

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra ekologie a životního prostředí



**Biomonitoring znečištění atmosféry těžkými kovy  
pomocí chemické analýzy mechu**

**Bc. Kateřina Hejzlarová**



Diplomová práce  
předložená  
na Katedře ekologie a životního prostředí  
Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

jako součást požadavků  
na získání titulu Mgr. v oboru  
Ochrana a tvorba životního prostředí

**Vedoucí práce: RNDr. Zbyněk Hradílek, Ph.D.**

Olomouc 2016



Hejzlarová K. (2016): Biomonitoring znečištění atmosféry těžkými kovy pomocí chemické analýzy mechu. Diplomová práce, Katedra ekologie a životního prostředí, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 92 s., v češtině.

## **Abstrakt**

Ke zjišťování hodnot atmosférického spadu těžkých kovů se v rámci celoevropského biomonitorovacího průzkumu, který je součástí mezinárodního programu OSN EHK ICP Vegetace, používá spektrometrická analýza vzorků mechu. Cílem mé práce bylo pomocí stejné metody podrobněji stanovit úroveň znečištění atmosféry na území severovýchodních Čech vybranými 6 těžkými kovy (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, a Zn) a zjistit, jak je naměřená koncentrace sledovaných prvků ovlivněna podkorunovými srážkami a zda se liší obsahy látek v mladších a starších segmentech mechu. Odběr vzorků jsem provedla opakovaně ve třech po sobě jdoucích letech (2011, 2012, 2013) na 12 lokalitách. Na každé z nich jsem zvolila 2 odběrová místa (pod korunami stromů a mimo okapovou zónu korun stromů) a každý vzorek byl následně ještě rozdělen na mladší a starší části rostlin. Celkem bylo analyzováno 144 vzorků mechu druhu travník Schreberův (*Pleurozium schreberi*). Naměřené koncentrace Cd, Cu a Pb byly signifikantně vyšší ve vzorcích odebraných pod korunami stromů než ve vzorcích odebraných na světlinách. Koncentrace Cd a Pb byly také signifikantně vyšší ve starších segmentech mechu. Naproti tomu koncentrace Cu byla vyšší v mladších částech rostlin. U Zn nebyl zjištěn signifikantní rozdíl ani mezi místy odběru ani mezi různě starými segmenty mechu. Naměřené koncentrace Cr a Ni byly tak nízké, že více než 50 % hodnot bylo pod mezí detekce přístroje, a výsledky proto nebylo možné statisticky vyhodnotit. V případě Cd, Cu a Pb se podařilo potvrdit předpoklad, že podkorunové srážky významně zvyšují obsah těchto látek v mechu. Zjištěné rozdíly v koncentracích Cd, Cu a Pb ve starších a mladších částech mechu nelze na základě této studie jednoznačně interpretovat, výrazně vyšší hodnoty koncentrace Cu v mladších segmentech ale poukazují na možnost, že je kov ze starších segmentů mechu vymýván. Za účelem porovnání nově získaných dat s výsledky mezinárodní studie jsem v r. 2013 odebrala vzorky také z 5 lokalit používaných pro účely uvedeného celoevropského biomonitorovacího průzkumu. Oproti předchozím zjištěním byly mnou naměřené hodnoty Cd a Cr výrazně vyšší. Naměřené koncentrace Cu, Ni, Pb a Zn byly ve většině případů v souladu s dlouhodobým trendem koncentrací těchto prvků na studovaném území.

Klíčová slova: bryomonitoring, emise, chrom, kadmium, měď, nikl, olovo, Travník Schreberův, zinek

Hejzlarová K. (2016): Bio-monitoring the pollution of the atmosphere by heavy metals using chemical analysis of moss. Diploma thesis, Department of Ecology and Environmental Sciences, Faculty of Science, Palacky University in Olomouc, 92 pp., in Czech.

## **Abstract**

The European bio-monitoring survey aimed at determining the atmospheric deposition rates of heavy metals, which is a part of the international UNECE ICP Vegetation programme, exploits spectrometric analysis of moss samples. The aim of my work was to determine, in greater detail, the level of air pollution in northeastern Bohemia with selected 6 heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) using the same method and to find out how the concentrations of the monitored elements are influenced by throughfall and whether there are any differences in their levels between younger and older segments of the moss plants. I collected the moss samples repeatedly, in three consecutive years (2011, 2012, 2013) at 12 sampling plots. At each sampling plot, I chose 2 different sampling locations (under the tree canopy closure versus outside the canopy drip zone). Each sample was divided into two parts: one containing younger segments of the plants and the other containing older ones. In total, 144 samples of *Pleurozium schreberi* were analysed. The detected concentrations of Cd, Cu and Pb were significantly higher in samples collected under the canopy closure than in those collected in gaps. The concentrations of Cd and Pb were also significantly higher in older segments of the moss plants. On the contrary, the concentration of Cu was higher in younger segments of the plants. No significant differences have been found for Zn, neither as regards different sampling locations, nor as regards younger versus older segments of the moss plants. The concentrations of Cr and Ni measured were so low that over 50 % of all values were below the detection limit of the analytical device used, and therefore the results could not be statistically evaluated. In case of Cd, Cu and Pb, I managed to confirm the assumption that the throughfall significantly increases the contents of these substances in moss. The differences in concentrations of Cd, Cu and Pb between younger and older segments of the plants cannot be clearly interpreted based on this study. Nevertheless, the higher Cu concentration values found in the younger segments of the plants suggest that the metal may be washed out of the segments. To be able to compare the newly acquired data with the results of the international study, I also collected samples in 2013 from 5 sampling plots used for the European bio-monitoring survey mentioned above. As compared to the previous results, I found substantially higher concentrations of Cd and Cr. In most cases, the detected concentrations of Cu, Ni, Pb and Zn were in line with the long-term trend of the concentration values of these elements in the study area.

Keywords: bryomonitoring, cadmium, chromium, copper, emissions of pollutants, lead, nickel, *Pleurozium schreberi*, zinc

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Zbyňka Hradílka, Ph.D., s pomocí dále jmenovaných osob a s použitím citované literatury.

V Olomouci 19. prosince 2016

Podpis

# Obsah

Seznam tabulek .....	viii
Seznam obrázků .....	x
Seznam příloh.....	xi
Poděkování.....	xii
<b>1. Úvod.....</b>	<b>1</b>
1.1 Těžké kovy v atmosféře .....	1
1.2 Vývoj sledování znečištění ovzduší .....	2
1.2.1 Počátky mezinárodní spolupráce.....	2
1.2.2 Ženevská úmluva (CLRTAP) .....	4
1.2.3 Protokol o těžkých kovech.....	6
1.3 Biomonitoring znečištění ovzduší .....	7
1.3.1 Mechy jako vhodný materiál pro biomonitoring .....	7
1.3.2 Mezinárodní biomonitorovací program .....	10
1.3.3 Faktory ovlivňující koncentraci sledovaných látek v meších .....	11
<b>2. Cíle práce .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Materiál a metody .....</b>	<b>17</b>
3.1 Studované území .....	17
3.1.1 Vymezení studovaného území .....	17
3.1.2 Geologie .....	19
3.1.3 Geomorfologie .....	21
3.1.4 Pedologie.....	22
3.1.5 Vegetační pokryv .....	23
3.1.6 Vodopis .....	23
3.1.7 Podnebí.....	23
3.1.8 Vliv člověka .....	24
3.2 Sledované prvky .....	26
3.2.1 Kadmium (Cd) .....	27
3.2.2 Chrom (Cr).....	29
3.2.3 Měď (Cu) .....	29
3.2.4 Nikl (Ni).....	30
3.2.5 Olovo (Pb).....	31

3.2.6	Zinek (Zn) .....	32
3.3	Použitý materiál.....	33
3.4	Odběr vzorků.....	34
3.5	Zpracování vzorků.....	36
3.6	Analýza vzorků .....	37
3.6.1	Použitá metoda a přístroje.....	37
3.6.2	Princip atomové absorpční spektrometrie.....	38
3.7	Zpracování dat.....	38
<b>4.</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>40</b>
4.1	Popis proměnných .....	42
4.2	Zjištěné koncentrace jednotlivých sledovaných prvků .....	43
4.2.1	Kadmium (Cd) .....	43
4.2.2	Chrom (Cr).....	48
4.2.3	Měď (Cu) .....	50
4.2.4	Nikl (Ni).....	55
4.2.5	Olovo (Pb).....	56
4.2.6	Zinek (Zn) .....	63
<b>5.</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>69</b>
5.1	Kadmium (Cd).....	69
5.2	Chrom (Cr) .....	72
5.3	Měď (Cu).....	74
5.4	Nikl (Ni) .....	77
5.5	Olovo (Pb).....	80
5.6	Zinek (Zn) .....	83
<b>6.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>86</b>
<b>7.</b>	<b>Citované zdroje.....</b>	<b>89</b>
<b>8.</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>93</b>

## Seznam tabulek

Tab. 1: Seznam lokalit odběru vzorků.....	18
Tab. 2: Seznam lokalit používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum.....	19
Tab. 3: Poměr detekovaných a nedetekovaných hodnot .....	40
Tab. 4: Porovnání výsledků obsahu Zn (mg/kg) získaných pro jednotlivé sezóny .....	41
Tab. 5: Korelační matice dat z r. 2011 .....	42
Tab. 6: Korelační matice dat z r. 2012 a 2013.....	42
Tab. 7: Přehled naměřených koncentrací Cd (mg/kg) v letech 2012 a 2013.....	43
Tab. 8: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Cd; 2012,2013).....	44
Tab. 9: Rozložení dat „les – neles“ (Cd; 2012, 2013) .....	44
Tab. 10: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013) .....	46
Tab. 11: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013).....	46
Tab. 12: Koncentrace Cd (mg/kg) – lokality MBP .....	48
Tab. 13: Přehled naměřených koncentrací Cr (mg/kg) v letech 2012 a 2013 .....	48
Tab. 14: Koncentrace Cr (mg/kg) – lokality MBP .....	49
Tab. 15: Přehled naměřených koncentrací Cu (mg/kg) v letech 2011–2013.....	50
Tab. 16: Výsledky analýzy rozptylu (Cu; 2011) .....	51
Tab. 17: Plánované (Cu; 2011) .....	51
Tab. 18: Průměry koncentrací „les – neles“ (Cu; 2011).....	51
Tab. 19: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Cu; 2011).....	51
Tab. 20: Výsledky analýzy rozptylu (Cu; 2012, 2013) .....	52
Tab. 21: Plánované kontrasty (Cu; 2012, 2013).....	53
Tab. 22: Průměry koncentrací „les – neles“ (Cu; 2012, 2013 .....	53
Tab. 23: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Cu; 2012, 2013).....	53
Tab. 24: Koncentrace Cu (mg/kg) – lokality MBP .....	54
Tab. 25: Přehled naměřených koncentrací Ni (mg/kg) v letech 2011–2013 .....	55
Tab. 26: Přehled naměřených koncentrací Pb (mg/kg) v letech 2011–2013 .....	56
Tab. 27: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Pb; 2011).....	57
Tab. 28: Rozložení dat „les – neles“ (Pb; 2011) .....	57
Tab. 29: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Pb; 2011).....	58
Tab. 30: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Pb; 2011) .....	58
Tab. 31: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Pb; 2012, 2013) .....	60
Tab. 32: Rozložení dat „les – neles“ (Pb; 2012, 2013).....	60
Tab. 33: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Pb; 2012,2013).....	61
Tab. 34: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Pb; 2012, 2013) .....	61
Tab. 35: Koncentrace Pb (mg/kg) – lokality MBP .....	63
Tab. 36: Přehled naměřených koncentrací Zn (mg/kg) v letech 2011–2013.....	63
Tab. 37: Výsledky analýzy rozptylu (Zn; 2011) .....	65
Tab. 38: Plánované kontrasty (Zn; 2011).....	65



Tab. 39: Průměry koncentrací „les – neles“ (Zn; 2011).....	65
Tab. 40: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Zn; 2011).....	65
Tab. 41: Výsledky analýzy rozptylu (Zn; 2012, 2013).....	66
Tab. 42: Plánované kontrasty (Zn; 2012, 2013).....	67
Tab. 43: Průměry koncentrací „les – neles“ (Zn 2012, 2013).....	67
Tab. 44: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Zn; 2012, 2013).....	67
Tab. 45: Koncentrace Zn (mg/kg) – lokality MBP.....	68

## Seznam obrázků

Obr. 1: Odběrové lokality v kontextu celého území ČR .....	17
Obr. 2: Poloha odběrových lokalit na ortofotomapě .....	18
Obr. 3: Poloha odběrových lokalit na mapě zobrazující zonaci CHKO Broumovsko .....	18
Obr. 4: Lokality používané pro mezinárodní biomonitorovací průzkum .....	19
Obr. 5: Geologická stavba Královéhradeckého kraje .....	20
Obr. 6: Geomorfologické členění Královéhradeckého kraje .....	22
Obr. 7: Travník Schreberův ( <i>Pleurozium schreberi</i> ) .....	33
Obr. 8: Histogram rozložení naměřených koncentrací Cd (mg/kg) .....	45
Obr. 9: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Cd; 2012, 2013) .....	45
Obr. 10: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013) .....	47
Obr. 11: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Pb; 2011) .....	57
Obr. 12: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Pb; 2011) .....	59
Obr. 13: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Pb; 2012, 2013) .....	60
Obr. 14: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Pb; 2012, 2013) .....	62
Obr. 15: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cd s výsledky celostátního průzkumu .....	70
Obr. 16: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cd s výsledky celostátního průzkumu .....	71
Obr. 17: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cr s výsledky celostátního průzkumu .....	73
Obr. 18: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cr s výsledky celostátního průzkumu .....	74
Obr. 19: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cu s výsledky celostátního průzkumu .....	76
Obr. 20: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cu s výsledky celostátního průzkumu .....	77
Obr. 21: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Ni s výsledky celostátního průzkumu .....	79
Obr. 22: Porovnání nově zjištěných koncentrací Ni s výsledky celostátního průzkumu .....	80
Obr. 23: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Pb s výsledky celostátního průzkumu .....	81
Obr. 24: Porovnání nově zjištěných koncentrací Pb s výsledky celostátního průzkumu .....	82
Obr. 25: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Zn s výsledky celostátního průzkumu .....	84
Obr. 26: Porovnání nově zjištěných koncentrací Zn s výsledky celostátního průzkumu .....	85

## Seznam příloh

Příloha 1: Poloha odběrových lokalit na základní mapě .....	93
Příloha 2: Poloha odběrových lokalit na zeměpisné mapě .....	94

## **Poděkování**

RNDr. Zbyňku Hradílkovi, Ph.D. děkuji za příkladné a vstřícné vedení. RNDr. Petru Hekerovi, Ph.D. děkuji za pomoc se zpracováním vzorků v chemické laboratoři a s jejich spektrometrickou analýzou. Mgr. Martinu Macháčovi, RNDr. Martinu Duchoslavovi, Ph.D. a RNDr. Janě Jičínské, Ph.D. děkuji za pomoc při zpracování a vyhodnocení statistických dat. Doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. děkuji za poskytnutí primárních dat z mezinárodního biomonitorovacího průzkumu a dalších informací k tématu. Mgr. Petru Köpplovi a RNDr. Aleši Hájkovi děkuji za přínosné konzultace a poskytnutí některé literatury. Za nepostradatelnou podporu děkuji svým rodičům, dalším členům rodiny, přátelům a kolegům. Všem uvedeným patří můj dík také za mimořádnou ochotu a trpělivost.

# 1. Úvod

## 1.1 Těžké kovy v atmosféře

Skupinu chemických prvků, jejichž hustota je větší než  $4,5 \text{ g/cm}^3$ , nazýváme těžké kovy (TK). Ačkoliv je tento termín často chybně používán jako synonymum škodlivosti pro živé organismy, patří do této skupiny i látky pro život nezbytné neboli esenciální. Jsou to např. železo (Fe), měď (Cu) a zinek (Zn), mangan (Mn) a kobalt (Co), které jsou ve stopovém množství potřebné pro správné fungování metabolismu a toxickými se stávají až ve vyšších dávkách. Naopak kovy jako rtuť (Hg), olovo (Pb), kadmium (Cd) nebo arsen (As) jsou jedovaté i v minimálních koncentracích.

TK byly vždy přirozenou součástí biosféry, do které se dostávají prostřednictvím vulkanické činnosti a zvětrávání hornin. V současnosti však do jejich distribuce významnou měrou zasahuje člověk a přirozené procesy mají v porovnání s lidskou činností mnohem menší význam. Většina částic TK, které se nachází v atmosféře, je dnes antropogenního původu. Na emisích TK se nejvíce podílí sektor veřejné energetiky a výroby tepla a sektor výroby železa a oceli (ČHMÚ 2013). V rámci těchto odvětví představuje největší zdroj znečištění ovzduší TK metalurgický průmysl, především pak pyrometalurgie, při které se kovová ruda zpracovává za velmi vysokých teplot (Bencko et al. 1995). Dalším významným zdrojem znečištění je spalování fosilních paliv. Množství takto vznikajících emisí TK závisí na druhu a původu paliva, typu spalovacího zařízení a teplotě spalování. Nezanedbatelný podíl na přísunu TK do atmosféry mají také staré ekologické zátěže po těžební a hutnické činnosti, které jsou zdrojem tzv. sekundární prašnosti. Doprava přispívá ke zvyšování koncentrace TK v ovzduší nejen spalováním fosilních paliv ale také částčkami materiálu, které se uvolňují otěrem brzd a pneumatik.

Jednou z charakteristických vlastností TK je jejich tendence akumulovat se jak v prostředí, tak v tělech živých organismů, kterým mohou způsobovat fyziologická i genetická poškození. TK vytvářejí vazby s bílkovinami, enzymy i nukleovými kyselinami, čímž mohou ovlivňovat jejich funkčnost (Landis et al. 2000).

Konkrétní účinky závisí na typu látky, která se do organismu dostala, a na její dávce. Dlouhodobé vystavení účinkům TK v mnoha případech poškozuje oběhovou a nervovou soustavu a může být také příčinou vzniku rakoviny. Částice TK z ovzduší kontaminují vegetaci, a tak se dostávají do potravního řetězce, kde se s narůstajícími trofickými úrovněmi hromadí. Proto jsou negativními účinky TK nejvíce ohroženi vrcholoví konzumenti a mezi nimi i člověk.

Vzhledem k nebezpečí, které TK představují pro životní prostředí i pro lidské zdraví, je nutné dlouhodobě sledovat jejich koncentrace v ovzduší a hledat způsoby, jak další kontaminaci prostředí omezit.

## **1.2 Vývoj sledování znečištění ovzduší**

### **1.2.1 Počátky mezinárodní spolupráce**

Kvalita ovzduší nad evropským kontinentem se začala výrazně zhoršovat začátkem druhé poloviny 20. století. Především ve válkou nejvíce postižené střední Evropě se rychlým tempem rozvíjela průmyslová výroba a s ní spojená výroba elektrické energie. S rozvojem průmyslu docházelo k čím dál většímu zatížení atmosféry znečišťujícími látkami.

V této době si skandinávští vědci povšimli, že poškození tamní přírody emisemi je nepoměrně větší, než jaké by se dalo očekávat vzhledem k množství látek vypouštěných do ovzduší na jejich území. Na základě provedených měření a studií došli k závěru, že nebezpečné zplodiny vyprodukované sousedními státy jsou atmosférou přenášeny na velké vzdálenosti. Nejprve byla za hlavního producenta znečištění dostávajícího se nad Skandinávii považována Velká Británie a tamní „vysoké komíny“ (tall stacks). Na začátku 70. let se však pozornost ze strany severských zemí přesunula ke střední Evropě. Norsko tehdy začalo poukazovat na neuspokojivý stav zdejšího životního prostředí, zvláště na zvyšující se znečištění ovzduší a vod. Jako hlavní znečišťovatelé byly označeny Československo, Polsko a Německo (Kurfürst 2004).

Československo proto navštívila švédská delegace složená z odborníků na problematiku znečištění atmosféry vedená tehdejší ministriní životního prostředí paní Gro Harlem Brandtland. Jednání u nás probíhala na Federálním ministerstvu pro technický a investiční rozvoj a na českém Ministerstvu lesního a vodního hospodářství. Jednání se za československou stranu zúčastnili zástupci obou zmíněných ministerstev a odborníci z Českého hydrometeorologického ústavu a ze Státní vodohospodářské inspekce. Švédská strana přednesla tezi, že škodlivé látky vypouštěné do ovzduší nad střední Evropou jsou přenášeny na velké vzdálenosti a způsobují okyselování skandinávských jezer, které vede k poklesu produkce ryb. Zároveň Československu nabídla odbornou pomoc při řešení redukce emisí. Zástupci našeho státu během těchto jednání představili jednak již realizované ale především plánované kroky, které měly vést ke snížení produkce škodlivin.

Obdobná jednání proběhla i v ostatních středoevropských zemích. Politický režim tehdejšího Československa i ostatních států RVHP však bránil zveřejňování údajů o skutečném stavu znečištění ovzduší. Publikovány mohly být pouze obecné informace a relativní údaje v procentuální formě (ibid.).

Dalším důležitým mezníkem v otázce celoevropské ochrany ovzduší byla Světová konference OSN o životním prostředí člověka, která se konala od 5. do 17. června 1972 ve Stockholmu. Jedním z jejích závěrů byla i deklarace principů ochrany prostředí, která se následně stala důležitým podkladem při řešení problematiky znečištění ovzduší přesahujícího hranice států.

Z politického hlediska hrála významnou roli Konference o bezpečnosti a spolupráci v Evropě, která začala 22. listopadu 1972 v Helsinkách. Vzhledem k tomu, že jednotlivá jednání se konala v průběhu několika dalších let, bývá označována jako Helsinský proces. Závěrečný dokument byl rozdělen na čtyři oblasti spolupráce (tzv. koše), druhá oblast zahrnovala mimo jiné spolupráci v oblasti environmentální problematiky. Bez těchto jednání by v tehdejší politicky rozdělené Evropě pravděpodobně nebylo jednotné řešení problematiky znečištění ovzduší vůbec možné (ibid.).

### 1.2.2 Ženevská úmluva (CLRTAP)

Výsledek dlouhodobých snah o sjednocení evropské ochrany ovzduší se dostavil ve dnech 13. – 14. listopadu 1979 v podobě Úmluvy o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – CLRTAP; dále jen „Úmluva“), která byla sjednána v rámci Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů v Ženevě (proto také bývá označována jako Ženevská úmluva). Úmluvu podepsalo 33 států, kromě 31 evropských zemí to byly také USA a Kanada. Aby mohla Úmluva vstoupit v platnost, musela být ratifikována min. 24 ze zavázaných států. Poté, co byla tato podmínka splněna, nabyla Úmluva 16. března 1983 účinnosti.

Tehdejší Československo mezi prvními 33 signatářskými státy chybělo, úmluvu přijalo až 23. prosince 1983 ratifikací. V platnost pak u nás Úmluva vstoupila 22. března 1984. Stala se tak jedinou mezinárodní smlouvou týkající se ochrany životního prostředí, která byla naší zemí podepsána ještě před rokem 1989. Česká republika přijala Úmluvu formou nástupnictví hned při svém vzniku 1. ledna 1993.

Jedním z prvních kroků, které byly u nás na základě Úmluvy realizovány, byl projekt odsíření velkých uhelných elektráren. Nově byl také zaveden systém podrobné inventarizace emisí. Od roku 1980 jsou emise evidovány Registrem emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO), který od roku 1993 spravuje ČHMÚ.

Podepsáním Úmluvy se země zavázaly k postupnému snižování produkce emisí, sledování obsahu škodlivin v ovzduší a jejich spadů, a k podpoře studia vlivu těchto látek na stav životního prostředí a zdraví člověka. K dosažení těchto cílů byly stanoveny následující prostředky: výměna informací, konzultace, výzkum, monitoring a přezkoumání technické politiky, vědeckých aktivit a technických opatření zaměřených proti znečišťování ovzduší.

Úmluva sama o sobě představuje spíše úvodní prohlášení – definuje hlavní problémy týkající se znečišťování atmosféry, formuluje základní principy a obecné cíle



ochrany ovzduší a navrhuje prostředky vhodné k dosažení těchto cílů. Konkrétní cíle a opatření jsou předmětem až následně přijímaných protokolů k Úmluvě.

I po více než 35 letech své existence představuje Úmluva jeden z nejvýznamnějších mnohostranných smluvních aktů v oblasti globální ochrany ovzduší. V průběhu let podepsalo Úmluvu mnoho dalších států a v současnosti má 51 smluvních stran. Dosud bylo k Úmluvě přijato 8 následujících protokolů:

**1. Protokol k Úmluvě LRTAP o dlouhodobém financování Programu EMEP** (Protocol to the LRTAP Convention on Long-term Financing of the EMEP Programme)

- Zkratka EMEP pochází z anglického European Monitoring and Evaluation Programme. Jedná se o program mezinárodní spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě.
- Protokol byl přijat 28. září 1984, v platnost vstoupil 28. ledna 1988.

**2. Protokol k Úmluvě LRTAP o snížení emisí síry nebo jejich toků přes hranice států nejméně o 30 %** (Protocol to the LRTAP Convention on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 %).

- Protokol byl přijat 8. července 1985, v platnost vstoupil 2. září 1987

**3. Protokol k Úmluvě LRTAP o omezení emisí oxidů dusíku nebo jejich toků přes hranice států** (Protocol to the LRTAP Convention on the Reduction of Emissions of Nitrogen Oxides or their Transboundary Fluxes)

- Protokol byl přijat 31. října 1988, v platnost vstoupil 14. února 1991.

**4. Protokol k Úmluvě LRTAP o omezení emisí těkavých organických látek nebo jejich toků přes hranice států.** (Protocol to the LRTAP Convention on the Reduction of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes).

- Protokol byl přijat 18. listopadu 1991, v platnost vstoupil 29. září 1997.

**5. Protokol k Úmluvě LRTAP o dalším snížení emisí síry (tzv. druhý protokol o síře)** (Protocol to the LRTAP Convention on Further Reduction of Sulphur Emissions – „the 2<sup>nd</sup> Protocol on Sulphur“).

- Protokol byl přijat 14. června 1994, v platnost vstoupil 5. srpna 1998.

**6. Protokol o těžkých kovech k Úmluvě LRTAP** (Protocol on Heavy Metals to the LRTAP Convention).

- Protokol byl přijat 24. června 1998, v platnost vstoupil 29. prosince 2003.

**7. Protokol k Úmluvě LRTAP o persistentních organických znečišťujících látkách (tzv. protokol POPs)** (Protocol to the LRTAP Convention on Persistent Organic Pollutants – „the POPs protokol“).

- Protokol byl přijat 24. června 1998, v platnost vstoupil 23. října 2003.

**8. Protokol k Úmluvě LRTAP o snížení acidifikace, eutrofizace a přízemního ozonu** (Protocol to the LRTAP Convention to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone).

- Protokol byl přijat 30. listopadu 1999, v platnost vstoupil 17. května 2005.

### 1.2.3 Protokol o těžkých kovech

Na přípravě protokolu o těžkých kovech mělo velký podíl Československo a následně Česká republika. V průběhu roku 1988 byla vytvořena tzv. Účelová pracovní skupina pro emise těžkých kovů (the Task Force on Heavy Metals Emissions – TFHM). Skupina byla tvořena evropskými specialisty na tuto problematiku a jejím vedením byl pověřen Ing. Jiří Kurfürst, CSc. z Českého hydrometeorologického ústavu.

V průběhu příprav protokolu o těžkých kovech se uskutečnila 4 jednání TFHM, z nichž první dvě se konala v Praze (r. 1989 a r. 1991), třetí jednání proběhlo v Berlíně (r. 1993) a čtvrté v Haagu (r. 1994). Výsledky těchto jednání byly shrnuty v State-of-the-Art Report vydaném českou stranou v roce 1994. Koncem téhož roku se sešla výkonná rada úmluvy LRTAP a na základě výše uvedené závěrečné zprávy bylo

odsouhlaseno pokračování přípravy protokolu o těžkých kovech. Vlastní návrh protokolu připravila pracovní skupina „Ad Hoc Preparatory Working Group on Heavy Metals (PWGHM) do konce roku 1996.

Protokol o těžkých kovech byl přijat 24. června 1998, kdy jej podepsali představitelé 34 států včetně České republiky. Česká republika protokol ratifikovala 6. srpna 2002. V oficiální platnost protokol vstoupil 29. prosince 2003.

Jednotlivé státy se přijetím protokolu zavázaly ke snížení svých celkových ročních emisí olova, rtuti a kadmia. Dle přílohy 4 protokolu měl být nejpozději do 6 měsíců od data nabytí účinnosti protokolu snížen obsah olova v benzínu pro silniční motorová vozidla na koncentraci  $\leq 0,013$  g/l. Dalším důležitým bodem byl závazek ke snížení obsahu rtuti v alkalických manganových člancích. Příloha 7 protokolu obsahovala seznam alternativ k výrobkům obsahujícím těžké kovy, jako jsou elektronické součástky, baterie, dentální amalgámy, pesticidy, nátěrové hmoty apod.

V souladu se základními ustanoveními Úmluvy je prováděn soustavný monitoring znečištění ovzduší těžkými kovy. Od roku 2000 je úroveň atmosférické depozice TK v Evropě zjišťována pomocí chemické analýzy mechů v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace. Tento mezinárodní monitorovací program navázal na původní mezinárodní sledování spadu vybraných prvků řízené od roku 1990 skandinávskými odborníky.

### **1.3 Biomonitoring znečištění ovzduší**

#### **1.3.1 Mechy jako vhodný materiál pro biomonitoring**

Pro potřeby velkoplošného sledování znečištění ovzduší se bioindikátory využívají jako levná alternativa standardních měřicích stanic. Jejich výhodou je možnost získání dat z hustší sítě lokalit. Spolehlivost získaných dat je ale velkou měrou závislá na stanovení vhodné metodiky odběru a zpracování vzorků a jejím následném dodržení výzkumnými pracovníky (Fernández et al. 2015).

Živé organismy jsou k indikaci úrovně znečištění prostředí využívány v zásadě dvěma způsoby. Jako tzv. senzitivní indikátory se využívají citlivé organismy, které jsou při zvýšené koncentraci zjišťovaných látek poškozovány nebo hynou. Míra zatížení prostředí je pak odhadována na základě jejich početnosti nebo pokryvnosti na dané ploše. Často používanými senzitivními indikátory jsou citlivé druhy epifytických řas, lišejníků a mechorostů.

Jako tzv. akumulativní indikátory se využívají organismy, které jsou schopny danou látku do určité míry hromadit ve svých tělech bez zjevných známek poškození. Mezi takové organismy patří některé druhy epifytických řas, lišejníků a mechorostů, plodnice hub, borka stromů, některé cévnaté rostliny). Chemickou analýzou se zjišťují konkrétní koncentrace daných látek v odebrané biomase – relativní depoziční zátěž. Na základě dalších znalostí (jako je např. absorpční kapacita organismu pro daný prvek a průměrný nárůst biomasy tohoto organismu za určité období) je potom možné z naměřených koncentrací vypočítat průměrné zatížení sledované lokality – absolutní depoziční zátěž (Anděl 2011).

Z hlediska manipulace s živými organismy rozlišujeme dva základní způsoby biomonitoringu. Pokud jsou analyzovány organismy odebrané na místech svého přirozeného výskytu, jedná se o pasivní biomonitoring. V případě, že člověk tyto organismy instaluje na požadované lokality, hovoříme o aktivním biomonitoringu.

Pro účely biomonitorovacích průzkumů, jejichž záměrem je zjistit konkrétní koncentrace polutantů (tedy provést analýzu odebraných vzorků) se mnohem lépe hodí rostliny než živočichové a to z etických, praktických i vědeckých důvodů. Rostliny se jako modulární klonální organismy lépe vyrovnávají s odebráním jejich částí. Vhodnost použití rostlin k bioindikaci atmosférického spadu byla testována již na přelomu 70. a 80. let minulého století (Hutchinson & Whitby 1974, Rühling & Tyler 2001). Koncentrace prvků absorbovaných ze vzduchu je v rostlinných pletivech závislá na koncentraci těchto látek v atmosféře, schopnosti rostlin tyto prvky absorbovat, na poměru povrchu rostliny k její celkové hmotě, schopnosti iontové výměny rostliny a době expozice. Absorpci TK ovlivňují rovněž meteorologické a topografické faktory

a vzdálenost od zdroje znečištění (Rao 1982). Díky možnosti odebrání vzorků z husté sítě lokalit lze touto metodou odhalit i malé zdroje znečištění (Fernández et al. 2007).

Ze široké škály živých organismů jsou za nejvhodnější bioindikátory považovány epifytické mechorosty a lišejníky. Tyto organismy mají velké areály rozšíření, snadno se s nimi manipuluje a především vykazují velmi širokou škálu hodnot specifické citlivosti na atmosférické polutanty, která je výrazně větší než u většiny vyšších rostlin (Rao 1982).

Než se příslušné látky dostanou do rostlinných pletiv mechů (proces označovaný jako absorpce), jsou nejprve zachyceny na povrchu lístků (proces označovaný jako adsorpce). Nejlepšími adsorbenty TK mezi mechorosty jsou rašeliníky (*Sphagnum* sp.), které oproti ostatním zkoumaným druhům vykazují o 20 % vyšší schopnost adsorpce (González & Pokrovsky 2013). Vzhledem ke specifickým nárokům na životní podmínky je rozšíření těchto mechorostů ostrůvkovité a rašeliníky se proto nehodí k plošnému pasivnímu biomonitoringu. Úspěšně jsou ale používány k aktivnímu biomonitoringu prostřednictvím tzv. moss bags, tedy tašek naplněných odebraným mechem.

Jako velmi přesné akumulativní bioindikátory se osvědčily bokoplodé mechy. Nejčastěji jsou využívány následující druhy: travník Schreberův (*Pleurozium schreberi*), rokytník skvělý (*Hylocomium splendens*), lazovec čistý (*Scleropodium purum*), rokyt cypřišovitý (*Hypnum cupressiforme*), zpeřenka jedlová (*Abietinella abietina*), baňatky (*Brachythecium* spp.) a trněnky (*Eurhynchium* spp.). V porovnání s jinými bioindikátory vykazují hodnoty zjištěné analýzou těchto druhů vysokou míru korelace s naměřenými absolutními hodnotami aktuálního atmosférického znečištění (Suchara & Sucharová 1998a a 1998b). Další nezanedbatelnou výhodou těchto druhů je jejich hojné rozšíření a hodí se proto dobře i k pasivnímu biomonitoringu. Obecně je biomonitoring využívající mechorostů označován jako bryomonitoring (z lat. Bryophyta)

K účinné adsorpci polutantů dochází zejména díky skutečnosti, že epidermis mechorostů většinou není kryta kutikulou, která by zabraňovala pronikání cizorodých látek do pletiv. Významnou roli hraje také adsorpční kapacita pektinů v pletivech a

velký povrch buněčných struktur. Díky tomu, že se vstřebané látky v pletivech mechorostů akumulují dlouhodobě, můžeme jejich analýzou stanovit i atmosférickou depozici prvků vyskytujících se v ovzduší pouze ve stopovém množství. V případě těžkých kovů je akumulační kapacita mechorostů mnohem větší než akumulační kapacita cévnatých rostlin. (Rao 1982). Různé druhy mechů ovšem vykazují odlišnou adsorpční kapacitu pro jednotlivé prvky (např. Koz & Cevik 2013), v případě sběru více druhů je nutná transformace výsledků.

Další výhodou mechorostů oproti vyšším rostlinám je z hlediska bioakumulace absence pravých kořenů. Mechové rostlinky jsou prostřednictvím svých přichytných vláken (rhizoidů) v kontaktu jen s lesním opadem, případně nadložním humusem a z tohoto substrátu navíc přijímají jen minimum látek (Tyler 1970). Výsledky analýzy proto vypovídají o koncentraci zjišťovaných látek, které jsou převážně atmosférického původu a tato data nejsou nijak významně zkreslena koncentrací těchto látek v půdním pokryvu lokality odběru.

### **1.3.2 Mezinárodní biomonitorovací program**

Metoda zjišťování atmosférického spadu kovů pomocí analýzy mechu byla vypracována na přelomu 60. a 70. let na švédské univerzitě v Lundu. Vytvoření celoevropské biomonitorovací sítě pro sledování obsahu vybraných látek v ovzduší bylo iniciováno skandinávskými vědci v čele s Åke Rühlingem kolem roku 1980. První evropský biomonitorovací průzkum se uskutečnil v letech 1990-1991 a od té doby je opakován v 5letých intervalech. Postupně narostl počet zemí, které jsou do programu zapojeny. V r. 2005 to již bylo 28 evropských států, na jejichž území byly odebrány vzorky mechu z více než 6000 lokalit (<http://icpvegetation.ceh.ac.uk>). Zjišťovány jsou koncentrace následujících prvků: arsen (As), kadmium (Cd), chrom (Cr), měď (Cu), železo (Fe), rtuť (Hg), nikl (Ni), olovo (Pb), vanad (V) a zinek (Zn). Mnoho zemí testuje navíc také koncentrace hliníku (Al) antimonu (Sb) a celkového dusíku ( $N_{\text{celk.}}$ ) (např. Schröder et al 2010).

Z počátku byl celoevropský monitoring koordinován švédskými odborníky. Od r. 2000 je prováděn v rámci programu OSN EHK „Vlivy znečištění ovzduší na přirozenou vegetaci a plodiny“ (zkratka: ICP Vegetace) a řízen koordináčním centrem tohoto

programu, které sídlí v Centru pro ekologii a hydrogeologii v Bangoru ve Spojeném království. Pracovníci tohoto centra podávají zprávu „Pracovní skupině pro účinky“ (Working Group on Effects – WGE) zřízené na základě Úmluvy o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution – CLRTAP). Pracovní skupina shromažďuje výsledky a posuzuje účinky atmosférického znečištění na jednotlivé složky životního prostředí a na lidské zdraví. Na základě výsledků evropského biomonitorovacího průzkumu je zároveň vyhodnocována dostatečnost a efektivita opatření zakotvených v Aarhuském protokolu o těžkých kovech platném od r. 1998.

Celoevropské výsledky jsou zveřejňovány koordinačním centrem, jednotlivé státy získaná data prezentují formou národních zpráv a odborných publikací (např. Harmens et al 2008, Harmens et al 2012, Harmens 2015). V České republice proběhl tento velkoplošný biomonitoring v letech 1991, 1995, 2000 a 2005 a 2010. Byl veden pracovníky Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví v Průhonicích. Pracovníci oddělení Biomonitoringu zajišťovali veškeré práce spojené s odběrem a zpracováním vzorků, chemickou analýzou a vyhodnocením výsledků. Výsledky publikovali formou národních zpráv ČR doc. RNDr. Ivan Suchara, CSc. a Ing. Julie Sucharová, Ph.D. (Sucharová & Suchara 2000, Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008). Kromě povinně testovaných prvků zkoumá český tým i koncentrace dalších látek obsažených ve vzorcích mechu. Česká národní zpráva z r. 2008 obsahuje výsledky stanovených koncentrací 37 prvků naměřených ve vzorcích odebraných v průběhu let 2005-2006.

### **1.3.3 Faktory ovlivňující koncentraci sledovaných látek v meších**

Koncentrace sledovaných látek je primárně dána množstvím těchto látek uvolňovaných do prostředí z přírodních procesů (zvětrávání hornin, vulkanická činnost) a antropogenních zdrojů (metalurgie, spalování fosilních paliv, doprava atd.). Dále je ovlivňována mnoha dalšími faktory prostředí. V rámci celoevropského biomonitorovacího programu se vědci zabývají mimo jiné stanovením nejvýznamnějších z těchto činitelů a určením míry jejich vlivu na koncentraci jednotlivých prvků ve vzorcích. Závěry plynoucí z tohoto výzkumu prováděného na

území ČR jsou publikovány jako součást národních zpráv (např. Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008).

Výše zmíněné české studie ukazují, že variabilitu v obsahu příslušných prvků na našem území vysvětluje především 5 následujících faktorů: 1) eroze půdních povrchů spojená s následnou depozicí půdních částic, 2) přítomnost metalurgického průmyslu, 3) průmyslové spalování fosilních paliv (především energetický a teplárenský sektor), 4) místní anomálie distribuce prvků v matečných horninách a 5) odlišný vliv emisí a erodovaných částic na lokalitách s anomálním obsahem některých prvků v horninách.

Dále byla těmito studii zjišťována míra vlivu faktorů okolní krajiny. Jako nejvýznamnější se ukázaly: 1) nadmořská výška lokality odběru vzorku, 2) srážkový úhrn a jeho rozložení v průběhu roku, 3) míra zalesnění a urbanizace krajiny (Sucharová et al. 2008).

Naměřený obsah 21 z 37 testovaných prvků statisticky významně klesal s nadmořskou výškou odběrových lokalit (ibid.). Autoři studie vidí možné vysvětlení v nižším obsahu sedimentujících částic nesoucích sledované prvky ve vyšších nadmořských výškách a v nižší hustotě osídlení spojené s menší zátěží pocházející z průmyslu a zemědělství. Naměřený obsah několika prvků však s nadmořskou výškou stoupal. Důvodem může být vyšší zastoupení těchto látek v horninách našich pohoří a také intenzivnější erozní procesy v těchto oblastech.

Zjištěné koncentrace 22 z 37 testovaných látek také významně negativně korelovaly s velikostí srážkového úhrnu (ibid.). Studie předpokládá, že příčinou tohoto jevu ve smývání prachových částic z povrchu mechu nebo vyluhování některých látek z rostlinných pletiv. Obsah některých prvků ale se zvyšujícím se srážkovým úhrnem roste (např. Cd, Pb, a Zn). To může být způsobeno zvýšením jejich intenzivnějším vymýváním z atmosféry (mokrý deště). Citovaná studie zdůrazňuje důležitost podrobnějšího prostudování vlivu srážek na obsah sledovaných látek v mechu.

Při zjišťování vlivu zalesnění a urbanizace krajiny se ukázal různý vliv těchto faktorů na koncentrace jednotlivých látek. Obsah prvků šířených převážně erodovanými



půdními částicemi (např. Al, Cu, Fe) s růstem lesnatosti klesal. Autoři to přisuzují menší míře eroze, zachytávání prachu vegetací a nižší rychlosti proudění vzduchu na zalesněném území. Obsah některých prvků ale s mírou lesnatosti koreloval pozitivně (např. Ag, Cd, Pb). Tento vztah studie vysvětluje možným přijímáním příslušných látek kořeny stromů z podloží, následným hromaděním v opadu a humusu, které podléhají erozním procesům a kontaminují mech. Současně byla zjištěna významná kladná korelace obsahu prvků v mechu s mírou urbanizovanosti krajiny. Tento vztah byl velmi silný např. u obsahu Cd, Cr, Cu, Ni, Pb a Zn. Na znečištění ovzduší těmito látkami se podílí zejména emise ze spalování fosilních paliv (domácnosti, průmyslová výroba, doprava) ale také například koroze plechových krytin a okapů.

Zkoumán byl také vliv geomorfologie a geologického podloží. Ukázalo se, že až na několik výjimek je vliv těchto faktorů malý. Zajímavostí je např. zjištěná pozitivní korelace obsahu Cu s výskytem křemencových a vápnitých matečných hornin (ibid.). Vzhledem k tomu, že je metoda zjišťování obsahu chemických látek v mechu orientována na stanovení jejich koncentrace v ovzduší, hovoří malá závislost naměřených hodnot na geologickém podloží ve prospěch této metody.

V rámci celoevropského biomonitorovacího programu byly u nás v roce 1995 souběžně zjišťovány také obsahy prvků dlouhodobě zadržovaných v nadložním humusu jehličnatých lesů (Suchara & Sucharová 2000). Na každé z vytipovaných lokalit byly odebírány vzorky mechu (*Pleurozium schreberi* – S horizont), opadu (L horizont) a humusu (H horizont). Při odebírání vzorků bylo důsledně dbáno na to, aby vzorky humusu nebyly kontaminovány minerální půdou.

Lesní nadložní humus je charakteristický svým vysokým adsorpčním potenciálem. Makromolekuly humusu účinně zachycují prvky a sloučeniny z atmosférického spadu. Vazba kovů na tyto molekuly je natolik pevná, že jen velmi malá část z navázaného množství může být vymývána do spodnějších horizontů. Z těchto důvodů je lesní nadložní humus velmi dobrým bioindikačním materiálem.

Výsledkem výše uvedené studie byly mimo jiné následující poznatky: Koncentrace všech sledovaných prvků prudce vzrůstala ve směru od L horizontu k H

horizontu. V rozložení obsahu prvků v lesním nadložním humusu nebyla, až na výjimečné případy, zjištěna korelace s jejich rozložením v horninách a půdních pokryvech ČR. Zjištěné rozložení prvků dlouhodobě ukládaných v lesním nadložním humusu přibližně odpovídalo rozložení tehdejších úrovní atmosférické depozice těchto prvků zjištěných analýzou mechu během roku 1995 – publikovanému v české národní zprávě (ibid.)

Výsledky analýzy nadložního humusu tedy podávají informace především o atmosférické depozici měřených prvků (vznikají tzv. imisně-depoziční katastry). Lokální geogenní vlivy dané chemickým složením minerální půdy a hornin (vytvářející tzv. geochemické katastry) ovlivňují obsah zjišťovaných prvků v nadložním humusu podstatně méně než atmosférická depozice.

Vzhledem k tomu, že rhizoidy mechových rostlinek nedosahují až do vrstev minerální půdy, ale komunikují pouze s opadem a nadložním humusem, podporují výše uvedená zjištění předpoklad, že látky obsažené v mechu jsou převážně atmosférického původu a že na jejich obsah nemá velký vliv chemické složení geologického podloží.

Různí autoři se věnují také problematice vlivu okolní vegetace na obsah látek v mechu. V případě stromů hraje významnou roli jejich velký povrch umožňující zachytávat mnohem více prachu na dané ploše, než by zachytilo bylinné vegetační patro (např. Aboal et al). Dešťová voda následně tento prach smývá z listů a větví (podkorunový okap) a stéká na zem také přímo po kmeni (Rutter et al. 1971). Při porovnáním vzorků odebraných na kmenech stromů a na okolní půdě byly zjištěny vyšší koncentrace prvků ve vzorcích mechu ze stromů (Boquete 2015). Většina studií porovnávající vzorky mechu odebrané pod korunami stromů a na otevřené ploše (např. Boquete 2015) však neodhalila významný rozdíl v naměřené koncentraci prvků (Férez et al. 2015). Fernández (2015) ale poukazuje na to, že v mnoha studiích pravděpodobně nebyla použita dostatečně senzitivní metoda statistické analýzy výsledků.

## 2. Cíle práce

Touto prací navazují na svou bakalářskou práci „Biomonitoring znečištění atmosféry těžkými kovy na území severovýchodních Čech pomocí chemické analýzy mechu“ (Hejzlarová 2012). Hlavním zdrojem informací pro mne opět byly národní zprávy ČR vydané Výzkumným ústavem pro krajinu a okrasné zahradnictví Silva Taroucy v Průhonicích, které zveřejňují výsledky českého biomonitorovacího průzkumu prováděného v rámci mezinárodního programu OSN EHK ICP Vegetace (Sucharová & Suchara 1998c, Sucharová et Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008).

Stejně jako ve své bakalářské práci, jsem se i tentokrát zaměřila na oblast severovýchodních Čech, kde žiji a pokusila jsem se získat podrobnější údaje o atmosférickém spadu vybraných TK na tomto území. K původně zjišťovaným prvkům (Ni, Zn, Cu, Pb) jsem v této práci přidala navíc další dva (Cd, Cr). Prvky jsem zvolila podle možností chemické laboratoře na Katedře ekologie a životního prostředí UP v Olomouci. Metodiku sběru vzorků jsem upravila tak, aby jejich analýza podala také nové poznatky o vlivu podkorunových srážek na obsah TK ve vzorcích a o fyziologii ukládání TK v mechu. K pokračování v práci na tomto tématu mě vedla potřeba získání většího množství dat, které by zajistilo dostatečně signifikantní výsledky statistické analýzy.

Metodika celoevropského biomonitorovacího programu (Harmens 2005) předpokládá ovlivnění koncentrace sledovaných látek v mechu podkorunovými srážkami a ukládá proto povinnost odběru vzorků pouze z ploch, které se nacházejí mimo okapovou zónu korun stromů. Zajímalo mě, jak velký je vliv podkorunových srážek na koncentraci sledovaných TK v mechu a zda se u jednotlivých prvků liší. Na každé odběrové lokalitě jsem proto zvolila dvě místa odběru vzorků – pod korunami stromů a na volné ploše a následně jsem se pokusila vyhodnotit vliv tohoto faktoru.

Dosavadní vědecké studie se zatím dostatečně nevěnovaly délce doby akumulace jednotlivých prvků v mechu a možnosti jejich vyluhování působením srážek. Jedním z cílů této práce proto bylo porovnat koncentrace měřených látek ve starších a mladších segmentech mechových rostlinek.

Na koncentraci měřených látek má samozřejmě kromě dešťových srážek vliv celá řada dalších faktorů prostředí, proto na základě toho pokusu nelze vyvodit jednoznačné závěry, jeho výsledky však mohou sloužit jako podklad pro další výzkum.

V neposlední řadě bylo cílem této práce porovnání naměřených výsledků s výsledky získanými na našem území v rámci mezinárodního biomonitorovacího programu. Mezinárodní program využívá řidší síť odběrových lokalit než tato předkládaná studie, ta by proto mohla přinést více informací o vlivu lokálních zdrojů znečištění na studovaném území.

### **Cíle práce – shrnutí:**

- 1) Zjistit koncentrace vybraných těžkých kovů (Ni, Zn, Cu, Pb, Cd, Cr) ve vzorcích mechu odebraných na území severovýchodních Čech v průběhu let 2011-2013 a na základě získaných výsledků stanovit odborný odhad průměrné koncentrace těchto látek v ovzduší nad sledovaným územím.
- 2) Zjistit, zda se liší koncentrace TK v mechu rostoucím pod korunami stromů od koncentrací v mechu sebraném na světlinách – tedy zda mají na koncentraci TK v mechu statisticky významný vliv podkorunové srážky.
- 3) Zjistit, zda se liší koncentrace TK ve starých a nových částech mechových rostliněk a přinést tak nové informace, které by mohly být dále využity ve výzkumu délky doby akumulace sledovaných prvků v rostlinných pletivech.
- 5) Porovnat získaná data s výsledky celoevropského biomonitorovacího průzkumu.

### 3. Materiál a metody

#### 3.1 Studované území

##### 3.1.1 Vymezení studovaného území

Zájmové území v oblasti severovýchodních Čech i vlastní odběrové lokality jsem si vytyčila již v roce 2011 pro účely bakalářské práce. Polohu a velikost studované plochy jsem zvolila s ohledem na místo mého trvalého bydliště a moje časové a finanční možnosti. K vytipování odběrových lokalit jsem použila standardní středoevropskou mapovací síť (www.bibliotheca.cz), která je tvořena čtverci o straně 8 km. Studované území zaujímá následujících 12 kvadrantů: 5361, 5362, 5363, 5364, 5461, 5462, 5463, 5464, 5561, 5562, 5563 a 5564. Celá plocha má rozlohu 32 x 24 km (768 km<sup>2</sup>). V každém kvadrantu jsem zvolila jednu odběrovou lokalitu (Obr. 1, Příl. 1 a 2). Lokality jsem očíslovala ve stejném pořadí, jako jsou očíslovány příslušné kvadranty a pojmenovala jsem je podle nejbližšího sídla (Tab. 1, Obr. 2).

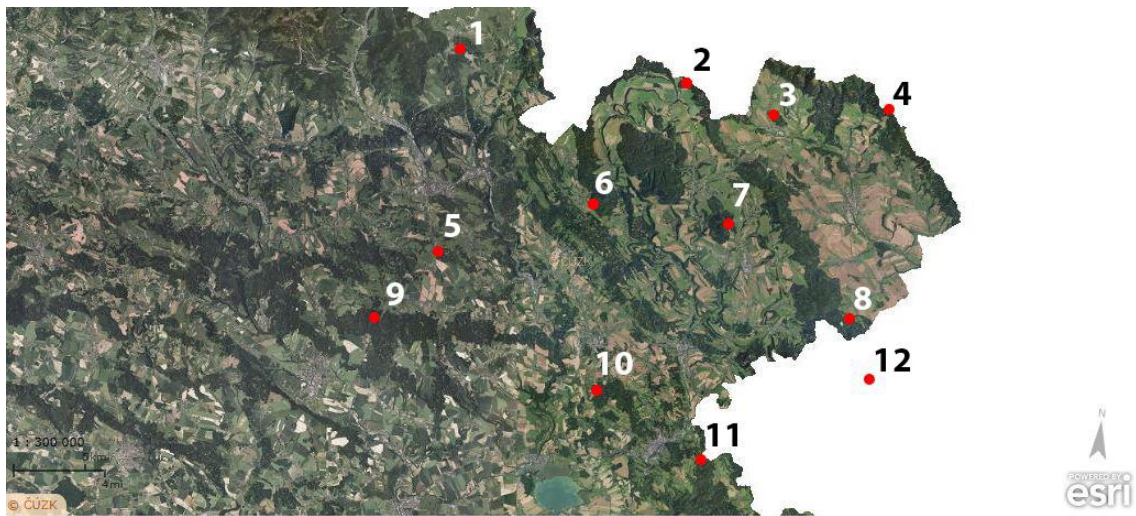


**Obr. 1: Odběrové lokality v kontextu celého území ČR; ©ČÚZK**

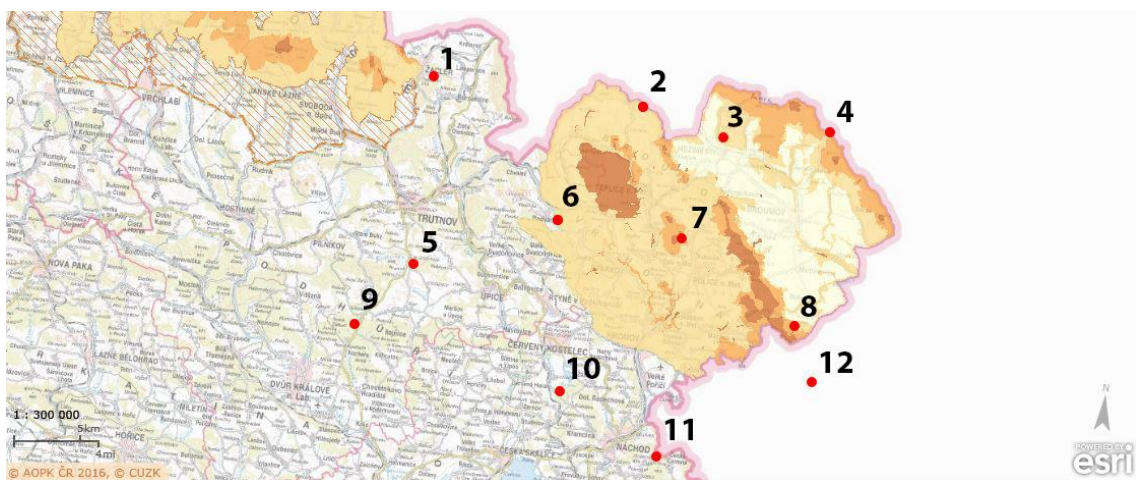
Území se nachází v Královéhradeckém kraji v česko-polském pohraničí mezi Krkonošemi a Orlickými horami. Zaujímá celý Broumovský výběžek, na západě pak zasahuje až k Žacléři, Trutnovu a Dvoru Králové nad Labem, na jihu k Náchodu a České Skalici. Značnou část území zaujímá chráněná krajinná oblast Broumovsko (Obr. 3). Na jihovýchodě navazuje na CHKO Broumovsko polský národní park Stolové hory (Park Narodowy Gór Stołowych). Jedna z 12 vytipovaných lokalit se nachází v Polsku, a to právě ve zmíněném národním parku (lokalita č. 12 – Karłów).

**Tab. 1: Seznam lokalit odběru vzorků**

Číslo lokality	Název lokality	Číslo kvadrantu	Zeměpisné souřadnice	Nadmořská výška (m n. m.)
1	Žaclěř	5361	50°39'12.12"S 15°55'16.68"V	610
2	Zdoňov	5362	50°38'54.84"S 16°09'17.64"V	602
3	Meziměstí	5363	50°38'02.20"S 16°14'47.90"V	480
4	Janovičky	5364	50°38'45.48"S 16°21'47.16"V	629
5	Trutnov	5461	50°31'15.96"S 15°55'22.68"V	498
6	Radvanice	5462	50°33'48.72"S 16°04'30.42"V	630
7	Dědov	5463	50°33'38.28"S 16°12'49.38"V	600
8	Božanov	5464	50°30'30.90"S 16°20'50.46"V	450
9	Kocbeře	5561	50°28'27.00"S 15°51'57.90"V	538
10	Trubějov	5562	50°26'38.90"S 16°05'57.50"V	430
11	Dobrošov	5563	50°24'24.18"S 16°12'45.18"V	520
12	Karlow	5564	50°28'15.18"S 16°22'26.04"V	750



**Obr. 2: Poloha odběrových lokalit na ortofotomapě;** 1 – Žaclěř, 2 – Zdoňov, 3 – Meziměstí, 4 – Janovičky, 5 – Trutnov, 6 – Radvanice, 7 – Dědov, 8 – Božanov, 9 – Kocbeře, 10 – Trubějov, 11 – Dobrošov, 12 – Karlów; ©ČÚZK

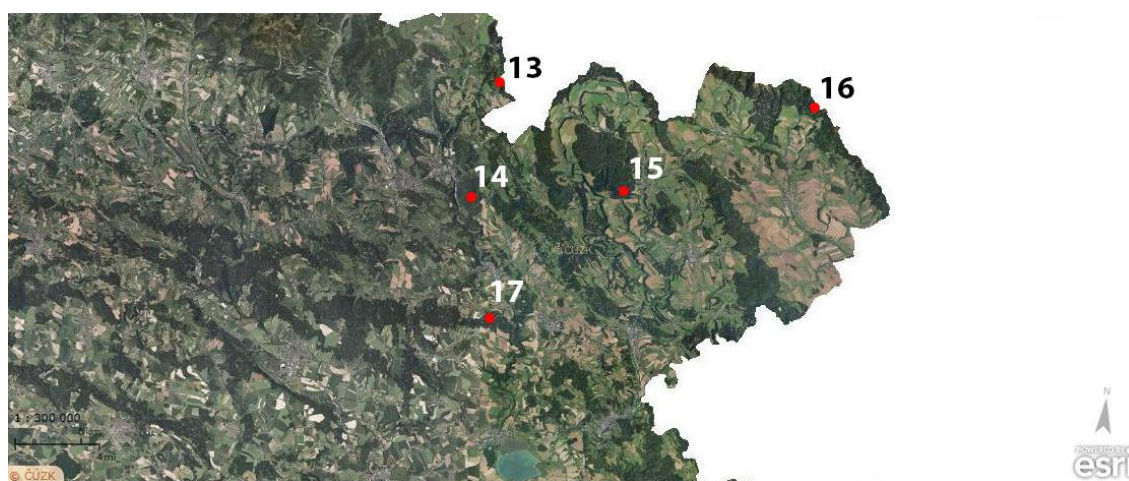


**Obr. 3: Poloha odběrových lokalit na mapě zobrazující zonaci CHKO Broumovsko;** 1 – Žaclěř, 2 – Zdoňov, 3 – Meziměstí, 4 – Janovičky, 5 – Trutnov, 6 – Radvanice, 7 – Dědov, 8 – Božanov, 9 – Kocbeře, 10 – Trubějov, 11 – Dobrošov, 12 – Karlów (nejsvětlejší barva – IV. zóna – nejnižší stupeň ochrany, nejtmavší barva – I. zóna – nejvyšší stupeň ochrany; v levém horním rohu je patrná zonace části Krkonošského národního parku. ©AOPK ČR, ©ČÚZK

Na ploše studovaného území se nachází 5 lokalit používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace (Tab. 2, Obr. 4). Za účelem porovnání nově naměřených koncentrací s výsledky celostátního průzkumu jsem v roce 2013 odebrala vzorky mechu i z těchto 5 lokalit (viz dále).

**Tab. 2: Seznam lokalit používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum**

Číslo lokality	Název lokality	Číslo kvadrantu	Zeměpisné souřadnice	Nadmořská výška (m n. m.)
13	Bernartice	5361	50°38'26"S 16°00'16"V	700
14	Bohuslavice n. Ú.	5461	50°33'30"S 15°59'14"V	550
15	Skály	5462	50°34'28"S 16°09'12"V	625
16	Janovičky	5364	50°38'52"S 16°21'09"V	670
17	Havlovice	5562	50°28'30"S 16°01'22"V	465

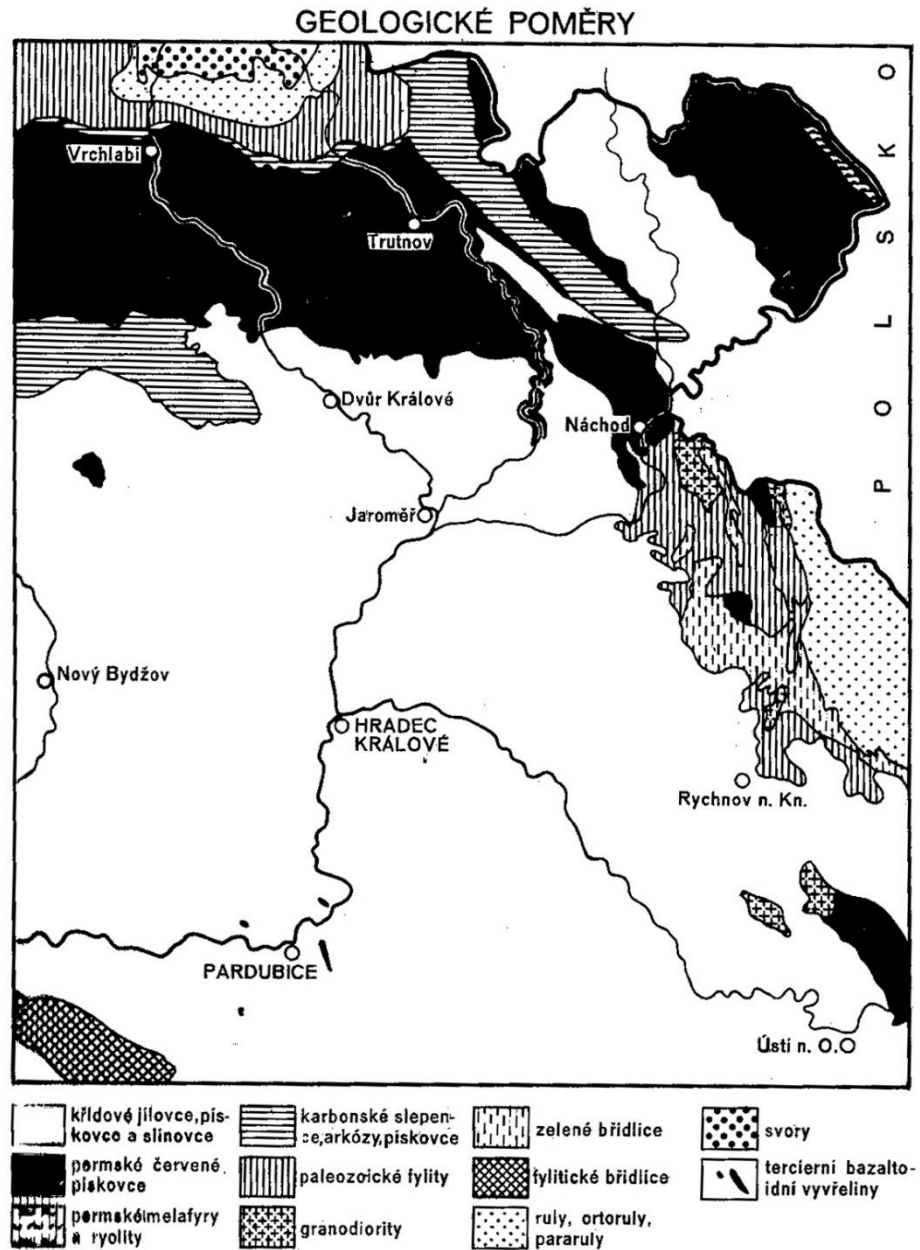


**Obr. 4: Lokality používané pro mezinárodní biomonitorovací průzkum; ©ČÚZK**

### 3.1.2 Geologie

Geologický podklad studovaného území tvoří hlavně prvohorní a druhohorní usazeniny (Obr. 5). Plošně jsou nejvíce zastoupeny slínovce (opuky), jílovce a pískovce svrchní křídy. Meziměstská vrchovina, tedy severovýchodní část Broumovského výběžku až po Broumovské stěny, je budována permskými červenými pískovci a slepenci. Na jejím severním okraji, v Javořích horách, najdeme i vyvěřelé a metamorfované horniny, především permské ryolity a melafyry. Polická vrchovina je charakteristická kvádrovými pískovci svrchní křídy, které zde vytvářejí skalní města. Největším z nich je NPR Adršpašsko-teplické skály. Podloží Žacléřské vrchoviny je na severu tvořeno ryolitem, na jihozápadě slepenci a arkózami karbonského stáří. Podkrkonošská pánev nacházející se mezi Náchodem a Trutnovem je stejně jako Meziměstská vrchovina tvořena hlavně permskými červenými pískovci a slepenci.

Oblast mezi Žaclěrem a Malými Svatoňovicemi u Úpice vyplňuje Žaclěřsko-Svatoňovická uhelná pánev tvořená horninami svrchního karbonu, permu a triasu. Z okolí Žaclěře, Radvanic a Malých Svatoňovic byly v minulosti vytěženy velké zásoby černého uhlí.



**Obr. 5: Geologická stavba Královéhradeckého kraje; převzato z: Rybář 1986**

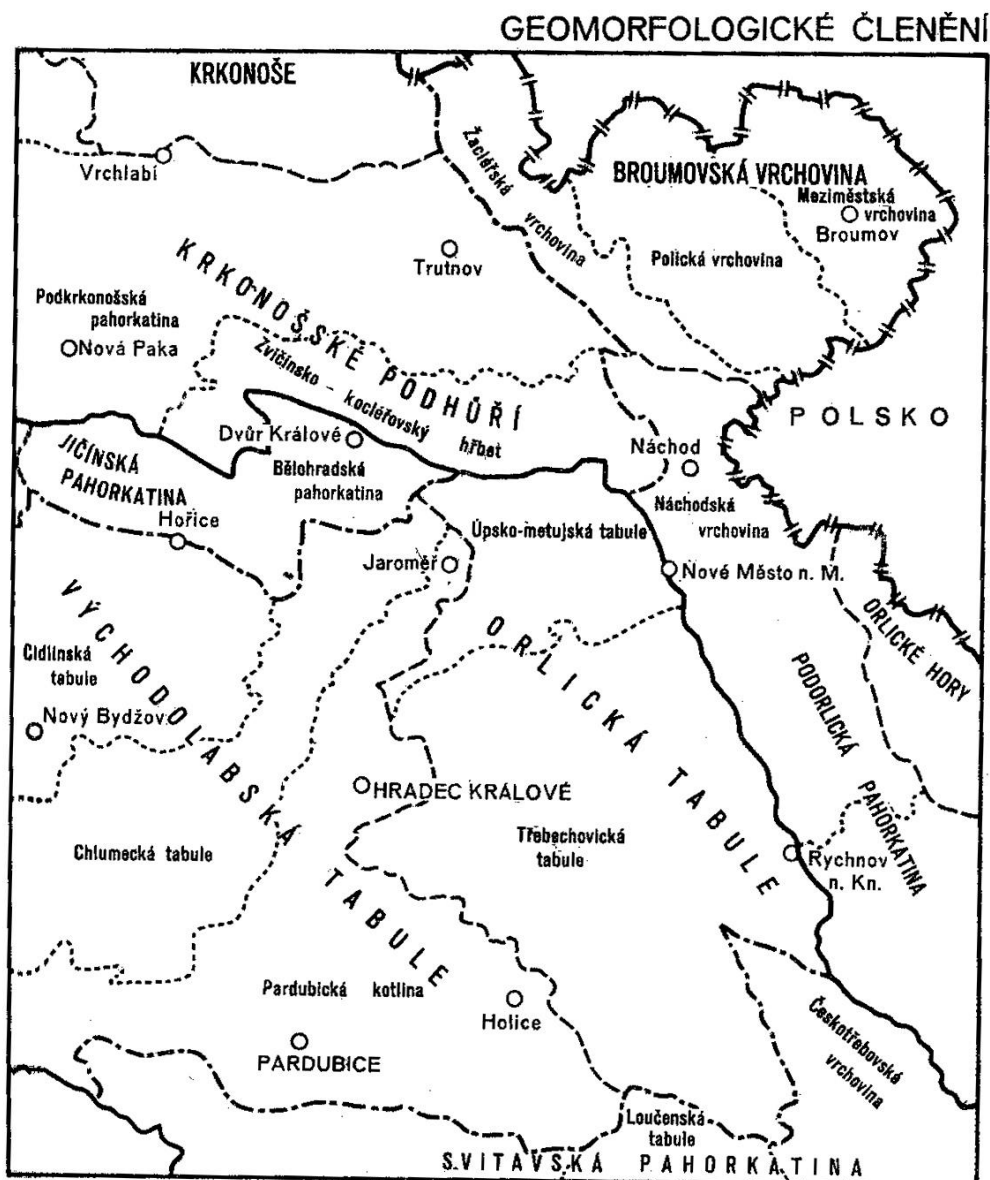


### 3.1.3 Geomorfologie

V rámci studované plochy se nachází několik menších geomorfologických celků (Obr. 6), všechny však jsou součástí Českého masivu. Většinu studovaného území zaujímá Broumovská vrchovina, která spadá do Krkonoško-jesenické subprovincie. Dělí se na Meziměstskou, Polickou a Žacléřskou vrchovinu. Je charakteristická členitým povrchem. Najdeme zde četné kuesty, tabulové plošiny, kaňony i široká údolí. Dominantou Meziměstské vrchoviny jsou Javoří hory a jejich nejvyšší vrchol Ruprechtický Špičák (880 m n. m.). Nejvyšší body Polické vrchoviny se nacházejí na Broumovských stěnách. Na české straně je to Bor (828 m n. m.), Božanovský Špičák (773 m n. m.) a Koruna (772 m n. m.), v Polsku Velká Hejšovina (919 m n. m.) a Malá Hejšovina (896 m n. m.). K výrazným vrcholům Polické vrchoviny patří i vrch Čáp (785 m n. m.) a stolové hory Ostaš (700 m n. m.) a Hejda (627 m n. m.). Na severu Žacléřské vrchoviny ve Vraních horách je nejvyšší kótou Královecký Špičák (879 m n. m.) Po jejím jihovýchodním okraji se táhne hřbet Jestřebích hor s vrcholy Žaltman (739 m n. m.) a Švédský vrch (660 m n. m.).

Mezi Jestřebími horami a vnější kuestou Broumovské vrchoviny se rozkládá Hronovská kotlina. Ta již spadá do Náchodské vrchoviny, která je součástí Podorlické pahorkatiny, z větší části spadající do subprovincie Česká tabule. Severní hranice Podorlické pahorkatiny probíhá mezi Červeným Kostelcem (414 m n. m.) a Hronovem (364 m n. m.). Zde se nadmořská výška pohybuje mezi 300 až 500 m a směrem na jih se postupně zvedá až k 800 m. Jižní hranice mnou zkoumaného území prochází poblíž vrchu Dobrošov (622 m n. m.) u Náchoda.

Západní a jihozápadní část zkoumaného území se nachází ve východní části Krkonošského podhůří. Oblast západně od Náchoda je tvořena Zvičinsko-kocléřovským hřbetem. Území rozprostírající se od tohoto hřbetu směrem na sever přes Trutnov až k hranici Žacléřské vrchoviny je již součástí Podkrkonošské pahorkatiny. V její jižní a jihovýchodní části se nadmořská výška pohybuje kolem 450 m a směrem ke Krkonošům pozvolna stoupá.



**Obr. 6:** Geomorfologické členění Královéhradeckého kraje; převzato z: Rybář 1986

### 3.1.4 Pedologie

Na studovaném území převažují hnědé půdy (kambizemě). Nejvíce zastoupeným typem jsou zde modální kambizemě. V pohraniční oblasti mezi Žaclěrem a Jestřebími horami, v Adršpaško-teplických skalách, v pásu Broumovských stěn a Javořích hor tvoří půdní pokryv dystritické kambizemě. V jižní části studovaného území místy nad modálními kambizeměmi převládají modální luvizemě (Faltysová et al. 2001).

### 3.1.5 Vegetační pokryv

Z celkové plochy Královéhradeckého kraje v roce 2014 zaujímal 58,2 % zemědělská půda, 31,1 % lesní pozemky, 1,6 % vodní plochy, 2,0 % zastavěné plochy a 7,1 % ostatní plochy. 40,0 % zemědělsky využívaných ploch představovala orná půda, 2,4 % zahrady, 0,9 % ovocné sady a 14,9 % trvalé travní porosty. Lesní porosty zaujímal 30,3 % z celkové rozlohy kraje. Přestože by na tomto území měla být zastoupena převážně listnatá společenstva, 75,0 % celkového lesního porostu představovaly jehličnany, a to především smrky (Koblížková et al. 2014).

Studované území se nachází v severní části kraje, která je v porovnání s celým územím lesnatější a je zde vyšší zastoupení travních porostů (ibid.). Díky velkému výškovému rozpětí a geomorfologické různorodosti najdeme v rámci studované oblasti velmi pestrou nabídku ekosystémů.

### 3.1.6 Vodopis

Většina studovaného území spadá prostřednictvím řek Úpy a Metuje do povodí Labe. Pouze Broumovská kotlina je odvodňována řekou Stěnavou, která patří k povodí Odry. Evropské rozvodí Odry a Labe probíhá po hřebeni.

Broumovských stěn. Broumovský výběžek je významnou zásobárnou podzemní vody, některé ze zdejších pramenů jsou minerální. Nejcennější zdroje pitné vody se nachází na Policku. V roce 1981 zde byla na ploše 218,2 km<sup>2</sup> vyhlášena Chráněná oblast přirozené akumulace vod Polická pánev. Celková vydatnost zdejších zdrojů je přibližně 350 l/s.

### 3.1.7 Podnebí

Na studovanou plochu zasahuje několik klimatických oblastí. Centrální část Broumovské kotliny, okolí Náchoda a území jižně od Trutnova se nachází v mírně teplé oblasti klimatu MT 5 s 30–40 letními dny za rok, 140–160 dny v s průměrnou teplotou

10°C a více a srážkovým úhrnem 350–450 mm ve vegetačním období a 250–300 mm v zimním období.

Okolí Meziměstí, Police nad Metují, Hronova a území mezi Trutnovem a Červeným Kostelcem se nachází v mírně teplé oblasti klimatu MT 2 s 20–30 letními dny za rok, 140–160 dny v s průměrnou teplotou 10°C a více a srážkovým úhrnem 450–500 mm ve vegetačním období a 250–300 mm v zimním období.

Javoří hory, Broumovské stěny, oblast Adršpašsko-teplických skal a pás území podél česko-polského pohraničí od Meziměstí až k Žacléři spadá do chladné oblasti klimatu CH7 s 10–30 letními dny za rok, 120–140 dny v s průměrnou teplotou 10°C a více a srážkovým úhrnem 500–600 mm ve vegetačním období a 400–500 mm v zimním období (Faltysová et al. 2002).

Nad zkoumanou oblastí převládá po většinu roku západní proudění vzduchu (ibid.). V roklích a skalních městech jsou častým jevem krátkodobé teplotní inverze.

### **3.1.8 Vliv člověka**

V Královéhradeckém kraji připadá na 1 km<sup>2</sup> přibližně 116 obyvatel, což je v porovnání s ostatními kraji podprůměrné osídlení. Celorepublikový průměr se v současnosti pohybuje kolem 133 obyvatel na 1 km<sup>2</sup> (Koblížková et al 2014). Zkoumaným územím prochází dvě silnice mezinárodního významu: E67 a E442. Celá oblast je bohatě protkána železniční sítí.

Z ekonomického hlediska je Královéhradecký kraj charakterizován jako zemědělsko-průmyslová oblast s dobře rozvinutým cestovním ruchem. Většina průmyslu je soustředěna do velkých měst. V Hradci Králové je rozvinutý strojírenský, elektrotechnický, kovozpracující, chemický a dřevozpracující průmysl a hutnictví neželezných kovů. Na zbývajícím území kraje najdeme textilní, sklářský a papírenský průmysl, výrobu elektrických a optických zařízení a hutnictví železných kovů. K celostátní průmyslové produkci však kraj přispívá jen malým dílem. Podle údajů Českého statistického úřadu se kraj podílí na celkových tržbách velkých průmyslových

podniků ČR přibližně 4 %. V 1. až 3. čtvrtletí roku 2011 bylo v Královéhradeckém kraji 131 podniků se 100 a více zaměstnanci. To je po Karlovarském a Libereckém kraji nejméně v republice.

Ke dni 31. 3. 2012 bylo v Registru ekonomických subjektů evidováno celkem 135 266 ekonomických subjektů se sídlem v Královéhradeckém kraji, z toho 42 010 se věnovalo obchodu, ubytování a stravování, 18 896 průmyslu, 17 628 stavebnictví a 6 841 zemědělství, lesnictví a rybářství.

Na studovaném území převládá zemědělská výroba a cestovní ruch. Pěstuje se zde hlavně ječmen, pšenice, řepka, kukuřice, cukrová řepa a jablka. Živočišná výroba je zaměřena na chov skotu a prasat. S čilým cestovním ruchem je spojeno znečištění z dopravy, ke kterému velkou měrou přispívá i kamionová doprava mezi Polskem a Českou republikou.

Královéhradecký kraj se dlouhodobě vyznačuje relativně dobrou kvalitou ovzduší. Nachází se zde málo velkých stacionárních zdrojů znečištění, území je však ovlivněno i emisemi pocházejícími z Pardubického kraje. Dominantní zdroj emisí v Královéhradeckém kraji v posledních letech představují lokální topeniště a neustále se zahušťující doprava (ČHMÚ 2012). Průměrné roční koncentrace celorepublikově sledovaných těžkých kovů (Cd, As, Pb a Ni,) v kraji nedosahují imisních limitů (ČHMÚ 2013).

K nejvýznamnějším velkým stacionárním zdrojům znečištění v Královéhradeckém kraji patří následující podniky (ČHMÚ – REZZO):

Elektrárna Poříčí, ČEZ a.s., Praha

Teplárna Dvůr Králové nad Labem, ČEZ, a.s., Praha

Teplárna Náchod, KA Contracting ČR s.r.o.

SAINT-GOBAIN ORSIL s.r.o., Častolovice (tepelné a zvukové izolace)

Cukrovary TTD a.s., České Meziříčí

Ammann Czech Republic a.s., Nové Město nad Metují (výroba stavebních strojů)

K nejdůležitějším velkým stacionárním zdrojům znečištění v Pardubickém kraji patří následující podniky (ČHMÚ – REZZO):

Elektrárna Chvaletice, ČEZ a.s., ČEZ a.s., Praha

Elektrárna Opatovice, International Power Opatovice a.s.

Cementárna Halam a.s., Prachovice

SYNTHESIA a.s., Semtín

PARAMO a.s., Pardubice

### 3.2 Sledované prvky

V rámci této práce jsem zjišťovala koncentraci chromu (Cr), kadmia (Cd), mědi (Cu), niklu (Ni), olova (Pb) a zinku (Zn) v odebraných vzorcích mechu. Kovy jsem zvolila na základě možností spektrometru, který vlastní Katedra ekologie a životního prostředí Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. V textu budu z důvodu přehlednosti dále používat především jejich chemické značky.

Monitoring a hodnocení kvality ovzduší v České republice zajišťuje na základě pověření Ministerstva životního prostředí Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Údaje o stavu ovzduší zjišťované pomocí automatizovaných i manuálních měřicích stanic jsou archivovány v Informačním systému kvality ovzduší České republiky (databáze ISKO). Kromě výsledků měření ze staniční sítě ČHMÚ jsou v této databázi shromažďována i data zjištěná spolupracujícími institucemi, kterými jsou zejména zdravotní ústavy, ČEZ, a. s., Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i., Česká geologická služba, Výzkumný ústav vodohospodářský TGM, v.v.i. a Hydrobiologický ústav. Z těžkých kovů jsou na našem území celoplošně a dlouhodobě sledovány koncentrace arzenu (As), kadmia (Cd), niklu (Ni) a olova (Pb).

Hlavními antropogenními zdroji emisí TK jsou tepelné elektrárny, teplárny a průmysl zpracovávající železo a ocel. Územní rozložení emisí TK v ČR přibližně odpovídá rozmístění velkých podniků spadajících do těchto sektorů. Stálost prostorového rozdělení naměřených koncentrací TK byla pozorována i v sousedním

Polsku (Kapusta et al. 2014). V okolí tepelných elektráren a tepláren spalujících uhlí jsou v ČR dlouhodobě zjišťovány zvýšené koncentrace As a Ni. Kolem železáren a oceláren je z TK zvýšený především spád Cd a Pb (ČHMÚ 2013).

Obsah TK ve fosilních palivech se významně liší v závislosti na lokalitě jejich těžby. Množství emisí TK vznikající při spalování fosilních paliv pak závisí na konkrétním druhu a původu paliva, typu spalovacího zařízení a teplotě spalování (ibid.).

Emise TK dále vznikají při nejrůznějších technologických procesech, kde jsou TK obsaženy ve vstupních surovinách (železná ruda, kovový šrot, sklářský kmen, barviva atd.). Významným zdrojem emisí TK jsou také lokální topeniště a stále se zahušťující doprava.

V letech 2007-2013 byl v ČR zaznamenán klesající trend emisí sledovaných TK (As, Cd, Ni, Pb) s výjimkou dvou výkyvů, a to v r. 2010 a 2013, kdy byly spady těchto prvků vyšší. V roce 2010 mohly být hlavní příčinou zhoršené rozptylové a meteorologické podmínky (ČHMÚ 2015). Vývoj emisí TK úzce souvisí s vývojem emisí suspendovaných částic, na které jsou tyto prvky vázány. Pozorovaný trend může být v průběhu jednotlivých let ovlivněn aktuálně používaným typem uhlí a dalších fosilních paliv a také sekundární výrobou neželezných kovů, zejména hliníku (Al) a olova (Pb). Emise z těchto zdrojů jsou velmi proměnlivé a závisí na kvalitě recyklovaného kovového odpadu (ČHMÚ 2013).

Zatížení životního prostředí těžkými kovy pocházejícími z antropogenních zdrojů v současné době představuje globální problém. Zasaženy jsou všechny složky biosféry včetně světového oceánu. Například v játrech dugongů indických (*Dugong dugon*) žijících v oblasti Velkého bariérového útesu byla zjištěna přítomnost As, Cr, Cu, Ni, a Pb (Haynes et al. 2005).

### **3.2.1 Kadmium (Cd)**

Kadmium je měkký stříbrně lesklý lehce tavitelný toxický kov. Krystalizuje v šesterečné soustavě. Jeho relativní atomová hmotnost je 112,41. Na Zemi patří mezi

relativně vzácné prvky, obsah kadmia v zemské kůře je přibližně 0,1-0,5 mg/kg. Nejčastěji se vyskytuje jako příměs rud zinku a olova.

Přibližně 90 % světových emisí Cd pochází z antropogenních zdrojů, zbývajících 10 % představuje vulkanická činnost. Nejvíce kadmia se do ovzduší dostává při výrobě železa, oceli a neželezných kovů a spalováním fosilních paliv a odpadů. K snadnému uvolňování kadmia přispívá jeho nízký bod varu (767 °C). Navázáno je především na částice jemné frakce do 2,5 μm a méně na částice o velikosti do 10 μm (ČHMÚ 2011).

Kadmium je karcinogenní pro člověka i pro zvířata. Jedná se o mimořádně kumulativní látku, která je s organismu vylučována jen velmi pomalu a obtížně. Hromadí se především v játrech a v ledvinách, které jsou tak nejvíce ohroženy chronickou otravou.

Nebezpečnost kadmia spočívá také v jeho chemické podobnosti se zinkem. Díky tomu může vstupovat do různých enzymatických procesů místo něj a působit závažné zdravotní problémy, například zablokování inzulinového cyklu nebo rakovinu prostaty. Dále kadmium způsobuje řídnutí kostí (osteoporózu), chudokrevnost (anémii) a při expozici kontaminovanému ovzduší také rakovinu plic.

Používání kadmia v Evropské unii upravuje směrnice 2002/95/ES „Omezení užívání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“ platná od r. 2006.

Dle ročenek ČHMÚ se v letech 2009-2013 (období po které byly atmosférickým spadem ovlivňovány mnou odebrané vzorky mechu) koncentrace Cd na všech lokalitách měření v ČR pohybovala pod imisním limitem (5 ng/m<sup>3</sup>), pouze s výjimkou lokality Tanvald (Liberecký kraj) v r. 2013, kdy zde byl naměřen roční průměr 6,9 ng/m<sup>3</sup> (ČHMÚ 2013). Trvale zvýšená koncentrace Cd v této oblasti pochází ze zdejšího sklářského průmyslu, kde se v minulosti hojně používala barviva a tavidla s příměsí Cd. Průměrné roční koncentrace Cd mají v ČR trvale klesající trend (ČHMÚ 2015).



### 3.2.2 Chrom (Cr)

Chrom je bělolesklý velice tvrdý, ale křehký kov. Krystalizuje v krychlové soustavě. Jeho relativní atomová hmotnost je 52,00. Kromě vysoké tvrdosti je také mimořádně chemicky odolný, používá se proto do slitin (legovaná ocel aj.) a jako antikoroziční úprava. Na Zemi je poměrně vzácný, průměrný obsah chromu v zemské kůře 0,1-0,2 g/kg. Často je nacházen společně s rudami železe, např. v podobě chromitu ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ).

Účinky chromu na živé organismy závisí na jeho mocenství. Trojmocný chrom je ve stopovém množství esenciálním prvkem. Sloučeniny obsahující šestimocný chrom jsou však zdraví škodlivé a nebyla vyloučena jejich karcinogenita.

Stejně jako v případě kadmia je i Používání chromu v EU upraveno směrnicí 2002/95/ES „Omezení užívání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“ platnou od r. 2006. Vypouštění většího množství chromu než je 50 kg podléhá v ČR povinnosti hlášení do Integrovaného registru znečišťování životního prostředí (IRZ). Také jsou u nás stanoveny limity Cr v pracovním prostředí, v případě šestimocného chromu  $0,1 \text{ mg/m}^3$  a v případě ostatních sloučenin  $1,5 \text{ mg/m}^3$ .

### 3.2.3 Měď (Cu)

Měď je měkký tažný lesklý kov červenozlaté barvy. Relativní atomová hmotnost Cu je 63,55. Její průměrný obsah v zemské kůře je 55–70 mg/kg. V přírodě se měď nejčastěji vyskytuje v podobě sloučenin, z nich nejčastější jsou sulfidy jako například chalkozin ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) a chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ). Přibližně 6 % světových zásob mědi je v ryzí formě (Bencko et al. 1995).

Měď se používá k výrobě elektrotechnických zařízení, instalatérských a topenářských dílů a součástí, je součástí slitin a její sloučeniny jsou obsaženy v některých pesticidech.

Měď je esenciálním stopovým prvkem pro rostliny i živočichy. Páry obsahující měď a měděný prach ale vyvolávají horečku z kovů. Soli mědi působí dráždivě na kůži a sliznici spojivek a rohovku.

V rámci studovaného území se nachází významné permské zrudnění u Horních Vernéřovic (část obce Jívka). Nejvíce zastoupenými rudnými nerosty jsou zde pyrit ( $\text{FeS}_2$ ), chalkosin ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) a bornit ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) (Bernard 1981).

### 3.2.4 Nikl (Ni)

Nikl je tažný lesklý stříbrobílý kov krystalizující v krychlové soustavě. Jeho relativní atomová hmotnost je 58,09. Ryzí se nachází pouze v železných meteoritech, v přírodě se vyskytuje ve vazbě se sírou, arzenem, antimonem a kyselinou křemičitou ve formě sulfidů a křemičitanů. Jeho obsah v zemské kůře je přibližně 100 mg/kg, je pátým nejhojnějším prvkem zemského jádra a sedmým nejhojnějším prvkem na Zemi.

Nikl se používá k legování oceli a jako antikorozní ochrana jiných kovů, je důležitou složkou slitin a nepostradatelnou surovinou pro některé typy galvanických článků a katalyzátorů.

Pro rostliny a některé živočichy je ve stopovém množství esenciálním prvkem. Ve vyšší koncentraci je však toxický. Pro člověka má alergenní a karcinogenní účinky. Dlouhodobá profesionální expozice prachu obsahujícímu nikl způsobuje rakovinu plic a nosních dutin (Bencko et al. 1995).

Přibližně tři čtvrtiny emisí Ni jsou antropogenního původu. Atmosféru niklem nejvíce zatěžuje spalování těžkých topných olejů, těžba niklových rud, rafinace niklu a výroba železa a oceli. V ovzduší se Ni vyskytuje v aerosolu několika chemických sloučenin lišících se svou toxicitou pro člověka a ekosystémy. Kolem 70 % Ni je navázáno na částice frakce menší než 10  $\mu\text{m}$  a je transportováno na delší vzdálenosti. Zbývajících 30 % Ni se váže na částice do 30  $\mu\text{m}$ , které rychleji sedimentují v menší vzdálenosti od zdroje (ČHMÚ 2011).

Dle ročenek ČHMÚ se v letech 2009-2013 (období po které byly atmosférickým spadem ovlivňovány mnou odebrané vzorky mechu) koncentrace Ni na všech lokalitách měření v ČR pohybovaly pod imisním limitem ( $20 \text{ ng/m}^3$ ), pouze s výjimkou lokality Příbram (Středočeský kraj) v r. 2011, kdy zde byl naměřen roční průměr  $29,1 \text{ ng/m}^3$ . Zvýšení spadu Ni tehdy bylo způsobeno bouracími pracemi v blízkosti měřicí stanice (ČHMÚ 2011). Průměrné roční koncentrace Ni vykazují dlouhodobě klesající trend (ČHMÚ 2015).

### 3.2.5 Olovo (Pb)

Olovo je měkký stříbrolesklý kov krystalizující v krychlové soustavě. Jeho relativní atomová hmotnost je 207,21 a jeho průměrný obsah v zemské kůře je odhadován na 12–16 mg/kg. V ryzí podobě je olovo nacházeno jen vzácně. Nejhojnější olověnou rudou je galenit (PbS). V rámci studovaného území se galenit vyskytuje například v okolí Suchovršic poblíž Úpice (Rybář et al. 1989).

Téměř veškeré olovo nacházející se v atmosféře pochází z činnosti člověka. Jeho hlavním zdrojem jsou vysokoteplotní procesy: spalování fosilních paliv, výroba železa a oceli a metalurgie neželezných kovů (ČHMÚ 2011). Přírodní procesy jako vulkanická činnost a zvětrávání hornin mají v porovnání s antropogenními zdroji zanedbatelný vliv.

Olovo je v ovzduší vázáno na jemné prachové částice menší než  $1 \mu\text{m}$  a je proto roznášeno do velmi velké vzdálenosti od zdroje (ČHMÚ 2011). Při dlouhodobé expozici způsobuje Pb poruchy biosyntézy hemu (nebílkovinná složka krevního hemoglobinu), negativně ovlivňuje nervový systém a krevní tlak a není vyloučena jeho karcinogenita. Dlouhodobá expozice dětí i nízkým dávkám olova způsobuje zpomalení duševního vývoje a nepříznivé změny chování. Dále olovo negativně ovlivňuje také reprodukční zdraví žen (Calder 1995).

Od počátku 20. století do konce 80. let se atmosférický spad olova v ČR zvýšil na desetinásobek původních hodnot (Cibulka et al. 1991). Dnes je jeho používání stejně jako v případě Cd a Cr v EU upraveno směrnicí 2002/95/ES „Omezení užívání

některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“ platnou od r. 2006.

Dle ročenek ČHMÚ se v letech 2009-2013 (období po které byly atmosférickým spadem ovlivňovány mnou odebrané vzorky mechu) koncentrace Pb na všech lokalitách měření v ČR pohybovaly hluboko pod imisním limitem ( $500 \text{ ng/m}^3$ ) a průměrné roční koncentrace Pb vykazují dlouhodobě klesající trend (ČHMÚ 2015).

Velké množství olova se dříve do ovzduší dostávalo z automobilové dopravy. Sloučenina tetraethylolovo ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ) se přidávala do benzínu pro zvýšení jeho oktanového čísla za účelem zpomalení rychlosti hoření. Ve vyspělých zemích včetně České republiky je dnes přidávání této látky do benzínu zakázáno a moderní automobily jezdí výhradně na bezolovnatý benzín. V České republice bylo používání olovnatého automobilového benzínu definitivně zakázáno k 1. lednu 2001.

### 3.2.6 Zinek (Zn)

Zinek je měkký lesklý lehce tavitelný modrobílý kov krystalizující v šesterečné soustavě. Jeho relativní atomová hmotnost je 65,41. Jeho průměrný obsah v zemské kůře je přibližně 100 mg/kg. Zinek je velice reaktivní prvek, proto jej v ryzím stavu téměř nenajdeme.

Mezi hlavní zinkové rudy patří sfalerit ( $\text{ZnS}$ ) a zinkit ( $\text{ZnO}$ ). Při samotné těžbě se zinek dostává do životního prostředí jen minimálně, ale při tavení rudy se do ovzduší uvolňují emise obsahující kromě zinku také kadmium, olovo, arzen a další kovy (Bencko et al. 1995).

V průmyslu se zinek používá k výrobě nerezavějících slitin a mosazi, při výrobě železa, ke galvanizaci oceli a k pozinkování železa. Jemně práškováný oxid zinečnatý se používá jako zinková běloba.

Zinek obsahují prakticky všechna rostlinná pletiva a všechny živočišné tkáně. Je například nezbytný pro správnou funkci některých savčích enzymů. Páry nebo velmi

jemný prach kovového zinku a oxidu zinečnatého však způsobují horečku z kovů připomínající svými příznaky malárii.

### 3.3 Použitý materiál

Na všech odběrových lokalitách jsem během tří sezón odebírala vzorky travníku Schreberova – *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. Jedná se o bokoplodý mech patřící do řádu rokytotvaré (*Hypnales*) a čeledi rokytníkovité (*Hylocomiaceae*).



**Obr. 7: Travník Schreberův (*Pleurozium schreberi*);**  
převzato z: <https://commons.wikimedia.org>, autor snímku: Hermann Schachner

Roste na kyselých půdách, zejména v jehličnatých lesích. Najdeme ho na lesním opadu, mezi trávou, na skalách i na tlejícím dřevě. Patří k našim nejhojnějším mechům. Často se vyskytuje společně s rokytníkem skvělým (*Hylocomium splendens*) a kostrbatcem zeleným (*Rhytidiadelphus squarrosus*) (Velenovský 1897). Travník je rozšířen po celé severní polokouli a také v Andách. Vyskytuje se od nížin až nad horní

hranici lesa. Právě díky jeho hojnému výskytu a široké ekologické valenci je pro biomonitoring jedním z nevhodnějších druhů mechu.

Travník vytváří rozsáhlé zelené již z dálky dobře rozpoznatelné porosty. Jeho lodyžky jsou nápadně rezavě červené, kolem 10 cm dlouhé, jednoduše zpeřené (Obr. 7). Podobným druhem je lazovec čistý (*Pseudoscleropodium purum*), na rozdíl od travníku má ale zelenou lodyhu. Lístky jsou lesklé, vejčité, velmi vyduťaté, na konci zúžené v tupou zoubkatou špičku a mají krátké dvojité žebro. Větvní lístky bývají o něco menší než lístky lodyžní. Oproti severským oblastem u nás mech vytváří tobolečky jen vzácně (Kremer B. P. & Muhle H. 1998).

### 3.4 Odběr vzorků

Při odebírání i zpracovávání vzorků jsem vycházela z metodiky mezinárodního biomonitorovacího průzkumu prováděného každých 5 let v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace (Harmens 2005). Česky je tato metodika detailně popsána například v národní zprávě ČR zveřejňující výsledky čtvrtého českého biomonitorovacího průzkumu (Sucharová et al. 2008).

V rámci mezinárodního biomonitorovacího průzkumu se na území ČR používají tzv. trvalé monitorovací plochy přibližně vytvářející síť čtverců o straně 15 km (na mnou studovaném území se nachází 5 těchto trvalých monitorovacích ploch). Na každé lokalitě je zvolena odběrová plocha o velikosti 50 × 50 m. Z každé odběrové plochy se na 7 místech odeberou dílčí vzorky, které jsou následně smíchány, aby vytvořily jeden reprezentativní směsný vzorek o objemu cca 8 l. Místa odběru se vybírají tak, aby vzorky mechu nebyly ovlivněny spadem podkorunových srážek. V laboratoři jsou následně odděleny a analyzovány pouze horní zelené segmenty mechu. Udává se, že jejich stáří je 2,5–3 roky (např. Harmens 2005).

Na rozdíl od mezinárodního průzkumu jsem pro vymezení odběrových lokalit použila standardní středoevropskou mapovací síť ([www.biblioteka.cz](http://www.biblioteka.cz)), která je tvořena čtverci o straně 8 km. V rámci studovaného území jsem s pomocí této sítě vybrala

12 odběrových lokalit. Na těchto lokalitách jsem odběr vzorků provedla opakovaně 1x ročně v průběhu 3 let – na podzim r. 2011 – pro účely bakalářské práce (Hejzlarová 2012), dále pak na podzim 2012 a na jaře 2013. Na každé lokalitě jsem zvolila 2 odběrová místa – na volné ploše („NELES“) a pod korunami stromů („LES“). Každý z těchto 2 vzorků jsem následně rozebrala na jednotlivé rostlinky, které jsem rozdělila na mladší horní zelenou část („VRŠEK“) a starší spodní hnědou část („SPODEK“). Tak tedy vznikly z každé lokality 4 vzorky za každou odběrovou sezónu: 1) „NELES-VRŠEK“, 2) „NELES-SPODEK“, 3) „LES-VRŠEK“, 4) „LES-SPODEK“. Tímto způsobem jsem získala 48 vzorků v každé sezóně, celkem tedy 144 vzorků mechu.

Vzorky jsem odebírala v rámci jedné lokality na dvou odlišných místech („LES“ a „NELES“), abych mohla posoudit míru vlivu podkorunových srážek na koncentraci TK v mechu. Snažila jsem se, aby tato dvě místa od sebe dělila co nejmenší vzdálenost. Tedy aby jediným faktorem, kterým se výrazně liší, byla právě přítomnost/nepřítomnost korun stromů nad místem výskytu a ostatní faktory prostředí byly srovnatelné. Musela jsem proto najít lokality, na kterých se travník vyskytuje zároveň na světlinách i pod korunami. Tento mech ovšem nejčastěji roste na místech, kde je les řídký. Bylo tudíž obtížné najít místa, kde je mech přímo pod korunami stromů, nebo nad něž naopak větve nezasahují vůbec. Proto jsem neodebírala více dílčích vzorků, ale pouze dva, které se v míře zastínění korunami stromů lišily skutečně výrazně.

Na podzim r. 2013 jsem navíc odebrala mech z 5 trvalých monitorovacích ploch mezinárodního biomonitorovacího průzkumu. Protože jsem tyto vzorky potřebovala k porovnání nově naměřených hodnot s výsledky mezinárodního průzkumu, pracovala jsem v tomto případě pouze s horními segmenty mechu („VRŠKY“) odebranými mimo okapovou zónu korun stromů („NELES“). Jednalo se tedy o 5 dalších vzorků.

Během vlastního odběru jsem dbala na to, aby vzorky nebyly ovlivněny vzrostlejší vegetací bylinného patra nebo nadměrným opadem a nebyly znečištěné činností lesních živočichů. V době mezi odběrem a zpracováním jsem vzorky skladovala v otevřených mikrotenových sáčcích zakrytých čistou bavlněnou látkou. Tak se nezapařily a zároveň nedocházelo k jejich kontaminaci.

### 3.5 Zpracování vzorků

Odebrané chomáče mechu jsem nejprve rozebrala na jednotlivé rostliny. Ty jsem za sucha pečlivě očistila od jehličí, větviček a dalších kousků opadu. Důkladné omývání vzorků vodou totiž významně mění koncentraci TK v pletivech a proto se nedoporučuje (Fernández et al. 2015). Každou rostlinku jsem potom rozdělila na dvě části v místě, kde zbarvení lístků přechází ze zeleného do hnědého. Na rozdíl od mezinárodní studie jsem dále zpracovávala a analyzovala i spodní segmenty mechu, aby bylo možné porovnat koncentraci zjišťovaných TK v mladších a starších částech mechu. Takto zpracovaný materiál jsem uložila do papírových sáčků, ve kterých během několika dní uschl.

Suché vzorky jsem namlela na kulovém mlýnku TU 260, ZPA Dukla Prešov. Do doby dalšího zpracování jsem vzorky uchovávala v uzavíratelných polyetylenových sáčcích. Následující kroky jsem prováděla v chemické laboratoři Katedry ekologie a životního prostředí Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

Vzorky jsem přesypala do obálek z filtračního papíru a dosušila v sušičce při 60 °C po dobu 1 hodiny. V tomto bodě byly připraveny k mineralizaci neboli rozkladu až na jednoduché organické látky. Na analytických vahách jsem odvažovala 0,5 g vzorku v případě vzorků z r. 2011 a 1g vzorku v případě vzorků z let 2012 a 2013. Používala jsem váhy Precisa 1212 M SuperBal. Navážku jsem ihned přesypávala do speciálních teflonových mineralizačních nádobek.

Ke každému vzorku jsem pipetou přidala 7 ml 65% HNO<sub>3</sub> a 1 ml 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Prováděla jsem tedy tzv. rozklad mokrou cestou. Vzniklá směs začala pomalu kypět a bylo nutné ji opatrně sklepávat. Když se její objem přestal zvětšovat, bylo možné nádobky uzavřít a umístit ve speciálním stojanu do mineralizátoru.

Používala jsem mikrovlnné mineralizační zařízení Speedwave® two od firmy Berghof. Průběh mineralizace řídí připojený počítač. Zvolila jsem 40minutový mineralizační program, který prvních dvacet minut postupně zvyšuje teplotu až na



180 °C a dalších dvacet minut tuto teplotu udržuje. Pro dokonalé rozložení vzorků bylo nutné spustit program dvakrát za sebou.

Přibližně 1 hodinu po ukončení druhého cyklu byly již nádoby dostatečně zchladlé, aby bylo možné je otevřít. Obsah každé z nich jsem přelila do varné baňky, kterou jsem doplnila destilovanou vodou po rysku na výsledný objem 50 ml. Posledním krokem přípravy vzorků bylo jejich přelití přes filtrační papír do uzavíratelných plastových nádobek. Takto byly konečně připraveny pro spektrometrickou analýzu.

V každé fázi přípravy vzorků jsem dbala na to, aby nebyly kontaminovány. Při manipulaci s nimi jsem používala ochranné rukavice, po namletí každého vzorku jsem pečlivě vyčistila nádoby mlýnku i mlecí kuličky. Mineralizační nádoby i laboratorní sklo jsem pro každý nový vzorek nejprve řádně vymyla destilovanou vodou. Všechny sáčky i nádoby jsem popisovala čísly vzorků, aby nedošlo k jejich záměně.

## **3.6 Analýza vzorků**

### **3.6.1 Použitá metoda a přístroje**

K analýze vzorků byla použita atomová absorpční spektrometrie, což je analytická metoda sloužící ke stanovení obsahu látek v roztoku. Připravené vzorky ze všech tří odběrových sezón (2011, 2012, 2013) podrobil analýze RNDr. Petr Hekera Ph.D. z katedry Ekologie a životního Prostředí na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Použil atomový absorpční spektrometr Avanta  $\Sigma$  s automatickým podavačem SDS-270 od firmy GBS. Vybrané prvky (Cd, Cr, Cu Pb, Ni, Zn) byly stanovovány v plamenu acetylen-vzduch. Software Avanta pracuje pod operačním systémem Windows® 95.

Vzorky z r. 2011 byly analyzovány již v rámci méj bakalářské práce na obsah Cu, Ni, Pb a Zn (Hejzlarová 2012). Původně získané výsledky spektrometrické analýzy obsahovaly velké množství hodnot naměřených pod mezí detekce přístroje. V rámci této práce jsem proto přebytečné množství vzorků z r. 2011 zakoncentrovala pomocí odparu

a podrobila spektrometrické analýze výše uvedených 4 prvků znovu (pro dodatečné stanovení Cd a Cr už bohužel nebyl dostatek materiálu). Podařilo se mi doplnit některá chybějící data, a proto je součástí této práce i opakované statistické vyhodnocení vzorků z r. 2011.

### 3.6.2 Princip fungování atomového absorpčního spektrometru

Kapilára automatického podavače nasaje malé množství vzorku a rozpráší jej v podobě aerosolu do plamene spektrometru. Působením vysoké teploty se poruší chemické vazby v molekulách přítomných sloučenin. Součástí přístroje jsou výbojky s dutou katodou. Pro detekci každého prvku se používá samostatná výbojka vyzařující světlo o takové vlnové délce, které jeho atomy nejvíce pohlcují. Přístroj měří úbytek intenzity světla po průchodu atomizovaným vzorkem v plamenu a na základě tohoto úbytku vypočítá koncentraci volných atomů testovaného prvku.

V praxi se úbytek intenzity procházejícího světla vyjadřuje veličinou zvanou absorbance ( $A$ ), která je vyjádřena vzorcem Lambert-Beerova zákona:

$$A = \log_{10} (I_0/I_t) = K \cdot C \cdot L$$

$I_0$  = počáteční intenzita záření světelného zdroje

$I_t$  = naměřená intenzita záření po průchodu atomizovaným vzorkem

$K$  = experimentálně určená konstanta

$C$  = koncentrace volných atomů ve vzorku

$L$  = délka dráhy světla

## 3.7 Zpracování dat

Ke statistickému zpracování výsledků byl použit program NCSS 9 (Hintze 2013). Volba metod statistické analýzy byla ovlivněna zejména množstvím chybějících dat (hodnot naměřených pod mezí detekce přístroje). V případě Zn a Cu bylo možné použít běžné metody analýzy – všechny naměřené koncentrace Zn byly nad mezí detekce, u Cu

chybělo pouze 6 hodnot (5%). Vzhledem k výzkumnému designu byla zvolena „mixed ANOVA“, která umožňuje pracovat s více nezávislými proměnnými a zároveň prozkoumat efekt opakovaného měření.

V případě Pb (22% chybějících hodnot) a Cd (11% chybějících hodnot) byla volba metody složitější. Jako nejlepší se ukázala metoda „Nondetects-Data Group Comparison“. Tato metoda nám sice neumožní kontrolovat efekt jednotlivých časových období sběru, koriguje ale problémy vznikající v důsledku chybějících hodnot.

Metoda „Nondetects-Data Group Comparison“ využívá Kaplan-Meierovu křivku přežívání. Jedná se o neparametrický postup analýzy dat ve studiích, kde vzorek postupně vymírá (např. studie pacientů v nemocnici, kvetení rostlin...). Tyto studie mívají chybějící hodnoty v pravé části rozložení. V našem případě je ale problém opačný – v pravé části rozložení jsou hodnoty nejvyšší, nedetekované hodnoty spadají do jeho levé části. Metoda „Nondetects-Data Group Comparison“ problém řeší tak, že si stanoví konstantní hodnotu, která je vyšší, než maximální naměřená hodnota. Naměřené hodnoty pak od této konstanty odečte a rozložení tak zrcadlově obrátí. Po analýze jsou výsledky přepočítány podobným způsobem zpět. NCSS už poskytuje přímo přepočtené hodnoty.

Z naměřené koncentrace jednotlivých prvků v mechu je možné odhadnout hodnotu jejich absolutní atmosférické depozici na dané lokalitě. V rámci mezinárodního biomonitorovacího průzkumu jsou absolutní hodnoty spadu určovány podle následující rovnice:  $D_{el} = C_{el} \times K_{el}$ , kde  $D_{el}$  je absolutní atmosférická depozice daného prvku ( $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{rok}$ ),  $C_{el}$  je naměřený obsah prvku v mechu ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) a  $K_{el}$  je koeficient zahrnující v sobě účinnost příjmu daného prvku mechou (0–1) a velikost ročního přírůstku biomasy mechu ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{rok}$ ) (Sucharová et al 2008). Hodnoty koeficientu  $K_{el}$  pro ČR byly stanoveny v roce 1998 (Suchara & Sucharová 1998c, Suchara & Sucharová 2004b) a jsou uvedeny také v české národní zprávě za rok 2000 (Suchara & Sucharová, 2004a). Protože na velikost roční produkce mechu má zásadní vliv počasí, měly by být koeficienty  $K_{el}$  pro každou etapu průzkumu aktualizovány. Novější údaje bohužel nejsou k dispozici, proto jsem k odhadu absolutní atmosférické depozice použila koeficienty  $K_{el}$  z r. 1998.

## 4. Výsledky

Za účelem ověření formulovaných hypotéz byly statisticky analyzovány výsledky spektrometrického měření obsahu Cu, Pb a Zn ve 144 vzorcích mechu odebraných v letech 2011-2013 a výsledky spektrometrického měření obsahu Cd v 96 vzorcích odebraných v letech 2012-2013. I přes upravení metodiky spočívající ve zvýšení navážky vzorků podrobovaných spektrometrické analýze se ani v sezónách 2012 a 2013 nepodařilo stanovit koncentrace testovaných prvků ve všech vzorcích (Tab. 3). Obsah TK byl v některých vzorcích tak malý, že nepřekročil mez detekce použitého spektrometru. Naměřené hodnoty nižší než stanovená mez detekce jsou příliš zatíženy chybou měření přístroje a v tabulkách budou dále uváděny jako hodnoty pod mezí detekce („<MD“).

**Tab. 3: Poměr detekovaných a nedetekovaných hodnot**

kov	Počet vzorků	počet hodnot nad mezí detekce	počet hodnot pod mezí detekce	% hodnot nad mezí detekce
Cd	96	85	11	89
Cr	96	41	55	43
Cu	144	138	6	96
Ni	144	67	77	47
Pb	144	113	31	78
Zn	144	144	0	100

Pro statistickou analýzu výsledků Cu a Zn bylo možné použít běžné metody. V případě ostatních prvků představovalo velké množství chybějících údajů značný problém, a to zejména u Cr a Ni.

Program NCSS nabízí analytické postupy, které jsou schopné pracovat i se soubory obsahujícími velký podíl chybějících dat. Podle Helsela (2005) je ale třeba dodržet podmínku, že chybějících dat nebude více než 50 %. To zcela jednoznačně nesplňují Cr (57 % chybějících dat) a Ni (53 % chybějících dat), proto byly z další analýzy a testování hypotéz vyřazeny.

Dalším problémem při statistickém vyhodnocování výsledků byla srovnatelnost jednotlivých období sběru. Vzorky z podzimu 2011 (n = 48) byly analyzovány

atomovým absorpčním spektrometrem jako jedna sada vzorků na jaře roku 2012. Vzorky z podzimu 2012 a jara 2013 ( $n = 96$ ) byly analyzovány totožným přístrojem jako druhá sada vzorků na jaře roku 2015. Rozdíl mezi těmito sadami byl v navážce jednotlivých vzorků, která byla pro druhé období zdvojnásobena za účelem zpřesnění měření. Pro jaro 2011 byla navážka 0,5 g, pro podzim 2012 a jaro 2013 činila 1 g.

Množství navážky by teoreticky naměřené hodnoty ovlivňovat nemělo, protože jsou později podle odpovídajících koeficientů přepočítávány na množství udávané v mg na 1 kg mechu. Data z obou měření by tedy měla být srovnatelná. Při kontrole tohoto předpokladu se ale bohužel ukázalo, že tomu tak není. V případě větší navážky (vzorky z r. 2012 a 2013) byly výsledky pravděpodobně přesnější, při menší navážce přístroj obsah prvku nadhodnocoval. Také hodnoty meze detekce byly v jednotlivých obdobích výrazně jiné (vyšší v případě menší navážky), což vedlo k většímu množství hodnot naměřených pod mezí detekce. Jako příklad lze uvést výsledky naměřené pro zinek (Tab. 4). Průměry naměřených hodnot Zn z podzimu 2012 a jara 2013 jsou si velmi blízké, zatímco průměr z podzimu 2011 se liší o více než jednu směrodatnou odchylku. Podobný trend se bohužel objevuje i u ostatních kovů. Z tohoto důvodu byly výsledky z podzimu 2011 podrobeny statistické analýze izolovaně od výsledků z podzimu 2012 a jara 2013.

**Tab. 4: Porovnání výsledků obsahu Zn (mg/kg) získaných pro jednotlivé sezóny**

Zn	aritmetický průměr	směrodatná odchylka	medián	mez detekce
<b>podzim 2011</b>	53,14	13,21	51,15	1,20
<b>podzim 2012</b>	38,40	14,29	34,40	0,60
<b>jaro 2013</b>	38,15	9,48	36,82	0,60

Vzhledem ke způsobu, jakým se těžké kovy do mechu dostávají, lze předpokládat určitou míru korelace mezi jejich obsahy v jednotlivých vzorcích. Pro výpočet korelace byly chybějící hodnoty nahrazeny hodnotou meze detekce. Z tohoto důvodu byl také použit Spearmanův korelační koeficient. V roce 2011 nebyla potvrzena žádná korelace mezi testovanými prvky (Tab. 5). V sezónách 2012–2013 byla zjištěna signifikantní korelace mezi většinou testovaných kovů, nejsilnější vztah byl mezi Zn a Pb (Tab. 6).

**Tab. 5: Korelační matice dat z r. 2011;** žádné signifikantní korelace

	Zn	Cu	Pb
<b>Cu</b>	0,17		0,10
Sig.	0,250		0,495
<b>Pb</b>	0,25	0,10	
Sig.	0,087	0,495	

**Tab. 6: Korelační matice dat z r. 2012 a 2013;** signifikantní korelace zvýrazněny tučně

	Zn	Cu	Pb	Cd
<b>Cu</b>	0,18		<b>0,26</b>	0,12
Sig.	0,087		0,011	0,227
<b>Pb</b>	<b>0,40</b>	<b>0,26</b>		<b>0,30</b>
Sig.	0,000	0,011		0,003
<b>Cd</b>	<b>0,28</b>	0,12	<b>0,30</b>	
Sig.	0,006	0,227	0,003	

Vzhledem k signifikantním korelacím mezi kovy se nabízí otázka, zda by nebylo vhodné v rámci statistické analýzy testovat formulované hypotézy pro všechny kovy společně. Korelace ale nejsou signifikantní ve všech případech a také u již zmíněného vztahu mezi zinkem a olovem nepřekračují hodnotu 0,3, která je obvykle brána jako slabá (např. Field 2009). Také chybějící data u olova a kadmia by takovouto analýzu spíše zkomplikovala a zabránila by použití určitých statistických metod. Proto byly výsledky koncentrací jednotlivých kovů statisticky analyzovány odděleně.

## 4.1 Popis proměnných

### nezávislé proměnné:

- „les\_neles“ – nominální proměnná nabývající dvou hodnot. Určuje, zda byl vzorek odebrán pod stromy nebo na otevřené ploše
- „vršek\_spodek“ – nominální proměnná nabývající dvou hodnot. Určuje, zda byla daná hodnota obsahu kovu naměřena ve spodních nebo horních segmentech mechových rostlin
- „čas\_sběru“ – ordinální proměnná nabývající tří hodnot. Určuje čas sběru vzorku (podzim 2011, podzim 2012, jaro 2013)

### závislá proměnná:

- „obsah\_kovu“ – poměrová proměnná udávající naměřený obsah konkrétního kovu v miligramech na kilogram sušiny mechu

## 4.2 Zjištěné koncentrace jednotlivých sledovaných prvků

### 4.2.1 Kadmium (Cd)

Obsah Cd byl měřen pouze ve vzorcích ze sezón 2012 a 2013. Spektrometrickou analýzou se podařilo stanovit obsah Cd v 84 z 96 vzorků, což představuje 88 % (Tab. 7). Množství chybějících údajů tedy nebylo u Cd příliš velké, rozložení dat ale nevyhovovalo parametrům pro metodu ANOVA. Pro statistické vyhodnocení byla proto použita metoda analýzy „Nondetects-Data Group Comparison“.

**Tab. 7: Přehled naměřených koncentrací Cd (mg/kg) v letech 2012 a 2013;** aritmetické průměry a směrodatné odchylky byly vypočítány ze souboru dat, kde byla za chybějící hodnoty dosazena konkrétní hodnota meze detekce daného prvku.

LOKALITA	MIMO KORUNY STROMŮ						POD KORUNAMI STROMŮ					
	vrchní segmenty			spodní segmenty			vrchní segmenty			spodní segmenty		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Žacléř		<MD	<MD		<MD	0,70		<MD	0,60		0,60	1,15
Zdoňov		<MD	0,60		0,70	0,80		0,65	0,75		0,70	0,65
Meziměstí		0,55	0,90		0,60	0,85		<MD	0,80		<MD	0,90
Janovičky		0,65	0,70		0,70	0,70		0,75	1,00		0,75	0,70
Trutnov		0,55	0,65		0,70	0,60		0,65	0,60		0,70	0,65
Radvanice		1,00	<MD		2,60	0,85		0,75	0,60		0,85	0,80
Dědov		0,65	0,75		0,70	<MD		0,55	0,85		0,65	0,80
Božanov		<MD	0,75		0,65	0,85		0,80	0,75		0,75	0,65
Kocbeře		0,65	<MD		0,95	0,60		0,65	0,65		0,95	0,70
Trubějov		0,55	0,80		1,00	0,70		0,85	0,75		0,65	0,65
Dobrošov		0,65	0,75		0,70	0,75		0,70	0,75		0,75	0,70
Karlów		0,60	0,65		0,70	0,60		0,80	0,75		0,70	0,70
průměr ( $\bar{x}$ )		0,63	0,68		0,88	0,71		0,69	0,74		0,72	0,75
směrodatná odchylka (s)		0,12	0,11		0,53	0,10		0,10	0,11		0,10	0,14
mez detekce (MD)		0,55	0,55		0,55	0,55		0,55	0,55		0,55	0,55
počet vzorků (n)		12	12		12	12		12	12		12	12
počet měření pod mezí detekce		3	3		1	1		2	0		1	0

### Testování hypotéz:

#### 1) Porovnání „les – neles“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

- **H0:** V koncentracích Cd naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Cd než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

Testy signifikance ukazují s výjimkou Log-rank testu negativní výsledek (Tab. 8). Manuál programu NCSS 9 doporučuje nejvíce přihlížet k testu Log-rank, který přikládá všem hodnotám stejný význam. Např. test Peto-Peto pracuje odlišně – přikládá nejvyšší

význam hodnotám na dolním konci distribuční křivky, v našem případě tedy na konci horním, protože data jsou pro analýzu zrcadlově obrácena (viz kapitola 3.7). Příkládá tedy větší význam hodnotám skutečně pozorovaným a ne odhadům chybějících dat. Lze tedy odvodit, že závěr Log-rank testu vychází zejména z předpokládané distribuční křivky chybějících dat.

**Tab. 8: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Cd; 2012,2013)**

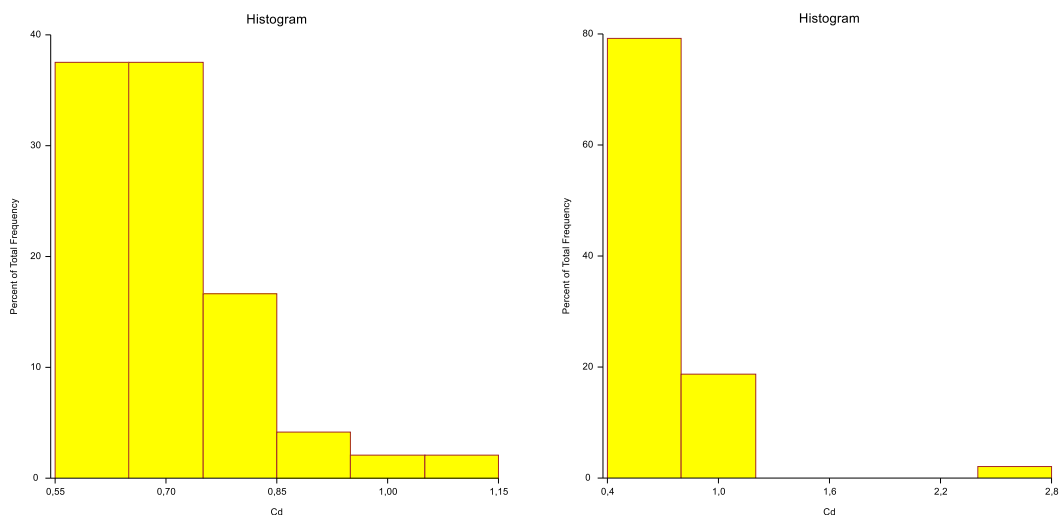
Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	4,008	1	0,0453	Ano
Gehan-Wilcoxon	2,746	1	0,0975	Ne
Tarone-Ware	3,384	1	0,0658	Ne
Peto-Peto	2,121	1	0,1453	Ne
Mod. Peto-Peto	2,105	1	0,1468	Ne

Této úvaze odpovídají i následující histogramy (Obr. 8), které ukazují, že pod korunami stromů (levý histogram) bylo naměřeno výrazně méně hodnot pod mezí detekce než na volné ploše (pravý histogram). I z toho můžeme usuzovat na platnost hypotézy H1, tedy že naměřené koncentrace Cd byly vyšší pod korunami stromů než na nezastíněných plochách. Vyšší koncentrace Cd ve vzorcích typu „les“ jsou patrné také z rozložení naměřených dat (Tab. 9) a z grafu předpokládané distribuční funkce (Obr. 9).

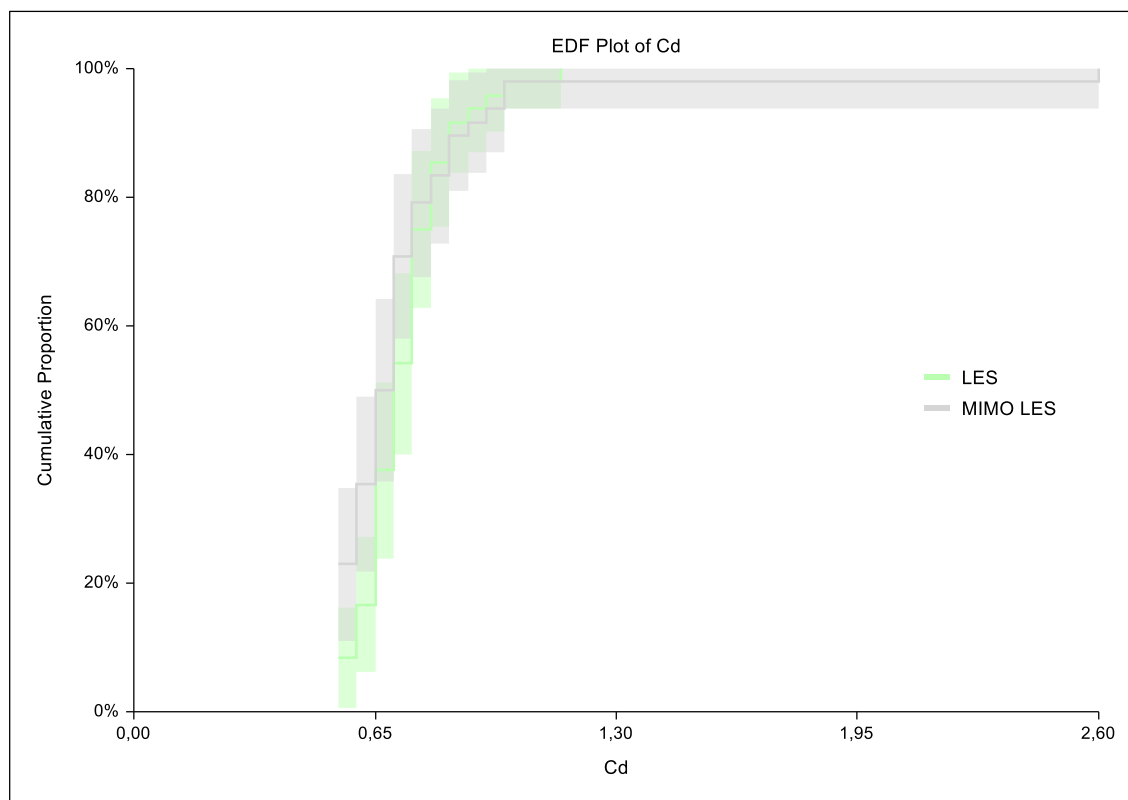
**Tab. 9: Rozložení dat „les – neles“ (Cd; 2012, 2013)**

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
les	První (Q1)	0,65	0,60	0,70
les	Medián (Q2)	0,70	0,65	0,75
les	Třetí (Q3)	0,80	0,75	0,80
neles	První (Q1)	0,60	0,55	0,65
neles	Medián (Q2)	0,70	0,65	0,70
neles	Třetí (Q3)	0,75	0,70	0,85





**Obr. 8: Histogram rozložení naměřených koncentrací Cd (mg/kg); koncentrace Cd ve vzorcích odebraných pod korunami stromů (levý histogram) a koncentrace Cd ve vzorcích odebraných na světlinách (pravý histogram).**



**Obr. 9: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Cd; 2012, 2013); křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.**

## 2) Porovnání „vršek – spodek“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

- **H0:** V koncentracích Cd naměřených ve spodních a horních částech mechových rostliněk nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostlinek bude naměřena vyšší koncentrace Cd, než v mladších horních segmentech.

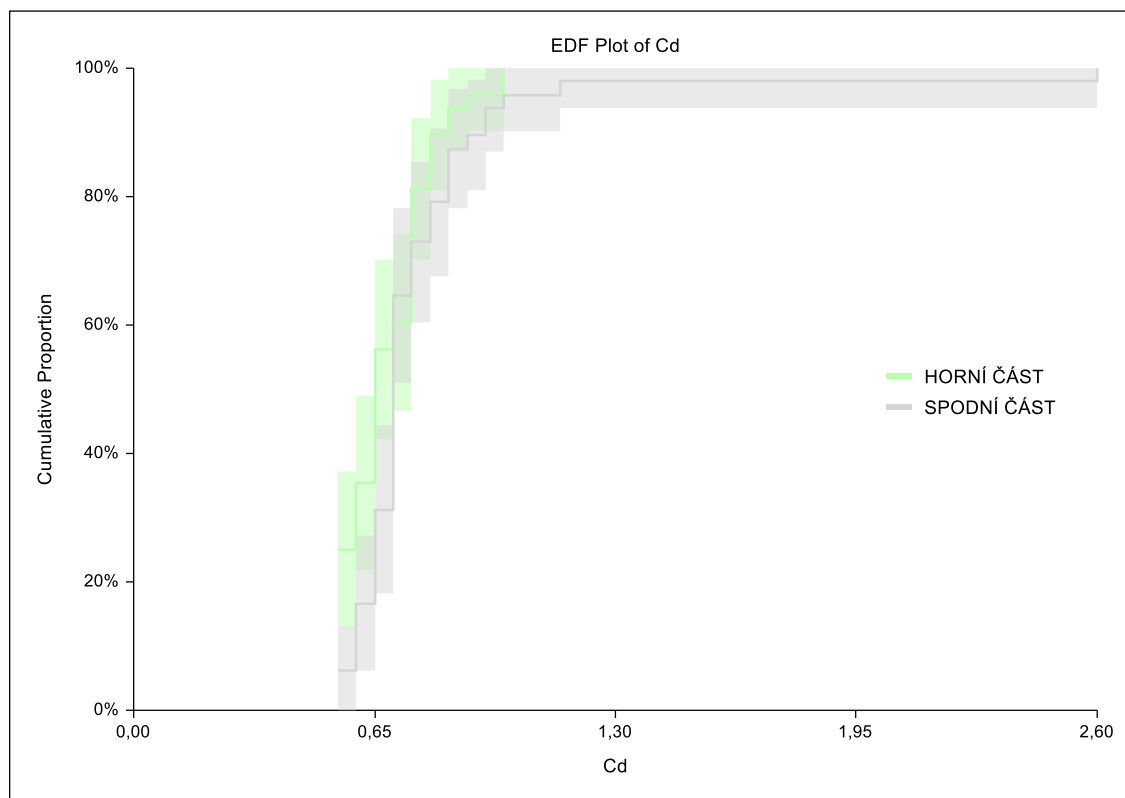
Na základě doporučovaného Log-rank testu můžeme zamítnout i nulovou hypotézu týkající se porovnání koncentrace Cd v horních a spodních segmentech mechu (Tab. 10). Signifikantně vyšší koncentrace Cd byly zjištěny ve starších spodních segmentech mechu (Tab. 11, Obr. 10).

**Tab. 10: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013)**

Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	5,633	1	0,0176	Ano
Gehan-Wilcoxon	3,612	1	0,0574	Ne
Tarone-Ware	4,548	1	0,0329	Ano
Peto-Peto	2,832	1	0,0924	Ne
Mod. Peto-Peto	2,810	1	0,0937	Ne

**Tab. 11: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013)**

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
vršek	První (Q1)	0,60	0,55	0,65
vršek	Medián (Q2)	0,65	0,65	0,75
vršek	Třetí (Q3)	0,75	0,75	0,80
spodek	První (Q1)	0,65	0,60	0,70
spodek	Medián (Q2)	0,70	0,70	0,70
spodek	Třetí (Q3)	0,80	0,70	0,85



**Obr. 10: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Cd; 2012, 2013);** křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.

### **Cd – shrnutí výsledků statistického testování hypotéz**

Při statistickém testování výsledků z let 2012-2013 se podařilo zamítnout obě dvě nulové hypotézy. V případě porovnání „les – neles“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Cd ve vzorcích odebraných pod korunami stromů („les“). V případě porovnání „vršek – spodek“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Cd ve starších spodních segmentech mechu („spodek“).

### **Výsledky z lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu**

Koncentraci Cd se podařilo stanovit ve všech vzorcích horních segmentů mechu odebraných mimo zástín korun stromů na lokalitách používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum v roce 2013 (Tab. 12).

**Tab. 12: Koncentrace Cd (mg/kg) – lokality MBP;** „MBP“ – mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace;  $MD_{Cd} = 0,55$  mg/kg.

LOKALITA	koncentrace Cd (mg/kg)
Bernartice	0,60
Bohuslavice n. Ú.	0,65
Skály	0,65
Janovičky	0,65
Havlovce	0,55

#### 4.2.2 Chrom (Cr)

Obsah Cd byl rovněž analyzován pouze ve vzorcích ze sezón 2012 a 2013. Spektrometrickou analýzou se podařilo stanovit koncentraci Cd ve 41 z 96 vzorků, což představuje 43 %. Vzhledem k velkému množství chybějících údajů nemohla být zjištěná data podrobena statistickému zpracování a v této kapitole uvádím alespoň přehled naměřených hodnot (Tab. 13).

**Tab. 13: Přehled naměřených koncentrací Cr (mg/kg) v letech 2012 a 2013;** aritmetické průměry a směrodatné odchylky byly vypočítány ze souboru dat, kde byla za chybějící hodnoty dosazena konkrétní hodnota meze detekce daného prvku.

LOKALITA	MIMO KORUNY STROMŮ						POD KORUNAMI STROMŮ					
	vrchní segmenty			spodní segmenty			vrchní segmenty			spodní segmenty		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Žacléř		<MD	<MD		4,30	4,40		<MD	<MD		4,70	3,10
Zdoňov		<MD	4,40		3,80	5,20		2,90	<MD		<MD	3,15
Meziměstí		<MD	<MD		3,90	3,40		<MD	<MD		5,10	<MD
Janovičky		3,25	<MD		<MD	<MD		3,30	<MD		<MD	<MD
Trutnov		3,05	<MD		3,70	<MD		<MD	<MD		4,80	<MD
Radvanice		2,85	<MD		4,55	<MD		3,05	<MD		5,45	<MD
Dědov		4,00	<MD		5,10	<MD		2,80	<MD		3,75	<MD
Božanov		3,00	<MD		<MD	<MD		4,65	<MD		4,10	<MD
Kočeře		<MD	<MD		<MD	1,58		<MD	<MD		<MD	<MD
Trubčejov		<MD	1,38		<MD	<MD		<MD	<MD		<MD	0,13
Dobrošov		<MD	2,33		4,80	0,28		<MD	0,13		<MD	2,58
Karlów		<MD	1,83		3,40	0,53		<MD	0,53		<MD	3,48
průměr ( $\bar{x}$ )		2,83	2,53		3,65	2,56		2,88	2,18		3,60	2,52
směrodatná odchylka (s)		0,43	0,67		0,90	1,33		0,59	0,83		1,13	0,78
mez detekce (MD)		2,55	2,55		2,55	2,55		2,55	2,55		2,55	2,55
počet vzorků (n)		12	12		12	12		12	12		12	12
počet měření pod mezí detekce		7	8		4	6		7	10		6	7

### **Výsledky z lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu**

Koncentraci Cr se podařilo stanovit ve 4 z 5 vzorků horních segmentů mechu odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitách používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum v roce 2013 (Tab. 14).

**Tab. 14: Koncentrace Cr (mg/kg) – lokality MBP;** „MBP“ – mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace;  $MD_{Cr} = 2,55$  mg/kg.

<b>LOKALITA</b>	<b>koncentrace Cr (mg/kg)</b>
<b>Bernartice</b>	7,73
<b>Bohuslavice n. Ú.</b>	5,08
<b>Skály</b>	>MD
<b>Janovičky</b>	2,63
<b>Havlovice</b>	6,08

### 4.2.3 Měď (Cu)

Obsah Cu byl měřen ve vzorcích ze sezón 2011, 2012 a 2013. Spektrometrickou analýzou se podařilo stanovit koncentraci ve 138 ze 144 vzorků, což představuje 96 % (Tab. 15). Množství chybějících dat tedy bylo zanedbatelné a ke statistickému vyhodnocení mohla být použita vícecestná analýza rozptylu (ANOVA).

**Tab. 15: Přehled naměřených koncentrací Cu (mg/kg) v letech 2011–2013;** aritmetické průměry a směrodatné odchylky byly vypočítány ze souboru dat, kde byla za chybějící hodnoty dosazena konkrétní hodnota meze detekce daného prvku.

LOKALITA	MIMO KORUNY STROMŮ						POD KORUNAMI STROMŮ					
	vrchní segmenty			spodní segmenty			vrchní segmenty			spodní segmenty		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Žacléř	1,30	0,65	1,35	4,60	<MD	0,55	10,20	4,95	2,00	7,00	10,60	1,45
Zdoňov	4,20	3,40	1,65	8,10	1,80	0,60	5,90	4,55	6,15	5,80	3,80	4,05
Meziměstí	7,70	1,75	3,05	6,10	<MD	2,20	5,50	2,10	5,35	7,00	2,10	4,45
Janovičky	27,00	2,85	6,50	1,70	2,00	5,55	8,70	8,00	6,55	9,00	6,00	8,25
Trutnov	5,00	1,45	4,75	13,70	<MD	3,70	7,20	3,90	6,35	3,90	2,60	4,40
Radvanice	49,20	1,60	7,90	2,80	1,25	5,10	7,60	3,70	5,80	5,70	1,55	5,95
Dědov	4,70	2,25	4,70	3,90	1,20	4,60	11,30	3,80	9,20	7,80	2,45	8,55
Božanov	5,60	1,60	5,70	3,40	<MD	5,20	4,90	4,10	6,40	5,60	1,65	5,05
Kočeře	5,80	3,35	5,65	5,50	1,30	6,25	9,00	4,75	6,65	9,80	2,55	6,35
Trubčejov	6,10	2,50	6,15	6,90	2,25	4,85	8,40	6,55	7,10	7,50	3,95	6,05
Dobrošov	10,10	2,30	4,60	15,70	1,40	3,75	7,60	5,90	7,80	10,10	<MD	6,05
Karlův	4,90	1,85	5,40	3,40	<MD	4,45	32,40	3,25	7,70	4,40	0,75	6,10
průměr ( $\bar{x}$ )	10,97	2,13	4,78	6,32	1,16	3,90	9,89	4,63	6,42	6,97	3,21	5,56
směrodatná odchylka (s)	13,10	0,78	1,85	4,15	0,60	1,78	7,02	1,51	1,66	1,91	2,65	1,82
mez detekce (MD)	0,30	0,55	0,55	0,30	0,55	0,55	0,30	0,55	0,55	0,30	0,55	0,55
počet vzorků (n)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
počet měření pod mezí detekce	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	0

### Testování hypotéz:

#### 1) Porovnání „les – neles“ a „vršek – spodek“ – odběrová sezóna 2011

##### „les – neles“

- **H0:** V koncentracích Cu naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Cu než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

##### „vršek – spodek“

- **H0:** V koncentracích Cu naměřených ve spodních a horních částech mechových rostliněk nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostliněk bude naměřena vyšší koncentrace Cu, než v mladších horních segmentech.

Vzhledem k nízkému počtu chybějících hodnot bylo v tomto případě možné použít dvoucestnou analýzu rozptylu („two-way ANOVA“), tzn. ANOVU se dvěma nezávislými proměnnými mezi subjekty (Tab. 16). Všechny hodnoty jsou uvedeny jako signifikantní pro  $p < .05$ . Pro testování hypotéz byly použity plánované kontrasty (Tab. 17). Při ( $p < .05$ ) není možné zamítnout ani jednu ze dvou testovaných nulových hypotéz. Velikost efektu pro kontrast „vršek – spodek“ je ale 0,24. Je tedy možné, že při větším vzorku by tento kontrast vyšel jako signifikantní. Tento trend je patrný i z porovnání aritmetických průměrů (Tab. 18 a 19).

**Tab. 16: Výsledky analýzy rozptylu (Cu; 2011)**

Znak (zdroj proměnlivosti)	Stupně volnosti	Suma druhých mocnin	Průměr druhých mocnin	F-poměr	Hladina významnosti	Síla testu ( $\alpha = 0.05$ )
A: les_neles	1	0,541	0,541	0,01	0,928	0,050
B: vršek_spodek	1	172,141	172,141	2,61	0,113	0,352
AB	1	8,926	8,926	0,14	0,714	0,064
S	44	2901,459	65,942			
Total (Adjusted)	47	3083,070				
Total	48					

**Tab. 17: Plánované kontrasty (Cu; 2011)**

Porovnávaná kategorie	T-hodnota	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám $H_0$ ( $p < .05$ )	Velikost efektu ( $r$ )
les/neles	0,0906	44	0,928	Ne	0,01
vršek/spodek	1,6157	44	0,113	Ne	0,24

**Tab. 18: Průměry koncentrací „les – neles“ (Cu; 2011);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Cu (mg/kg).

Odběrové místo	$\bar{x}$
les	8,429
neles	8,642

**Tab. 19: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Cu; 2011);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Cu (mg/kg).

Část mechové rostlinky	$\bar{x}$
vršek	10,429
spodek	6,642

## 2) Porovnání „les – neles“ a „vršek – spodek“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

### „les – neles“

- **H0:** V koncentracích Cu naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Cu než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

### „vršek – spodek“

- **H0:** V koncentracích Cu naměřených ve spodních a horních částech mechových rostlinek nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostlinek bude naměřena vyšší koncentrace Cu, než v mladších horních segmentech.

Vzhledem k nízkému počtu chybějících hodnot bylo možné i pro data ze sezón 2012 a 2013 použít vícecestnou analýzu rozptylu, v tomto případě byla použita třicestná ANOVA („three-way mixed ANOVA“), tzn. ANOVA se třemi nezávislými proměnnými – dvě nezávislé proměnné mezi subjekty (between subjects) a jedna pro opakovaná měření (repeated measures, within subjects) (Tab. 20). Všechny hodnoty jsou uvedeny jako signifikantní pro  $p < .05$ . Pro testování hypotéz byly použity plánované kontrasty, podle kterých můžeme zamítnout obě testované nulové hypotézy (Tab. 21). Signifikantně vyšší koncentrace Cu byla zjištěna ve vzorcích odebraných pod korunami stromů (Tab. 22) a v horních segmentech mechu (Tab. 23).

**Tab. 20: Výsledky analýzy rozptylu (Cu; 2012, 2013)**

Znak (zdroj proměnlivosti)	Stupně volnosti	Suma druhých mocnin	Průměr druhých mocnin	F-poměr	Hladina významnosti	Síla testu ( $\alpha = 0.05$ )
A: les_neles	1	92,335	92,335	34,64	0,000*	0,999
B: vrsek_spodek	1	25,575	25,575	9,6	0,003*	0,857
AB	1	0,276	0,276	0,1	0,749	0,061
C(AB): cislo_vzorku	44	117,279	2,665			
D: cas_sberu	1	136,207	136,207	37,97	0,000*	0,999
AD	1	2,359	2,359	0,66	0,421	0,124
BD	1	0,609	0,609	0,17	0,682	0,068
ABD	1	0,332	0,332	0,09	0,762	0,060
CD(AB)	44	157,854	3,587			
S	0					
Total (Adjusted)	95	532,830				



**Tab. 21: Plánované kontrasty (Cu; 2012, 2013)**

Porovnávaná kategorie	T-hodnota	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)	Velikost efektu (r)
les/neles	5,8857	44	0,000	Ano	0,66
vršek/spodek	3,0976	44	0,003	Ano	0,42

**Tab. 22: Průměry koncentrací „les – neles“ (Cu; 2012, 2013);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Cu (mg/kg).

Odběrové místo	$\bar{x}$
les	4,955
neles	2,994

**Tab. 23: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Cu; 2012, 2013);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Cu (mg/kg).

Část mechové rostlinky	$\bar{x}$
vršek	4,491
spodek	3,458

**Cu – shrnutí výsledků statistického testování hypotéz**

Při statistickém testování výsledků z roku 2011 se nepodařilo zamítnout ani jednu ze dvou testovaných nulových hypotéz. Mezi vzorky odebranými pod korunami stromů a na světlinách ani mezi staršími a mladšími segmenty mechových rostlinek nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl. V případě porovnání „vršek – spodek“ však byl patrný trend vyššího obsahu Cu v mladších horních segmentech mechu („vršek“).

Při statistickém testování výsledků z let 2012 a 2013 se podařilo zamítnout obě dvě nulové hypotézy. V případě porovnání „les – neles“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Cu ve vzorcích odebraných pod korunami stromů („les“). V případě porovnání „vršek – spodek“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Cu v mladších horních segmentech mechu („vršek“).

### Výsledky z lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu

Koncentraci Cu se podařilo stanovit ve všech vzorcích horních segmentů mechu odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitách používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum v roce 2013 (Tab. 24).

**Tab. 24: Koncentrace Cu (mg/kg) – lokality MBP;** „MBP“ – mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace;  $MD_{Cu} = 0,55$  mg/kg.

<b>LOKALITA</b>	<b>koncentrace Cu (mg/kg)</b>
<b>Bernartice</b>	4,35
<b>Bohuslavice n. Ú.</b>	6,05
<b>Skály</b>	5,25
<b>Janovičky</b>	7,65
<b>Havlovice</b>	5,90

#### 4.2.4 Nikl (Ni)

Obsah Ni byl analyzován ve vzorcích ze sezón 2011, 2012 a 2013. Spektrometrickou analýzou se podařilo stanovit koncentraci Ni v 67 ze 144 vzorků, což představuje 47%. Vzhledem k velkému množství chybějících údajů nemohla být zjištěná data statisticky testována a na tomto místě uvádím alespoň přehled naměřených hodnot (Tab. 25).

**Tab. 25: Přehled naměřených koncentrací Ni (mg/kg) v letech 2011–2013;** aritmetické průměry a směrodatné odchytky byly vypočítány ze souboru dat, kde byla za chybějící hodnoty dosazena konkrétní hodnota meze detekce daného prvku.

LOKALITA	MIMO KORUNY STROMŮ						POD KORUNAMI STROMŮ					
	vrchní segmenty			spodní segmenty			vrchní segmenty			spodní segmenty		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Žacléř	<MD	<MD	2,30	<MD	<MD	3,60	4,00	<MD	2,80	5,30	2,15	4,70
Zdoňov	<MD	<MD	2,15	<MD	1,85	2,85	<MD	<MD	2,60	5,80	<MD	3,95
Meziměstí	5,00	<MD	1,85	7,40	<MD	3,15	<MD	<MD	3,35	8,40	<MD	3,85
Janovičky	5,90	<MD	<MD	<MD	2,10	<MD	<MD	<MD	2,15	6,60	<MD	2,55
Trutnov	<MD	<MD	<MD	6,30	1,95	<MD	<MD	<MD	<MD	5,40	<MD	<MD
Radvanice	5,30	<MD	<MD	5,50	<MD	<MD	<MD	<MD	<MD	6,80	<MD	<MD
Dědov	6,70	<MD	<MD	6,20	<MD	<MD	4,70	<MD	<MD	7,70	<MD	2,30
Božanov	<MD	<MD	<MD	4,70	<MD	<MD	<MD	<MD	<MD	5,20	2,20	<MD
Kočeře	4,50	<MD	<MD	4,10	2,40	<MD	<MD	<MD	<MD	6,80	2,20	<MD
Trubějov	4,80	2,65	<MD	6,40	3,95	<MD	5,00	<MD	<MD	6,60	3,20	<MD
Dobrošov	5,90	2,70	<MD	7,10	3,25	<MD	5,00	2,45	<MD	8,90	2,05	<MD
Karlów	6,40	<MD	<MD	4,10	2,45	2,40	5,80	3,15	<MD	7,50	4,15	<MD
průměr ( $\bar{x}$ )	4,94	1,99	1,91	5,24	2,27	2,23	4,20	2,01	2,14	6,75	2,25	2,53
směrodatná odchylka (s)	1,06	0,31	0,14	1,34	0,65	0,60	0,70	0,38	0,48	1,16	0,68	0,99
mez detekce (MD)	3,70	1,85	1,85	3,70	1,85	1,85	3,70	1,85	1,85	3,70	1,85	1,85
počet vzorků (n)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
počet měření pod mezí detekce	4	10	9	3	5	8	7	10	8	0	6	7

#### Výsledky z lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu

Koncentraci Ni se nepodařilo stanovit ani v jednom z 5 vzorků horních segmentů mechu odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitách používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum v r. 2013. Všechny naměřené hodnoty byly pod mezí detekce přístroje, která byla v tomto případě 1,85 mg/kg.

#### 4.2.5 Olovo (Pb)

Obsah Pb byl měřen ve vzorcích ze sezón 2011, 2012 a 2013. Spektrometrickou analýzou se podařilo stanovit jeho koncentraci ve 113 ze 144 vzorků, což představuje 78 % (Tab. 26). Množství chybějících údajů tedy bylo poměrně velké, proto byla pro statistické vyhodnocení použita metoda analýzy „Nondetects-Data Group Comparison“.

**Tab. 26: Přehled naměřených koncentrací Pb (mg/kg) v letech 2011–2013;** aritmetické průměry a směrodatné odchylky byly vypočítány ze souboru dat, kde byla za chybějící hodnoty dosazena konkrétní hodnota meze detekce daného prvku.

LOKALITA	MIMO KORUNY STROMŮ						POD KORUNAMI STROMŮ					
	vrchní segmenty			spodní segmenty			vrchní segmenty			spodní segmenty		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Žacléř	<MD	<MD	<MD	3,65	5,05	<MD	<MD	5,95	<MD	8,60	18,20	5,90
Zdoňov	3,23	<MD	<MD	8,90	11,60	<MD	3,86	<MD	5,35	10,91	24,30	12,30
Meziměstí	4,78	<MD	4,50	11,50	<MD	8,10	4,41	<MD	5,30	8,48	9,50	10,00
Janovičky	5,79	5,15	9,00	9,90	10,25	15,50	10,41	12,35	11,25	18,63	29,75	16,35
Trutnov	3,44	<MD	<MD	9,57	9,10	10,70	<MD	<MD	<MD	6,92	13,10	10,60
Radvanice	8,35	5,35	9,10	17,87	13,15	14,85	7,55	7,25	10,35	15,32	10,20	15,05
Dědov	6,63	4,10	5,40	9,32	12,30	9,50	4,95	<MD	9,90	11,41	8,85	18,30
Božanov	4,99	<MD	3,55	8,69	4,25	6,65	3,06	<MD	<MD	8,14	7,00	9,90
Kocbeře	4,20	<MD	<MD	6,80	7,65	8,20	6,63	<MD	3,60	14,06	10,15	9,00
Trubějov	5,12	<MD	4,80	9,69	5,95	9,30	6,21	<MD	<MD	<MD	5,90	7,50
Dobrošov	7,05	<MD	4,55	15,78	6,75	9,10	7,47	4,80	8,65	19,34	7,30	14,90
Karlův	5,33	4,00	7,40	10,03	7,05	9,20	6,55	<MD	7,75	15,82	9,85	10,95
průměr ( $\bar{x}$ )	5,15	3,92	5,21	10,14	8,05	9,02	5,57	4,90	6,36	11,71	12,84	11,73
směrodatná odchylka (s)	1,56	0,63	2,03	3,56	3,08	3,49	2,21	2,53	2,90	4,79	7,13	3,58
mez detekce (MD)	2,90	3,55	3,55	2,90	3,55	3,55	2,90	3,55	3,55	2,90	3,55	3,55
počet vzorků (n)	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
počet měření pod mezí detekce	1	8	4	0	1	2	2	8	4	1	0	0

#### Testování hypotéz

##### 1) Porovnání „les – neles“ – odběrová sezóna 2011

- **H0:** V koncentracích Pb naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Pb než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

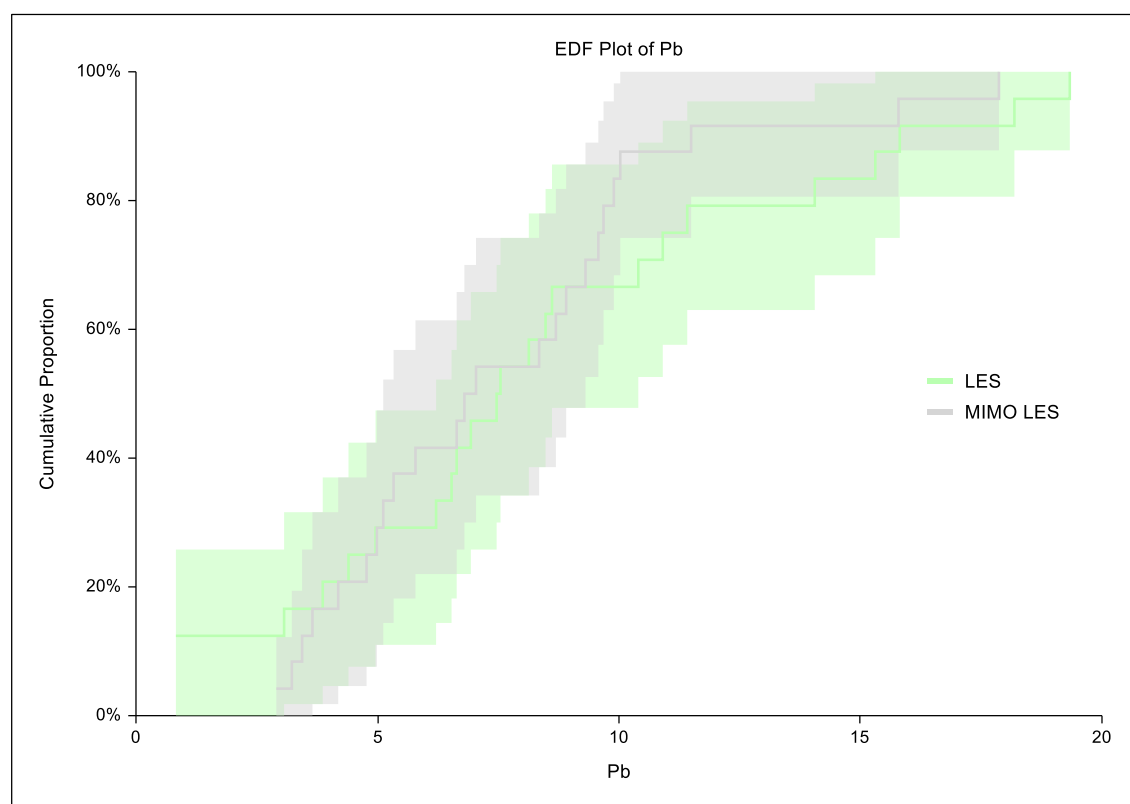
Z provedeného testování vyplývá, že nulovou hypotézu týkající se rozdílu koncentrací Pb ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na světlinách nemůžeme zamítnout (Tab. 27). Mezi vzorky „les“ a „neles“ tedy nebyl v sezóně 2011 zjištěn signifikantní rozdíl (Tab. 28, Obr. 11).

Tab. 27: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Pb; 2011)

Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	0,064	1	0,8010	Ne
Gehan-Wilcoxon	0,130	1	0,7189	Ne
Tarone-Ware	0,012	1	0,9110	Ne
Peto-Peto	0,130	1	0,7189	Ne
Mod. Peto-Peto	0,143	1	0,7057	Ne

Tab. 28: Rozložení dat „les – neles“ (Pb; 2011)

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
les	První (Q1)	4,951	2,895	6,923
les	Medián (Q2)	7,553	6,210	10,406
les	Třetí (Q3)	11,413	8,140	15,818
neles	První (Q1)	4,993	3,441	6,629
neles	Medián (Q2)	7,049	5,119	9,315
neles	Třetí (Q3)	9,692	8,350	11,497



Obr. 11: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Pb; 2011); křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.

## 2) Porovnání „vršek – spodek“ – odběrová sezóna 2011

- **H0:** V koncentracích Pb naměřených ve spodních a horních částech mechových rostliněk nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostliněk bude naměřena vyšší koncentrace Cu, než v mladších horních segmentech.

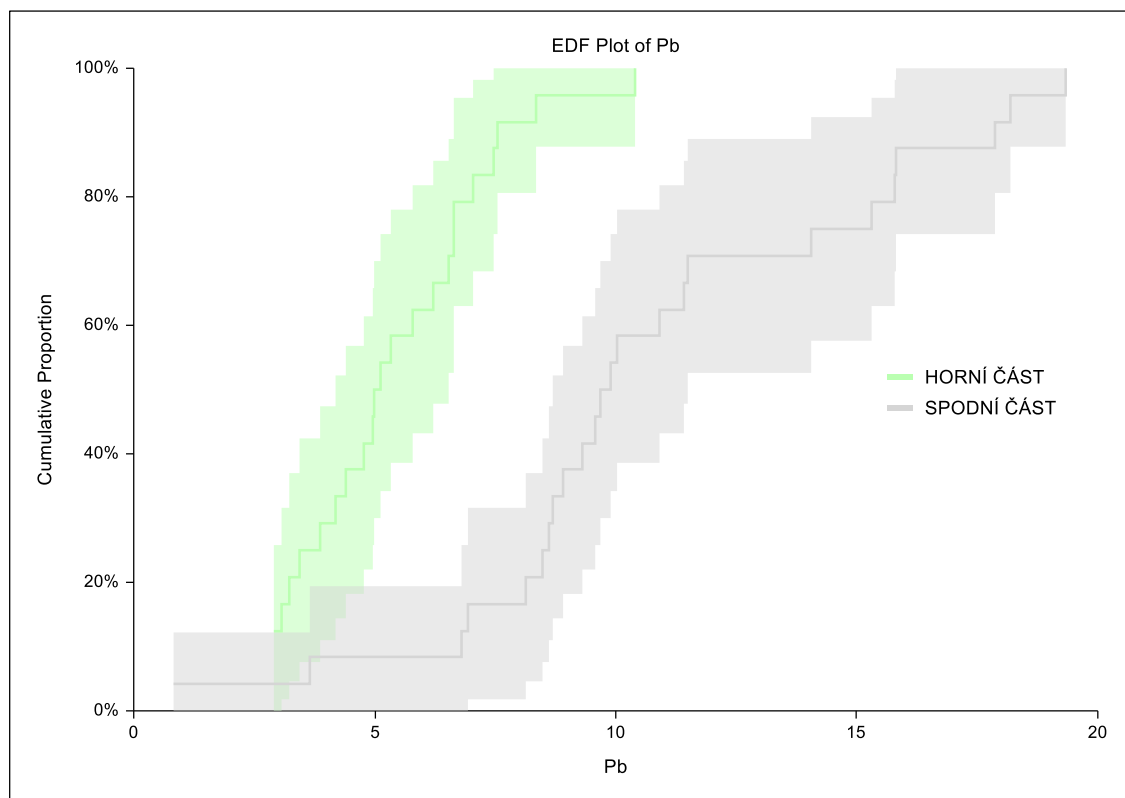
Nulovou hypotézu týkající se rozdílu koncentrací Pb ve starších a mladších segmentech mechu z r. 2011 zamítáme na základě výsledků všech použitých testů (Tab. 29). Signifikantně vyšší koncentrace Pb byla zjištěna ve starších spodních segmentech mechu (Tab. 30, Obr. 12).

**Tab. 29: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Pb; 2011)**

Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	17,848	1	0,0000	Ano
Gehan-Wilcoxon	25,457	1	0,0000	Ano
Tarone-Ware	23,489	1	0,0000	Ano
Peto-Peto	25,457	1	0,0000	Ano
Mod. Peto-Peto	25,563	1	0,0000	Ano

**Tab. 30: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Pb; 2011)**

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
vršek	První (Q1)	3,860	2,895	4,951
vršek	Medián (Q2)	5,119	4,196	6,546
vršek	Třetí (Q3)	6,630	5,329	7,553
spodek	První (Q1)	8,602	6,797	9,567
spodek	Medián (Q2)	9,902	8,685	11,497
spodek	Třetí (Q3)	15,315	10,028	17,874



**Obr. 12: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Pb; 2011); křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.**

### 3) Porovnání „les – neles“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

- **H0:** V koncentracích Pb naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Pb než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

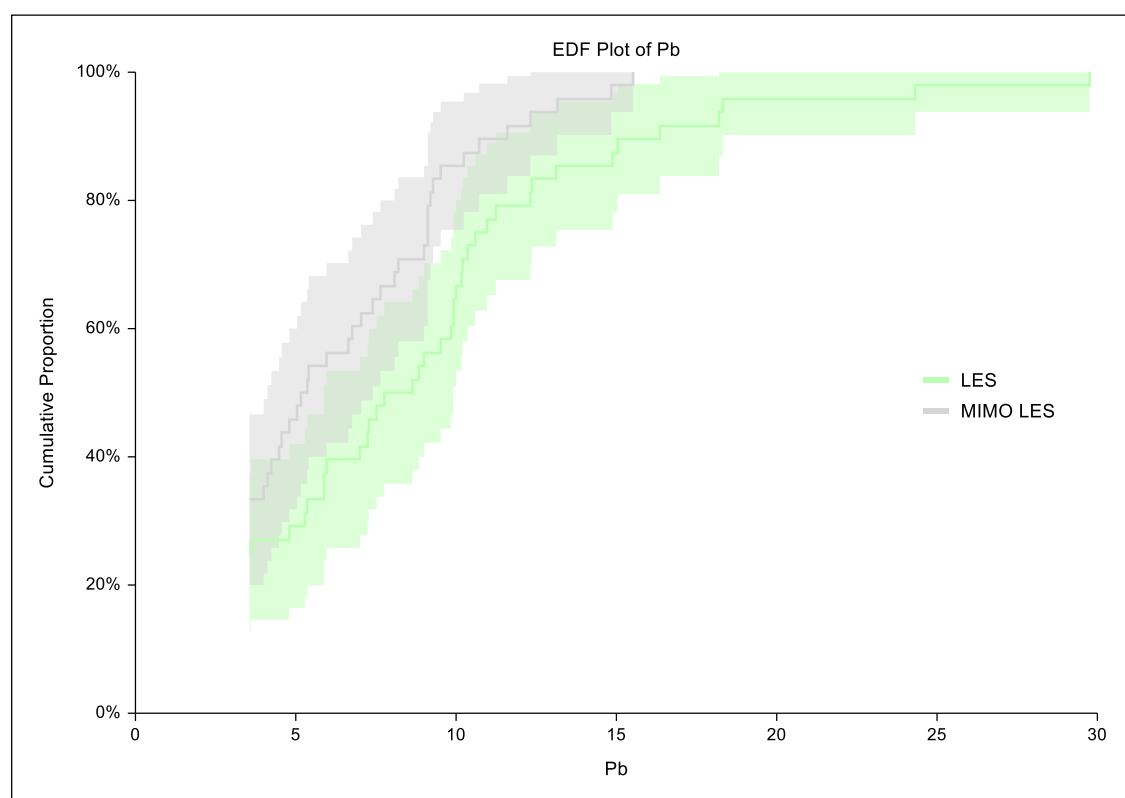
Nulovou hypotézu můžeme zamítnout na základě tří z pěti použitých testů signifikance (Tab. 31). Kvartily předpokládaného rozložení ukazují vyšší hodnoty pro vzorky odebrané pod korunami stromů (Tab. 32). Kvůli velkému množství chybějících dat nebyl program v jednom případě schopen v rámci dané statistické procedury spočítat odhad (prázdné pole v tabulce 32). Graf předpokládané distribuční funkce koresponduje s kvartily předpokládaného rozložení, koncentrace Pb ve vzorcích typu „les“ dosahují vyšších četností ve vysokých hodnotách (Obr. 13). Vzhledem ke všem těmto ukazatelům zamítáme nulovou hypotézu.

**Tab. 31: Testy signifikance rozdílu „les – neles“ (Pb; 2012, 2013)**

Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	2,744	1	0,0976	Ne
Gehan-Wilcoxon	4,618	1	0,0316	Ano
Tarone-Ware	3,771	1	0,0521	Ne
Peto-Peto	4,645	1	0,0312	Ano
Mod. Peto-Peto	4,67	1	0,0307	Ano

**Tab. 32: Rozložení dat „les – neles“ (Pb; 2012, 2013)**

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
les	První (Q1)	3,60	3,55	5,95
les	Medián (Q2)	8,65	5,90	9,90
les	Třetí (Q3)	10,95	9,90	13,10
neles	První (Q1)		3,55	4,25
neles	Medián (Q2)	5,35	4,10	7,40
neles	Třetí (Q3)	9,10	7,05	9,50

**Obr. 13: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „les – neles“ (Pb; 2012, 2013); křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.**



#### 4) Porovnání „vršek – spodek“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

- **H0:** V koncentracích Pb naměřených ve spodních a horních částech mechových rostliněk nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostliněk bude naměřena vyšší koncentrace Cu, než v mladších horních segmentech.

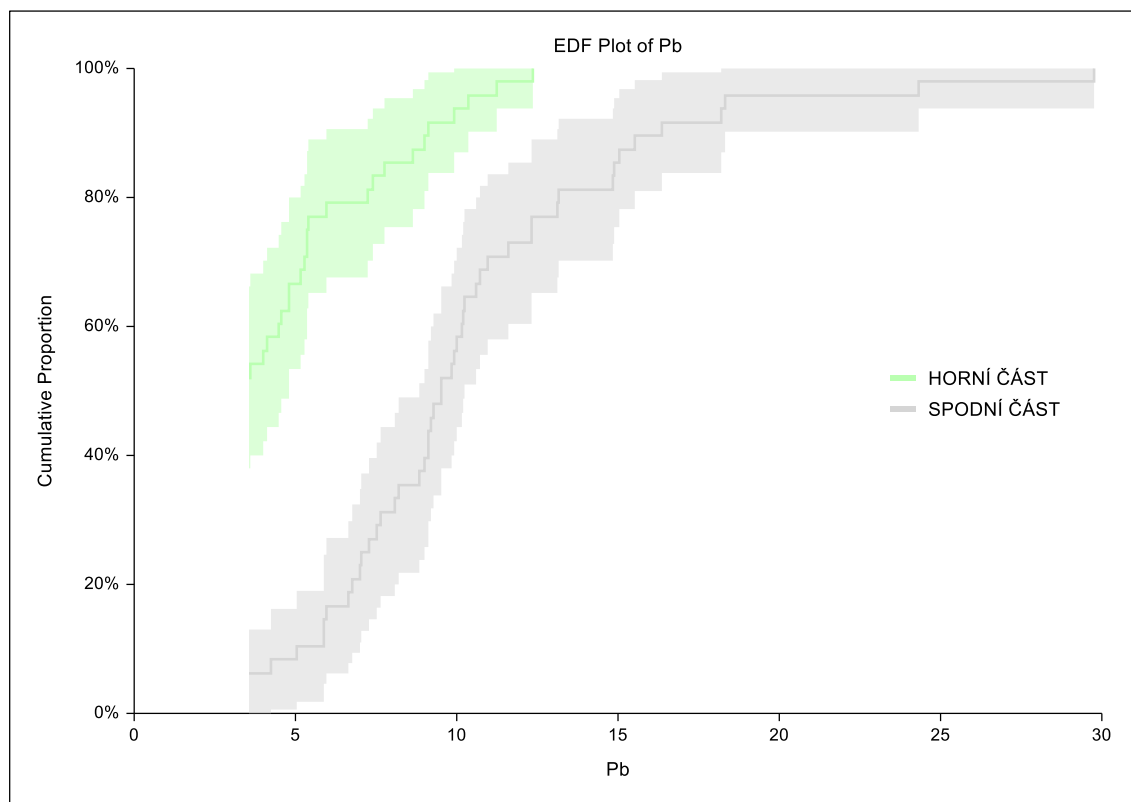
Nulovou hypotézu týkající se rozdílu koncentrací Pb ve starších a mladších segmentech mechu odebraných v 2012-2013 zamítáme na základě výsledků všech použitých testů (Tab. 33). Signifikantně vyšší koncentrace Pb byla zjištěna ve starších spodních segmentech mechu (Tab. 34). Kvůli velkému množství chybějících dat nebyl program v několika případech schopen v rámci dané statistické procedury spočítat odhad (prázdná pole v tabulce 34). Graf předpokládané distribuční funkce potvrzuje stejný závěr. Data ze spodní části mechových rostliněk dosahují vyšších četností ve vysokých hodnotách (Obr. 14).

**Tab. 33: Testy signifikance rozdílu „vršek – spodek“ (Pb; 2012,2013)**

Název testu	Chí-kvadrát	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)
Log-rank	45,382	1	0,000	Ano
Gehan-Wilcoxon	42,642	1	0,000	Ano
Tarone-Ware	44,784	1	0,000	Ano
Peto-Peto	42,616	1	0,000	Ano
Mod. Peto-Peto	42,537	1	0,000	Ano

**Tab. 34: Rozložení dat „vršek – spodek“ (Pb; 2012, 2013)**

	Kvartil	Odhad	Konf. interval spodní	Konf. interval horní
			95,0% C.L.	95,0% C.L.
vršek	První (Q1)		3,55	
vršek	Medián (Q2)		3,55	4,80
vršek	Třetí (Q3)	5,40	4,55	7,75
spodek	První (Q1)	7,30	5,95	9,00
spodek	Medián (Q2)	9,50	8,85	10,25
spodek	Třetí (Q3)	12,30	10,20	14,90



**Obr. 14: Graf předpokládané distribuční funkce, porovnání „vršek – spodek“ (Pb; 2012, 2013);** křivky distribuční funkce zobrazeny spolu s konfidenčními intervaly.

### **Pb – shrnutí výsledků statistického testování hypotéz**

Při statistickém testování výsledků z roku 2011 se podařilo zamítnout pouze jednu ze dvou testovaných nulových hypotéz a to hypotézu týkající se porovnání „vršek – spodek“. Signifikantně vyšší koncentrace Pb byla zjištěna ve spodních segmentech („spodek“).

Při statistickém testování výsledků z let 2012 a 2013 se podařilo zamítnout obě formulované nulové hypotézy. V případě porovnání „les – neles“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Pb ve vzorcích odebraných pod korunami stromů („les“). V případě porovnání „vršek – spodek“ byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Pb ve starších spodních segmentech mechu („spodek“).



## Testování hypotéz:

### 1) Porovnání „les – neles“ a „vršek – spodek“ – odběrová sezóna 2011

#### „les – neles“

- **H0:** V koncentracích Zn naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Zn než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

#### „vršek – spodek“

- **H0:** V koncentracích Zn naměřených ve spodních a horních částech mechových rostliněk nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostliněk bude naměřena vyšší koncentrace Zn, než v mladších horních segmentech.

Díky tomu, že se v případě zinku podařilo stanovit koncentraci ve všech vzorcích, bylo možné pro vzorky z r. 2011 použít dvoucestnou analýzu rozptylu („two-way ANOVA“), tzn. ANOVU se dvěma nezávislými proměnnými mezi subjekty (Tab. 37). Všechny hodnoty jsou uvedeny jako signifikantní pro  $p < .05$ . Pro testování hypotéz byly použity plánované kontrasty (Tab. 38).

Při  $p < .05$  nebylo možné zamítnout nulovou hypotézu v případě rozdílů mezi vzorky sebranými v lese a mimo les. Hladina významnosti je ale hodnotě 0,05 velmi blízká a vypočtená velikost efektu podporuje předpoklad, že při větším množství dat bychom nulovou hypotézu zamítnout mohli. Také aritmetický průměr hodnot naměřených pod korunami stromů je mírně vyšší než aritmetický průměr hodnot naměřených na světlinách (Tab. 39).

Nulová hypotéza pro rozdíly mezi horní a spodní částí mechu byla zamítnuta, větší koncentrace Zn byla ve spodních segmentech (Tab. 40).

**Tab. 37: Výsledky analýzy rozptylu (Zn; 2011)**

Znak (zdroj proměnlivosti)	Stupně volnosti	Suma druhých mocnin	Průměr druhých mocnin	F – poměr	Hladina významnosti	Síla testu ( $\alpha = 0.05$ )
A: les_neles	1	604,21	604,21	3,87	0,055	0,486
B: vršek_spodek	1	719,98	719,98	4,61	0,037*	0,556
AB	1	15,30	15,300	0,1	0,756	0,061
S	44	6869,27	156,12			
Total (Adjusted)	47	8208,76				
Total	48					

**Tab. 38: Plánované kontrasty (Zn; 2011)**

Porovnávaná kategorie	T-hodnota	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 ( $p < .05$ )	Velikost efektu (r)
les/neles	1,9673	44	0,055	Ne	0,28
vršek/spodek	2,1475	44	0,037	Ano	0,31

**Tab. 39: Průměry koncentrací „les – neles“ (Zn; 2011); uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Zn (mg/kg).**

Odběrové místo	$\bar{x}$
les	56,696
neles	49,600

**Tab. 40: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Zn; 2011); uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Cu (mg/kg).**

Část mechové rostlinky	$\bar{x}$
vršek	49,275
spodek	57,021

## 2) Porovnání „les – neles“ a „vršek – spodek“ – odběrové sezóny 2012 a 2013

### „les – neles“

- **H0:** V koncentracích Zn naměřených ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na nezastíněných plochách nebude rozdíl.
- **H1:** Ve vzorcích odebraných pod korunami stromů budou naměřeny vyšší koncentrace Zn než ve vzorcích odebraných na nezastíněných plochách.

### „vršek – spodek“

- **H0:** V koncentracích Zn naměřených ve spodních a horních částech mechových rostlinek nebude rozdíl.
- **H1:** Ve spodních částech mechových rostlinek bude naměřena vyšší koncentrace Zn, než v mladších horních segmentech.

K analýze dat z r. 2012 a 2013 byla také použita vícecestnou analýzu rozptylu, v tomto případě třicestná ANOVA („three-way mixed ANOVA“), tzn. ANOVA se třemi nezávislými proměnnými – dvě nezávislé proměnné mezi subjekty (between subjects) a jedna pro opakovaná měření (repeated measures, within subjects) (Tab. 41). Všechny hodnoty jsou uvedeny jako signifikantní pro  $p < .05$ . Pro testování hypotéz byly použity plánované kontrasty, podle kterých nemůžeme zamítnout ani jednu z testovaných nulových hypotéz (Tab. 42). Naměřené koncentrace Zn ve vzorcích odebraných pod stromy a ve vzorcích ze světlin se významně nelišily (Tab. 43). Nelišily se od sebe ani hodnoty Zn naměřené v horních a spodních segmentech (Tab. 44).

**Tab. 41: Výsledky analýzy rozptylu (Zn; 2012, 2013)**

Znak (zdroj proměnlivosti)	Stupně volnosti	Suma druhých mocnin	Průměr druhých mocnin	F - poměr	Hladina významnosti	Síla testu ( $\alpha = 0.05$ )
A: les_neles	1	53,32711	53,32711	0,24	0,624	0,076
B: vrsek_spodek	1	252,6882	252,6882	1,15	0,289	0,182
AB	1	17,8969	17,8969	0,08	0,776	0,058
C(AB): cislo_vzorku	44	9672,164	219,8219			
D: cas_sberu	1	1,462734	1,462734	0,02	0,896	0,051
AD	1	102,4034	102,4034	1,21	0,277	0,189
BD	1	0,344401	0,344401	0	0,949	0,050
ABD	1	0,9302344	0,9302344	0,01	0,917	0,051
CD(AB)	44	3734,243	84,86916			
S	0					
Total (Adjusted)	95	13835,46				

**Tab. 42: Plánované kontrasty (Zn; 2012, 2013)**

Porovnávaná kategorie	T-hodnota	Stupně volnosti	Hladina významnosti	Zamítám H0 (p < .05)	Velikost efektu (r)
les/neles	0,4925	44	0,624	Ne	0,07
vršek/spodek	0,1313	44	0,896	Ne	0,02

**Tab. 43: Průměry koncentrací „les – neles“ (Zn 2012, 2013);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Zn (mg/kg).

Odběrové místo	$\bar{x}$
les	39,022
neles	37,531

**Tab. 44: Průměry koncentrací „vršek – spodek“ (Zn; 2012, 2013);** uvedeny jsou aritmetické průměry ( $\bar{x}$ ) naměřených koncentrací Zn (mg/kg).

Část mechové rostlinky	$\bar{x}$
vršek	36,654
spodek	39,899

**Zn – shrnutí výsledků statistického testování hypotéz**

Při statistickém testování výsledků z roku 2011 se podařilo zamítnout pouze jednu ze dvou formulovaných nulových hypotéz a to hypotézu týkající se porovnání „vršek – spodek“. Signifikantně vyšší koncentrace Zn byla zjištěna ve spodních segmentech („spodek“).

Při statistickém testování výsledků z let 2012 a 2013 se nepodařilo ani jednu ze dvou nulových hypotéz. Nebyl tedy zjištěn statisticky významný rozdíl mezi vzorky odebranými pod korunami stromů a na světlinách ani mezi staršími a mladšími segmenty mechových rostlinek.

### **Výsledky z lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu**

Koncentraci Zn se podařilo stanovit ve všech vzorcích horních segmentů mechu odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitách používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum v roce 2013 (Tab. 45).

**Tab. 45: Koncentrace Zn (mg/kg) – lokality MBP;** „MBP“ – mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace.  $MD_{Zn} = 0,60$  mg/kg

<b>LOKALITA</b>	<b>koncentrace Zn (mg/kg)</b>
<b>Bernartice</b>	35,95
<b>Bohuslavice n. Ú.</b>	33,65
<b>Skály</b>	22,25
<b>Janovičky</b>	35,35
<b>Havlovice</b>	24,40



## 5. Diskuse

### 5.1 Kadmium (Cd)

Obsah Cd byl analyzován pouze ve vzorcích z let 2012 a 2013. Koncentraci se podařilo stanovit v 84 z 96 vzorků (88 %), procento chybějících dat tedy není v případě Cd příliš vysoké. Přesto byla ke statistickému vyhodnocení dat použita metoda „Nondetects-Data Group Comparison“, a to zejména proto, že rozložení dat neodpovídalo parametrům vyžadovaným pro dvoucestnou ANOVU.

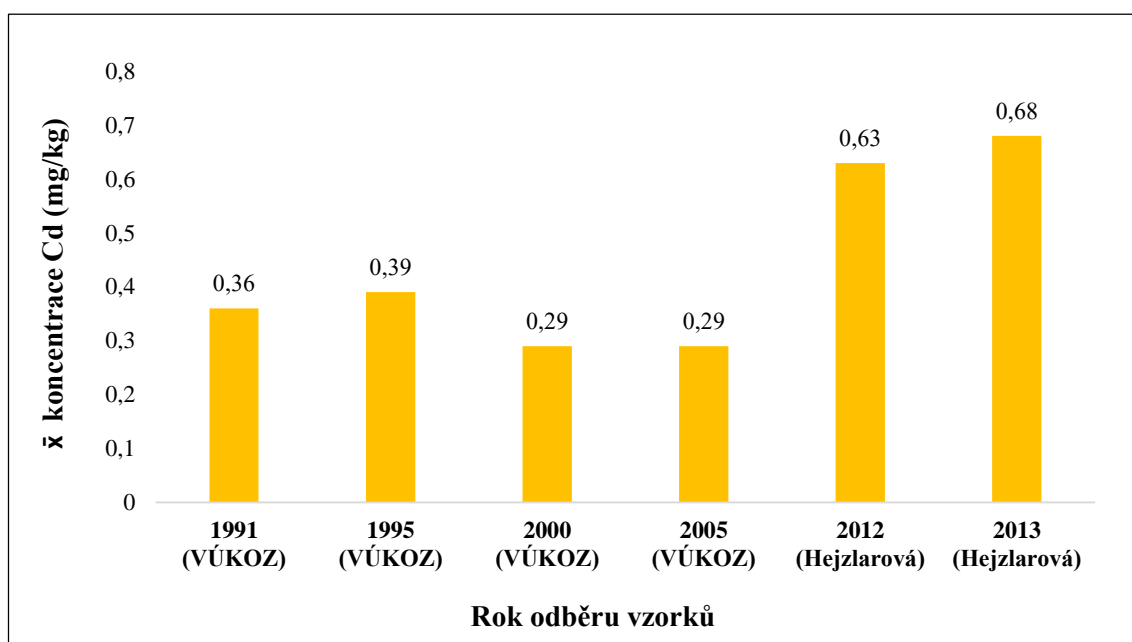
Statistická analýza potvrdila očekávaný vyšší obsah Cd ve vzorcích odebraných pod korunami stromů, což koresponduje s předpokladem, že obsah TK v mechu zvyšují podkorunové srážky, které do mechu splavují prach zachycený na okolních stromech (např. Suchara & Sucharová 2004a).

Porovnání vrchních a spodních segmentů ukázalo signifikantně vyšší obsah Cd ve starších spodních částech mechu. Tato skutečnost může poukazovat na dlouhodobou akumulaci prvku v rostlinném pletivu a malou míru jeho vymývání. Rozdíl však může být způsoben i vyššími hodnotami spadu Cd v průběhu několika let před odběrem vzorků a proměnlivostí počasí a množství srážek v jednotlivých letech.

Absolutně nejvyšší hodnota Cd byla naměřena ve spodních segmentech odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitě č. 6 – Radvanice v r. 2012 (2,60 mg/kg). Tato skutečnost plně neodpovídá závěrům statistické analýzy. Vyšší obsah Cd na světlinách mohl být na této lokalitě způsoben vyšší lokální sekundární prašností z blízkých hald bývalých uhelných dolů.

Průměrný obsah Cd naměřený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2012 a 2013 na celém sledovaném území byl 0,65 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 0,12 g/m<sup>2</sup>/rok. V porovnání s celostátním průměrem jsou naměřené průměrné koncentrace v letech 2012 i 2013 přibližně dvakrát vyšší než celorepublikový průměr z let 2000 a 2005 (Sucharová et al. 2008) a neodpovídají tak dosud zjištěnému klesajícímu trendu v

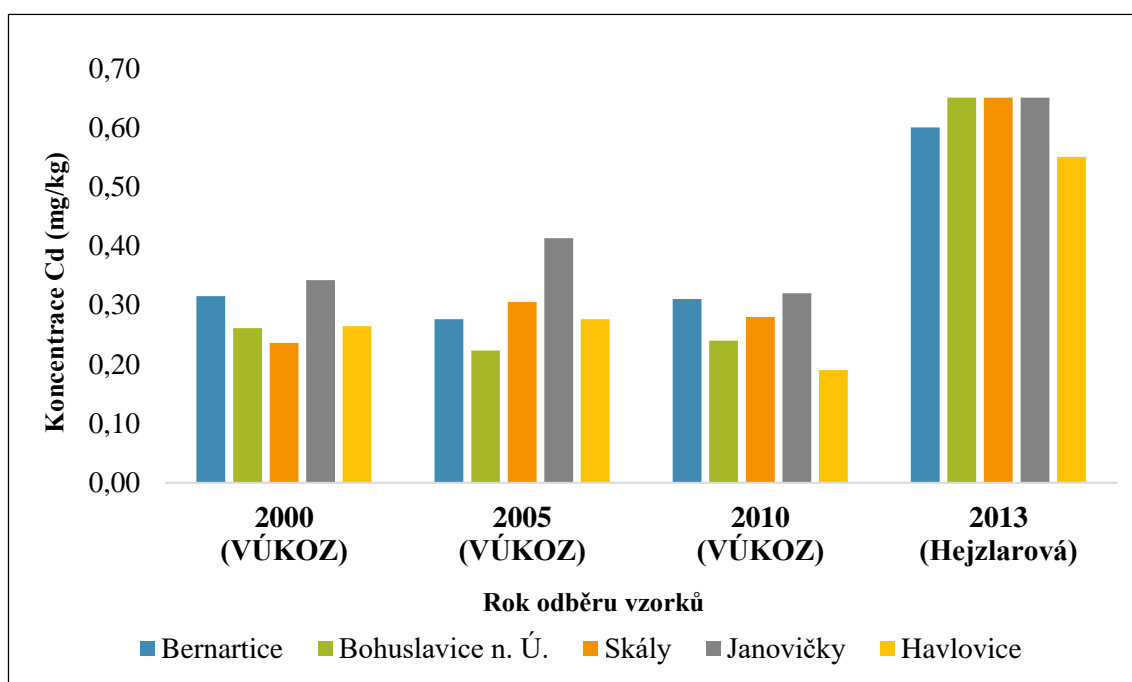
zatížení našeho území kadmíem (Obr. 15) Porovnáním výsledků spektrometrické analýzy z roku 2011 s výsledky z roku 2012 a 2013 ukázalo, že v případě nízkých koncentrací prvku má přístroj tendenci údaje spíše nadhodnocovat. Je bohužel možné se domnívat, že k téže chybě měření došlo i v případě Cd, jehož atmosférické spady jsou nejnižší ze všech šesti sledovaných prvků.



**Obr. 15: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cd s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

Nejvyšší průměrná koncentrace Cd v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 6 – Radvanice ( $\bar{x} = 0,78$  mg/kg). Tato lokalita je z hlediska TK vůbec nejzatíženější lokalitou. V oblasti kolem Radvanic v minulosti probíhala těžba černého uhlí a uranové rudy. V těsné blízkosti obce Radvanice přibližně jeden kilometr západně od odběrové lokality se nachází halda dolu Kateřina, ve které došlo koncem 70. let 19. století k samovznícení vytěženého materiálu. Hořící haldu se podařilo zasanovat až během let 1998-2005, po dobu přibližně 35 let tak bylo okolí dolu nepřetržitě kontaminováno imisemi obsahujícími široké spektrum chemických látek. Cd bylo v radvanické haldě vázáno především na sulfidy, dále pak na sulfáty a oxidy (Sejkora & Tvrđý 1999).

Nejnižší průměrná koncentrace Cd v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 1 – Žaclěř, ve vzorku z roku 2012 a 2013 se pohybovala pod mezí detekce přístroje (MD = 0,55 mg/kg). Při celostátním biomonitorovacím průzkumu byla zjištěna pozitivní korelace mezi koncentrací Cd v mechu a velikostí srážkového úhrnu na odběrové lokalitě (Sucharová et al. 2008). Příčina této závislosti je připisována intenzivnímu vymývání prachových částic obsahujících Cd z atmosféry deštěm (mokrá depozice). Dle Atlasu podnebí Česka jsou na lokalitě Žaclěř při porovnání s ostatními lokalitami odběru nejvyšší průměrné roční úhrny srážek (Tolasz et al. 2007). Podle tohoto srovnání bychom zde očekávali vyšší koncentrace Cd. Pokud však vezmeme v úvahu převládající západní proudění vzduchu, nachází se lokalita Žaclěř ve srážkovém stínu Krkonoš (Faltysová 2001). V centrální části Krkonoš jsou průměrné roční úhrny srážek přibližně o 200–400 mm vyšší než v okolí Žaclěře (Tolasz et al. 2007). Je tedy možné, že prachové částice přicházející s prouděním vzduchu ze západu a severozápadu jsou z atmosféry intenzivněji vymývány nad západní a centrální částí Krkonoš a lokalita Žaclěř je odcloněna od kontaminace částicemi přenášenými na velké vzdálenosti.



**Obr. 16: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cd s výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová), tak v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkuji panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice.

Vysoké hodnoty koncentrace Cd vykazovaly i vzorky odebrané v roce 2013 na 5 lokalitách mezinárodního biomonitorovacího programu (Obr. 16).

## 5.2 Chrom (Cr)

Obsah Cr byl rovněž sledován jen ve vzorcích z let 2012 a 2013. Koncentraci se podařilo stanovit pouze ve 41 z 96 vzorků (43 %). Vzhledem k příliš velkému podílu chybějících hodnot nemohla být tato data podrobena statistické analýze.

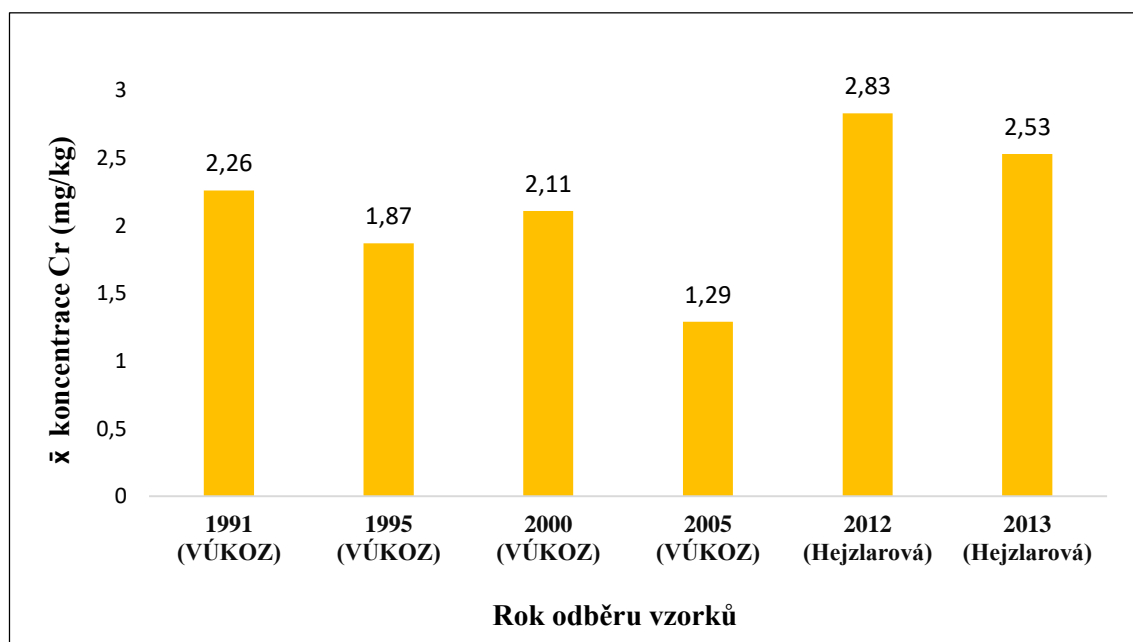
Průměry naměřeného množství Cr na celém sledovaném území vypočítané zvlášť pro jednotlivé sezóny odběru a typ vzorku se v případě vzorků odebraných pod korunami stromů pohybovaly v rozpětí hodnot 2,18-3,60 mg/kg a v případě vzorků odebraných mimo zastíněné plochy v rozpětí hodnot 2,53-3,65 mg/kg. Při porovnání „les – neles“ tedy nebyl patrný žádný trend.

V případě horních segmentů se tyto průměry pohybovaly v rozpětí hodnot 2,18-2,88 mg/kg a v případě spodních segmentů v rozpětí hodnot 2,52-3,65 mg/kg. Při porovnání „vršek – spodek“ tak lze pozorovat trend směřující k vyšší koncentraci Cr ve starších segmentech mechu. Toto zjištění koresponduje s předpokladem dlouhodobé akumulace kovu v rostlinném pletivu.

Absolutně nejvyšší hodnota Cr byla naměřena ve spodních segmentech odebraných mimo zástin korun stromů na lokalitě č. 2 – Zdoňov v r. 2012 (5,20 mg/kg). Vyšší koncentrace Cr naměřená ve vzorcích odebraných mimo zástin korun stromů může souviset s větší sekundární prašností na otevřených plochách, podobně jako v případě Cd.

Průměrný obsah Cr naměřený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2012 a 2013 na celém sledovaném území byl 2,68 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 0,58 g/m<sup>2</sup>/rok. V porovnání s celostátním průměrem jsou naměřené průměrné koncentrace v letech 2012 i 2013 přibližně dvakrát vyšší než celorepublikový průměr z r. 2005 (Sucharová et

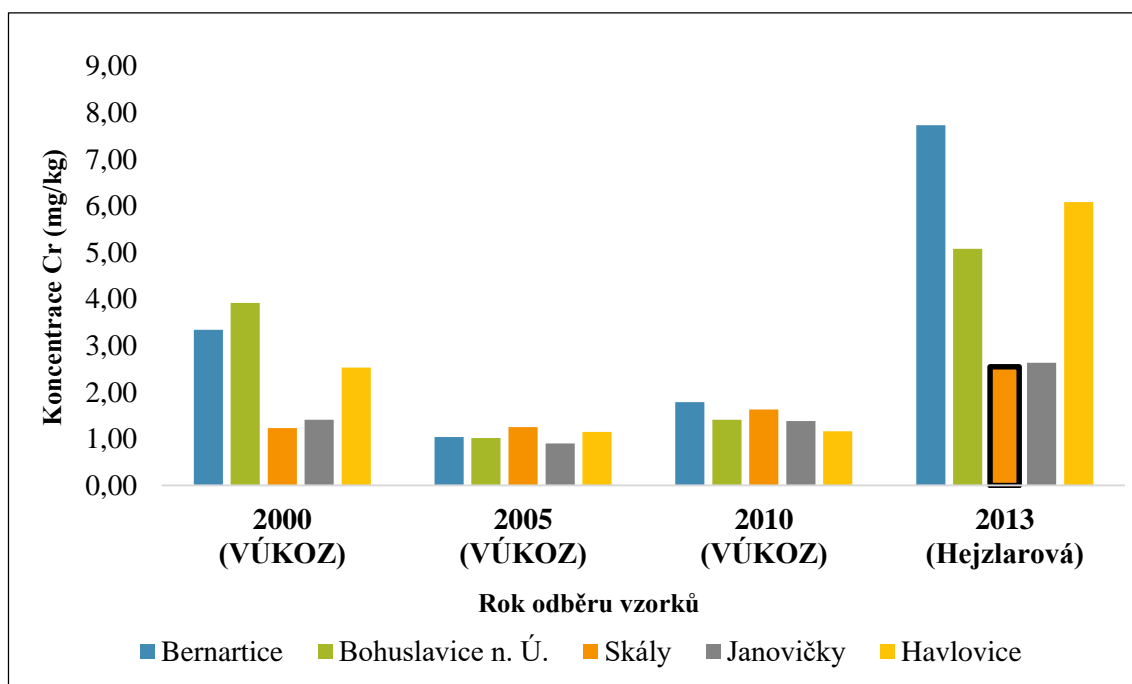
al. 2008) a neodpovídají tak dosud zjištěnému klesajícímu trendu v zatížení našeho území chromem (Obr. 17). Spíše než zvýšení koncentrace chromu v atmosféře se jako vysvětlení nabízí mírné nadhodnocení výsledků měření použitým spektrometrem a také velké množství chybějících dat.



**Obr. 17: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cr s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

Nejvyšší průměrná koncentrace Cr zjištěná v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 2 – Zdoňov ( $\bar{x} = 3,48$  mg/kg). Nejnižší průměrná koncentrace Cd zjištěná v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 10 – Trubějov ( $\bar{x} = 1,97$  mg/kg). Všechny tyto údaje jsou ale silně zatíženy chybějícími daty, která byla pro výpočet aritmetického průměru nahrazena hodnotou meze detekce Cr (MD = 2,55 mg/kg). Vypočítané aritmetické průměry jsou tedy s velkou pravděpodobností značně nadhodnoceny.

Ve vzorcích z pěti lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu odebraných v roce 2013 byly zjištěny velmi rozdílné koncentrace Cr (Obr. 18). Dlouhodobému klesajícímu trendu zatížení území severovýchodních Čech niklem se blížila pouze lokalita Skály, kde byla naměřena koncentrace Cr pod mezí detekce přístroje.



**Obr. 18: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cr s výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová) i v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkují panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice; černé ohraničení sloupce označuje, že byla naměřena hodnota pod mezí detekce přístroje, výška sloupce v tomto případě udává hodnotu meze detekce ( $MD_{Cr} = 2,55 \text{ mg/kg}$ ).

### 5.3 Měď (Cu)

Obsah Cu byl analyzován ve vzorcích ze všech tří sezón odběru. Koncentraci se podařilo stanovit ve 138 ze 144 vzorků (96 %). Ke statistickému zpracování dat proto mohla být použita dvoucestná a třicestná ANOVA.

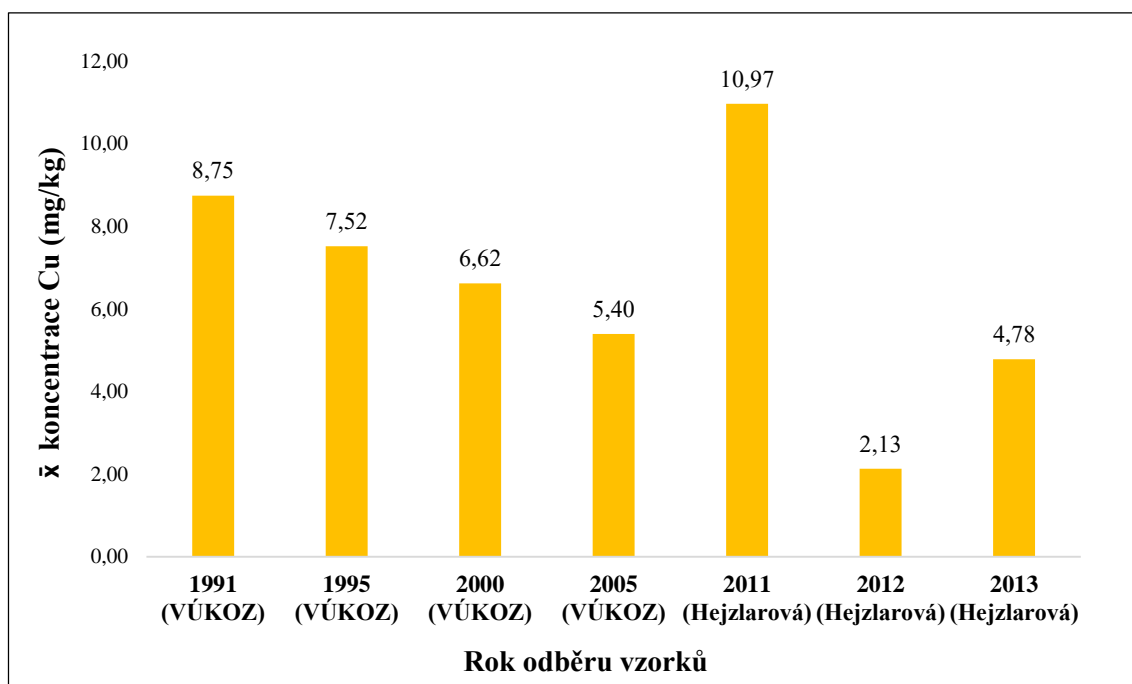
Vyhodnocení dat z roku 2011 neukázalo žádné signifikantní rozdíly mezi testovanými proměnnými. V případě porovnání koncentrací v horních a spodních segmentech mechu byl ale rozdíl téměř signifikantní a poukazoval na vyšší koncentraci Cu v horních segmentech, což koresponduje se závěry statistického testování výsledků ze sezón 2012 a 2013 (viz dále).

Společné statistické vyhodnocení výsledků z let 2012 a 2013 ukázalo signifikantně vyšší koncentraci Cu ve vzorcích odebraných pod korunami stromů. Tento

závěr odpovídá předpokladu, že podkorunové srážky významně zvyšují koncentraci TK v mechu. Zároveň však bylo zjištěno, že vrchní segmenty mechu obsahují výrazně více Cu než segmenty spodní. Podařilo se tedy zamítnout nulovou hypotézu, alternativní hypotéza H1 byla ale také vyvrácena, jelikož předpokládala opačný poměr. Vyšší obsah Cu v horních segmentech mechu může poukazovat na kratší dobu akumulace prvku v rostlinném pletivu a větší míru jeho vymývání, než v případě ostatních zjišťovaných kovů. Rozdíl však může být způsoben i rozdílnými hodnotami spadu Cd v jednotlivých letech, proměnlivostí počasí a množství srážek.

Absolutně nejvyšší hodnota Cu byla naměřena v horních segmentech odebraných mimo zástín korun stromů na lokalitě č. 6 – Radvanice v r. 2012 (49,20 mg/kg). Tato skutečnost z hlediska odběrového místa plně neodpovídá závěrům statistické analýzy. Vyšší obsah Cu na světlinách mohl být na této lokalitě způsoben vyšší lokální sekundární prašností z blízkých hald bývalých uhelných dolů (viz dále). Naměřená hodnota je v tomto případě ale diskutabilní, protože na dané lokalitě nebyly v dalších sezónách zjištěny takto extrémní koncentrace Cu.

Průměrný obsah Cu naměřený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2011-2013 na celém sledovaném území byl 5,96 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 1,69 g/m<sup>2</sup>/rok. V porovnání s celostátním průměrem je naměřená průměrná koncentrace z r. 2011 přibližně dvakrát vyšší než celorepublikový průměr z r. 2005 (Sucharová et al. 2008). Hodnotu průměru z r. 2011 však významně zvyšuje nejvyšší naměřená koncentrace na lokalitě Radvanice. Pokud bychom tuto hodnotu odstranili jako ulétlou, byla by průměrná koncentrace mědi na zbývajícím území v r. 2011 6,87 mg/kg, což už se blíží celostátnímu průměru z r. 2005 (5,40 mg/kg) (ibid.). Naměřené průměrné koncentrace r. 2012 a 2013 přibližně odpovídaly dlouhodobému klesajícímu trendu v zatížení atmosféry v ČR mědí (Obr. 19).



**Obr. 19: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Cu s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

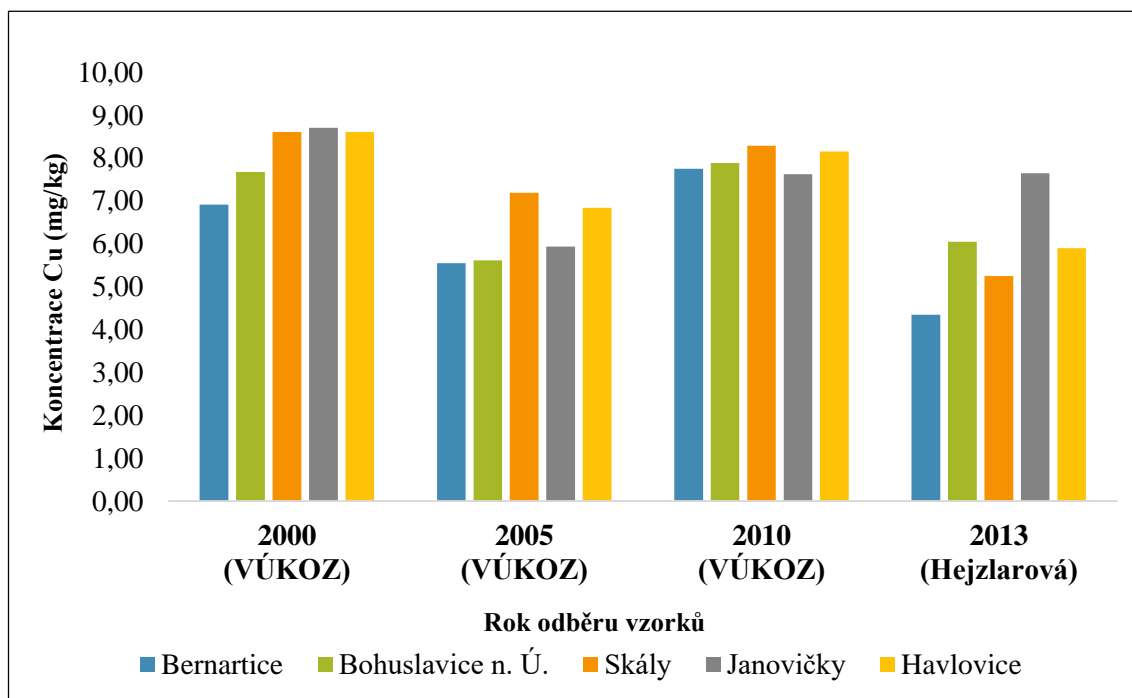
Nejvyšší průměrná koncentrace Cu stanovená v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 6 – Radvanice ( $\bar{x} = 19,57$  mg/kg). Zvýšená koncentrace mědi souvisí s haldou radvanického dolu Kateřina (viz kapitola 5.1) stejně jako zjištěné vysoké hodnoty koncentrací Cd, Pb a Zn. V době, kdy zde byla těžena uranová ruda, se na haldou odvážela hlušina obsahující velký podíl uhlí. V uhelných ložiscích v okolí Trutnova je uváděn zvýšený obsah Cu, Pb a Zn (Bernard 1981). Okolí haldy, která téměř 35 let hořela, je stále ještě kontaminováno pestrou škálou chemických látek, které se do mechu dostávají prostřednictvím sekundární prašnosti. V blízkosti lokality Radvanice se kromě černého uhlí a uranu těžila také měď. Přibližně 2 km jižně od odběrové lokality se u obce Jívka nachází dnes již vytěžený měděný důl Bohumír a v jeho těsné blízkosti odkaliště představující specifický biotop s malou mírou pokrytí vegetací. Odtud se do okolí může šířit prach obsahující velké množství mědi.

Nejnižší průměrná koncentrace Cu stanovená v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 1 – Žaclěř ( $\bar{x} = 1,10$  mg/kg). Minimum i maximum Cu bylo tedy zjištěno na stejných lokalitách jako v případě Cd a Pb a pravděpodobně souvisí



s vymýváním prachových částic z atmosféry nad západní částí Krkonoš (viz kapitola 5.1).

Koncentrace Cu zjištěné ve vzorcích odebraných v roce 2013 na 5 lokalitách mezinárodního biomonitorovacího programu odpovídají dlouhodobému mírně klesajícímu trendu zatížení území severovýchodních Čech mědí (Obr. 20).



**Obr. 20: Porovnání nově zjištěných koncentrací Cu s výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová), tak v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkuji panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice.

## 5.4 Nikl (Ni)

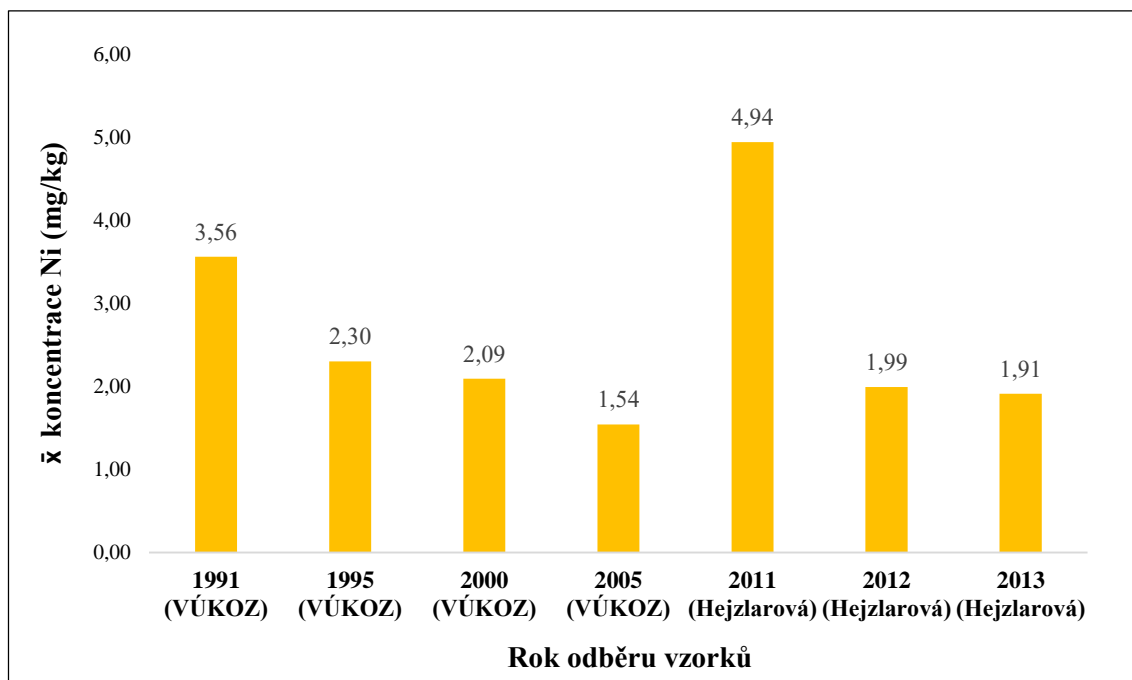
Obsah Ni byl měřen ve vzorcích ze všech tří sezón odběru. Koncentraci se ale podařilo stanovit pouze v 67 ze 144 odebraných vzorků (47 %). Vzhledem k příliš velkému počtu chybějících dat nemohly být výsledky použity ke statistickému testování formulovaných hypotéz.

Aritmetické průměry naměřeného množství Ni na celém sledovaném území vypočítané zvlášť pro jednotlivé sezóny odběru a typ vzorku se v případě vzorků odebraných pod korunami stromů pohybovaly v rozpětí hodnot 2,01-6,75 mg/kg a v případě vzorků odebraných mimo zastíněné plochy v rozpětí hodnot 1,91-5,24 mg/kg. Při porovnání „les – neles“ je tedy patrný trend vyšší koncentrace Ni pod korunami stromů, což odpovídá hypotéze předpokládající, že podkorunové srážky zvyšují obsah těžkých kovů v mechu.

V případě horních segmentů se tyto průměry pohybovaly v rozpětí hodnot 1,91-4,94 mg/kg a v případě spodních segmentů v rozpětí hodnot 2,23-6,75 mg/kg. Při porovnání „vršek – spodek“ lze tedy pozorovat trend vyšší koncentrace Ni ve starších spodních segmentech mechu, což je v souladu s předpokladem dlouhodobé akumulace kovu v rostlinném pletivu. Samotná tato skutečnost, ale není důkazem dlouhodobé akumulace, protože na koncentraci prvku v mechu má vliv mnoho faktorů, zejména pak rozdílné hodnoty spadu a proměnlivost počasí v jednotlivých letech.

Absolutně nejvyšší hodnota Ni byla naměřena ve spodních segmentech odebraných pod korunami stromů na lokalitě č. 11 – Dobrošov v r. 2011 (8,90 mg/kg), což je v souladu s výše popsány zjištěnými trendy. Zatížení lokality Dobrošov niklem je s největší pravděpodobností způsobeno emisemi z Teplárny Náchod. Například v roce 2013 pocházelo 63,4 % emisí Ni ze sektoru veřejné energetika a výroby tepla (ČHMÚ 2013).

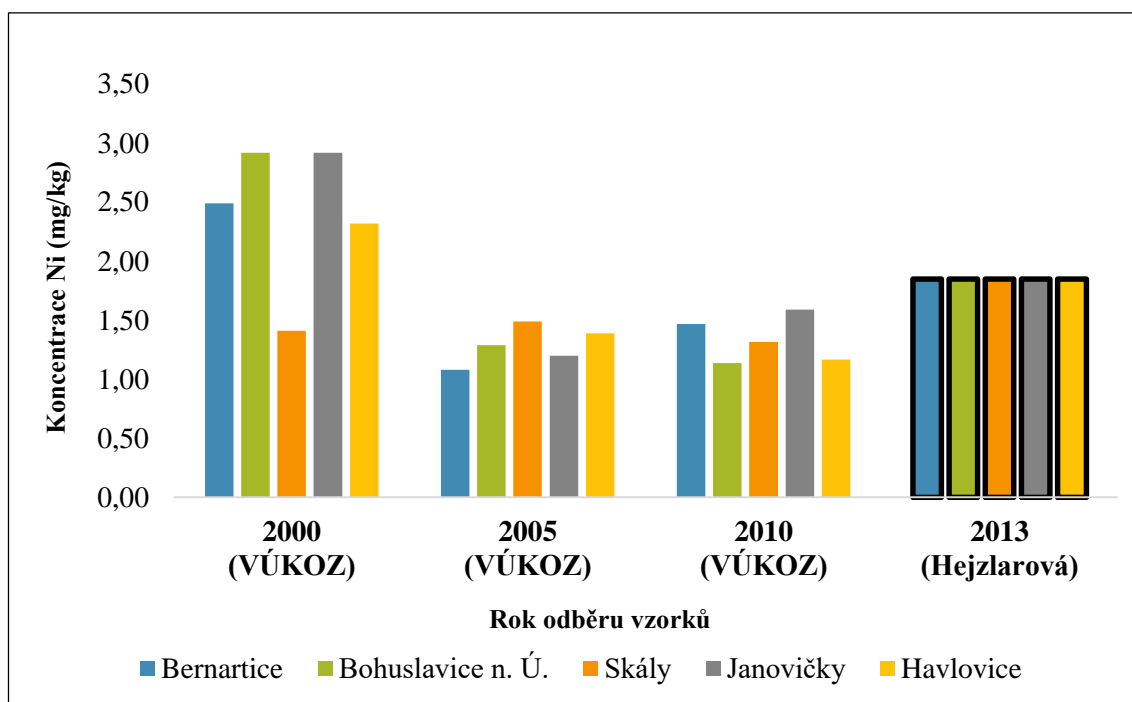
Průměrný obsah Ni naměřený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2011-2013 na celém sledovaném území byl 2,95 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 0,83 g/m<sup>2</sup>/rok. V porovnání s celostátním průměrem je naměřená průměrná koncentrace z r. 2011 více než třikrát vyšší než celorepublikový průměr z r. 2005 (Sucharová et al. 2008). Hodnotu průměru z r. 2011 však významně zvyšují měření z roku 2011, která jsou pravděpodobně nadhodnocená použitým spektrometrem. Naměřené průměrné koncentrace r. 2012 a 2013 přibližně odpovídají dlouhodobému mírně klesajícímu trendu v zatížení atmosféry v ČR niklem, z krátkodobějšího hlediska však vykazují mírný nárůst a stagnaci (Obr. 21).



**Obr. 21: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Ni s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

Nejvyšší průměrná koncentrace Ni v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna rovněž na lokalitě č. 11 – Dobrošov ( $\bar{x} = 3,48$  mg/kg). Nejnižší průměrná koncentrace Ni v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 5 – Trutnov a na lokalitě č. 8 Božanov ( $\bar{x} = 2,47$  mg/kg). Všechny průměry jsou ale stejně jako v případě Cr silně zatíženy chybějícími daty.

Ve vzorcích z pěti lokalit mezinárodního biomonitorovacího průzkumu odebraných v roce 2013 se koncentrace Ni nepodařilo stanovit. Všechny naměřené hodnoty byly pod mezí detekce přístroje, což je však v souladu s dlouhodobým klesajícím trendem zatížení území severovýchodních Čech niklem (Obr. 22).



**Obr. 22: Porovnání nově zjištěných koncentrací Nis výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová), tak v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkuji panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice; černé ohraničení sloupce označuje, že byla naměřena hodnota pod mezí detekce přístroje, výška sloupce v tomto případě udává hodnotu meze detekce ( $MD_{Ni} = 1,85 \text{ mg/kg}$ ).

## 5.5 Olovo (Pb)

Obsah Pb byl zjišťován ve vzorcích ze všech tří odběrových sezón. Koncentraci se podařilo stanovit ve 113 ze 144 vzorků (78 %). Vzhledem ke značnému množství chybějících dat byla ke statistickému vyhodnocení použita metoda „Nondetects-Data Group Comparison“, stejně jako v případě Cd.

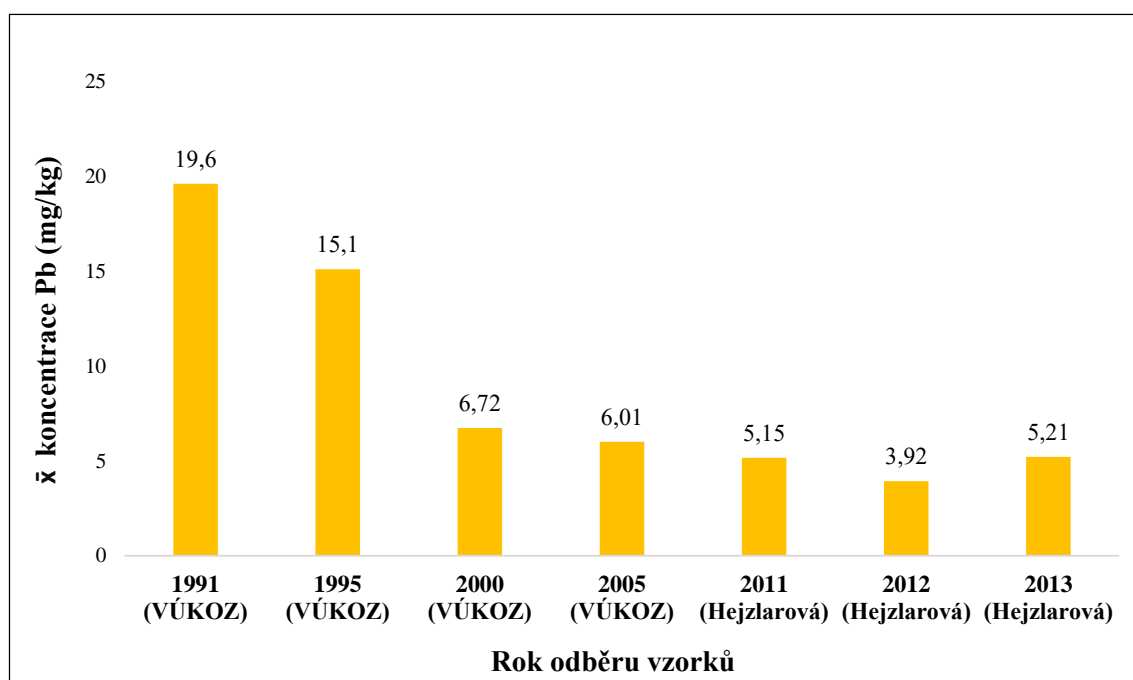
Vyhodnocení dat z roku 2011 ukázalo signifikantní rozdíl pouze mezi mladšími a staršími segmenty mechu, vyšší koncentrace Pb byla naměřena v horních segmentech, což koresponduje se závěry statistického testování výsledků ze sezón 2012 a 2013 (viz dále).

Společné statistické zpracování výsledků z let 2012 a 2013 ukázalo signifikantně vyšší koncentraci Pb ve vzorcích odebraných pod korunami stromů, což odpovídá

předpokladu, že podkorunové srážky významně zvyšují koncentraci sledovaných prvků v mechu. Zároveň byla zjištěna signifikantně vyšší koncentrace Pb ve starších spodních segmentech mechu poukazující na možnou dlouhodobou akumulaci tohoto prvku v rostlinném pletivu.

Absolutně nejvyšší hodnota Pb byla naměřena ve spodních segmentech odebraných pod korunami stromů na lokalitě č. 4 – Janovičky v r. 2012 (2,60 mg/kg). Toto zjištění koresponduje s výše uvedenými závěry statistického testování formulovaných hypotéz.

Průměrný obsah Pb naměřený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2011-2013 na celém sledovaném území byl 4,76 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 0,62 g/m<sup>2</sup>/rok. Naměřené průměrné koncentrace z let 2011, 2012 a 2013 jsou v souladu s dlouhodobý klesajícím trendem v zatížení atmosféry v ČR olovem (Obr. 23).

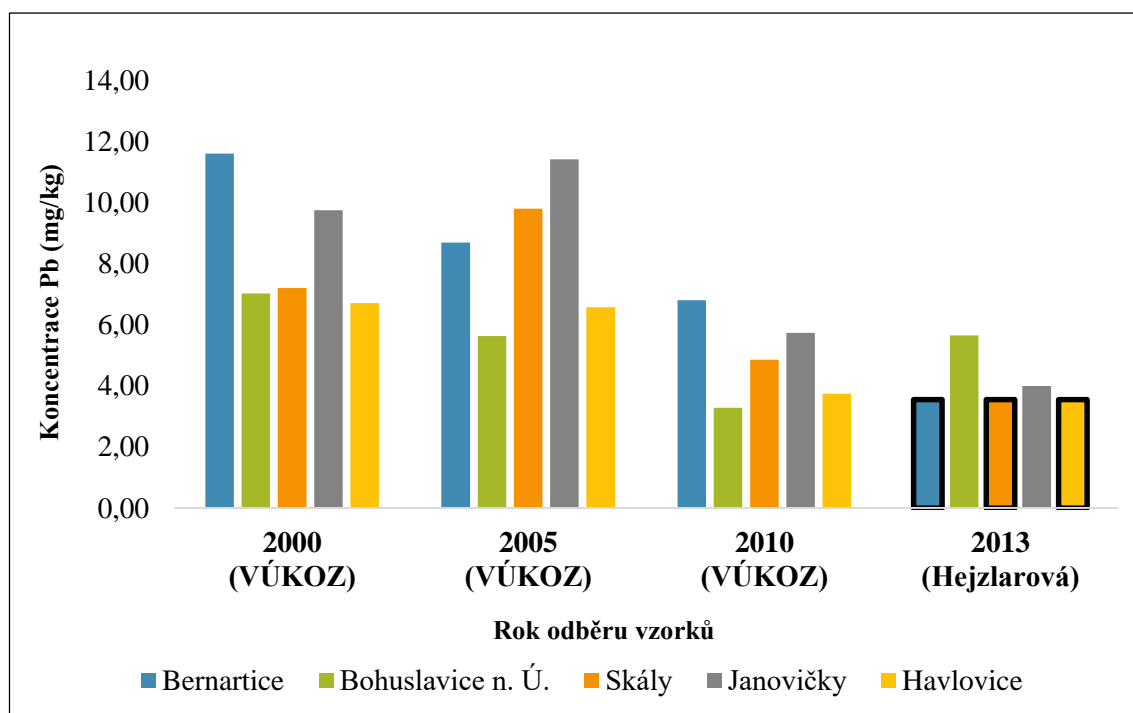


**Obr. 23: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Pb s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

Nejvyšší průměrná koncentrace Pb v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 6 – Radvanice ( $\bar{x} = 7,60$  mg/kg). Přítomnost olova byla v minulosti také zjištěna na výše zmíněné radvanické haldě dolu Kateřina. V období, kdy halda hořela, se zde olovo vyskytovalo ve formě sulfidů i ryzí (v kapalném i pevném skupenství), dále pak ve formě sulfátů a oxidů (Sejkora & Tvrđý 1999).

Nejnižší průměrná koncentrace Pb v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 1 – Žaclěř ( $\bar{x} = 3,33$  mg/kg). Příčinou nízkých koncentrací zde může být vymývání prachových částic obsahujících olovo již nad západní a centrální části Krkonoš stejně jako v případě Cd (viz kapitola 5.1).

Koncentrace Pb naměřené ve vzorcích odebraných v roce 2013 na 5 lokalitách mezinárodního biomonitorovacího programu jsou v souladu s dlouhodobým klesajícím trendem zatížení území severovýchodních Čech olovem (Obr. 24).



**Obr. 24: Porovnání nově zjištěných koncentrací Pb s výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová), tak v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkuji panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice; černé ohraničení sloupce označuje, že byla naměřena hodnota pod mezí detekce přístroje, výška sloupce v tomto případě udává hodnotu meze detekce ( $MD_{Pb} = 2,55$  mg/kg).

## 5.6 Zinek (Zn)

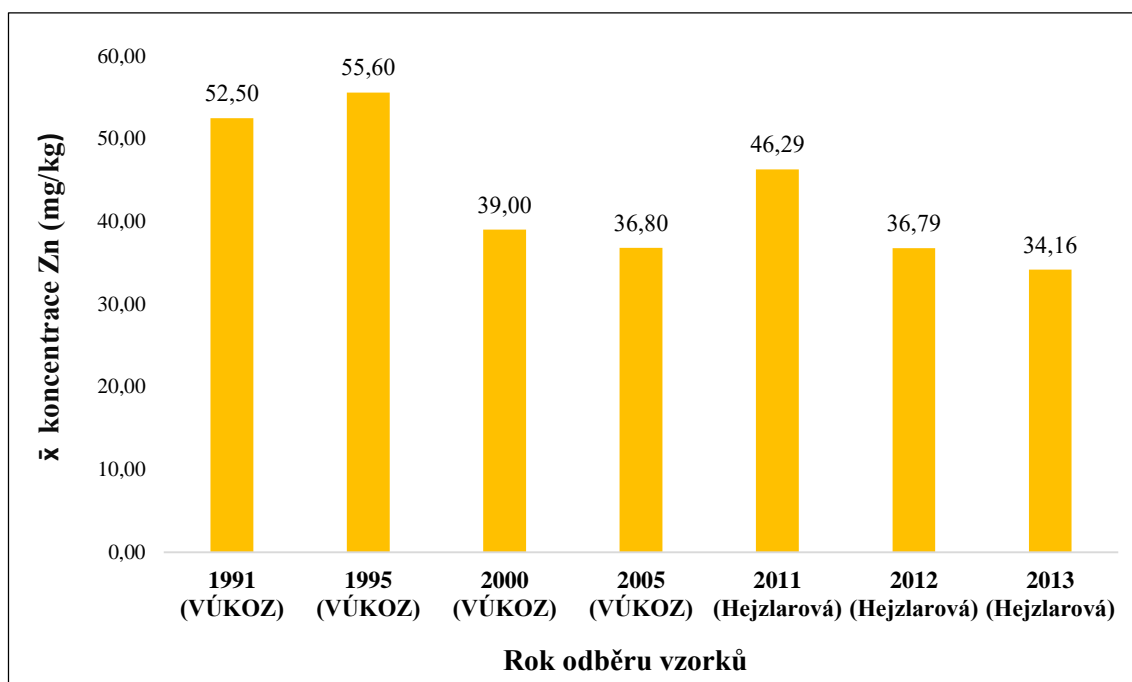
Obsah Zn byl analyzován ve vzorcích ze všech tří sezón. Koncentraci se podařilo stanovit ve všech 144 vzorcích. Ke statistickému vyhodnocení proto mohla být použita dvoucestná ANOVA. Kromě rozdílu „vršek – spodek“ v sezóně 2011 se však nepodařilo odhalit žádný další signifikantní rozdíl v porovnávaných souborech. Vzhledem velkému množství získaných dat lze předpokládat, že závěry statistického testování dobře popisují skutečnost.

Vyhodnocení dat z roku 2011 ukázalo signifikantně vyšší koncentraci Zn ve spodních segmentech mechu, což by odpovídalo předpokladu dlouhodobé akumulace prvku v rostlinném pletivu. Ve vzorcích z let 2012 a 2013 však nebyl tento závěr potvrzen. Testování ukázalo, že není statisticky významný rozdíl v koncentraci Zn mezi mladšími a staršími segmenty mechu.

Koncentrace Zn ve vzorcích odebraných pod korunami stromů a na světlinách se signifikantně nelišila ani v jednom z testovaných období, což lze interpretovat tak, že podkorunové srážky pravděpodobně nemají na obsah Zn v mechu významný vliv.

Absolutně nejvyšší hodnota Zn byla naměřena ve spodních segmentech odebraných pod korunami stromů na lokalitě č. 5 – Trutnov v r. 2011 (91,80 mg/kg). Toto zjištění koresponduje se závěrem statistického testování („vršek – spodek“) a s obecně zjištěným trendem („les – neles“).

Průměrný obsah Zn stanovený v horních segmentech mechu odebraných mimo okapovou zónu korun stromů v letech 2011-2013 na celém sledovaném území byl 39,08 mg/kg, což představuje absolutní atmosférickou depozici přibližně 5,98 g/m<sup>2</sup>/rok. Průměrné koncentrace z let 2011, 2012 a 2013 jsou přibližně v souladu s dlouhodobě klesajícím a v posledních letech spíše stagnujícím trendem v zatížení atmosféry v ČR zinkem (Obr. 25).



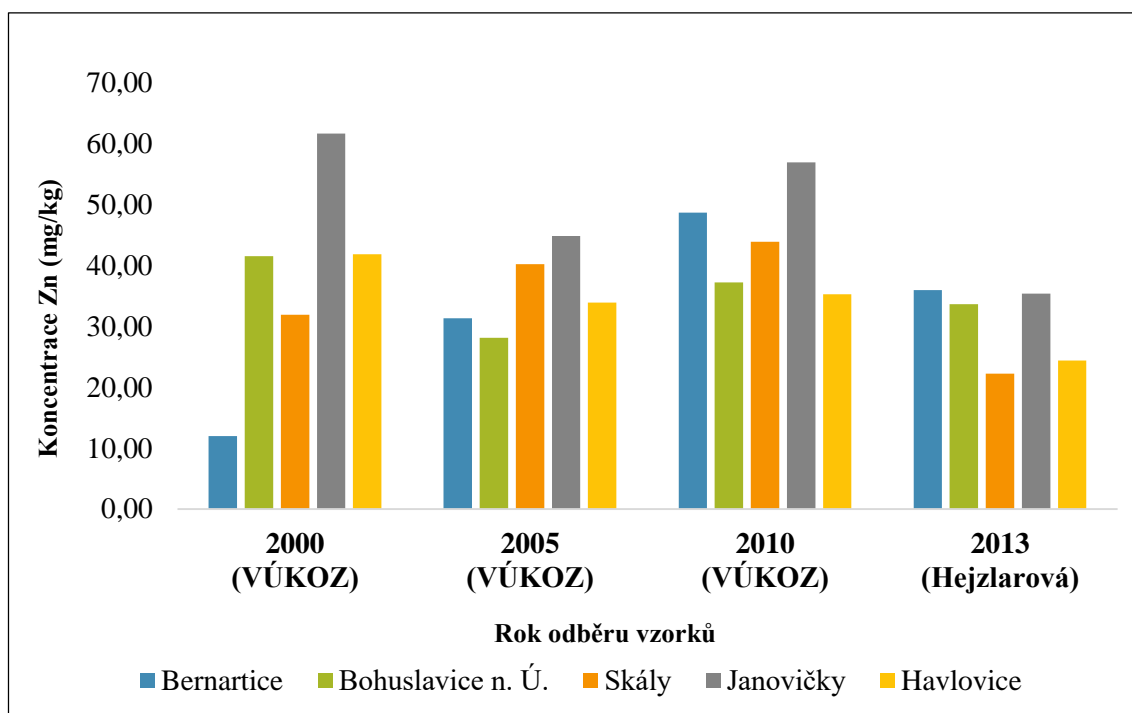
**Obr. 25: Porovnání nově zjištěných průměrných koncentrací Zn s výsledky celostátního průzkumu;** uvedeny jsou aritmetické průměry koncentrací naměřených ve vzorcích „neles-vršky“, v případě vlastních dat (Hejzlarová) se jedná o průměry pro studované území, v případě celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny celorepublikové průměry (Sucharová et al. 2008).

Nejvyšší průměrná koncentrace Zn v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 10 – Trubějov ( $\bar{x} = 58,35$  mg/kg). Lokalita Trubějov se nachází přibližně 3,5 km JV od galvanizovny GALČEK spol. s.r.o., Červený Kostelec, kde se provádí mimo jiné galvanické zinkování. Tento závod je nejpravděpodobnějším zdrojem vyššího spadu Zn.

Nejnižší průměrná koncentrace Zn v rámci vzorků „neles-vršek“ byla zjištěna na lokalitě č. 9 – Kocbeře ( $\bar{x} = 28,65$  mg/kg).

Koncentrace zjištěné na území severovýchodních Čech v rámci předchozích etap mezinárodního biomonitorovacího průzkumu se na jednotlivých lokalitách výrazně liší a pro celé sledované území vykazují přibližně stagnující trend. Koncentrace Zn naměřené ve vzorcích odebraných na těchto lokalitách v roce 2013 tak více než s trendem zjištěným na sledovaném území korespondují s dlouhodobým klesajícím trendem v zatížení celého území ČR zinkem. (Obr. 26).





**Obr. 26: Porovnání nově zjištěných koncentrací Zn s výsledky celostátního průzkumu;** v případě vlastních dat (Hejzlarová), tak v případě dat z celostátního průzkumu (VÚKOZ) jsou uvedeny hodnoty koncentrací naměřených na jednotlivých lokalitách ve vzorcích „neles-vršky“, lokality jsou barevně odlišeny; údaje převzaty z českých národních zpráv (Sucharová & Suchara 2004a, Sucharová et al. 2008), data z r. 2010 dosud nebyla publikována – za laskavé poskytnutí děkuji panu doc. RNDr. Ivanu Sucharovi, CSc. z Výzkumného ústavu Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice.

## 6. Závěr

Hlavním cílem mojí práce bylo získat podrobné údaje o aktuálním znečištění atmosféry na území severovýchodních Čech vybranými těžkými kovy (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) pomocí spektrometrické analýzy odebraných vzorků mechu a zároveň zjistit, jak jsou obsahy jednotlivých prvků v mechu ovlivněny podkorunovými srážkami a stářím odebraných segmentů rostlin. Tomuto zadání jsem přizpůsobila metodiku odběru a zpracování vzorků.

Vycházela jsem z metodiky používané při mezinárodním biomonitorovacím průzkumu prováděném v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace. Za účelem získání většího množství dat ze studovaného území jsem zvolila hustší síť lokalit. Oficiální metodika ukládá odběr vzorků z míst, která se nachází mimo okapovou zónu korun stromů a pracuje pouze s mladšími zelenými segmenty mechu. Aby bylo možné zodpovědět otázku vlivu podkorunových srážek a otázku vlivu stáří odebraných částí rostlin, odebírala jsem na každé lokalitě vzorky jak na světlínách, tak pod korunami stromů a analyzovala jsem mladší zelené i starší hnědé segmenty mechu.

Pro účely výše uvedených dílčích cílů práce jsem během tří sezón (2011, 2012, 2013) shromáždila 144 vzorků mechu z 12 lokalit. Úspěšnost stanovení koncentrace spektrometrickou analýzou se u jednotlivých prvků lišila. Obsah Cd se podařilo stanovit v 89 % vzorků, obsah Cr ve 43 % vzorků, obsah Cu v 96 % vzorků, obsah Ni ve 47 % vzorků, obsah Pb v 78 % vzorků a obsah Zn ve 100 % vzorků. Zejména koncentrace Cr a Ni se ve velkém množství vzorků pohybovaly pod mezí detekce přístroje, výsledky zjištěné pro tyto dva prvky proto nemohly být podrobeny statistickému zpracování. Naměřené koncentrace Cu, Ni, Pb a Zn v horních segmentech mechu odebraných mimo zástin korun stromů byly ve většině případů v souladu s dlouhodobými klesajícími trendy zatížení ovzduší těmito látkami na území celé ČR zjištěnými v rámci mezinárodního biomonitorovacího programu. Zjištěné koncentrace Cd a Cr byly přibližně dvakrát vyšší než celorepublikový průměr, což však bylo s velkou pravděpodobností způsobeno chybou měření spektrometru, který v případě velmi nízkých koncentrací výsledky nadhodnocoval.

Díky odběru vzorků z relativně husté sítě lokalit bylo možné pozorovat vliv lokálních zdrojů znečištění. Nejvýraznější byl tento jev na lokalitě č. 6 – Radvanice, kde byly zjištěny nejvyšší průměrné koncentrace Cd, Cu a Pb z celého sledovaného území a i průměrné koncentrace Cr a Zn byly vyšší než na mnoha dalších lokalitách. V Radvanicích se nachází bývalý černouhelný důl Kateřina, na jehož odvalu došlo V 70. letech 20. století k samovznícení vytěženého materiálu. Přestože sanační práce zde byly úspěšně dokončeny v roce 2005, ze zjištěných údajů je patrné, že okolí Radvanic je dosud kontaminováno látkami, které se z hořící haldy po 35 let uvolňovaly do ovzduší.

U tří sledovaných prvků (Cd, Cu, Pb) se podařilo potvrdit předpoklad, že podkorunové srážky významně zvyšují jejich obsah v mechu. U zjištěných koncentrací Ni bylo možné pozorovat trend vyššího obsahu tohoto prvku ve vzorcích odebraných pod korunami stromů. Koncentrace Zn se ve vzorcích odebraných v okapové zóně stromů a na světlinách nelišily. Z těchto výsledků vyplývá, že vliv podkorunových srážek je u většiny testovaných prvků významný a při odběru vzorků je nutné striktně dodržovat pravidlo vyžadující odběr pouze na místech mimo okapovou zónu korun stromů.

Na základě získaných dat byly také zjištěny významné rozdíly v koncentraci Cd, Cu, Pb a Zn v mladších a starších segmentech mechu. Koncentrace Cd, Pb a Zn byly vyšší ve starších segmentech a tento trend vykazovaly i koncentrace Cr a Ni. Naopak tomu bylo v případě Cu, jejíž koncentrace byla vyšší v mladších segmentech mechu. Otázku příčiny tohoto jevu nelze na základě zjištěných údajů zodpovědět, vyšší obsah Cu v mladších částech rostlin však může znamenat, že je kov z rostlinných pletiv postupně vymýván. Toto zajímavé zjištění by bylo vhodné prověřit v dlouhodobějším výzkumu, který by lépe zohledňoval vliv dalších spolupůsobících faktorů, zejména množství atmosférických srážek.

Abych mohla nově získané výsledky porovnat nejen s celorepublikovými průměry ale i s konkrétními v minulosti naměřenými hodnotami, odebrala jsem v roce 2013 vzorky mechu také z 5 lokalit používaných pro mezinárodní biomonitorovací průzkum. Nově naměřené koncentrace Cu, Ni, Pb a Zn byly ve většině případů v souladu s dlouhodobými trendy koncentrací těchto prvků na studovaném území a zároveň s

dlouhodobě klesajícími trendy těchto látek na území celého státu. Zjištěné koncentrace Cd a Cr byly pravděpodobně zkresleny chybou měření přístroje stejně jako ve vzorcích z ostatních lokalit.

Mezinárodní biomonitorovací průzkum prováděný v rámci programu OSN EHK ICP Vegetace je uskutečňován každých 5 let na území téměř celé Evropské unie. Aby výsledky měření co nejlépe odpovídaly realitě, je důležité dobře rozumět mechanismům akumulace jednotlivých prvků v mechu a vlivu faktorů, které ji ovlivňují. Do mozaiky již zjištěných informací tato práce přispívá zejména potvrzením významnosti vlivu podkorunových srážek na obsah látek v mechu.

## 8 Citované zdroje

[ČHMÚ] Český hydrometeorologický ústav (2009–2015): Znečištění ovzduší na území České republiky (série ročenek)

[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc_CZ.html)

Aboal J.R., Jiménez M.S., Morales D. & Hernández J.M. (2002): Net below canopy fluxes in Canarian Laurel Forest canopies. – *Journal of Hydrology*, 264: 201–212.

Anděl P. (2011): *Ekotoxikologie, bioindikace a biomonitoring*. – Evernia, Liberec, 265 p.

Bencko V., Cikrt M. & Lener J. (1955): *Toxické kovy v životním a pracovním prostředí člověka*. – Grada Publishing, Praha, 288 p.

Bernard J. H. (1981): *Mineralogie Československa*. – Academia, Praha, 648 p.

Boquete M.T. (2015): A critical evaluation of the use of the moss technique to monitor air pollution. (Doctoral Thesis), University of Santiago de Compostela, pp. 254–260 (Chapter 7). *In*: Fernández J.A., Boquete M.T., Carballeira A. & Aboal J.R. (2015): A critical review of protocols for moss biomonitoring of atmospheric deposition: Sampling and sample preparation. – *Science of the Total Environment*, 517: 132–150.

Calder I. (1995): *Olovo a zdraví*. – Státní zdravotní ústav Praha, 20 p.

Cibulka J., Domažlická E., Kozák J., Kubizňáková J., Mader P., Machálek E., Maňková B., Musil J, Pařízek J., Píša J., Pohunková H., Reisnerová H. & Svobodová Z. (1991): *Pohyb olova, kadmia a rtuti v biosféře*. – Academia, Praha, 427 p.

Faltysová H., Mackovčín P., Sedláček M. a kol. (2002): *Královéhradecko*. *In*: Mackovčín P. & Sedláček M. (eds.): *Chráněná území ČR, svazek V., Agentura ochrany přírody a krajiny a EkoCentrum Brno*, Praha, 410 p.

Fernández J.A., Aboal J.R., Real C. & Carballeira A. (2007): A new moss biomonitoring method for detecting sources of small scale pollution. – *Atmos. Environ.*, 41: 357–371.

Fernández J.A., Boquete M.T., Carballeira A. & Aboal J.R. (2015): A critical review of protocols for moss biomonitoring of atmospheric deposition: Sampling and sample preparation. – *Science of the Total Environment*, 517: 132–150.

Field A. P. (2009): *Discovering statistics using SPSS: (and sex and drugs and rock 'n' roll)*. – i.e. Thousand Oaks, Calif., Los Angeles, SAGE Publications, 857 p.

Harmens H. (2005): *Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Europe using bryophytes. Monitoring manual, 2005/2006 survey*. – Centre for Ecology and Hydrology, Bangor, 10 pp.

Harmens H. (2015): Heavy metal and nitrogen concentrations in mosses are declining across Europe whilst some “hotspots” remain in 2010. – *Environmental Pollution*, 93-104.

Harmens H., Ilyin I., Mills G., Aboal J.R., Alber R., Blum O, Coşkun M., Temmerman De L., Fernández J.A., Figueira R., Frontasyeva M., Godzik B., Goltsova N., Jeran Z., Korzekwa S., Kubin E., Kvietkus K., Leblond S., Liiv S., Magnússon S.H., Maňková B., Nikodemus O., Pesch R., Poikolainen J., Radnović D., Rühling Å., Santamaria J.M., Schröder W., Spiric Z., Stafilov T., Steinnes E., Suchara I., Tabor G., Thöni L., Turcsányi G., Yurukova L. & Zechmeister H.G. (2012): Country-specific correlations across Europe between modelled atmospheric cadmium and lead deposition and concentrations in mosses. – *Environmental Pollution*, 166: 1–9.

Harmens H., Norris D. & the participants of the moss survey Programme Coordination Centre for the ICP Vegetation (2008): Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990-2005). – Centre for Ecology and Hydrology, Bangor, 54 p.

Haynes D., Carter S., Gaus C., Müller J. & Dennison W. (2005): Organochlorine and heavy metal concentrations in blubber and liver tissue collected from Queensland (Australia) dugong (*Dugong dugon*). – *Marine Pollution Bulletin*, 51: 361-369.

Hejzlarová K. (2012): Biomonitoring znečištění atmosféry těžkými kovy na území severovýchodních Čech pomocí chemické analýzy mechu. Bakalářská práce, Katedra ekologie a životního prostředí, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 45 p.

Helsel D.R. (2005): Nondetects And Data Analysis: Statistics for censored environmental data. – John Wiley and Sons, New York. 250 p.  
<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471671738.html>

Hintze, J. (2013). NCSS 9. NCSS, LLC. Kaysville, Utah, USA. [www.ncss.com](http://www.ncss.com).

Hutchinson T. C. & Whitby L. M. (1974): Heavy-Metal Pollution in the Sudbury Mining and Smelting Region of Canada, I. Soil and Vegetation Contamination by Nickel, Copper, and Other Metals. – *Environmental Conservation*, 1: 123–132.

Kapusta P, Szarek-Łukaszewska G. & Godzik B. (2014): Present and Past Deposition of Heavy Metals in Poland as Determined by Moss Monitoring. – *Polish Journal of Environmental Studies*, 6: 2047-2053.

Koblížková E., Kratina J., Mertl J., Pokorný J., Ponocná T., Rollerová M. & Vlčková V. (2014): Zpráva o životním prostředí v Královéhradeckém kraji. – CENIA, Česká informační agentura životního prostředí, Ministerstvo životního prostředí, Praha, 29 p.

Koz B. & Cevik U. (2013): Lead adsorption capacity of some moss species used for heavy metal analysis. – *Ecological Indicators*, 36: 491–494.

Kremer B.P. & Muhle H. (1998): Lišejníky, mechorosty, kaprad'orosty. – Ikar, Praha, 286 p.

Landis W.G., Sofield R.M. & Ming-Ho Y. (2000):. Introduction to Environmental Toxicology: Molecular Substructures to Ecological Landscapes. – Florida, CRC Press, 542 p.

Rao D.N. (1982): Responses of Bryophytes to Air Pollution. – In: Smith A.J.E. [eds.], Bryophyte ecology, 12: 445–469, Chapman & Hall, London.

Rühling Å. & Tyler G. (2001): Changes in Atmospheric Deposition Rates of Heavy Metals in Sweden, A Summary of Nationwide Swedish Surveys in 1968/70 – 1995. – Water, Air, & Soil Pollution, 1: 311–323.

Rutter, A.J., Kershaw, K., Robins, P., & Morton, A.J., 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. 1. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. – Agricultural Meteorology 9: 367–374.

Rybář P. (1986): Všeobecná část – příroda. – In: autorský a lektorský kolektiv, Náchodsko a Hradecko, turistický průvodce ČSSR, svazek 26, 1: 7–16, Olympia, Praha.

Rybář P. (1989): Přírodou od Krkonoš po Vysočinu. – Kruh, Hradec Králové, 391 p.

Sejkora J. & Tvrđý J. (1999): Hořící uhelné haldy a redepozice toxických látek při samovolném termickém rozkladu uhelné hmoty. – EKO – Ekologie a společnost, 4: 11–15.

Schröder W., Holy M., Pesch R., Harmens H., Fagerli H., Alber R., Coşkun M., Temmerman De L., Frolova M., González-Miqueo L., Jeran Z., Kubin E., Leblond S., Liiv S., Maňková B., Piispanen J., Santamaría J.M., Simonè P., Suchara I., Yurukova L., Thöni L. & Zechmeister H.G. (2010): First Europe-wide correlation analysis identifying factors best explaining the total nitrogen concentration in mosses. – Atmos. Environ., 44: 3485–3491.

Suchara I. & Sucharová J. (1998a): Mechorosty a monitorování (1). – Živa, Academia, Praha, 5: 201–202.

Suchara I. & Sucharová J. (1998b): Mechorosty a monitorování (2). – Živa, Academia, Praha, 6: 246–248.

Suchara I. & Sucharová J. (1998c): Atmospheric deposition levels of chosen elements in the Czech Republic determined in the framework of the International Bryomonitoring Program 1995. – The Science of the Total Environment, 223: 3–52.

Suchara I. & Sucharová J. (2000): Distribution of long-term accumulated atmospheric deposition loads of metal and sulphur compounds in the Czech Republic determined through forest floor humus analyses. – Acta Pruhoniana, 69: 1–178.

Suchara I. & Sucharová J. (2004a): Biomonitoring atmosférické depozice prvků a jejich sloučenin v České republice pomocí analýzy mechů. Výsledky ČR mezinárodního biomonitorovacího programu OSN EHK ICP-Vegetace 2000. Část I.: Prvky požadované pro biomonitorovací program. – Acta Pruhoniana, 77: 1–135.

Suchara I. & Sucharová J. (2004b) Distribution of 36 element deposition rates in a historic mining and smelting area as determined through fine-scale biomonitoring techniques. Part I: Relative and absolute current atmospheric deposition levels detected by moss analyses. – *Water, Air, and Soil Pollution*, 153: 205–228.

Suchara I., Sucharová J. & Holá M. (2008): Obsah 37 prvků v mechu a časové a prostorové změny jeho hodnot v České republice během posledních 15 let. Čtvrtý český biomonitorovací průzkum prováděný v rámci mezinárodního biomonitorovacího programu OSN EHK ICP-Vegetace 2005/2006. Část I: Prvky požadované pro biomonitorovací program. – Výzkumný ústav Silva Taroucy pro krajinu a okrasné zahradnictví, Průhonice, 171 p.

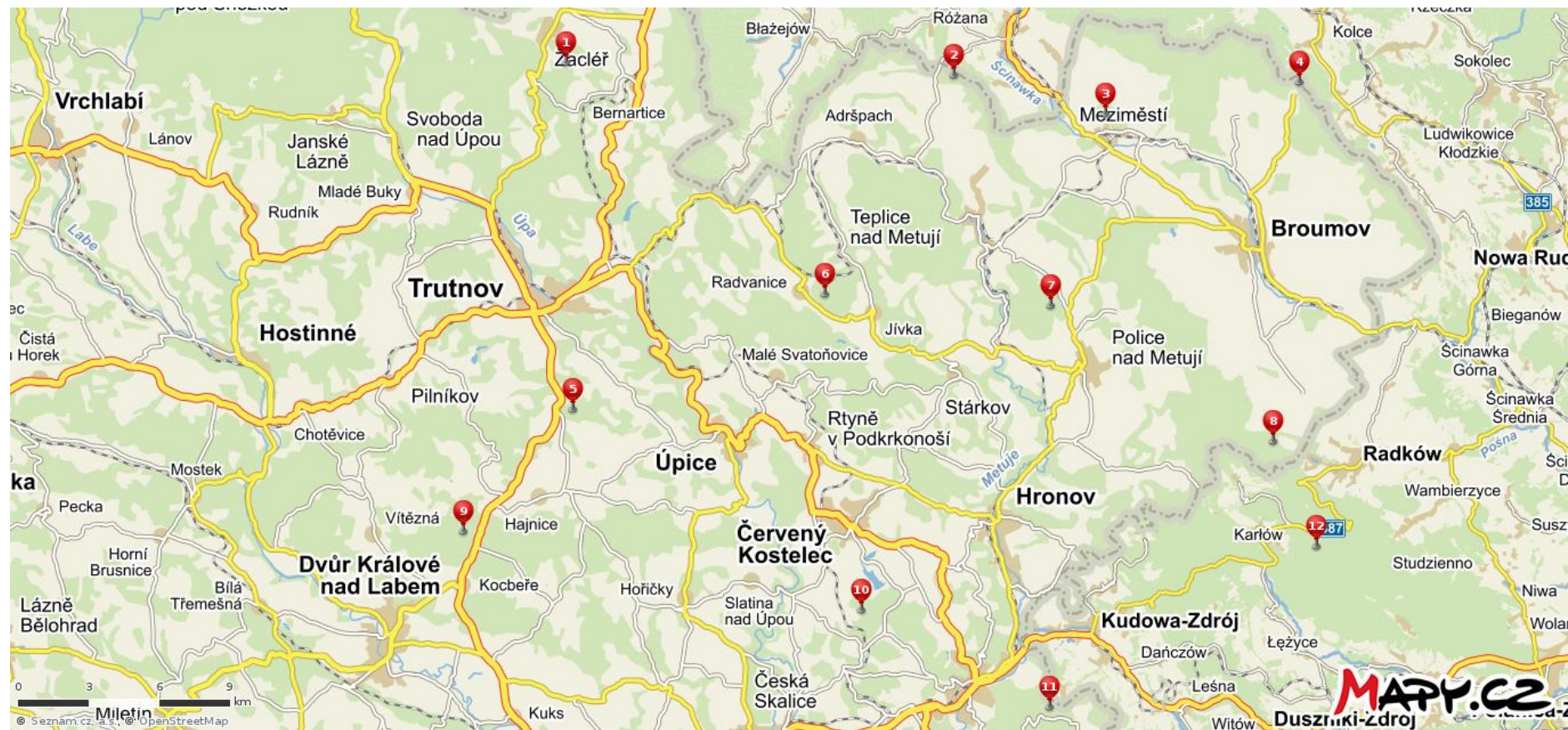
Tolasz R., Brázdil R., Bulíř O., Dobrovolný P., Dubrovský M., Hájková L., Halášová O., Hostýnek J., Janouch M., Kohut M., Krška K., Křivancová S., Květoň V., Lepka Z., Lipina P., Macková J., Metelka L., Míková T., Mrkvica Z., Možný M., Nekovář J., Němec L., Pokorný J., Reitschläger, Richteroval D., Rožnovský J., Řepka M., Semerádová D., Sosna V., Stříž M., Šercl P., Škáchová H., Štěpánek P., Štěpánková P., Trnka M., Valeriánová A., Valter J., Vaníček K., Vavruška F., Voženílek V., Vráblík T., Vysoudil M., Zahradníček J., Zusková I., Žák M. & Žalud Z. (2007): Atlas podnebí Česka. – Český hydrometeorologický ústav, Praha a Universita Palackého v Olomouci, Olomouc, 256 s.

Tyler G. (1970): Moss Analysis – A Method for Surveying Heavy Metal Deposition. *In: Harmens H., Norris D. and the participants of the moss survey Programme Coordination Centre for the ICP Vegetation (2008): Spatial and temporal trends in heavy metal accumulation in mosses in Europe (1990-2005).* – Centre for Ecology and Hydrology, Bangor, 54 p.

Velenovský J. (1897): *Mechy české.* – Česká akademie císaře Františka Josefa pro vědy, slovesnost a umění, Praha, 348 s.

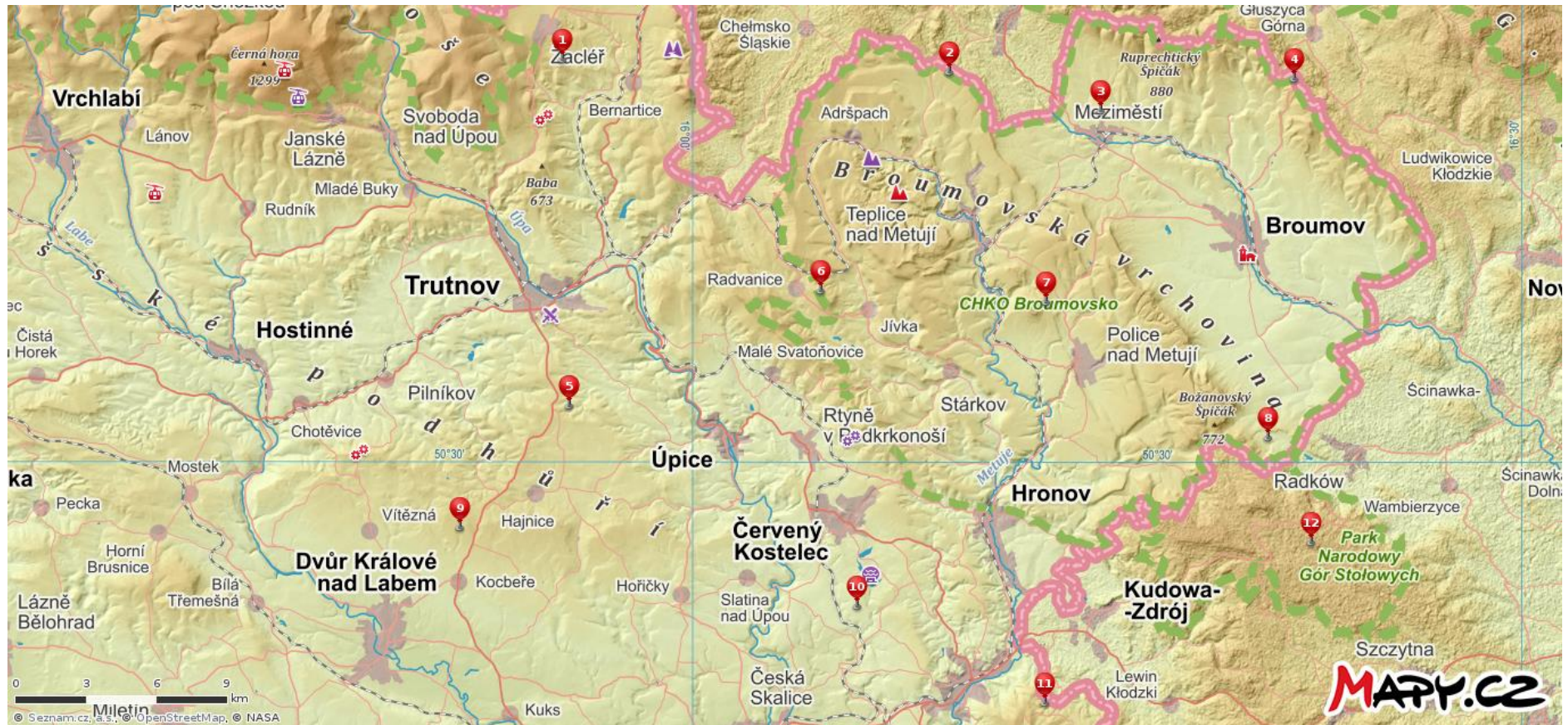


### Příloha 1: Poloha odběrových lokalit na základní mapě



1 – Žacléř, 2 – Zdoňov, 3 – Meziměstí, 4 – Janovičky, 5 – Trutnov, 6 – Radvanice, 7 – Dědov, 8 – Božanov, 9 – Kocbeře, 10 – Trubějov, 11 – Dobrošov, 12 – Karlów; © Seznam.cz, © OpenStreetMap

## Příloha 2: Poloha odběrových lokalit na zeměpisné mapě



; 1 – Žaclěř, 2 – Zdoňov, 3 – Meziměstí, 4 – Janovičky, 5 – Trutnov, 6 – Radvanice, 7 – Dědov, 8 – Božanov, 9 – Kocbeře, 10 – Trubějov, 11 – Dobrošov, 12 – Karlów;

©Seznam.cz, © OpenStreetMap, ©NASA