

RAZPRAVE  
PAPERS

Letnik 26  
1-2

Vsebina – Contents	Stran
M. Sijerkovič, V. Švast: Lokalna analiza prodora hladnog zraka 12.–13. 1. 1982. godine Local analysis of the air invasion on 12th – 13 th january 1982. . . . .	5
Z. Petkovšek: Veter v Sloveniji z vidika vpliva na zbiralnik sončne energije Wind in Slovenia regarding its influence on sun-energy-collector. . . . .	19
J. Pristov, B. Zupančič, F. Štucin: Najvišje dnevne padavine za porečje Save do Krškega Maximal daily precipitations in the basin of the Sava. . . . .	35
T. Vrhovec: Gravitacijski valovi v jezerih hladnega zraka Gravity waves in the cold air lakes . . . . .	49
T. Zupančič, B. Zupančič: Vpliv mesta Celje na prizemno cirkulacijo zraka v zimskih mesecih Influence of the city of Celje on ground level circulation in the winter months . . . . .	65
D. Hrček: Preprost model onesnaženosti zraka za Celje The simple urban air pollution model for Celje . . . . .	75
T. Planinšek: Transport onesnaženja zraka v okolico TE Trbovlje Transport of air pollution from the Trbovlje coal – fired power plant . . . . .	87

**LOKALNA ANALIZA PRODORA HLADNOG ZRAKA 12. – 13.1.1982.  
GODINE**

**LOCAL ANALYSIS OF THE COLD AIR INVASTON ON 12th – 13 th  
JANUARY 1982.**

**Milan SIJERKOVIĆ, Vlasta ŠVAST**  
Republički hidrometeorološki zavod SR Hrvatske, Zagreb

UDK 551.515.8

**SUMMARY**

The objective of this paper is to present research on the weather characteristics of the cold air invasion in Croatia on 12th – 13th January, 1982. The local analysis method used in this investigation included the station time–sections, the local changes of equivalent–potential temperature and the wind at short intervals.

It is shown that this invasion was from the North and very strong, representing cold air advection on the Eastern and South–eastern side of an anticyclone that was moving from Western Europe to the East. In conditions of stable stratification of the cold air mass, the front was accompanied by strong cloudiness. The precipitations were mostly postfrontal and only partly present. The impact of orography on their appearance, durability and quantity was significant.

The passing of the cold front caused a general decrease of temperature, especially in the mountainous regions, except in the Northern lowland areas, where the inversion caused by cooling in the lower layers was broken, so that the temperature was slightly increased at first. On the Adriatic sea-coast, the passing of the cold front was accompanied by wind direction changes to the local wind, the bora. The directional change was rapid and the velocity changes were considerable, especially in the coastal area. The invasion of cold air caused a rapid, large and general pressure increase that was the smallest in the Southern-most parts of Croatia, i.e. the Southern Adriatic and the outer Dalmatian islands.

**POVZETEK**

Naredili smo sinoptično in lokalno analizo prodora hladnega zraka na področju Hrvatske za 12. in 13.1.1982. Prodor je bil izrazit in glede na smer gibanja prek naše države severni. Značilnosti vremenskih razmer ob prehodu hladne fronte in v času prodora smo določili iz časovnih presekov na postajah in s potekom psevdopotencialne temperature. Pokazalo se je, da prodor niso spremljale povsod istosmerne spremembe meteoroloških elementov niti niso bile enako intenzivne, kar je posledica delno tudi lokalnih – topografskih in orografskih vplivov.

## UVOD

Dosadašnja istraživanja hladnih fronta i prodora hladnog zraka u nas provedena su, prije svega, sa sinoptičkog i aerološkog stanovišta i metodama sinoptičke klimatologije. U tom su smislu zanimljivi radovi Pristova (1957) i Petkovšeka (1962). U radu Čadeža (1964) provedena je tipizacija prodora hladnog zraka i dati su opisi i tumačenja pripadnih vremenskih prilika sa stanovišta dinamike i termodinamike.

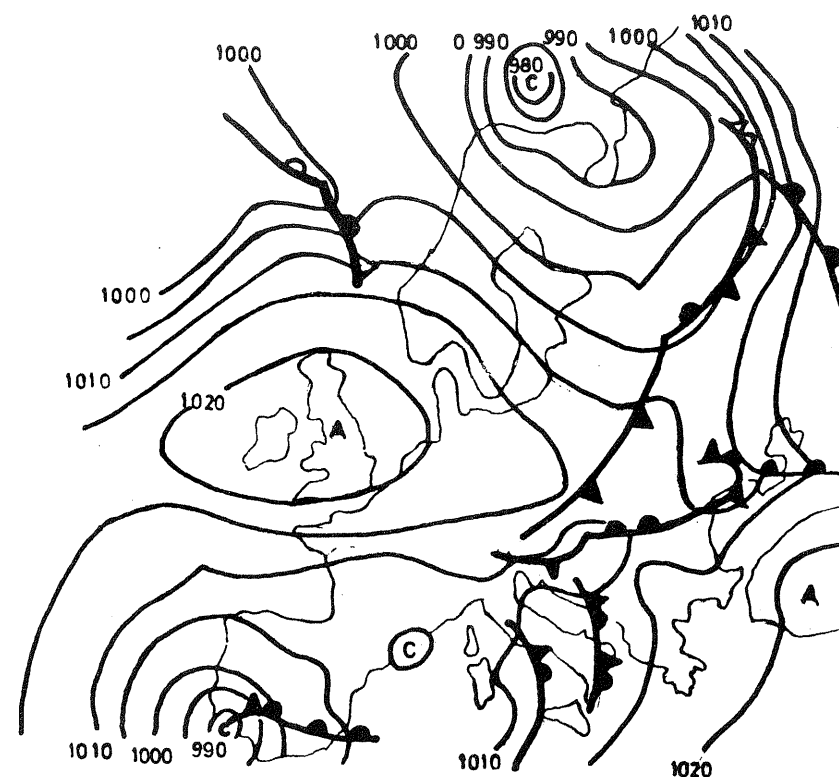
Više pojedinosti o karakteristikama vremenskih prilika u toku hladnih prodora moguće je dobiti pomoću metoda mezoanalize i lokalne analize. U tom smislu veliko značenje imaju mezokarte i kombinirani grafički prikazi toka meteoroloških elemenata i vremenskih pojava. Takve su elemente analize koristili Fujita, Newstein i Tepper (1956), a u nas Čadež (1954) i Sijerković (1976).

Osnovni je cilj ovog rada bio detaljna analiza vremenskih prilika prigodom sjevernog prodora hladnog zraka u naše krajeve 12 – 13.1.1982. godine. Taj je prodor u mnogome bio tipičan, a napose je bio karakterističan po naglom, velikom i općem porastu tlaka zraka, nakon čega je uspostavljena jaka anticiklona s izraženim temperaturnim inverzijama, što je bilo praćeno vrlo velikom zagađenošću zraka.

Istraživanje karakteristika vremenskih prilika u toku prodora provedeno je metodama mezoanalize i lokalne analize vremena.

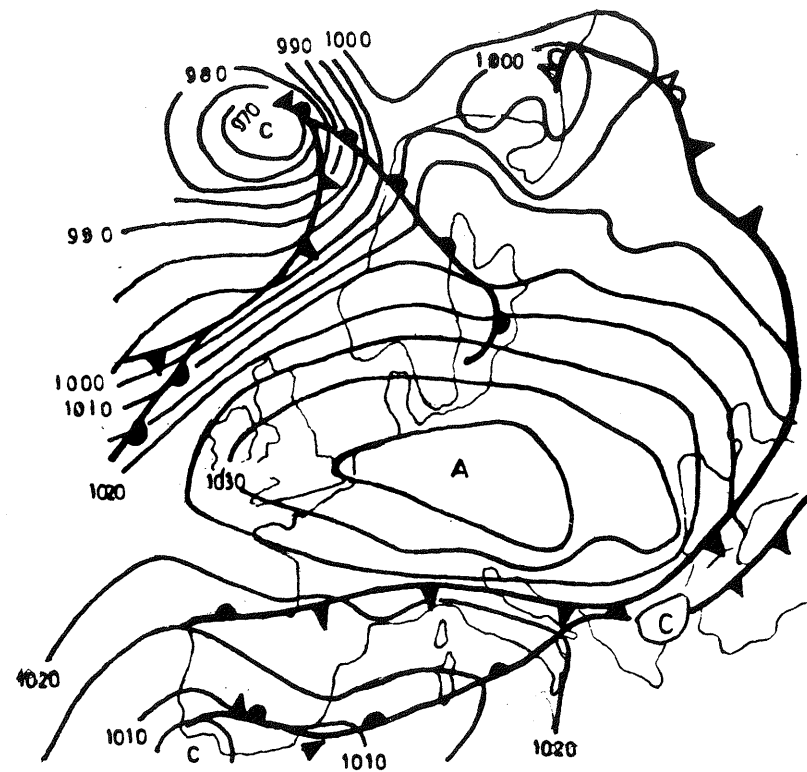
## MAKROVREMENSKA SITUACIJA

Osnovne karakteristike makrovremenske situacije prije prodora hladnog zraka mogu se uočiti na prizemnoj sinoptičkoj karti (sl. 1). Frontalna je zona sjevernije od naših krajeva, povezana s prodorom arktičke zračne mase, bila vrlo izražena u temperaturnom polju. Iznad južnog dijela Evrope postojala je općenita advekcija toplih zračnih masa, a frontalna je zona bila termički slabije izražena od arktičke.



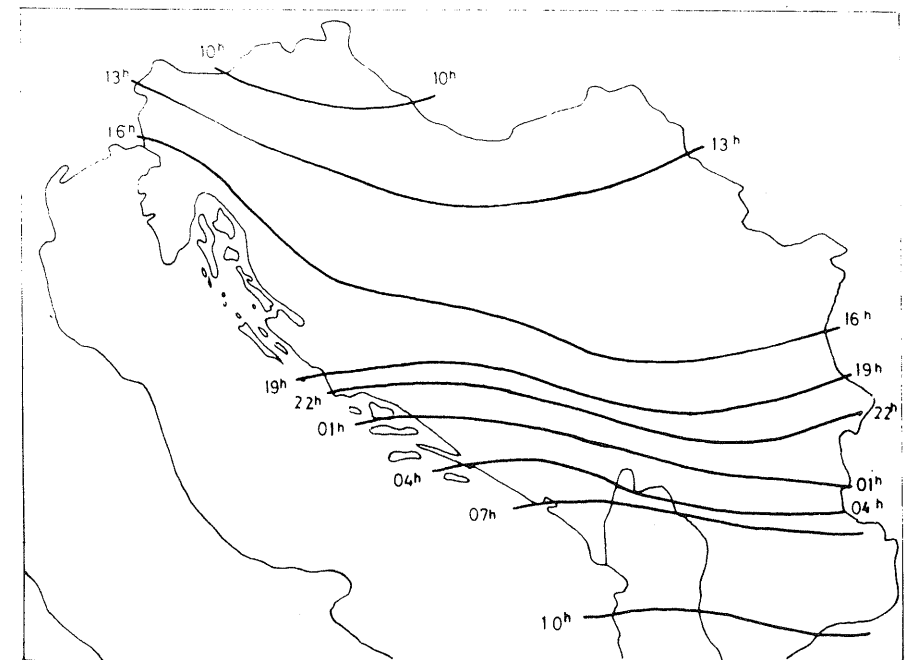
Slika 1 Prizemna sinoptička karta, 12.1.1982, 06<sup>h</sup> GMT  
Fig. 1 Surface synoptic map, 12.1.1982, 06<sup>h</sup> GMT

Nova advekcija hladnog zraka dovela je do spajanja frontalnih zona i intenzifikacije fronte, a zatim do njezinog brzog premještanja na jugoistok (sl. 2), uz istodobno kretanje zapadnoevropske anticiklone na istok.



Slika 2 Prizemna sinoptička karta, 13.1.1982, 06<sup>h</sup> GMT  
 Fig. 2 Surface synoptic map, 13.1.1982, 06<sup>h</sup> GMT

Na temelju sinoptičkih karata za područje naše zemlje određene su izohrone prodora hladnog zraka (sl. 3), koje pokazuju da je prodor u razdoblju od 06<sup>h</sup> GMT 12.1. do 06<sup>h</sup> GMT 13.1.1982. zahvatio sve krajeve naše zemlje, osim krajnjeg jugoistočnog dijela, i da je prema smjeru kretanja bio sjeverni.



Slika 3 Izohrone prodora hladnog zraka, 12. – 13. 1. 1982.  
 Fig. 3 The isochrones of the cold air invasion, 12. – 13. 1. 1982.

## LOKALNA ANALIZA POMOĆU STANIČNOG GRAFIKONA VREMENA

Za potrebe analize vremenskih prilika u toku prodora hladnog zraka 12 – 13. 1.1982. izrađeni su stanični grafikoni vremena za sve glavne meteorološke stanice u Hrvatskoj, od kojih su na sl. 4. prikazana četiri karakteristična za meteorološke stanice: Osijek, Ogulin, Senj i Lastovo.

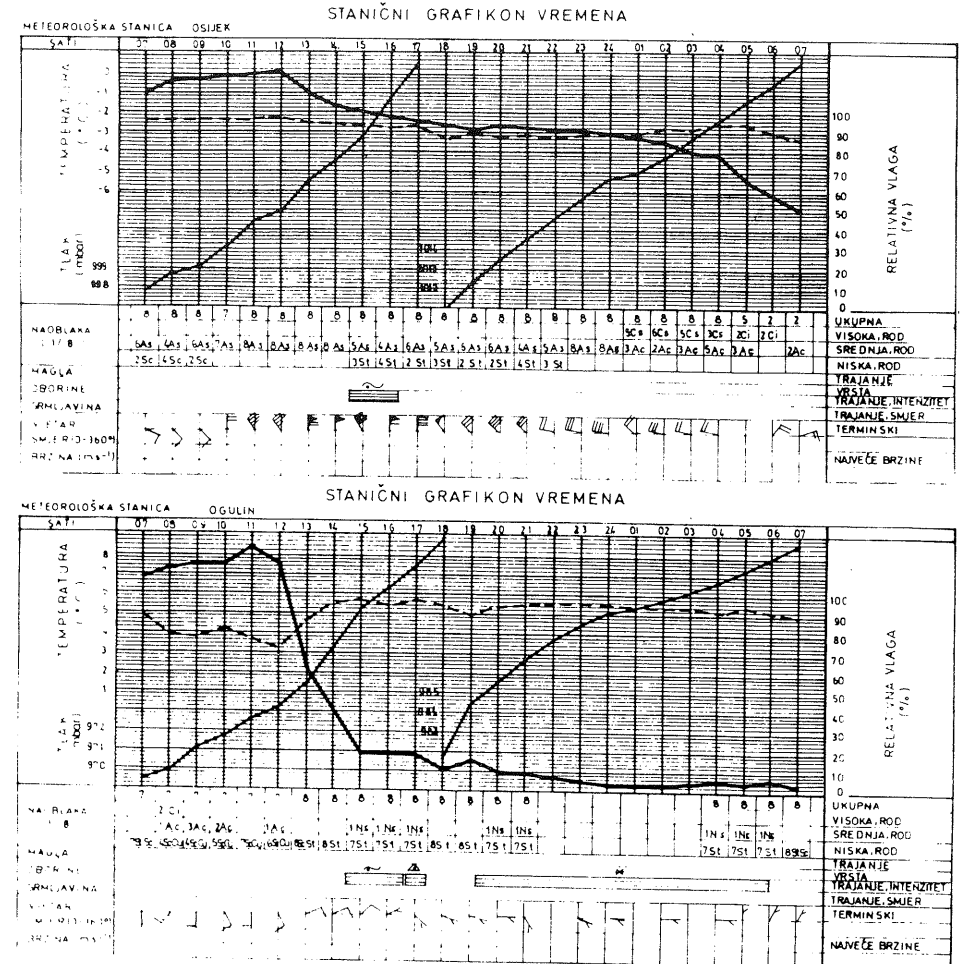
Stanični grafikon vremena predstavlja kombinirani grafički prikaz meteoroloških elemenata i vremenskih pojava na meteorološkoj stanici u toku razdoblja analize (Sijerković, 1976).

Na grafikonima je predočeno vremensko razdoblje od 07<sup>h</sup> SEV 12.1. do 07<sup>h</sup> 13.1.1982, u kojem je prodor hladnog zraka zahvatio sve krajeve Hrvatske. Tlak je označen tanjom crtom, temperatura debljom crtom, a relativna vlaga crtkanom linijom. Zbor velikih promjena tlaka u toku prodora na nekim je meteorološkim stanicama krivulja koja prikazuje njegov tok data u dva dijela. Za brzinu vjetera korištene su slijedeće oznake:  $\nabla$   $-0,5 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\nabla$   $-1 \text{ ms}^{-1}$ ,  $\nabla$   $-5 \text{ ms}^{-1}$ .

Identifikacija prolaza hladne fronte iznad nekog mjesta provođena je na temelju subjektivne procjene promjene vremenskih prilika – meteoroloških elemenata i vremenskih pojava sadržanih na staničnom grafikonu vremena.

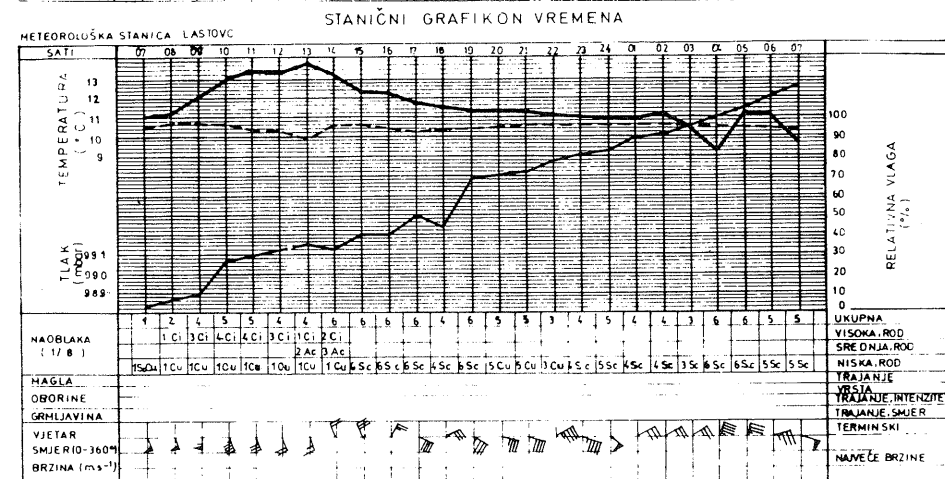
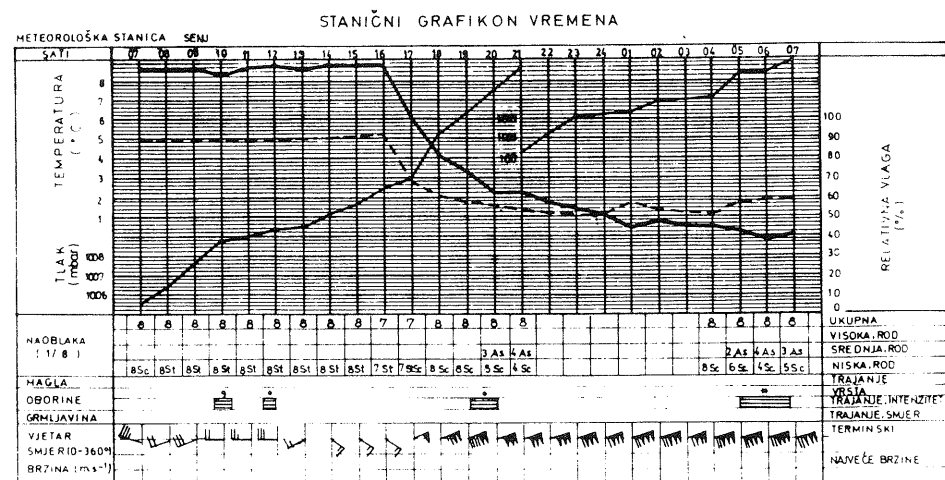
**T l a k z r a k a.** Tlak zraka bio je meteorološki element koji je najprilicnije pratio prolaz hladne fronte, pa je korišten kao temeljni indikator u te svrhe.

Prilikom prolaza fronte svagdje je uočen karakterističan porast tlaka (Zverev, 1977) premda nije bio ujednačen na cijelom području Hrvatske. Najveći je bio u unutrašnjosti, između 2 i 2,5 mbara u toku jednog sata, pri čemu se zamjećuje njegovo smanjivanje s porastom nadmorske visine. Promjene tlaka na Jadranu su bile manje, uz njihovo općenito smanjivanje prema južnom dijelu Jadrana i od obale prema otvorenom. Na obali je najveći porast tlaka bio ispod planinskih prijevoja, gdje je prodiranje hladnih zraka bilo najizraženije i praćeno jakim burom.



Slika 4 Stanični grafikon vremena, 12. – 13. 1.1982.

Fig. 4 The station time section, 12. – 13.1.1982



Slika 4 (nastavak) Stanični grafikon vremena, 12. – 13.1.1982.  
 Fig. 4 (continuation) The station time section, 12. – 13.1.1982.

Porast tlaka u toku cijelog prodora hladnog zraka bio je vrlo velik i u Zagrebu je, na primjer, iznosio 25,2 mbara u toku 24 sata.

Osim karakterističnog porasta tlaka prilikom prolaza hladne fronte, u sjevernim nizinskim krajevima unutrašnjosti uočava se i drugi maksimum porasta tlaka koji je nastupio kasnije u toku prodora i vremenski se podudara s najizraženijim padom temperature zraka. U mnogim se krajevima zamjećuje i povećani porast tlaka u razdobljima intenzivnijih oborina, što je vjerojatno posljedica dinamičkog učinka spuštanja zraka u oborinskom području (Čadež, 1964).

**Temperatura zraka.** Promjene temperature prilikom prolaza hladne fronte nisu na svim meteorološkim stanicama bile istog znaka, a i intenzitet promjene je bio prilično neujednačen. Međutim, ako se promatra prodor kao cjelina, on je svugdje prouzročio pad temperature.

U većini je krajeva i prolaz hladne fronte bio praćen padom temperature. Najveće je zahlađenje bilo u planinskim krajevima. Na Zavižanu, na sjevernom Velebitu, temperatura je u toku jednog sata pala 8°C. Zamjećuje se i razmjerno veliki pad temperature i u onim područjima Jadrana gdje je prodiranje hladnog zraka preko planinskih prijevoja bilo najizraženije i praćeno jakim burom, što je u suglasju s drugim analizama (Lukšić, 1969; Sijerković, 1976).

Najmanje je zahlađenje pri prolazu fronte bilo na južnom Jadranu i na dalmatinskim otocima, što je posljedica uobičajene transformacije hladne zračne mase na njezinu putu prema jugu i iznad toplog Jadranskog mora.

U sjevernim nizinskim krajevima unutrašnjosti prilikom prolaza hladne fronte je došlo do porasta temperature, kako se to često događa (Zverev, 1977) u situacijama kad prolaz fronte narušava prizemni inverzioni sloj, što je i ovaj put bio slučaj. Kasnije je i u tim krajevima došlo do pada temperature, ali manjeg nego drugdje u unutrašnjosti.

**Relativna vlaga.** Lokalne promjene relativne vlage prilikom prolaza hladne fronte, a i u toku cijelog prodora, nisu bile istoznačne, a znatno su se razlikovale i u intenzitetu.

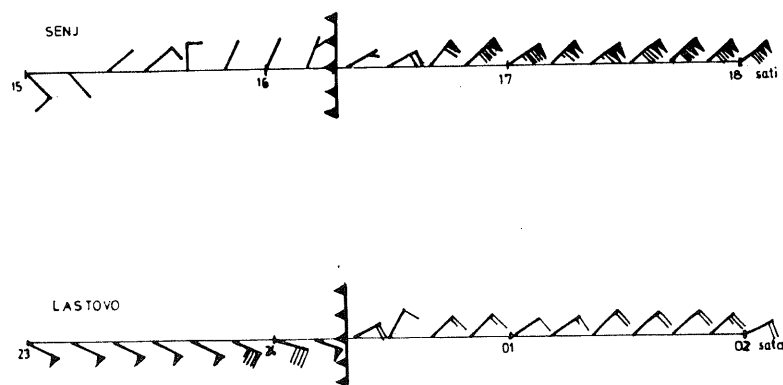
U onim krajevima unutrašnjosti gdje je fronta narušila prizemni sloj temperature inverzije, relativna vlaga je općenito malo pala. U drugim krajevima unutrašnjosti prolaz je fronte bio praćen porastom relativne vlage. Na Jadranu je posvuda nastupio pad relativne vlage, što je posebno bilo izraženo u onim krajevima na obali gdje je prolaz hladne fronte bio praćen odsustvom oborina i jačom burom.

Promjene relativne vlage u daljnjem toku hladnog prodora uvelike su ovisile o vremenskoj razdiobi oborinskih razdoblja, jer je pri njihovoj pojavi dolazilo do porasta relativne vlage.

V j e t a r. Analiza staničnih grafikona vremena, s terminskim satnim podacima o vjetru, pokazuje da je u toku prodora vjetar skrenuo na sjeverne smjerove, dok je na Jadranu zupuhala bura, što je uobičajeno za sjeverne prodore hladnog zraka (Čadež, 1964).

Međutim, neposredno pri prolazu hladne fronte uobičajeno skretanje vjetra u smjeru kretanja kazaljke na satu (Zverev, 1977) bilo je prisutno samo na planinskim stanicama. U nizinama unutrašnjosti uočava se protusatno skretanje vjetra. I promjene brzine pokazuju karakteristične razlike. U planinskim krajevima vjetar je neposredno pri prolazu fronte bio oslabljen, a kasnije je brzina porasla. U nizinskim krajevima unutrašnjosti vjetar je ojačao pri prolazu fronte, a postfrontalna je brzina bila veća od predfrontalne.

Na Jadranu se uočava protusatno skretanje smjera vjetra i osjetan porast brzine vjetra pri prolazu hladne fronte i nakon toga.



Slika 5 Desetminutne promjene vjetra na Jadranu, 12.–13. 1. 1982.  
Fig. 5 Wind changes at 10-minute intervals over the Adriatic

Na sl. 5 predočene su desetminutne promjene vjetra za Senj i Lastovo. Zamjećuje se nagli prijelaz vjetra na buru, uz protusatnu promjenu smjera, a posebno je uočljiv nagli i veliki porast brzine u obalnom području ispod planinskih prijevoja, kao što je to pokazano i u nekim drugim analizama (Sijerković, 1980).

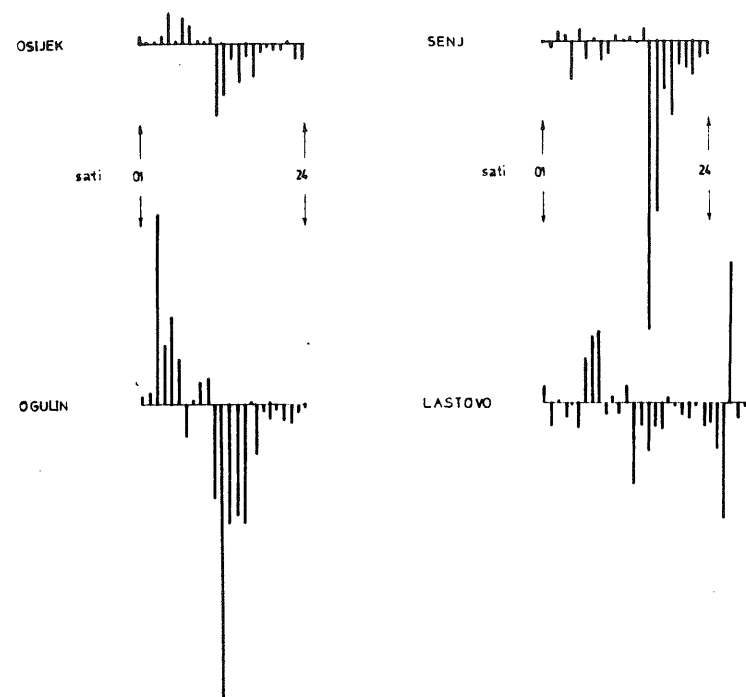
N a o b l a k a i o b o r i n e. Približavanje fronte bilo je praćeno naoblačenjem, a oblačno je vrijeme potrajalo i nekoliko sati poslije prolaza fronte. Skretanje vjetra na buru na Jadranu općenito nije bilo praćeno razbijanjem naoblake. Prolaz fronte bio je praćen kontinuiranim oblačnim sistemom As, Sc, St, a u oborinskim područjima i oblacima Ns, dok su na južnom Jadranu i na otvorenom dijelu srednjeg Jadrana, gdje je naoblačenje bilo slabije nego drugdje, prolaz hladne fronte pratili oblaci Sc i Ac.

U većem dijelu Hrvatske prolaz fronte nije bio praćen oborinama, ali ih je bilo kasnije, čak nekoliko sati nakon prolaza fronte. Oborine su uglavnom bile slabe, a ponegdje su izostale u toku cijelog prodora. Dugotrajnije i jače oborine zamijećene su u Lici i Gorskom kotaru, kao posljedica orografskog utjecaja na zračne struje i procese kondenzacije u zraku (Čadež, 1964). Izraženije oborine u nekim jadranskim područjima posljedica su intenzifikacije prisutnog plitkog ciklonalnog polja, uz stvaranje i premještanje ciklonalnih sistema subsinoptičkih razmjera (Sijerković, 1976).

## LOKALNA ANALIZA PSEUDOPOTENCIJALNE TEMPERATURE ZRAKA

U cilju dobivanja kvantitativnog indikatora za određivanje prolaza hladne fronte korištena je pseudopotencijalna temperatura, koja predstavlja kompleksni pokazatelj vremenskih prilika, jer sadrži temperaturu, tlak i vlagu zraka.

U praktičnom radu korištena je ekvivalentno-potencijalna temperatura  $\theta_e$ , koja je približno jednaka pseudopotencijalnoj temperaturi  $\theta_{ps}$ . Za sve glavne meteorološke stanice u Hrvatskoj izračunate su vrijednosti pseudopotencijalne temperature za svaki sat u toku prodora hladnog zraka, kao i uzastopne međusatne razlike.



Slika 6 Uzastopne satne razlike  $\theta_{ps}$  za Osijek, Ogulin, Senj i Lastovo, 12.–13. 1. 1982 ( $1^{\circ}\text{C} - 0,75 \text{ cm}$ )

Fig. 6  $\theta_{ps}$  – interhourly differences for Osijek, Ogulin, Senj and Lastovo, 12.–13. 1. 1982 ( $1^{\circ}\text{C} - 0,75 \text{ cm}$ )

Na sl. 6 predočen je hod uzastopnih satnih razlika pseudopotencijalne temperature za četiri meteorološke stanice u Hrvatskoj u toku prodora hladnog zraka.

Prolaz fronte je bio svagdje praćen izraženim padom pseudopotencijalne temperature, uz maksimalne vrijednosti satnih razlika. Promjene pseudopotencijalne temperature bile su najmanje u sjevernim nizinskim krajevima unutrašnjosti, a najveće u planinskom području. Na Jadranu su bile najveće uz obalu sjevernog dijela, a prema jugu i dalje od obale bile su zamjetno manje. To je u suglasju s prethodnim kvalitativnim zaključcima.

## ZAKLJUČAK

Analizirani prodor hladnog zraka na području Hrvatske pokazuje karakteristične razlike u vremenskim prilikama pojedinih krajeva, u čemu se očituju i lokalni utjecaji, prije svega topografske i orografske naravi. Pokazalo se da je u lokalnoj analizi za tačno određivanje vremena prelaska fronte korisno kombinirati metode staničnih grafikona vremena, lokalnih promjena pseudopotencijalne temperature i vjetra u kratkim vremenskim intervalima.

## LITERATURA

- Čadež, M., 1954: Analiza vremena u FNR Jugoslaviji u 1951 godini. Izdanje SUHMS Jugoslavije, Rasprave i studije 5, Beograd, 39
- Čadež, M., 1964: Vreme u Jugoslaviji. PMF u Beogradu – Meteorološki zavod, Rasprave 4, 80
- Fujita, T., Newstein, H. and Tepper, M., 1956: Mesoanalysis- An Important Scale in the Analysis of Weather Data. U. S. Weather Bureau, Research Paper, 39, 83
- Lukšić, I., 1969: Interesantan slučaj bure u Senju 9. XII 1968. „Vijesti“ Hidromet. služba SRH, 3–4, Zagreb, 19–24
- Petkovšek, Z., 1962: Prehod hladnih front preko Alp in njihov vpliv na vreme v Sloveniji. Doktorska disertacija, Ljubljana
- Pristov, J., 1957: Vremenska dogajanja v zvezi s prodorom hladnega zraka. Meteorološki zbornik I DMS, Ljubljana
- Sijerković, M., 1976: Istraživanje lokalnih vjetrova u Hrvatskoj metodom mezoanalize. Magistarski rad, Zagreb
- Sijerković, M., 1980: Istraživanje nastupa lokalnog vjetra bure metodom mezoanalize. Razprave DMS, Letnik 24, št. 1, Ljubljana, 15–25
- Zverev, A., S., 1977: Sinoptičeskaja meteorologija. Gidrometeoizdat, Lenjingrad



## VETER V SLOVENIJI Z VIDIKA VPLIVA NA ZBIRALNIK SONČNE ENERGIJE

### WIND IN SLOVENIA REGARDING ITS INFLUENCE ON SUN-ENERGY-COLLECTOR

Zdravko PETKOVŠEK  
VTOZD Fizika, FNT, Ljubljana

UDK 551.553  
UDK 551.555

#### SUMMARY

The Useful energy obtained from a sun-energy-collector also depends on the wind characteristics in the location. Wind can take away or add a considerable amount of energy by turbulent flux, but strong winds can damage or destroy the construction supporting the collector. The wind characteristics of Slovenia are treated here with respect to these influences.

First some upper level wind roses are presented because the relief of Slovenia reaches the 850 mb level over considerable areas, and to a smaller extent even the 700 mb level. The winds on peaks and ridges at these heights correspond approximately to the winds at the levels mentioned. For some details the analysis of P-B (pilot-balloon) observations are presented up to 2160 m, and vertical wind profiles are also given for Ljubljana, representing a basin-like site, and for Murska Sobota, representing flat terrain (Figs. 2-4).

Regarding wind characteristics in Slovenia, three typical regions can be distinguished: high open places, lowland valleys and basins, and the coastal region. In high districts, however, shallow basin can be found with stagnant air and low wind conditions. But in general in the high regions the winds are stronger and calms are rare — Table 2, a. Lowland unit in central Slovenia show weak average winds and high frequency of calms (2b). The coastal region has considerable winds, although due to its position on the lee side of the Alps, the whole of Slovenia has a low average wind speed, compared with the winds in the lowlands of Western Europe. Also, the number of days with strong winds in the coastal region (Table 3) is important, because the bora there is a cold wind and carries away a great amount of the collector's energy.

As the sun-energy-collector works only in the daytime, and as the energy is most welcome in the winter, the daily and yearly distributions of wind speed are important, and are presented in Figs. 7 and 8 for typical places. Finally in Fig. 9 the frequency of strong and stormy winds is presented for many places, indicating that the collector holding the construction must be solid everywhere.

## POVZETEK

Proučevanja odnosov med zbiralnikom sončne energije in vetrom kažejo, da lahko veter bistveno vpliva na koristno moč zbiralnika, saj jo lahko zmanjša za več kot četrtino. V delu so zato podane glavne značilnosti hitrosti vetra v Sloveniji. Prikazane so njegove razporeditve z višino, vrednosti pri tleh, letni in dnevni hod vetra ter močni in viharne vetrovi za nekatere kraje Slovenije.

## UVOD

Precejšen del energije, ki jo prejme zbiralnik od sonca, odda v okolje, ali pa mu jo okolje na različne načine odvzame ali doda (Petkovšek-Rakovec 1982). Koristna energija, ki jo da zbiralnik, je lahko zaradi tega precej spremenjena. Eden od parametrov okolja, ki odvaja ali dovaja energijo, je gibanje zraka ali veter. Kolikšen del energije odnese ali prinese veter, je odvisno tako od vrste zbiralnika kot od značilnosti vetra v izbrani lokaciji. Slovenija je zelo razgibana in ima v različnih krajih zelo različne vremenske in klimatske razmere. Zato je treba na eni strani poznati sovplive med zbiralnikom in vetrom ter na drugi karakteristike vetrov pri nas v Sloveniji. S tem bi lahko razmeram v okolju primerno izbrali za posamezna področja njim najbolj ustrezno vrsto zbiralnika, ki bi dal za tiste razmere optimalno možno količino energije. V tem delu bo zajeto gibanje zraka oziroma veter in prikazane bodo glavne značilnosti ter razporeditve vetrov v Sloveniji, z višino in s časom.

## ODNOS MED VETROM IN ZBIRALNIKOM SONČNE ENERGIJE

Veter je pomemben pri zbiralniku sončne energije zaradi dveh glavnih učinkov:

- veter odnaša ali prinaša energijo iz okolja,
- močan veter lahko poškoduje ali uniči zbiralnik.

Veter v naravi je vrtinčasto (turbulentno) gibanje zraka, in čeprav je mirujoč zrak slab prevodnik toplote, vendar odnašajo vrtinci oziroma vetrovi od toplejših teles znatne količine energije v atmosfero. Po najbolj razširjeni K-teoriji je toplotni fluks podan z enačbo

$$F_H = -\rho c_p K_H \partial\theta/\partial z$$

kjer je  $\rho$  gostota zraka,  $c_p$  njegova specifična toplota pri konstantnem pritisku,  $K_H$  turbulentna difuzivnost za toploto,  $\theta$  potencialna temperatura in  $z$  koordinanta – višina nad ploskvijo, ki se ohlaja (ali ogreva, če je  $\partial\theta/\partial z < 0$ ).  $K_H$  je odvisna od mnogih parametrov (hitrosti vetra, stabilnosti atmosfere, hrapavosti površin i.d.) in se s krajem in časom spreminja ter jo je mogoče le približno določiti. Pogosto jo izenačimo z difuzivnostjo gibalne količine in jo dobimo iz vetrovnih profilov. Ker tudi teh večinoma ne poznamo, podamo turbulentni fluks zaznave toplote med steklom zbiralnika in atmosfero, s približno polempirično enačbo

$$H_{sz} = -(K_1 + K_2 v) (T_s - T_z)$$

kjer sta  $K_1$  in  $K_2$  empirična koeficienta (npr. Meinel, 1976),  $v$  je hitrost vetra ter sta  $T_s$  in  $T_z$  temperaturi stekla in zraka. Očitno je pri  $T_s > T_z$  toplotni tok od zbiralnika v atmosfero in se s tem zmanjšuje njegova koristna moč, kar je sorazmerno hitrosti vetra. Ta je torej v tej zvezi precej pomembna.

Numerični eksperimenti z modelom zbiralnika sončne energije, ki sloni na bilanci energijskih tokov znotraj zbiralnika in okolice, kažejo, da odvisnost izkoristka zbiralnika od hitrosti vetra ni preprosto določljiva. Istočasno namreč sovplivajo karakteristike zbiralnika in poleg vetra še drugi parametri okolja, ker so odvisni od vetra. Vendar na osnovi teh numeričnih eksperimentov ugotovimo, da lahko zmerni vetrovi spremenijo izkoristek zbiralnika za okrog 10% (v eno ali drugo smer), medtem ko se lahko njegov izkoristek npr. pri hladni burji (in neselektivnem absorberju) zmanjša za četrtino.

Dobro je, da je zbiralnik sončne energije vsaj v različnih letnih časih (če že ne urah dneva) obrnjen čimbolj proti soncu. Zato je navadno nameščen na posebni konstrukciji, sam pa naj ima čimvečjo površino. Ker je upor telesa v zračnem toku

$$U = \rho c S v^2 / 2$$

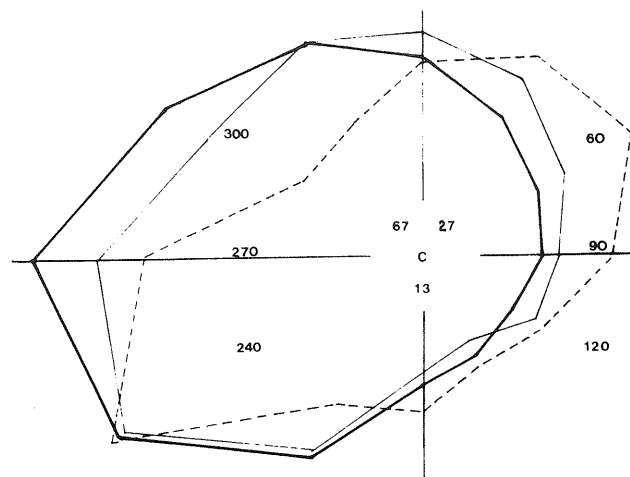
sorazmeren s površino preseka in s kvadratom hitrosti, sila upora hitro narašča. Pri močnih vetrovih je upor lahko tako velik, da zruši konstrukcijo in uniči zbiralnik. To velja posebno za vetrovne sunke ob nevihtah ali v burji. V njih doseže veter trikratno poprečno hitrost, a že ta je velika – upor pa se podeveteri. Zato je poznavanje poprečnih, prevladujočih in močnih vetrov ter njihovih karakteristik pri nas v tej zvezi dokaj pomembno.

## SPLOŠNO O VETRU NAD SLOVENIJO

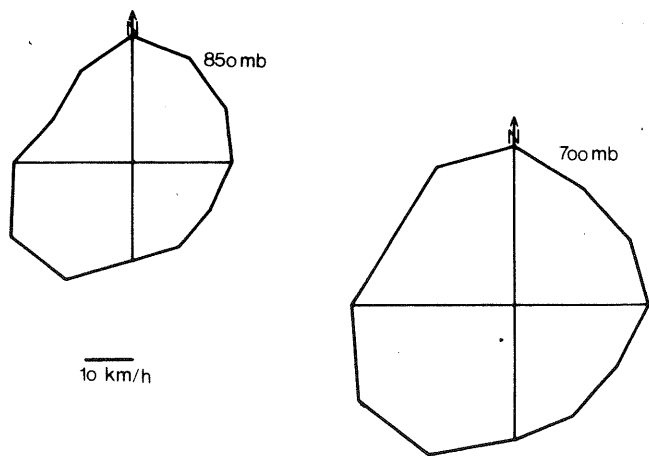
Zaradi sile trenja, je praktično vsako gibanje zraka v naravi turbulentno ali vrtinčasto. To se kaže v sunkovitosti in spremenljivosti vetra ter v tem, da je prenos toplote, raznih primesi in gibalne količine (torej samega vetra) skozi zrak zelo velik. Nastajanje in obnašanje turbulence je zelo zamotan problem, mi bomo lahko le približno ocenjevali njene posledice.

Najmočnejše je trenje navadno pri tleh, zato prevladujejo v višinah močnejši vetrovi, ki proti tlem slabijo in končno zrak med kamenčki in v dnu goste trave obmiruje – vetra ni, čeprav pihajo istočasno v višinah močni vetrovi. Zato je v zvezi z vetrom pomemben podatek tudi relativna višina nad tlemi, in to glede meritve vetra in tudi namestitve zbiralnika.

Splošni zahodni vetrovi, ki prevladujejo v zgornji troposferi zmernih geografskih širin, so nad Slovenijo v spodnjih plasteh troposfere zaradi Alp v poprečju šibkejši in odklonjeni – slika 1. Na sliki so prikazana poprečja. Toda taki splošni vetrovi so močnejši v območju ciklonov in front in znatno šibkejši v območjih anticiklonov. Poprečna doba prehoda front je vsakih 4 dni (Šegula 1976), vendar so lahko posamezna obdobja nekajkrat daljša ali krajša. V anticiklonih, ko so splošni vetrovi šibki, se razvijajo ob obalah in pobočjih lokalni vetrovi, ki so tudi šibki ali kvečjemu zmerni. Na drugi strani pa se lahko kjerkoli ob nevihtah nenadno pojavi zelo močan ali celo orkanski veter, v posebnih pogojih pa se pojavlja burja in fen ali pa nastopi doba nekajdnevnega brezvetrja (čeprav povsem zrak nikoli ne miruje) z ugodnimi ali slabimi posledicami.



Legenda: 850 mb - - - - - pogostost v %  
 700 mb ————— 40 %  
 500 mb ————— 500  
 C Primeri s hitrostjo pod 5km/uro izraženi v %



Slika 1 Celoletna roža smeri vetrov (zgoraj) in roži poprečnih hitrosti vetrov nad Slovenijo (1958–67), (po D. Furlanu 1980)  
 Fig. 1 Annual wind rose of upper wind frequency (above) and two rosses of wind speed over central Slovenia (1958–67), (after D. Furlan 1980)

Zaradi turbulentnega gibanja zraka je vsak podatek o vetru poprečje za neki čas (npr. sekundo, minuto ali uro). Krajši ko je čas, bolj je podatek natančen, a manj reprezentativen – zlasti pri tleh, kjer ustvarjajo razne ovire nove vrtince in je veter že na majhne razdalje lahko tudi v poprečju močno različen. Podatki o vetru so, skratka, močno odvisni od lokacije in časa, in le skrbna presoja omogoča ekstrapolacijo vrednosti za drug kraj ali čas. Tudi dobri instrumenti za veter (anemografi) so sorazmerno redko postavljeni, ker so dragi.

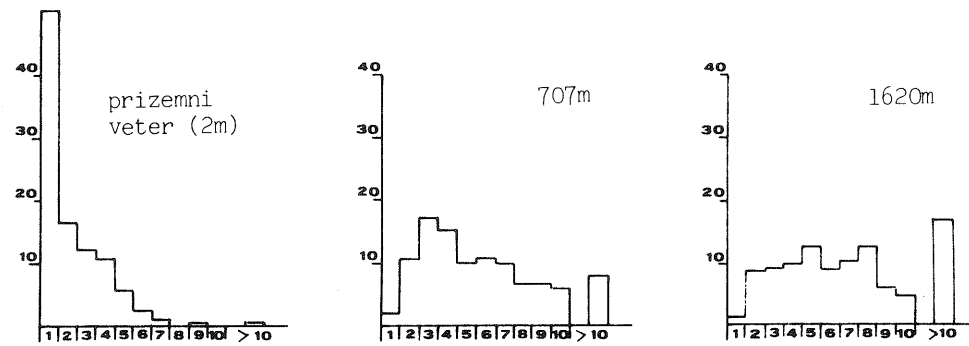
### RAZPOREDITEV VETROV V SLOVENIJI

Za potrebe v zvezi z zbiralnikom sončne energije je pomembna predvsem hitrost vetra (in le izjemoma tudi smer), zato bomo v nadaljnjem obravnavali predvsem hitrost.

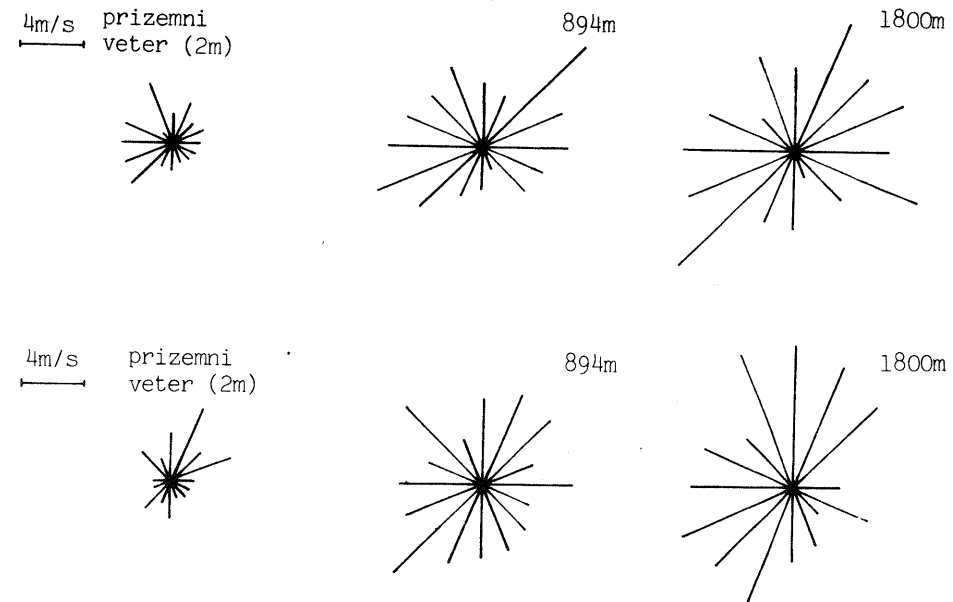
Zaradi trenja pri tleh hitrost vetra, posebno v spodnjem kilometru atmosfere navzdol hitro in vse hitreje slabi. To je npr. lepo razvidno iz analize pilot-balonskih opazovanj za Ljubljano in Mursko Soboto (Duh 1981). Iz podatkov 215 pilot-balonskih opazovanj leta 1959 je narejena slika 2, ki kaže, da so pri tleh navadno vetrovi šibki, z višino pa se najpogosteje opazovana hitrost pomika proti večjim vrednostim. Naslednja slika 3 predstavlja hitrostne rože vetrov na nekaterih višinah nad Ljubljano in M. Soboto. Tudi z nje je razvidno, da so vetrovi v višinah močnejši, poleg tega pa nam kaže tudi smeri, iz katerih so vetrovi najmočnejši in najšibkejši. Očitno je pri tleh za Ljubljano značilna zahodna komponenta, za Mursko Soboto pa vzhodna, medtem ko so na višinah razmere drugačne. Pri tem je koristno upoštevati, da so jugozahodni vetrovi navadno relativno topli, severovzhodni pa relativno hladni, zlasti v zimski dobi.

Na sliki 4 so prikazane poprečne vertikalne razporeditve hitrosti vetrov za oba kraja do višine 2160 m, in to še ločeno za vse vetrove skupaj ter posebej za šibke in močne vetrove. Pri šibkih vetrovih ( $v \leq 3$  m/s na 1080 m) (v anticiklonih) je značilen sekundarni minimum na višini okrog 1000 metrov nad tlemi in je verjetno posledica subsidenčne inverzije in vetrovnih razmer tik pod njo. Pri močnih vetrovih ( $v \geq 8$  m/s na 1080 m) pa se zlasti pri M. Soboti kaže spodnji vetrovni stržen.

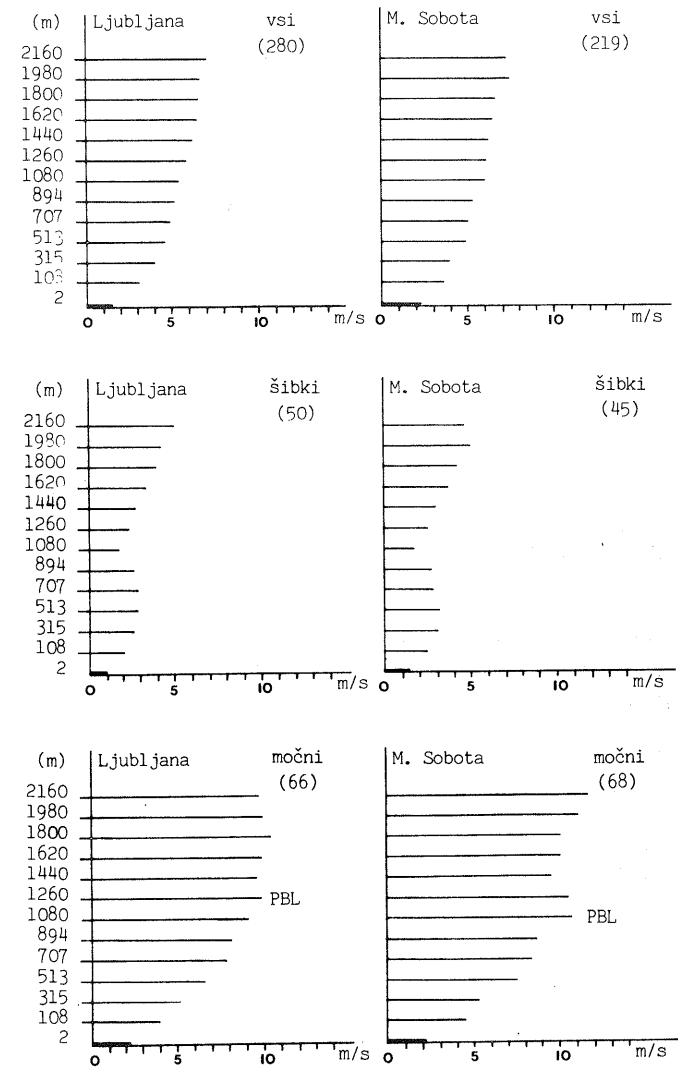
Podatke pilot-balonskih opazovanj lahko dobimo predvsem ob lepem vremenu in veljajo za spodnji del t.i. proste atmosfere, vendar na vetrove v Ljubljani že vplivajo obrobni grebeni, na obe postaji pa seveda tudi Alpe kot celota. Večina meteoroloških postaj z zanesljivimi podatki o vetru je v nižinah – dolinah in kotlinah, kjer vladajo tudi glede vetra posebne razmere. Zato nam služijo navedeni podatki kot dobra pomoč pri oceni hitrosti vetra v višjih legah – na vrhovih, pobočjih in planotah, kjer bi lahko nameščali zbiralnike sončne energije. Vendar paj je treba biti pri prenosu podatkov o vetru iz proste atmosfere v lokacijo pri tleh na enaki nadmorski višini zelo previden, ker je lahko pri tleh veter šibkejši ali pa tudi močnejši. O tem odloča oblikovitost terena, smer vetra in drugi atmosferski pogoji. Konkretni primeri, ki so nam na razpolago, so z malo večjih višin, vendar pokažejo bistvo. Tako je npr. enakost vetra na isti višini v prosti atmosferi ali na grebenu bolj izjema kot pravilo, kakor je razvidno s tabele 1.



Slika 2 Frekvenčna razporeditev vetrov nad Ljubljano po hitrostnih razredih za tri višine pilot-balonskih opazovanj 1959  
 Fig. 2 Frequency distribution of wind speed above Ljubljana in speed-classes for three heights of P-B observations in 1959



Slika 3 Hitrostne rože vetrov nad Ljubljano in Mursko Soboto za tri višine pilot-balonskih opazovanj leta 1959  
 Fig. 3 Wind speed roses above Ljubljana and Murska Sobota for three heights of P-B levels in 1959



Slika 4 Vertikalni profili vetra nad Ljubljano in Mursko Soboto za vse vetrove skupaj ter posebej za šibke ( $v \leq 3$  m/s) in močne ( $v \geq 8$  m/s) vetrove in njihova pogostnost ( )

Fig. 4 Vertical wind profiles for Ljubljana and Murska Sobota for all winds together, and for low ( $v \leq 3$  m/s) and high ( $v \geq 8$  m/s) winds separately, and their frequency ( )

Tabela 1 Relativna pogostnost razlik hitrosti vetra ( $\Delta v > 2,5$  m/s) za triletno dobo ob 14. uri v prosti atmosferi in na grebenih (po Pristovu 1959)

Table 1 Relative frequency of wind speed differences in the free atmosphere and on ridges for three years at 14 CET

postaja	enak	močnejši	šibkejši	na grebenu
Sonnblick (3106 m)	5	35	60	%
Kredarica (2515 m)	7	26	67	%

Očitno prevladuje zaviralni vpliv tal na veter s trenjem; toda približno tretjina primerov z večjo hitrostjo na grebenu kaže pogoste dinamične vplive (Bernoullijev efekt), a tudi termodinamični vplivi, npr. konvekcija, termalni veter i.dr. niso zanemarljivi.

Na osnovi študija razpoložljivih podatkov in presoje reliefnih in klimatskih značilnosti neke lokacije lahko strokovnjak približno oceni navedene vplive, pri čemer se je mogoče v osnovi nasloniti tudi na sliko 4. Na ta način je mogoče dobiti oceno vetrov za lokacije nad 250 m nad dnom dolin in kotlin. V njih samih pa vladajo specifične razmere, ki si jih bomo ogledali pozneje.

V mikroskali velikostnega reda 100 m in manj je pri oceni lokacije zbiralnika sončne energije in vpliva vetra nanj treba upoštevati razne ovire (hiše, drevje, oblikovitost tal ipd.) predvsem v smeri prevladujočih vetrov. Poleg tega pa je pomemben prizemni vetrovni profil. Večina meritev in teoretičnih rešitev kaže, da je prizemni profil vetra približno logaritmičen, vendar močno odvisen tudi od atmosferskih pogojev (zlasti stabilnosti atmosfere), od konfiguracije okolice in hrapavosti tal – slika 5. Tu so pri oceni poprečnih ali značilnih vetrov v neki lokaciji zbiralnika sončne energije možne največje napake. Že višinska razlika namestitve za nekaj metrov ali napačna ocena kakega vplivnega parametra lahko zgreši pravo vrednost hitrosti vetra ob zbiralniku za faktor 3 ali več. Pri tem je zato tudi pomembno vedeti, s katere višine nad tlemi in iz kakšne lokacije so podatki o vetru, ki jih upoštevamo oziroma jemljemo kot osnovo svojih ocen. Vsekakor ocena vetra v neki mikrolokaciji ni preprosta zadeva in površnost pri tem lahko privede do velikih napak.

#### RAZPOREDITEV VETROV PRI TLEH

Glede na vetrove naj v grobem razdelimo Slovenijo na naslednja tri območja:

- odprte lege,
- kotline in doline v notranjosti,
- Primorska.

Meje med njimi niso ostre in je to le doprinos k možnosti ocene vetra in njegovega vpliva na zbiralnik ter podajanja raznih značilnosti področij.

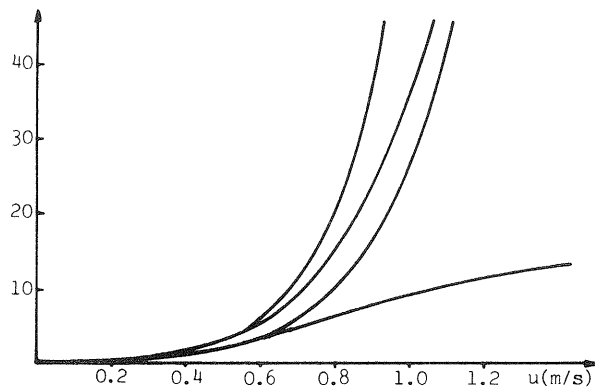
a) Za odprte lege bomo tu šteli lokacije, ki so sorazmerno dobro dostopne vplivu splošnih vetrov nad deželo. Zato lahko mednje štejemo večji del Primorske, čeprav ima majhno nadmorsko višino in jo bomo pozneje še posebej obravnavali zaradi burje. Na drugi strani pa so kotline na visokih planotah (npr. deli Komne), ki kljub velikim nadmorskim višinam ne spadajo v to področje. Vendar pa za večino velja, da so višje lege navadno tudi bolj odprte oz. prevetrene, kot je razvidno s tabele 2.

Na odprtih oziroma višjih legah imamo v Sloveniji malo postaj z dobrimi podatki o vetru, saj je celo postaja Jezersko v dokaj zaprti legi. Zato je pomoč slike 4 toliko bolj koristna. Iz tabele 2 pa je tudi očitno, da so v višjih legah pri tleh neredka brezvetrja, ki jih v prosti atmosferi skoraj ni. Primerjava podatkov s tabele 2 in slike 4 kaže, da bi za oceno vetra pri tleh morali zmanjšati hitrost vetra s proste atmosfere skoraj za polovico. Toda upoštevati je treba, da so podatki s tabele 2 poprečja s klimatoloških terminov ob 7., 14. in 21. uri, za zbiralnike sončne energije pa so predvsem pomembni podatki čez dan. Dopolnitve spoznanj glede tega nam bodo dale poznejše obravnave časovne razporeditve vetra.

Tabela 2 Poprečne hitrosti vetrov na nekaterih meteoroloških postajah v Sloveniji za 20-letno dobo (1956–75) v m/s in odstotki brezvetrja

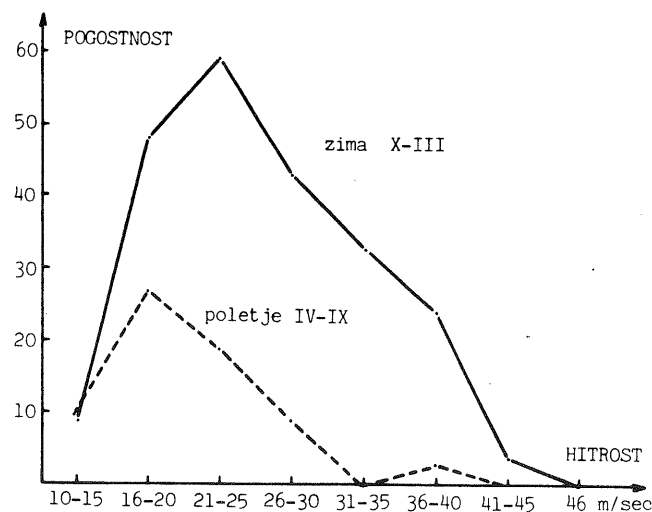
Table 2 Average wind speeds in m/s and percentage of calms for some places in Slovenia for the period 1956–75

	hitrost	brezvetrje
a) odprte lege		
Dom na Komni (1520 m)	2,5 m/s	10 %
Kredarica (2515 m)	2,8	22
Pleša-Nanos (1260 m)	3,9	17
b) nižine notranjosti		
Celje (244 m)	1,0 m/s	41 %
Ljubljana (300 m)	1,0	33
Maribor (275 m)	1,5	37
Murska Sobota (184 m)	0,9	53
Novo mesto (220 m)	1,3	21
Rateče-Planica (864 m)	0,5	69
Šmartno-Sl. Gradec (452 m)	1,7	23
Jezersko (960 m)	1,6	43
c) Primorska		
Ajdovščina (110 m)	1,7 m/s	41 %
Hirska Bistrica (420 m)	1,8	38
Koper (27 m)	2,3	29
Postojna (533 m)	2,4	26



Slika 5 Prizemni vertikalni profili vetra ob raznih približkih v stabilni atmosferi (po J. Rakovcu 1972)

Fig. 5 Surface wind profile at different approximations to atmospheric stability



Slika 6 Pogostnost vetrovnih sunkov burje po jakostnih razredih v Ajdovščini za dobo 1968-73 (po Petkovšek-Paradiž 1976)

Fig. 6 Frequency of bora gusts in speed-classes in Ajdovščina for the period 1968-73

Nižine in kotline v notranjosti Slovenije zlasti v zimski dobi pogosto zapolnjujejo jezera hladnega zraka, ki so ločena od višje atmosfere z izrazitimi temperaturnimi inverzijami. Te so navadno na relativnih višinah med 70 in 250 m (Petkovšek 1979). Pogosto pihajo nad inverzijami zmerni ali celo močni vetrovi, medtem ko vlada v kotlinah brezvetrje ali pa se razvije šibko lokalno gibanje zraka ob pogočjih in/ali pod vplivom toplotnih otokov naselij. Kljub temu, da se megla v zimski polovici leta čez opoldne razkroji, jezera hladnega zraka navadno ostanejo in preprečujejo vpliv višinskih vetrov k tlom. Iz podatkov tabele 2 b) vidimo, da so tu poprečni vetrovi večinoma pod 1,5 m/s in s tem trikrat šibkejši kot na ravninah zahodne Evrope (npr. Dresden 4,9, Hamburg 4,2 m/s), kjer je tudi brezvetrja komaj med 1 in 5% (Wallen 1977). V naših nižinah pa je brezvetrja veliko in dosega v Planici skoraj 70% vseh opazovalnih terminov. Prav zaradi pogostnega brezvetrja lahko štejemo tudi našo gorsko postajo Jezersko med „nižinske“ zaprte lege.

c) Primorska, kot smo že omenili, spada pretežno med odprta področja, razen izrazitih dolin in kotlin, ki imajo pogosta brezvetrja. Posebnost večjega dela Primorske je burja, ki je bolj pogosta in relativno hladna v zimski polovici leta (Petkovšek-Paradiž 1976). Burja lahko bistveno vpliva na zbiralnik sončne energije tako glede odvajanja toplote kot glede potrebe po posebno trdnih konstrukcijah, da ne nastanejo lomi zbiralnikov. S tega vidika je treba posebej upoštevati sunkovitost burje, kjer dosegajo hitrosti trikratno poprečno vrednost, a že ta ni majhna. Največja izmerjena hitrost vetra ob sunku burje v Ajdovščini je bila 47 m/s, sicer pa je pogostnost burij z maksimalnimi hitrostmi po razredih razvidna s slike 6.

Vplive burje vključujejo podatki o vetru tabele 2 primorskih postaj. Pri tem očitno izstopa nesmisel upoštevanja samo poprečnih hitrosti vetrov, ki so obenem po pogostnosti manj številne. Kadar je burja, so vetrovi znatno močnejši oziroma hitrosti bistveno večje od poprečnih, v preostalem času pa so vetrovi znatno šibkejši ali pa je brezvetrje. Zato podajamo v tabeli 3 za dva kraja Primorske še dodatne podatke, za nekatere druge kraje pa še pozneje na sliki 9.

Tabela 3 Število dni močnih vetrov ( $v \geq 6 \text{ Bf} \approx 12 \text{ m/s}$ ) in viharnih vetrov ( $v \geq 8 \text{ Bf} \approx 19 \text{ m/s}$ ) za Koper in Ajdovščino po mesecih in za vse leto (poprečno v 20-letni dobi 1956-75)

Table 3 The monthly number of strong ( $v \geq 6 \text{ Bf}$ ) and stormy ( $v \geq 8 \text{ Bf}$ ) winds in Koper and Ajdovščina - average for a period of 20 years (1956-75)

mesec:		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Leto
Koper	$\geq 6 \text{ Bf}$	8	7	8	7	4	4	4	5	3	6	7	8	73
	$\geq 8 \text{ Bf}$	4	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	3	25
Ajdovščina	$\geq 6 \text{ Bf}$	10	8	9	7	6	4	5	6	5	8	10	9	87
	$\geq 8 \text{ Bf}$	6	4	5	3	2	2	3	3	2	4	5	5	44

Velika večina močnih in viharnih vetrov je posledica burje, zato daje tabela 3 obenem približno sliko letne razporeditve burje. Ta je seveda v poletnih mesecih precej manj pogosta kot v zimskih.

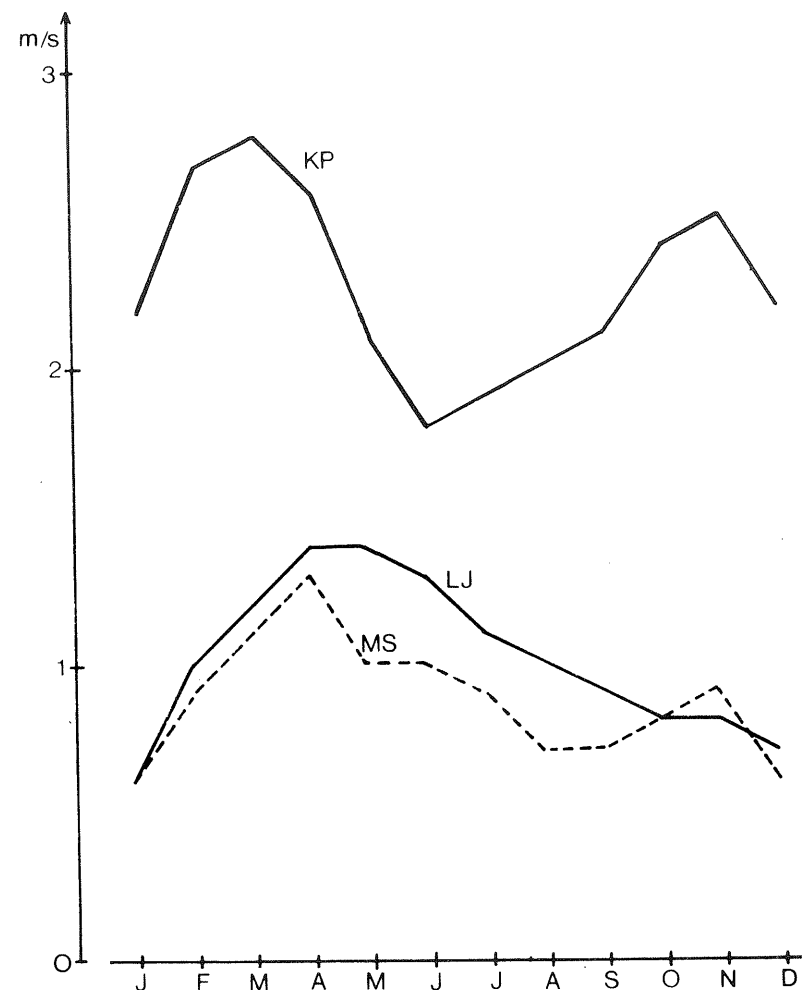
### ČASOVNE RAZPOREDITVE VETROV

Obdobja, za katera bomo podali časovne razporeditve hitrosti vetrov v Sloveniji, bodo periodična: leto in dan. Kvaziperiodično pa je menjavanje ciklonalnih in anticiklonalnih vplivov s povprečno periodo 4 dni, ki smo jo že omenili.

Letna razporeditev hitrosti vetrov za tri kraje — slika 7 — kaže bistveno razliko med Koperom, kot predstavnikom Primorske, in Ljubljano, kot predstavnikom nižin oziroma kotlin. Ob povečani labilnosti atmosfere spomladi narašča vpliv višinskih vetrov k tlom, zato hitrosti pri tleh proti pomladi naraščajo. Pri tem je maksimum v Kopru, kjer so vetrovi vseskozi močnejši, dosežen prej. Od maksimuma v Kopru hitrost vetra v Kopru naglo pade na minimum v juniju (vpliv etezijskega podnebja) in nato proti novembru počasi, a stalno narašča. Nasprotno pa v Ljubljani hitrost vetra od maksimuma v maju vse do konca leta stalno in dokaj enakomerno pada zaradi vse večje stabilnosti atmosfere in v jeseni dalj časa trajajočih jezer hladnega zraka. Murska Sobota kaže v skladu s svojo bolj odprto, a vendar velikokotlinsko lego, značilnosti obeh prejšnjih potekov. Ta slika nam skupaj s spredaj navedenimi povprečnimi letnimi vrednostmi omogoča presojo in oceno letne razporeditve hitrosti vetra tudi za druge kraje oziroma lokacije zbiralnikov sončne energije ter relativno oceno njihove izrabe v posameznih letnih časih.

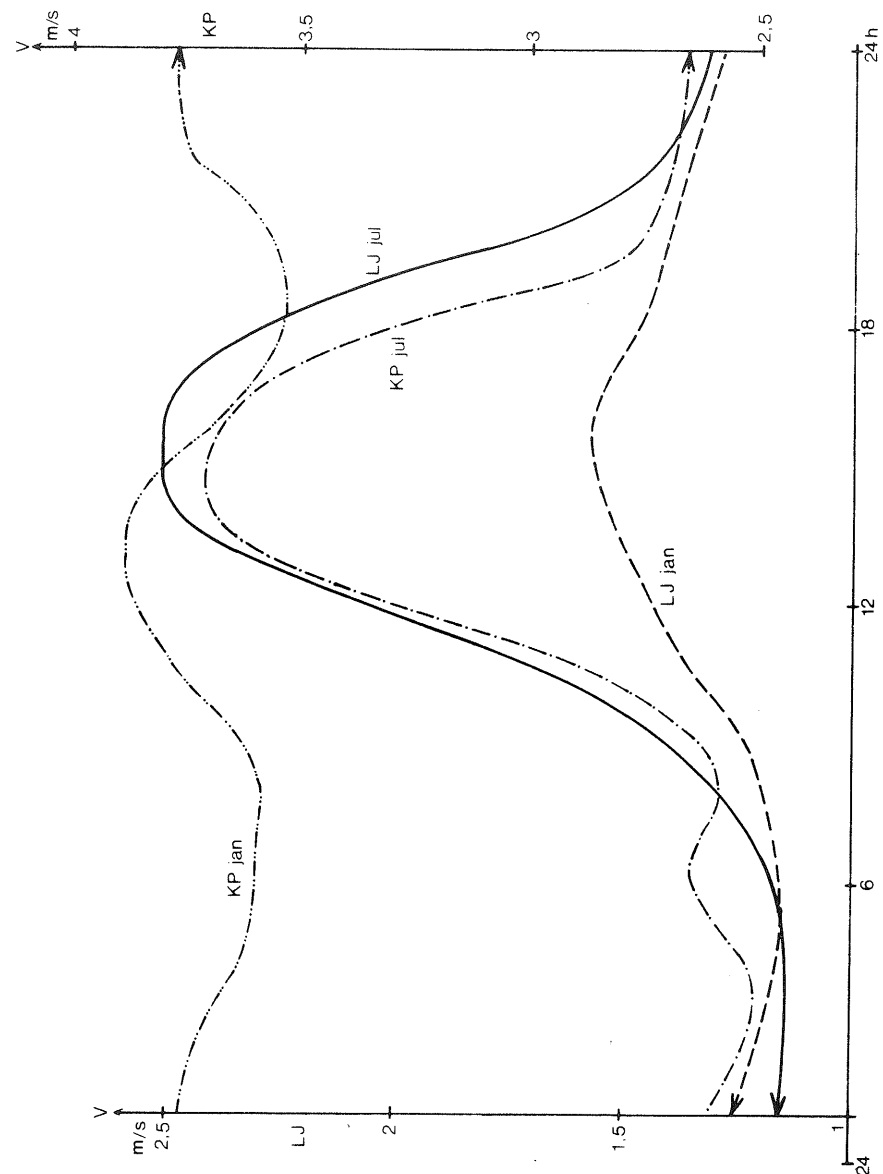
Dnevna razporeditev hitrosti vetra je logična posledica labilizacije atmosfere v dopoldanskem času, kar omogoča vse boljši in čišči vpliv splošnih vetrov k tlom. Vetrovi pri tleh so zato okrog poldne najmočnejši, najšibkejši pa ponoči, ko se atmosfera pri tleh stabilizira. Na to pa seveda dodatno vplivajo reliefni in splošni klimatski pogoji. Za ilustracijo podajamo na sliki 8 izglajene dnevne poteke za januar in julij za Ljubljano in Koper. Krivulje so izrisane na osnovi 24-urnih vrednosti za dan, vrednost vsake ure pa je povprečje petletnega obdobja in vsebuje čez 2000 podatkov. Kljub temu je bilo za naše potrebe smiselno krivulje izgladiti.

Slika 8 nam kaže, da so v Ljubljani (leva skala) ponoči vetrovi zares šibki in se čez dan poleti znatno okrepijo, čeprav so še kljub temu dvakrat šibkejši, kot v zahodni Evropi. Pozimi so celo v zgodnjih popoldanskih urah le malo nad 1,5 m/s. A tudi tu je treba biti pri uporabi povprečja previden: kadar se kotlinsko jezero hladnega zraka ne razkroji, so vetrovi tudi popoldne večinoma pod 1 m/s, medtem ko je ob prehodih front ali širšem času njihovega vpliva precej vetrovno. Oblačno in deževno vreme ob frontah pa tudi sicer, a zlasti pozimi, ne daje veliko možnosti za izrabo sončne energije. V preostalem času pozimi so pogoji za izrabo sončne energije boljši v višjih legah, medtem ko je v nižinah ob sicer šibkem vetru zaradi megle sonca izredno malo (Hočevar in sod. 1982).

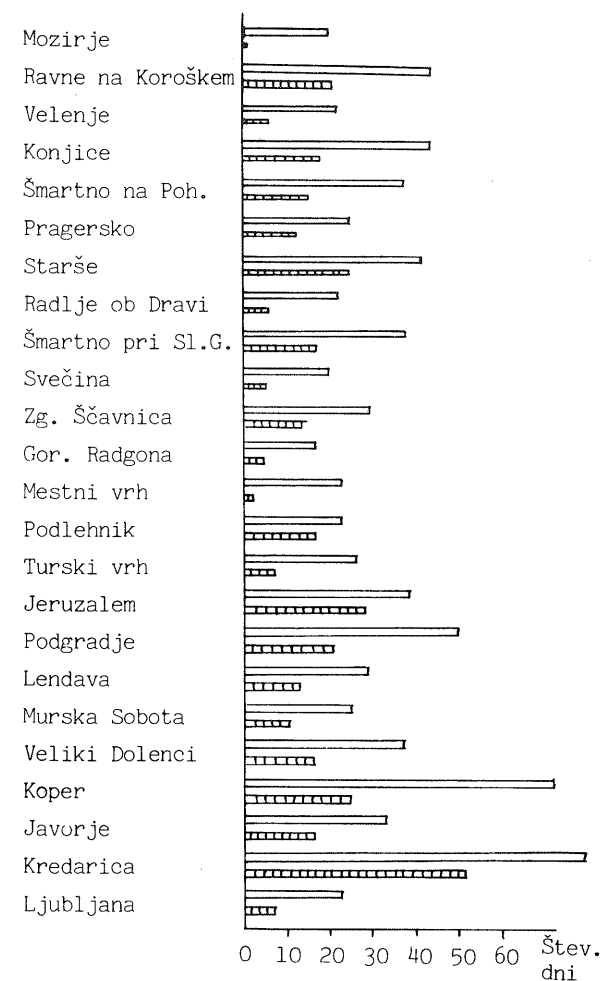


Slika 7 Letna razporeditev povprečnih hitrosti vetrov za Koper, Ljubljano in Mursko Soboto za 6-letno dobo (1975–80)

Fig. 7 Annual distribution of average wind speed in Koper, Ljubljana and Murska Sobota for a 6-year period (1975–80)



Slika 8 Izglajeni dnevni poteki hitrosti vetrov za Ljubljano in Koper za mesec januar in julij  
 Fig. 8 Smoothed daily courses of wind speed for Ljubljana and Koper in months of January and July



Slika 9 Pogostnost močnih ( $v \geq 6$  Bf) in viharnih ( $v \geq 8$  Bf) vetrov v nekaterih krajih Slovenije za dobo 1956–75 (po D. Furlanu 1980)  
 Fig. 9 Frequency of strong ( $v \geq 6$  Bf) and stormy ( $v \geq 8$  Bf) winds in some places in Slovenia for the period 1956–75

Koper spada med odprte lege, poleg tega pa se tu pozna vpliv burje in še obalnih vetrov z izrazitim dnevnim ciklom. Julijski dnevni potek hitrosti vetra v Kopru je podoben ljubljanskemu, le da so hitrosti za okrog 1,3 m/s večje (desna skala slike 8). Pozimi pa je povsem drugače. Tudi nočni veter je v Kopru močan in ima ugoden učinek na zbiralnik



sončne energije. Z dovajanjem toplote iz zraka, ki je ponoči znatno toplejši kot kolektor (posebno s selektivnim absorberjem), preprečuje premočno nočno ohlajevanje zbiralnika in mu zvišuje štartno temperaturo ob sončnem vzhodu, ko prične z absorpcijo zbirati sončno energijo. Posebnost zimske dnevne razporeditve vetra v Kopru je posledica večje ciklonske sredozemske aktivnosti in seveda burje.

## MOČNI VETROVI V SLOVENIJI

Zaradi na splošno šibkih vetrov v zavetrju Alp in zlasti v kotlinah, štejemo pri nas med močne vetrove tiste z vrednostmi nad 6 Bf (45 km/h), ki so npr. na holandskem blizu poprečnim. Zelo močni ali viharne vetrovi pa so nad 8 Bf (65 km/h).

Močni in viharne vetrovi se pojavljajo pri nas najčešče ob burji, ki pa je lokalno omejena in smo jo že obravnavali. Kjerkoli pa se lahko nenadno pojavi viharne veter ob prehodu fronte z nevihtami, včasih pa tudi kot kratkotrajni viharne piš pri termični nevihti. Tako kot same nevihte, so taki primeri dokaj sporadični, vendar ne izjemni in lahko naredijo veliko škodo – med drugim tudi na slabo pritrjenih ali nezaščitenih zbiralnikih sončne energije. Pogostnost pojavljanja močnih in viharne vetrov v nekaterih krajih Slovenije je prikazana na sliki 9 (in v tabeli 3). Vsekakor pa ni kraja, kjer se ne bi občasno pojavili.

---

Delo je del raziskovalne naloge RP: Nekonvencionalni viri energije, 02-2166-486-82, ki ga je financirala Raziskovalna skupnost Slovenije.

## LITERATURA

- Arhiv Hidrometeorološkega zavoda SRS, Ljubljana  
Duh F., 1981, Vetrikalne razporeditve vetra v Sloveniji, dipl. delo (neobjavljeno), VTO Fizika, FNT, 85 str.
- Furlan, D., 1980, Klimatski prikaz severovzhodne Slovenije, Hidrometeorološki zavod SRS, 324 str.
- Hočevar, A., in sod., 1981, Sončno obsevanje v Sloveniji – trajanje in energija, Bioteh. fakulteta, VTOZD Agronomija, 96 str.
- Meinel, A. B., 1976, Applied solar energy, Addison-Wesley Pub. Comp., Reading, Massachusetts, 647 str.
- Petkovšek, Z., 1965, Oblačnost, vetrovi in megla ob hladnih frontah v Sloveniji, Razprave-Papers VI, DMS, 23–31
- Petkovšek, Z., and Paradiž B., 1976, Bora in the Slovenian Coastal Region, Local Wind Bora, Univ. of Tokyo Press, 135–144
- Petkovšek, Z., 1979, Emisijski potencial SO<sub>2</sub> za večino kotlin Slovenije, Razprave-Papers 23/1, DMS, 37–49
- Petkovšek, Z., in Rakovec, J., 1982, Zbirnik sončne energije in njegovo okolje – numerični model, SITHOK posvet. o izrabi sončne energije, II. del, 311–321
- Pristov, J., 1959, Abweichungen des Windes auf den alpinen Beobachtungstationen in Bezug auf die Strömung in der freien Atmosphäre, Berich. Deutsch. Wetterd., B. 8, Nr. 54, 241–243
- Rakovec, J., 1972, Vertikalni profili vetra v prizemni turbulentni plasti, Razprave-Papers XIV, DMS, 3–13
- Šegula, A., 1976, Hladne fronte v območju Alp, Razprave-Papers 20/2, DMS, 89–99
- Wallen, C. C., 1977, Climates of Central and Southern Europe, World Survey Clim. V. 6, Elsevier Pub. Comp, 248 str.

**NAJVIŠJE DNEVNE PADAVINE ZA POREČJE SAVE DO KRŠKEGA  
MAXIMAL DAILY PRECIPITATIONS IN THE BASIN OF THE  
RIVER SAVA**

Janko PRISTOV, Boris ZUPANČIČ, Filip ŠTUCIN  
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.577.2  
UDK 551.577.37

**SUMMARY**

The intention of the present work was to estimate the maximal daily precipitation in the basin of the river Sava, which covers about 11000 square kilometres of very varied relief in Slovenia. The lowest part of this basin lies 150 metres above sea level and the highest peaks reach about 2800 metres.

The work was carried out in two parts. In the first, on the basis of the results of 30 years of measurement of daily precipitation at meteorological stations in the basin, we made a choice of synoptic situations which caused heavy precipitations.

The results showed that the area was not uniform. Maximal daily precipitation did not appear throughout the river basin at the same time, since they were not caused by the same synoptic situation. On the basis of this analysis, we estimated the portion of the annual maximal daily precipitation for smaller, uniform areas, for a synoptic situation which caused maximal daily precipitation for the whole basin.

The second part of this work was a statistical analysis of the extremes. For this purpose we used Gumbel and Jenkinsen's method. The results of this analysis depend on the distribution of extreme precipitations and on the length of the series of measurements, and therefore the calculations did not give good results for all stations. Hence, we made a map of maximal daily precipitation calculated so that we considered some rules governing the distributions of maximal daily precipitation for the 30 year series of measurements.

The synthesis of the results of both parts of our work gave an estimate of the maximal daily precipitation in the basin of the river Sava.

**POVZETEK**

Cilj tega prispevka je bila ocena maksimalnih dnevnih padavin na porečju Save, ki obsega okoli 11.000 km<sup>2</sup> reliefno razgibanega območja Slovenije. Metoda dela je imela dve fazi. Najprej smo na osnovi meritev naredili izbor sinoptičnih situacij, ki so vzrok visokim padavinam. Ugotovili smo, da porečje ni padavinsko homogeno, da nastopajo najmočnejše

dnevne padavine ob različnih sinoptičnih situacijah. Za posamezna homogena področja smo ocenili razmerje med letnimi ekstremi in padavinami pri sinoptičnih situacijah, ki dajejo največ padavin na celotnem porečju. Drugi del naloge je bil izračun absolutnih ekstremov s teorijo ekstremnih vrednosti (Gumbel, Jenkinsen). Tako dobljeni absolutni ekstremi so močno odvisni od same porazdelitve ekstremnih vrednosti ter od dolžine opazovalnega obdobja. Karto prostorske porazdelitve teh vrednosti smo zato narisali še z upoštevanjem zakonitosti prostorske porazdelitve, dobljenih na karti, kjer so bili osnovni podatki izmerjeni ekstremi v 30-letnem obdobju. Sinteza prvega in drugega dela nam je dala realno oceno maksimalnih dnevnih padavin na celotnem porečju Save.

## UVOD

Padavine so meteorološki element, katerega intenziteta je močno odvisna od orografije in posameznih meteoroloških situacij. Po nastanku ločimo več vrst padavin. Za naš problem so najpomembnejše: frontalne padavine, orografske padavine in padavine iz konvektivnih oblakov. Vse tri vrste padavin se lahko pojavijo v istem dnevu, največkrat pa so med seboj ločene.

Konvektivne padavine se pojavljajo ponavadi v pozno pomladanskem in poletnem razdobju. Orografske padavine so najpogostejše v jesenskem in pomladanskem razdobju, to je v povezavi s ciklonom v Sredozemlju. Frontalne padavine pa so prek celega leta, v poletnih primerih bolj povezane s konvektivnimi padavinami, v jesenskih in pomladanskih mesecih z orografskimi padavinami. Ekstremne padavine na širšem območju so v naših krajih redno vezane na vpliv oziroma prehod frontalnega sistema.

Območje jugovzhodnih Alp, še predvsem Kaninsko območje, je znano po zelo intenzivnih padavinah. Močnejše padavine so verjetno v posameznih predelih Dinarskega gorovja, in sicer tam, kjer so najugodnejši pogoji za orografske padavine (kot npr. Crkvice).

V zadnjem 80-letnem razdobju so bile v Jugoslaviji zabeležene naslednje maksimalne dnevne padavine:

Crkvice	480 mm
Drinjak	440 mm
Livek	358 mm
Lučine	341 mm
Bovec	330 mm
Gomance	326 mm
Savica	309 mm

Reya (1945) je ugotovil, da je najbolj namočeno ozemlje južno pobočje Kanina, v Italiji. Kot tipična primera ekstremnih dnevnih padavin sta Osojane v Rezijanski dolini, 617 mm, in Korito v Rezijanski dolini, 371 mm (Reya 1945).

Iz navedenega sledi, da so najvišje dnevne padavine v razponu med 300 in 400 mm v zahodni Sloveniji. Nas zanima, kakšne ekstremne padavine so se pojavile v Sloveniji v zadnjih 30 letih in kakšna je povratna doba ekstremnih padavin.

Na osnovi 30-letnih opazovanj na 200 postajah smo za vsako postajo in vsak mesec vzeli najvišjo dnevno količino padavin. Na osnovi teh podatkov smo izbrali 10 datumov, ko je dobilo porečje Save, na osnovi najvišjih dnevnih padavin, največjo množino vode. Izdelali smo dnevne in dvodnevne padavinske karte in določili sinoptične situacije, ki so povzročile te močne padavine v Sloveniji.

S teorijo ekstremnih vrednosti po Jenkinsenu (1955), smo za vse padavinske primere poskusili izračunati mesečne povratne dobe. Pokazalo se je, da je za takšen izračun v velikem številu primerov premalo podatkov, ker je razporeditev zelo neenotna. Isto metodo za računanje povratnih dob oziroma absolutnih ekstremov, smo uporabili za letne maksime, vendar tudi tu rezultati niso spodbudni.

Uporabili smo tudi računanje povratnih dob po Gumbelovi metodi (Nemec, 1972) za povratno dobo 10.000 let, ki je v našem primeru uporabnejša, vendar so tudi tu rezultati nekoliko problematični in je zato potrebno še usklajevanje z analizo prostorske porazdelitve dobljenih točkovnih vrednosti.

## POGOJI ZA NASTANEK INTENZIVNIH DNEVNIH PADAVIN

**Konvektivne padavine.** Kot smo že omenili, so pogosto zelo intenzivni nalivi pri nevihtah, ki se najpogosteje pojavljajo samo pomladi in poleti v popoldanskih in večernih urah. Te padavine ponavadi trajajo krajši čas in zato kljub veliki izdatnosti ne dosežejo ekstremnih dnevnih padavin. Termične nevihte in tudi nevihte v kapljah hladnega zraka lahko v našem primeru kar zanemarimo. Te intenzivne padavine so le na posameznih območjih, v bližnji okolici pa lahko padavin sploh ni.

**Padavine zaradi prehoda frontalnega sistema.** Za dnevne maksimalne padavine je pogoj, da imamo splošno dviganje zraka, ne samo v posameznih celicah. Splošno dviganje je ob frontalnih sistemih ali v mladih ciklonskih tvorbah predvsem v jugovzhodnem delu ciklona.

Že prognostična praksa kaže, da je trajanje vpliva frontalnega sistema na padavine odvisno od smeri vetra v prosti atmosferi nad našimi kraji. Če je smer zračnih tokov pod znatnim kotom na smer fronte pri tleh, so pomiki front razmeroma hitri. Takšni pogoji so pogosti pri frontah, ki se premikajo od severa, severozahoda ali zahoda in prevladujejo v prosti atmosferi severozahodni ali vsaj zahodni zračni tokovi. Na te frontalne sisteme sicer vpliva gorski masiv Alp na način, da se ob gorski prepreki kratkotrajno zaustavijo, ko pa preidejo glavni gorski masiv, se fronte — več ali manj — enakomerno pomikajo proti jugovzhodu. Iz naše sinoptične prakse je poznano, da trajajo intenzivne padavine ob prehodu takšne

fronte manj od 12 ur s tem, da lahko nastane na fronti celo slaboten val, ki pa takoj izgine, brž ko se fronta oddalji od Alp. Takšna fronta preide Slovenijo razmeroma hitro. Od enega do drugega konca Slovenije rabi od nekaj ur do polovice dneva in so zato najpogostejše glavne padavine v takšnih primerih zabeležene isti dan.

Drugačni pa so vplivi prehoda front, kadar se na fronti oziroma pred njo razvije sekundarni ciklon. V teh primerih prevladujejo nad Slovenijo močni jugozahodni vetrovi, ki lahko zadržijo pomik fronte prek Slovenije za dalj časa. V takšnih primerih nastane kvazistacionarni frontalni sistem, ki se lahko nekaj časa pomika v eno in nato v drugo smer. Sekundarni ciklon nastane ponavadi v Genovskem zalivu ali nad zahodnim delom Padske nižine. Če nastane takšen sekundarni ciklon nad severnim Jadranom, le-ta ni toliko izrazit in ne povzroči tako močnih padavin (Pristov, 1964).

Pri vzrokih za padavine, ki nastanejo v Sloveniji ob sekundarnih ciklonih, je več komponent, ki različno vplivajo na izdatnost in čas trajanja padavin:

- a) Vpliv prehoda fronte — padavine so lahko po vsej Sloveniji s precej enakomerno intenziteto (Petkovšek, 1964).
- b) Vpliv ciklonalne cirkulacije in s tem dviganje zraka — padavine so predvsem v zahodni Sloveniji; le če se ciklon pomika po poti 5b ali 5c, so možne po celi Sloveniji (Pristov, 1967).
- c) Orografske padavine — te padavine nastanejo predvsem ob gorskih pregradah, ko se zrak ob pobočjih dviga. Intenziteta padavin je lahko zelo velika, posebno če je vertikalna stratifikacija zraka vlažno labilna. Izrazita področja, kjer se pojavljajo te orografske padavine, so: Julijske Alpe, Trnovski gozd z Nanosom, Javorniki in tudi Snežnik. Savinjske Alpe imajo najizdatnejše orografske padavine ob južni smeri zračnih tokov, v manjši meri pa dobi občasno orografske padavine tudi Pohorje.

Padavine zaradi sredozemskega ciklona. Te padavinske situacije lahko trajajo dalj časa. V teh primerih ni izrazitih frontalnih sistemov pri tleh. Padavine nastanejo ponavadi zaradi advekcije toplega in vlažnega zraka ob jugozahodnih oziroma južnih vetrovih. Padavine so tem močnejše, čim večja je vsebnost vlage v zraku, čim izrazitejši so jugozahodni zračni tokovi, čim izrazitejša je splošno dviganje zaradi ciklonalne cirkulacije in dviganja vlažnega zraka ob gorskih preprekah. To so primeri ko dobi največ padavin zahodna in jugozahodna Slovenije. Druga področja dobijo znatnejše padavine le, če se ciklon pomika po poti 5b in 5c. Ta padavinski režim lahko traja tudi dalj časa — nekaj dni.

## PRIMERI MOČNIH PADAVIN NA POREČJU SAVE

Padavine pri sredozemskem ciklonu. Najizrazitejša primera ciklonalnih padavin v tem ciklonalnem razdobju, sta bila 11. 11. 1954 in 25. 9. 1973. Smer vetra v prosti atmosferi je v teh primerih južna oziroma jugozahodna. Glavne padavine dobijo Savinjske Alpe, Snežnik, pa tudi osrednja Slovenija. Kateri kraji, poleg gorskih pretek, dobijo veliko množino padavin, je odvisno od primera do primera. Vsekakor so to lahko tudi nižinski predeli oziroma kraji zunaj gorskih masivov.

Najmočnejše padavine na porečju Save so bile 25. 9. 1973, in sicer ob izrazitem sredozemskem ciklonu. Maksimum je bil na področju Snežnika, Suhe krajine in Savinjskih Alp (slika 1). Padavine niso enakomerne, temveč so v večjih ali manjših izrazitejših celicah. Med temi padavinskimi celicami so ožja območja, kjer je padlo na isti dan znatno manj padavin, lahko tudi le 1/3 količine iz najbolj namočenih krajev. Značilnost te situacije je, da dobi padavine celotna Slovenije, seveda ponekod več drugod manj.

Primeri padavin pri prehodu fronte z nastankom sekundarnega ciklona. Kadar nastane nad severnim Sredozemljem, največkrat nad Genovskim zalivom, izrazit sekundarni ciklon, se pojavijo v Sloveniji orografske padavine. Sekundarni ciklon nastane ponavadi že pred prodorom hladnega zraka prek Alp, torej še v topli zračni masi (primeri: 29. 10. 1959, 9. 10. 1964, 20. 5. 1969). Nad našimi kraji prevladujejo v takšnih primerih močni jugozahodni vetrovi. Padavine se prično v območju Julijskih Alp ali Trnovskega gozda, včasih lahko tudi v območju Snežnika ali v Savinjskih Alpah, odvisno od smeri vetra v prosti atmosferi. Pri izrazitejših ciklonih nastopijo padavine vsaj en dan pred prehodom fronte in so izrazito orografskega značaja. V takšnih primerih vzhodna Slovenija skoraj nima padavin, v osrednji in zahodni Sloveniji pa padavinsko močno izstopajo hriboviti in gorski predeli (slika 2). Takšna porazdelitev padavin lahko traja tudi do dva dni, odvisno od sinoptične situacije. Cela Slovenija dobi padavine šele pri zamenjavi zračne mase (prehod frontalnega sistema) ali ob pomiku ciklona iznad Genovskega zaliva proti vzhodu (Pristov, 1965).

Te vremenske situacije se pojavljajo pogosto v poznojesenskem času, ko je atmosfera že stabilna in ne pride do neviht. Savica in Kamniška Bistrica imata dnevni maksimum v mesecu oktobru in so v obeh primerih orografske padavine.

Podobne sinoptične situacije se lahko pojavijo tudi v spomladanskih mesecih, vendar padavine tedaj niso izrazito vezane na relief, ker že pride do formiranja nevihtnih oblakov in lahko potuje nevihtna celica tudi razmeroma daleč od gorske prepreke. V takšnih primerih ne nastanejo padavine samo zaradi dviganja zraka ob preprekah, temveč so padavine pogojene dodatno z labilnostjo ozračja, torej so padavine v teh primerih delno orografske, delno konvektivne.

Primeri padavin ob prehodu hladnih front. Poznamo zelo različne vplive prehodov hladnih front prek Slovenije. Nekatere hladne fronte povzročijo le pooblačitev ali le padavine v severovzhodni Sloveniji. To so predvsem fronte, ki preidejo naše kraje ob severozahodnih vetrovih. Nekateri prehodi front povzročijo manjše oziroma kratkotrajne padavine po vsej Sloveniji in nas v tem primeru ne zanimajo. Ostanje torej prehodi front, ki povzročajo intenzivne padavine. To so hladne fronte, ob katerih nastane ponavadi val, ki fronto nekoliko zaustavi in zaradi tega lahko trajajo intenzivne padavine tudi prek 12 ur. Pogoja za takšno situacijo sta znatna temperaturna razlika med zračnima masama in vsaj prehodno jugozahodni zračni tokovi nad našimi kraji. Pogosto sta ta pogoja izpolnjena na prednji strani višinske doline. Val na hladni fronti, ki nastane na južnem obrobju Alp, izgine, brž ko se pomakne fronta proti vzhodu. Val nastane zaradi pomika hladnega zraka okoli Alp in v višjih zračnih plasteh prek Alp.

Najpogosteje trajajo v takšnih primerih padavine manj kot en dan, če pa se pojavijo padavine tudi drugega dne, niso to frontalne, temveč pofrontalne padavine.

Te padavine zajamejo celotno Slovenijo (primeri: 11. 9. 1953, 7. 11. 1973 in 28. 9. 1978). Prično se ponavadi v severozahodnih ali severnih krajih in se razširjajo proti jugovzhodu oziroma jugu. Te situacije so lahko v vseh letnih časih, a povzročajo različne množine padavin. Največje množine padavin so jeseni ali poleti, ko je absolutna vlaga v ozračju v poprečju znatno višja kot spomladi ali celo pozimi. V zimskih in tudi spomladanskih mesecih so namreč najvišje dnevne padavine povezane s pojavljanjem izrazite ciklonalne situacije.

V teh izbranih padavinskih primerih niso izrazite orografske padavine, temveč v splošnem dobi osrednja in zahodna Slovenija več padavin kot vzhodni kraji Slovenije (sliki 3 in 4).

Prav pri teh padavinskih situacijah se najbolj pozna celična razporeditev padavin. Maksimalne dnevne padavine ob takšnih situacijah niso vezane na gorske pregrade, temveč so odvisne precej od naključja, kjer se je na hladni fronti najmočnejše razvila padavinska celica. V okolici te padavinske celice so padavine znatno šibkejše. To se pozna tudi na analiziranih padavinskih kartah, kjer so lepo izražene posamezne celice intenzivnih padavin.

Najvišje dnevne padavine. Najvišje dnevne padavine (slika 5), ki so bile kdajkoli v 30 letih od 1950 do 1979 zabeležene na naših postajah, so na večini porečja Save do Krškega med 100 in 140 mm. Nad 140 mm dnevnih padavin so bile v strnjemem področju, to je, razen na posameznih merskih mestih, na obrobju porečja Save do Savinjskih Alp, prek Karavank. Nad 220 mm dnevnih padavin je bilo zabeleženo le v Julijskih Alpah, Bohinjskem področju in na porečju Idrijce.

Podobno porazdelitev nam prikazuje tudi karta (slika 6) za 10.000-letno povratno dobo maksimalnih dnevnih padavin, izračunanih na osnovi podatkov 30-letnega niza od 1950 do 1979. Seveda so v teh primerih vrednosti znatno večje, zelo grobo vzeto za približno 100%. Najvišja vrednost je izračunana za področje Kanina, 610 mm, kar se ujema z že izmerjenimi podatki v Rezijanski dolini.

Na porečju Save ima najvišjo izračunano vrednost Savica, 577 mm. Razen Bohinjskega področja so izračunane 10.000-letne padavine povsod na porečju Save pod 400 mm.

Te izračunane vrednosti, kakor tudi maksimalne dnevne padavine v 30-letnem razdobju, pomenijo najvišje vrednosti za posamezne točke. Predhodna razglabljanja pa so pokazala, da povzročajo določene padavinske situacije maksimalne padavine le v posameznih predelih, nikakor pa ne istočasno nad celotnim porečjem Save.

## ZAKLJUČKI

Obdelave sinoptičnih situacij, ki povzročajo na porečju Save zelo močne padavine, so pokazale, da so vzroki za nastanek teh padavin različni. Različne sinoptične situacije povzročajo tudi različno prostorsko porazdelitev padavin. Nikdar se ne zgodi, da bi lahko na isti dan dobilo celotno povodje Save ekstremno močne padavine.

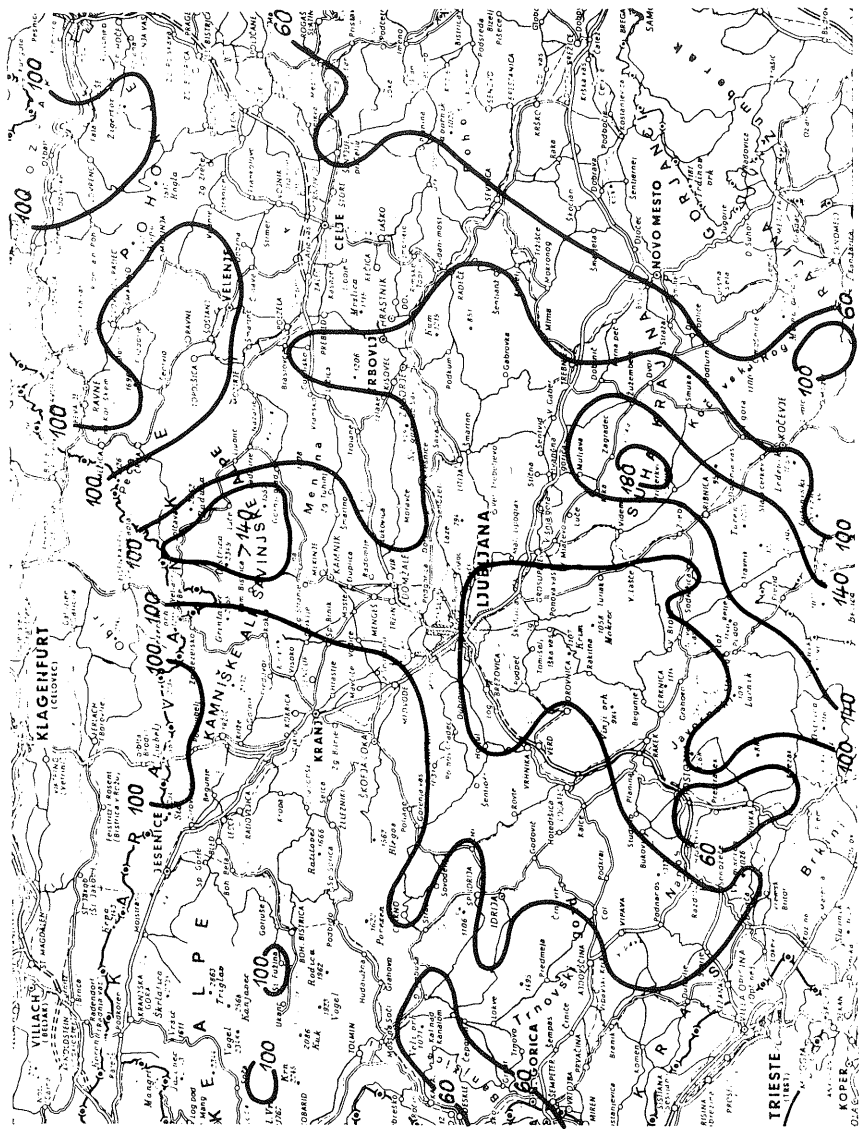
Vsekakor so dnevne padavine na povodju Save lahko intenzivnejše, kot smo jih zabeležili pri kakršnikoli sinoptični situaciji v 30-letnem razdobju, vendar imajo kljub temu določeno zgornjo mejo.

Ker so ekstremno močne padavine vezane izključno na posamezne celice, katerih lokacija je odvisna od sinoptičnih situacij in reliefa, lahko predpostavimo, da se te ekstremne padavine pojavljajo v različnih krajih ob različnem času. Če gre za frontalne padavine, moramo upoštevati tudi pomike frontalnih sistemov in s tem v zvezi pomike frontalnih padavin.

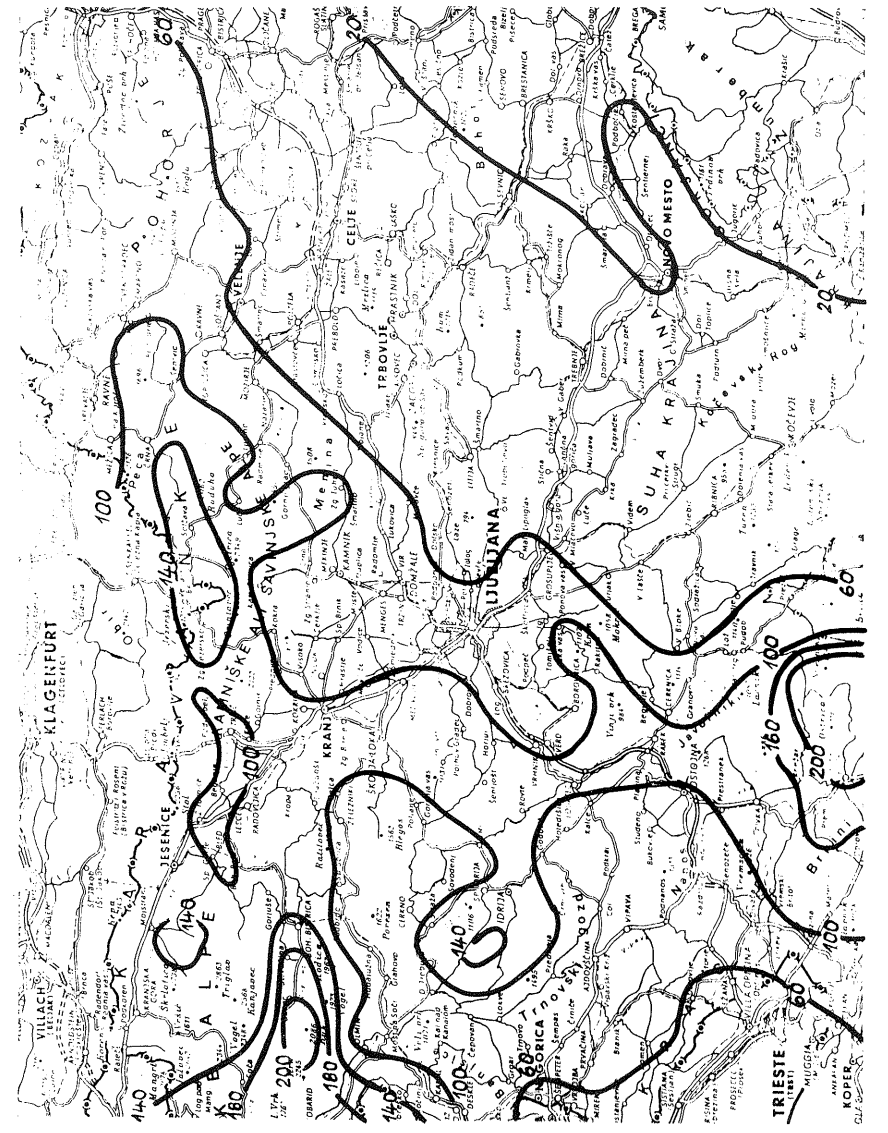
Če želimo oceniti maksimalne padavine za isti dan za 10.000-letno povratno dobo, moramo iz prej navedenih razlogov zmanjšati vrednosti iz slike 6, vsaj za 1/3 do 1/2, da bi dobili oceno teoretično možnih padavin s to povratno dobo za isti dan za celotno porečje Save.

## LITERATURA

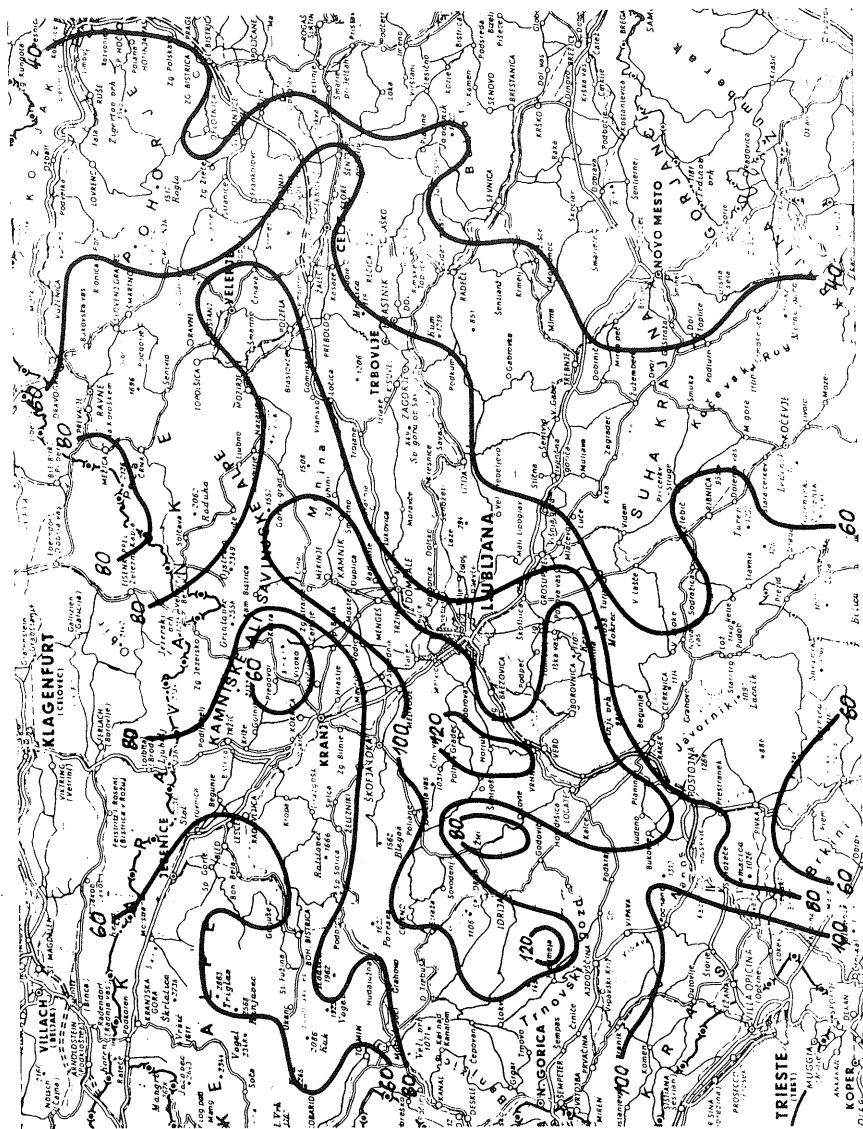
- Reya, O., 1945: Najvišje dnevne padavine v Sloveniji. Zavod za meteorologijo in geodinamiko, Ljubljana
- Jenkinsen, A. F., 1955: The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements Q. J. R. Met. Soc. 87 (1955), 158—171
- Nemec, J., 1972: Engineering hydrology, London
- Chromow, S. P., 1942: Einführung in die synoptische Wetteranalyse, 2. Aufl., Wien
- Petkovšek, Z., 1964: Padavine ob hladnih frontah v Sloveniji, Razprave — Papers IV, Ljubljana
- Pristov, J., 1967: Odvisnost med padavinsko razporeditvijo in temperaturo in vetrovi na višinah, Razprave — Papers IX, Ljubljana
- Pristov, J., 1964: Količinska kratkoročna napoved padavin, poročilo Skladu Borisa Kidriča (neobjavljeno)
- Pristov, J., 1964: Vremenska dogajanja v zvezi s prodorom hladnega zraka preko Alp in vpliv orografije na padavine. Meteorološki zbornik Ljubljana, 1957
- Pristov, J., 1965: Količinska kratkoročna napoved padavin, Sklad Borisa Kidriča (neobjavljeno)



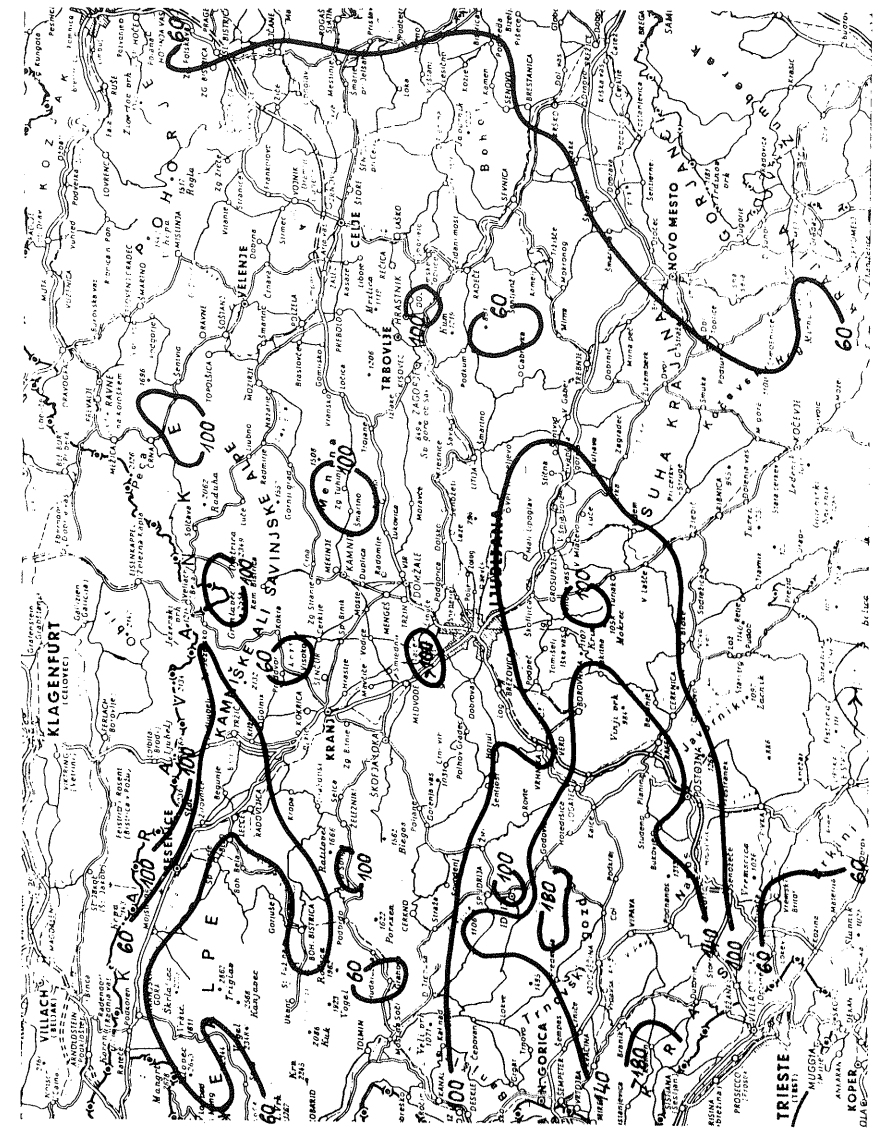
Slika 1: Padavinska karta za dan 25. IX. 1973  
 Fig. 1: Map of daily precipitation on 25. IX. 1973



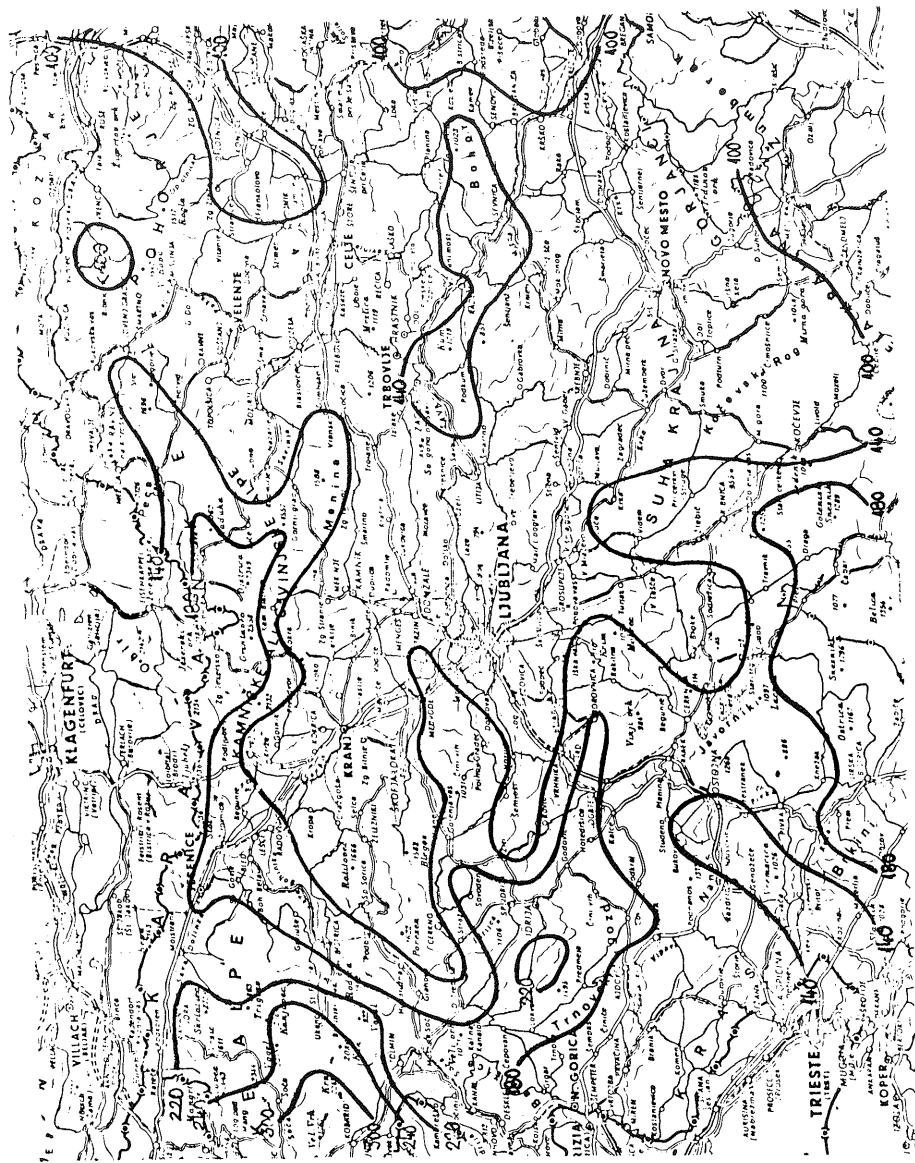
Slika 2: Padavinska karta za dan 9. X. 1964  
 Fig. 2: Map of daily precipitation on 9. X. 1964



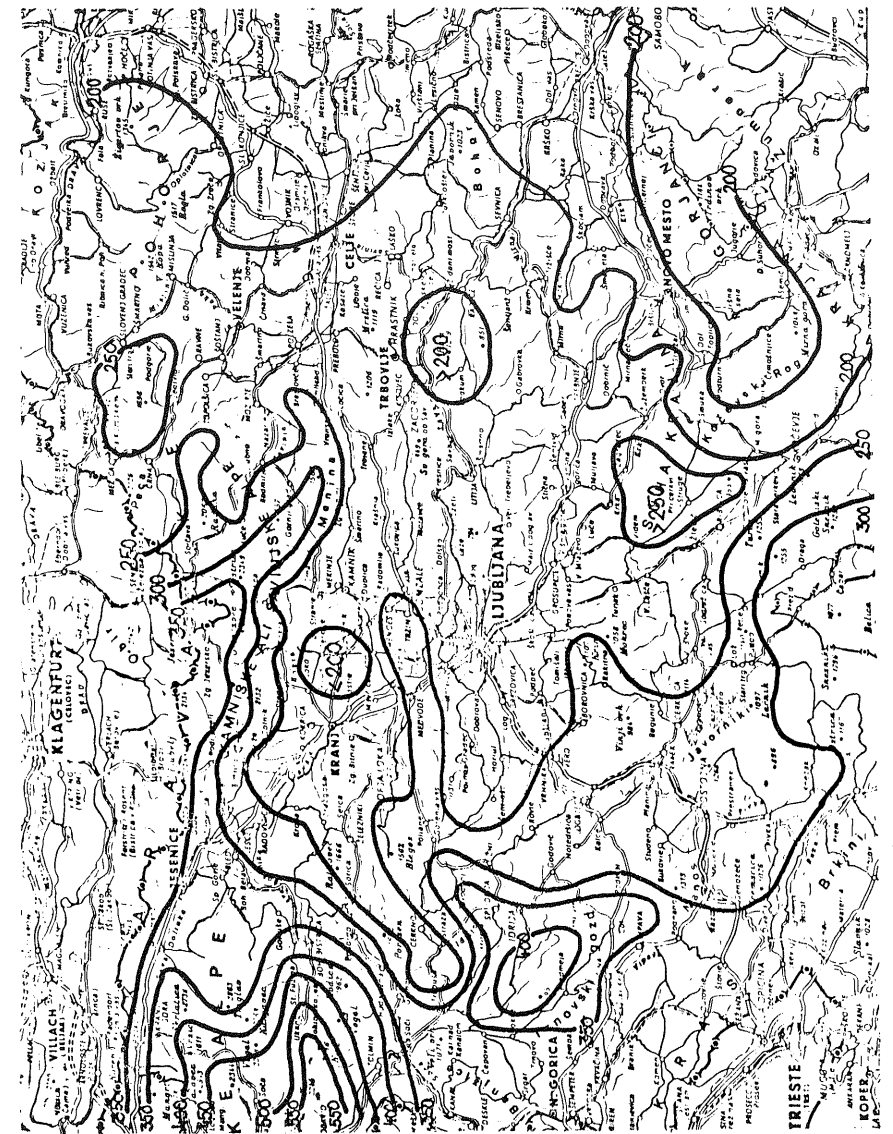
Slika 3: Padavinska karta za dan 28. IX. 1978  
 Fig. 3: Map of daily precipitation on 28. IX. 1978



Slika 4: Padavinska karta za dan 11. IX. 1953  
 Fig. 4: Map of daily precipitation on 11. IX. 1953



Slika 5: Padavinska karta za maksimalne dnevne padavine za 30-letno obdobje od 1950 do 1979  
 Fig. 5: Map of maximal daily precipitation for the 30 year period 1950—1979



Slika 6: Padavinska karta za maksimalne dnevne padavine, izračunana po Gumbelovi metodi za  $T = 10.000$  let  
 Fig. 6: Map of maximal daily precipitation calculated by Gumbel's method for  $T = 10,000$  years



# GRAVITACIJSKI VALOVI V JEZERIH HLADNEGA ZRAKA GRAVITY WAVES IN THE COLD AIR LAKES

Tomaž VRHOVEC  
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.524.77  
UDK 551.511.13

## SUMMARY

Expressions for the phase velocity of the waves that can be visually observed on the upper boundary of an inversion in large basins were derived. For calculation purposes the atmosphere is divided into two layers: „the lake“ of cool air in the basin and the atmosphere above it. These two layers are divided by the inversion layer, which is supposed to be so thin as to be only a region of discontinuity of temperature and wind velocity. Expressions for the phase velocity were derived for the two layers with a constant temperature gradient and as a special case, also for the two layers with constant but different temperatures. The phase velocity for the two isothermal layers is a function of the air pressure at the bottom of the lake, the height of the inversion, the height of the level of subsidence, the temperature difference between the two layers, the wind velocity in and above the lake and the wave number. During numerical analysis of the expression both limits of „shallow“ and „deep water“ were observed. It is also significant that the height of the subsidence layer and the absolute value of the temperatures have only minor influence on the phase velocity. Another interesting fact is that wind velocity affects the phase velocity of the waves with smaller wave numbers less than those with greater wave numbers.

## POVZETEK

Izpeljali smo disperzijski relaciji za valovanje na horizontalni ločnici dveh zračnih plasti, v katerih je vertikalni gradient temperature različen od nič. Za izotermni plasti, vertikalni temperaturni gradient je enak nič, smo izraz podrobneje analizirali. Pokazalo se je, da je fazna hitrost odvisna od dejanskega zračnega tlaka na dnu kotline, višine dvignjene inverzije, temperaturne razlike med plastema, hitrosti vetra v zgornji in spodnji plasti in seveda od valovnega števila. Opaženi sta bili limiti „globoke“ in „plitve plasti“ in absolutni vrednosti temperatur imata na fazno hitrost majhen vpliv, prav tako ima pri dolgih valovnih dolžinah hitrost vetra nad jezerom manjši vpliv na fazno hitrost, kot smo pričakovali.

## UVOD

V tem delu poskušamo prikazati primeren model, s katerim bi pojasnili nekatere lastnosti valovanj, ki jih opazimo na megleni plasti nad kotlinskimi jezeri hladnega zraka. Ta jezera se pojavijo v razgibanem reliefu ob močnem radiacijskem ohlajanju in šibkih vetrovih, tako da se v vdolbinah reliefa nabere hladen zrak, ki nato tam ostane, dokler se ne spremeni sinoptična situacija. V kotlini zbrani zrak je hladnejši od zraka nad njim, na

vertikalnem poteku temperature opazimo inverzijo. Inverzna plast je pogosto tenka v primerjavi z relativno višino inverzije glede na dno kotline, zato lahko govorimo o inverzni plasti kot o gladini jezera hladnega zraka. Zaradi tenkosti inverzije lahko idealizirano rečemo, da je le-ta pravzaprav le ločnica med hladnejšim zrakom v jezeru in toplejšim nad njim. Atmosfero si torej moremo misliti sestavljeno iz dveh različno toplih (gostih) plasti, na ploskvi diskontinuitete pa se ob motnji lahko pojavijo valovanje. V nadaljevanju si bomo pogledali enačbe, ki popisujejo to valovanje, pregledali bomo pogoje, ki omejujejo rešitve teh enačb, in tako izpeljali disperzijsko relacijo, določili izraze za fazno hitrost ter izračunali fazno hitrost valovanja pri različnih meteoroloških pogojih.

## PREDPOSTAVKE

Koordinatni sistem orientiramo z osjo Z proti zenitu, os X pa postavimo v smer morebitnega vetra. Prostor naj bo v smeri X neomejen, v smeri Z pa imamo pri  $z=0$  tla in na višini  $z=h$  inverzijo. Vse procese bomo popisovali dvodimenzionalno; v smeri Y sprememb ni. Vektor hitrosti se torej zapiše:

$$\vec{u} = (u, 0, w)$$

hkrati pa velja

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

Pri računanju širjenja gravitacijskih valov so poleg tega običajne še tele predpostavke (Blumen 1971)

- zanemarimo vrtenje Zemlje,
- gibanje zraka je nevskozno,
- poprečno stanje je hidrostatično uravnoteženo,
- procesi so adiabatски (dvigi in spusti po suhi adiabati).

Zaradi megle, ki se ponavadi nabere v inverzni plasti, dvigi in spusti na gladini jezera hladnega zraka ne potekajo po suhi adiabati, saj pride pri spremembah višine gladine do faznih sprememb. Hkrati pa so odmiki gladine od ravnovesne lege majhni v primerjavi z globino jezera, tako da temperaturne spremembe zaradi dvigov in spustov niso velike. Zaradi tega nadomestimo zahtevo po adiabatčnosti procesov s predpostavko o nestisljivosti zraka (Čadež 1958), torej

$$\text{div } \vec{u} = 0$$

Ker zanemarimo rotacijo Zemlje in viskoznost, lahko zahtevamo, da je časovno poprečje rotorja vektorja  $\vec{u}$  enako nič, tako da je tok potencialen.

## OSNOVNE ENAČBE

Zahtevali smo, da je  $\text{div } \vec{u} = 0$  in  $\text{rot } \vec{u} = 0$ . Zadnja zahteva se reducira v enačbo  $(\text{rot } \vec{u})_y = 0$ , druge komponente rotorja so enake nič zaradi dvodimenzionalnosti. Tako dobimo enačbi enačbi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Z odvajanjem prve po x in druge po z lahko enačbi združimo in dobimo Laplacovi enačbi:

$$\nabla^2 u = 0, \nabla^2 w = 0 \quad (3)$$

Za u in w vpeljemo  $u = U + v_x$  in  $w = v_z$ , kjer je U poprečna hitrost vetra v smeri X,  $v_x$  in  $v_z$  pa odkloni hitrosti v posamezni smeri; poprečno hitrost v vertikalni smeri pa postavimo enako 0.

Enačbi (3) rešimo z valovnimi nastavkoma

$$\begin{aligned} v_z &= f(z) \sin(k(x - ct) + \varphi) \\ v_x &= f(z) \cos(k(x - ct) + \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

Ta nastavka izberemo iz dveh razlogov: na ta način dosežemo, da je časovno poprečje  $(\text{rot } u)_y = 0$ , hkrati pa dobimo na površini potujoče valovanje. Z nastavkoma (4) pretvorimo enačbi (3) v navadne diferencialne enačbe, ki jih z upoštevanjem robnih pogojev rešimo. (Od tod dalje se indeks 1 nanaša na količine v jezeru, 2 pa na količine nad njim, indeks j pa lahko nadomesti oba). Robni pogoji za hitrost so takšni:

- za spodnjo plast:  $v_{z1}(x=0) = 0$ ,
- za zgornjo plast lahko postavimo podoben pogoj, če upoštevamo, da nastanejo jezera hladnega zraka večinoma v anticiklonalnih vremenskih situacijah, za katere je značilna močna subsidenčna inverzija. Ta inverzna plast s svojo veliko stabilnostjo preprečuje vertikalna gibanja. Postavimo torej, da velja  $v_{z2}(z=d) = 0$ , kjer je d višina spodnjega roba subsidenčne inverzije.

— na meji obeh plasti pri  $z = h$  smo zahtevali potujoče valovanje, odmike od ravnovesne lege popišemo z  $\beta = \beta \cdot \cos(k(x - ct))$ , tako da je hitrost premikanja ločnice  $\beta = \beta \cdot kc \cdot \sin(k(x - ct))$ . Na meji se sredstvi ves čas in povsod stikata in hkrati ne prihaja do mešanja. Zato so smiselni le izrazi, zakatere velja  $k_1 = k_2 = k$  in  $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi$ . Fazno razliko izberemo enako nič. S faznimi hitrostmi  $c_1$  in  $c_2$  pa je takole. Če zrak v zgornji in v spodnji plasti miruje, potem velja zaradi stikanja in nemešanja sredstev podobno kot za valovno število  $c_1 = c_2 = c$ , če pa se zrak v zgornji plasti giblje s poprečno hitrostjo  $U_2$  v spodnji pa z  $U_1$ , potem mora na ločnici veljati  $c = U_1 + c_1 = U_2 + c_2$ . Vsaka plast „vidi“ sosednjo, kot da se premika s hitrostjo valovanja  $c$ . Z upoštevanjem zgornjih robnih pogojev, polje hitrosti torej zapišemo takole:

$$\begin{aligned} v_{z1} &= A \operatorname{sh}(kz) \cdot \sin(k(x - (c - U_1)t)) \\ v_{x1} &= A \operatorname{ch}(kz) \cdot \cos(k(x - (c - U_1)t)) \\ v_{z2} &= B \operatorname{sh}(k(z-d)) \cdot \sin(k(x - (c - U_2)t)) \\ v_{x2} &= B \operatorname{ch}(k(z-d)) \cdot \cos(k(x - (c - U_2)t)) \end{aligned} \quad (5)$$

Z gibalnima enačbama

$$\rho_j \frac{\partial v_{zi}}{\partial t} = - \frac{\partial p_j}{\partial z} - g \rho_j$$

$$\rho_j \frac{\partial v_{xj}}{\partial t} = - \frac{\partial p_j}{\partial x}$$

je polje hitrosti (5) povezano s poljem pritiska. Za določitev slednjega moramo integrirati enačbi (6) po času. V teh dveh enačbah se prvič pojavi gostota  $\rho$ . Čadež (1959) je tukaj postavil  $\partial \rho / \partial \gamma = 0$ , kot da je atmosfera homogena, v naši izpeljavi pa bomo bolj splošni. Temperaturo popišemo z  $T = T_0 + \gamma z$ , kjer je  $T_0$  temperatura pri  $z = 0$ ,  $\gamma z$  pa je vertikalni temperaturni gradient. S takšno temperaturo izračunamo gostoto, upoštevaje hidrostatično ravnovesje za poprečne razmere in dobimo

$$\rho_j = \rho_{j0} \left( \frac{1 - \gamma_j z}{T_{j0}} \right)^{\alpha_j} \quad (7)$$

kjer sta

$$\alpha_j = (g + \gamma_j R) / \gamma_j R \quad \text{in} \quad \rho_{j0} = p_0 / RT_{j0}$$

Tako izračunano gostoto postavimo v gibalni enačbi (6). Integrala teh dveh enačb nista analitično rešljiva za poljubne vrednosti koeficienta  $\gamma$ , zanesljivo pa sta rešljiva, če sta plasti vsaka posebej izotermni. Tedaj pač velja enostavo

$$\rho_j = \rho_{j0} \cdot \exp(-gz/RT_j)$$

Za izotermni primer se pritiskovni polji zapišeta takole:

$$P_1(x, z, t) = \frac{\rho_{10} \omega_1 A \exp(-a_1 z)}{k^2 - a_1^2} \cdot \left( k \operatorname{ch}(kz) + a_1 \operatorname{sh}(kz) \right) \cdot \psi_1 + \frac{\rho_{10} g}{a_1} \exp(-a_1 z) + p_{10}$$

oziroma

$$P_2(x, z, t) = \frac{\rho_{20} \omega_2 B \exp(-a_2 z)}{k^2 - a_2^2} \cdot \left( k \operatorname{ch}(k(z-d)) + a_2 \operatorname{sh}(k(z-d)) \right) \cdot \psi_2 + \rho_{20} g \exp(a_2 z) + p_{20}$$

Pri obeh izrazih za pritisk smo uporabili naslednje okrajšave:

$$\omega_j = k(c - U_j); \quad a_j = \frac{g}{RT_j}; \quad \psi_j = \cos(kx - \omega_j t);$$

$p_{10}$  in  $p_{20}$  pa sta integracijski konstanti.

Za plasti s temperaturnim gradientom pa dobimo takšne izraze

$$p_1(x, z, t) = A \omega_1 \rho_{10} \psi_1 \int_0^h (1 + b_1 z)^{\alpha_1} \operatorname{sh}(kz) dz = \frac{g \rho_{10} (1 + b_1 z)^{\alpha_1}}{(\alpha_1 + 1) \cdot b_1} + p_{10}$$

in podobno

$$p_2(x, z, t) = B \omega_2 \rho_{20} \psi_2 \int_0^h (1 + b_2 z)^{\alpha_2} \operatorname{sh}(k(z-d)) dz = \frac{g \rho_{20} (1 + b_2 z)^{\alpha_2}}{(\alpha_2 + 1) \cdot b_2} + p_{20}$$

kjer je

$$b_j = \gamma_j / T_{j0}$$

## DISPERZIJSKA RELACIJA

Disperzijsko relacijo izpeljemo iz dinamičnega in kinematičnega pogoja na ločnici pri  $z=h$ .

I. Če v zgornji in v spodnji plasti ni poprečnega toka ( $U_1 = U_2 = 0$ ) na diskontinuiteti, veljata pogoja

$$p_1(x, h + \beta, t) = p_2(x, h + \beta, t)$$

in hkrati še

$$v_{z1}(x, h, t) = v_{z2}(x, h, t)$$

Po daljšem računu, pri katerem upoštevamo, da so amplitude valovanja majhne, dobimo disperzijske relacije

a) če je temperaturni gradient različen od nič

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{G_1 - G_2} \quad (8)$$

kjer so:

$$\rho_j = \rho_{j0} (1 + b_j h)^{\alpha_j};$$

$$G_2 = \frac{k^2 \rho_{10}}{\text{sh}(kh)} \int_0^h (1 + b_1 z)^{\alpha_1} \text{sh}(kz) dz;$$

$$G_2 = \frac{k^2 \rho_{20}}{\text{sh}(k(h-d))} \int_0^h (1 + b_2 z)^{\alpha_2} \text{sh}(k(z-d)) dz$$

b) če sta plasti izotermni

$$\frac{\omega^2}{jk^2} = \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 F_1 - \rho_2 F_2} \quad (9)$$

kjer so

$$\rho_j = \rho_{j0} \exp(-a_j h); F_1 = \frac{k \cdot \text{cth}(kh) + a_1}{1 - a_1^2 / k^2}; F_2 = \frac{k \cdot \text{cth}(k(h-d)) + a_2}{1 - a_2^2 / k^2}$$

II. Če pa  $U_1$  in  $U_2$  nista nič, potem na ločnici velja kombinirani mejni pogoj (Čadež 1958), ki se zapiše takole:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p_1 - p_2) - (U_1 - U_2) \left( \frac{\partial p_1}{\partial x} + g\rho_2 \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + g\rho_2 (v_{z1} - v_{z2}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (p_1 - p_2) - (U_1 - U_2) \left( \frac{\partial p_2}{\partial x} + g\rho_1 \frac{\partial z_1}{\partial t} \right) + g\rho_1 (v_{z1} - v_{z2}) = 0$$

$$\text{kjer je } Z_1 = \int_0^t v_{z1} dt \quad \text{in} \quad Z_2 = \int_0^h v_{z2} dt$$

Po daljšem računu, pri katerem upoštevamo majhnost amplitud valovanja, dobimo takšne rezultate:

a) za plasti s temperaturnim gradientom:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{U_1 G_1 - U_2 G_2}{G_1 - G_2} + \sqrt{\frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{G_1 - G_2} - G_1 G_2} \frac{(U_1 - U_2)^2}{(G_1 - G_2)^2} \quad (10)$$

pri čemer so okrajšave enake kot pri (8)

b) za izotermni plasti:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{\rho_1 U_1 F_1 - \rho_2 U_2 F_2}{\rho_1 F_1 - \rho_2 F_2} + \sqrt{\frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 F_1 - \rho_2 F_2} - \rho_1 \rho_2 F_1 F_2} \frac{(U_1 - U_2)^2}{(\rho_1 F_1 - \rho_2 F_2)^2} \quad (11)$$

kjer so okrajšave enake kot pri (9). Disperzijske relacije (8), (9), (10) in (11) nam kažejo povezavo med meteorološkimi parametri, valovnim številom in krožno frekvenco. Kvocijent  $\omega/k$  je fazna hitrost, odvod  $\partial\omega/\partial k$  pa je grupna hitrost valovanja.

## ANALIZA FAZNE HITROSTI ZA IZOTERMNE PLASTI

V povezavi med  $\omega$  in  $k$  nastopajo naslednji meteorološki in reliefni parametri:

$h$	– višina inverzije nad dnem kotline,
$T_1$	– temperatura jezera hladnega zraka,
$T_2$	– temperatura zraka nad jezerom,
$U_1$	– hitrost vetra v jezeru,
$U_2$	– hitrost vetra nad jezerom,
$nh$	– nadmorska višina dna kotline*,
$P_0$	– zračni tlak na dnu kotline, reduciran na morsk nivo,*
$d$	– ničelni nivo za odmike v vertikalni smeri (višina subsidenčne inverzije).

\* namesto teh dveh parametrov lahko nastopa dejanski tlak na dnu kotline  $p_{00}$

Ti parametri se lahko spreminjajo takole:  $h$  – višina inverzije: za široke kotline, takšne približno ustrezajo zahtevi po neomejenosti, je Petkovšek (1979) določil višine med 100 in 400 metri. Zaradi smiselnosti rezultatov mora biti  $h$  vedno manjši od  $d$ .

$T_1, T_2$  ↔ temperatura zraka v jezeru mora biti vedno nižja od temperature zraka nad njim.  $T_1$  sama pa je določena z meteorološko situacijo, ki omogoča nastanek jezera hladnega zraka: to je zimsko anticiklonalno vreme.

$U_1$  – hitrost premikanja zraka v jezeru smo postavili enako nič, ker v jezerih hladnega zraka ponavadi ni vetra.

$U_2$  – Nad jezerom se zrak lahko premika, vendar zaradi anticiklona ti vetrovi niso močni.

$p_0$  – dejanski pritisk na dnu kotline lahko izračunamo iz reducirane vrednosti pritiska.

$d$  – višina zgornjega ničelnega nivoja za odmike v vertikalni smeri je višina spodnjega roba subsidenčne inverzije, merjeno od dna kotline navzgor, v anticiklonih more biti med 500 in 3000 metri (vse navedbe po Lamb (1972)).

V ilustracijo smo izračunali nekaj primerov z različnimi kombinacijami parametrov pri različnih valovnih dolžinah; rezultati teh računov so predstavljeni v nadaljevanju. Ugotovili smo naslednje:

1. Odvisnost fazne hitrosti od višine subsidenčne inverzije, če so drugi parametri konstantni, je majhna. Slika 1 prikazuje rezultate tega računa za valovne dolžine  $L$  ( $L = 2\pi/k$ ) 500, 1000, 2000, 4000 in 6000 metrov.

2. Če se temperaturi zraka v jezeru in tistega nad njim spreminjata tako, da je nujna razlika stalna, potem se fazna hitrost spremeni le malenkostno, četudi se temperaturi spremenita za več kot deset stopinj (slika 2).

3. Odvisnost fazne hitrosti od hitrosti poprečnega toka v zraku nad jezerom: fazna hitrost sledi naraščajoči hitrosti vetra, vendar to sledenje ni enako za vse valovne dolžine. Pri manjših hitrostih vetra se valovi premikajo hitreje od vetra, razlika med hitrostma pa se z naraščajočo hitrostjo vetra manjša. Dolgi valovi se pri majhnih hitrostih vetra sicer gibljejo hitreje od kratkih, vendar za njimi pri večjih hitrostih zaostanejo. Zanimivo je, da se fazna hitrost valov z dolžino 6000 metrov spremeni le za slaba 2 m/s, četudi se hitrost vetra spremeni za 10 m/s.

4. Spreminjanje fazne hitrosti valovanja v odvisnosti od višine inverzije pokaže pričakovane lastnosti: za jezera z majhno globino je spreminjanje fazne hitrosti, posebno še za dolge valovne dolžine, precejšnje; pri globljih jezerih pa se doseže limita „globoke vode“, mejno razmerje  $h/L$  je približno 0.2.

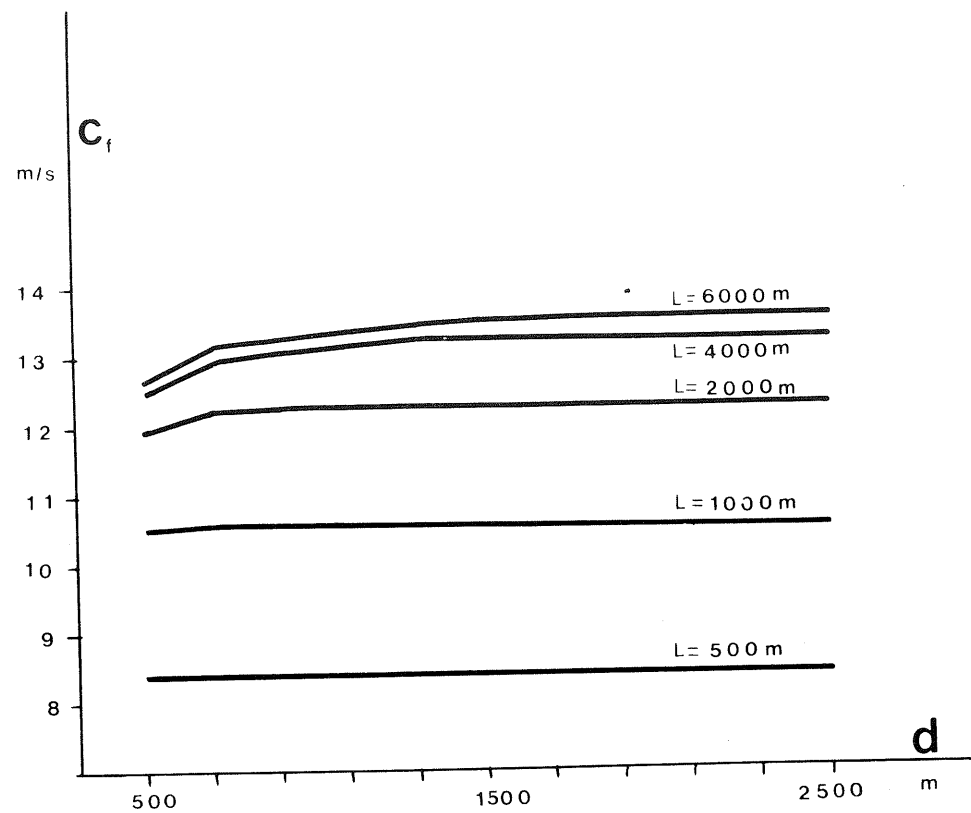
5. Spreminjanje fazne hitrosti glede na spreminjanje temperaturne razlike med plastema – pri čemer je temperatura zraka v jezeru konstantna (slika 5) – pokaže, da fazna hitrost dolgih valov z naraščajočo razliko temperatur narašča nekoliko hitreje od fazne hitrosti kratkih valov.

6. Slika 6 prikazuje spreminjanje fazne hitrosti kot funkcijo valovne dolžine. Družina krivulj se loči po razliki temperatur in po hitrosti vetra. Za vse krivulje je značilno, da se pri dolgih valovnih dolžinah fazna hitrost ustali, globina jezera je namreč le 200 metrov, dosežena je torej limita „plitve vode“. Prav tako je za vse krivulje značilno, da je fazna hitrost za primere z vetrom večja od fazne hitrosti tistih brez vetra, vendar razlike niso enake pri vseh valovnih dolžinah. Pri kratkih valovnih dolžinah naraščajo krivulje za primere brez vetra hitreje od tistih z vetrom, pri daljših pa se krivulje primerov z vetrom hitreje ustalijo, tako da maksimalne razlike v hitrostih nastopijo pri  $L$  je približno 2000 metrov.

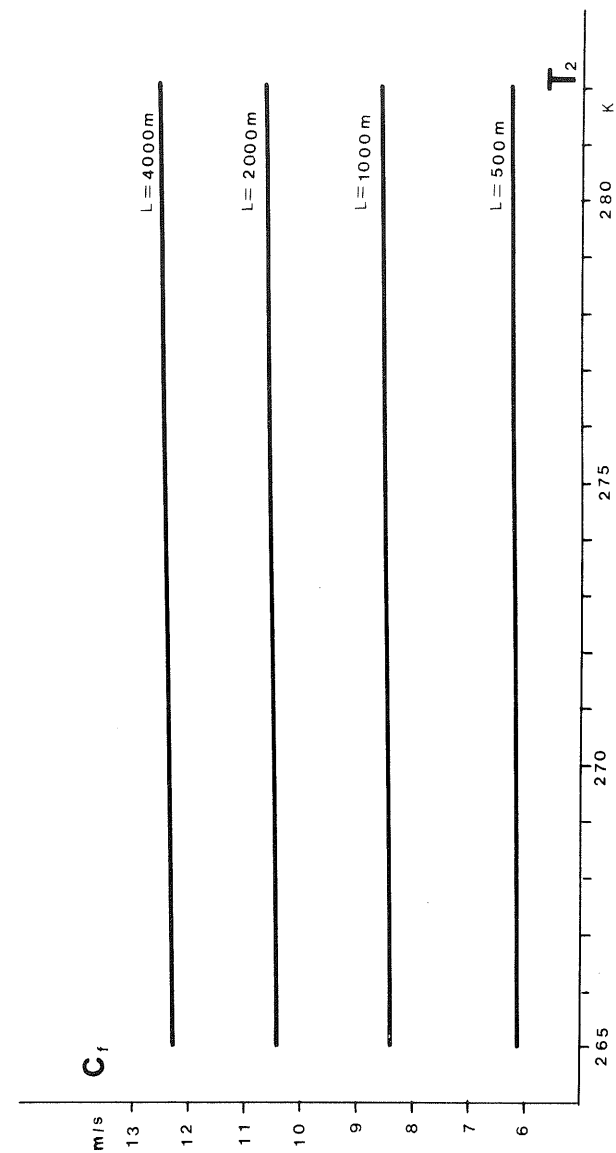
Zahvaljujem se prof. dr. Z. Petkovšku, ki me je opozoril na problem.

## LITERATURA

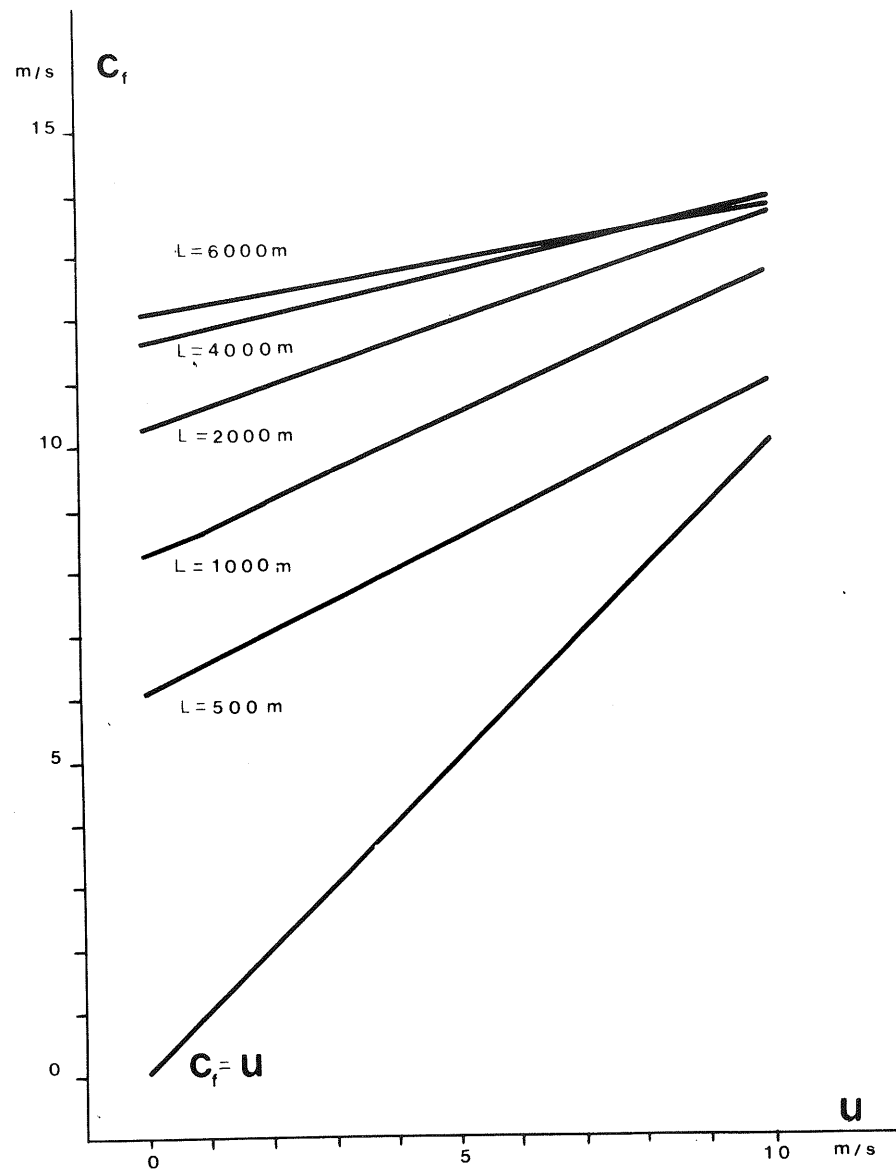
- Čadež, M., 1959: Uvod u dinamičko meteorologiju I. deo, Savez studenata Prirodno matematičnog fakulteta Beograd, Beograd
- Lamb, H. H., 1972: Climate: present, past and future, volume I, Meuthen, London
- Petkovšek, Z., 1979: Emisijski potencial  $SO_2$  za večino kotlin Slovenije, Razprave Društva meteorologov Slovenije, vol 23, no 1, 37–47.
- Blumen, W., 1979: Hydrostatic neutral waves in paralel shear flow of stratified fluid, J. Atmos. Sci., vol 28, no 3, American Meteorological Society



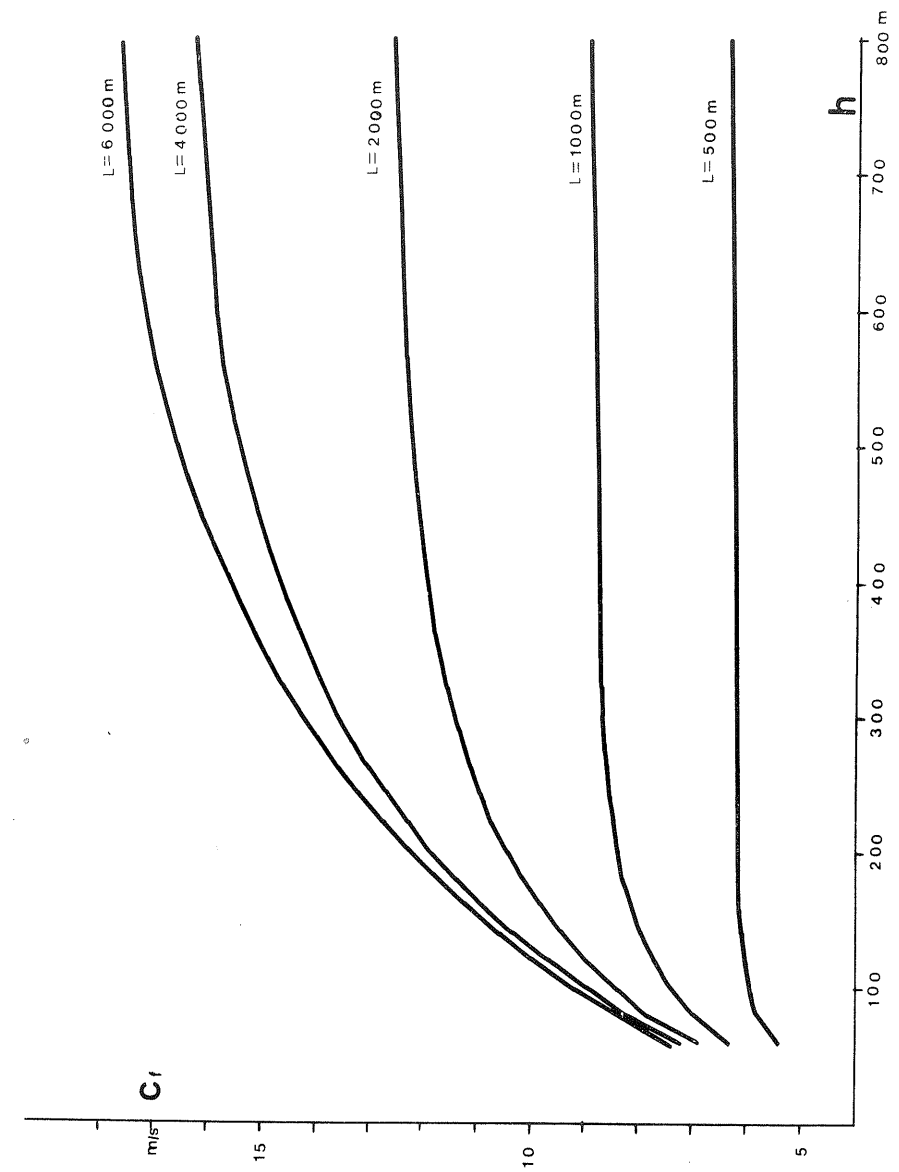
Slika 1 Fazna hitrost kot funkcija višine subsidenčne inverzije  $T = 270\text{K}$ ,  $T = 277\text{K}$ ,  $h = 200\text{ m}$ ,  $U = 4\text{ m/s}$ ,  $p = 1030\text{ mb}$ , nadmorska višina dna kotline je  $300\text{ m}$  (zadnja dva parametra sta enaka tudi pri naslednjih slikah)  
 Fig. 1 Phase velocity as function so the heihat of the subsidence layer,  $T = 270\text{K}$ ,  $T = 277\text{K}$ ,  $h = 200\text{ m}$ ,  $U = 4\text{ m/s}$ ,  $p = 1030\text{ mb}$ , the altitude of the basin is  $300\text{ m}$ . (Last two parameters are also valid for the other Figures)



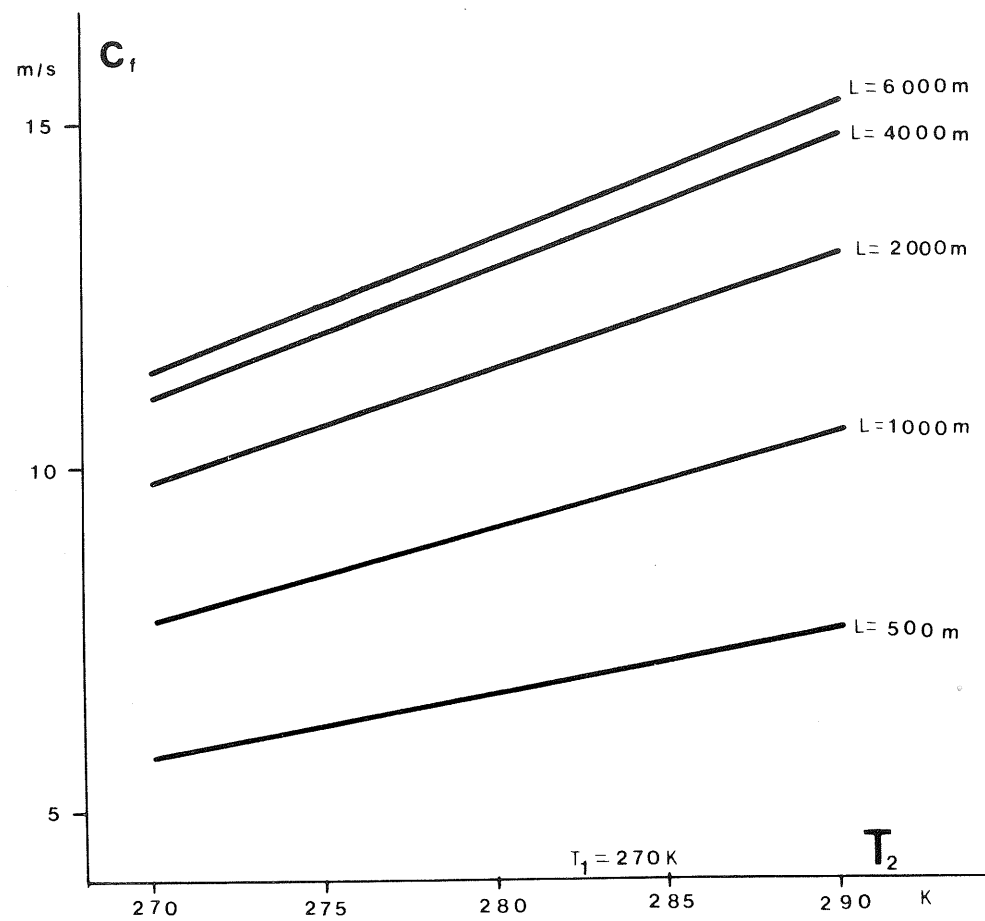
Slika 2 Spreminjanje fazne hitrosti v odvisnosti od temperature zraka, če je razlika med temperaturama plasti konstantna.  $U = 0\text{ m/s}$ ,  $d = 1500\text{ m}$ ,  $H = 200\text{ m}$   
 Fig. 2 Phase velocity as a function of temperature; the difference between the temperatures of the two layers is constant.  $U = 0\text{ m/s}$ ,  $d = 1500\text{ m}$ ,  $h = 200\text{ m}$



Slika 3 Spreminjanje fazne hitrosti v odvisnosti od hitrosti poprečnega toka v zgornji plasti.  $T = 277\text{K}$ ,  $T = 280\text{K}$ ,  $h = 200\text{ m}$ ,  $d = 1500\text{ m}$   
 Fig. 3 Phase velocity as function of the velocity of the mean flow in the upper layer.  $T = 277\text{K}$ ,  $T = 280\text{K}$ ,  $h = 200\text{ m}$ ,  $d = 1500\text{ m}$

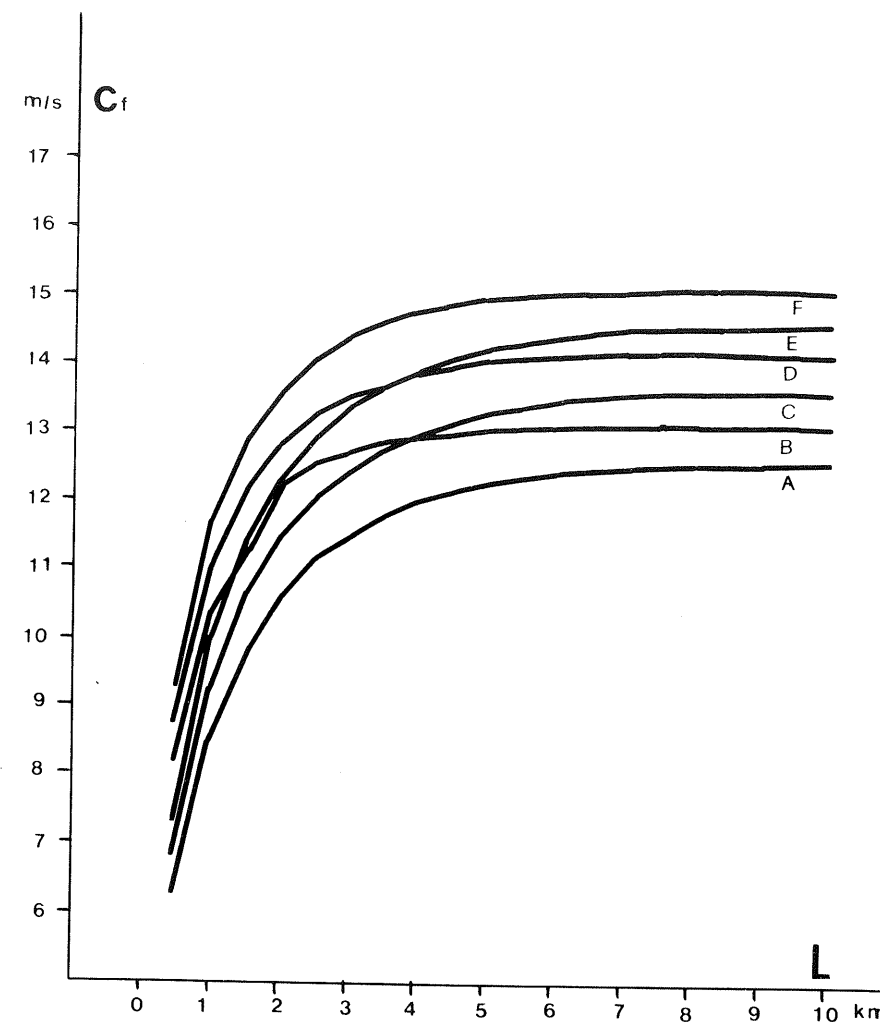


Slika 4 Fazna hitrost kot funkcija višine inverzije.  $T = 273\text{K}$ ,  $T = 277\text{K}$ ,  $u = 0\text{ m/s}$ ,  $d = 1500\text{ m}$   
 Fig. 4 The dependance of the phase velocity on the height of the inversion.  $T = 273\text{K}$ ,  $T = 277\text{K}$ ,  $U = 0\text{ m/s}$ ,  $d = 1500\text{ m}$



Slika 5 Spreminjanje fazne hitrosti v odvisnosti od temperature zraka v zgornji plasti.  
 $T = 270$  K,  $U = 0$  m/s,  $h = 200$  m,  $d = 1500$  m.

Fig. 5 Phase velocity as a function of the temperature of the upper layer.  
 $T = 270$  K,  $U = 0$  m/s,  $h = 200$  m,  $d = 1500$  m



Slika 6 Odvisnost fazne hitrosti od valovne dolžine, hitrosti poprečnega toka in temperature zgornje plasti,  $h = 200$  m,  $d = 1500$  m  
 (krivulje A, C in E so za primere brez vetra, pri ostalih je  $U = 4$  m/s)

Fig. 6 Phase velocity as a function of wave length with the upper layer's temperature and mean velocity as parameters,  $h = 200$  m,  $d = 1500$  m  
 (functions A, C and E are for the cases without wind, others with  $U = 4$  m/s)



## VPLIV MESTA CELJE NA PRIZEMNO CIRKULACIJO ZRAKA V ZIMSKIH MESECIH

### INFLUENCE OF THE CITY OF CELJE ON GROUND LEVEL CIRCULATION IN THE WINTER MONTHS

Tone ZUPANČIČ, Boris ZUPANČIČ  
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.588.7

#### SUMMARY

The objective of this paper is research on the wind and temperature conditions in the Celje basin in wintertime. The basis for this study were hourly measurements of these two parameters at five points in the basin, measurements of temperature at Miklavški hrib, which lies 140 m above the floor of the basin on its south border, and some measurements of temperature in 25 localities in the basin. We analysed temperature inversions and the distributions of the hourly temperature data. On the basis of the measurements of the temperature in the basin, we estimated the horizontal gradient of temperature in the heat island. We also analysed the wind direction in the basin, and the influence of the heat island on the air circulation in cases when a temperature inversion was present.

#### POVZETEK

V tem prispevku smo prikazali vetrovne in temperaturne razmere v Celjski kotlini v zimskih obdobjih 1980/81, 1981/82. Osnova analizam so bile meritve urnih vrednosti teh dveh parametrov na petih merilnih mestih v kotlini, meritve temperature na Miklavškem hribu, ki leži 140 m višje na robu kotline ter dodatne, občasne terenske meritve temperature. Najprej smo naredili frekvenčno analizo temperaturnih inverzij po času pojavljanja in po jakosti ter analizirali porazdelitve urnih vrednosti temperature zraka. Na osnovi meritev v kotlini smo ocenili horizontalni temperaturni gradient v toplotnem otoku. V izbranih primerih smo analizirali vetrovne razmere ter vpliv toplotnega otoka na cirkulacijo zraka.

#### UVOD

Mesto Celje leži na južnem robu kotline z nadmorsko višino okrog 240 m. Kotlina je na mejnem območju med alpskim in panonskim svetom in se razprostira okrog 25 km v smeri vzhod-zahod in okrog 5 km v smeri sever-jug. Na južni in zahodni strani se teren dvigne od 800 do 1000 m nadmorske višine. Proti severu je položno hribovje do 600 m nadmorske višine in se nadaljuje v Paški Kozjak (1273 m). Proti vzhodu in severovzhodu se razprostira gričevje od 400 do 500 m nadmorske višine.

Velike koncentracije škodljivih snovi (Arhiv HMZ), ki se pojavljajo v Celjski kotlini, povzročajo precej nevšečnosti tamkajšnjemu prebivalstvu, zato so se lotili postopne sanacije

obstojećih razmer. Projekt „Model sanacije ozračja v urbanizirani kotlini“ je v šestih raziskovalnih nalogah celovito obravnaval to problematiko. V ta namen so bile opravljene nekatere dodatne meritve meteoroloških parametrov na območju Celjske kotline. V novembru 1980 smo na petih mestih pričeli z meritvami vetra in temperature, ki smo jih zaključili marca 1982. Razpoložljivi podatki so obdelani po urnih vrednostih. Merili smo na naslednjih mestih:

- 1 – Meteorološka postaja Lava
- 2 – Nova vas
- 3 – Pri Cinkarni
- 4 – Pod gradom
- 5 – Partizanska cesta

Na sliki 1 so razvidne lokacije teh postaj. Lokacije smo izbrali predvsem za ugotavljanje cirkulacije zraka, zato smo temperaturno polje ugotavljali še z občasnimi dodatnimi meritvami temperature zraka na 25 točkah v mestu in na periferiji.

V tem prispevku smo se omejili na prikaz rezultatov za hladno obdobje leta in upoštevali podatke za november, december, januar in februar v sezonah 1980/81 in 1981/82. Za ta čas smo obdelali tudi termograme z meteorološke postaje na Miklavškem hribu, da smo lahko ugotavljali temperaturno razliko med postajami v kotlini in na hribu.

## TEMPERATURNE RAZMERE

Temperaturna inverzija, ki je vzrok za oblikovanje zaprtega sistema kotlinske atmosfere s posebnimi fizikalnimi zakonitostmi, je v Celjski kotlini pogost pojav. Stekanje in nato zadrževanje hladnega zraka nastaja pri sinoptičnih situacijah lepega vremena s šibkimi višinskimi vetrovi prek celega leta. Temperaturne inverzije smo v Celju merili v dveh etapah s temperaturno radiosondo, ki je bila pritrjena na vezan balon. Na ta način smo ugotavljali višino inverzije, trajanje inverzije in gradient temperature na posameznih višinah. Meritve so pokazale, da se močne temperaturne inverzije pojavljajo v vseh letnih časih, poprečna višina in trajanje pa je večje v hladnem delu leta. Meritve temperaturnega gradienta ne sovpadajo z obravnavanim obdobjem, zato smo si posredno pomagali s temperaturnimi podatki na meteoroloških postajah Lava in Miklavškem hribu, med katerima je 140 m višinske razlike. Primerjave temperaturnih razlik s podatki, dobljenimi z balonom, kažejo, da so temperaturne razlike zadovoljiv pokazatelj za statistične obdelave inverzij. Primerjava klimatoloških podatkov med Miklavškim hribom in postajo Lava za desetletno obdobje (Zupančič, 1982), je pokazala, da so višje plasti ozračja toplejše (1971–1980), temperaturne inverzije so bolj pogoste v jutranjih in večernih urah (termina ob 7. in 21. uri) in močnejše izražene v hladnem delu leta. Tako je bilo npr. za to obdobje v hladnem delu leta poprečno 1,8 dni, ko je bila temperatura na Miklavškem hribu za več kot 5°C višja od vrednosti na Lavi in 10,6 dni, ko je bila razlika več kot 1°C. Analiza urnih vrednosti temperature za ti dve postaji za hladno obdobje 1980/81 in 1981/82 je pokazala, da je bilo 15 dni, ko je trajala inverzija neprekinjeno 24 ur, medtem ko imamo kar 104 dni, ko je trajala inverzija 16 ur na dan ali več.

Ena od značilnosti večjih urbanih območij je toplotni otok – pojav, ko je mestni del toplejši od periferije. Poleti se toplotni otok pojavlja zaradi intenzivnejšega segrevanja naseljenih področij, pozimi pa je toplotni otok predvsem posledica ogrevanja. Značilna posledica tega pojava je cirkulacija zraka, vezana le na mesto in bližnjo okolico, kar predvsem pozimi negativno vpliva na kvaliteto zraka. Temperaturni gradient med centrom in okolico ima za posledico stekanje zraka in dviganje v sredini, zaradi temperaturne inverzije pa se nato razteka v višini in se spušča proti robu toplotnega otoka.

Primerjave temperaturnih podatkov na petih postajah s statističnimi testi (Cooley in Lohnes, 1971) in faktorsko analizo (Vukadinović, 1973) so pokazale, da so rezultati meritve na postajah Lava, Nova vas in Cinkarna en homogen vzorec, na postajah Pod gradom in na Partizanski cesti pa drug. Glede na to, da sta postaji Pod gradom in na Partizanski cesti bližje mestu, je takšna delitev povsem razumljiva. Glavna značilnost, ki jo kažejo ti rezultati, so velike standardne deviacije v januarju in decembru na vseh postajah, kar pomeni, da je spremenljivost temperatur v tem obdobju največja; to je povezano s pogostostjo pojavljanja in razkranjanja toplotnega otoka in z izrazitostjo tega pojava.

Zaradi obrnobe lege merilnih postaj smo temperaturne razmere v mestu in okolici ugotavljali še z občasnimi dodatnimi meritvami na 25 točkah, ki so bile izbrane v smeri sever–jug in vzhod–zahod. Opravili smo okrog 40 meritev v popoldanskih, večernih in jutranjih urah. Poprečne temperaturne razlike med središčem mesta in periferijo v primerih, ko je pihal šibak veter, so bile okrog 2 K. Pri spremembi sinoptične situacije, ko se je v višjih slojih pojavljal močan veter, so bile temperaturne razlike zanemarljive.

## CIRKULACIJA ZRAKA

Smer in hitrost vetra smo merili z elektronskimi anemografi domače izdelave, ki imajo prag občutljivosti 0,1 m/s. Podatki so urne vrednosti poprečne hitrosti in prevladujoče smeri vetra. Upoštevali smo le tiste primere, ko imamo podatke na vseh petih postajah. Za naše obdobje razpolagamo s 1691 urnimi podatki. Pogostost vetra po smereh smo zaradi lažje prostorske predstave narisali na karto merila 1:50.000.

Na sliki 1 je prikazana pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.). Vidimo, da se posamezne rože vetrov med seboj zelo razlikujejo, čeprav razdalje med posameznimi merilnimi mesti niso velike niti ni med njimi višjih ovir. Vzrok za to je lokacija samih merilnih mest. Postaje Lava, Nova vas in Cinkarna ležijo na samem obrobju toplotnega otoka, kjer se že poznajo zunanji vplivi, postaji Pod gradom in na Partizanski cesti pa sta pod vplivom bližine pobočij. Na vseh postajah so pogosteje zabeležene smeri, ki pomenijo stekanje zraka proti mestnemu središču, čeprav so bile v obdelavi zajete vse sinoptične situacije.

Na sliki 2 so narisane pogostosti vetra po smereh za hitrost vetra 2 m/s in več. Vidimo, da je pri večjih hitrostih vetra vpliv mesta praktično zanemarljiv. Število teh urnih podatkov je bilo med 262 v Cinkarni in 103 Pod gradom. Glede na majhno število močnejših vetrov ti le malo vplivajo na vetrovne razmere, prikazane na prvi sliki.

Na sliki 3 in 4 so prikazane pogostosti vetra po smereh za hitrosti pod 2 in pod 1 m/s. V obeh primerih je opazno izrazito stekanje zraka proti mestnemu središču. Stekanje je nekoliko bolj izrazito pri hitrostih vetra pod 1 m/s, bistvenih razlik med obema slikama pa ni, saj je v poprečju okrog 75% vseh hitrosti pod 1 m/s.

Veter smo obravnavali posebej za primere, ko je bila temperaturna inverzija. Za celodnevno inverzijo smo šteli dneve, ko je inverzija trajala 22 ali več ur na dan. Teh primerov je bilo v obravnavanem obdobju 37. Za dneve z delno inverzijo smo vzeli primere, ko se je inverzija pojavila v 16 do 21 urah in dneva in pri tem ni nastopila sprememba tipa vremena. Takih dni je bilo 67. Na sliki 5 so prikazane pogostosti vetra po smereh za primere s celodnevno inverzijo, na sliki 6 pa primeri z delno inverzijo. Stekanje zraka je izrazito v obeh primerih. Poprečne hitrosti vetra po posameznih smereh so bile v primerih celodnevne inverzije pod 1 m/s, v primerih z delno inverzijo pa okrog 1 m/s.

Dolgo obdobje stabilnega vremena je bilo od 17. 1. do 3. 2. 1981, ko so se v Celju pojavljale močne temperaturne inverzije. Žal za to obdobje nimamo vseh podatkov o vetru. 28. 1. je bila poprečna razlika temperature med Miklavškim hribom in Lavo 5,2 K. Iz sinoptične situacije je razvidno, da je bilo nad srednjo in južno Evropo ustaljeno območje visokega zračnega pritiska. Ob severnih vetrovih je nad naše kraje pritekal hladen zrak. Na 850 mb ploskvi je pihal veter s hitrostjo okrog 8 m/s. Temperatura zraka ob 7. uri je bila na Lavi -17,0°C in na Miklavškem hribu -9,8° C. Stekanje zraka je bilo izrazito, le v zgodnjih popoldanskih urah, ko se je razlika temperatur med Miklavškim hribom in Lavo zmanjšala na okrog 1 K, je prišlo do sprememb v smeri vetra.

## ZAKLJUČKI

Mesto Celje ima zaradi pojavljanja toplotnega otoka močan vpliv na cirkulacijo zraka. Razlike med temperaturami v mestu in periferijo so pozimi ob mirnem vremenu v poprečju okrog 2 K, največje izmerjene razlike pa 5 K. Od 240 obravnavanih dni je bilo kar 104 dni, ko je bila temperatura na Miklavškem hribu vsaj 16 ur na dan višja od temperature na Lavi. Ob temperaturnih inverzijah so bile hitrosti vetra okrog 1 m/s in manj. Z izbranimi petimi merilnimi mesti smo lahko izmerili stekanje zraka, nismo pa mogli ugotoviti vplivnega področja mesta, kar bi bilo potrebno vedeti pri izbiri lokacij objektov, ki onesnažujejo zrak.

## LITERATURA

ARHIV HMZ SR Slovenije

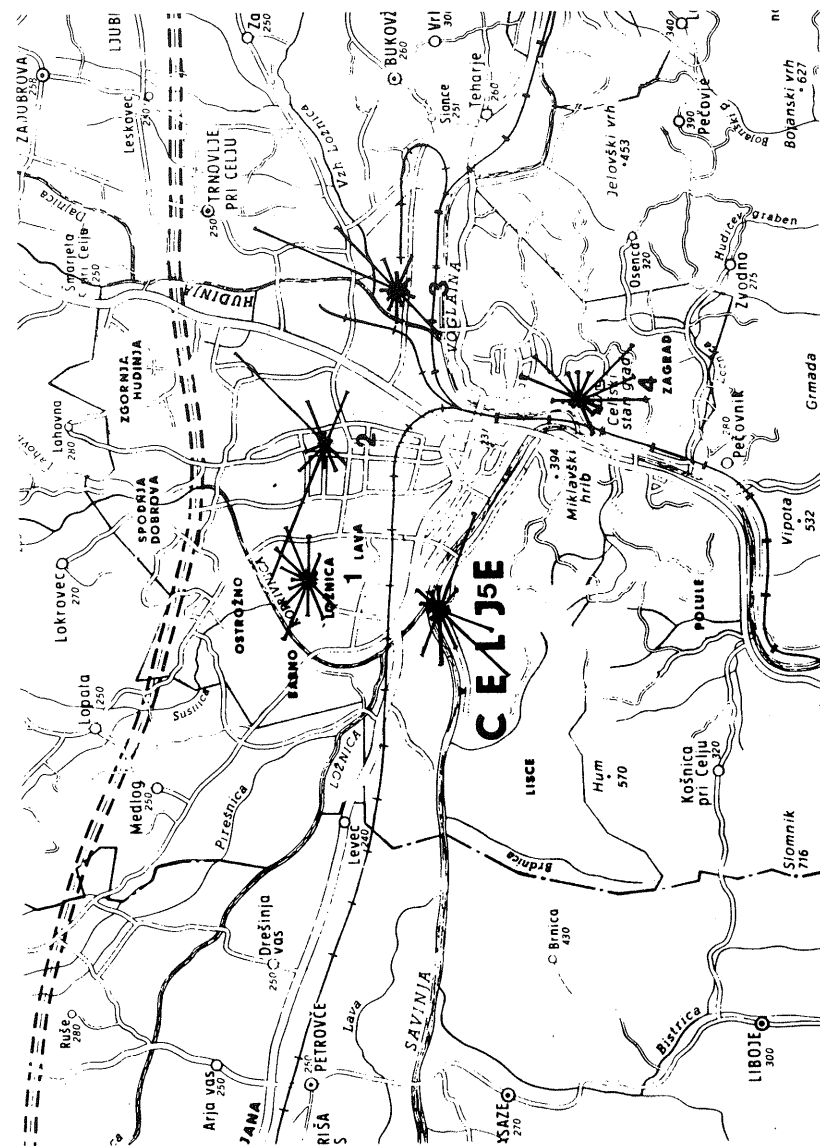
Zupančič, T., s sodelavci: Meteorološke značilnosti Celjske kotline I., II. in III. del Raziskovalne naloge HMZ 1980, 81, 82

Cooley, W. W., Lohnes, P. R.: Multivariate Data Analysis, New York 1971

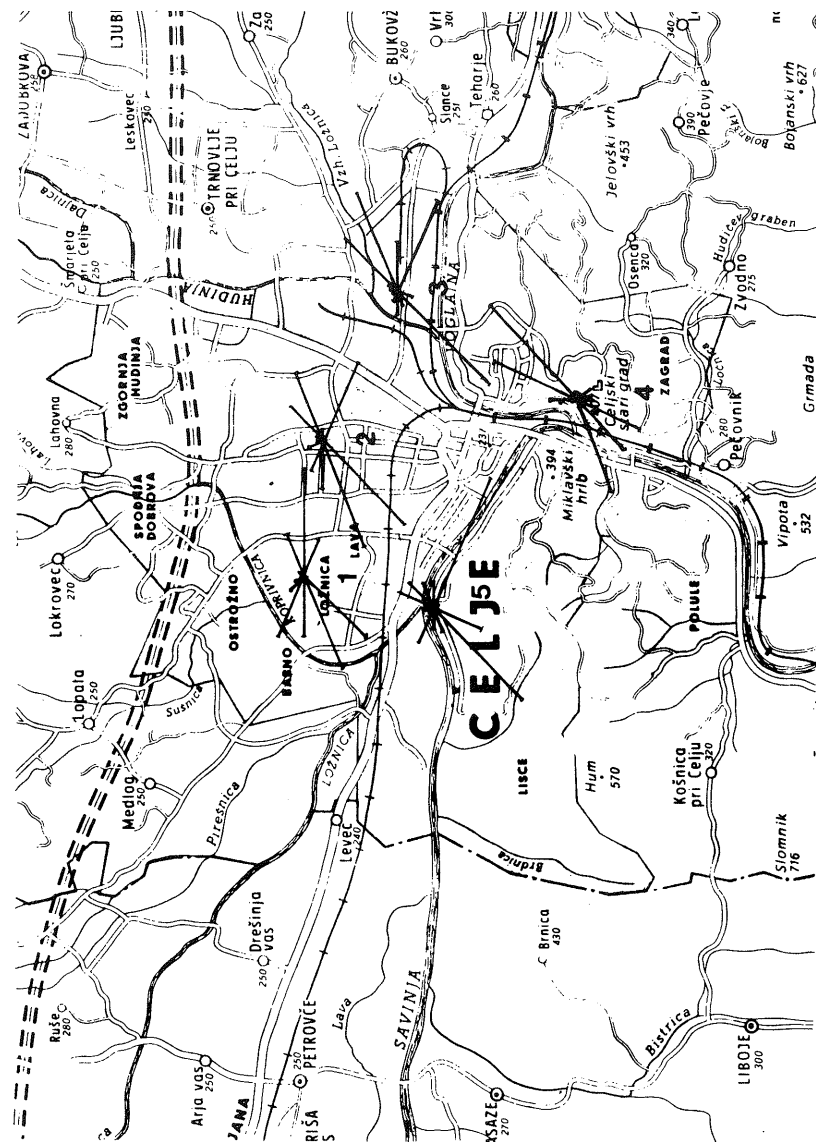
Vukadinović, S.: Elementi teorije verovatnoče i matematične statistike, Beograd, 1973

Petkovšek, Z., s sodelavci: Širjenje onesnaženja zraka v kotlinah, 1-4 faza, Ljubljana 1973-1979, FNT - Poročilo za ISS

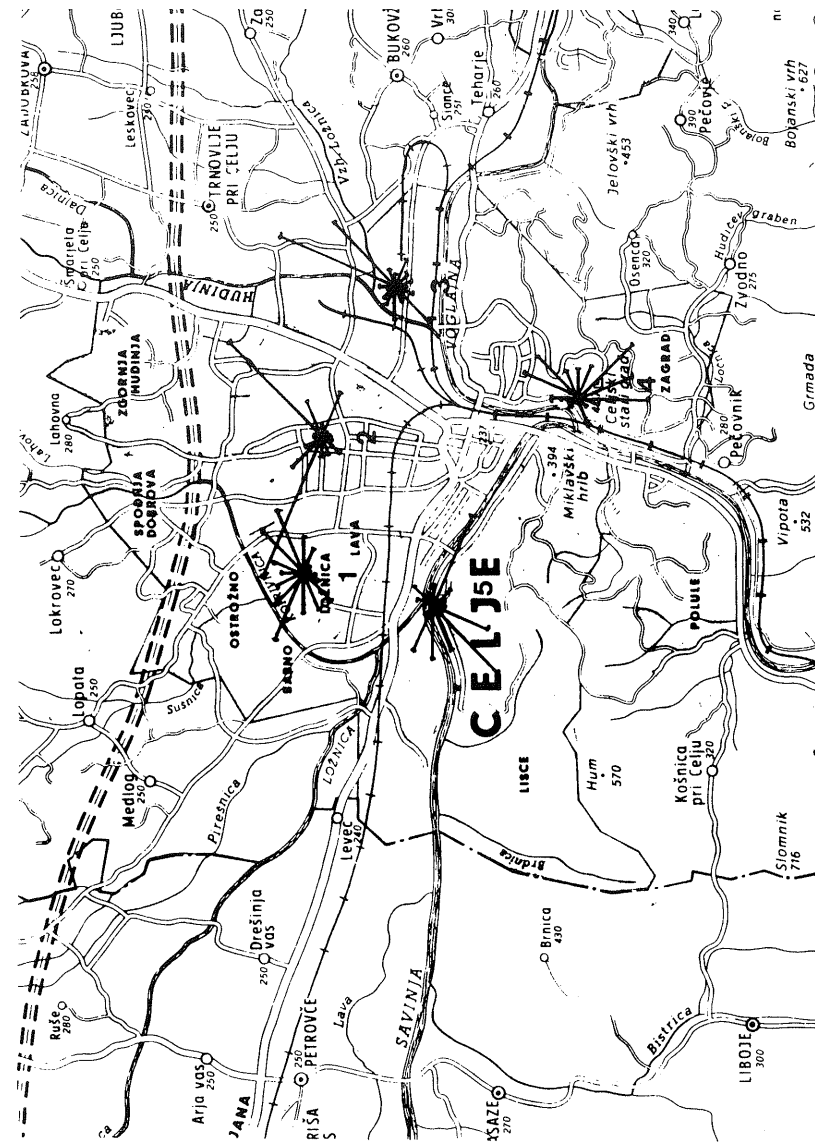
Hočevnar, A., Petkovšek, Z.: Doprinos k poznavanju razmer v jezeru hladnega zraka v Ljubljanski



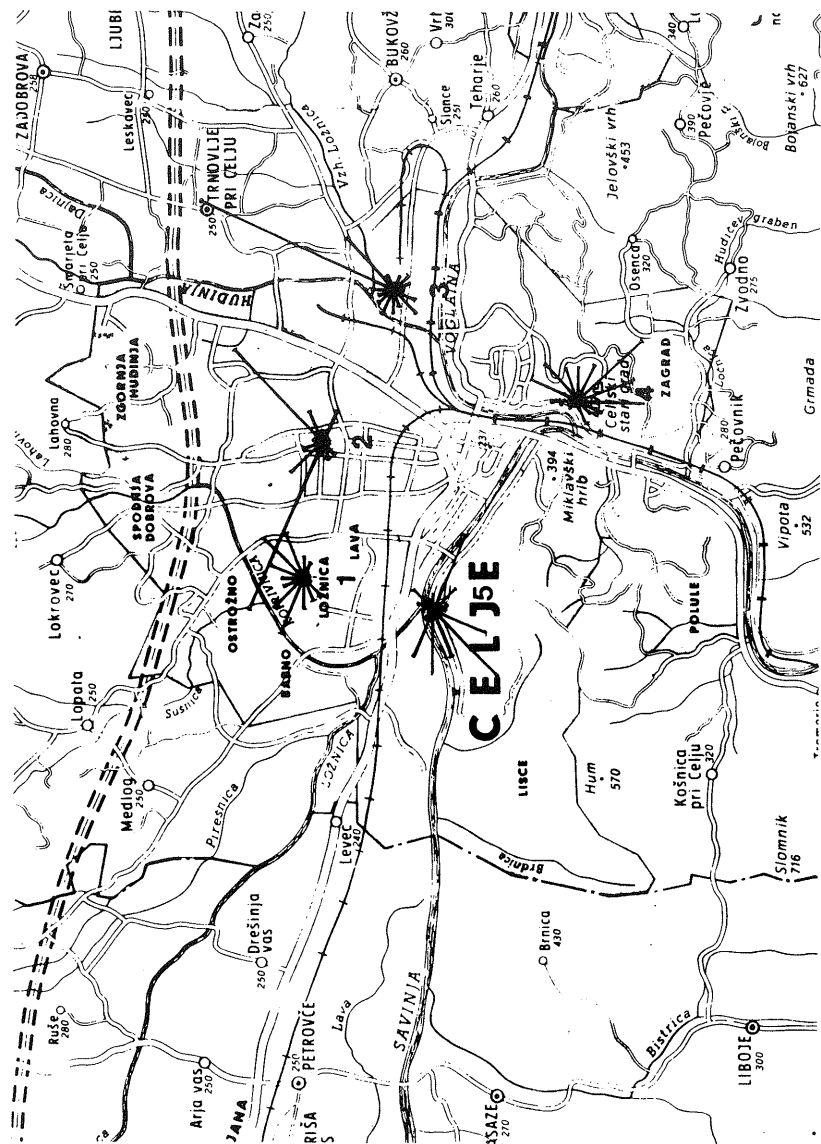
Slika 1 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/81 (nov.-feb.)  
Fig. 1 Wind direction frequency for the winters 1980/81 and 1981/82 (Nov.-Feb.)



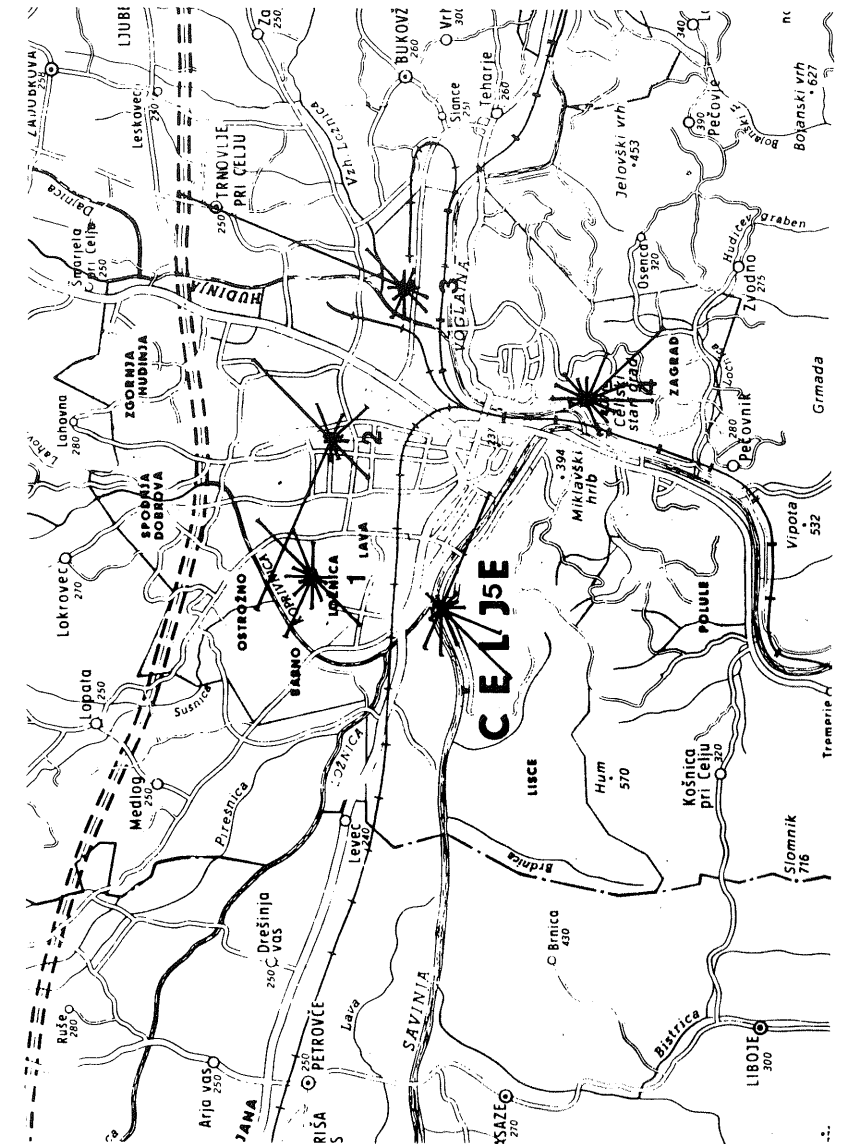
Slika 2 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.).  
Hitrost vetra  $\geq 2$  m/s  
Fig. 2 Wind direction frequency for the winters 1980/81 and 1981/82 (Nov.–Feb.).  
Wind speed  $\geq 2$  m/s



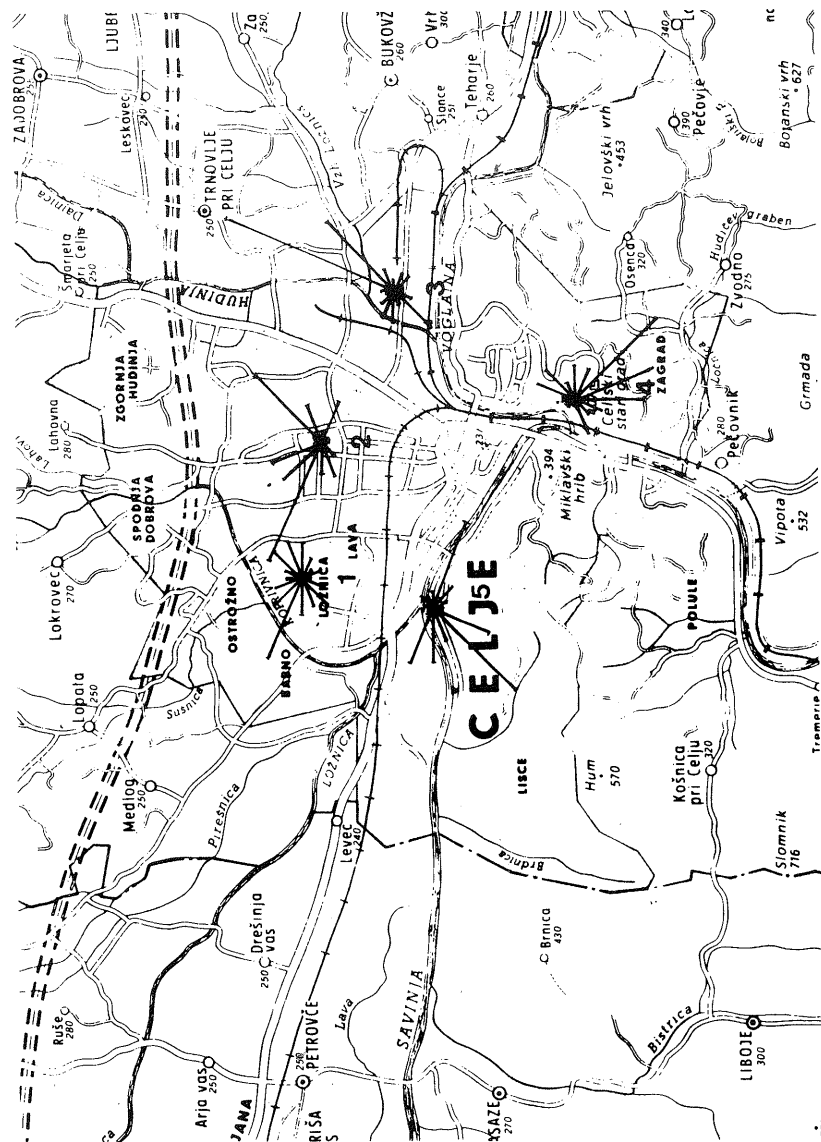
Slika 3 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.).  
Hitrost vetra  $< 2$  m/s  
Fig. 3 Wind direction frequency for the winters 1980/81 and 1981/82 (Nov.–Feb.).  
Wind speed  $< 2$  m/s



Slika 4 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.)  
 Hitrost vetra < 1 m/s  
 Fig. 4 Wind direction frequency for the winters 1980/81 and 1981/82 (Nov.–Feb.)  
 Wind speed < 1 m/s



Slika 5 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.)  
 Primeri s celodnevno temperaturno inverzijo.  
 Fig. 5 Wind direction frequency for the winters 1980/81 in 1981/82 (Nov.–Feb.)  
 Cases with daylong vertical temperature inversion.



Slika 6 Pogostost vetra po smereh za zimi 1980/81 in 1981/82 (nov.–feb.).  
Primeri z delno inverzijo.

Fig. 6 Wind direction frequency for the winters 1980/81 and 1981/82 (Nov.–Feb.)  
Cases of vertical temperature inversion with 15 to 21 hours duration.

## PREPROST MODEL ONESNAŽENOSTI ZRAKA ZA CELJE

### THE SIMPLE URBAN AIR POLLUTION MODEL FOR CELJE

Dušan HRČEK  
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.510.42

#### SUMMARY

The city of Celje, which has 40,000 inhabitants, is situated in a basin, and is quite an industrialised town.

Air pollution in Celje is high because of strong emissions of SO<sub>2</sub> and poor meteorological conditions: temperature inversions and low wind velocities are frequent.

The simple ATDL urban air pollution model that was introduced by Gifford and Hanna in 1971 was applied to estimate average daily SO<sub>2</sub> concentrations in Celje. Predicted concentrations were compared with observed concentrations of SO<sub>2</sub> in 31 grid squares (0.25 km<sup>2</sup>).

The results showed that predicted and observed concentrations are in quite good agreement. But in three grid squares where a sulphuric acid factory, which is a strong SO<sub>2</sub> emitter, is situated the results do not accord with the observed concentrations. It seems that the area source emission supposition is not valid because of the presence of approximately 50 m high chimneys in these squares.

#### POVZETEK

Mesto Celje s 40.000 prebivalci leži v kotlini in ima razmeroma močno industrijo. Predvsem zaradi velike emisije žveplovega dioksida, pogostih temperaturnih inverzij in šibkih vetrov je zrak v Celju onesnažen nad z zakonom dovoljeno mejo.

Za računanje koncentracij SO<sub>2</sub> smo priredili preprost model onesnaženosti zraka ATDL, ki so ga razvili v laboratoriju za atmosfersko difuzijo in turbulenco (ATDL) v ZDA, Hanna S. R. (1971). Izračunane vrednosti smo primerjali z izmerjenimi 24-urnimi poprečnimi koncentracijami SO<sub>2</sub> v 31 kvadratih 500 x 500 m<sup>2</sup> v Celju.

Rezultati kažejo na relativno dobro ujemanje z merjenimi poprečnimi koncentracijami. V treh kvadratih, kjer je največji onesnaževalec zraka z žveplovim dioksidom Cinkarna, ki proizvaja žvepleno kislino, se izračunane vrednosti ne ujemajo z izmerjenimi. V teh kvadratih zaradi razmeroma visokih dimnikov očitno ne velja predpostavka o ploskovnih virih emisije, ki jo uporabljamo v modelu.

## UVOD

Meteorološke razmere, ki vplivajo na atmosfersko difuzijo in transport onesnaženosti zraka v mestih, se precej razlikujejo od meteoroloških razmer v neurbaniziranem okolju. Ob primerjanju lahko na splošno rečemo, da je v mestih površje bolj hrapavo, zrak je toplejši in bolj suh ter bolj onesnažen. Naštete lastnosti povzročajo spremembo drugih meteoroloških količin, kot npr.: vertikalni vetrovni profil, spekter turbulentne energije, vertikalni temperaturni gradient, horizontalna razporeditev temperature zraka (toplotni otok) in spremembe v energijski bilanci površine ter pri količini padavin.

Pri modeliranju onesnaženosti zraka na urbaniziranem področju je potrebno upoštevati meteorološke razmere. Z analizo občutljivosti modelov onesnaženosti zraka glede na spreminjanje posameznih količin v modelu sta Gifford in Hanna (1970) ugotovila, da so najpomembnejše količine: jakost virov emisije škodljivih snovi v zrak, transport s prevladujočim vetrom in vertikalna difuzija, ki je močno odvisna od atmosferske stabilnosti. Pomembna je tudi prevladujoča smer vetra v povezavi z razporeditvijo jakosti virov emisije.

Skupno emisijo škodljivih snovi množice nizkih virov primerno predstavimo, če jo podamo na enoto površine. V primeru mesta obsegajo ploskovni viri: gospodinjstva, majhne industrijske vire in kotlovnice za ogrevanje ter vse druge manjše vire z nizkimi dimniki. Ploskovni viri so po definiciji enakomerno porazdeljeni na razmeroma velikih površinah, zato so lokalne spremembe koncentracije pri tleh majhne v primerjavi s spremembami koncentracije, ki jih povzroča meandiranje dimne sledi iz posameznega točkovnega vira. Tako se emisijska koncentracija škodljive snovi, ki izhaja iz ploskovnih virov v večjih mestih, spreminja le za en velikostni red v obdobju več dni, S. R. Hanna (1971).

V raziskovalnem centru v Oak Ridgeu (Tennessee, ZDA) so primerjali rezultate preprostega modela onesnaženosti zraka ATDL, ki so ga razvili v centru, z rezultati vrste drugih, bolj kompliciranih modelov (F. A. Gifford, 1973). Pri tem so uporabljali baze podatkov, s katerimi so posamezni avtorji predhodno testirali svoje modele. Poprečni korelacijski koeficient med rezultati modela ATDL in dejansko izmerjenimi koncentracijami (13 nizov podatkov) je bil 0.71. Poprečni korelacijski koeficient za rezultate 13 drugih modelov v primerjavi — te rezultate so objavili njihovi avtorji — pa je 0.59. V preprostem modelu ATDL niso posebej upoštevali prispevkov posameznih večjih virov. Pri uporabi modela ATDL za Frankfurt pa so posebej obravnavali točkovne vire za emisijo, ki je večja od 5 kg SO<sub>2</sub>/h. Kljub izboljšavi preprostega modela ATDL se rezultati modela za računanje poprečnih letnih koncentracij SO<sub>2</sub> niso izboljšali. Vrednost korelacijskega koeficienta je namreč padla z 0.83 (pri preprostem modelu ATDL s ploskovno aproksimacijo emisije) na 0.80 pri „izboljšanem“ modelu.

Mesto Celje s 40.000 prebivalci leži v kotlini. Ima močno industrijo. Zaradi razmeroma visoke emisije žveplovega dioksida, pogostih temperaturnih inverzij in šibkih vetrov je zrak v Celju onesnažen nad z zakonom dovoljeno mejo. Od leta 1980 potekajo v Celju raziskave onesnaženosti zraka v okviru projekta „Model sanacije ozračja v urbanizirani

kotlini“. Poleg izdelave katastra onesnaževalcev zraka, meritev onesnaženosti zraka, meteoroloških meritev ter raziskav v zvezi z zdravstvenimi in ekonomskimi posledicami onesnaženosti zraka, je v programu projekta tudi izdelava modela onesnaženosti zraka. Model naj bi bil uporaben za potrebe prostorskega planiranja in za izdelavo programa sanacije kakovosti zraka v mestu v kotlini, poleg tega je model potreben pri izvajanju izrednih ukrepov za zmanjšanje onesnaženosti zraka. Pri izdelavi modela za Celje smo se odločili, da uporabimo za potrebe prostorskega planiranja za osnovo model ATDL, ki je razmeroma preprost in obenem dovolj uporaben, kot so pokazale raziskave v raziskovalnem centru v Oak Ridgeu, F. A. Gifford, 1973.

## PRIREJENI MODEL ATDL ZA CELJE

Model ATDL izhaja iz nekaterih predpostavk, na primer, da vplivajo na koncentracijo onesnaženosti v neki točki mesta le viri emisije na privetni strani te točke. Druga predpostavka je, da je porazdelitev jakosti virov emisije približno enakomerna. Ta predpostavka je v velikih mestih realna, saj jakost ploskovnih virov emisije variira za manj kot en velikostni red na razdaljo nekaj kilometrov, S. R. Hanna, 1971. Približno enakomerno porazdeljena jakost ploskovnih virov emisije dovoljuje, da zanemarimo horizontalno komponento difuzije v primerjavi z vertikalno komponento. Predpostavljamo, da je vertikalna porazdelitev koncentracije onesnaženosti zraka normalna ali Gaussova s standardno deviacijo  $\sigma_z$ . Ponavadi podajajo standardno deviacijo v obliki potence, S. R. Hanna, 1971:

$$\sigma_z = ax^b, \text{ pri čemer je:}$$

x = oddaljenost od vira emisije (m)

a, b sta empirična parametra, ki sta funkciji stabilnosti (dimenzija a je m<sup>1-b</sup>).

Če ima veter konstantno smer in hitrost, je možno z navedenimi predpostavkami izračunati prizemno koncentracijo, npr. po formuli Gifforda in Hanne, 1971:

$$c = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{u} \cdot \frac{(\Delta x/2)^{1-b}}{a(1-b)} \cdot \left\{ Q_0 + \sum_{i=1}^N Q_i \left[ (2i+1)^{1-b} - (2i-1)^{1-b} \right] \right\}, \quad (1)$$

pri čemer je:

c = koncentracija oz. gostota primesi (mg/m<sup>3</sup>)

u = hitrost vetra (m/s)

$\Delta x$  = dolžina osnovnice kvadrata pri popisu emisije

Q<sub>i</sub> = jakost i-tega ploskovnega vira emisije (kg/m<sup>2</sup> s)

N = število kvadratov

Izraz (1) daje prizemno koncentracijo v kvadratu z indeksom i = 0, pri čemer ima sosednji kvadrat proti vetru indeks i = 1.



V mestih, kjer se emisija onesnaženosti v sosednjih kvadratih ne razlikuje veliko in je zato možna predpostavka enake emisije v teh kvadratih, lahko enačbo (1) poenostavimo v obliko:

$$c = K \cdot \frac{Q}{u}, \text{ pri čemer je} \quad (2)$$

$$Q = Q_0 \text{ in} \\ K = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left( \frac{2N+1}{2} \Delta x \right)^{1-b} \cdot \frac{1}{a(1-b)}$$

V Celju se velikost emisije SO<sub>2</sub> v posameznih kvadratih precej razlikuje (tabela 1), kljub temu smo uporabili enačbo (1).

Z modelom ATDL smo izračunali koncentracije in jih primerjali z izmerjenimi koncentracijami žveplovega dioksida v Celju. Glede na to, da razpolagamo z razmeroma natančnimi podatki o vetru, smo enačbo (1) razširili. Poleg tega smo vpeljali faktor I<sub>SO<sub>2</sub></sub>, ki zmanjšuje izračunano koncentracijo SO<sub>2</sub> zaradi kemijskih in drugih odstranjevalnih procesov v atmosferi. Izrazu za koncentracijo smo dodali še člen C<sub>0</sub>, ki predstavlja koncentracijo onesnaženosti „ozadja“. Na ta način popišemo prizemno koncentracijo žveplovega dioksida z enačbo:

$$c = I_{SO_2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{(\Delta x/2)^{1-b}}{a(1-b)} \cdot \sum_{j=1}^M \frac{f_j}{u_j} \cdot \left[ Q_0 + \sum_{i=1}^N Q_{ij} \cdot R \right] + C_0, \quad (3)$$

f<sub>j</sub> = frekvenca smeri vetra

u<sub>j</sub> = poprečna hitrost vetra za smer j (m/s)

M = 16 (število smeri vetra)

Q<sub>ij</sub> = jakost i-tega ploskovnega vira v smeri j (kg/m<sup>2</sup> s)

R = (2i+1)<sup>1-b</sup> - (2i-1)<sup>1-b</sup>

Tabela 1 Emisija SO<sub>2</sub> iz drobnih kurišč, kotlovnice za ogrevanje in industrije v Celju v kurilni sezoni (v 100 kg SO<sub>2</sub>/0.25 km<sup>2</sup>).

Table 1 Source strength data for Celje, mean emission rates in 100 kg SO<sub>2</sub>/0.25 km<sup>2</sup> for heatin season

Opomba: Vertikalni stolpci v tabeli predstavljajo kvadrate 500x500 m<sup>2</sup> v smeri proti severu od spodaj navzgor.

Note: Vertical columns in the Table are grid squares 500x500 m<sup>2</sup> towards the North from down to up.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	457	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	926	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	23	41	65	35	9	38	628	6	21	9	10	0	0	0	0
12	2	4	45	8	95	57	64	31	31	5	13	0	0	0	0
0	19	7	372	187	601	14	263	231	55	16	7	0	0	242	0
0	9	25	108	229	372	168	544	80	2	5	11	0	0	0	0
0	285	53	456	261	655	335	6105	1248	19473	4	17	0	0	0	0
0	0	24	736	240	876	194	74	4	34	8	20	0	0	0	0
0	0	0	2	10	571	82	88	46	0	0	46	46	0	0	0
0	0	0	2	4	18	4	8	8	3	2	4	0	27	96	0
0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0

Z modelom ATDL smo računali poprečno 24-urno koncentracijo SO<sub>2</sub> po enačbi (3). Z izbiro ustrezne frekvenčne porazdelitve smeri in hitrosti vetra ter poprečnih jakosti ploskovnih virov emisije SO<sub>2</sub> lahko računamo koncentracijo tudi za drugačna časovna obdobja.

V enačbi (3) sta dva parametra, ki ju je potrebno posebej določiti. To sta faktor zmanjševanja koncentracije I<sub>SO<sub>2</sub></sub> in koncentracija „ozadja“ C<sub>0</sub>.

S faktorjem I<sub>SO<sub>2</sub></sub> smo v prvem približku popisali odstranjevalne procese v atmosferi, ki zmanjšujejo koncentracijo žveplovega dioksida. F. A. Gifford (1977) navaja podatek za teoretične vrednosti konstante K iz enačbe (2). Vrednosti za labilno, nevtrarno in stabilno atmosfero so enake 50, 200 in 600. Izmerjena poprečna letna vrednost K za polutante, ki ne reagirajo oziroma se ne spreminjajo v atmosferi, za 44 mest v ZDA je 225. Ustrezna izmerjena vrednost za SO<sub>2</sub> pa je 50. Za I<sub>SO<sub>2</sub></sub> smo zato postavili vrednost 50/225. Natančnejšo vrednost smo dobili s kalibracijo modela z izmerjenimi koncentracijami SO<sub>2</sub>. Izkazalo se je, da je vrednost 50/225 za 30% previsoka. Razlog za korekcijo tiči najbrž v dejstvu, da je atmosfera v Celju zaradi kotlinske lege bolj stabilna, kot je poprečna stabilnost v 44 metrih v ZDA.

V enačbi (3) je člen  $C_o$ , ki predstavlja ozadje onesnaženosti zraka z žveplovim dioksidom. Koncentracija ozadja je posledica transporta  $SO_2$  na velike razdalje. Ocenjujemo, da je velikost koncentracije ozadja razmeroma majhna, zato ni smiselno, da bi v modelu onesnaženosti zraka to vrednost posebej računali. Kot prvi približek za  $C_o$  smo uporabili vrednost  $0.04 \text{ mg/m}^3$ , ki sta jo uporabila S. R. Hanna in F. A. Gifford pri modelu onesnaženosti zraka za Frankfurt leta 1977.

Ponavadi uporabljajo pri modelih onesnaženosti zraka mrežo z osnovnico od 0.5 do 10 km. Zaradi same velikosti mesta Celje je primerna dimenzija osnovnice kvadrata 0.5 km. Pri tem pa je vprašljiva predpostavka o ploskovnih virih emisije.

Najbolj je ta predpostavka problematična v primeru Cinkarne, katere glavni proizvod je žveplena kislina in ki ima množico srednje velikih dimnikov z višinami od 50 m. Cinkarna je največji onesnaževalec zraka z žveplovim dioksidom v Celju. Njeno območje je šrafirano na sliki 2. Konec leta 1982 je začel obratovati nov 100 m visok dimnik, ki združuje nekatere posamezne vire onesnaževanja Cinkarne. Ker razpolagamo le z meritvami imisije pred začetkom obratovanja novega dimnika, smo se odločili, da obravnavamo Cinkarno v tej fazi kot ploskovni vir.

#### VHODNI PODATKI V MODEL

V obdobju od oktobra 1980 do marca 1982 so potekale v Celju meritve 24-urnih koncentracij  $SO_2$  na 31 merilnih mestih. Lokacije merilnih mest so bile izbrane tako, da je v enem kvadratu  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  eno merilno mesto. V centru Celja je ta mreža gosta, proti periferiji pa se gostota merilnih mest zmanjšuje.

Osnovna enota popisa emisije je kvadrat Gauss-Krügerjeve koordinatne mreže  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . Računsko območje modela ATDL za Celje zajema  $15 \times 13$  kvadratov.

V okviru raziskovalnega projekta „Model sanacije ozračja v urbanizirani kotlini“ so I. Štefelj in sodelavci leta 1980 zbrali podatke o poprečni ploskovni emisiji žveplovega dioksida v posameznih kvadratih za kurilno in nekurilno sezono. Emisija je podana v treh kategorijah: drobna kurišča (moč je manjša od 1 MW), kotlovnice za ogrevanje (moč je večja od 1 MW) in industrija. Emisija žveplovega dioksida, ki nastaja pri gorenju fosilnih goriv za ogrevanje, je sorazmerna razlika temperature v ogrevanem prostoru in temperature zunanjega zraka (Plassman E. in Zuendorf O. J., 1977). Ob upoštevanju poprečne dnevne temperature zraka lahko iz podatkov o emisiji  $SO_2$  v kurilni in nekurilni sezoni ocenimo emisijo za določen dan v kurilni sezoni. V prvem približku ne upoštevamo tedenskega nihanja emisije in praznikov. Vzamemo, da sta emisiji  $SO_2$  drobnih kurišč in terciarne dejavnosti odvisni le od temperature zunanjega zraka. Poprečno temperaturo ogrevanih prostorov vzamemo za konstanto ( $T_{not} = 20^\circ\text{C}$ ). Industrijsko emisijo žveplovega dioksida zaradi ogrevanja ocenimo tako, da od emisije v kurilni sezoni odštejemo emisijo v nekurilni sezoni. Za razliko emisij vzamemo, da je funkcija temperature. Iz podatkov o sezonski emisiji, ki so v glavnem ocenjeni, ne pa izmerjeni, ni smiselno bolj natančno računanje poprečne dnevne emisije.

Skupno ploskovno emisijo žveplovega dioksida  $E_i$  (kg) za  $i$ -ti dan v določenem kvadratu računskega območja računamo po naslednji enačbi:

$$E_i = (E_{DK} + E_{TK} + E_{IK} - E_{IN}) \frac{(T_{not} - \bar{T}_{di})}{\sum_{d=d_1}^{d=d_n} (T_{not} - \bar{T}_d)} + \frac{E_{IN}}{183} \quad (4)$$

$E_{DK}$	= emisija drobnih kurišč v kurilni sezoni
$E_{TK}$	= emisija terciarne dejavnosti v kurilni sezoni (kotlovnice za ogrevanje)
$E_{IK}$	= emisija industrije v kurilni sezoni
$E_{IN}$	= emisija industrije v nekurilni sezoni
$T_{not}$	= temperatura v ogrevanem prostoru (K)
$\bar{T}_{di}, \bar{T}_d$	= poprečna dnevna temperatura zunanjega zraka (K)
$d_1, d_n$	= prvi in zadnji dan kurilne sezone

Vsota  $(T_{not} - \bar{T}_d)$  se imenuje letni temperaturni primanjkljaj. Z enačbo (4) računamo v modelu onesnaženosti zraka za vsak kvadrat računskega območja vrednost emisije za  $i$ -ti dan kurilne sezone.

V modelu smo uporabili podatke o vetru z merilnega mesta Cinkarna. V enačbi (3) je faktor  $f_j/u_j$ , ki vsebuje podatke o vetru, količina  $f_j$  je pogostost vetra iz smeri  $j$  ( $j=1, \dots, 16$ ), količina  $u_j$  je poprečna hitrost vetra za pripadajočo smer  $j$  v 24-urnem intervalu. Za določanje stabilnosti atmosfere potrebujemo tudi skupno poprečno 24-urno hitrost vetra.

Pri računanju prispevka k emisiji  $SO_2$  zaradi uporabe fosilnih goriv za ogrevanje potrebujemo v enačbi (4) podatek o poprečni dnevni temperaturi. Podatka o temperaturi v Celju smo vzeli z meteorološke postaje na Lavi, ki je na severozahodnem robu mesta. Ta podatek upoštevamo v vseh točkah računskega območja modela enako. Razlike v poprečni dnevni temperaturi na območju modela so namreč zanemarljive glede na prispevek k emisiji žveplovega dioksida oziroma glede na natančnost sezonskih vrednosti emisije po kvadratih. Na osnovi enačbe (4) potrebujemo v modelu tudi podatek o letnem temperaturnem primanjkljaju.

Stabilnost atmosfere je v enačbi (3) podana s parametroma  $a$  in  $b$ . V tabeli 2 so podatki za vrednosti  $a$  in  $b$ , ki sta jih podala F. A. Gifford in S. R. Hanna (1970) pri različnih vrednostih stabilnosti atmosfere po Pasquillu.

Tabela 2 Vrednosti parametrov a in b pri različni stabilnosti atmosfere.  
Table 2 Values of a and b under different meteorological conditions.

Stabilnost atmosfere	Simbol stabilnosti	a (m <sup>1-b</sup> )	b	1-b	$\frac{(\Delta x/2)^{1-b}}{a(1-b)}$ $\Delta x = 500 \text{ m}$
zelo labilno	A	0.40	0.91	0.09	45.66
labilno	B	0.33	0.86	0.14	46.39
nevtravno	C	0.22	0.80	0.20	68.57
rahlo stabilno	D	0.15	0.75	0.25	106.03
stabilno	E	0.06	0.71	0.29	285.01

Pri določanju stabilnostnih razredov smo uporabili podatke o temperaturi zraka na Miklavškem hribu nad Celjem (385 m n. m.) in podatke o temperaturi zraka in hitrosti vetra na Lavi (244 m n. m.). Vogt (1971) je izdelal klasifikacijo stabilnosti atmosfere s 6 stabilnostnimi razredi na osnovi razlik temperature med višinama 120 in 20 m na stolpu. Na osnovi te klasifikacije smo izdelali klasifikacijo za 140 m višinske razlike s 5 stabilnostnimi razredi. Stabilnostni razred F (zelo stabilno) smo izpustili, ker v literaturi nismo našli vrednosti parametrov a in b za ta stabilnostni razred. Pa tudi poprečna dnevna stabilnost atmosfere razreda F je v mestu malo verjetna.

Tabela 3 Prirejena klasifikacija stabilnosti atmosfere po Vogtu  
Table 3 Classification of atmospheric stability based on the values given by Vogt

Hitrost vetra (m/s)	temperaturni gradient $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ med višino 140 m in 2 m						
	$\leq 2.0^{\circ}$	od -1.9 do -1.6	od -1.5 do -1.3	od -1.2 do -1.0	od -0.9 do 0.0	od 0.1 do 0.3	$< 3.0^{\circ}$
$u < 1$	A	A	B	C	D	E (F)	E (F)
$1 \leq u < 2$	A	B	B	C	C	E (F)	E (F)
$2 \leq u < 3$	A	B	C	D	D	E	E (F)
$3 \leq u < 5$	B	B	C	D	D	D	E
$5 \leq u < 7$	C	C	D	D	D	D	D
$u \geq 7$	D	D	D	D	D	D	D

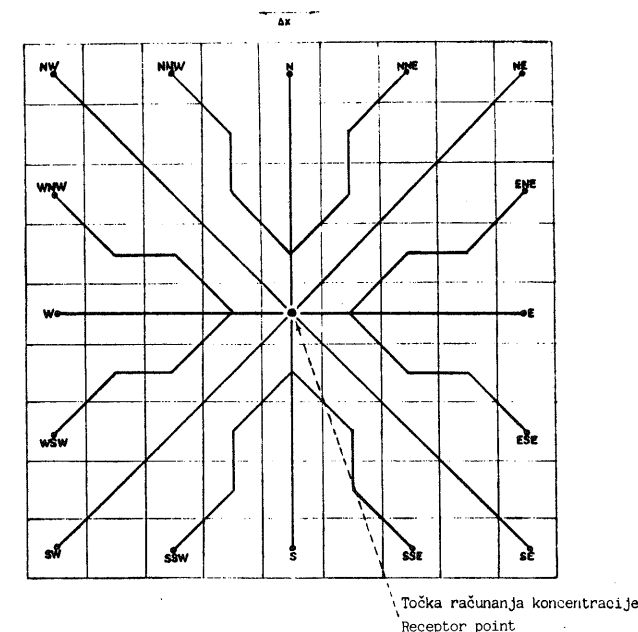
Iz tabele 3 smo dobili poprečno 24-urno stabilnost iz poprečnega gradienta temperature in poprečne hitrosti vetra.

Pri prevedbi modela ATDL glede na upoštevanje razreda stabilnosti se je izkazalo, da je največje ujemanje izračunanih koncentracij z izmerjenimi v primeru, če vzamemo kot vhodni podatek razred stabilnosti, ki je za razred bolj labilen, ne pa dejansko izmerjeno stabilnost. To je razumljivo, saj je merilno mesto za temperaturo, s katerega jemljemo podatke, na robu mesta, v prvem približku pa velja, da je atmosfera v mestu za en razred bolj labilna kot v neposredni okolici.

### POSTOPEK RAČUNANJA KONCENTRACIJ

Za računanje koncentracij so potrebni podatki o 24-urni emisiji v vseh točkah računskega območja. Poleg emisijskih podatkov potrebujemo še podatke o pogostosti smeri vetra in ustreznih poprečnih hitrostih ter podatke o razredu stabilnosti atmosfere za določen dan.

Osnova računskega postopka je enačba (3). Pojavi se težava, ker so ploskovni viri emisije v pravokotni mreži, smeri vetra pa so radialne. Na sliki 1 je preprosta shema računanja prispevkov posameznih ploskovnih virov iz različnih smeri vetra. Prispevke iz različnih smeri seštejemo in dobimo koncentracijo v točki računanja „O“ na sliki 1.

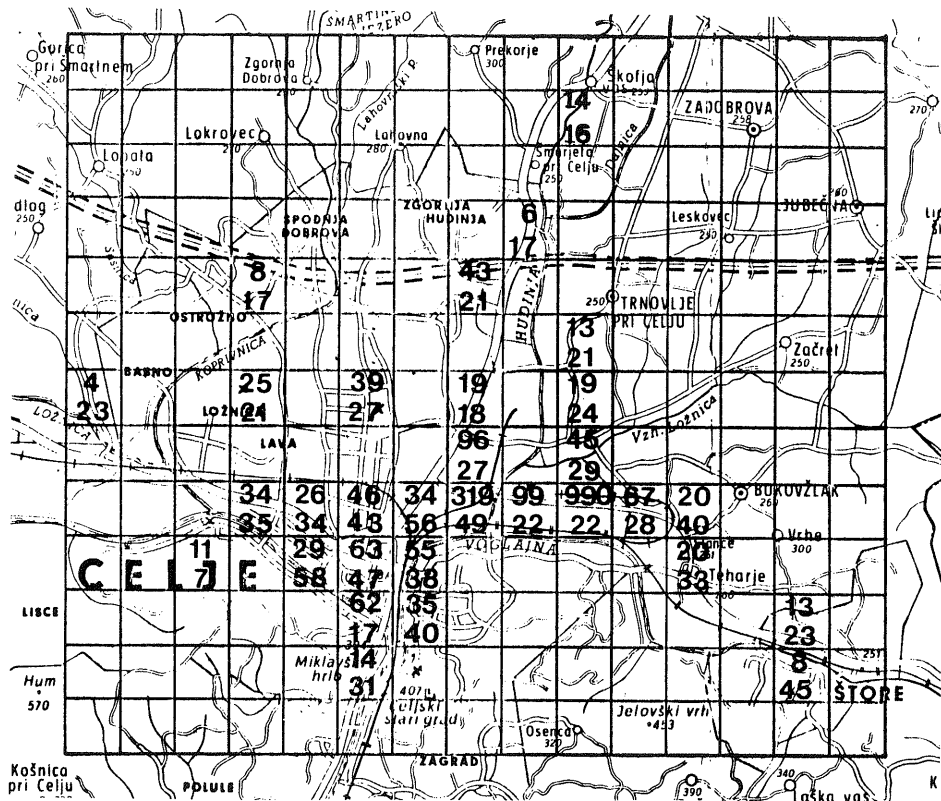


Slika 1 Shema računanja prispevkov ploskovnih virov h koncentraciji v točki računanja pri raznih smereh vetra.

Fig. 1 Scheme for combining rectangular source — grid squares with radial wind directions for calculation in receptor point.

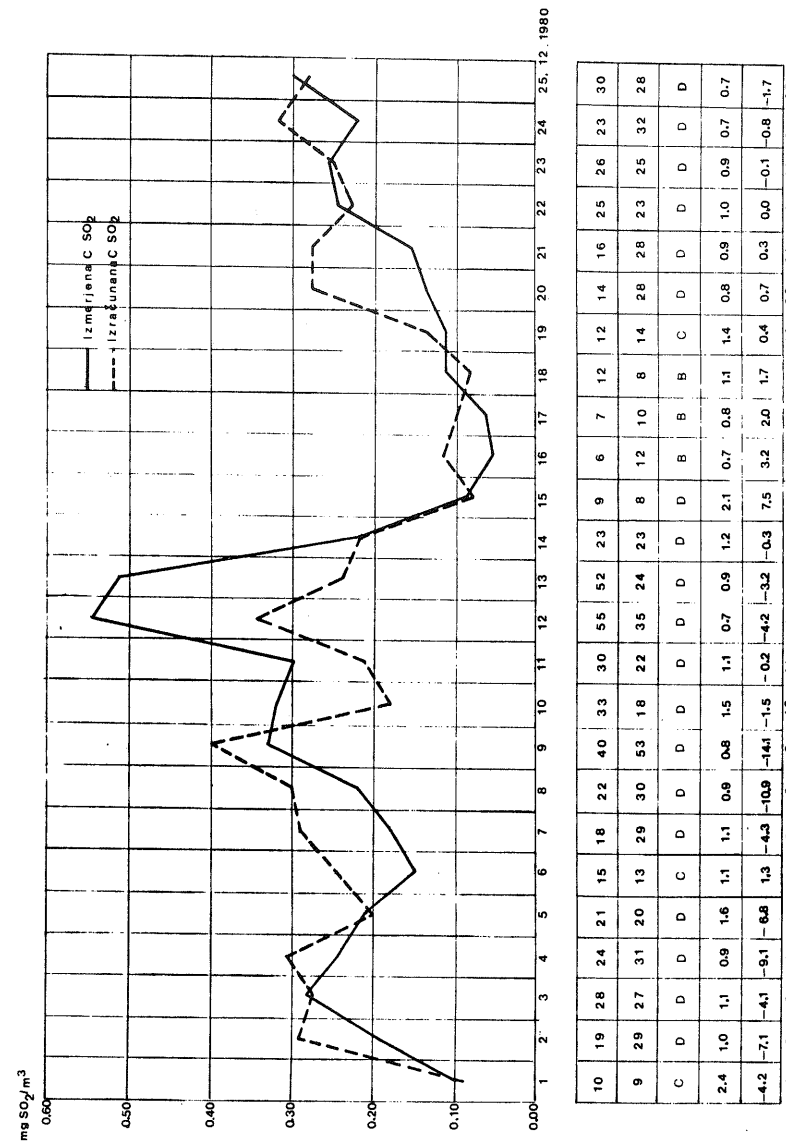
## REZULTATI

Kot smo pričakovali, so v kvadratih, kjer je locirana Cinkarna, izračunane vrednosti po prirejenem modelu ATDL precej večje od izmerjenih. Na sliki 2 je primer izračunanih in izmerjenih koncentracij. Na osnovi enačbe Bosanquet-Pearsona (1956) za prizemno koncentracijo  $c$  iz dvignjenega točkovnega vira velja ocena, da je točka z maksimalno prizemno koncentracijo oddaljena 10 višin dimnika. Torej je pri 50 m visokem dimniku točka maksimalne koncentracije pri tleh, ki jo povzroča ta dimnik, v sosednjem kvadratu  $500 \times 500 \text{ m}^2$ . V modelu ATDL je relativna utež ploskovnega vira  $R$  v kvadratu, za katerega se po enačbi (3) računa koncentracija, enaka 1, z oddaljenostjo pa uteži naglo padajo, tako da je za razred stabilnosti D v sosednjem kvadratu v smeri proti vetru relativna utež le še 0.31.



Slika 2 Polje izračunanih 24-urnih koncentracij  $\text{SO}_2$  (zgornji podatek v kvadratu) in polje izmerjenih koncentracij (spodnji podatek v kvadratu) v  $10^{-2} \text{ mg/m}^3$ ; kategorija stabilnosti D (11. 12. 1980).

Fig. 2 Calculated daily ground level  $\text{SO}_2$  concentrations for Celje (the upper value in the square) and observed concentrations (lower value) in  $10^{-2} \text{ mg/m}^3$ ; atmospheric stability – type D (11. 12. 1980).



Slika 3 Primerjava izračunanih in izmerjenih poprečnih koncentracij  $\text{SO}_2$  za Celje v 25 dneh decembra 1980.

Fig. 3 Comparison of calculated and observed mean daily concentrations of  $\text{SO}_2$  for Celje in 25 days of December 1980.

Pri primerjavi izmerjenih vrednosti z izračunanimi nismo upoštevali treh podatkov z območja Cinkarne. Za vsak dan primerjalnega obdobja smo izračunali poprečno dnevno koncentracijo SO<sub>2</sub> za Celje iz 28 izmerjenih podatkov. To poprečno vrednost smo primerjali s poprečno vrednostjo izračunanih vrednosti po modelu, in to za tiste kvadrate, v katerih so bile meritve. Na sliki 3 sta podani krivulji izmerjenih in izračunanih koncentracij v decembru 1980. Primerjave kažejo, da se poteka izmerjenih in izračunanih koncentracij razmeroma dobro ujemata. Večja odstopanja so v dneh, ko se poprečna dnevna temperatura močno spremeni glede na prejšnji dan. To je posledica približnega izračuna emisije SO<sub>2</sub>, pri čemer ne upoštevamo toplotne akumulacije stavb.

## SKLEP

Primerjave izračunanih in izmerjenih vrednosti kažejo relativno dobro ujemanje, čeprav so bile v modelu uporabljene mnoge poenostavitve in grobe predpostavke. Poleg tega predstavlja z modelom izračunana koncentracija poprečno vrednost za kvadrat, izmerjena vrednost pa ni poprečna vrednost za kvadrat, pač pa je le približek za to vrednost. Merilna mesta ne morejo biti idealno geometrijsko postavljena, poleg tega direktni vplivi najbližjih virov emisije ponekod zmanjšujejo reprezentativnost meritev.

Naše raziskave so potrdile, da je model ATDL kljub preprostosti uporaben in ima zaradi svoje preprostosti prednost pred modeli, ki so bolj zapleteni, ne dajejo pa boljših rezultatov.

## LITERATURA

- Gifford, F. A., in Hanna, S. R., Urban Air Pollution Modelling, The Second International Clean Air Congress, Washington, 1970, Academic Press, Inc, New York, december 1971
- Gifford, F. A., Atmospheric Transport and Dispersion over Cities, Nuclear Safety, Vol. 13., No. 5., 1972
- Gifford, F. A., The Simple ATDL Urban Air Pollution Model, Proceedings of 4 th Meeting of NATO/CCMS Panel on Modelling, 1973
- Hanna, S. R., A Simple Method of Calculating Dispersion from Urban Area Sources, APCA Journal, Vol. 21, No. 12, december 1971
- Hanna, S. R., Gifford F. A., Application of the ATDL Simple Urban Dispersion Model to Frankfurt, Proceedings of the NATO/CCMS „8th International Tehnical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application“ 1977, Louvain-La-Neuve, Belgija
- Magill, P.L., Holden, F. R., Ackley C.; Air Pollution Handbook, New York, 1956
- Plassman, E., Zuendorf, O. J., Emissionen Luftfremder Stoffe aus Hausbrand Fenerstätten und Kleingewerbetrieben, Köln, 1977
- Štefelj, I., in sodelavci, Poročilo o raziskovalni nalogi za leto 1980. Raziskovalna naloga: Določitev onesnaževanja zraka v Celju, HMZ SRS, Ljubljana, 1980
- Vogt, K. J., in sodelavci, Ausbreitung und Ablagerung Kernforschungsanlage Jülich, August 1971

## TRANSPORT ONESNAŽENJA ZRAKA V OKOLICO TE TRBOVLJE

### TRANSPORT OF AIR POLLUTION FROM THE TRBOVLJE COAL – FIRED POWER PLANT

Tone PLANINŠEK  
Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana

UDK 551.510.42  
UDK 614.71/.72

#### SUMMARY

We have studied transport of SO<sub>2</sub> from the Trbovlje coal-fired power plant to the east by means of average 24-hour SO<sub>2</sub> concentrations, measured on seven points on the east side of Trbovlje. We determined stability in a simple way by means of temperature data from the meteorological stations at Kum (1219 m) and Klenik (560). Wind data were taken at the 900 mb level from the Zagreb observatory which is about 80 km from Trbovlje. The weather situation was determined from the 850 mb level. The results of our study show that high SO<sub>2</sub> concentrations at upper sites appear under warm air advection conditions in the lower part of the atmosphere and for weak winds. In stronger winds and less stable conditions the highest concentrations appear in places which are at the same height as the top of the 360 m high stack.

#### POVZETEK

Z obdelavo poprečnih 24-urnih koncentracij SO<sub>2</sub>, merjenih na sedmih merilnih mestih vzhodno od TE Trbovlje, smo preučevali transport SO<sub>2</sub> iz TE Trbovlje proti vzhodu. Iz podatkov z meteoroloških postaj Kum in Klenik pri Vačah smo na preprost način določali stabilnost atmosfere, za veter smo upoštevali podatke iz zagrebških radiosondažnih podatkov, po 850 mb višinskih kartah pa smo določili vremensko situacijo. Rezultati kažejo, da se pojavljajo velike koncentracije SO<sub>2</sub> v višjih predelih pri topli advekciji v spodnjih plasteh atmosfere in pri šibkih vetrovih, pri močnejših vetrovih pa so koncentracije SO<sub>2</sub> najvišje v višini ustja dimnika.

#### UVOD

Termoelektrarno Trbovlje sestavljata dve enoti z emisijama 7000 ton SO<sub>2</sub> in 23200 SO<sub>2</sub> ton na leto. Skupna letna emisija SO<sub>2</sub> v Trbovljah znaša brez Termoelektrarne 988 ton, v Hrastniku pa 1960 ton (Paradiž in sodelavci, 1981). Po dograditvi druge enote, ki je imela sprva le 80 m visok dimnik, so se pojavile hude poškodbe na vegetaciji in tudi njeno propadanje v dolini Save in na bližnjih pobočjih zaradi zelo velikih koncentracij SO<sub>2</sub> – polurne vrednosti so presegle 10 mg/m<sup>3</sup> (Maček in sodelavci, 1972). Propadanje gozdov je sprožilo erozijske procese, ki so začeli ogrozati železniško progovo v dolini Save.

Sanacije kritičnih razmer so se lotili z gradnjo 360 m visokega dimnika za drugi blok termoelektrarne. Koncentracije SO<sub>2</sub> v dolini in na bližnjih pobočjih so se močno zmanjšale (Paradiž in sodelavci, 1981). Ko so začeli razmišljati o gradnji tretje enote Termoelektrarne-Toplarne, je nastalo vprašanje, koliko bo celotna emisija vplivala na širšo okolico Termoelektrarne. Za prvo oceno vpliva sedanje Termoelektrarne na širšo okolico smo postavili mrežo sedmih merilnih mest za poprečne 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub>. Izmerjene vrednosti so bile velike, večje kot jih dobimo z računanjem po enačbah za dimni dvig in disperzijo. Podatke smo podrobneje obdelali in pokazali predele, kjer lahko tudi v prihodnje pričakujemo občasne prekoračitve maksimalnih dopustnih koncentracij SO<sub>2</sub>.

## PODATKI

V obdobju julij 1980 – marec 1981 je delovala mreža sedmih merilnih mest za poprečne 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub> in dima. Razporeditev merilnih mest je prikazana na sliki 1. Za veter smo vzeli zagrebške radiosondažne podatke z 900 mb ploskve, kot merilo stabilnosti atmosfere pa smo računali razliko temperatur med meteorološkima postajama na Kumu in Kleniku pri Vačah (Pučnik, 1972, Planinšek, 1974). Na razpolago smo imeli tudi podatke o dnevni porabi premoga v Termoelektrarni Trbovlje. V poletnih mesecih so se velike koncentracije SO<sub>2</sub> pojavljale bolj poredko, zato smo obdelali le zimsko obdobje, in sicer le tiste dneve, ko je koncentracija SO<sub>2</sub> vsaj na enem merilnem mestu, razen v Laškem in v Rimskih Toplicah, preseгла vrednost 0.20 mg/m<sup>3</sup>. Kadar termoelektrarna ni obratovala, ta vrednost ni bila nikoli dosežena na nobenem merilnem mestu.

## OBDELAVE

Za čas od novembra 1980 do februarja 1981 smo obdelali 42 primerov z velikimi koncentracijami SO<sub>2</sub> v okolici TE Trbovlje. Glede na višino poprečne 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub> na merilnem mestu Gore (755 m) ter na sedlu med Hrastnikom in Rimskimi Toplicami – merilni mesti Marno (445 m) in Sedraž (420 m) – smo razdelili situacije v tri tipe:

Tip I: Poprečna 24-urna koncentracija SO<sub>2</sub> na merilnem mestu Gore je bila za več kot 0.10 mg/m<sup>3</sup> večja od koncentracije SO<sub>2</sub> na merilnih mestih na Sedlu med Hrastnikom in Rimskimi Toplicami.

Tip II: Koncentracije SO<sub>2</sub> so bile približno enake.

Tip III: Koncentracije SO<sub>2</sub> na Sedlu so bile za več kot 0.10 mg/m<sup>3</sup> večje kot na merilnem mestu na Gorah.

Nato smo ugotavljali, kakšne so koncentracije SO<sub>2</sub> pri različnih tipih in kakšna sta takrat stabilnost in veter. Kot merilo za stabilnost atmosfere smo upoštevali razlike temperatur med meteorološkima postajama Kum z nadmorsko višino 1219 m in Klenik pri Vačah z nadmorsko višino 560 m. Nadmorska višina ustja dimnika je 570 m, in če upoštevamo

še dvig dimnih plinov po izstopu iz dimnika, vidimo, da se dimni plini širijo v plasti, ki je na višini med obema meteorološkima postajama. Upoštevali smo termine ob 14. in 21. uri prejšnjega dne in ob 7. uri dneva meritve. Termine smo tako vzeli zato, ker traja 24-urna meritev od 7. ure prejšnjega do 7. ure dneva meritve. Iz treh dnevnih podatkov o razliki temperatur med Kumom in Klenikom smo definirali 4 razrede stabilnosti:

1. razred – inverzija v 3 terminih
2. razred – inverzija v 2 terminih
3. razred – inverzija v 1 terminu
4. razred – ni inverzije

Podatke o vetru smo vzeli iz radiosondažnih podatkov z meteorološke postaje Zagreb od 13. ure prejšnjega dne in 1. ure dneva meritve. Pri naših obdelavah je nekaj primerov, ko so podatki o vetru izpadli. Najprej smo za vsak tip situacije izračunali poprečni stabilnostni razred in poprečno hitrostjo vetra.

TIP	R	H	K	N
I	2.21	6.7	0.30	14
II	3.25	7.8	0.23	12
III	3.06	7.3	0.21	16

R – poprečni razred stabilnosti

H – poprečna hitrost vetra v m/s

K – poprečna koncentracija SO<sub>2</sub> v mg/m<sup>3</sup> za vseh 7 postaj

N – število primerov

Iz gornje tabele vidimo, da je poprečni stabilnostni razred pri tipu I najnižji, kar pomeni, da se onesnaženje širi v višje plasti zraka ob stabilnejšem vremenu in ob šibkejšem vetru, skupna poprečna koncentracija SO<sub>2</sub> pa je največja. Pri labilnejši atmosferi in močnejšem vetru pa se onesnaženje širi enakomerneje po vseh višinah. Samo na sedlu med Hrastnikom in Rimskimi Toplicami vpliva TE Trbovlje ob situacijah, ki so med obema opisanimi. Pri razlagi teh ugotovitev ne smemo pozabiti, da delamo s 24-urnimi poprečnimi koncentracijami SO<sub>2</sub>, podatki o stabilnosti so kombinacija opazovanj v treh terminih na merilnih mestih pri tleh in ne v prosti atmosferi, podatki o vetru pa so vzeti dvakrat na dan s točke, ki je 80 km od Trbovelj.

Velike 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub> se v višjih predelih okoli Trbovelj največkrat pojavljajo ob advékiji toplega zraka, to je ob prisotnosti izrazitih procesov v atmosferi, kar pomeni, da se lahko smer vetra v času meritve SO<sub>2</sub> (24) ur bistveno spremeni. Tako se lahko v obdobju 24 ur pojavijo razmere, ki so značilne za različne tipe razporeditve koncentracij SO<sub>2</sub>. Nekaj informacij o razporeditvi koncentracij SO<sub>2</sub> nam dajo poprečne koncentracije SO<sub>2</sub> za vsako merilno mesto po različnih tipih situacij v tabeli 1.

Tabela 1 Poprečna 24-urna koncentracija SO<sub>2</sub> v mg/m<sup>3</sup> po tipih situacij glede na razporeditev koncentracij SO<sub>2</sub>

Table 1 Average 24-hour SO<sub>2</sub> concentrations in mg/m<sup>3</sup> according to the type of situation with respect to concentration distributions

T I P	M E R I L N O M E S T O						
	G O R E	P O D K R A J	M A R N O	S E D R A Ž	T U R J E	R. T O P L I C E	L A Š K O
I	0.74	0.22	0.22	0.27	0.22	0.22	0.19
N	14	14	14	14	14	12	14
II	0.31	0.15	0.30	0.20	0.23	0.20	0.19
N	12	12	12	12	12	10	12
III	0.15	0.16	0.29	0.27	0.25	0.19	0.17
N	16	15	16	16	16	13	15

N – število primerov

Dodajmo še število primerov smeri vetra na 900 mb ploskvi po posameznih tipih situacij.

Tabela 2 Število primerov smeri vetra na 900 mb ploskvi po tipih situacij glede na razporeditev koncentracij SO<sub>2</sub>

Table 2 Number of cases of wind direction on the 900 mb level for types of situation with respect to the distribution of SO<sub>2</sub> concentration

T I P	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	SKUPAJ
I	2	5	1	0	2	3	10	2	25
II	3	4	1	1	3	3	5	2	22
III	7	6	4	0	0	5	4	4	30

Pri tipu I prevladuje smer W, pri tipu III je največ smeri N in NW, pri tipu II pa so zastopane vse smeri. Podatkov je bilo premalo, da bi bili reprezentativni, izmerjeni so bili predaleč od Trbovelj, pa še relief na obravnavanem področju veter odkloni. Poskusili smo tudi z obdelavo podatkov z meteorološke postaje na Kumu, vendar se tudi iz teh podatkov ne da dobiti zveze med smerjo vetra in situacijami glede na razporeditev koncentracije SO<sub>2</sub> po prostoru.

Iz obdelav lahko povzamemo naslednje:

- Velike koncentracije SO<sub>2</sub> se ne pojavljajo samo na enem merilnem mestu, ampak jih ima več merilnih mest hkrati. To vidimo iz poprečkov pri različnih tipih glede na razporeditev koncentracij SO<sub>2</sub>. Izjema je merilno mesto Gore, ki leži precej višje od drugih merilnih mest.
- Tudi v primerih, ko Termoelektrarna Trbovlje ni obratovala, so bile zabeležene na merilnih mestih Marno, Turje in Sedraž razmeroma velike koncentracije SO<sub>2</sub> (do 0.17 mg/m<sup>3</sup>). Termoelektrarna torej ni edini vir SO<sub>2</sub> na tem območju. V takšnih primerih SO<sub>2</sub> ne pride tako visoko, saj je koncentracija SO<sub>2</sub> na merilnem mestu Gore takrat zanemarljivo nizka.
- Velike koncentracije SO<sub>2</sub> v višini nad 600 m nadmorske višine se največkrat pojavljajo v zvezi s temperaturnimi inverzijami na teh višinah.
- Koncentracije v Rimskih Toplicah so večje kot v Laškem. Glede na podobno lego obeh krajev v dolini Savinje in precej večjo emisijo SO<sub>2</sub> v Laškem kot v Rimskih Toplicah bi pričakovali večjo koncentracijo SO<sub>2</sub> v Laškem kot v Rimskih Toplicah. Zato lahko večje koncentracije SO<sub>2</sub> v Rimskih Toplicah ne glede na manjšo oddaljenost pripišemo prenosu iz Zasavja.

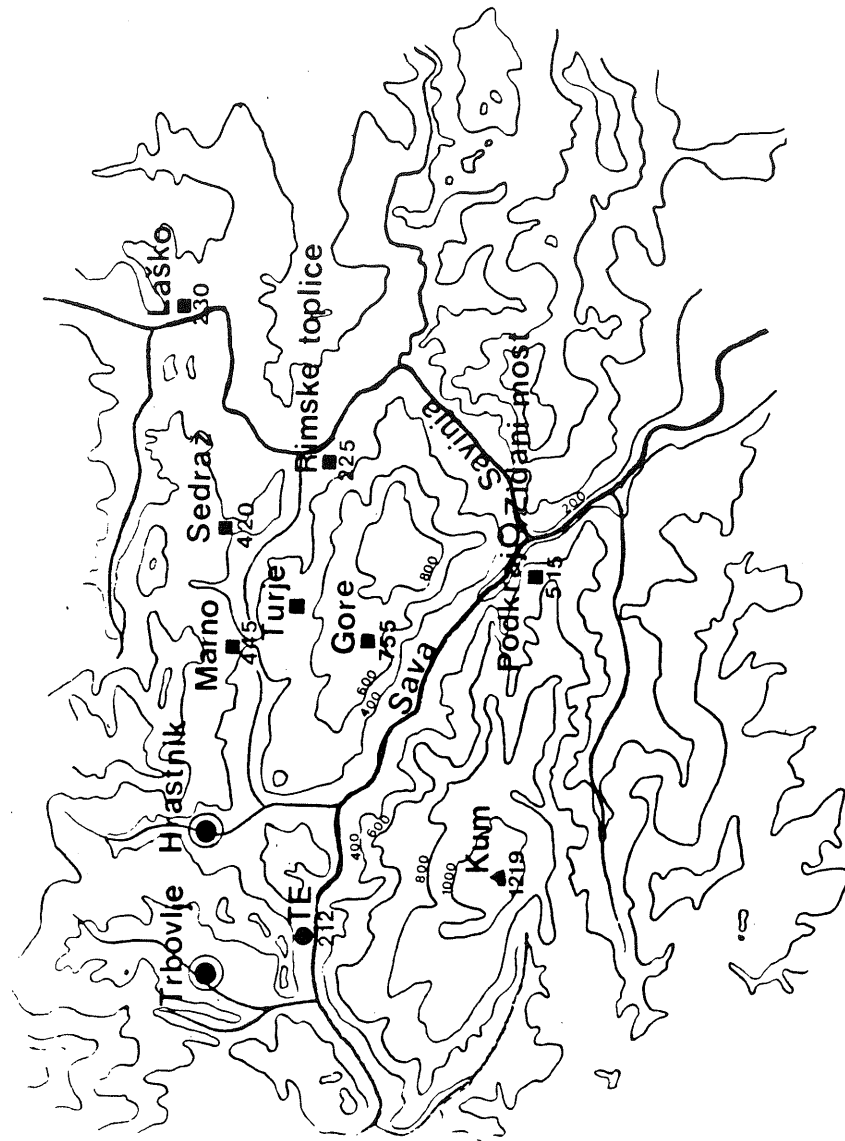
## ZAKLJUČEK

S podatki z nekaj merilnih mest za 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub> in s podatki o temperaturi z navadnih meteoroloških postaj lahko dobimo približno sliko stanja onesnaženosti zraka in o njegovih vzrokih nad določenim področjem. Lahko tudi ugotovimo, da se pojavljajo koncentracije, ki močno presegajo največje dovoljene 24-urne koncentracije SO<sub>2</sub> na višinah nad 700 m nadmorske višine in so posledica emisije iz Termoelektrarne. Preostala emisija iz Hrastnika ima vpliv le do nadmorske višine okoli 600 m. Emisijo iz Termoelektrarne opazimo z majhnim deležem tudi pri koncentracijah SO<sub>2</sub> v Rimskih Toplicah. Zaradi zelo razgibanega reliefa na tem območju so možne razne trajektorije SO<sub>2</sub> od dimnika do oddaljenih krajev in tudi pojav večjih vrtincev in zastojnih con vetra, kjer se lahko pojavijo večje koncentracije onesnaženja. Te trajektorije in ogrožena področja pa je mogoče določiti le z boljšimi meritvami meteoroloških parametrov, predvsem vetra in koncentracij onesnaženja.

## LITERATURA

- Paradiž B., in sodelavci, 1981, Spremembe kakovosti zraka v Zasavju s sanacijo TE Trbovlje II in izgradnjo Termoelektrarne-Toplarnne Trbovlje – Elaborat HMZ
- Maček J., Paradiž B., Šolar M., Zupančič T., 1972: Ugotovitve o onesnaženosti zraka v Zasavju, vzrokih in posledicah. Elaborat HMZ
- Arhiv HMZ
- Pučnik J., 1972: Temperaturne inverzije v Ljubljanski kotlini. Razprave – Papers XIV,
- Planinšek T., 1974: Zimska jezera hladnega zraka v Celjski kotlini. Diplomsko delo





Slika 1 Razporeditev merilnih mest za 24-urno koncentracijo SO<sub>2</sub> (kvadratki) v okolici TE Trbovlje  
 Fig. 1 Arrangement of SO<sub>2</sub> measuring points (squares) around the Trbovlje coal-fired power plant