...Wiese
- 3...Leonfeldner-Str.
- 4...Haselgraben
- 5...Urfahr
- 6...Petrinum
- 7...Stadtzentrum

Bei dieser Messfahrt erfolgte die Rückfahrt auf derselben Route. Deutlich ist ein inverses Verhalten zu erkennen, wobei jetzt durch längeres Verweilen auf der Wiese (2) diese als tiefere Temperatur erscheint. Die dritte Fahrt erfolgte quer durch Urfahr über die Donau zum Hauptplatz und zurück. Die Temperaturunterschiede fielen in diesem Fall geringer aus als im Thermalbild, betrugen jedoch immer noch etwa 1-2 °C. In einer Messfahrt am 10. 08. 1998 konnten Unterschiede von bis zu 3 °C beobachtet werden.

Diese Unterschiede sind im Allgemeinen ausreichend, um lokale Strömungen zu induzieren, welche von den kalten Bereichen zu den wärmeren gerichtet sind. Voraussetzung dafür ist jedoch eine Stagnation der überlagerten Strömungen.

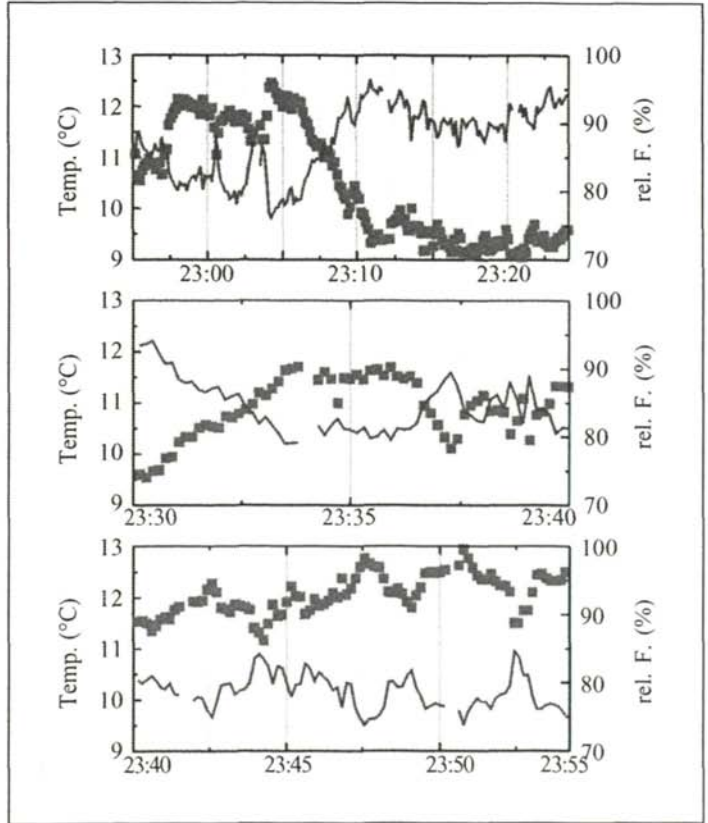


Abb. 72: Horizontale Temperaturverläufe in der Temperaturmessfahrt am 22. 09. 1998

6 STRAHLUNG

6.1 Einleitung

Eine Betrachtung der Strahlungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet ist insofern von Bedeutung, als diese unmittelbaren Einfluss auf die Temperaturverteilung in einem Gebiet hat. Da die Strömungen in den kritischen Situationen vornehmlich einem thermischen Antrieb unterliegen, kommt der Kenntnis der Strahlungsverhältnisse große Bedeutung zu. Wie entscheidend die Bedingungen für den Strahlungsgenuss die Ausbildung thermischer Strömungen beeinflussen kann, haben schon die Betrachtungen des Haselgrabenwindes gezeigt.

Für das Gebiet Linz-Urfahr wurden daher die Strahlungsverhältnisse im Rahmen einer für diese Studie angefertigten Diplomarbeit (STANZER 1999) näher untersucht. Die in den nächsten Abschnitten dargestellten Ergebnisse sind im Wesentlichen daraus entnommen worden. Die erforderlichen Berechnungen wurden mit dem Strahlungsmodell SRAD vorgenommen.

6.2 Die Albedo unterschiedlicher Oberflächen

Die Albedo ist jener Anteil der einfallenden kurzwelligigen Strahlung, der bei seinem Auftreffen auf eine Oberfläche reflektiert wird. Je höher

Tabelle 9: Albedo verschiedener Oberflächen (in %)

Albedo unterschiedlicher Landnutzung								
Landnutzung	Pease	Landsberg	Bruck	Bründl	Oke	Sailor	Tang	Parlow
lockere Bebauung	18	16,6	21-45		15	15	18	16
dichte Bebauung	14	12,2	16-38		14	14		
Industrie	15	13,8				12	14	18
städtische Parks	23		49			20		
Grünland			20-26	15-35		20	20	16,8
Acker		14,7		15-25		20	20	17
LWS		16,5			20		19	
LWS und Natur		16,2						
Laubwald			26	12-20			18	
Mischwald						18		12,7
Nadelwald				10-14				
Fluss			7	5-10				
offenes Gewässer			16	5-10				11,7

also die Albedo einer Oberfläche ist, desto geringer ist die Absorption und damit die Umwandlung in langwellige Strahlung, die wiederum für die Temperaturverhältnisse bedeutend ist. Abhängig ist der Anteil der reflektierten Strahlung von der Beschaffenheit (Material, Farbe) der jeweiligen Oberfläche.

Allgemein weisen Stadtgebiete eine niedrigere Albedo auf als das ländliche Umland. Für mitteleuropäische Städte wurde aus Flugzeugmessungen eine Albedo von 15-20 % bestimmt (RASCHKE 1979), in Tabelle 9 werden dafür Werte zwischen 15 und 18 Prozent angegeben.

Die Ursache für die niedrige Albedo einer Stadt liegt darin, dass die städtische Oberfläche deutlich stärker versiegelt ist als das freie Umland. Diese gegenüber dem ländlichen Umland geringere Albedo wirkt - aufgrund des höheren Anteils an Luftbeimengungen - allerdings bei verminderter Sonneneinstrahlung. Tatsächlich besteht eine Stadt aus einem Mosaik unterschiedlicher Oberflächen. Das Ausmaß der reflektierten Strahlung hängt daher neben dem Anteil an Grünfläche vom Straßenbelag und von der Art und Farbe der Baumaterialien ab.

Die Albedo dicht verbauter Flächen liegt gar nur zwischen 12 und 14 Prozent. Straßenschluchten spiegeln die reflektierte Strahlung zwischen den Häuserwänden mehrfach hin und

her. Dieser Vorgang vermindert die Albedo vor allem im Stadtzentrum.

Bei Schneelage wird der Unterschied zwischen den Albedowerten einer Stadt und dem freien Umland am größten. Auf einem Acker, genauso wie im Grünland, erreicht dann die Albedo Spitzenwerte von 50 bis 60 Prozent. Im Stadtgebiet hingegen wird der Schnee schneller geräumt oder taut aufgrund der höheren Temperaturen früher ab als auf dem Land. Das Stadtgebiet weist daher in so einer Situation eine deutlich niedrigere Albedo auf als das schneebedeckte Umland.

Die Albedo einer Wasserfläche ist allgemein am niedrigsten. Bei den Hauptästen großer Flüsse beträgt sie etwa acht Prozent, in Tabelle 9 wird ihr Wert mit fünf bis zehn Prozent angegeben. Bei stehenden Gewässern kommen die Studien zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen mit Albedowerten zwischen 5 und 16 Prozent. Kleinere Seen sollen infolge von Bewuchs und geringer Tiefe eine höhere Albedo aufweisen als tiefe Gewässer (QUITT 1992).

Die Albedo vegetationsbedeckter Gebiete hängt ganz vom Vegetationstyp ab. Die von Wäldern bedeckte Oberfläche weist beispielsweise je nach Waldtyp unterschiedliche Albedowerte auf. Laubwälder haben eine höhere Albedo als Nadelwälder. Bei der Betrachtung der Albedo-

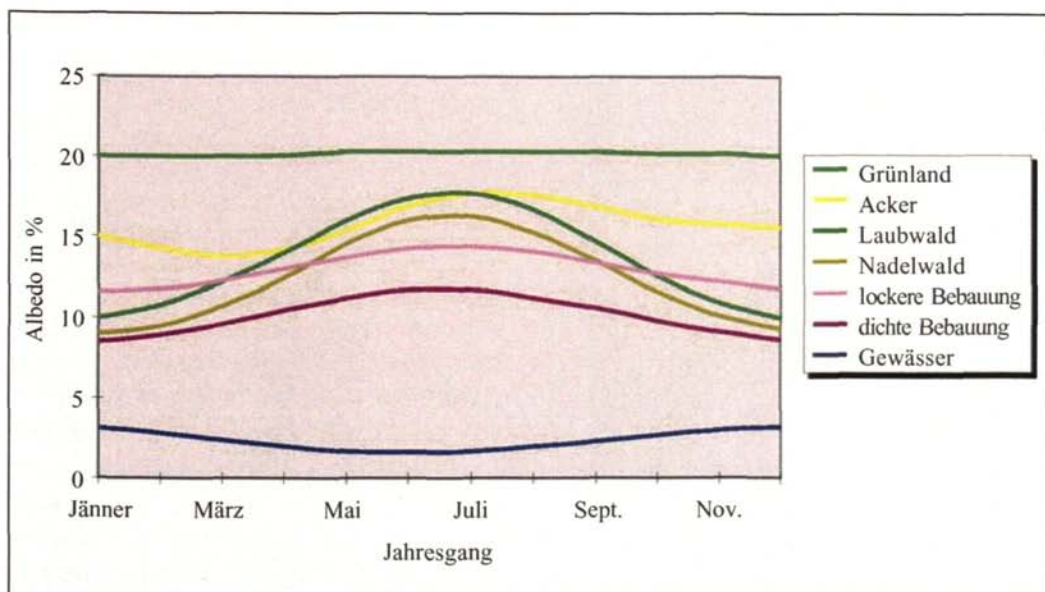


Abb. 73: Der Jahresgang der Albedo unterschiedlicher Landnutzung (BREST 1987)

werte von Wäldern wird besonders deutlich, dass die Albedo einen Jahresgang aufweist, Abbildung 73 zeigt diesen.

Grünflächen weisen mit etwa 20 Prozent das ganze Jahr über eine in etwa gleichbleibende Albedo auf. Die Albedo der Laubwälder ist im Vergleich zum Grünland zwar geringer, erreicht aber im Sommer mit rund 18 % einen bemerkenswert hohen Wert. Im Winter wird die Albedo aufgrund des fehlenden Laubdaches drastisch auf 10 % gesenkt.

6.3 Die flächenhafte Verteilung der Albedo im Großraum Linz

Um sich ein Bild von der flächenhaften Verteilung der Albedo im Großraum Linz machen zu können, wird auf die Ergebnisse der Studie von BREST (1987) zurückgegriffen. Die dort ermittelten Albedowerte werden jenen Flächennutzungstypen, welche aus CORINE-Daten für Linz abgeleitet wurden, zugeordnet. Da das CORINE-Landcover-Projekt jedoch mehr Nutzungsklassen voneinander unterscheidet als es in der Studie von BREST (1987) geschehen ist, müssen Ergänzungen angebracht werden. Diese Ergänzungen betreffen die Land-

nutzungsklassen „Industrie und Gewerbe“, „Landwirtschaftspartellen“, „Landwirtschaft und Naturraum“, „Mischwald“ und „Fluss“.

Die Albedowerte dieser vier Landnutzungsklassen werden mit Hilfe der Tabelle 9 bestimmt. Daraus werden die Bezüge der Albedowerte zueinander übernommen, um daraufhin die Absolutbeträge der Albedo an den Jahresgang ähnlich strukturierter Nutzungsklassen anzupassen. Beispielsweise orientiert sich der solchermaßen ermittelte Jahresgang der Nutzungsklasse „Fluss“ an dem Verlauf der Albedowerte von „stehenden Gewässern“, die Nutzungsklasse „Mischwald“ bildet das Mittel der Nutzungsklassen „Laubwald“ und „Nadelwald“.

Die Nutzungsklasse „Industrie und Gewerbe“ richtet sich nach dem Jahresgang der Albedowerte von „dichter Bebauung“; sowohl „Landwirtschaftspartellen“ als auch „Landwirtschaft und Naturraum“ orientieren sich am flachen Verlauf der Albedowerte von „Grünland“. In Abbildung 74 ist die Verteilung der durchschnittlichen Albedowerte eines Jahres im Untersuchungsgebiet dargestellt. Gebiete mit hoher Albedo scheinen in hellen Farben auf, je

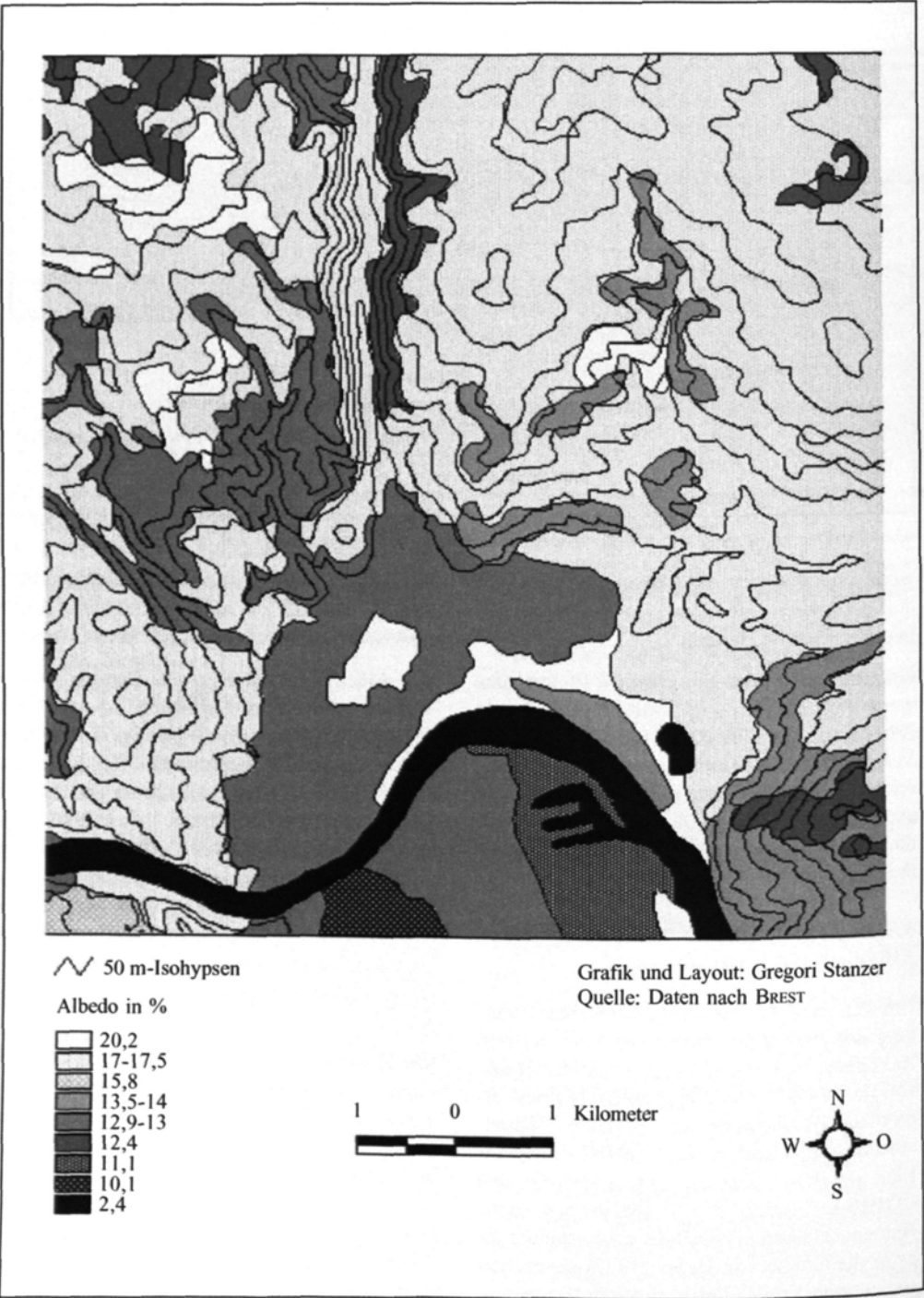


Abb. 74: Verteilung der Albedo im Jahresmittel für Linz

geringer die Albedo ist, um so dunkler werden die diesen Gebieten zugeordneten Farben.

Die deutlich geringste Albedo weisen die Wasserflächen Donau und Pleschinger See auf. In Abbildung 74 treten sie deshalb äußerst markant hervor. Auch das dicht bebaute Stadtzentrum und das Industriegebiet an der Donau fallen mit ihren geringen Albedowerten von 10,1 % bzw. 11,1 % auf. Die mittleren Jahreswerte der Albedo von Mischwald und lockerer Bebauung liegen mit 12,9 % bzw. 13 % sehr eng beieinander. Sie sind grau gekennzeichnet und nehmen einen recht großen Flächenanteil ein.

Die größte Erstreckung weisen aber die sehr hellen, dicht gepunkteten Flächen der komplexen Parzellenstruktur und der Klasse Landwirtschaft und Naturraum auf. Der komplexen Parzellenstruktur wird dabei ein Albedowert von durchschnittlich 17,5 zugewiesen. Einen noch höheren Albedowert weist nur mehr das Grünland auf. Dessen Wert beträgt im Jahresdurchschnitt 20,2 Prozent; die betreffenden Flächen werden in hellstem Grau dargestellt.

6.4 Die Sonnenscheindauer

Die Sonnenscheindauer ist die Summe der Besonnungszeit und wird durch Sonnenauf- und Sonnenuntergang begrenzt. Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer hängt von der geographischen Lage eines Ortes und den scheinbaren Sonnenbahnen am Himmel ab. In ihr wird sowohl die Bewölkung als auch der tatsächliche Horizontverlauf vernachlässigt. Die effektiv mögliche Sonnenscheindauer berücksichtigt den Einfluss des Reliefs und somit die Schatten werfenden Hänge und Objekte. Diese Maßzahl bezieht sich auf die Dauer des direkten Sonnenlichts bei wolkenlosem Himmel. In Linz beträgt die jährlich effektiv mögliche Sonnenscheindauer 3.926 Stunden. Dies entspricht 88 % der astronomisch möglichen Dauer.

Die tatsächliche Sonnenscheindauer bezeichnet jene Zeit, in der ein Objekt wirklich vom direkten Sonnenlicht bestrahlt wird. Diese Zeit-

spanne wird sowohl vom Relief als auch von der Bewölkung bestimmt. Da sich die Bewölkung stets ändert, kann die tatsächliche Sonnenscheindauer von Jahr zu Jahr unterschiedlich sein. Durchschnittlich genießt Linz eine jährliche Sonnenscheindauer von 1.726 Stunden. In Industriestädten kann die Sonnenscheindauer im Verhältnis zum umliegenden Freiland gar um 10 bis 20 Prozent verkürzt werden. Für das Stadtzentrum von London wurde beispielsweise eine - gegenüber dem Freiland - um 16 Prozent kürzere Sonnenscheindauer gemessen (LANDSBERG 1981).

Am 21. Dezember sind die Kuppen am sonnenreichsten, die Sonnenstrahlen erreichen sie an bis zu 8 ½ Stunden. Das Linzer Becken erreichen die Sonnenstrahlen am - astronomisch betrachteten - sonnenärmsten Tag des Jahres zwischen 7 und 8 Stunden. Diese ermittelte Sonnenscheindauer beinhaltet nur den Schattenwurf des Geländes, nicht jedoch jenen von umstehenden Objekten wie Gebäuden. Laut RATZ (1988) ist jedoch in Stadtgebieten der Schattenwurf der Gebäude jener Faktor, welcher den Strahlungsempfang am meisten beeinflusst. Dies gilt im Übrigen besonders bei niedrigem Sonnenstand im Winter.

Am 21. Juni fällt die Sonne steil in das Untersuchungsgebiet ein und verursacht deshalb neben der Tatsache, dass sie länger scheint, auch ein im Vergleich zum 21. Dezember etwas abweichendes Verteilungsbild.

Nun werden die Mindestwerte der Sonnenscheindauer nicht mehr in einem Seitental des Haselbaches und am Nordhang des Kalvarienberges erzielt, sondern können am Talgrund des engen Haselgrabens beobachtet werden (Abb. 75). Hier scheint die Sonne an einem wolkenlosen Tag etwa 10 Stunden, während sie an den Hügelkuppen um Linz den Erdboden an bis zu 16 Stunden erwärmt. Das Linzer Stadtgebiet im Becken wird an diesem Tag an etwa 15 Stunden vom direkten Sonnenlicht erhellt, zu den Rändern des Beckens nimmt die Dauer der Sonnenscheinstunden ab.

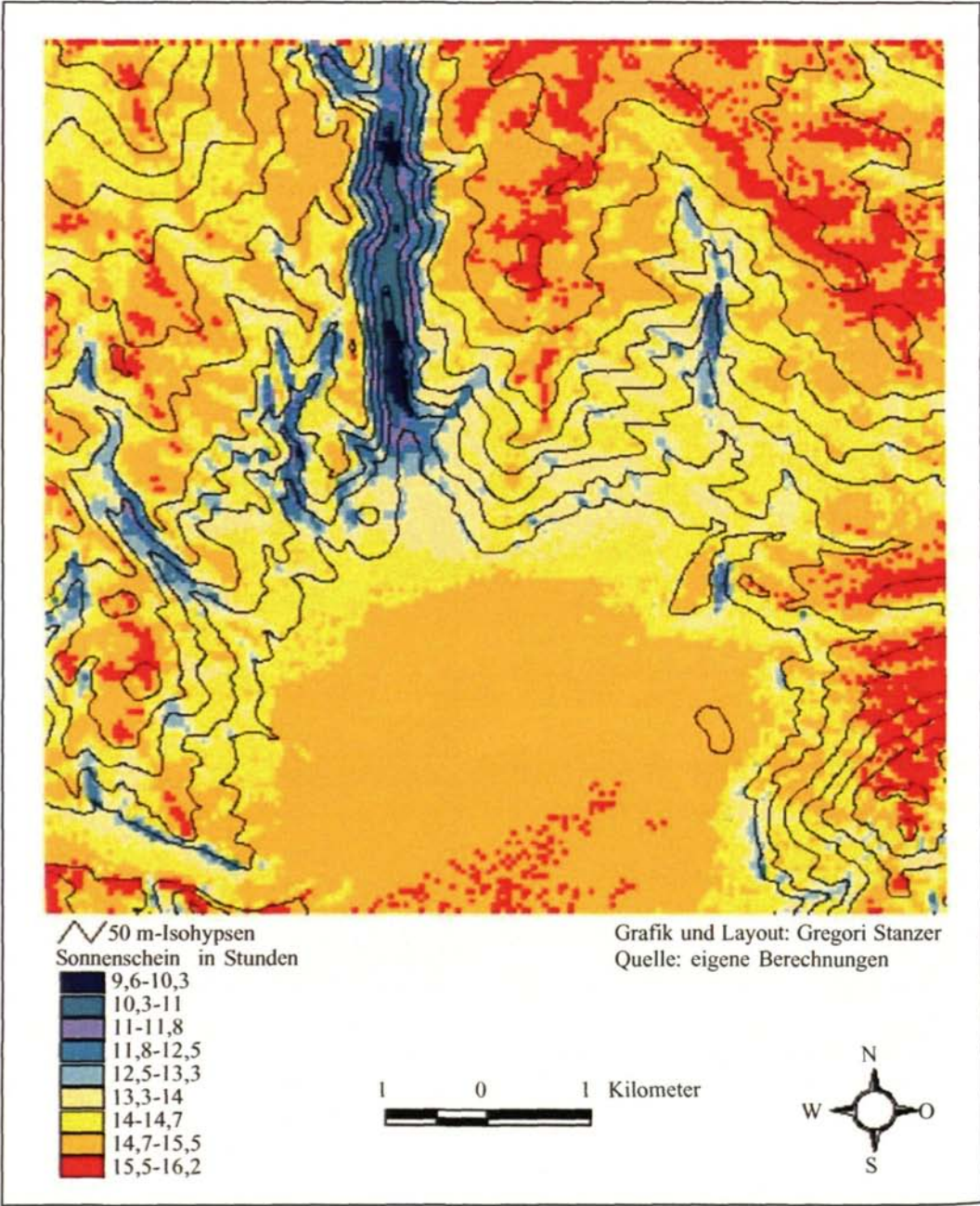


Abb. 75: Effektiv mögliche Sonnenscheindauer für Linz am 21. Juni

6.5 Die Globalstrahlung

Für das Strahlungsklima eines Ortes ist die Angabe der Globalstrahlung eine der wesentlichsten Grundlagen. Allgemein lässt sich sagen,

dass die Strahlung in den Bergen am intensivsten ist. Denn zum einen legt die Strahlung ganz einfach eine kürzere Wegstrecke durch die Atmosphäre zurück, bevor sie die Kuppen und Anhöhen der Berge erreicht. Zum ande-

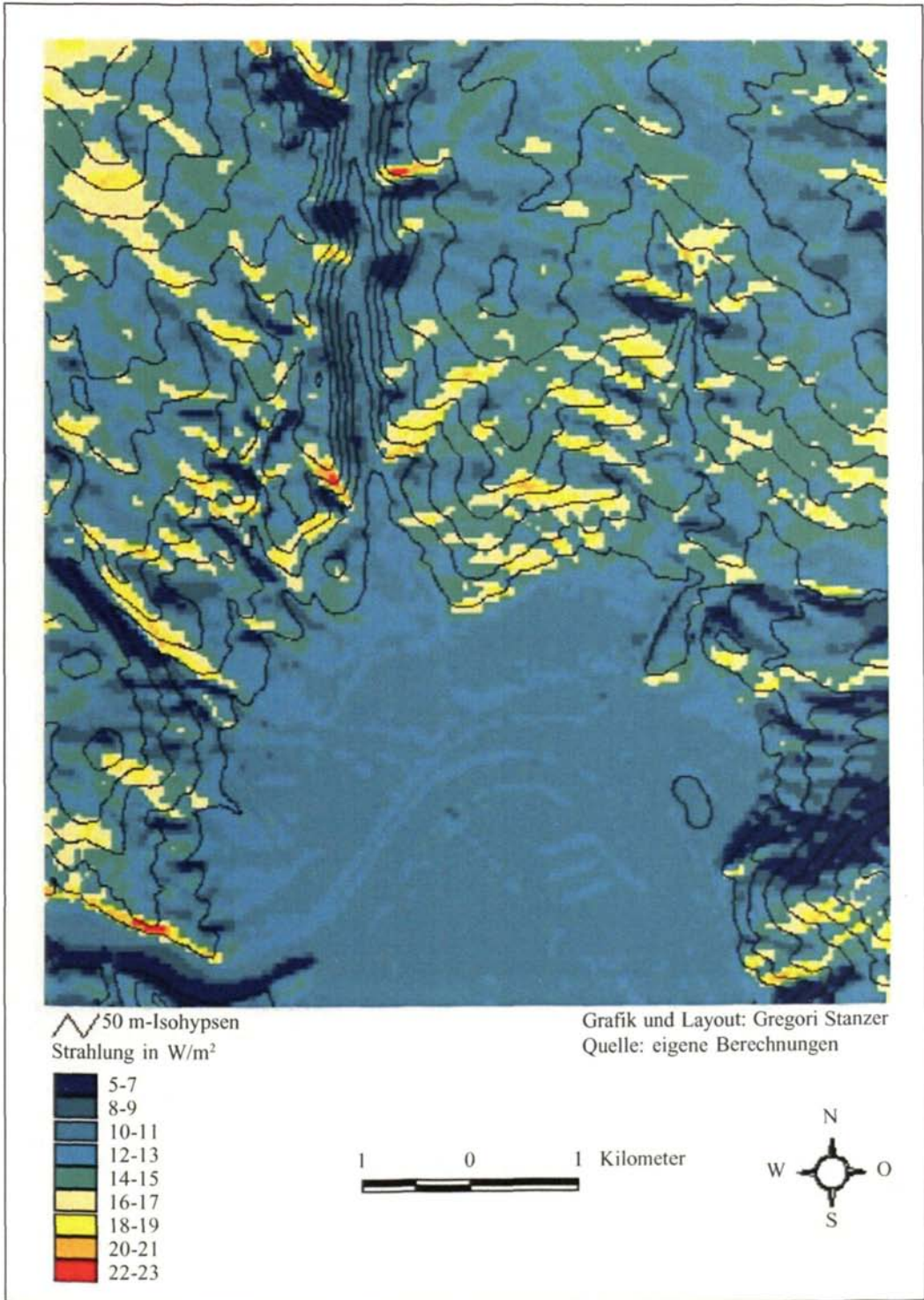
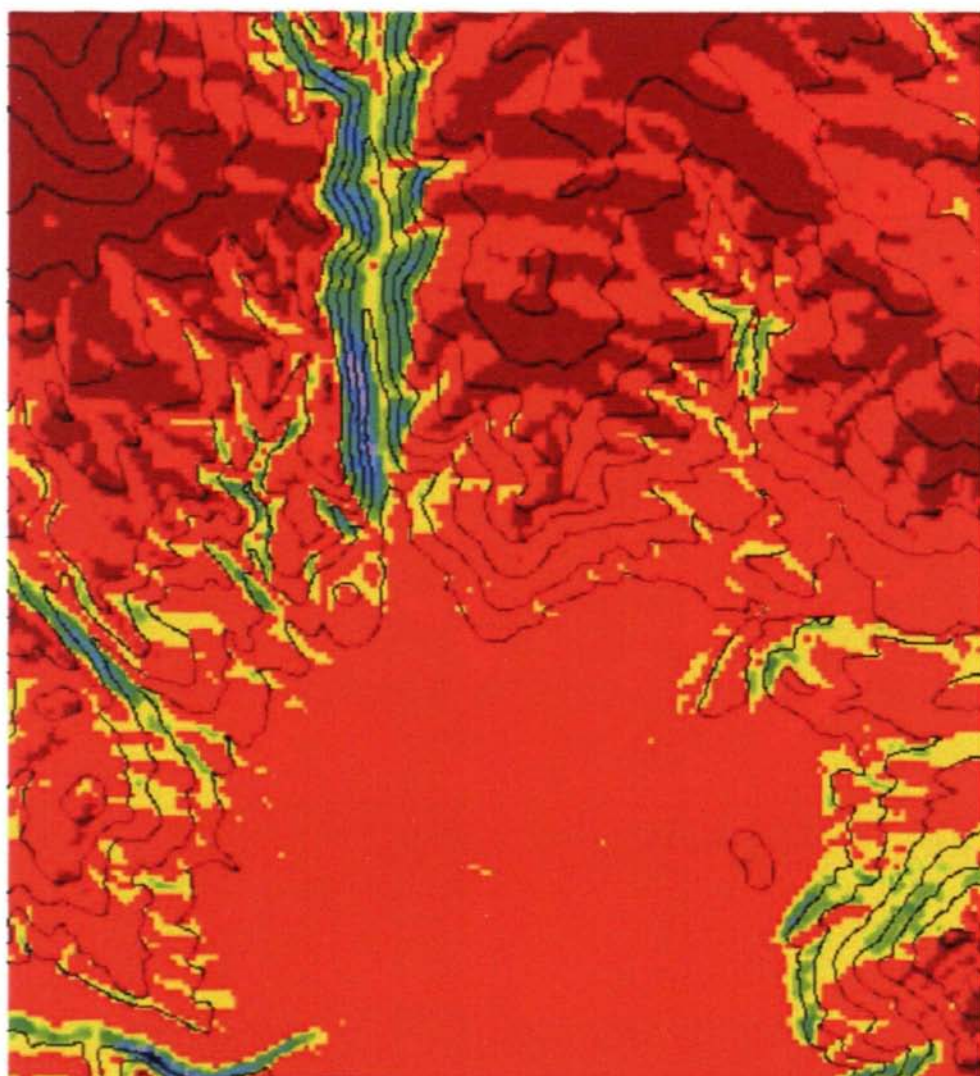
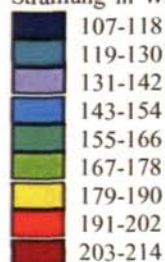


Abb. 76: Globalstrahlung bei mittlerer Bewölkung für den 21. 12.



50 m-Isohypsen
Strahlung in W/m^2



Grafik und Layout: Gregori Stanzer
Quelle: eigene Berechnungen

1 0 1 Kilometer

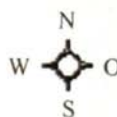


Abb. 77: Globalstrahlung bei mittlerer Bewölkung für den 21. 06.

ren sinkt mit zunehmender Seehöhe sowohl der Wasserdampfgehalt als auch der Anteil an Aerosolen. Der durchschnittliche Jahreswert der Globalstrahlung steigt daher mit zunehmender Seehöhe.

Für die Modellierung der durchschnittlichen Strahlungsintensität wolkenloser Tage am 21. Dezember wird eine Transmission von 55 Prozent angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus dem Vergleich zwischen maximal möglicher und tatsächlicher Strahlung wolkenloser Tage in Linz. Die höchste Strahlungsintensität in Linz wird am 21. Dezember an den Südhängen der Ausläufer der Böhmisches Masse erzielt. Im Tagesmittel beträgt sie an exponierten Stellen an die 70 W/m². Bereits an den Hängen sind die Strahlungsunterschiede zwischen verschiedenen Geländestrukturen sehr groß. Am wenigsten Strahlung erhalten die Nordflanke des Kalvarienberges, der nordseitig geneigte Rücken des Pfenningberges, die kurzen und steilen Seitenverzweigungen des Haselgrabens und der Dießenleitenbach.

Für den Monat Juni wird an wolkenlosen Tagen eine mittlere Transmission von 68 % bestimmt. Bei vollkommen wolkenlosem Himmel - also einer relativen Sonnenscheindauer von 100 % - wird für das Bearbeitungsgebiet am 21. Juni demnach folgendes Verteilungsbild der Globalstrahlung ermittelt:

Im Unterschied zum 21. Dezember wird im Bearbeitungsgebiet die maximale Strahlungsintensität mehr an den Hügelkuppen als an den Hängen beobachtet. Sie erreicht dort Werte von etwas über 360 W/m². Der überwiegende Anteil des Bearbeitungsgebietes erhält eine Strahlungsintensität von rund 330 W/m². Da sich bereits für die Sonnenscheindauer abzeichnete, dass der Talboden des Haselgrabens gegenüber den beidseitigen Hängen bevorzugt ist, kann dort eine höhere mittlere Strahlungsintensität erwartet werden. Dies trifft tatsächlich zu.

Für die Modellierung der durchschnittlichen Globalstrahlung bewölkter Tage werden Werte der relativen Sonnenscheindauer und der

Transmission von Linz-Stadt herangezogen. Diese Werte variieren von Monat zu Monat.

Das Linzer Stadtgebiet kann anhand der Strahlungsintensität im Winter stärker untergliedert werden, wenn auch die Unterschiede im gesamten Kartenbild sehr klein sind. Ähnlich der Situation an wolkenlosen Tagen empfangen die südseitig geneigten Hänge am meisten Strahlung. Dort werden bis zu 23 W/m² ermittelt, wohingegen Gebiete wie der Haselgraben und der Nordrücken des Pfenningberges in manchen Bereichen auch nur 5 W/m² erhalten.

Für das Linzer Stadtgebiet wird eine Strahlungsintensität von etwa 10-13 W/m² ermittelt. Da das digitale Geländemodell sogar die Struktur des Donauufers enthält, ist es möglich, deren gegenüber der Donau erhöhten Strahlungsempfang modellhaft zu bestimmen. Die südseitig geneigten Dämme, welche das Donauufer befestigen, erhalten bis zu 13 W/m² und sind in grün ausgewiesen; die Donau ist mit ihrem Betrag von rund 10 W/m² blau gekennzeichnet (Abb. 76).

Für den 21. Juni wird bei durchschnittlicher Bewölkung und Transmission folgende Verteilung der Globalstrahlung ermittelt:

Die modellierte durchschnittliche Strahlungsintensität bei Bewölkung beträgt im Linzer Becken an die 200 W/m², an wolkenlosen Tagen dagegen bedeutend mehr, nämlich zwischen 320 und 340 W/m². Im Übrigen decken sich diese 200 W/m² gut mit den in Linz gemessenen Globalstrahlungswerten. Die geringsten Tagesmittelwerte der Globalstrahlung betragen am 21. Juni im Übrigen 107 W/m² und werden für die Nordflanke des Kalvarienberges ermittelt (Abb. 77).

6.6 Die kurzweilige Strahlungsbilanz

Um die kurzweilige Strahlungsbilanz zu bestimmen, wird auf die CORINE-Landnutzungs-klassifikation und auf die bei BREST (1987) veröffentlichten Albedowerte zurückgegriffen. Zuerst soll die kurzweilige Strahlungsbilanz wolkenloser Tage, an denen die relative Sonnen-

scheindauer also 100 % beträgt, ermittelt werden.

Für den 21. Dezember wird eine Transmission bei wolkenlosem Himmel von 65 % angenommen. Dieser Wert entspricht nahezu dem Höchstwert der für den Monat Dezember in Linz angeführten Transmission von 64 % (Abb. 78).

Im Linzer Stadtgebiet beläuft sich die kurzweilige Strahlungsbilanz auf einen Tagesdurchschnitt von 30 bis 37 W/m² - ein Wertebereich, welcher in Abbildung 78 in einem leuchtenden Blau hervorgehoben wird. Im Stadtgebiet ist die Strahlungsbilanz entlang dem Donaulauf, im Industriegebiet und im Bereich der Pleschinger Au mit bis zu 44 W/m² am höchsten. Diese Gebiete werden in Türkisgrün ausgewiesen. Abgesehen vom feiner differenzierten Stadtgebiet selber entspricht das Erscheinungsbild der kurzweiligen Strahlung recht gut demjenigen der Globalstrahlung bei mittlerer Bewölkung. Auch hier werden die Höchstwerte an den südexponierten Hängen und weniger im Kuppenbereich erzielt. Diese Maxima betragen am 21. Dezember etwa zwischen 70 und 90 W/m².

Auch die Minima der kurzweiligen Strahlungsbilanz sind ebenso wie jene der Globalstrahlung verteilt. So weisen die Nordflanken und Gräben mit rund 10 bis 20 W/m² die geringsten Werte auf und sind in der Karte mitternachtsblau gekennzeichnet.

Für den 21. Juni wird eine Transmission bei wolkenlosem Himmel von 85 % angenommen. Dieser Wert entspricht nahezu dem Höchstwert der für den Monat Juni in Linz angeführten Transmission von 84 %.

Im Juni treten die Unterschiede der kurzweiligen Strahlungsbilanz je nach Landnutzungstyp noch deutlicher hervor als im Dezember. In diesem Monat ist die Albedo aller Nutzungsklassen - ausgenommen der Gewässer - höher als im Dezember. Da den Gewässern lediglich eine Albedo von 1,6 % zugewiesen wird, ist es leicht zu erklären, wieso sie mit bis zu 400 W/m² die höchsten Werte der kurzweiligen Strahlungsbilanz aufweisen.

Ihre Verluste durch Reflexion sind am geringsten! Aufgrund des hohen Sonnenstandes sind die exponierten Hänge gegenüber Kuppen und Ebenen weniger bevorzugt als im Dezember.

Auffallend sind die geringen Werte der Wiesen um die Pleschinger Au und des Heilhamerfeldes, welches vom Stadtgebiet umsäumt wird. Diese geringeren Werte der Strahlungsbilanz setzen sich entlang der Mühlkreis-Autobahn im Bruckfeld etwas Richtung Norden fort. Auch das Richtung Norden leicht abfallende Gebiet beim Burgstaller Wald weist geringere Werte der Strahlungsbilanz auf. Die dortigen geringen Strahlungswerte konnten bereits bei der Globalstrahlung nachgewiesen werden. Im Unterschied zur Globalstrahlung lässt sich sagen: Aufgrund der Geländewirkung und des geringen Schattenwurfes ist die Globalstrahlung der Wiesen um die Pleschinger Au recht groß, für die Bestimmung der kurzweiligen Strahlungsbilanz kommt nun jedoch auch die hohe Albedo von Wiesen zur Wirkung.

Die niedrigsten Werte werden auf der steileren Westseite des Haselgrabens, an der Nordflanke des Kalvarienberges und im Graben des Dießenleitenbaches registriert. Der Nordrücken des Pfenningberges weist zwar großflächig geringe Werte der Strahlungsbilanz auf, doch insgesamt liegt die Strahlungsbilanz dort noch über den Werten der eben genannten Gebiete. Anscheinend spielt bei hohem Sonnenstand die Neigung der Hänge eine größere Rolle als im Winter, wo es in erster Linie auf die Exposition ankommt.

Um die kurzweilige Strahlungsbilanz bewölkter Tage in Linz modellieren zu können, wird auf die bereits ermittelten Durchschnittswerte der Transmission und Sonnenscheindauer zurückgegriffen.

Für den Dezember wird mit einer Transmission bei wolkenlosem Himmel von 55 % und einer Transmission bei vollkommen bewölktem Himmel von 18 % gerechnet. Die relative Sonnenscheindauer beträgt in diesem Monat

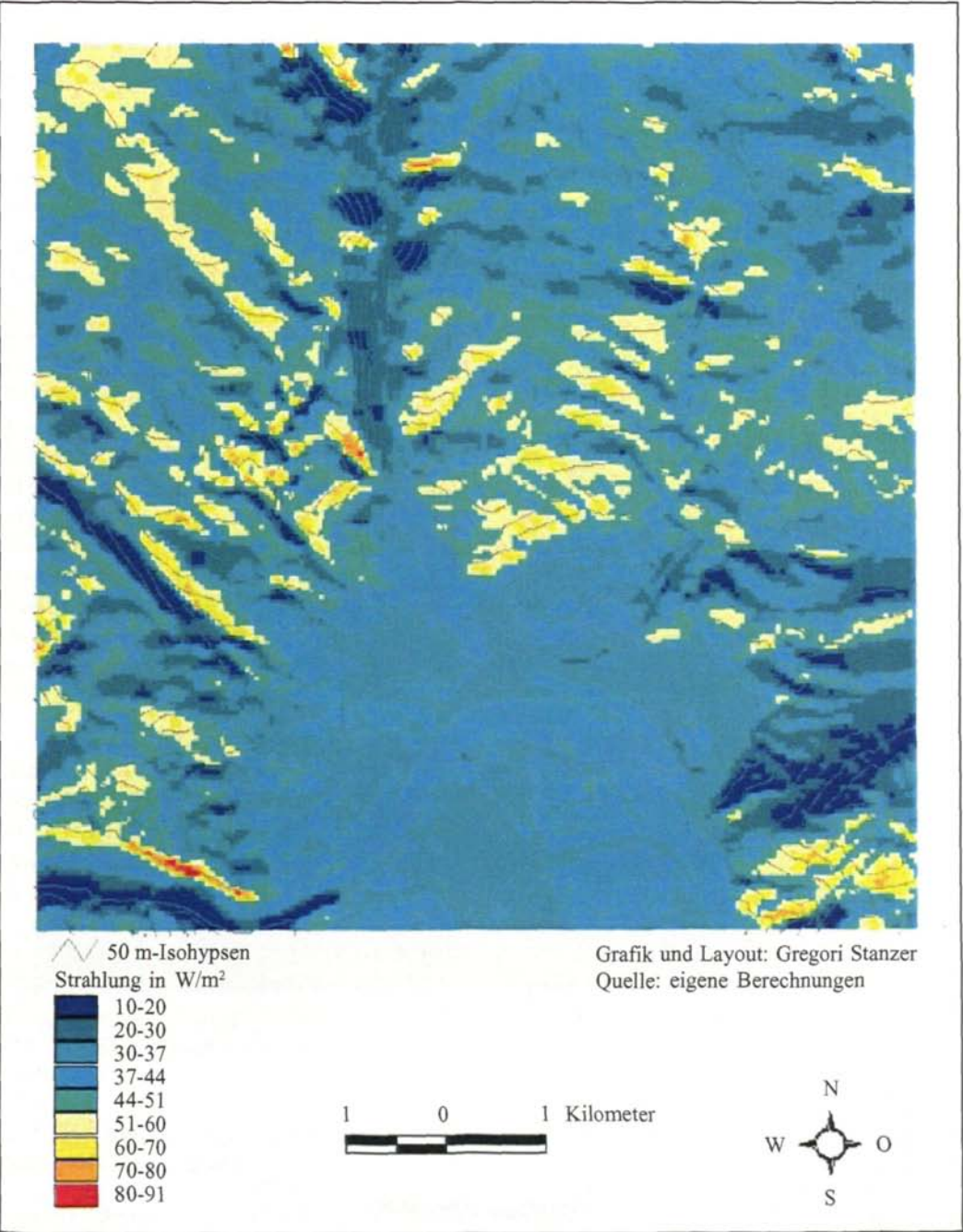


Abb. 78: Kurzwellige Strahlungsbilanz für den 21. 12. (Maximalwerte)

19 %. Im Vergleich zu den Höchstwerten der kurzwelligen Strahlungsbilanz treten an durchschnittlich bewölkten Tagen die Wiesen um die

Pleschinger Au und das Heilhamer-Feld deutlicher hervor. Sie weisen einen Strahlungswert von 8 bis 10 W/m^2 auf. Für das sonstige Linzer

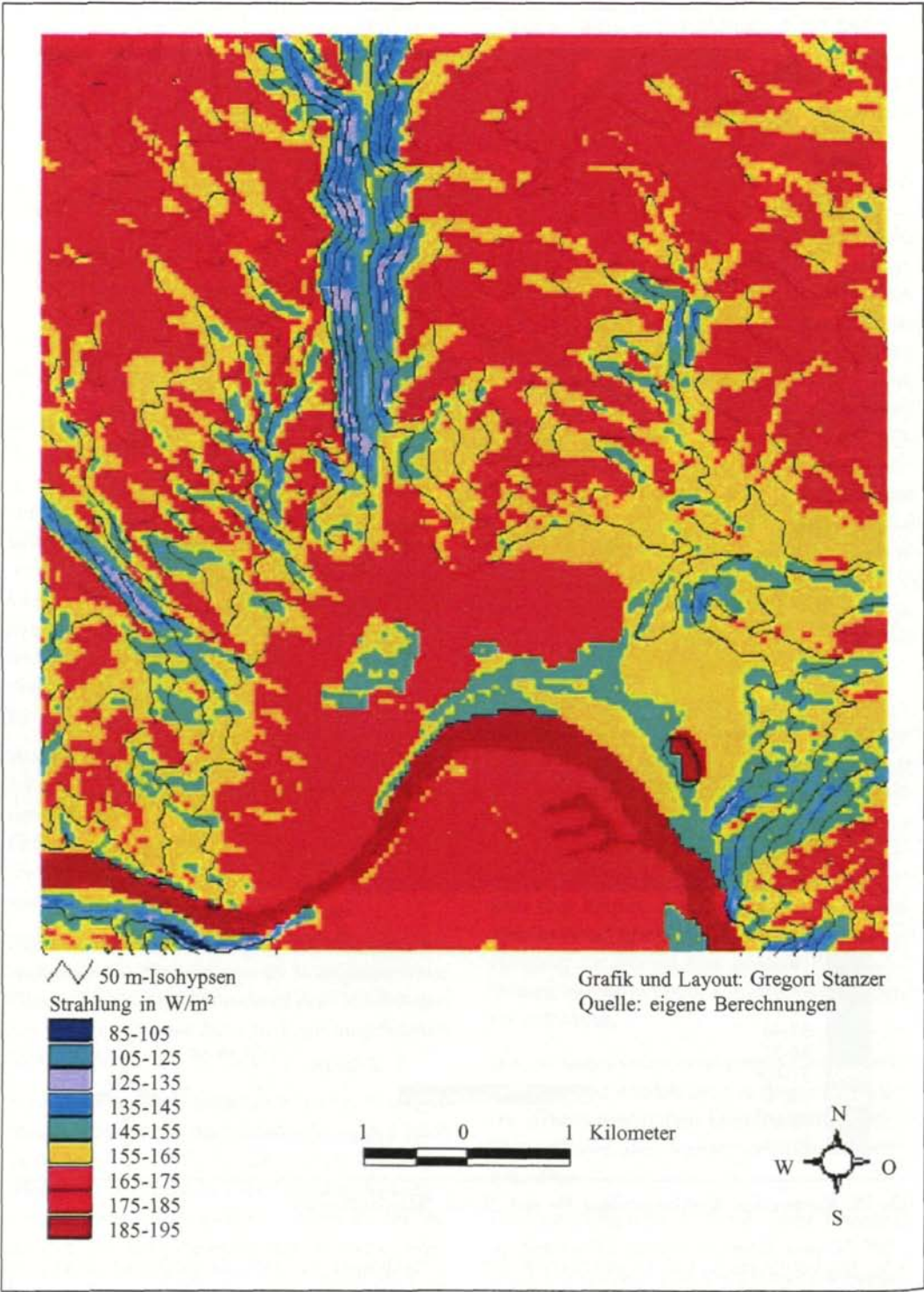


Abb. 79: Kurzwellige Strahlungsbilanz für den 21. 06. (Mittel)

Stadtgebiet werden großteils Werte von 10 bis 12, höchstens 13 W/m^2 bestimmt.

Für den Juni umfassen die durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse eine Transmission bei wolkenlosem Himmel von 68 %, eine Transmission bei vollkommen bewölktem Himmel von 23 % und eine relative Sonnenscheindauer von 47 %.

Für den 21. Juni verursacht die Berücksichtigung der tatsächlichen Strahlungsverhältnisse und die darauf abgestimmte Klassifizierung der Werte einiges: Denn abgesehen von den Absolutwerten, welche im Gebietsdurchschnitt von 336 auf 164 W/m^2 gesenkt werden, verändert sich auch das Erscheinungsbild der Abbildung 79 auffallend. Allgemein lässt sich sagen, dass eine verstärkte Differenzierung des Untersuchungsgebietes in unterschiedliche Wertebereiche der Strahlungsbilanz erfolgt. Die Konturen des Stadtgebietes treten so hervor, wie sie in der Landnutzungstypisierung festgelegt sind. Gerade im Bereich des Bruckfeldes und des Katzbaches werden große Gebiete mit einer geringeren Strahlungsbilanz als das Stadtgebiet ausgewiesen.

Darüber hinaus werden auch die Gräben, welche die Ausläufer des Böhmisches Massivs durchfurchen, in ihren Strahlungsverhältnissen stärker als zuvor differenziert. Einzig die Strukturlinie der Donau bleibt - wie bei allen Darstellungen der kurzweiligen Strahlungsbilanz im Untersuchungsgebiet - sehr markant. Die karminrot eingefärbte Donau weist mitsamt dem Pleschinger See Höchstwerte von bis zu 195 W/m^2 auf. Für das Linzer Stadtgebiet selber werden am 21. Juni Werte zwischen 165 und 185 W/m^2 bestimmt.

6.7 Die Bedeutung der relativen Sonnenscheindauer

Für die Messstation Linz-Stadt gelten für die durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse im

Juni folgende Transmissionswerte: Die Transmission bei wolkenlosem Himmel beträgt 68 %, bei vollkommener Bewölkung 23 %. Für den zirkumsolaren Koeffizienten wird, wenn nicht anders angegeben, stets ein Wert von 0,40 angenommen.

Tabelle 10 bezieht sich auf diese durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse im Juni; lediglich der Wert der relativen Sonnenscheindauer S_r wird verändert. Im Mittel beträgt dieser Wert 47 %, für die Sensitivitätsstudien wird er das eine Mal auf 35 % herabgesetzt, das andere Mal auf 60 % erhöht.

Bei der tatsächlichen Sonnenscheindauer von 47 % erhält eine Rasterzelle des Untersuchungsgebietes durchschnittlich 195,7 W/m^2 . In Abbildung 77 wird das Verteilungsbild der Globalstrahlung dargestellt; dort lässt sich der Mindestwert von 107 W/m^2 und der Höchstwert von 214 W/m^2 auf einfache Weise räumlich zuordnen. Wird für den Monat Juni eine relative Sonnenscheindauer S_r von 60 % angenommen, so erhöht sich die mittlere Strahlungsintensität im Untersuchungsgebiet auf 228,8 W/m^2 . Dies bedeutet, dass sich bei einer Änderung von S_r um ein Prozent die Globalstrahlung bei ansonsten gleichgebliebenen Strahlungsverhältnissen um 2,5 W/m^2 ändert.

6.8 Die Bedeutung der Transmission bei unterschiedlicher Bewölkung

Tabelle 11 bezieht sich abermals auf die durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse in Linz. Diesmal wird die Transmission bei vollkommener Bewölkung verändert. Das eine Mal wird dieser Transmissionswert auf 15 % herabgesetzt, das andere Mal eine Transmission von 30 % angenommen. Bezugspunkt für die Erörterung der geänderten Transmission ist die ermittelte Globalstrahlung bei einer Transmission von 23 %.

Tab. 10: Strahlungsverhältnisse (W/m^2) bei unterschiedlicher rel. Sonnenscheindauer

rel. Sonnens.	Minimum	Maximum	Standardabw.	Mittelwert
$S_r = 35$	91,6	181,3	8,1	165,5
$S_r = 47$	107	214	9,7	195,7
$S_r = 60$	124	251	11,6	228,8

Tab. 11: Strahlungsverhältnisse (W/m^2) bei unterschiedlicher Transmission (bedeckt)

t_{ed}	Minimum	Maximum	Standardabw.	Mittelwert
$t_{ed} = 15$	99	199,5	9,2	182,1
$t_{ed} = 23$	107	214	9,7	195,7
$t_{ed} = 30$	114,7	228,3	10,3	208,4

Tab. 12: Strahlungsverhältnisse (W/m^2) bei unterschiedlicher Transmission (bewölkt)

$t_{k(m^*)}$	Minimum	Maximum	Standardabw.	Mittelwert
$t_{k(m^*)} = 50$	91,3	175,1	7,7	157,8
$t_{k(m^*)} = 68$	107	214	9,7	195,7

Tab. 13: Strahlungsverhältnisse (W/m^2) bei unterschiedlicher Transmission (wolkenlos)

$t_{k(m^*)}$	Minimum	Maximum	Standardabw.	Mittelwert
$t_{k(m^*)} = 68$	177,1	363	17,2	331,3
$t_{k(m^*)} = 85$	206,5	433,3	21,9	401,3
$t_{k(m^*)} = 100$	252,7	527,3	28,4	483,8

Die Transmission von 23 % entspricht den durchschnittlichen Strahlungsverhältnissen im Juni, weshalb der dafür ermittelte Globalstrahlungswert von $195,7 W/m^2$ bereits bei einer relativen Sonnenscheindauer von 47 % bestimmt wurde. Wird mit einer Transmission t_{ed} von 23 % gerechnet, so erhöht sich die durchschnittliche Globalstrahlung des Untersuchungsgebietes auf $208 W/m^2$. Dies bedeutet, dass sich bei einer Änderung der Transmission um einen Prozentpunkt die ermittelte Globalstrahlung unter ansonsten durchschnittlichen Bedingungen um $1,8 W/m^2$ erhöht.

Bei durchschnittlicher Bewölkung bezieht sich Tabelle 12 auf die durchschnittlichen Strahlungsverhältnisse in Linz, wobei die Transmission $t_{k(m^*)}$ bei wolkenlosem Himmel in ihrem Wert verändert wird. Der für Linz ermittelte Durchschnittswert dieser Transmission beträgt im Juni 68 %. Das eine Mal wird nun ein Wert von 50 % angenommen, das andere Mal mit einer Transmission von 85 % gerechnet.

Wird für den Untersuchungstermin anstatt einer Transmission bei wolkenlosem Himmel von 68 % eine solche Transmission $t_{k(m^*)}$ von 50 % angenommen, so sinkt der Mittelwert der Globalstrahlung im Untersuchungsgebiet auf $157,8 W/m^2$. Dies entspricht einer Änderung von $2,1 W/m^2$, wenn sich der Transmissionswert $t_{k(m^*)}$ um einen Prozentpunkt verschiebt.

In Tabelle 13 wird der Fall angenommen, dass der Himmel den ganzen 21. Juni über wolkenlos ist, die relative Sonnenscheindauer daher 100 % beträgt. Das eine Mal wird nun mit der mittleren Transmission $t_{k(m^*)}$ bei wolkenlosem Himmel gerechnet. Sie beträgt im Juni 68 %. In Anlehnung an den höchsten in Linz-Stadt ermittelten Transmissionswert $t_{k(m^*)}$ von 84 % wird die Globalstrahlung auch bei einer Transmission von 85 % bestimmt. Schließlich werden weitere Vergleichswerte ermittelt, indem eine unrealistische Transmission $t_{k(m^*)}$ von 100 % angenommen wird.

Aus einem direkten Vergleich mit Tabelle 12 geht hervor, dass die Transmission $t_{k(m^*)}$ bei einem vollkommen wolkenlosen Himmel einen größeren Einfluss auf die Modellergebnisse ausübt als bei bewölktem Himmel. Eine Erhöhung der Transmission von 68 auf 85 % verursacht eine im Durchschnitt um $70 W/m^2$ höhere Globalstrahlung. Des Weiteren sind die so ermittelten Globalstrahlungswerte auch deswegen so interessant, da sie den in Linz je erreichbaren Höchstwerten entsprechen. Am 21. Juni, am Tag des Sonnenhöchststandes, beträgt die Globalstrahlung bei einer Transmission von 68 % im Untersuchungsgebiet durchschnittlich $331,3 W/m^2$. Dieser Wert ist für Linz durchaus realistisch.

Es kann jedoch als unwahrscheinlich betrachtet werden, dass bei einer Transmission von

85 % die Strahlungsbedingungen im Untersuchungsgebiet eine mittlere Globalstrahlung von $401,3 \text{ W/m}^2$ tatsächlich zulassen. Dieser Wert wird im Strahlungsmodell SRAD ermittelt, dafür dürfte sich am Himmel aber nicht einmal die kleinste Quellwolke bilden. In diesem Zusammenhang muss nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass für diese Sensitivitätsstudie die Globalstrahlung auf geneigter Fläche herangezogen wird. In Strahlungsmessungen muss das Messgerät jedoch immer waagrecht ausgerichtet werden. Dadurch ergibt sich, dass die hier angeführte Globalstrahlung in der Ebene mit den Messwerten besser übereinstimmt als im gegliederten Gelände.

6.9 Die Bedeutung des zirkumsolaren Koeffizienten

Um die Sensitivität des Strahlungsmodells SRAD auf die Eingangsgröße des zirkumsolaren Koeffizienten zu überprüfen, wird ein wolkenloser Himmel und folglich eine relative Sonnenscheindauer S_r von 100 % angenommen. Auch wird die Transmission $t_{k(m^*)}$ bei wolkenlosem Himmel auf 100 % gesetzt, was deutlich über dem tatsächlichen Maximum von 84 % liegt. Für solche Strahlungsverhältnisse wird nun der zirkumsolare Koeffizient zwischen den Werten 15 und 50 variiert (Tabelle 14).

Bei einem zirkumsolaren Koeffizienten von 15 wird eine durchschnittliche Globalstrahlung von $481,9 \text{ W/m}^2$ ermittelt, bei einem Koeffizienten von 50 beträgt die berechnete Globalstrahlung 488 W/m^2 . Aufgrund der sehr geringen Spannweite in den ermittelten Ergebnissen lässt sich sagen, dass der Einfluss des zirkumsolaren Koeffizienten auf die Globalstrahlung im Modell als sehr gering erachtet wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meteorologische Eingangsgröße, welche die

modellierten Globalstrahlungswerte am meisten beeinflusst, die relative Sonnenscheindauer ist. Auch bei einem durchschnittlich bewölkten Himmel wirkt die Transmission $t_{k(m^*)}$ auf das Modellergebnis stärker ein als die Transmission t_{cl} bei vollkommener Bewölkung. Bei wolkenlosem Himmel ist der Einfluss der Transmission selbstverständlich noch größer. Den geringsten Einfluss übt in jedem Fall der zirkumsolare Koeffizient aus.

6.10 Vergleich mit Messungen verschiedener Strahlungsgrößen

6.10.1 Bewölkung

Das Jahresmittel des Bedeckungsgrades liegt in Linz-Stadt bei 65 %. Eine solchermaßen hohe mittlere Bewölkung wird aufgrund zweier Ursachen hervorgerufen: Linz liegt im planetarischen Westwindgürtel, für den durchziehende Fronten und Schlechtwetterbänder charakteristisch sind. Und in der kalten Jahreszeit erhöhen die oft sehr beständigen Nebel und Hochnebelnagen des Linzer Beckens den Bedeckungsgrad.

Neben einer allgemein starken Bewölkung lässt sich für Linz und seine nähere Umgebung auch ein ausgeprägter Jahresgang erkennen. Am höchsten ist die Bewölkung im Winter, am geringsten im Sommer. Eine detailliertere Betrachtung des Jahresganges soll mit Hilfe von Abbildung 80 erfolgen.

Für das Verständnis der klimatologischen Situation um Linz ist es wichtig, die Lage der einzelnen Messstationen zu kennen. Linz-Stadt liegt in einer Seehöhe von 263 m. An allen fünf Beobachtungsstationen ist die Bewölkung im Dezember am höchsten, der monatliche Spitzenwert von 84 Prozent wird in Linz beobachtet. Die Landeshauptstadt verzeichnet auch das andere Extrem: Die geringste monatliche Bewölkung. Linz weist somit den markantesten Jahresgang auf.

Tab. 14: Strahlungsverhältnisse (W/m^2) bei unterschiedlichem zirkumsolaren Koeffizienten (wolkenlos)

CIRC	Minimum	Maximum	Standardabw.	Mittelwert
CIRC = 15	251,2	524,4	28,3	481,9
CIRC = 40	252,7	527,3	28,4	483,8
CIRC = 50	254,3	534,5	29	488,3

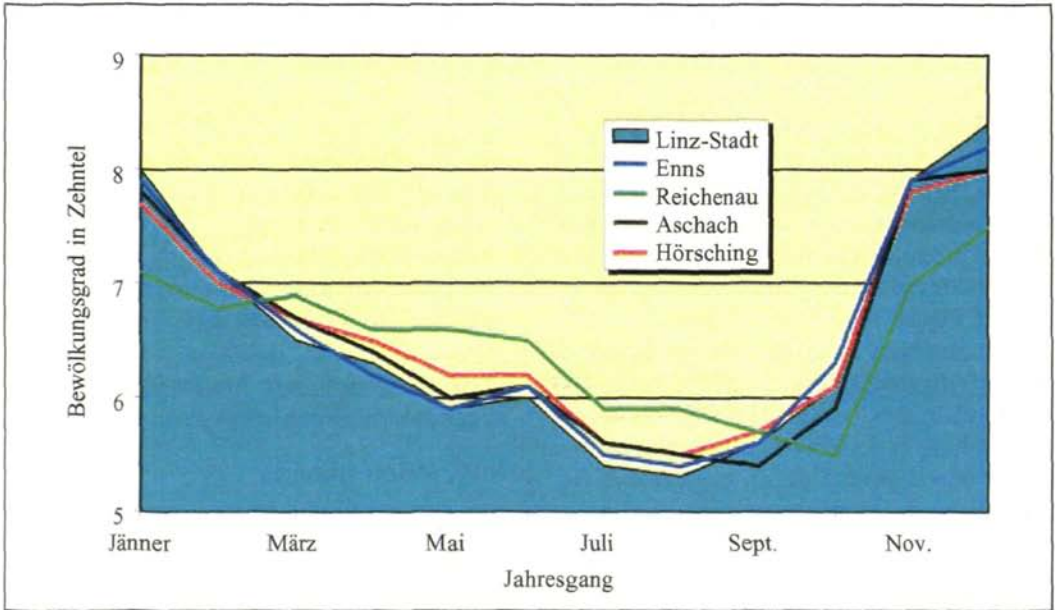


Abb. 80: Der Jahresgang der Bewölkung in und um Linz

Einen nahezu identen Jahresgang zeigt die 10 km von Linz entfernte Station Enns (260 m). In Aschach (282 m), vor allem aber in Hörsching (297 m) ist der Jahresgang ausgeglichener. Die Station mit den geringsten jahreszeitlichen Unterschieden ist jedoch eindeutig das in fast 700 m im Mühlviertel gelegene Reichenau (685 m). Die Systematik dieser unterschiedlichen Jahresgänge der Bewölkung wird erst klar, wenn der Zusammenhang zwischen jahreszeitlichem Bewölkungsgrad und Seehöhe untersucht wird.

Von Mai bis September sind in Linz durchschnittlich weniger als sechs Zehntel der Himmelsfläche von Wolken bedeckt. Das monatliche Bewölkungsminimum wird im August beobachtet und beträgt 53 Prozent. Auch über ganz Oberösterreich betrachtet ist die Bewölkung im Sommer weit geringer als im Winter. Im Herbst und Winter (Oktober bis Februar) sind die stark bewölkten Gebiete vorwiegend in den Tälern und Becken zu finden. Im Jänner beträgt die Bewölkung in Linz bis zu 80 % und mehr. Das Bergland ist in dieser Zeit begünstigt und nur zu 60 % bewölkt. In der warmen Jahreszeit erfolgt hingegen eine Umkehr der Verhältnisse.

Dann sind die tiefer gelegenen Gebiete geringer bewölkt. Zur gleichen Zeit verstärkt sich die Bewölkung im Bergland und erreicht dort im Juni zwischen 65 und 70 Prozent.

Gleich anderen Klimaelementen weist auch die Bewölkung einen charakteristischen Tagesgang auf. Ein gegenläufiges Verhalten der Hoch- und Tieflagen ist dabei ebenfalls zu erwarten. Im Gebirge sollte sich die stärkste Bewölkung tagsüber im Sommer, in der Ebene und in Becken in den Nächten des Winters einstellen.

In Abbildung 81 wird anhand der Station Linz-Stadt überprüft, ob diese Annahme auch für das Linzer Becken zutrifft. Die Daten der Beobachtungstermine von 7^h, 14^h und 19^h dienen dabei als Grundlage.

Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Bewölkung um 7 Uhr, also etwa zur Zeit des Temperaturminimums, allgemein am stärksten ist. Am geringsten ist die Bewölkung zumeist am Abend um 19^h. Der Unterschied zwischen der beobachteten Bewölkung um 14^h - der Zeit des Temperaturmaximums - und 19^h ist im Übrigen das ganze Jahr über gering.

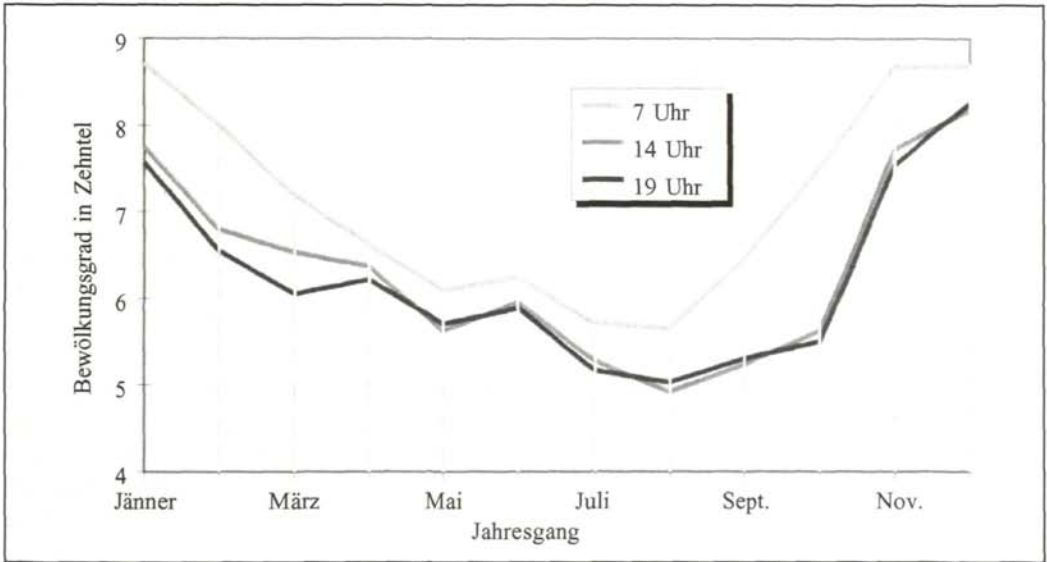


Abb. 81: Tagesgang der Bewölkung in Linz

Bezüglich der Tagesschwankungen der Bewölkung werden die größten Tagesschwankungen im Herbst und Winter, vor allem im Oktober, verzeichnet. Während in diesem Monat der morgendliche Himmel zu mehr als 75 % bewölkt ist, verringert sich die Bewölkung in den nächsten sieben Stunden auf 56 %. Die geringsten Tagesschwankungen der Bewölkung wer-

den im Juni, bei höherem Bedeckungsgrad auch im April beobachtet.

Beträgt die mittlere Bewölkung eines Tages höchstens 20 Prozent, so wird dieser Tag als heiter bezeichnet. Im Durchschnitt weist Linz jährlich 56 heitere Tage auf. Trübe Tage hingegen weisen im Durchschnitt aller drei Beobachtungstermine mehr als 80 Prozent Be-

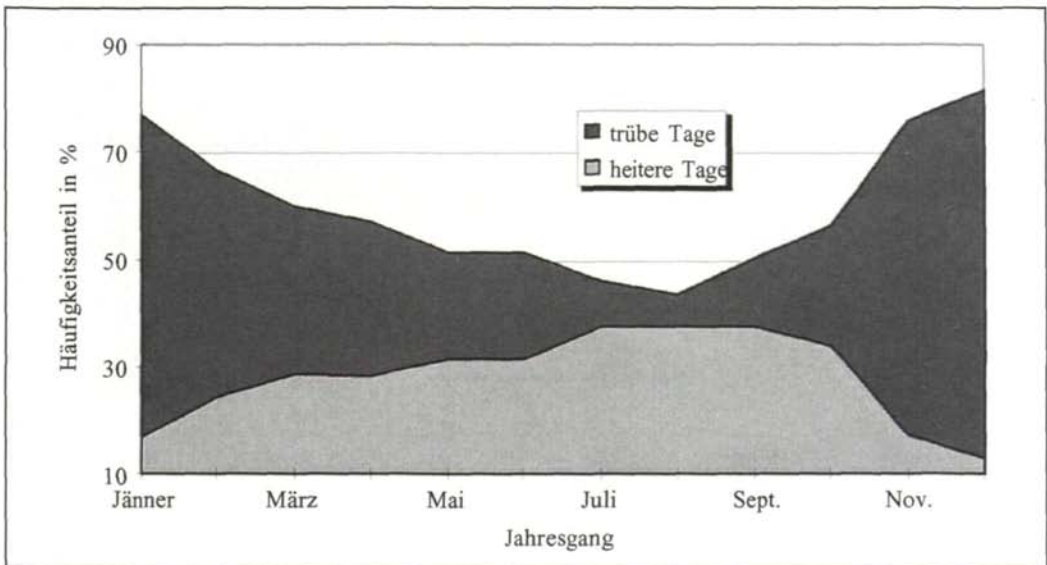


Abb. 82: Die Häufigkeit trüber und heiterer Tage im Jahresgang

wölkung auf. In Linz ist es öfters trüb als heiter, im Jahr an durchschnittlich etwa 162 Tagen. Wie in Abbildung 82 ersichtlich ist, werden die meisten trüben Tage im Winter, in den Monaten November bis Jänner, registriert.

Die meisten heiteren Tage werden von Juli bis September beobachtet. Zur selben Zeit, vor allem im August, sind auch weniger trübe Tage zu verzeichnen als sonst. Es lässt sich daher sagen, dass eine Strahlungsmodellierung bei wolkenlosen Verhältnissen für Linz am besten mit den Bewölkungsverhältnissen im Sommer übereinstimmt. Im Winter hingegen, besonders in den Monaten November bis Jänner, ist die Anzahl an heiteren Tagen nur äußerst gering.

6.10.2 Die Globalstrahlung in Linz

Es ist seit langem bekannt, dass Stadtgebiete weniger Strahlung empfangen als das umliegende Freiland. Hohe Schadstoffbelastungen und die damit verbundenen Luftbeimengungen über einer Stadt vermindern die Globalstrahlung. Vor allem im Winter und Herbst tragen beständige

Inversionslagen in Tälern und Becken dazu bei, dass sich die Schadstoffe in Städten anreichern. In dieser Zeit verursacht die „städtische Dunstglocke“ einen Strahlungsverlust von bis zu 50 %. Der niedrige Sonnenstand im Winter erhöht diese Strahlungsverluste. Tageszeitlich führt dies vor allem in den Morgen- und Abendstunden zu einer vermehrten Strahlungsschwächung. Gegenüber dem Stadt-Umland ergeben Messungen in der Stadt eine bis zu 20 % stärkere Strahlungsschwächung. Dies gilt für den Winter; der Stadt-Land-Unterschied in der Strahlungsschwächung nimmt zum Sommer hin auf 4 bis 7 % ab. Die Luftbeimengungen, welche im Winter die Strahlungsintensität herabsetzen, werden im Frühling durch höhere Windgeschwindigkeiten, im Sommer durch vermehrte Konvektion in ihrer Konzentration verdünnt.

Messungen, welche über einer ebenen, unbeschatteten Grasoberfläche durchgeführt werden, ermöglichen es, das Strahlungsklima verschiedener Orte zu charakterisieren und miteinander zu vergleichen. Ein solcher Vergleich wird in Abbildung 83 durchgeführt.

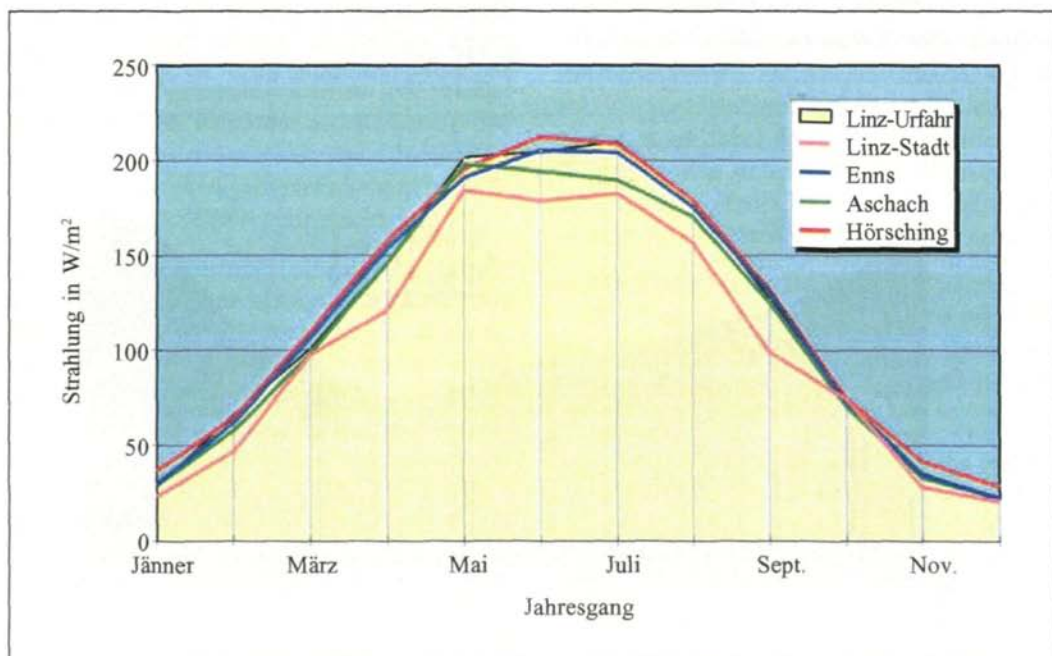


Abb. 83: Der Jahresgang der Globalstrahlung in Linz, Hörsching, Aschach und Enns

Abgesehen von der sechsjährigen Messreihe der Station Linz-Stadt liegen die Strahlungswerte der Stationen eng beisammen. Die Globalstrahlungswerte der Stationen Hörsching und Enns werden allerdings nicht gemessen, sondern auf rechnerische Weise ermittelt (BRUCK 1985). Dies mag den sehr homogenen Jahresgang der Strahlung, welche bei den Stationen beinahe parallel verläuft, erklären. Hörsching und Enns sind im Übrigen auch die einzigen Stationen, an denen die höchsten Strahlungswerte für den Juni angegeben werden.

Aufgrund des Sonnenhöchststandes im Juni ist ein solches Strahlungsmaximum plausibel; die gemessenen Werte der anderen Stationen deuten aber in eine andere Richtung. In Aschach und Linz-Stadt ist die mittlere Monatsstrahlung im Mai am höchsten, in Linz-Urfahr wird im Juli die höchste Monatsstrahlung beobachtet.

In Linz-Urfahr beträgt die durchschnittliche Tagesintensität der Globalstrahlung im Juli 210 W/m^2 , in Aschach wird der jährliche Höchstwert im Mai erreicht und beläuft sich auf etwa 200 W/m^2 . Auffallend ist, dass das Strahlungs-

niveau bei der Messstation Linz-Stadt vor allem in den Sommermonaten deutlich unter den Messergebnissen der anderen Stationen liegt. Es ist schwierig zu sagen, aus welchen Gründen die Strahlungswerte der Station Linz-Stadt so klar unter jenen von Linz-Urfahr liegen. Lässt sich dafür ein Stadteffekt verantwortlich machen oder verursachen die unterschiedlichen Messbetreiber Inhomogenität? In jedem Fall lohnt es sich, diese Strahlungsunterschiede im Auge zu behalten, zumal in Steyregg eine weitere, nahe gelegene Strahlungsmessstation zur Verfügung steht. An beiden Linzer Stationen werden die Messungen der Globalstrahlung seit 1993 durchgeführt. Es mag auch sein, dass eine längere Datenreihe mehr Aufschluss gibt.

Um die in SRAD ermittelten Werte zu validieren, ist es sinnvoll, das modellierte Ergebnis mit der gemessenen Strahlungsintensität jener Tage zu vergleichen, an denen die relative Sonnenscheindauer nahezu 100 % beträgt. Hiefür werden die höchsten monatlichen Messwerte der Station Linz-Urfahr aus den Jahre 1993 bis 1997 betrachtet. Das absolute Maximum entspricht

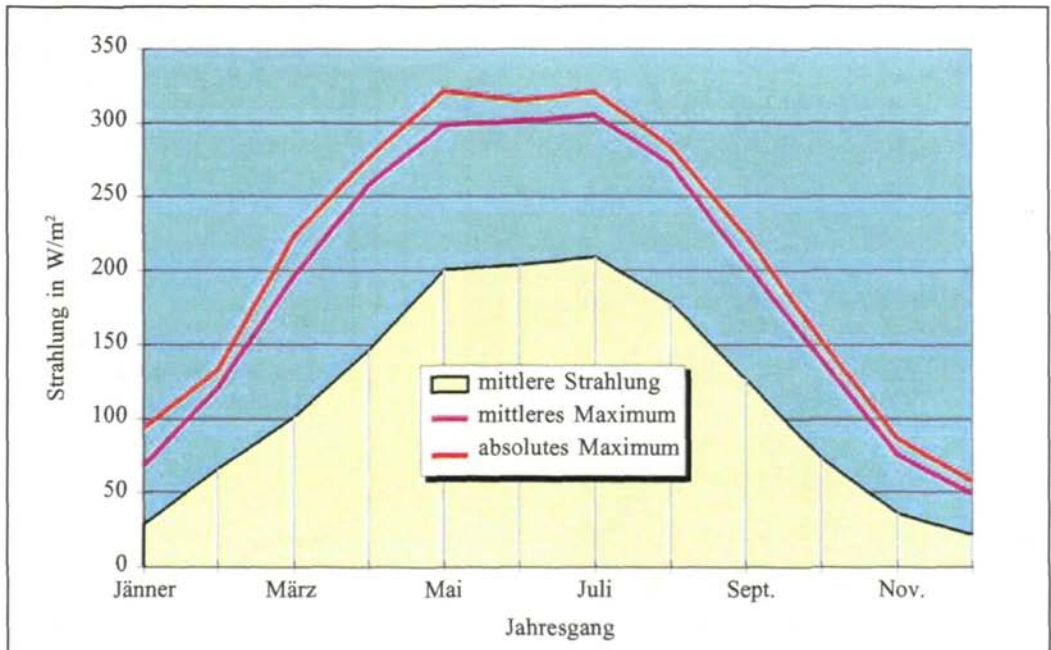


Abb. 84: Die Globalstrahlung in Linz-Urfahr

dem in all diesen Jahren je gemessenen Tageshöchstwert eines Monats, das mittlere Maximum gibt Aufschluss über den durchschnittlichen Tageshöchstwert eines Monats in den Jahren 1993 bis 1997. Im Vergleich dazu wird in Abbildung 84 auch die mittlere tägliche Strahlungsintensität innerhalb eines Monats aufgezeichnet.

Für das absolute Tagesmaximum der Strahlung gilt ebenso wie für die durchschnittliche Strahlungsintensität in Linz-Urfahr: In der Zeit des Sonnenhöchststandes, im Juni, erfolgt ein

kurzfristiger Einbruch der Globalstrahlung. Die höchste Strahlungsintensität wird in diesen Beobachtungsjahren zumeist im Juli, als Einzelwert von 322 W/m^2 jedoch im Mai erzielt. Dabei liegt das absolute Tagesmaximum im Juli mit 321 W/m^2 nur knapp unter diesem Wert. Im Übrigen stimmen diese gemessenen Werte recht gut mit den modellierten Ergebnissen überein. Am 21. Juni werden für das Linzer Stadtgebiet Werte zwischen 320 und 340 W/m^2 ermittelt. Ein weiteres Indiz für die Güte des Strahlungsmodells SRAD.

7 FOLGERUNGEN UND PLANUNGSHINWEISE

7.1 Kriterien für die Belüftung

Der Begriff Belüftung bezeichnet nichts anderes als Austausch von Luftmassen durch eine bestehende Luftströmung. Das hat zur Folge, dass zum einen durch vorangehende Stagnationsphasen belastete Luft abtransportiert und somit die Schadstoffkonzentrationen gesenkt werden. Weiters bedeutet die Existenz solch ei-

ner Strömung, die auf ein Gebiet wirkt, das Entstehen von Bewegungsvorgängen, die auch Turbulenzen genannt werden. Diese bewirken eine bessere Durchmischung der Atmosphäre im betroffenen Bereich, was zu einer Verdünnung der Schadstoffe führt.

Wie sich aus der klimatologischen Analyse der Strömungen und den Modellrechnungen ergibt,

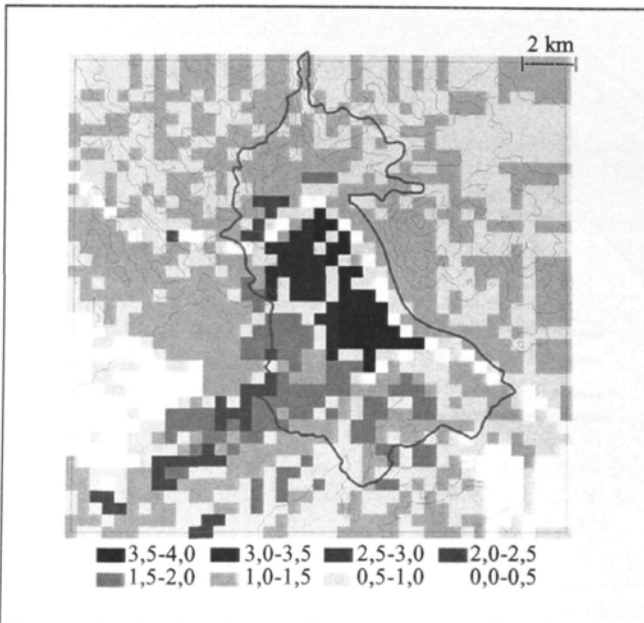


Abb. 85:
Oberflächenstruktur für
Linz und Umgebung
(Rauhigkeitslänge [m])

treten in nicht allen Situationen kritische Schadstoffbelastungen auf. Vielmehr beschränken sich diese auf einige klar definierte Fälle, in welchen die gute Belüftung der betroffenen Stadtteile sichergestellt werden muss. Die in den kritischen Situationen vorhandenen Luftströmungen können diese Aufgabe wahrnehmen. Sie hängen von verschiedenen Faktoren ab und auch die Stadtteile werden unterschiedlich beeinflusst. Die Stadtstruktur setzt diesen Strömungen durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit Widerstände entgegen. Wenn diese Eigenschaften bei den Überlegungen berücksichtigt werden, lassen sich für das Stadtgebiet Aussagen treffen, in welchen Bereichen die belüftungsrelevanten Strömungen sensibel auf

Änderungen der Flächenwidmung oder der Bebauungsstruktur reagieren könnten.

Generell lässt sich festhalten, dass aufgrund der topographischen Gegebenheiten der Süden des Linzer Stadtgebietes in Hinblick auf die Belüftung bevorzugt ist. In den umgrenzten Gebieten im Norden des Stadtgebietes können vor allem die großräumigen östlichen Strömungen nicht so effektiv wirksam werden, da sie von der Topographie behindert werden.

Als Anhaltspunkt für die flächenhafte Beurteilung der Belüftungssituation in Linz kann die Verteilung der Oberflächenrauigkeit im Stadtgebiet und in den umliegenden Bereichen verwendet werden. Diese teilt das Gebiet in ver-

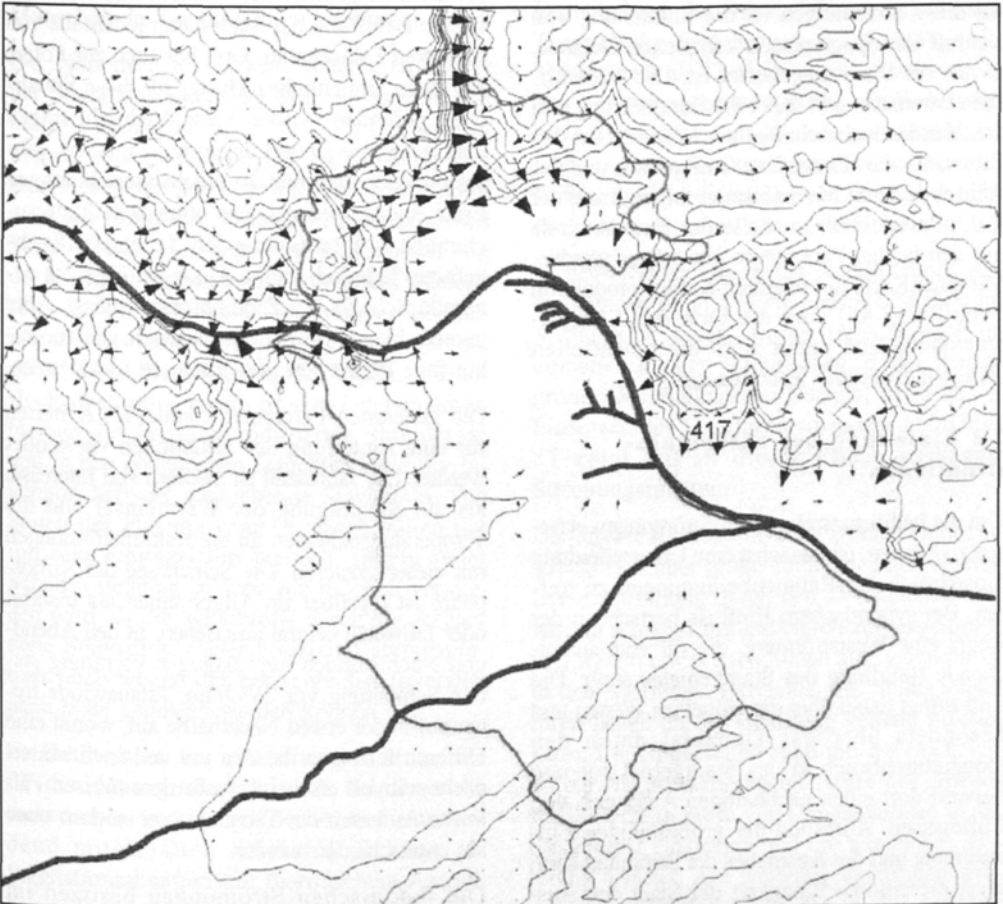


Abb. 86: Relative Kaltluftproduktion für Linz und Umgebung

schiedene Oberflächentypen, die durch unterschiedliche Rauigkeitslängen gekennzeichnet sind. Die Geländehöhen für Linz und Umgebung (20 x 20 km Ausschnitt) wurden mit einer Auflösung von 10 m mit der TOSCA Software aus einer 1:25000 Karte digitalisiert. Ein Landsat-Bild von Linz wurde mit Hilfe der Software IDRISI bearbeitet, um die Stadtstruktur und die Oberflächentypen der umliegenden Bereiche zu analysieren (Abb. 85).

Die belüftungsrelevanten Strömungen für die Stadt Linz in den kritischen Situationen sind in erster Linie Kaltluftströmungen, die sich als Hangwinde in den hangnahen Bereichen oder als Talauswinde in größeren Teilen des Stadtgebietes bemerkbar machen. Die Grundbedingung für diese Strömungen ist die Entstehung von Kaltluft im topographisch komplexen Gelände, in das die Stadt eingebettet ist. Die wesentlichen Parameter sind dabei die Hangneigung und die Oberflächenbeschaffenheit. Während bei den Talwinden die Herkunft der Luftmassen und der Antrieb anderen Mechanismen folgen, kann die Kaltluftproduktion im Falle der Hangabwinde mit den beiden Parametern gut erfasst werden. Mit einer Karte der relativen Kaltluftproduktion (Abbildung 86) sind die Orte der Kaltluftentstehung und damit auch die potentiellen Hangwindbereiche festzumachen.

7.2 Einteilung der Strömungssituationen

Um die belüftungsrelevanten Strömungen erfassen zu können, ist zunächst eine Unterscheidung hinsichtlich der Rahmenbedingungen zu treffen. Bei synoptischem Einfluss herrscht in der Regel eine Westströmung, die für eine ausreichende Belüftung des Stadtgebietes sorgt. Die Luft dringt dabei über die Hügel im Westen und besonders über das Donautal durch den Donaudurchbruch in das Stadtgebiet vor und bewirkt dort einen nachhaltigen Austausch von Luftmassen. Aufgrund der großräumigen Einströmung und des Ausmaßes der Strömung kann auch die erhöhte Rauigkeit der Stadt den Austausch nicht wesentlich behindern. Da in die-

sen Fällen für gewöhnlich eine instabile Schichtung der Atmosphäre zu finden ist, kommt es zu keiner Abkopplung der synoptischen Strömung von der Zirkulation in Bodennähe, und somit kann der Wind seine belüftende Funktion bis zum Boden ausüben. Um eine Beeinträchtigung der Belüftung zu verhindern, muss darauf geachtet werden, dass im Westen des Stadtgebietes kein Schadstoffeintrag in die Atmosphäre erfolgt. Durch Baumaßnahmen kann in diesem Fall keine Verringerung der Belüftung erfolgen.

Anders verhält es sich bei synoptisch schwachen Wetterlagen. In diesen Fällen treten lediglich thermisch induzierte Strömungen im Untersuchungsgebiet auf, die mehr oder weniger stark ausgeprägt sein können. Ihre Relevanz für die Belüftung der Stadt hängt jedenfalls von mehreren Faktoren ab. Dies hat auch zur Folge, dass kein einheitliches Muster für diese Situationen gefunden werden kann. Vielmehr tragen Parameter wie Bedeckungsgrad, Tageszeit, Jahreszeit oder Stabilität zu einem vielschichtigen Erscheinungsbild bei, das ohne Detailuntersuchungen in interessierenden Teilen des Stadtgebietes lediglich einige Aussagen über das generelle Schema der Zirkulationen zulässt. Aber gerade diese liefern Informationen, die für zukünftige Planungen von Interesse sein können.

Die genannten Parameter können als Kriterien für eine Einteilung der Situationen verwendet werden. Die Jahreszeit ist insofern von Interesse, als die Ausprägung der Wärmeinsel und die Temperaturgradienten für die Kaltluftströmungen mit dieser variieren. Die Schichtung der Atmosphäre ist tagsüber im Allgemeinen als instabil oder fallweise neutral anzusehen, in den Abend- und Nachtstunden liegt dagegen vorrangig stabile Schichtung vor. Wichtige Talauswinde treten nur in der ersten Nachthälfte auf, womit eine Differenzierung in die Zeit vor und nach Mitternacht sinnvoll erscheint. Außerdem müssen Fälle mit Auftreten der Talwinde von solchen ohne sie unterschieden werden.

Die thermischen Strömungen besitzen im Normalfall eine wesentlich geringere Stärke als

synoptische Strömungen; auch das Ausmaß der herangeführten Luftmassen ist deutlich geringer. Zudem ist die vertikale Erstreckung der Strömungen auf die untersten Schichten der Atmosphäre beschränkt, bei Hangwinden und Flurwinden auf einige Meter über dem Boden, bei Talauswinden auf nicht mehr als 150 bis 200 m über Grund. Als Konsequenz ergibt sich eine hohe Empfindlichkeit dieser Strömungen gegenüber veränderten Rahmenbedingungen. Da sie durch lokale Effekte hervorgerufen werden, können sie auch durch lokale Veränderungen beeinflusst werden. Die wichtigsten lokalen Einflüsse sind in diesem Zusammenhang die thermischen Verhältnisse und die Beschaffenheit der Oberfläche, genau jene, die vom Menschen am leichtesten zu verändern sind.

Bei synoptisch schwachen Wetterlagen erfolgt der Strahlungseintrag tagsüber für gewöhnlich nahezu unbehindert. In den Wintermonaten kommt es jedoch häufiger zur Bildung von Hochnebel, der die kurzwellige Einstrahlung drastisch herabsetzt. Während bei wolkenlosen Verhältnissen einerseits gute Durchmischung der bodennahen Schichten vorliegt und andererseits die für die lokalen Strömungen nötigen thermischen Unterschiede aufgebaut werden, gehen diese Mechanismen bei Situationen mit Hochnebel weitgehend verloren. Folglich unterbleiben die thermisch induzierten Strömungen und in den bodennahen Schichten unter der Inversion herrscht weitgehende Stagnation. Von Seiten der Planung kann in diesen Fällen nur indirekt eingegriffen werden, indem jeder Schadstoffeintrag so weit wie möglich vermieden wird, da die Schadstoffe durch die vorhandene Stagnation weder horizontal abtransportiert noch wegen der herrschenden Inversion nach oben gemischt werden können.

Es bleibt daher nur eine Situation übrig, die für die Planung relevant ist, da bei dieser die thermischen Strömungen den Ablauf entscheidend mitgestalten. Dieser Fall kann als Stagnationssituation mit thermischem Antrieb bezeichnet werden, und nur hier kann der Planer aktiv eingreifen.

7.3 Betrachtung der planungsrelevanten Situation

Am leichtesten lässt sich diese Situation erfassen, indem sie in vier Abschnitte eingeteilt wird. Der erste Abschnitt umfasst die Zeit von den späten Vormittagsstunden bis zum frühen Abend. In dieser Phase herrscht geringe Bewölkung und somit hoher Strahlungseintrag. Die großräumige Höhenströmung kommt aus E bis SE, die bodennahen Luftschichten sind gut durchmischt. Auch die bodennahe Strömung weht aus östlicher Richtung. Der Wind ist aber im Allgemeinen schwach. Durch die gute Durchmischung und die durch die Einstrahlung verursachte Konvektion ist eine gute Durchlüftung des Stadtgebietes gewährleistet. Thermische Strömungen sind infolge der Wärmeinsel als Flurwinde vor allem von Süden her vorhanden und in den nördlichen Gebieten sind die Hangaufwinde gut ausgebildet. Diese lokalen Strömungen unterstützen den Luftwechsel in dieser Periode, sind aber nicht die primären Austauschmechanismen.

In der zweiten Phase, die in den frühen Abendstunden ihren Anfang nimmt und etwa bis Mitternacht dauert, treten die thermisch induzierten lokalen Strömungen in den Vordergrund. Das markanteste Beispiel dafür ist das Einsetzen des Haselgrabenwindes. Abbildung 87 zeigt das in dieser Phase wirksame Strömungsmuster.

Der direkte Einfluss des Haselgrabenwindes erstreckt sich über große Teile des Stadtgebietes. Die Einströmung durch den Donaudurchbruch wird in seinem Einflussbereich zurückgedrängt und weicht etwas nach Süden aus, wodurch sie in den westlichen Bereichen des Stadtgebietes ihren Anteil an der Belüftung geltend machen kann. Die Hügelketten rund um die Stadt von W bis NE produzieren im Laufe des Abends Kaltluft, die in Form von Hangabwinden in das Stadtgebiet einsickert und die hangnahen Bereiche belüftet. Am weiteren Vordringen werden diese Strömungen durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit des Stadtgebietes gehin-

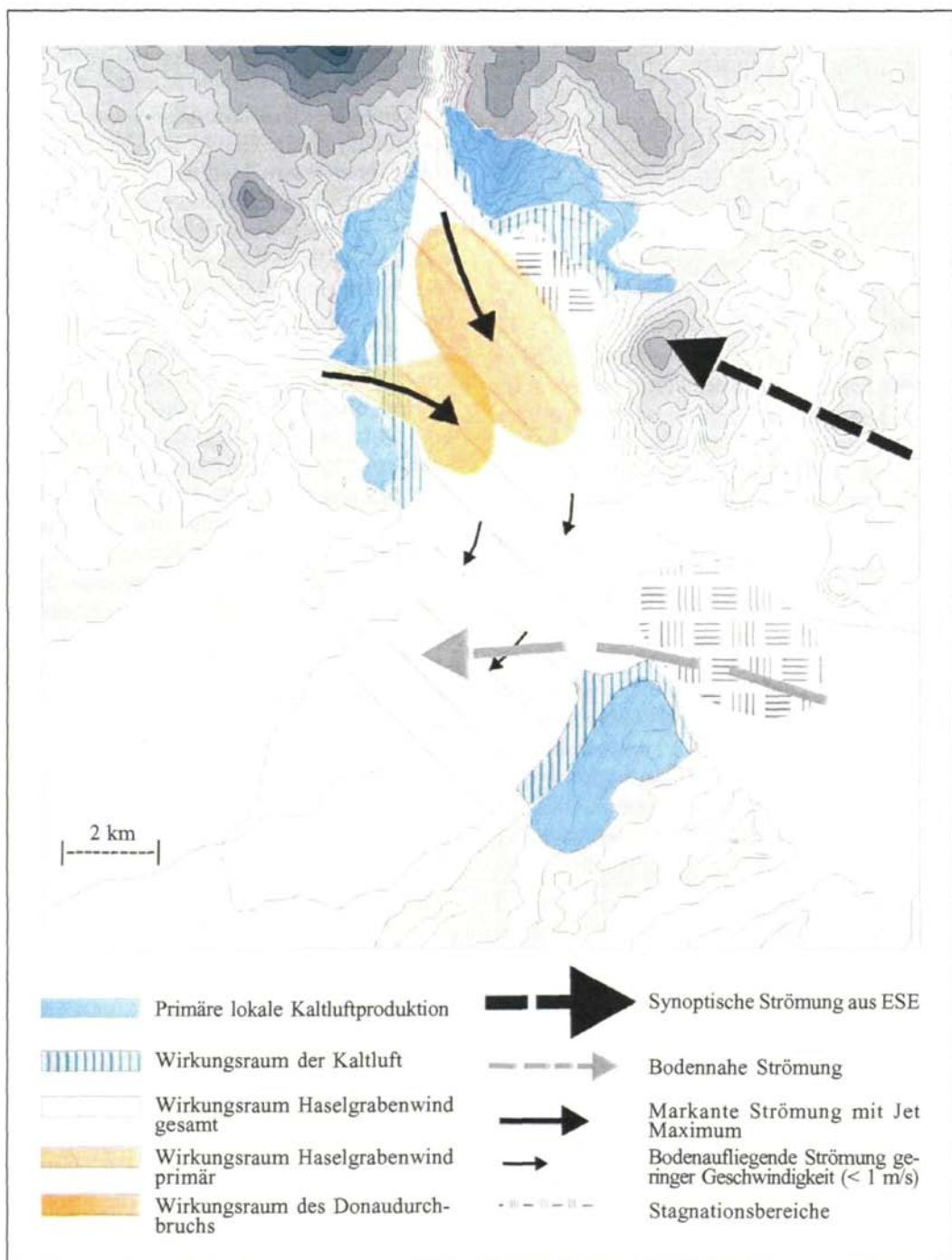


Abb. 87: Strömungsmuster Phase 2, 1. Nachthälfte

dert. Im Nordosten des Stadtgebietes bildet sich ein Stagnationsbereich aus, da einerseits die

wirksamen Talauswinde dieses Gebiet nicht erreichen können und andererseits die Hangab-

winde noch zu wenig Kaltluft für eine ausreichende Belüftung liefern.

Die durch den Haselgraben und den Donaudurchbruch aber auch über die kleineren Gräben in das Linzer Becken einströmende Kaltluft muss aufgrund der Massenerhaltung in einigen Bereichen des Beckens zu einem Ausströmen führen. Zum einen verursacht die städtische Wärmeinsel, da die Schichtung der Atmosphäre erst allmählich stabil wird, eine Aufwärtsbewegung über dem Stadtzentrum, die zum Abtransport von Luftmassen beiträgt. Es ist aber davon auszugehen, dass eine großflächige Ausströmbewegung nach Süden hin vorhanden ist und sich die überschüssige Luft der mesoskaligen Ostströmung anschließt und das Linzer Becken in Richtung Südwesten verlässt. Dabei trägt sie im Nahbereich der Stadt neben der Topographie zu einer Drehung der mesoskaligen Strömung von SE nach E bei. Somit kann man den Einflussbereich des Haselgrabenwindes und der anderen Talauswinde sekundär über das ganze Stadtgebiet ausdehnen, auch wenn der typische Jet in den südlicheren Stadtteilen nicht mehr nachzuweisen ist. Im Südosten bildet sich durch topographische Einflüsse ebenfalls ein Stagnationsbereich aus, welcher schon bei der klimaökologischen Begleitplanung zur Solar-City näher untersucht wurde.

Die Hangwinde von den Hängen im Süden besitzen wegen der schwachen Neigung der Hänge eine nur geringe Mächtigkeit. Abbildung 87 zeigt aber auch, abgesehen von dem Stagnationsbereich, die prinzipiell bessere Belüftung des südlichen Stadtgebietes.

In der zweiten Nachthälfte, die die dritte Phase darstellt, zeigt sich ein etwas anderes Bild, da die bisher wirksame beherrschende Strömung, der Haselgrabenwind, wegfällt. Die wirksamen Strömungsverhältnisse sind in Abbildung 88 zu sehen. Durch das Abflauen des Haselgrabenwindes dehnt sich der Einflussbereich des Donaudurchbruchs wesentlich nach Osten aus, wie die Messungen am Brucknerhaus belegen (Abb. 60). Der Lufteintrag in das Linzer Becken ist aber nun deutlich gerin-

ger, wodurch die Ausgleichsströmungen nach Süden hin abnehmen. Zusätzlich bildet sich eine stabile Schichtung über dem Stadtzentrum aus, die den konvektiven Effekt der Wärmeinsel unterbindet und somit ein Ansaugen von Luft aus der Umgebung verhindert. Daher ist auch die Bildung von Flurwinden lahmgelegt. Das alles bewirkt die Entstehung eines Stagnationsbereiches im Stadtgebiet, der deswegen kritisch sein kann, da auch das Industriegebiet von VA Stahl und Chemie Linz von erfasst wird.

Der Kaltluftabfluss von den Hängen im Norden wird durch die in dieser Phase stärkere Kaltluftproduktion massiver, wodurch die Kaltluft weiter in das Stadtgebiet vordringen kann. In den nördlichen Stadtteilen, besonders nördlich der Donau wird sie somit zum bestimmenden Belüftungsfaktor. Im Donautal wirkt die Einströmung durch den Donaudurchbruch. In den südlichen Bereichen ändert sich am Strömungsmuster, abgesehen von der geringeren Ausströmung aus dem Becken, kaum etwas.

Die heikelste Phase beginnt mit der Übergangsperiode am Morgen und dauert bis in den Vormittag hinein an. In Abbildung 89 ist das dazu gehörige Strömungsmuster dargestellt.

Die mit der Sonneneinstrahlung einsetzende Erwärmung der Hänge führt mit fortschreiten der Dauer zuerst zu einem Stillstand der Kaltluftproduktion und in weiterer Folge zu einer Umkehrung der Strömung zu einem Hangaufwind, wie er dann tagsüber, wie in Phase 1 beschrieben, wirkt. In genau dieser Übergangsphase kommt es jedoch in den Gebieten, die in den vorangegangenen Phasen primär durch die Kaltluft beeinflusst waren zu ausgedehnten Stagnationen, die bis zu einer Stunde oder auch noch länger andauern können.

Die stabile Schichtung über dem Stadtgebiet wird ebenfalls aufgebrochen und die städtische Wärmeinsel kann bei der nunmehr vorhandenen neutralen oder auch leicht labilen Schichtung wirksam werden und Flurwinde generieren. Diese wirken teilweise den sich anfangs

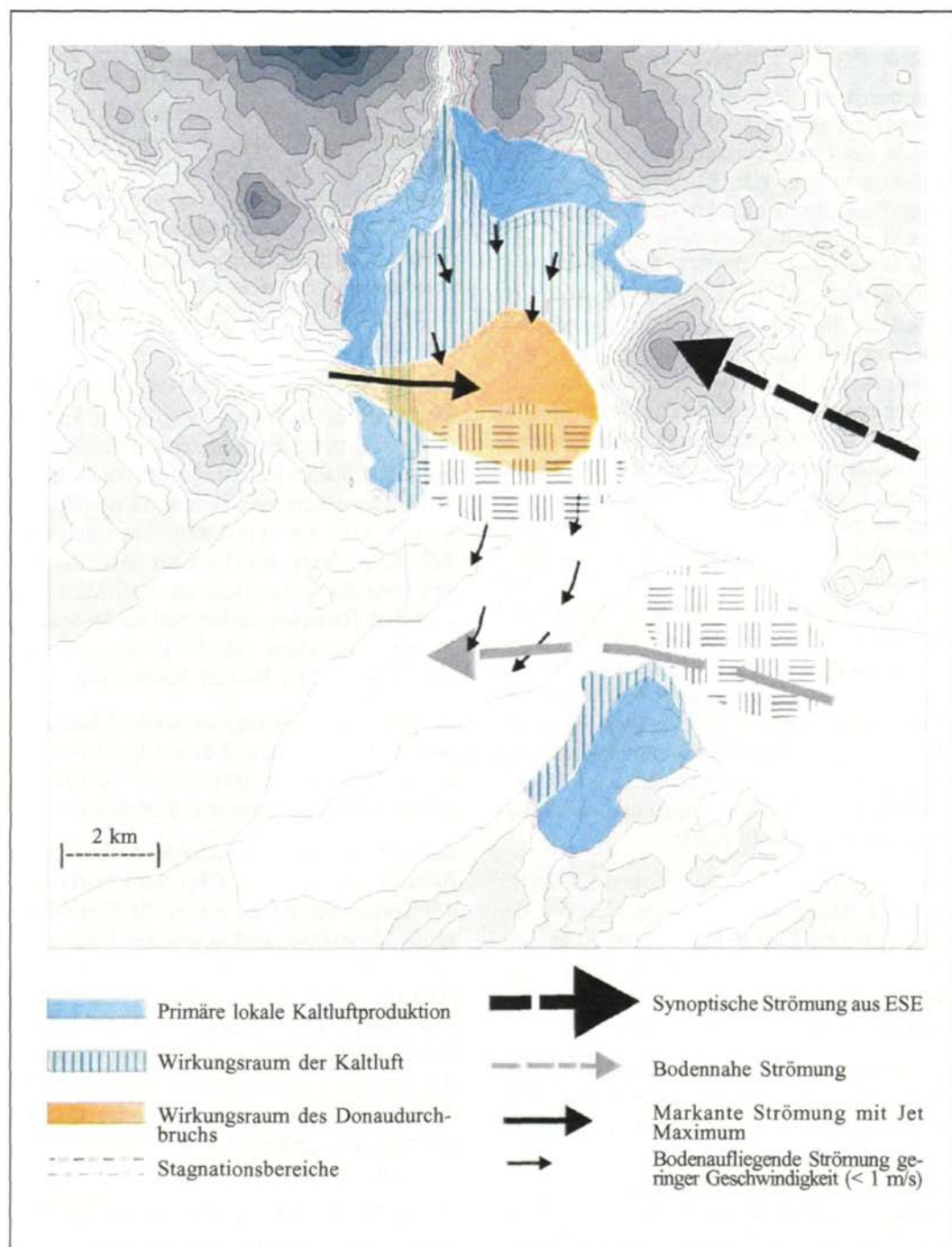


Abb. 88: Strömungsmuster Phase 3, 2. Nachthälfte

schwach entwickelnden Hangaufwinden entgegen und können so die Stagnationsphase in

den umgrenzten Stadtgebieten noch zusätzlich verlängern. Die Änderung der Stabilität ermög-

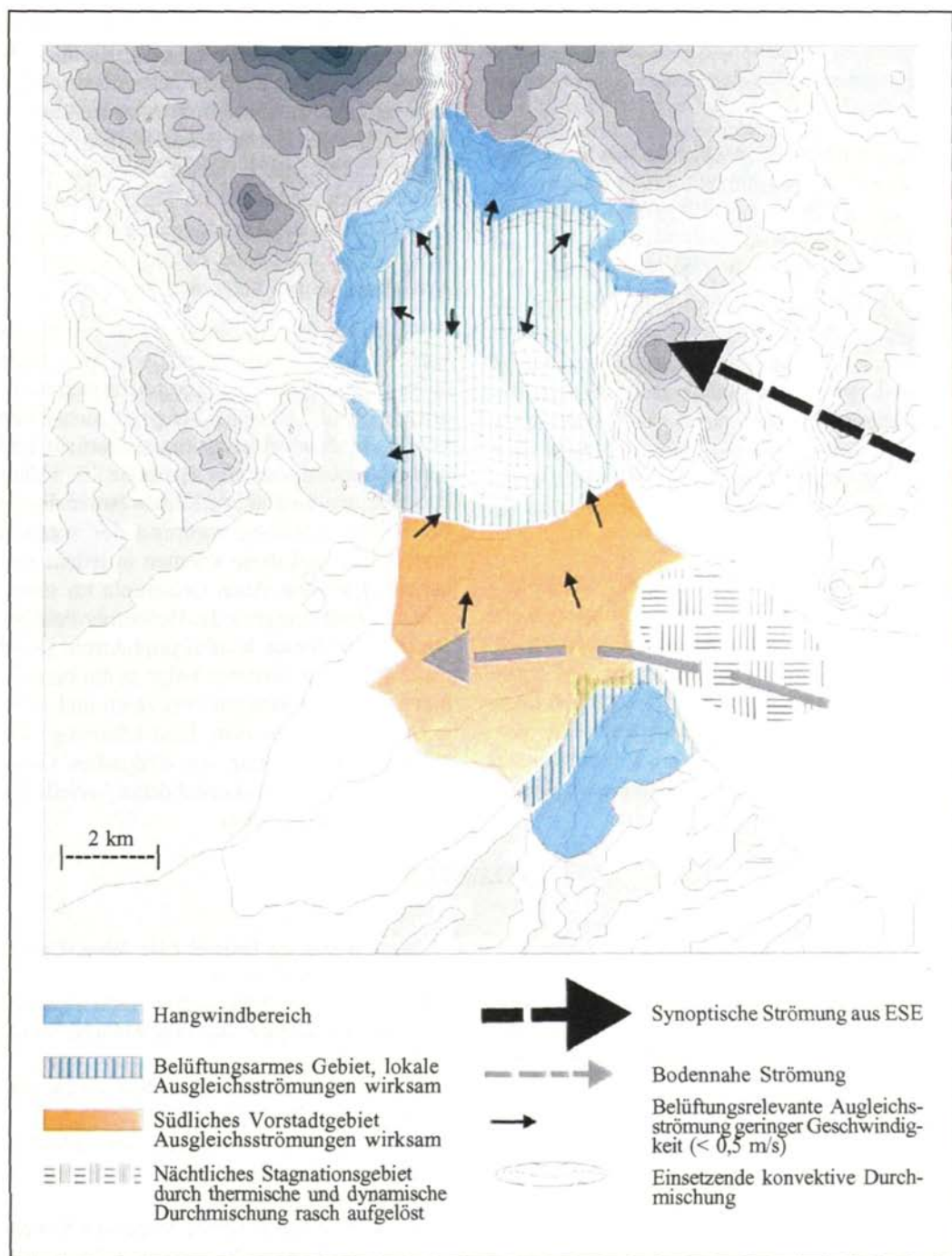


Abb. 89: Strömungsmuster Phase 4, Vormittag

licht auch ein Heruntermischen von Schadstoffen, die von der überlagerten Ostströmung im

Laufe der Nacht gegen die Hänge transportiert wurden und sich dort über der Inversion ange-

reichert haben. Diese werden nun in die belüftungsarmen Bereiche von oben her eingebracht und verursachen so die Belastungsspitzen am Vormittag.

In den südlichen Stadtteilen werden diese Flurwinde jedoch wirksam und führen zu einer Änderung der Strömung in Richtung des Stadtzentrums. Dieses Verhalten lässt sich sehr gut anhand von bodennahen Nebelschwaden beobachten, die entgegen der in höheren Schichten vorhandenen Strömung aus E nach Norden ziehen. Diese Beobachtungen wurden mit Time-Lapse-Videoaufnahmen möglich, die ebenfalls im Rahmen dieser Studie angefertigt wurden. Der mesoskalige Ostwind bleibt auch während dieser Periode weiterhin aufrecht, auch das Stagnationsgebiet im Südosten ist nach wie vor vorhanden.

Für die Planung wesentlich ist, dass die Belüftung des Stadtgebietes in diesen Situationen ein sehr komplexes Wechselspiel zwischen vielen unterschiedlichen Komponenten ist. Die wirklichen Strömungen sind im Wesentlichen lokal bewirkt und daher auch sensibel auf lokale Veränderungen. Zunächst sind zusätzliche Schadstoffeinträge in die Atmosphäre in den von

Stagnationen betroffenen Bereichen möglichst zu vermeiden, da diese Schadstoffe nur sehr langsam verdünnt und abtransportiert werden können und so zu hohen Immissionsbelastungen im Umfeld der Quelle führen können. Weiters ist jede Querbebauung in Hangbereichen zu vermeiden oder zumindest im Detail zu untersuchen, da diese das Eindringen der vor allem in der zweiten Nachthälfte für die Belüftung wesentlichen Kaltluft behindern kann.

Der Bereich des Haselgrabens ist prinzipiell von Bebauung freizuhalten. Es ist zwar nicht davon auszugehen, dass eine solche sich nachteilig auf den Haselgrabenwind auswirken würde, da dieser viel zu massiv auftritt und seine Jetachse über der Bauhöhe liegt. Der Haselgraben dient aber auch als Sammelrinne für Kaltluftabflüsse während der zweiten Nachthälfte und diese könnten in jedem Fall behindert werden. Auch Grüninseln im städtischen Bereich wie etwa das Heilhamer-Feld bewirken eine lokale Kaltluftproduktion. Diese Kaltluft kann in weiterer Folge in die benachbarte Bebauungsstruktur einsickern und lokale Luftwechsel bewirken. Eine Erhaltung oder auch eine Erweiterung von städtischen Grünbereichen oder Parks besitzt daher Vorteile für die Belüftungssituation.

LITERATUR

- BAUMGARINER A. (1956): Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 28, 1956.
- BRESI C. L. (1987): Seasonal albedo of an urban/rural landscape from satellite observations. *J. of Climate Appl. Meteorol.*, Bd.26, S. 1169-1187.
- BRUCK M., HAMMER N., NEUWIRTH F., SCHAFFAR G. (1985): Meteorologische Daten und Berechnungsverfahren. Hrsg. von Österr. Ges. f. Sonnenenergie und Weltraumfragen Wien, dbv-Verlag für die TU Graz.
- FEZER F. (1995): Das Klima der Städte. 1. Aufl., Perthes.
- FUKUOKA Y., KOBAYASHI M., INOUE T. (1989): Effects of river water and fog on urban temperature. *Int. Conf. Urban Climate, Kyoto, Abstract C 22.*
- GEPP W. (1999): Kaltluftfluß in komplexem Gelände und dessen Wechselwirkung mit Stadtgebieten am Beispiel Linz. Wien, Universität Wien, Diplomarbeit.
- KESSLER A. (1985): Anthropogene Änderungen des Strahlungshaushalts der Erdoberfläche. Bonn, Erdkunde.
- LANDSBERG H. E. (1981): The urban climate. *Int. Geophysical Series*, Bd. 28.
- LANGER B. (1999): Untersuchung der städtischen Wärmeinsel in Linz. Wien, Universität für Bodenkultur, Diplomarbeit.
- MURSCH-RADLGRUBER E. (1984): Modell der Ausbreitung von Luftschadstoffen unter komplexen meteorologischen und topographischen Bedingungen. Wien, Universität Wien, Dissertation.
- MURSCH-RADLGRUBER E. (1989): Modell zur Berechnung der Schadstoffausbreitung in strukturiertem

- Gelände. Österreichische Zeitschrift für Statistik und Informatik (ZSI) 19(1): 82-97.
- PECHINGER U., SEIBERT P. (1990): Observations and simulations with linked numerical PBL and air pollution models and a Gaussian model under low wind speed conditions: a case study of the urban-industrial Linz area. IL NUOVO CIMENTO 13(6): 903-915.
- PRABHA T.V. (1996): Modeling of flow and dispersion over an urban pre-alpine complex terrain - Linz. Wien, Universität für Bodenkultur, Dissertation.
- MURSCH-RADLGRUBER E., PRABHA T.V. (1996): Investigation of air pollution distribution in Linz: case studies to evaluate a K-type diffusion model coupled with a mass-consistent wind model. Atmosph. Env. 33(24-25): 4067-4080.
- QUTT E. (1992): Atlas Ost- und Südosteuropa. Topoklimatische Typen in Mitteleuropa Nr. 1.3. Hrsg. von Österr. Ost- und Südosteuropainstitut. Stuttgart, Bornträger.
- RASCHKE E. (1979): Der Strahlungshaushalt über Stadtgebieten. *promet* 9(4): 17-20.
- RATZ J. (1988): Strahlungshaushalt. Berlin. In „Stadtklima und Luftreinhaltung“, VDI (Hrsg.). S. 13-26.
- STANZER G. (1999): GIS in der Stadtklimaforschung. Eine Modellierung des solaren Strahlungsempfanges in Linz-Urfahr. Wien, Universität Wien, Diplomarbeit.
- WEBER R. O., KAUFMANN P. (1998): Relationship of Synoptic Winds and Complex Terrain Flows during the MISTRAL Field Experiment. *J. Appl. Meteor.* 37: 1486-1496.
- WEISS V. E., FRENZEL J. W. (1961): Windströmungen im Linzer Becken und ihre Bedeutung für luftchemische Probleme des Stadtklimas. *Wetter und Leben.* 13: 215-220.