

BODENNAHEFELD DER LUFTSTRÖMUNG AUF DEM GEBIET DER STADT BRNO

M. Kolář

Lehrstuhl für Geographie an der naturwissenschaftlichen Fakultät
der J. E. Purkyně-Universität, Brno, Kotlářská 2, Tschechoslowakei

Eingegangen: Juni 1985

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Studium der Windverhältnisse von Brno wurde bewiesen, daß die Luftströmung im barischen Niveau 850 hPa einen signifikanten Einfluß auf die Luftbodennaheströmung hat (mit Ausnahme der Station im Stadtzentrum im Nachttermin). Aus der durchgeführten Analyse ergibt sich auch eine gewisse Modifikation der Strömung unmittelbar über der Stadt im Vergleich zum Niveau 850 hPa. Die angeführten Veränderungen der Richtung und Geschwindigkeit des Windes werden vor allem durch die Verbauung verursacht. Es kommen auch die orographischen Besonderheiten des bestimmten Ortes zur Geltung, die u. a. die Veränderungen der Luftströmung im mikro- und mesoklimatischen Maßstab zur Folge haben.

1. EINFÜHRUNG

In der Luftbodennaheschicht wird die Strömung von verschiedenen Geländeformen, Waldbeständen und Verbauung beeinflußt. Die Luftströme umströmen die Hindernisse, wodurch die Richtung, Geschwindigkeit und Struktur der Luftströmung in der Bodennaheschicht (Entstehung der Luftwirbel und die Verstärkung der Turbulenz) verändert werden.

Manche Autoren, wie z. B. Berljand (1970, 1975), Probald (1979), Soňkin (1968) erwähnen die Bildung der spezifischen Zirkulation über der Stadt, die eins der Hauptkennzeichen der Existenz der Wärmeinsel der Stadt ist. Diese Zirkulation hat konvektiven Charakter. In der Luftbodennaheschicht bewegt sich die Luft zum Stadtzentrum und in größeren Höhen wird sie durch eine Gegenströmung kompensiert, die zum Stadtrand orientiert ist.

In der Verbauung der Stadt kommt es zur Veränderung der Geschwindigkeit und Richtung der Luftströmung. Man sieht, daß sich die Verbauung der Stadt als Oberfläche mit hemmenden Wirkungen erweist. Die Geschwindigkeit der Strömung über der Stadt wird oft bis zur Windstille geschwächt. Nur ausnahmsweise kann es zur Stärkung der Windgeschwindigkeit kommen, und zwar als Folge des Düseneffektes in den Straßen der Stadt.

Berljand (1975) führt an, daß das vertikale Profil der Windgeschwindigkeit vom Verbauungstyp abhängig ist. Im Falle der ungleichen Höhe ändert sich die Windgeschwindigkeit mehr als bei der Verbauung mit gleicher Höhe der Gebäude. In der Arbeit aus dem Jahre 1970 führt derselbe Autor an, daß sich die mittlere Geschwindigkeit bis in die Höhe der Gebäude der Null annähern kann und über den Gebäuden nach dem logarithmischen Modell steigt.

2. AUSGANGSMATERIAL

Bei der Analyse der Feldströmung wurde die Richtung der Strömung im bari-
schen Niveau 850 hPa, das sich durchschnittlich in einer Höhe von 1500 m ü. M.
befindet, mit der in den Bodenstationen Tuřany, Vysoká škola zemědělská (Land-
wirtschaftliche Hochschule) — VŠZ, lékařská fakulta UJEP (medizinische Fakul-
tät der J. E. Purkyně-Universität) — LF UJEP gemessenen Strömung verglichen
(immer im Termin 00⁰⁰ GMT und 12⁰⁰ GMT — Standardauswertung der Anemo-
gramme) für den Zeitraum XII. 1979—IX. 1980 (Abb. 1).

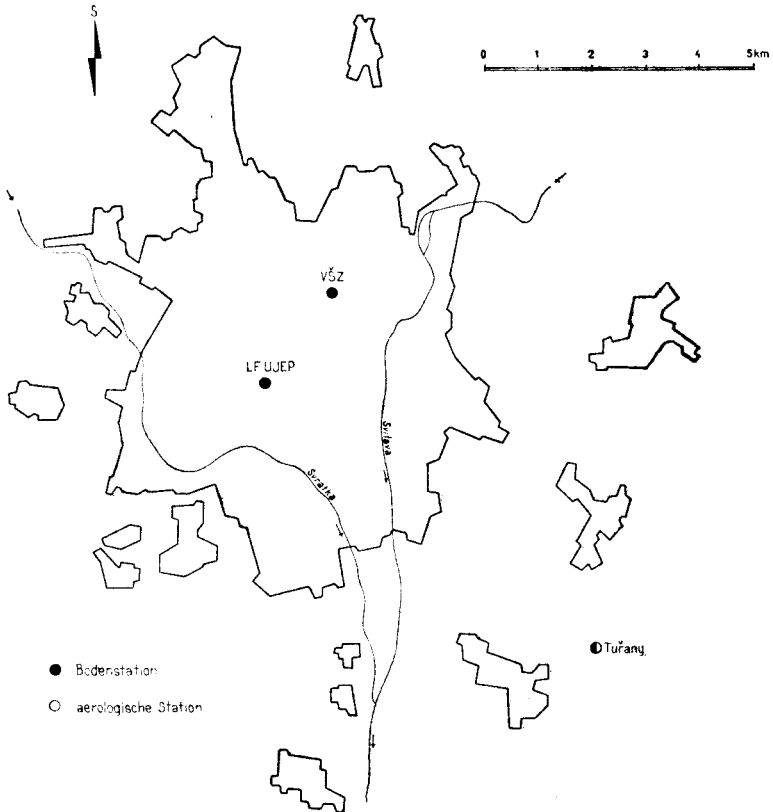


Abb. 1. Lokalisierung der die Richtung und Geschwindigkeit des Windes messenden Stationen in Brno

Die Angaben für das Niveau 850 hPa wurden aus der Tages- und Nachtmessung der Radiosonde in Brno-Tuřany ausgewertet. Aus der Nachricht TEMP wurden die Werte der Windrichtung in Zehnergraden gewonnen und in die achteilige Skala übertragen. Diese angeführte Transformation wurde deshalb durchgeführt, weil die Windrichtung in den Bodenstationen durch die Auswertung der Register der Universalanemographie in der achteiligen Skala gewonnen wurde.

Tab. 1. Die kontingenten Tabellen 9×9 für die Windrichtungen
im barischen Niveau 850 hPa und in den Bodenstationen im Termin 00⁰⁰ GMT

Tuřany		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
850 hPa											
N		4	4	—	—	—	—	—	9	12	29
NE		3	7	—	—	—	—	—	—	6	16
E		—	3	—	—	—	—	—	1	2	6
SE		—	3	—	2	1	—	—	—	15	21
S		—	1	7	8	4	—	—	—	19	39
SW		—	—	—	1	4	1	—	—	9	15
W		—	—	—	1	2	3	10	1	29	46
NW		2	—	—	—	—	1	5	3	17	28
Calm		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe		9	18	7	12	11	5	15	14	109	200

VSZ		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
850 hPa											
N		2	—	—	2	2	—	9	3	4	22
NE		4	—	1	—	—	—	5	1	—	11
E		2	1	—	—	—	—	1	—	—	4
SE		2	—	—	—	6	—	1	—	1	10
S		1	—	1	2	4	—	6	5	5	24
SW		—	2	—	—	4	—	5	—	2	13
W		2	4	1	1	8	—	12	2	8	38
NW		1	—	1	—	1	—	17	5	2	27
Calm		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe		14	7	4	5	25	—	56	16	22	149

LF UJEP		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
850 hPa											
N		—	1	—	3	—	—	1	5	18	28
NE		—	2	—	—	1	—	—	7	7	17
E		—	1	1	—	1	—	1	—	2	6
SE		—	—	—	1	2	—	—	—	13	16
S		1	2	—	7	1	—	3	2	19	35
SW		—	—	—	—	1	—	—	3	10	14
W		—	—	—	3	1	1	2	4	33	44
NW		2	—	—	—	—	—	3	6	18	29
Calm		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe		3	6	1	14	7	1	10	27	120	189

Tab. 2. Die kontingenten Tabellen 9×9 für die Windrichtungen im barischen Niveau 850 hPa und in den Bodenstationen im Termin 12⁰⁰ GMT

Tuřany 850 hPa	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
	N	10	5	4	—	—	—	—	4	4
NE	4	5	—	—	—	—	—	—	2	11
E	—	1	4	1	—	—	—	—	1	7
SE	—	1	1	11	—	—	—	—	4	17
S	—	—	3	9	9	1	1	—	4	27
SW	—	—	—	1	8	2	—	—	3	14
W	—	—	1	1	6	5	18	1	8	40
NW	1	—	1	—	—	1	6	8	8	25
Calm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	15	12	14	23	23	9	25	13	34	168

VSZ 850 hPa	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
	N	14	—	—	1	1	—	—	5	1
NE	2	2	—	—	—	—	—	3	—	7
E	—	2	—	—	2	—	—	—	—	4
SE	1	1	—	—	5	—	1	—	—	8
S	—	—	—	2	16	2	—	—	—	20
SW	1	—	—	—	4	1	8	6	2	22
W	3	—	—	—	4	1	8	6	2	24
NW	4	—	—	—	2	—	4	3	3	16
Calm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	25	5	—	3	34	4	21	23	8	123

LF UJEP 850 hPa	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calm	Summe
	N	1	1	—	1	—	—	2	10	7
NE	—	2	—	—	1	—	—	1	5	9
E	—	2	—	1	—	—	—	—	2	5
SE	—	1	—	9	3	—	—	—	1	14
S	—	—	—	4	11	—	—	—	7	22
SW	—	—	—	—	5	1	—	—	3	9
W	—	1	1	—	5	1	12	6	10	36
NW	—	—	—	—	—	—	2	7	15	24
Calm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	1	7	1	15	25	2	16	24	50	141

Aus der gleichen Station, die sich im offenen Flachrelief (Tuřany-Terrasse) außerhalb der Verbauung der Stadt befindet, wurden auch die Angaben für die Bodennahewindrichtung gewonnen.

Die Messungen der Windcharakteristiken in der Station VŠZ werden für den Bedarf der Landwirtschaftlichen Hochschule durchgeführt. Das Anemograph ist am Schulgebäude in einer Höhe von etwa 20 m über dem Terrain am Rande des Plateaus Černá Pole, das in den Durchbruch Řečkovice—Kuřim fällt, lokalisiert. Der anliegende Abhang liegt in südwestlicher Richtung.

Die Station LF UJEP befindet sich im Stadtzentrum auf dem Dach des dreistöckigen Gebäudes. In der Umgebung der Station gibt es mehrstöckige Verbauung. In westlicher Richtung befindet sich der Hügel Špilberk.

Im Hinblick auf die unregelmäßigen Messungen, technischen Störungen, manchmal auch auf die Unzugänglichkeit des Archivmaterials wurde die Anzahl der Eintrittsangaben für die eigene Erarbeitung ziemlich reduziert. Die Anzahl der ausgewerteten Messungen wird in den Tab. 1 und 2 angeführt.

3. WINDVERHÄLTNISSE VON BRNO

Nach der Publikation Podnebí Československé socialistické republiky — Tabulky (1961) überwiegt auf dem Gebiet von Brno die nordwestliche Strömung. Die durchschnittliche Häufigkeit dieser Richtung ist im Laufe des Jahres 14,5 %. Im Jahresablauf überwiegt in der Frühlings- und Sommerperiode die Strömung nordwestlicher und westlicher Richtung. Im Herbst und im Winter steigen die Häufigkeiten des Auftretens südöstlicher Richtung. Dies wird von der Wirkung des überwiegenden Luftdruckfeldes auf unserem Gebiet im Laufe des Jahres beeinflusst. Auf dem Gebiet von Brno treten oft Situationen mit Windstille (die durchschnittliche Häufigkeit während des Jahres 24,5 %) auf. Auf das Auftreten der Windstille hat in beträchtlichem Maße auch die Verbauung der Stadt einen Einfluß, die auf die Luftströmung eine hemmende Wirkung hat.

3.1 Einfluß der Luftströmung im Niveau 850 hPa auf die Bodenströmung auf dem Gebiet von Brno

Die Richtung der Strömung im Niveau 850 hPa und die der Strömung in den Bodenstationen, deren Abhängigkeit untersucht wird, stellen zwei qualitative Kennzeichen dar. Die Abhängigkeit der qualitativen Kennzeichen kann man mit Hilfe von kontingenten (polychorischen) Tabellen studieren (Tab. 1 und 2). Die enge Beziehung analysieren wir auf Grundlage des Testes χ^2 für die kontingente Tabelle $k \times m$. Nach Reisenauer (1965) hat das Testkriterium folgende Form:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \frac{(n_{ij} - o_{ij})^2}{o_{ij}},$$

wo n_{ij} Experimentalhäufigkeiten und o_{ij} erwartete Häufigkeiten sind, die man nach der Formel: $o_{ij} = \frac{n_{i.} \cdot n_{.j}}{n}$ aufstellt. Das angeführte Testkriterium hat χ^2 Verteilung mit $\nu = (k - 1)(m - 1)$ Freiheitsgrad. In diesem Fall handelte es sich um die kontingenten Tabellen 9×9 mit der Anzahl der Freiheitsgrade $\nu = 64$.

Bei der Testung sind wir auf folgende Weise vorgegangen. Zuerst haben wir die Nullhypothese H_0 aufgestellt, die lautet: die Richtung der Strömung im Niveau

850 hPa hat keinen signifikanten Einfluß auf die Richtung der Strömung in den Bodenstationen im Termin 00⁰⁰ und 12⁰⁰ GMT. Bei der Testung wurde das Signifikanzniveau $p = 0,05$ gewählt. Dann wurden kontingente Tabellen 9×9 aufgestellt und für jedes Feld der Tabelle wurde der Wert $\frac{(n_{ij} - o_{ij})^2}{o_{ij}}$ ausgerechnet.

Für das gewählte Signifikanzniveau $p = 0,05$ und für $\nu = 64$ wurde in den Tabellen (Reisenauer, 1965) der betreffende kritische Wert χ_p^2 ausgesucht. Wenn die Voraussetzung $\chi^2 > \chi_p^2$ erfüllt wurde, dann wurde die Nullhypothese verneint. Im Gegenfall wurde die Nullhypothese angenommen.

Die Testergebnisse werden in den Tabellen 3 und 4 zusammengefaßt. Aus den Tabellen ergibt sich, daß der Einfluß der Richtung der Strömung im Niveau 850 hPa auf die Richtung der Strömung in den verfolgten Bodenstationen auf dem Gebiet von Brno, und zwar im Termin 00⁰⁰ und 12⁰⁰ GMT bewiesen wurde. Eine Ausnahme bildet die Station LF UJEP, wo im Nachttermin diese Beziehung nicht signifikant ist.

Tab. 3. Der Einfluß der Strömung im Niveau 850 hPa auf die Luftbodennaheströmung im Termin 00⁰⁰ GMT

Station	850 hPa — Tuřany	850 hPa — VřZ	850 hPa — LF UJEP
χ^2 χ_p^2	196,6 83,7	86,6 83,7	65,0 83,7
Es gilt, daÙ	$\chi^2 > \chi_p^2$	$\chi^2 > \chi_p^2$	$\chi^2 < \chi_p^2$

Tab. 4. Der Einfluß der Strömung im Niveau 850 hPa auf die Luftbodennaheströmung im Termin 12⁰⁰ GMT

Station	850 hPa — Tuřany	850 hPa — VřZ	850 hPa — LF UJEP
χ^2 χ_p^2	274,5 83,7	140,4 83,7	204,2 83,7
Es gilt, daÙ	$\chi^2 > \chi_p^2$	$\chi^2 > \chi_p^2$	$\chi^2 > \chi_p^2$

3.2 Analyse des Feldes der Luftströmung in Brno

im Zeitraum vom Dezember 1979 bis September 1980 im Termin 00⁰⁰ GMT

Das Feld der Luftströmung auf dem Gebiet von Brno wurde auf Grund der Windmessung im barischen Niveau 850 hPa und aus den Messungen in den Bodenstationen Tuřany, VřZ und LF UJEP analysiert. Für beide behandelten Termine wurden absolute und relative Häufigkeiten der Windrichtung für den ganzen Untersuchungszeitraum und auch für die einzelnen Monate berechnet. Die relativen Häufigkeiten für den ganzen Zeitraum werden graphisch in der Abb. 2 dargestellt.

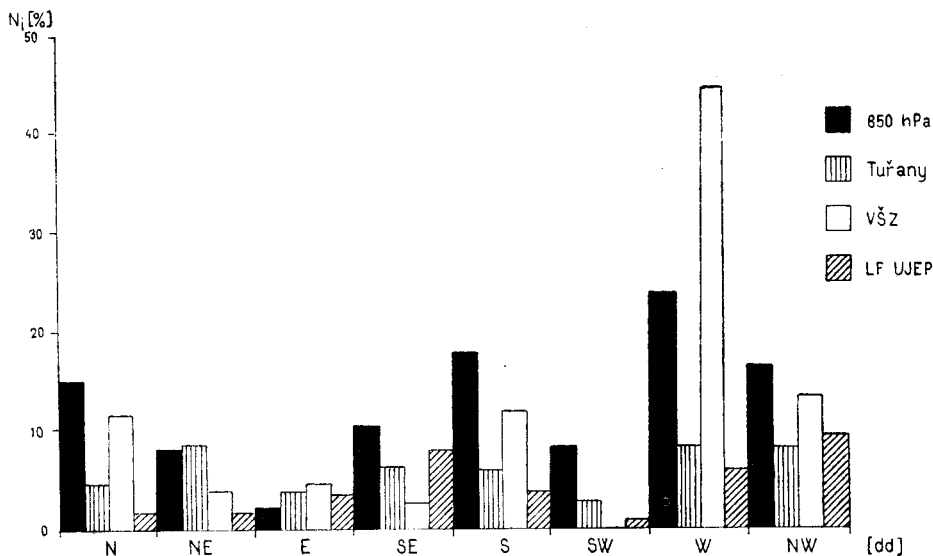


Abb. 2. Die Relativhufigkeiten der Windrichtung in Brno im Zeitraum Dezember 1979—September 1980 im Termin 00⁰⁰ GMT

Die Windrichtung im Niveau 850 hPa hat im Termin 00⁰⁰ GMT statistisch einen bedeutenden Einfluß auf die Windrichtung in der Station Tuřany und VřZ. Für die Station LF UJEP wurde dieser Einfluß nicht bewiesen.

In den Untersuchungsperioden im barischen Niveau 850 hPa überwiegt die westliche Strömung (23,4 %). Die weitere häufigste Richtung ist die südliche (17,4 %) und nordwestliche (15,9 %). Calm tritt hier nicht auf.

In Tuřany wird die Windrichtung von der Strömung im Niveau 850 hPa beeinflusst, aber es ist hier auch der Einfluß der Stadt zu sehen. Calm ist mit 52,9 % vertreten. In dieser Station überwiegt die nordöstliche Strömung (8,4 %), weiter folgen die westliche (7,9 %) und nordwestliche (7,9 %).

Die westliche Richtung überwiegt beträchtlich in der Station VřZ, während die südwestliche Strömung hier überhaupt nicht auftritt. Auch hier besteht die statistisch bedeutende Beziehung zwischen der Richtung der Strömung im Niveau 850 hPa und der des Windes in dieser Station. Viel mehr als der Einfluß der Stadt zeigt sich hier die lokale Zirkulation, die durch beträchtliches Übergewicht der westlichen Windrichtung im erwähnten Termin zu begründen ist. Diese Zirkulation ist wahrscheinlich termisch bedingt. Die Station liegt nämlich im Gipfelteil des Abhanges, der nach Süden bis Südwesten orientiert ist. In den Nachtstunden kommt es infolge der Austrahlung der Erdoberfläche zur Abkühlung der dem Abhang anliegenden Luftschicht. Die kalte Luft sinkt den Abhang hinab. Es entsteht auf diese Weise eine katabatische Strömung, die in größerer Höhe durch die Strömung des Westwindes ausgeglichen wird. Mit der Entstehung dieser Zirkulation hängt auch das Fehlen der südwestlichen Richtung zusammen.

Wie schon angeführt wurde, hat die Strömung im Niveau 850 hPa keinen bedeutenden Einfluß auf die Strömung in der Station LF UJEP. Die Strömung wird

hier beträchtlich durch die Verbauung der Stadt modifiziert, weil diese Station direkt im Stadtzentrum lokalisiert ist. Er tritt hier offensichtlich die termisch bedingte Lokalzirkulation und das Umströmen des Hügels Špilberk auf, was das häufigste Auftreten des nordwestlichen Windes bestätigt.

3.3 Analyse des Feldes der Luftströmung in Brno im Zeitraum vom Dezember 1979 bis September 1980 im Termin 12⁰⁰ GMT

Im Termin 12⁰⁰ GMT wurden absolute und relative Häufigkeiten ausgerechnet, die graphisch in der Abb. 3 dargestellt werden. Für diesen Termin wurde festgestellt, daß die Windrichtung im Niveau 850 hPa einen bedeutenden statistischen Einfluß auf die Windrichtung in allen erwähnten Bodenstationen hat.

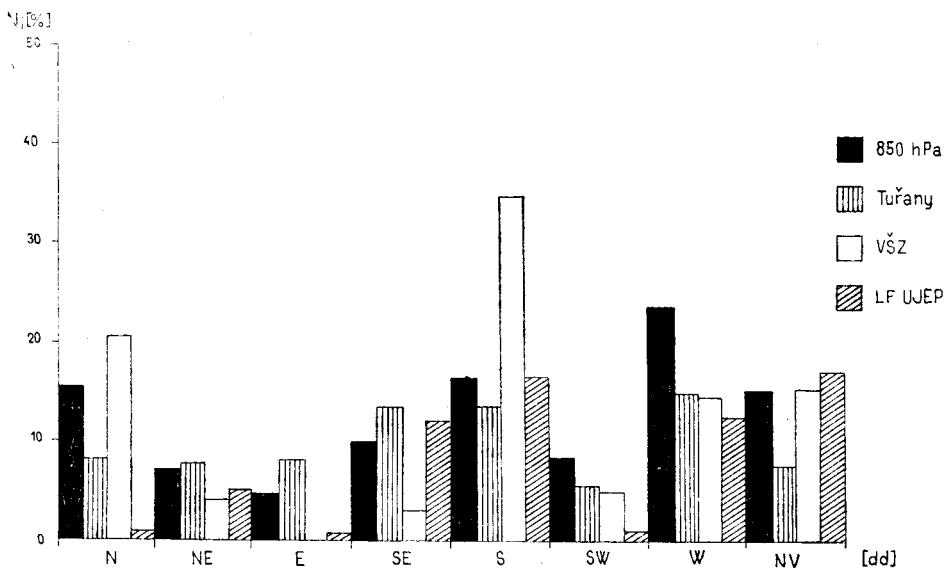


Abb. 3. Die Relativhäufigkeiten der Windrichtung in Brno im Zeitraum Dezember 1979—September 1980 im Termin 12⁰⁰ GMT

Im Niveau 850 hPa überwiegt die westliche Richtung (23,6 %). Auch in diesem Termin tritt calm nicht auf.

In Tuřany überwiegt im Einklang mit dem Niveau 850 hPa die westliche Strömung (14,6 %), es folgen südliche (13,4 %) und südöstliche Richtungen (13,4 %).

In der Station VřZ ist vor allem die südliche Richtung vertreten, worauf die Entstehung der termischen Zirkulation in der Umgebung der Station Einfluß hat. In den Tagesstunden wird sie durch größere Erwärmung des südlichen Abhanges hervorgerufen. Dadurch wird auch die dem Abhang anliegende Luftschicht erwärmt. Die wärmere Luft steigt den Anhang hinauf, kühlt sich ab und sinkt wieder. Es fehlt an Strömung der östlichen Richtung, was offensichtlich durch die hemmenden Wirkungen der Bauung in der nahen Umgebung der Station verursacht wird. Die Strömung in der Station LF UJEP wird überwiegend auf die

nordwestliche Richtung modifiziert. In allen Bodenstationen ist hier in diesem Termin am meisten calm (34,7 %) vertreten. Dies ist durch die Lage der Station im Stadtzentrum gegeben.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

In allen erwähnten Stationen, die in verschiedenen Stadtvierteln lokalisiert sind, kann man im Vergleich zum Niveau 850 hPa die Veränderungen der Windrichtung beobachten, obwohl außer der Station LF UJEP im Termin 00⁰⁰ GMT ein statistisch bedeutender Einfluß der Windrichtung im Niveau 850 hPa auf die Richtung der Luftströmung in den Bodenstationen bewiesen wurde. Die Veränderungen der Windrichtung über der Stadt werden von der Verbauung der Stadt beeinflusst, die als hemmender Faktor wirkt und sowohl auf die Veränderung der Windrichtung als auch auf die Struktur der Strömung Einfluß hat. Es zeigen sich auch orographische, mikro- und mesoklimatische Besonderheiten des bestimmten Ortes.

Im Nachttermin wurde ein häufigeres Auftreten von Windstille festgestellt als im Termin 12⁰⁰ GMT. Diese Schlußfolgerung hängt vom Tagesgang der Windgeschwindigkeit ab, der in der Bodenschicht das Minimum in den Nachtstunden aufweist.

In der Station VŠZ zeigt sich vor allem die lokale termische Zirkulation, die im Termin 00⁰⁰ GMT zur Stärkung der westlichen Strömung beiträgt. Im Termin 12⁰⁰ GMT zeigt sich auch termisch bedingte Zirkulation, die an der Erhöhung der Häufigkeit der südlichen Richtung teilnimmt.

Bei den beiden erwähnten Terminen überwiegt im Niveau 850 hPa die westliche Richtung. In der Station LF UJEP kommt es am häufigsten zur Veränderung der Richtung auf die nordwestliche. Es kommt hier wahrscheinlich zur termisch bedingten Zirkulation und es ist auch der Einfluß der Orographie zu sehen.

Im Hinblick auf die festgestellten und anderen Tatsachen ist auf die Tatsache hinzuweisen, daß die Geltung der Schlußfolgerungen, die für eine bestimmte Station für das umfangreiche, oft gegliederte Gebiet durchgeführt wurden, nicht zu verallgemeinern ist. Aus diesem Grunde ist es nötig, bei den Studien über die Streuung, die die Difusion der Verunreinigungen in der Atmosphäre analysieren, ausführliche topoklimatische Messungen durchzuführen.

LITERATUR

- Berljand, M. E. (1970): O rasprostraneni atmosferných priměsej v uslovijach goroda. Meteorologija i gidrologija, No. 3, S. 45—47.
- Berljand, M. E. (1975): Sovremennye problemy atmosfěroj diffuzii i zagřaznenija atmosfery. Gidrometeoizdat, Leningrad, 448 S.
- Probal, F. (1979): Typy prizemného polja tečeni v Budapeště. Práce a štúdie č. 23, HMU, Bratislava.
- Reisenauer, R. (1965): Metody matematické statistiky a jejich aplikace. SNTL, Praha, 210 S.
- Soňkin, L. P. (1968): Nekotoryje rezultaty synoptiko-meteorologičeskogo analiza zagřaznenija vozducha v gorodoch. Trudy GGO, vyp. 207.
- Podnebí Československé socialistické republiky. Tabulky. HMÚ Praha, 379 S.

