

Posouzení vlivu převládajících povětrnostních situací a sezónní variability na chemické složení atmosférické depozice v oblasti Českého krasu

Evaluation of the influence of prevailing weather types and seasonal variability on the chemical composition of atmospheric deposition in Czech Karst

Jitka Špičková¹, Irena Dobešová¹, Miloš Burian¹

0. Abstract

This study is devoted to the evaluation of the influence of prevailing weather types and seasonal variability on the chemical composition of atmospheric deposition in Czech Karst. The results of long-term monitoring of atmospheric deposition carried out at two localities in the Czech Karst were used for the purpose of comparison. The first locality is situated at the top of the hill Zlatý kůň. The second locality is positioned at the top of the hill Na Čihadle. The important characteristic of the sampling site is the location close to one of the largest quarries in the Czech Republic, moreover in the protected landscape area of Czech Karst.

Monitored compounds are represented by major cations and anions Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} and trace elements Cu, Mn, Fe, Zn, Pb, Be, As, Sr, Cd, Al, Cr.

Monthly collected samples of atmospheric precipitation are not an ideal means for the assessment of long range transport and meteorological influence on the chemical composition of atmospheric deposition. This is the main reason why only raw differences between samples were determined. Statistically significant differences were found between western cyclonic type of circulation and weather types with southern direction of circulation. The lowest concentrations of analysed substances are transported by south-western cyclonic type whilst the highest concentrations are connected with western cyclonic type of circulation.

Collected samples show seasonal variation in concentrations of chemical compounds and elements. The summer samples have significantly lower concentrations of major part of analysed substances compared to the samples collected in winter. This is caused by higher precipitation amount in summer and higher activity of emission sources in the winter.

The results of cluster analysis applied on the chemical composition data of the samples were similar. The samples were divided into clusters corresponding to the season in which they were collected and partly to the prevailing weather type.

1. Úvod

Data získaná během systematického monitoringu atmosférické depozice prováděného v oblasti Českého krasu se v tomto článku pokusíme zhodnotit zvláště se zaměřením na vliv meteorologické situace a sezónní variability. Pro srovnání byly vybrány dvě lokality: KJ1, která se nalézá se na vrcholu kopce Zlatý kůň, a KJK umístěná na vrcholu kopce Na Čihadle. Sledované látky je možné rozdělit do dvou skupin. První skupina hlavních kationtů a aniontů je zastoupena Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Druhou skupinu tvoří stopové prvky Cu, Mn, Fe, Zn, Pb, Be, As, Sr, Cd, Al, Cr. Přesné rozmístění lokalit a metodiku odběrů a zpracování vzorků podrobně popisují Dobešová a kol. (2001) a Dobešová a kol. (2003) v tomto čísle časopisu Český kras, kde jsou také rozebrány trendy v časovém vývoji a diskutovány možné zdroje sledovaných látek.

2. Dálkový transport kontaminantů a povětrnostní situace

Zkoumané lokality se nalézají v průmyslové oblasti. Kromě zřejmého lokálního ovlivnění chemického složení vzorků atmosférické depozice však může mít značný význam i dálkový transport znečištění. Pro tento transport je charakteristická přímá souvislost s atmosférickým prouděním a meteorologickou situací.

Za účelem zjištění původu atmosférických kontaminantů jsou obvykle počítány zpětné trajektorie. Jedná se o trajektorie počítané v poli fiktivního proudění, jehož rychlost má stejnou velikost jako rychlost skutečného proudění, ale opačný směr (Bednář a Zikmund 1985). Zpětné trajektorie, ovlivněné zdrojovými oblastmi vzduchových hmot, se mohou nápadně měnit v časových intervalech kratších než 12 hodin. Proto, za účelem lepšího porozumění transportním mechanismům, je vhodné provádět měření v kratších časových intervalech.

Měsíční kumulativní vzorky atmosférické depozice nejsou tedy příliš vhodné pro porovnávání vlivu dálkového transportu, neboť k jednomu typu proudění dochází v rozmezí maximálně několika dní. Tím se zvyšuje pravděpodobnost, že v měsíčním kumulativním vzorku budou charakteristické znaky jednotlivých typů setřeny.

Ve snaze minimalizovat tento pro výzkum dálkového transportu nepříznivý fakt byla použita data z ČHMÚ o denních srážkových úhrnech na nejbližších meteorologických stanicích Beroun a Neumětely a záznamy typizovaných povětrnostních situací, které se stanovují pro každý den.

Znalost denních srážkových úhrnů a příslušné povětrnostní situace poskytla podklady pro přiřazení jedné převládající povětrnostní situace každému měsíčnímu vzorku.

Až na malé odchylky byly denní srážkové úhrny na stanicích Beroun a Neumětely zhruba stejné. Monitorovaná oblast se nachází v polovině vzdálenosti mezi Berounem a Neumětely. Je tedy možno považovat tyto srážkové úhrny za platné i pro koněpruskou oblast.

Určitému měsíci byla vždy přiřazena ta povětrnostní situace, již odpovídaly v součtu nejvyšší srážkové úhrny. Ve více než polovině případů se současně jednalo o povětrnostní situaci, která byla v daném měsíci nejčastější.

Celkově je rozlišováno 28 typů povětrnostních situací. Podrobný popis všech typů lze najít např. v publikaci: Brádka a kol. (1961); Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR (1972), Křivancová a Vavruška (1997). Těch, které byly ve sledovaném období natolik významné, že byly přiřazeny jednotlivým měsícům bylo však pouze 14. Jednalo se o situace typu B, Bp, C, Cv, NEc, NWc, SEc, SWc1, SWc2, SWc3, Vřz, Wal, Wc a Wcs. Nízký počet zastoupení jednotlivých typů povětrnostních situací negativně ovlivňoval statistické zpracování.

Za účelem vytvoření menšího počtu skupin o větším počtu členů byly pro další zpracování na základě své typologické příbuznosti sloučeny situace B a Bp, situace SWc1 až SWc3 a situace Wc a Wcs. Situace C, Cv, NEc a Wal, které se vyskytly méně než třikrát byly z dalšího zpracování vyřazeny.

Za účelem zjištění, zda-li se mezi sebou odlišují skupiny měsíčních vzorků atmosférické depozice, kterým byla přiřazena rozdílná synoptická situace, byla použita jednocestná analýza variance (ANOVA) a Kruskal-Wallisův test. Jako shrnující parametr charakterizující celkovou mineralizaci srážek byla použita specifická vodivost. Data byla logaritmicke transformována, aby se jejich rozdělení přiblížilo normálnímu. Výsledky jsou znázorněny v tabulce 1.

Tabulka 1. Výsledky analýzy variance aplikované na měrnou vodivost vzorků, kterým byla přiřazena převládající povětrnostní situace. Ve všech případech jsou hladiny pravděpodobnosti nižší než kritická hladina pravděpodobnosti 0,05.

Lokalita	ANOVA	Kruskal-Wallisův test
KJ1	0.03698	0.012669
KJK	0.01416	0.043875

Tabulka 1. Výsledky analýzy variance aplikované na měrnou vodivost vzorků, kterým byla přiřazena převládající povětrnostní situace. Ve všech případech jsou hladiny pravděpodobnosti nižší než kritická hladina pravděpodobnosti 0,05.

Table 1. The results of the analysis of variance where the prevailing weather type was used as the factor variable and the specific conductivity as the response variable. The probability values are lower than the critical level 0,05 in both cases.

¹ Geologický ústav AV ČR, Rozvojová 135, 165 02 Praha 6 - Lysolaje

Poděkování: Publikované výsledky výzkumu byly financovány ve spolupráci s firmou Velkolom Čertovy schody a z prostředků Výzkumného záměru AV ČR AV0 Z3013912 a Programu rozvoje badatelského výzkumu v klíčových oblastech vědy K 3046108 "Klimatické a antropogenní vlivy na vývoj přírodního prostředí". Poděkování patří také Petru Skřivanovi za četné a trpělivě poskytované konzultace a Miroslavu Karlíkovi za všestrannou technickou spolupráci.

Čes. kras (Beroun), 29 (2003), 33-40, 5 obr., 11 tab.

ISSN 1211-1643

ISBN 80-902098-7-4

Vypočtená hladina pravděpodobnosti je ve všech případech nižší než kritická hladina pravděpodobnosti 0,05, z čehož vyplývá, že zkoumaná závislost je průkazná. Obě lokality jsou situovány na vyvýšených místech s vysokou průměrnou rychlostí větru, nedochází tudíž ke zvýšení koncentrací znečišťujících látek v ovzduší vlivem nedostatečného proudění a projevy dálkového transportu tak nejsou potlačeny místními vlivy.

Z analýzy variance vyplývá průkazná závislost již v případech, kdy ze zkoumaného souboru dat jsou vzájemně odlišné alespoň dvě skupiny. Za účelem zjištění, které povětrnostní situace se od sebe vzájemně odlišují, byly použity testy mnohonásobného porovnávání: Tukey-Kramerův test mnohonásobného porovnávání a Fischerův LSD test mnohonásobného porovnávání. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 2.

	lokality KJ1		lokality KJK	
situace	Tukey-Kramer	Fisher	Tukey-Kramer	Fisher
SWc	Wc	Wc, SEc	Wc	Wc
B		Wc	Wc	Wc
Vfz				Wc
Wc	SWc	SWc, B	SWc, B	Vfz, SWc, B
SEc		SWc		-

Tabulka 2. Výsledky testů mnohonásobného porovnávání. Pod jménem testu je uvedena povětrnostní situace odlišná od situace uvedené v prvním sloupci. Symbol - značí, že povětrnostní situace nebyla na dané lokalitě zastoupena.

Table 2. The results of multiple comparison tests. Weather type different from the weather type mentioned in the first column is listed under the name of the test. The symbol - means that the weather type was not represented enough at the locality.

Průměrné hodnoty koncentrací ($\mu\text{g.l}^{-1}$) všech analyzovaných chemických látek vzorků přiřazených jednotlivým povětrnostním situacím na obou lokalitách jsou uvedeny v tabulkách 5. a 6.

Statistické charakteristiky jednotlivých situací jsou na obou lokalitách podobné. Vzorky s nejvyšší měrnou vodivostí byly odebrány při převládající západní cyklonální situaci (Wc+Wcs). Hodnoty měrné vodivosti jihovýchodní cyklonální situace SEc jsou velmi podobné, případně i mírně vyšší na lokalitě KJ1. Je však nutné brát v úvahu, že tato situace nebyla zastoupena na lokalitě KJK a na lokalitě KJ1 bylo toto proudění přiřazeno pouze třem vzorkům. Ačkoliv se hodnoty měrné vodivosti i koncentrace analyzovaných látek ve srážkách svou velikostí blíží hodnotám západní cyklonální situace, je původ znečišťujících příměsí při této situaci odlišný. Východní složka zastoupená v tomto typu proudění přináší zvýšené koncentrace většiny látek. Naopak jednoznačně nejnižší mineralizaci mají srážky spojené s jihozápadní cyklonální situací (SWc). Mezi těmito krajními případy se nachází povětrnostní situace charakterizovaná brázdou nízkého tlaku (B+Bp). Proudění při této povětrnostní situaci se podobá proudění při situaci SWc a stejně tak hodnoty měrné vodivosti srážek, které toto proudění přináší, patří mezi nižší. Střední až vyšší hodnoty měrné vodivosti má dále povětrnostní situace spojená s vchodem frontální zóny (Vfz). Podobně jako u západní cyklonální situace se jedná o západní proudění a také koncentrace analyzovaných látek jsou blízké koncentracím látek ve srážkách příslušejících západní cyklonální situaci. Převažující proudění při zkoumaných povětrnostních situacích je znázorněno na obrázku 2.

3. Sezónní variabilita

V našich zeměpisných šířkách se projevují výrazné klimatické rozdíly mezi létem a zimou. Kromě rozdílů v atmosférickém proudění jsou pro jednotlivá roční období typické odlišné srážkové úhrny. Koncentrace látek během srážkové události se snižuje s narůstajícím množstvím srážek. Působení těchto dvou faktorů je přirozené, je však doplněno i výrazným vlivem lidské činnosti. Celkově vyšší intenzita vytápění v zimním období přináší vyšší spotřebu energie

situace	počet	Φ_a	Φ_v	medián	směr. odchylka	stř.chyba průměru	minimum	maximum	rozsah
B+Bp	16	36.16	27.46	21.5	41.65	10.41	11.5	180	168.5
SEc	3	48.1	36.73	50	20.91	12.08	26.3	68	41.7
SWc1-3	12	23	19.42	19.7	10.06	2.91	14.5	48	33.5
Vfz	8	31.08	25.52	32.75	9.63	3.4	14.5	46	31.5
Wc+Wcs	9	46.91	32.26	48.5	19.36	6.45	15.6	82	66.4

Tabulka 3. Statistické charakteristiky vodivosti vzorků srážek na lokalitě KJ1 v jednotkách $\mu\text{S.cm}^{-1}$ s ohledem na převládající synoptickou situaci. Kromě aritmetického průměru je zde uveden i vážený průměr Φ_v vztahený k objemu vzorku.

Table 3. Statistical characteristics of specific conductivity ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) of precipitation sampled at the locality KJ1 concerning the prevailing weather type. The arithmetic average Φ_a is adduced together with the volume weighted average Φ_v .

situace	počet	Φ_a	Φ_v	medián	směr. odchylka	stř.chyba průměru	minimum	maximum	rozsah
B+Bp	11	25.82	21.78	21.5	9.71	2.93	11.3	42	30.7
SWc1-3	10	24.11	20.88	25.25	8.62	2.73	13.1	36.2	23.1
Vfz	4	24.63	21.15	20	13.2	6.6	14.5	44	29.5
Wc+Wcs	7	61.36	41.15	46	47.86	18.09	15.2	160	144.8

Tabulka 4. Statistické charakteristiky vodivosti vzorků srážek na lokalitě KJK v jednotkách $\mu\text{S.cm}^{-1}$ s ohledem na převládající synoptickou situaci. Kromě aritmetického průměru je zde uveden i vážený průměr Φ_v vztahený k objemu vzorku.

Table 4. Statistical characteristics of specific conductivity ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) of precipitation sampled at the locality KJK concerning the prevailing weather type. The arithmetic average Φ_a is adduced together with the volume weighted average Φ_v .

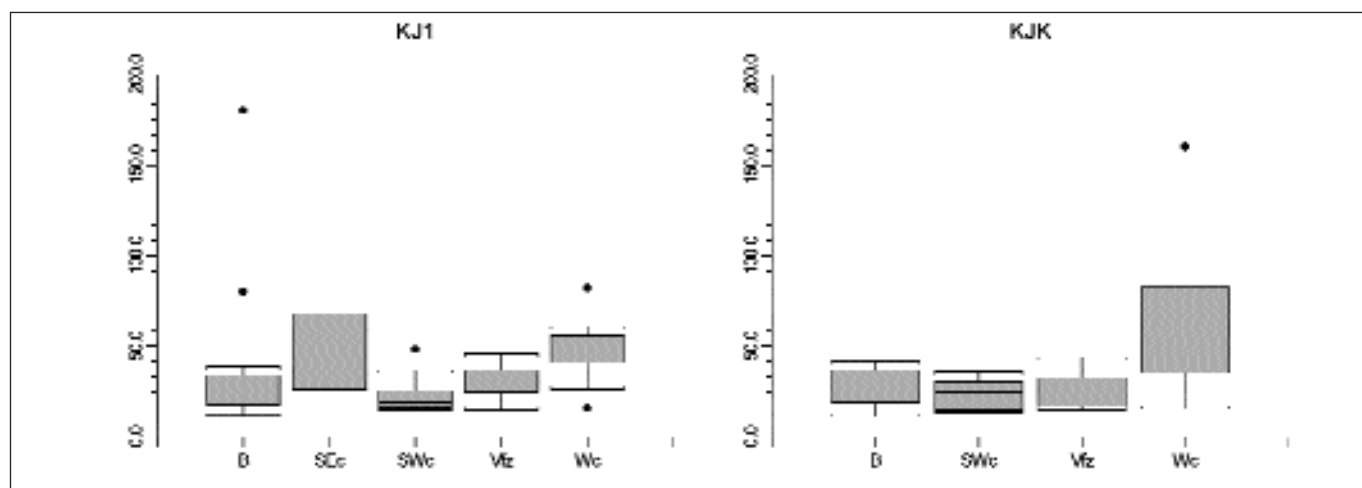
Statisticky významné odlišnosti mezi vodivostí vzorků srážek a jim přiřazenými povětrnostními situacemi se vyskytují pouze v některých případech. Nejvýraznější rozdíl je mezi situacemi Wc a SWc.

Statistické charakteristiky vodivosti vzorků srážek s ohledem na převládající synoptickou situaci lze nalézt v tabulkách 3. až 4. Jejich grafické znázornění formou krabicových diagramů je na obrázku 1. Tento typ diagramu slouží k přehlednému znázornění základních statistických charakteristik zpracovávaných dat. Umístění dvou protilehlých stran obdélníku je určeno hodnotami prvního a třetího kvartilu, střední příčka je na úrovni mediánu. Výběžky vystupující z obdélníku, sahají k takovému nejvzdálenějšímu pozorování, které není od bližšího kvartilu dále než ve vzdálenosti 1,5 násobku kvartilového rozpětí. Odlehlejší pozorování jsou vyznačena dále jako body.

vyrobené převážně spalováním fosilních paliv a to nejen velkými emisními zdroji, ale i obyčejnými domácnostmi. Zvýšené emise se pak projevují i vyššími koncentracemi některých látek v atmosférické depozici. Lze proto očekávat, že kromě závislosti na povětrnostní situaci se ve vzorcích srážek objeví i výrazná závislost na ročním období.

Měsíční vzorky atmosférické depozice odebrané v jednotlivých hydrologických rocích byly rozděleny na letní (květen, červen, červenec, září a říjen) a zimní (listopad, prosinec, leden, únor, duben). Jako shrnující charakteristika pro testování pomocí jednocestné analýzy variance byla opět použita měrná vodivost.

Stejně jako v případě testování odlišnosti povětrnostních situací byla data logaritmicky transformována, aby se jejich rozdělení přiblížilo normálnímu.



Obrázek 1. Krabicové diagramy znázorňující statistické charakteristiky vodivosti vzorků srážek s ohledem na převládající synoptickou situaci na sledovaných lokalitách KJ1 a KJK. Na svislé ose je vodivost v jednotkách $\mu\text{S.cm}^{-1}$.

Figure 1. Box plots representing the statistical characteristics of specific conductivity of precipitation sampled at the localities KJ1 and KJK concerning to the prevailing weather type. The conductivity in $\mu\text{S.cm}^{-1}$ is on the vertical axis.

Výsledky jsou znázorněny v tabulce 7. Příslušné statistické charakteristiky se nalézají v tabulce 8. a jejich grafické znázornění je na obrázku 3.

Celkově vyšší hodnoty měrné vodivosti byly zaznamenány v zimním období. Důvodem jsou jednak vyšší srážkové úhrny v létě, které mají za následek snížení koncentrace vymývaných látek způsobené zředěním vzorku.

Dalším důvodem je vyšší spotřeba energie za účelem vytápění v zimních měsících, spojená s vyššími emisemi látek provázejících spalování fosilních paliv.

Jak vyplývá z tabulek 9. a 10., až na ojedinělé výjimky jsou koncentrace analyzovaných chemických látek v zimních obdobích vyšší než v letních. Obecně vzato koncentrace stopových kovů se v zimních obdobích zvyšují dvojnásobně, zatímco koncentrace hlavních kationtů a aniontů, přestože jsou také zvýšené projevují menší variabilitu.

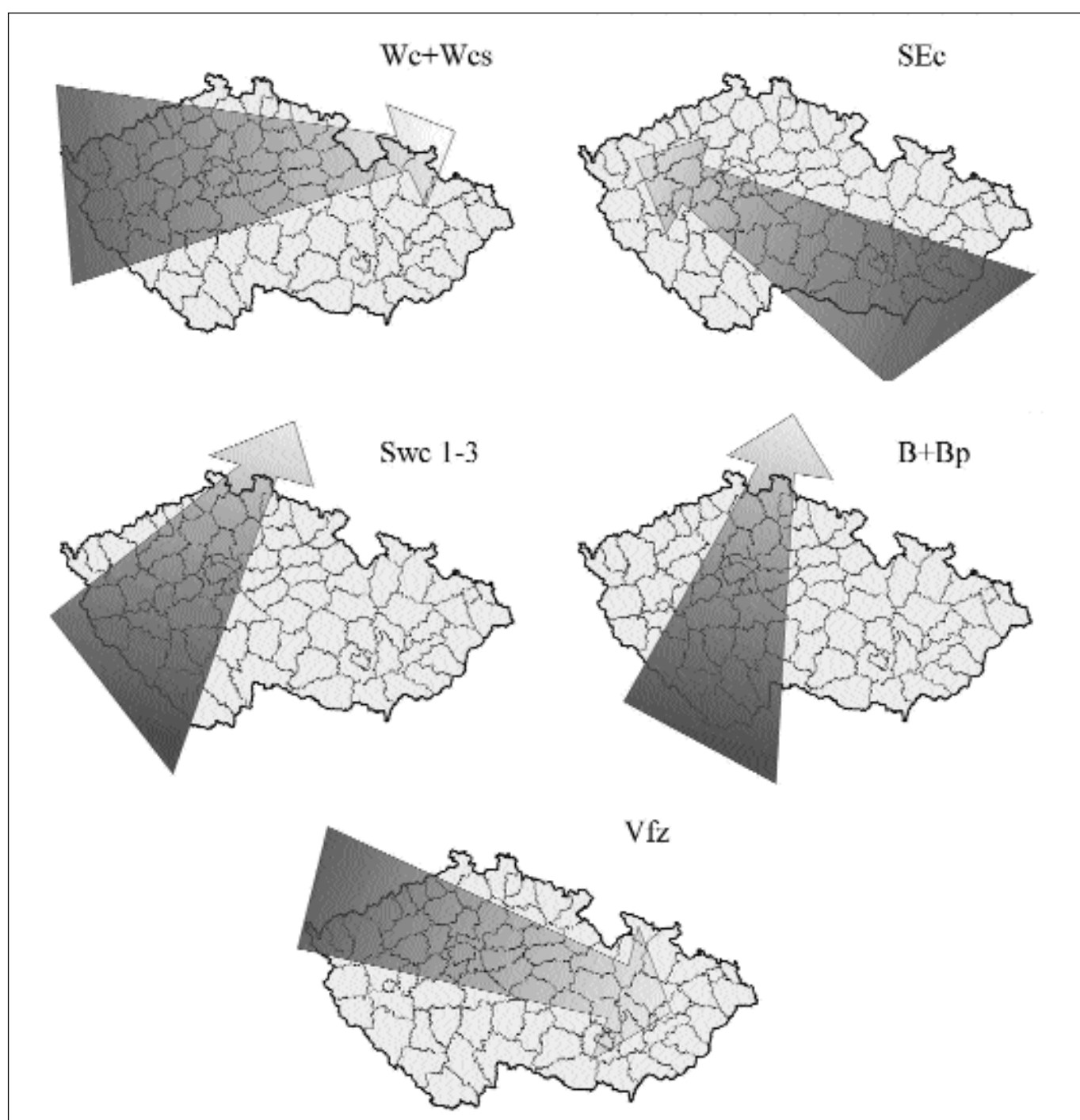
Zjednodušený pohled na proměnlivost koncentrací stopových kovů a hlavních iontů v důsledku odlišnosti mezi ročními obdobími poskytuje tabulka 11. Zde jsou uvedeny zaokrouhlené poměry průměrů koncentrací látek vážených objemem mezi zimními a letními obdobími.

Látky, které jsou součástí depozice na volné ploše odebrané v blízkosti Velkolomu Čertovy schody na lokalitě KJ1, lze na základě těchto poměrů rozdělit do několika skupin. Mezi látky, kde poměr koncentrací mezi zimními a letními měsíci dosahuje hodnot 1-2, a jejich koncentrace jsou tedy v zimním a letním období zhruba srovnatelné, patří Mn, Fe, Be, Sr, Al, K, Mg, Ca, NO_3^- a HCO_3^- . Patří sem tedy zejména látky, jejichž zdrojem je prašnost, která je vlivem činnosti VLČS srovnatelná v zimním i letním období. Dále sem spadá Be, jehož nízký poměr mezi koncentracemi v zimním a letním období je dán častým výskytem hodnot pod mezí detekce a z toho vyplývající neschopností

	$\text{H}^+ + \text{H}_2\text{PO}_4^-$		NH_4^+		NO_3^-		SO_4^{2-}		Cl^-		F^-	
	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v
V [ml]	248.37	-	245.33	-	285.04	-	695.89	-	447.82	-	-	-
Ca	0.92	0.86	2.73	1.77	1.82	0.93	4.32	2.32	2.87	1.80	-	-
Mn	7.42	6.80	17.53	14.47	6.80	6.33	9.38	6.78	12.87	9.28	-	-
Fe	40.05	49.51	236.67	316.93	44.30	43.49	74.75	48.92	90.36	38.30	-	-
Zn	7.36	6.31	18.33	9.38	6.17	4.37	14.75	10.92	18.43	12.51	-	-
Pb	1.37	1.08	4.89	2.49	0.99	0.92	2.55	1.84	2.79	1.87	-	-
Be	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02	-	-
As	1.03	0.99	1.48	0.74	0.54	0.43	0.53	0.60	1.08	0.61	-	-
Sr	2.26	1.99	3.83	3.16	1.99	1.71	3.43	2.43	4.27	2.58	-	-
Cd	0.04	0.09	0.24	0.13	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	-	-
Al	49.44	37.69	104.00	79.26	40.33	36.79	63.65	40.40	73.76	47.59	-	-
Cu	0.35	0.32	1.80	0.75	0.54	0.66	0.43	0.33	0.48	0.40	-	-
Na ⁺	189.36	149.47	190.00	150.82	188.83	148.08	221.23	151.98	433.08	275.65	-	-
K ⁺	128.13	93.75	236.67	217.31	118.06	123.20	111.86	71.32	123.08	76.05	-	-
NEH ⁺	451.31	441.44	1105.39	873.79	442.42	463.33	694.21	335.08	472.08	494.02	-	-
Mg ²⁺	73.69	68.49	113.53	93.89	50.00	45.18	39.09	59.27	115.08	81.24	-	-
Co ²⁺	4126.88	3011.17	7026.87	5288.38	3154.17	2312.83	4034.73	3317.02	8274.03	5393.88	-	-
P ⁻	45.81	31.49	61.80	47.48	22.90	17.86	68.30	39.34	82.00	45.08	-	-
Cl ⁻	432.50	330.41	494.00	321.16	543.67	416.33	317.13	346.32	1079.45	714.38	-	-
NO ₃ ⁻	3438.31	2971.81	3401.33	4809.91	2810.38	2486.01	3391.63	3045.75	5117.18	3838.76	-	-
NO ₂ ⁻	5973.50	3189.19	7372.43	6253.20	3709.75	2898.38	6378.63	4626.74	11451.50	8553.84	-	-
NO ₂ + NO ₃ ⁻	4405.88	3441.58	11895.33	8968.64	3372.58	2676.73	5368.73	4061.58	9083.18	5393.96	-	-

Tabulka 5. Průměrné hodnoty koncentrací ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) analyzovaných chemických látek ve vzorcích srážek odebraných na lokalitě KJ1 s ohledem na převládající synoptickou situaci. Kromě aritmetického průměru Φ_a je zde uveden i vážený průměr Φ_v vztahený k objemu vzorku V.

Table 5. Average concentration ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) of analysed compounds in precipitation on the locality KJ1 concerning the prevailing weather type. The arithmetic average Φ_a is added together with the volume weighted average Φ_v .



Obrázek 2. Schematické znázornění převažujícího proudění při zkoumaných povětrnostních situacích: západní cyklonální situace Wc+Wcs, jihovýchodní cyklonální situace SEc, jihozápadní cyklonální situace Swc 1-3, brázda nízkého tlaku a postupující brázda nízkého tlaku B+Bp, vchod frontální zóny Vfz.

Figure 2. Schematic illustration of the prevailing circulation connected with observed weather types: Wc+Wcs, SEc, Swc 1-3, B+Bp, Vfz.

sezónní variabilitu postihnout. V této skupině se nalézají i NO_3^- . Emise NO_x z nichž NO_3^- vznikají, jsou spojeny s vysokoteplotním spalováním, ke kterému dochází v zimě ve větší míře a s dopravou, která je v obou ročních obdobích srovnatelná.

Dvou až třináásobně zvýšených koncentrací dosahují v zimních měsících prvky a ionty: Cu, Zn, Pb, As, Cd, Cr, Na^+ , NH_4^+ , F, Cl a SO_4^{2-} . Zde se nalézají látky typicky obsažené v popílku vzniklém spalováním fosilních paliv (například As, Cd), které je v zimě vyšší, nebo látky, jako je SO_4^{2-} a F vznikající z prekurzorů spojených se spalováním fosilních paliv. Také do této skupiny patří kovy Cu, Zn, Pb a Cr. Ačkoliv se za jejich hlavní zdroje považuje hutnictví, mohou vznikat i při spalování domácích a průmyslových odpadů. Celoevropské emise amoniaku dosahují maximálních hodnot v jarních měsících, kdy dochází k aplikaci dusíkatých hnojiv v zemědělství a dobytek je vypouštěn na pastvu (Kopáček a kol. 1997). Oproti očekávání však NH_4^+ dosahuje výrazně vyšších koncentrací v zimním období, kam však byl zařazen

i duben, aby bylo zachováno řazení měsíců v rámci jednoho hydrologického roku.

Lokalita KJK se vyznačuje výrazně zvýšenými poměry koncentrací stopových kovů mezi zimními a letními měsíci ve srovnání s ostatními lokalitami, zatímco tyto poměry hlavních kationtů a aniontů jsou podobné poměrům na ostatních lokalitách. Projevu se zde patrně vliv lokálních zdrojů.

4. Shluková analýza

Shluková analýza patří mezi metody mnohorozměrné analýzy. Jejím cílem je nalézt v celém souboru dat takové skupiny objektů, které jsou si navzájem podobné, ale které se liší od objektů ostatních skupin, nebo najít takové skupiny proměnných, které jsou navzájem korelovány.

Srovnávané objekty mohou být charakterizovány kvalitativními i kvantitativními daty. Kvantitativní data přitom mohou být udávána v různých jednotkách. Proto byla nejprve provedena standardizace.

Dále byla provedena logaritmická transformace.

Výsledky shlukové analýzy aplikované na měsíční vzorky srážek charakterizované svým chemickým složením v podobě koncentrací sledovaných látek, pH, vodivosti a objemem jsou znázorněny v podobě dendrogramů na obrázcích 4. a 5. Na horizontální ose je dána hladina nepodobnosti, na které jsou objekty nebo skupiny objektů spojovány.

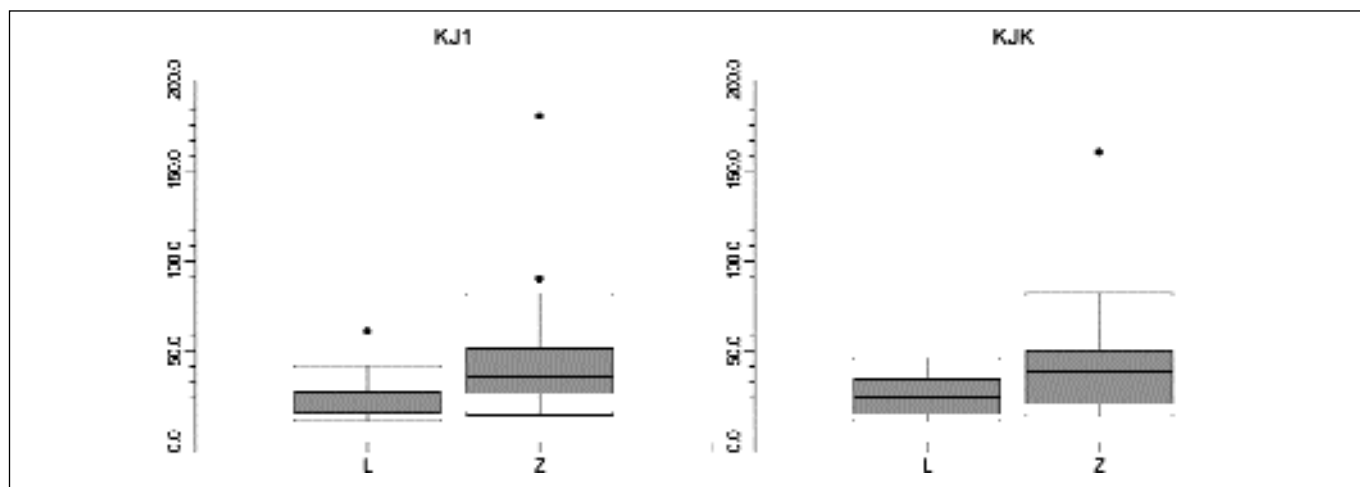
Na obrázku 4. je patrné rozdělení vzorků do dvou základních skupin. V první skupině převažují výrazné vzorky z letního období, je zde 24 vzorků

z letní sezóny a 6 vzorků ze zimní sezóny a ve druhé skupině naopak převládají vzorky pocházející ze zimního období (22 vzorků z letní sezóny a 6 vzorků ze zimní sezóny). Vliv sezónní variability je tedy zřejmý. Naopak závislost na převládající povětrnostní situaci se projevuje pouze slabě. V první skupině je zastoupeno 19 vzorků s převládající povětrnostní situací s jižní složkou proudění (3 povětrnostní situace B, 7 situací Bp, 9 situací SWc1-3) a 5 vzorků s přiřazenou povětrnostní situací se západní složkou proudění (1 situace Wc, 1 situace Wcs, 3 situace Vfz). Ve druhé skupině naopak mírně převládají vzorky s povětrnostní situací se západní složkou (5 situací Wc, 4 situace Wcs,

	B+Bp		SWc		Vfz		Wc+Wcs	
	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v	Φ_a	Φ_v
V [ml]	1017.32	-	1059.75	-	899.25	-	572.64	-
Cu	1.10	0.89	1.15	0.82	1.63	1.52	4.92	3.32
Mn	25.88	22.74	22.22	21.09	26.00	18.13	101.57	70.79
Fe	334.36	292.85	280.00	267.01	322.50	212.69	1304.29	822.85
Zn	19.91	17.60	13.60	11.77	12.00	10.42	52.86	39.77
Pb	3.72	3.25	3.43	3.64	2.11	1.53	10.10	7.64
Be	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.09	0.06
As	0.55	0.42	0.40	0.36	0.60	0.56	1.81	1.15
Sr	6.45	5.04	3.68	3.45	5.05	3.61	17.79	13.87
Cd	0.11	0.10	0.10	0.10	0.03	0.03	0.19	0.15
Al	161.55	147.29	142.73	133.38	170.60	110.55	926.49	605.91
Cr	0.42	0.39	0.39	0.40	0.79	0.54	4.76	2.69
Na+	270.00	212.86	192.00	130.12	187.50	151.96	513.33	372.49
K+	155.45	140.14	93.00	81.12	120.00	90.66	108.33	86.37
NH4+	504.82	386.67	476.90	430.16	513.50	462.82	510.50	481.47
Mg2+	98.18	93.40	89.00	74.49	110.00	92.17	141.67	116.27
Ca2+	3377.27	3216.30	3179.00	2762.08	2817.50	2243.13	6655.00	5106.93
F-	31.00	26.05	24.50	18.16	20.75	16.66	49.33	41.79
Cl-	523.64	408.84	620.90	452.03	475.00	383.14	1120.00	875.14
NO3-	3524.82	2997.24	3439.60	2941.07	4019.50	3376.90	4936.00	4056.77
HCO3-	5238.27	5104.10	4744.10	4256.68	2565.75	1987.96	11898.67	8669.15
SO42-	3166.73	2943.62	2652.40	2353.43	3749.00	3198.54	4169.83	3608.18

Tabulka 6. Průměrné hodnoty koncentrací ($\mu\text{S.l}^{-1}$) všech analyzovaných chemických látek ve vzorcích srážek odebraných na lokalitě KJK s ohledem na převládající synoptickou situaci. Kromě aritmetického průměru Φ_a je zde uveden i vážený průměr Φ_v vztahovaný k objemu vzorku V.

Table 6. Average concentration ($\mu\text{S.l}^{-1}$) of analysed compounds in precipitation on the locality KJK concerning the prevailing weather type. The arithmetic average Φ_a is added together with the volume weighted average Φ_v .



Obrázek 3. Grafické znázornění statistických charakteristik měrné vodivosti v jednotkách $\mu\text{S.cm}^{-1}$ v letním a zimním období na sledovaných lokalitách.

Figure 3. Box plots illustrating statistical characteristics of specific conductivity (in $\mu\text{S.cm}^{-1}$) in summer or winter season on both monitored localities.

lokalita	období	počet	Φ_a	Φ_v	medián	směr. odchylka	stř. chyba průměru	minimum	maximum	rozsah
KJ1	L	30	23.78	20.03	21.4	10.66	1.95	11.5	61	49.5
KJ1	Z	26	46.75	37.17	36.55	33.94	6.66	14.8	180	165.2
KJK	L	20	25.27	23.36	24.95	10.29	2.3	11.3	46.8	35.5
KJK	Z	18	44.82	32.55	39.5	34.3	8.09	14	160	146

Tabulka 8. Statistické charakteristiky měrné vodivosti měsíčních srážek odebraných na lokalitách KJ1 a KJK v jednotkách μS v zimním a letním období. Kromě aritmetického průměru Φ_a je zde uveden i vážený průměr Φ_v vztahovaný k objemu vzorku.

Table 8. Statistical characteristics of specific conductivity ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) of precipitation sampled at the localities KJ1 and KJK concerning to the season (L- summer, Z- winter). The arithmetic average Φ_a is added together with the volume weighted average Φ_v .

lokalita			V [ml]	Cu	Mn	Fe	Zn	Pb	Be	As	Sr	Cd	Al	Cr
KJ1	L	Φ_a	989.100	0.813	6.827	68.000	6.133	1.095	0.023	0.503	2.060	0.041	45.920	0.413
		Φ_v		0.565	6.211	59.063	5.097	0.977	0.021	0.400	1.769	0.037	35.911	0.445
	Z	Φ_a	483.100	3.666	12.554	91.607	17.036	2.530	0.030	1.380	4.102	0.089	76.418	0.507
		Φ_v		2.173	9.192	59.662	12.556	2.000	0.025	1.547	2.930	0.068	51.117	0.438
KJK	L	Φ_a	1186.600	1.118	22.075	311.950	13.950	3.213	0.020	0.358	3.885	0.090	154.995	0.388
		Φ_v		1.000	20.957	282.770	12.933	3.115	0.020	0.355	3.669	0.086	144.296	0.385
	Z	Φ_a	632.900	4.028	81.883	986.056	38.333	7.100	0.075	1.583	20.117	0.195	642.906	3.064
		Φ_v		3.166	70.262	744.194	32.755	6.199	0.069	1.476	18.762	0.185	485.105	2.028

Tabulka 9. Koncentrace stopových kovů ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) v zimním a letním období. Φ_a - aritmetický průměr, Φ_v - vážený průměr, V - objem vzorku.

Table 9. Concentrations of trace metals ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) in summer or winter season. Φ_a - arithmetic average, Φ_v - volume weighted average, V - volume of the sample.

lokalita			Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F	Cl	NO_3^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
KJ1	L	Φ_a	149.7	118.2	381.8	60.7	3536.0	30.1	392.2	2892.0	4969.5	3469.0
		Φ_v	123.5	95.7	378.4	48.5	2547.0	21.4	318.2	2510.5	3326.5	2795.8
	Z	Φ_a	329.6	151.5	896.1	101.5	6751.5	76.3	850.7	4902.4	9002.9	8158.3
		Φ_v	250.3	117.5	780.2	77.3	4780.2	50.3	658.5	4197.9	5965.4	5764.3
KJK	L	Φ_a	150.5	119.0	373.8	88.5	3302.5	22.3	409.5	2971.2	5404.0	2626.1
		Φ_v	133.4	109.3	340.4	80.6	3069.5	19.0	337.9	2692.1	4993.3	2559.7
	Z	Φ_a	470.0	170.6	711.5	137.6	5468.2	44.9	960.4	5116.2	8753.6	4529.1
		Φ_v	373.2	132.7	643.6	115.5	4396.4	37.6	792.3	4457.5	6692.1	3910.0

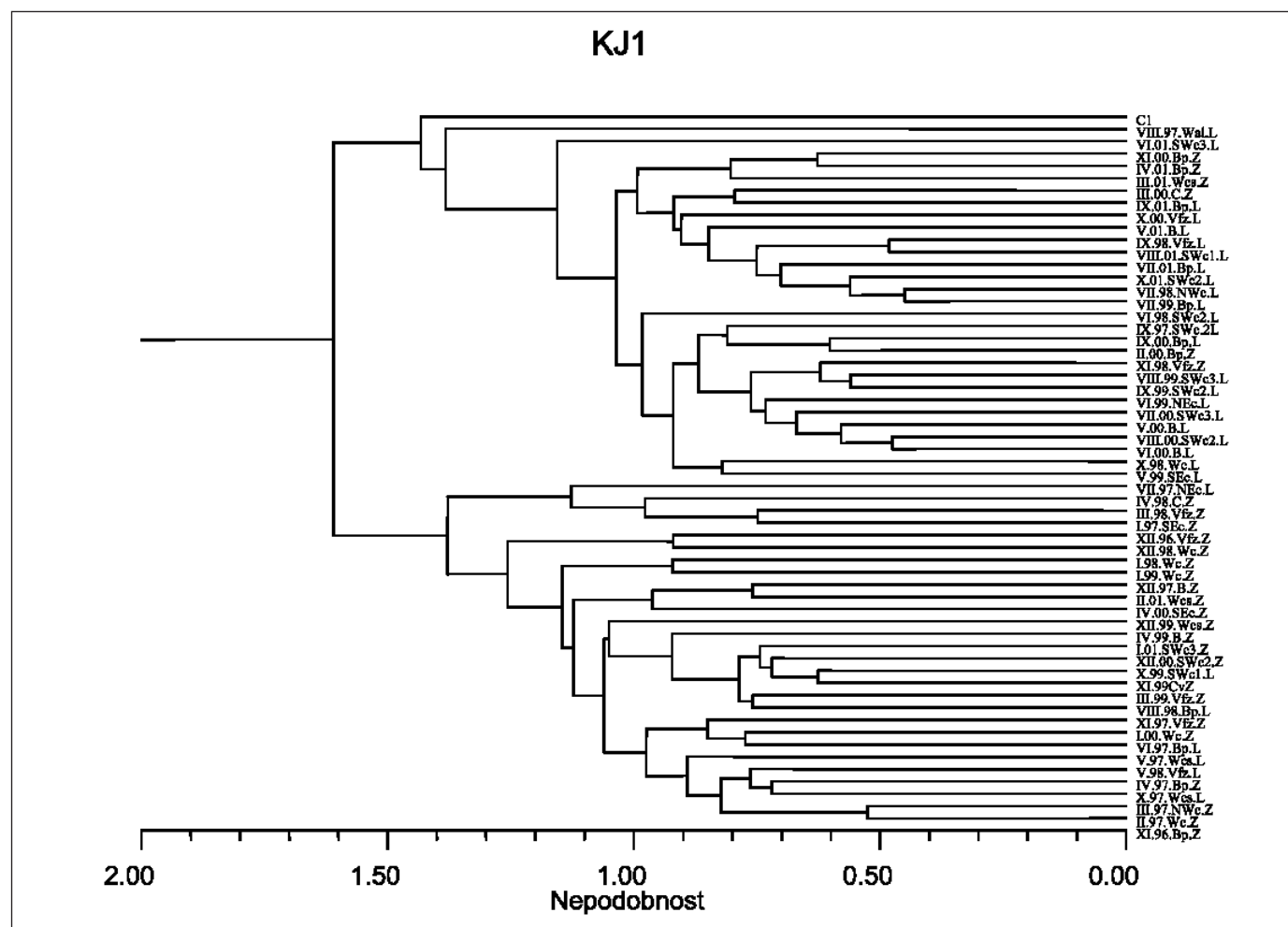
Tabulka 10. Koncentrace hlavních iontů ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) v zimním a letním období. Φ_a - aritmetický průměr, Φ_v - vážený průměr, V - objem vzorku.

Table 10. Concentrations of major cations and anions ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) in summer or winter season. Φ_a - arithmetic average, Φ_v - volume weighted average, V - volume of the sample.

	Cu	Mn	Fe	Zn	Pb	Be	As	Sr	Cd	Al	Cr	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F	Cl	NO_3^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
KJ1	3.8	1.5	1.0	2.5	2.0	1.2	3.9	1.7	1.8	1.4	1.0	2.0	1.2	2.1	1.6	1.9	2.3	2.1	1.7	1.8	2.1
KJK	3.2	3.4	2.6	2.5	2.0	3.4	4.2	5.1	2.2	3.4	5.3	2.8	1.2	1.9	1.4	1.4	2.0	2.3	1.7	1.3	1.5

Tabulka 11. Poměry vážených průměrů koncentrací látek v zimních a letních obdobích.

Table 11. Ratios of volume weighted averages in winter and summer season.



Obrázek 4. Dendrogram sestavený pomocí shlukové analýzy sledovaných charakteristik měsíčních vzorků srážek na lokalitě KJ1. Horizontální osa vyznačuje míru nepodobnosti vzorků. Jednotlivé vzorky jsou označeny podle měsíce, kdy byly odebrány (římská číslice), roku (arabské dvojčíslí), zkratky převládající povětrnostní situace a zkratky ročního období (L/Z).

Figure 4. The results of cluster analysis of samples collected at the locality KJ1 displayed as a tree diagram called a dendrogram. The horizontal axis of the dendrogram represents the distance or dissimilarity between clusters. The vertical axis represents the samples specified by month of collection (roman cipher), year (arabic cipher), abbreviation of the prevailing weather type and the abbreviation of the season (L - summer, Z - winter).

5 situací Vfz) nad vzorky s přiřazenou povětrnostní situací s jižní složkou proudění (2 situace B, 4 situace Bp, 3 situace SWc1-3).

V dendrogramu na obrázku 5. vytvořeném ze vzorků odebraných na lokalitě KJK jsou patrné dvě skupiny spojené na hladině nepodobnosti 1,75. První skupina je tvořena pouze zimními vzorky. Do druhé skupiny je zařazeno 20 vzorků odebraných v letním období a 8 vzorků odebraných v zimním období. I zde se objevuje náznak třídění podle povětrnostní situace.

V první skupině je zastoupeno 6 situací s převládajícím západním prouděním (3 případy Wc, 2 případy Wcs a 1 případ Vfz), oproti 4 zbývajícím povětrnostním situacím jiného typu. Ve druhé skupině silně převažují situace s jižním prouděním: desetkrát je zde zastoupena situace typu SWc1-3, šestkrát situace typu Bp a čtyřikrát situace typu B. To je dohromady 20 vzorků s převládající povětrnostní situací s jižní složkou proudění, oproti zbylým 8 odlišným situacím.

Celkově lze tedy shrnout výsledky shlukové analýzy jako prokazatelné pro stanovení významu sezónní variability. Na shluky vzniklé na základě podobného typu proudění nebo shody v typu převládající povětrnostní situace lze usuzovat pouze v hrubých rysech. Vzhledem k nerovnoměrnému zastoupení všech povětrnostních situací bylo nutné rozlišovat pouze situace se západní složkou proudění a situace s jižní složkou proudění.

Do první skupiny byly zařazeny povětrnostní situace typu Wc, Wcs, Vfz, druhá skupina je tvořena povětrnostními situacemi typu B, Bp, SWc1-3. O ostatních povětrnostních situacích vzhledem k jejich nepoměrně menšímu zastoupení nebylo možné usuzovat, zda v nějakém shluku převažují a nebo kvůli jejich odlišnému charakteru nebylo vhodné je přiřadit do jedné ze zmíněných skupin.

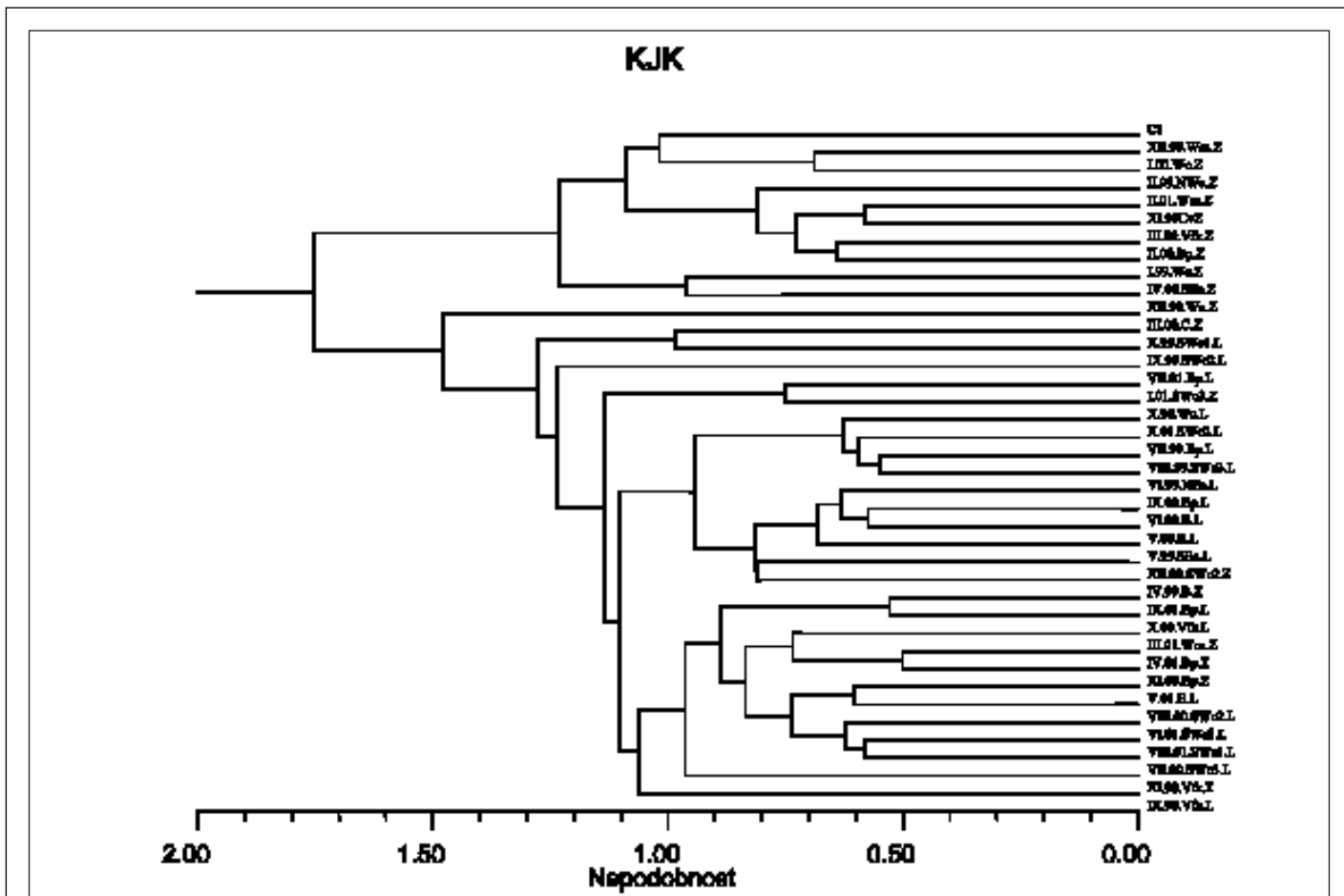
Vzhledem k tomu, že povětrnostní situace nejsou rovnoměrně zastoupeny ve všech obdobích, dalo by se usuzovat, že ve shlucích, ve kterých převládají vzorky z jednoho ročního období budou převažovat i vzorky s těmi povětr-

nostními situacemi, které se v tomto období vyskytovaly častěji. Nejednálo by se tak o závislost na typu proudění, ale o závislost na ročním období, ve kterém převládá určitý typ proudění. Situace je však opačná. Během sledovaného období byla měsíčním vzorkům přiřazena povětrnostní situace s jižní složkou proudění v 29 případech, z toho 10 případů spadá do letního období a 19 případů do zimního období. Povětrnostní situace s významnou západní složkou proudění byla přiřazena celkem 19 vzorkům, z toho 13 jich bylo odebráno v létě a 6 v zimě.

Zjednodušeně by se tedy dalo říci, že ve sledovaném období nastávaly povětrnostní situace s jižní složkou proudění dvakrát častěji v zimě a povětrnostní situace se západní složkou proudění dvakrát častěji v létě. Přesto v těch shlucích vzorků odebraných na lokalitách KJ1 a KJK, kde převládají vzorky z letního období, zároveň převládají vzorky s přiřazenou povětrnostní situací s jižní složkou proudění a naopak ve shlucích tvořených zimními vzorky převládají vzorky s povětrnostní situací se západní složkou proudění.

Z výsledků uvedených v oddílu o dálkovém transportu a povětrnostních situacích vyplývá, že vyšší koncentrace sledovaných látek mají vzorky, kterým byla přiřazena některá z povětrnostních situací se západní složkou proudění a naopak nejnižší koncentrace byly shledány u vzorků, kterým byla přiřazena povětrnostní situace s jižní složkou proudění.

V předcházejícím oddílu je popsán vliv sezónní variability, který se projevuje nižšími koncentracemi analyzovaných látek u vzorků odebraných v letním období a zvýšenými koncentracemi látek ve vzorcích odebraných v zimním období. Popsané shluky jsou tedy tvořeny v jednom případě vzorky s nižšími koncentracemi látek, kde jsou zastoupeny vzorky z letního období s převládajícími povětrnostními situacemi s jižní složkou proudění a v druhém případě vzorky s vyššími koncentracemi analyzovaných látek, odebranými v zimním období, nebo vzorky s povětrnostní situací se západní složkou proudění. Zmíněné závislosti jsou však patrné pouze ve výsledcích shlukové analýzy pre-



Obrázek 5. Dendrogram sestavený pomocí shlukové analýzy sledovaných charakteristik měsíčních vzorků srážek na lokalitě KJK. Horizontální osa vyznačuje míru nepodobnosti vzorků. Jednotlivé vzorky jsou označeny podle měsíce, kdy byly odebrány (římská čísla), roku (arabské dvojčíslí), zkratky převládající povětrnostní situace a zkratky ročního období (L/Z).

Figure 5. The results of cluster analysis of samples collected at the locality KJK displayed as a tree diagram called a dendrogram. The horizontal axis of the dendrogram represents the distance or dissimilarity between clusters. The vertical axis represents the samples specified by month of collection (roman cipher), year (arabic cipher), abbreviation of the prevailing weather type and the abbreviation of the season (L - summer, Z - winter).

zentovaných v podobě dendrogramů vytvořených na základě dat, kde jsou chemické parametry vzorků srážek uvedeny v podobě koncentrací (v jednotkách $\mu\text{g.l}^{-1}$). Při použití dat v podobě látkových toků (v jednotkách $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$), kde je eliminován vliv různých objemů vzorků a počtu dní expozice, není popsána závislost tak zjevná. Převaha vzorků z určitého ročního období v jednotlivých shlucích je méně výrazná. Zastoupení vzorků, kterým byla přiřazena povětrnostní situace s jižní nebo západní složkou proudění, ve vzniklých dvojicích shluků nejví v tomto případě žádnou zákonitost. Větší objemy mají vzorky odebrané v letním období a vzorky, kterým byla přiřazena povětrnostní situace s jižní složkou proudění. Lze tedy jednoznačně usuzovat, že při posuzování vlivu ročních období a převládající povětrnostní situace na chemické složení srážkových vod hraje objem vzorku významnou roli, a je-li jeho vliv zeslaben použitím dat v podobě látkových toků, dojde i k znevýznamnění pozorovaných závislostí.

5. Závěr

Data získaná během monitoringu atmosférické depozice v oblasti Českého krasu byla zpracována s ohledem na meteorologické ovlivnění lokalit a vliv sezónní variability, ačkoliv jejich povaha plně neodpovídá cíli. Za účelem výzkumu dálkového transportu a meteorologického ovlivnění chemického složení srážkové vody by byly vhodnější vzorky atmosférické depozice odebírané v kratších intervalech. Byly získány následující závěry:

1. Vliv povětrnostní situace převládající v daném měsíci je statisticky významný, k potvrzení této závislosti však byly použity skupiny povětrnostních situací vytvořené na základě příbuzného charakteru jednotlivých situací. Statisticky významné rozdíly byly shledány mezi cyklonálními situacemi s jižní složkou proudění a západními cyklonálními situacemi. Nejnížší koncentrace analyzovaných látek přináší jihozápadní cyklonální situace (SWc 1-3), zatímco nejvyšší koncentrace jsou spojeny se západními cyklonálními situacemi (Wc + Wcs).

2. Byla pozorována sezónní variabilita v koncentracích hlavních iontů a stopových kovů v odebraných vzorcích. Vzorky odebrané v letním období mají statisticky významně nižší koncentrace většiny analyzovaných látek oproti vzorkům odebraným v zimním období, jak bylo ověřeno pomocí analýzy variance. Projevují se tak vyšší srážkové úhrny v letním období a vyšší aktivita emisních zdrojů během zimního období.

3. Za účelem získání skupin vzorků vytvořených na základě exaktně definované míry podobnosti byla provedena shluková analýza vzorků zastoupených koncentracemi analyzovaných látek, hodnotou pH, vodivostí a objemem. Vytvořené shluky odpovídají členění na základě ročního období, ve kterém byl vzorek odebrán, méně výrazně se projevuje vliv převládajícího proudění.

6. Literatura

- Bednář J., Zikmunda O., 1985. Fyzika mezní vrstvy atmosféry. - Academia: 1-24. Praha
- Brádka, J., Dřevíkovský A., Gregor Z., Kolesár J., 1961. Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích. Praha, HMÚ 1-32. Praha
- Dobešová I., Cílek V., Skřivan P., Burian M., 2001. Chemismus atmosférických srážek v oblasti Českého krasu. Čes. kras (Beroun). 26: 40-46.
- Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR 1972. ČHMÚ, 1-21. Praha
- Kopáček J., Procházková L., Hejzlar J., Blažka P., 1997. Trends and seasonal patterns of bulk deposition of bulk nutrients in the Czech republic. Atmos. Environ., 31: 797-806.
- Křivancová S., Vavruška F., 1997. Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961 - 1990. Praha, ČHMÚ, 1-114. Praha
- Dobešová I., Špičková J., V., Skřivan P., Burian M., 2003. Atmosferické depoziční toky vybraných chemických prvků a jejich vzájemná korelace v oblasti Českého krasu. Čes. kras (Beroun) 29. Viz tento svazek.