

# Wpływ adwekcyjnych zmian temperatury w swobodnej atmosferze na zmiany temperatury powietrza przy powierzchni ziemi w Krakowie

Influence of free atmosphere temperature changes  
due to advection, on surface air temperature in Cracow

Rafał Bąkowski<sup>1</sup>

**Zarys treści:** W opracowaniu poruszono zagadnienia dotyczące wpływu zmian temperatury zachodzących na poziomie adwekcyjnym, czyli na powierzchni izobarycznej 850 hPa, na zmiany termiczne zachodzące w Krakowie przy powierzchni ziemi. Analizę przeprowadzono na podstawie danych dobowych z lat 1973-2002. W trakcie badań stwierdzono wyraźny wpływ adwekcji termicznej w swobodnej atmosferze na zmiany temperatury przy powierzchni ziemi w Krakowie. Wpływ ten widoczny jest wyraźnie wiosną i latem. W jesieni i zimie wpływ adwekcji termicznej jest mniej wyraźny, co jest związane głównie z warunkami cyrkulacyjnymi – przewagą w tych porach roku układów antycyklonalnych, kształtujących pogodę w omawianej części kontynentu.

**Słowa kluczowe:** adwekcja termiczna, antycyklon, cyklon, mapa topografii barycznej, powierzchnia izobaryczna, temperatura powietrza

**Key words:** thermal advection, anticyclone, cyclone, baric topography chart, isobaric surface, air temperature

## Wstęp

Zmiany termiczne zachodzące przy powierzchni ziemi są uwarunkowane szczególnie zmianami pola temperatury w dolnej i środkowej troposferze, zwłaszcza na tzw. poziomie adwekcyjnym, odpowiadającym powierzchni izobarycznej 850 hPa (Holton 1992; Thorncroft, Hoskins 1990). Poziom 850 hPa, leżący w umiarkowanych szeroko-

---

<sup>1</sup> Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział w Krakowie, ul. P. Borowego 14, 30-215 Kraków,  
e-mail: rafal\_bakowski@imgw.pl

ściach geograficznych na wysokości około 1300-1500 mpp (Bąkowski 2003), wyznacza wysokość, gdzie zanikają dobowe zmiany temperatury. Jednocześnie jest to poziom najniżej leżący w troposferze, na którym można wyznaczyć wielkość adwekcji termicznej nie uwzględniając wpływu podłoża. Z tych względów jest to także podstawowy poziom baryczny brany pod uwagę w trakcie prognozy temperatury powietrza.

Wpływ adwekcji temperatury, w tym zmian temperatury w dolnej i środkowej troposferze na jej zmiany zachodzące przy powierzchni ziemi, był tematem badań wielu uczonych na świecie (Hill, Simpson 1989; *Japan Meteorological Agency* 1988, Marshall 2002; Renard, Clark 1965). Prace te dowiodły ścisłych zależności między warunkami termicznymi panującymi w swobodnej atmosferze i przy powierzchni ziemi. Zależności te jednak różnie kształtują się w zależności od położenia terenu badań (Marshall 2002) oraz rozpatrywanej warstwy troposfery (*Japan Meteorological Agency* 1988). Brak jest jednak badań dotyczących omawianego zagadnienia na terenie Europy Środkowej, a w tym Polski. Problemy związane ze zmianami termicznymi zachodzącymi na powierzchni izobarycznej 850 hPa nad Polską zostały częściowo omówione przez autora, z uwzględnieniem także związków temperatury powietrza przy powierzchni ziemi i w środkowej troposferze (Bąkowski 2003). Brak jest jednak do tej pory kompleksowej ich charakterystyki. Warunki termiczne w Krakowie zostały szczegółowo scharakteryzowane, głównie przez naukowców Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ (Morawska-Horawska 1996, Piotrowicz 1996; Trepińska 1983, 1988, 1989; Trepińska, Kowanetz 1997; Trepińska, Marciniak 1986). Z tego względu w niniejszym opracowaniu pominięto tę część analiz.

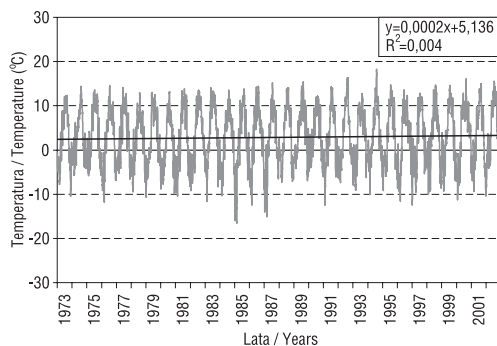
Celem opracowania było określenie, jaki wpływ na zmiany termiczne w Krakowie przy powierzchni ziemi mają zmiany temperatury zachodzące na poziomie adwekcyjnym, czyli na powierzchni izobarycznej 850 hPa. W pierwszej części opracowania poddano analizie statystycznej zmiany temperatury powietrza przy powierzchni ziemi na stacji Kraków-Balice oraz zmiany termiczne na poziomie 850 hPa nad stacją pomiarową. Drugą częśći opracowania poświęcono zbadaniu związków korelacyjnych temperatury powietrza na poziomie 850 hPa i temperatury przy powierzchni ziemi, wyznaczając okresy, w których adwekcja temperatury ma największy wpływ na zmiany termiczne zachodzące przy powierzchni ziemi. W kolejnej części opracowania wyznaczono sytuacje synoptyczne sprzyjające adwekcyjnym i „nieadwekcyjnym” zmianom temperatury powietrza.

Cele pracy realizowano na podstawie dobowych danych zawierających informacje o temperaturze powietrza z godziny 00 UTC z 30-lecia 1973-2002, pochodzących ze stacji synoptycznej w Krakowie-Balicach oraz danych z punktu gridowego 50°00'N i 20°00'E. Dane zawierające informacje ze swobodnej atmosfery pochodzą z reanaliz NCEP/NCAR, udostępnionych dzięki uprzejmości National Centre for Atmospheric Research. Wykorzystując dane NCEP/NCAR brano pod uwagę wysoką dodatnią korelację liniową (współczynnik korelacji równy 0,9, na poziomie istotności statystycznej 0,01) z danymi termicznymi pochodzącymi z sondaży aerologicznych na terenie Polski (Woyciechowska, Bąkowski 2006). Ponadto, aby otrzymać pełen obraz zróżnicowania barycznego oraz pola temperatury powietrza i wysokości geopotencjału, w trakcie prac wykorzystano dolne mapy synoptyczne oraz mapy topografii barycznej 850 hPa. Typy sytuacji synoptycznych przyjęto według klasyfikacji T. Niedźwiedzia (2003).

## Wyniki badań

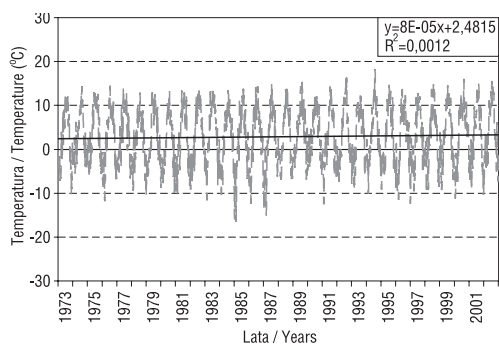
W analizowanym wieloleciu wyraźnie zaznacza się zgodność w przebiegu temperatury powietrza przy powierzchni ziemi i na powierzchni 850 hPa (ryc. 1 i 2). Zmiany temperatury powietrza przy powierzchni ziemi charakteryzują się jednak większymi wahaniami z dnia na dzień niż zmiany zachodzące w środkowej troposferze. Związane jest to z wpływem podłoża, a potwierdzone przez wyznaczone współczynniki zmienności. Współczynnik zmienności temperatury powietrza na stacji Kraków-Balice w analizowanych latach wyniósł 2,5, podczas gdy na powierzchni izobarycznej 850 hPa nad punktem pomiarowym był równy 1,3.

Aby zbadać, jaki wpływ na zmiany termiczne zachodzące w Krakowie przy powierzchni ziemi mają zmiany temperatury na poziomie adwekcyjnym, czyli na powierzchni izobarycznej 850 hPa, poddano analizie związku korelacyjne między omawianymi seriami danych w całym badanym 30-leciu oraz w poszczególnych miesiącach. W latach 1973-2002 stwierdzono wysoką korelację dodatnią (współczynnik korelacji równy 0,85, istotny na poziomie 0,05) między wartościami temperatury powietrza przy powierzchni ziemi i temperatury na analizowanym poziomie adwekcyjnym. Biorąc pod uwagę wartości temperatury przy powierzchni ziemi oraz w środkowej troposferze, na powierzchni izobarycznej 500 hPa, uzyskano współczynnik korelacji 0,72. Można zatem stwierdzić, że wybrany do analizy poziom izobaryczny (850 hPa) w przypadku Krakowa wydaje się najbardziej odpowiedni. Poniżej tego poziomu bowiem adwekcyjne zmiany temperatury powietrza są zakłócone przez wpływ powierzchni ziemi, powyżej zaś zależności te stopniowo maleją, zmniejszając się wraz ze wzrostem wysokości.



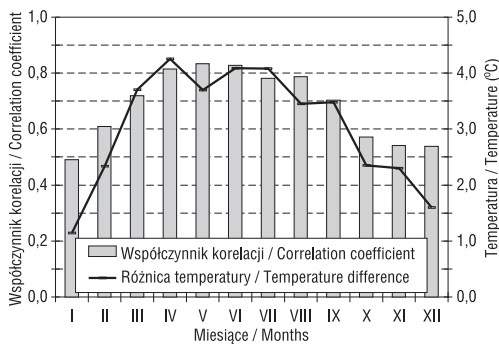
Ryc. 1. Roczny przebieg temperatury powietrza na stacji Kraków-Balice o godz. 00.00 UTC w latach 1973-2002

Fig. 1. Annual course of air temperature at Kraków-Balice meteorological station in the period 1973-2002 at 00.00 UTC



Ryc. 2. Temperatura powietrza nad Krakowem na powierzchni izobarycznej 850 hPa w latach 1973-2002 z godziny 00.00 UTC

Fig. 2. Air temperature over Kraków at the isobaric surface 850 hPa in the period 1973-2002 at 00.00 UTC



Ryc. 3. Roczny przebieg współczynnika korelacji oraz różnica między temperaturą przy powierzchni ziemi na stacji w Krakowie-Balicach i nad Krakowem na powierzchni izobarycznej 850 hPa w latach 1973-2002

Fig. 3. Annual course of correlation coefficient and range of air temperature at Kraków-Balice meteorological station and over Kraków at the standard WMO pressure level 850 hPa in the period 1973-2002

adwekcji chłodu. Zatem wiosną i latem adwekcja ciepła, pomimo że występuje nieco rzadziej, jest bardziej intensywna. Odwrotna sytuacja występuje zimą.

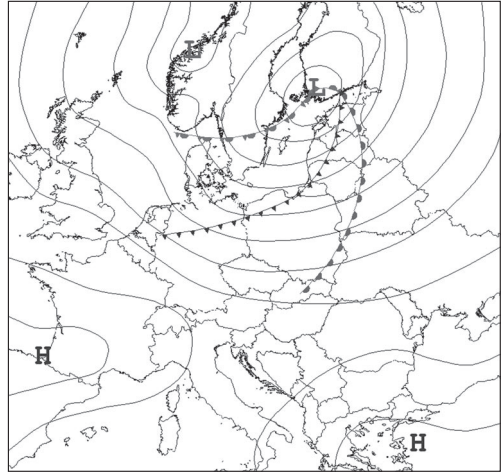
W zimie i jesienią związki korelacyjne między badanymi seriami danych są mniejsze (w styczniu, grudniu i w listopadzie 0,5). Zatem przyczyn zmian temperatury powietrza przy powierzchni ziemi w tych porach roku należy prawdopodobnie szukać w przeważających antycyklonalnych układach cyrkulacyjnych oraz wpływie wychłodzonego podłoża i występowaniu pokrywy śnieżnej. Często zalegające nad Europą Środkową układy antycyklonalne, zwłaszcza jesienią (centrum wyżu), ale także zimą (wyż i klin wyżowy związany z wyżem rosyjskim), stwarzają warunki bliskie atmosferze barotropowej. Układy te, zalegające nad omawianym obszarem kilka, często kilkanaście dni, dodatkowo sprzyjają utrzymywaniu się równowagi stałej i związanych z nią warstw hamujących w dolnej troposferze, do poziomu 850 hPa. Zmiany pola barycznego związane z nagłym wzrostem poziomego gradientu barycznego, będące typowymi układami baroklinowymi, choć charakterystyczne jesienią i zimą, trwają stosunkowo krótko, dlatego ich rola w adwekcyjnych zmianach temperatury przy powierzchni ziemi jest mniej wyraźna w skali wielolecia.

Warto zwrócić uwagę na średnie miesięczne wartości różnicy temperatury powietrza między powierzchnią ziemi a powierzchnią izobaryczną 850 hPa (ryc. 3). W jesieni i zimie różnice te nie przekraczają 2,5°C (w styczniu 1,1°C), a pionowy gradient termiczny często przyjmuje wartości ujemne, co wyraźnie świadczy o występowaniu inwersji termicznych występujących w omawianej warstwie powietrza. Wiosną i latem, gdy

Analiza związków korelacyjnych między opisywanymi seriami danych w poszczególnych miesiącach wyraźnie wskazuje na zależność zmian termicznych w swobodnej atmosferze ze zmianami przy powierzchni ziemi w ciepłej połowie roku. Współczynnik korelacji liniowej między badanymi seriami przekroczył 0,7 od marca do września, a wartości powyżej 0,8 przybierał od kwietnia do czerwca (ryc. 3). Można zatem stwierdzić, że wiosną i latem zmiany temperatury przy powierzchni ziemi w dużym stopniu są uwarunkowane adwekcyjną zmianą temperatury. Z badań autora dotyczących adwekcji termicznej nad środkową częścią Polski (Bąkowski 2006) wynika, że w tych porach roku liczba dni z adwekcją chłodu przeważa nad liczbą dni z adwekcją ciepła. Wyznaczone wartości adwekcji ciepła, określone w kelwinach na dobę, wyraźnie przeważają nad wartościami

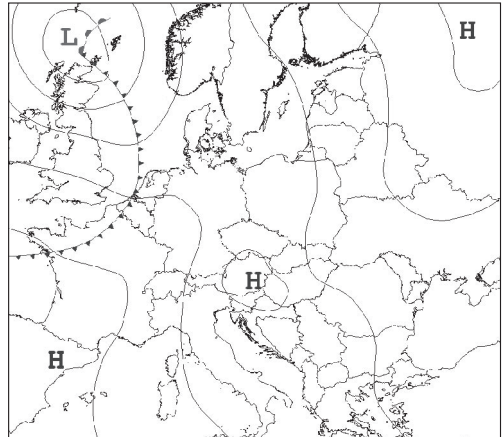
wzrasta rola wymiany turbulencyjnej, różnice te przekraczają  $4^{\circ}\text{C}$  (kwiecień  $4,3^{\circ}\text{C}$ ). W przebiegu rocznym zwraca uwagę znaczny spadek średniej miesięcznej różnicy temperatury powietrza między powierzchnią ziemi a powierzchnią izobaryczną 850 hPa od września do października. Jest to związane ze wzrostem częstości układów wyżowych nad analizowanym obszarem w październiku.

Jak wynika z badań (Bluestein 1992; Browning, Roberts 1994), układy cyrkulacyjne, zarówno o charakterze baroklinowym jak i barotropowym, w dominującym stopniu wpływają na zmiany temperatury powietrza zachodzące przy powierzchni ziemi. Pozostaje pytanie, jaki układ pola barycznego sprzyja adwekcyjnym zmianom temperatury przy powierzchni ziemi, zachodzącym przez dłuższy czas nad badanym obszarem. Jak wiadomo, aby zachodziła adwekcja, panujący układ baryczny musi przybierać cechy układu baroklinowego, gdzie gęstość powietrza jest funkcją ciśnienia i temperatury. Największa adwekcja termiczna zachodzi w strefach aktywnych frontów atmosferycznych, gdzie kąty adwekcji są bliskie  $90^{\circ}$ . Do układów barycznych, w których adwekcyjne zmiany termiczne są bardzo duże, należy zaliczyć także głębokie cyklony, zwłaszcza ich przednie (wschodnie) sektory, gdzie zachodzi adwekcja ciepła, oraz tylne (zachodnie), gdzie zachodzi intensywna adwekcja chłodu (ryc. 4). Analogiczna sytuacja występuje na wschodnich i zachodnich peryferiach wyżów. Z kolei barotropowy charakter atmosfery (pamiętając, że barotropowość w rzeczywistej atmosferze nie występuje) w największym stopniu (przybliżeniu) reprezentują centrum wyżu oraz „rozmyte” pola baryczne, warunkujące bardzo słabe wiatry w dolnej i środkowej troposferze (ryc. 5).



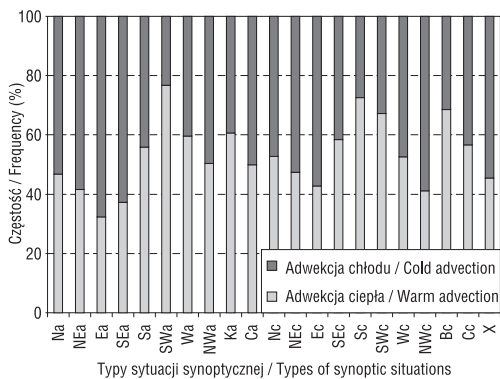
Ryc. 4. Sytuacja synoptyczna sprzyjająca adwekcyjnym zmianom temperatury (H – wyż, L – niż)

Fig. 4. Synoptic situation favourable to the thermal advection (H – anticyclone, L – cyclone)



Ryc. 5. Sytuacja synoptyczna niesprzyjająca adwekcyjnym zmianom temperatury (H – wyż, L – niż)

Fig. 5. Synoptic situation unfavourable to the thermal advection (H – anticyclone, L – cyclone)



Ryc. 6. Częstość (%) adwekcji ciepła i chłodu podczas określonych typów sytuacji synoptycznych w Polsce w latach 1973-2002

Fig. 6. Frequency (%) of warm advection and cold advection during the types of synoptic situations in Poland in the period 1973-2002

układ wysokiego ciśnienia, jak i niż baryczny (ryc. 6). Jest to zatem sytuacja baryczna sprzyjająca napływowi ciepłych polarnych morskich i zwrotnikowych mas powietrza, adwekcji chłodu natomiast sprzyjała sytuacja wschodnia i południowo-wschodnia antycyklonalna. Taki układ pola barycznego jest związany z zaleganiem nad wschodnią lub północno-wschodnią częścią kontynentu układu wysokiego ciśnienia w postaci wyżu rosyjskiego lub klina antycyklonalnego, który wymusza napływ bardzo chłodnej kontynentalnej masy powietrza. Charakterystyczną sytuacją sprzyjającą adwekcji chłodu jest sytuacja północno-zachodnia cyklonalna, warunkująca napływ chłodnej chwiejnej masy powietrza w tylnej, zachodniej części niżu przemieszczającego się w kierunku wschodnim, często „blokowanego” przez stabilny wyż znad Europy Wschodniej. Najmniejsze związki korelacyjne stwierdzono w przypadku zalegania nad Polską wyżu lub „rozmytego pola barycznego”. Obydwie sytuacje charakteryzują się warunkami zbliżonymi do modelu barotropowego atmosfery, a dodatkowo słabymi wiatrami w dolnej i środkowej troposferze, co wpływa na niewielkie wartości wiatru termicznego i nieznaczne zmiany wektora tego wiatru z wysokością, a zatem „braku” adwekcji termicznej.

## Podsumowanie

Reasumując, stwierdzono wyraźny wpływ adwekcji termicznej w swobodnej atmosferze na zmiany temperatury zachodzące przy powierzchni ziemi w Krakowie. Zmianom temperatury na poziomie adwekcyjnym (na powierzchni izobarycznej 850 hPa) towarzyszą zmiany temperatury przy powierzchni ziemi, wyraźnie widoczne latem i wiosną. W zimie i jesieni wpływ adwekcji termicznej jest mniej wyraźny za

Należy tu zaznaczyć, że aby określić znak adwekcji temperatury, należy poddać analizie pole temperatury i ciśnienia na mapie topografii barycznej 850 hPa, natomiast aby określić jej wielkość liczbową, należy zbadać pod względem termodynamicznym warstwę atmosfery od poziomu 850 hPa do 500 hPa. Analiza tylko dolnej mapy synoptycznej nie może dać informacji na temat wielkości, a często także znaku adwekcji termicznej.

Nad południową częścią Polski adwekcyjne zmiany temperatury warunkujące wzrost temperatury przy powierzchni ziemi zachodziły przy typach cyrkulacji wymuszających południowo-zachodni i południowy przepływ powietrza, zarówno w przypadku, gdy ośrodkiem sterującym był



sprawą częstych w tych porach roku układów antycyklonalnych, kształtujących pogodę w omawianym obszarze.

Opracowanie jest częścią projektu badawczego nr 618/E-217/SPB/COST/KN/DWM 80/2005-2006, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

## Literatura

- Bąkowski R., 2003, *Cyrkulacja dolnotroposferyczna na obszarze Karpat Polskich*, Wiad. IMGW, 26, 3-38.
- Bąkowski R., 2006, *Sezonowe zmiany adwekcji termicznej nad Polską (w latach 1975-2004)*, Annales UMCS, Sec. B, w druku.
- Bluestein H.B., 1992, *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Vol. I. Principles of Kinematics and Dynamics*, Oxford Univ. Press, 180-195, 330-371.
- Browning K.A., Roberts N.M., 1994, *Structure of a frontal cyclone*, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 120, 1535-1557.
- Hill A.E., Simpson J.H., 1989, *On the interaction of thermal and haline fronts*, The Islay Front Revisited, Estuarine Coast. Shelf Sci., 28, 495-505.
- Holton J.R., 1992, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Press, San Diego.
- Japan Meteorological Agency, 1988, *On the improvement of the significant weather chart*, Weather Serv. Bull., 55, 1-16.
- Marshall G.J., 2002, *Analysis of recent circulation and thermal advection in the northern Antarctic Peninsula*, Int. J. Climatol., 22, 1557-1567.
- Morawska-Horawska M., 1996, *Anomalie termiczne w Krakowie w stuleciu 1881-1998*, Stud. Ośrod. Dok. Fizjogr., 24, 291-306.
- Niedźwiedz T., 2003, *Kalendarz sytuacji synoptycznych dla dorzecza górnej Wisły (1973-2002)*, Plik komputerowy dostępny w Katedrze Klimatologii, Wydz. Nauk o Ziemi UŚ, Sosnowiec.
- Piotrowicz K., 1996, *Thermal characterization of winters in the 20th Century in Kraków*, Geogr. Polonica, 67, 77-88.
- Renard R.J., Clark L.C., 1965, *Experiments in numerical objective frontal analysis*, Mon. Wea. Rev., 93, 547-556.
- Thorncroft C.D., Hoskins B.J., 1990, *Frontal cyclogenesis*, J. Atmos. Sci., 47, 2317-2336.
- Trepińska J., 1983, *Climatic fluctuations in Cracow City, 1826-1975*, Geogr. Polonica, 45, 59-70.
- Trepińska J., 1988, *Wieloletni przebieg ciśnienia i temperatury powietrza w Krakowie na tle ich zmienności w Europie*, Rozpr. Habilitacyjne UJ, 140, Kraków.
- Trepińska J., 1989, *Severe winters in Cracow against the background of atmospheric circulation*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 75, 23-31.
- Trepińska J., Kowanetz L., 1997, *Wieloletni przebieg średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza w Krakowie (1792-1995)*, [w:] *Wahania klimatu w Krakowie (1792-1995)*, J. Trepińska (red.), Inst. Geogr. UJ, Kraków, 99-130.
- Trepińska J., Marciniak K., 1986, *Variability of the annual air temperature range in Cracow (1826-1984)*, Zesz. Nauk. UJ, Prace Geogr., 69, 9-26.

Woyciechowska J., Bąkowski R., 2006, *Comparison of values of the chosen meteorological fields measured at the aerological stations and the values taken from NCEP/NCAR reanalysis*, *Idöjaras*, 110, 2, 183-189.

## Summary

The study demonstrates a strong influence of thermal advection in the free atmosphere on surface temperature changes in Cracow. Temperature variations at the advection level (850 hPa isobaric surface) produce surface temperature changes, which are especially strong in summer and spring. In winter and autumn, the influence of thermal advection is weaker as anticyclonic systems often determine weather in Central Europe during the cold season.