

Analýza nejvhodnějšího interpolačního postupu při mapování atmosférické depozice do Grafické ročenky ČHMÚ

D.C. 8.3 Využití dlouhodobě měřených dat pro
hodnocení, interpretaci a nové pohledy na kvalitu
ovzduší včetně atmosférické depozice

DKRVO 2023–2027

Pavel Kurfürst, Iva Hůnová

1 Úvod

Mapy atmosférické depozice jsou jedním z důležitých výstupů hodnocení kvality ovzduší a jako takové jsou každoročně publikovány v Grafické ročence Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ, 2025). Informace v těchto mapách jsou nejen zásadním dokladem procesů probíhajících v atmosféře, ale i důležitou informací o vstupu environmentálně důležitých látek do ostatních složek přírodního prostředí (tedy do vody a půdy), a hodnoty depozičních toků indikují možné negativní ovlivnění ekosystémů (Hůnová et al., 2014; Hůnová et al., 2016; Hůnová et al., 2019; Hůnová et al., 2023). Z těchto důvodů se snažíme v maximální možné míře odhady depozičních toků zpřesňovat, což vede k jejich větší spolehlivosti, a to nejen přímo v bodech měřicích lokalit, ale též v oblastech, které nejsou přímým měřením pokryta, a kde je hodnota depozice odhadována na základě geostatistických postupů.

Cílem aktivity DC 8.3. „Využití dlouhodobě měřených dat pro hodnocení, interpretaci a nové pohledy na kvalitu ovzduší včetně atmosférické depozice“ DKRVO 2023–2027 v roce 2025 bylo ověřit, zda způsob interpolace prováděný dosud při mapování toků látek deponovaných prostřednictvím mokré vertikální depozice (tedy při epizodách atmosférických srážek v podobě deště či sněhu) je spolehlivým metodickým přístupem. Za tímto účelem bylo provedeno porovnání několika základních metod interpolace, a to IDW (Inverse Distance Weighted), což je metodika dosud praktikovaná, základní (ordinary) kriging a RBF (Radial Basis Functions) pro sulfáty (SO_4^{2-}), nitráty (NO_3^-), amonné ionty (NH_4^+), vodíkové ionty (H^+), chloridové ionty (Cl^-) a dále ionty olovnaté (Pb^{2+}), kadmennaté (Cd^{2+}) a nikelnaté (Ni^{2+}). Z důvodu rozdílných meteorologických podmínek v jednotlivých letech, kdy významným faktorem ovlivňujícím depoziční toky látek jsou srážkové úhrny, nebyla analýza provedena pouze pro jeden jediný kalendářní rok, ale pro pět posledních, po sobě následujících let (2020–2024).

2 Metodika

2.1 Tvorba map atmosférické depozice

Mapy mokré depozice jednotlivých iontů jsou konstruovány z pole koncentrací iontů ve srážkách (na základě průměrných ročních koncentrací vážených srážkovým úhrnem vypočtených z naměřených údajů) a z pole ročních srážkových úhrnů, které bylo vytvořeno na základě údajů ze srážkoměrných stanic provozovaných ČHMÚ. Pole ročních srážkových úhrnů, vytvářené na Úseku klimatologie ČHMÚ z dat všech cca 800 měřicích stanic, má zásadní vliv na podobu výsledné depoziční mapy. Plošná interpolace koncentrací iontů ve srážkách, která je předmětem této práce, je pouze částí výsledné mapy. Je důležité poznamenat, že měření depozic probíhá v odlišné měřicí síti, s nesrovnatelně nižším počtem stanic. Srážkové úhrny měřené na těchto stanicích sledujících chemické složení srážkových vod jsou často odlišné od srážkových úhrnů měřených na klimatologických stanicích. Nutnost kombinace odlišných a neporovnatelných zdrojů vnáší do výsledných map nejistotu. Z tohoto důvodu není samotná spolehlivost interpolace nejzásadnějším faktorem nejistoty výsledných depozičních map. Přesto je faktorem důležitým, zasluhujícím podrobnější zkoumání.

Vstupem do mapování mokré depozice pomocí plošné interpolace je bodová vrstva měřicích lokalit s jejich souřadnicemi a přepočtenými průměrnými koncentracemi. Přepočet zohledňuje použití dvou různých měřicích metod, srážky typu bulk (vzorek srážek s nedefinovaným podílem suché depozice) a čisté srážky (vzorek wet-only, odebíraný pouze v průběhu samotné

srážkové epizody). Samotná plošná interpolace je prováděna v prostředí GIS, specializovaným produktem (Geostatistical Analyst v ArcGIS Pro), nabízejícím širokou škálu různých interpolačních metod. Pro srovnání byly použity tři různé interpolační metody, IDW (Inverse Distance Weighted) – metodika dosud praktikovaná, RBF (Radial Basis Functions) a základní (ordinary) kriging. Tyto metody se liší mírou matematické komplexnosti a schopností interpretovat strukturu dat. Každá z metod IDW, RBF a kriging přistupuje k výpočtu neznámých hodnot specifickým způsobem, což zásadně ovlivňuje výsledný vzhled a přesnost mapy (Webster and Oliver, 2007; Goutham Priya and Jayalakshmi, 2018).

2.2 Metoda IDW

Metoda Inverse Distance Weighted (IDW) je nejvíce intuitivní. Vychází z prvního geostatistického zákona, tedy že blízké věci jsou si podobnější než ty vzdálené. Výsledná hodnota je váženým průměrem okolních bodů, přičemž váha klesá s rostoucí vzdáleností. Jelikož je IDW omezeno pouze na rozsah naměřených hodnot, nikdy nevytvoří odhad vyšší než maximum nebo nižší než minimum v datech. To je pro mapování depozic zásadní výhodou. Její hlavní nevýhodou je vznik nepřírodných, graficky zvýrazněných okolí kolem měřených bodů v oblastech s nízkou hustotou měření. Tato nevýhoda je v případě mapování depozic tlumena tím, že interpolace probíhá ve dvou krocích. Výsledky první interpolace jsou uloženy do pomocného gridu, z něj jsou hodnoty načteny do pravidelné sítě, jejíž jednotlivé body jsou od sebe vzdáleny 20 km v kolmých směrech, a poté interpolovány znovu. Navíc se naštěstí tato nevýhoda neprojevuje díky tomu, že výsledná mapa vzniká kombinací s klimatologickou mapou srážkových úhrnů. Ta má velmi jemné rozlišení, navíc jsou lokální rozdíly v srážkových úhrnech výraznější, než tomu je u koncentrací iontů ve srážkách.

2.3 Metoda RBF

Radial Basis Functions (RBF), jsou zaměřené na tvorbu maximálně hladkých a spojitých povrchů. Modelují plynulé trendy (například plynulé stoupání terénu), za cenu nerespektování rozsahu naměřených hodnot. Tato metoda je ideální pro vizuálně atraktivní zobrazení jevů, které se mění pozvolna a bez náhlých zlomů, jako je například teplota vzduchu. V našem případě byla vybrána na základě důležitého doporučení, že dosahuje přesnějších výsledků než metoda IDW v případě malého počtu měření, což je právě případ depozic.

2.4 Metoda kriging

Kriging na rozdíl od předchozích metod není jen deterministickým výpočtem, ale stochastickým modelem. Před samotnou interpolací vyžaduje analýzu pomocí variogramu, který matematicky definuje, jak se podobnost dat mění se vzdáleností. Kriging je unikátní v tom, že jako jediný poskytuje mapu chyb (standardní odchylky odhadu), čímž uživateli říká, kde je model spolehlivý a kde nikoliv. Možnost konstrukce mapy chyb byla i jednou z motivací pro vyzkoušení této metody. Zároveň je třeba poznamenat, že Kriging je ve srovnání s předchozími metodami citlivější na nízký počet měření. To se projevilo i u mapování depozic, kriging nebyl metodou s nejpřesnějšími výsledky u všech látek. V případě některých byla konstrukce mapy dokonce na hraně možností.

3 Výsledky

Výsledky jsou shrnuty v Tab. 1 a Tab. 2, které přehledně prezentují RMSE (Root Mean Square Error) pro jednotlivé interpolační metody. Čím je hodnota RMSE nižší, o tím vhodnější metodu se jedná. Na základě porovnání hodnot RMSE je zřejmé, že nejlepší výsledky nejsou zcela

jednoznačné. Nejčastěji vychází nejlépe metoda Ordinary kriging, ale není to pravidlem, u některých látek se optimální metoda v různých letech liší. Důležitým poznatkem je to, že dosud používaná metoda IDW se nejeví za sledované pětileté období jako optimální v převážné většině analyzovaných roků.

Rozdíly v úrovni depozic podle použité interpolační metody byly zkoumány též z prostorového pohledu. Projevují se dvěma způsoby, výsledkem je pak jejich kombinace. Za prvé se prokázal jednoznačný vliv rozdílu metod IDW a ordinary kriging v místech měření. Metoda IDW zachovává hodnoty v místech měření, metoda ordinary kriging nezachovává. To se projevilo v prostorovém pohledu na rozdíly: v okolí stanic jsou hodnoty v porovnání obou metod nejrozdílnější zejména u H^+ , u SO_4^{2-} a NO_3^- se to projevuje méně, ale přesto významně. Druhým pozorovatelným výsledkem srovnání metod v prostorovém pohledu jsou vyšší rozdíly v místech, která jsou nejhůře pokrytá měřeními, tedy v největší vzdálenosti od měřicích stanic. To se projevuje u všech látek, nejméně u H^+ , kde v prostorovém srovnání převažují zmíněné rozdíly v blízkém okolí stanic. Nelze říci, že by v některých oblastech byly hodnoty depozičních toků interpolované metodou ordinary kriging vyšší a v některých oblastech nižší než u IDW, a to ani v případě blízkého okolí stanic. Nicméně hodnoty RMSE u dosud používané metody IDW se od metody ordinary kriging odlišují jen zanedbatelně. O tom, že výsledné mapky depozičních toků se vizuálně v podstatě neliší, se můžeme přesvědčit i na Obr. 1 – Obr. 16, kde jsou uvedeny vždy depoziční toky pro jednotlivé látky po dvojicích pod sebou – jako původní ročenkova mapka vytvořená pomocí interpolace IDW a mapka nově vytvořená metodou ordinary kriging.

Tab. 3 ukazuje, do jaké míry se od sebe liší celkový depoziční tok (celkově za ČR) spočtený pomocí obou interpolačních metod, výpočty jsou provedeny pro $S_{SO_4^{2-}}$, $N_{NO_3^-}$, $N_{NH_4^+}$ a H^+ pro roky 2023 a 2024. Rozdíly v celkových depozičních spočtených pro celé území ČR mezi oběma metodami jsou velmi nízké, v některých oblastech bylo dosaženo vyšších hodnot jednou metodou, v jiných druhou, v celkovém součtu je to pak vyrovnané. Z Tab. 3 vyplývá, že rozdíly v celkových depozičních tocích jsou ve všech případech nižší než 4 %. Všechny obrázky a tabulky jsou uvedeny v Přílohách.

4 Závěr

Závěrem lze konstatovat, že výsledky dvou různých interpolačních metod, tedy IDW běžně dosud používané v ročenkových mapách, a ordinary kriging, která vychází při srovnání RMSE nejlépe, nejsou natolik odlišné, aby to bylo dostatečným impulsem pro změnu dosavadní metodiky interpolace při tvorbě map depozičních toků environmentálně důležitých látek.

5 Literatura

ČHMÚ, 2025. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2024. Český hydrometeorologický ústav, Praha

https://www.chmi.cz/documents/42501/444216/Rocenka_kvality_ovzdusi_2024.pdf

Goutham Priya M., Jayalakshmi S., 2018. Evaluation of Interpolation Techniques for Air Quality Monitoring using Statistical Error Metrics – A Review. International Journal of Engineering Research & Technology 6, <https://www.ijert.org>.

Hůnová I., Kurfürst P., Baláková L., 2019. Areas under high ozone and nitrogen loads are spatially disjunct in Czech forests. Science of the Total Environment 656C, 567–575.

Hůnová I., Kurfürst P., Schreiberová M., Vlasáková L., Škáchová H., 2023. Atmospheric Deposition of Lead and Cadmium in a Central European Country over the last Three Decades. Atmosphere 14, no. 1: 19.

Hůnová I., Kurfürst P., Vlček O., Stráník V., Stoklasová P., Schováňková J., Srbová D. (2016): Towards a Better Spatial Quantification of Nitrogen Deposition: A Case Study for Czech Forests. Environmental Pollution 213, 1028–1041.

Hůnová I., Maznová J., Kurfürst P. (2014): Trends in atmospheric deposition fluxes of sulphur and nitrogen in Czech forests. Environmental Pollution 184: 668–675.

Webster R., Oliver M. A., 2007. Geostatistics for Environmental Scientists. Second edition. John Wiley & Sons, Chichester, England.

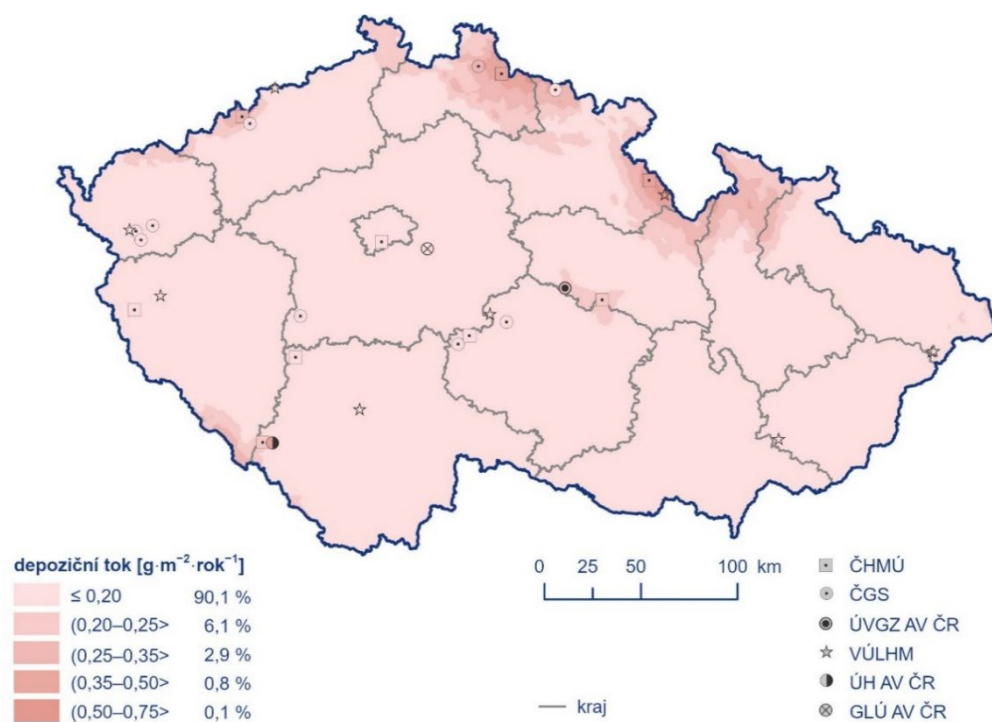
6 Přílohy

Tab. 1 Hodnoty RMSE (Root Mean Square Error, střední kvadratická chyba) pro různé interpolační metody aplikované na interpolaci depozičních toků $N_NO_3^-$, $N_NH_4^+$, $S_SO_4^{2-}$ a H^+

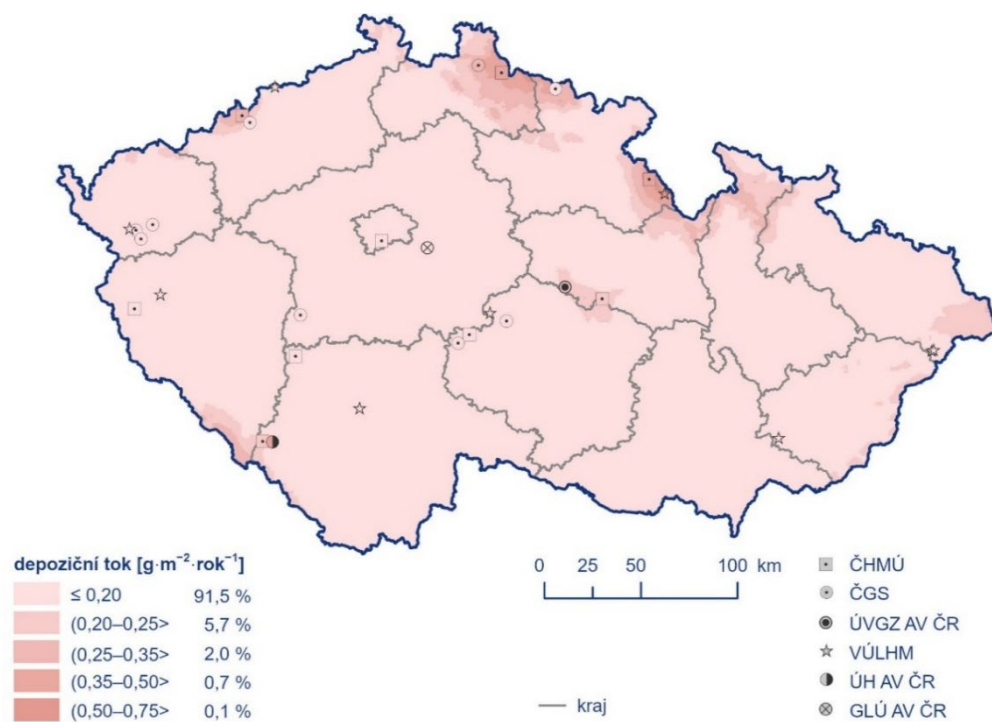
		$N_NO_3^-$			$N_NH_4^+$			$S_SO_4^{2+}$			H^+		
		IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging
2020	Count	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Mean	0,005	0,002	0,001	0,009	0,005	-0,006	-0,002	-0,001	-0,002	0,040	-0,023	0,013
	RMSE	0,102	0,099	0,094	0,246	0,237	0,219	0,065	0,062	0,055	1,407	1,398	1,315
2021	Count	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Mean	0,006	0,005	-0,004	0,003	0,001	-0,006	0,001	0,001	-0,004	-0,154	-0,129	0,015
	RMSE	0,199	0,196	0,198	0,188	0,187	0,168	0,119	0,117	0,110	2,218	2,199	2,143
2022	Count	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
	Mean	-0,004	-0,001	0,002	0,012	0,004	0,005	0,002	0,003	0,002	0,281	0,129	0,180
	RMSE	0,115	0,112	0,097	0,101	0,098	0,102	0,079	0,077	0,068	2,879	2,835	2,618
2023	Count	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	Mean	0,007	0,007	0,004	0,007	0,009	-0,005	0,003	0,004	-0,001	0,133	0,056	0,005
	RMSE	0,092	0,093	0,087	0,177	0,175	0,164	0,085	0,084	0,079	1,971	1,930	1,781
2024	Count	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
	Mean	-0,008	-0,003	0,000	-0,026	-0,014	-0,019	-0,007	-0,003	-0,001	0,075	0,044	0,025
	RMSE	0,160	0,159	0,155	0,142	0,137	0,140	0,061	0,059	0,058	1,507	1,505	1,343

Tab. 2 Hodnoty RMSE (Root Mean Square Error, střední kvadratická chyba) pro různé interpolační metody aplikované na interpolaci depozičních toků Cl^- , Pb^{2+} , Cd^{2+} a Ni^{2+}

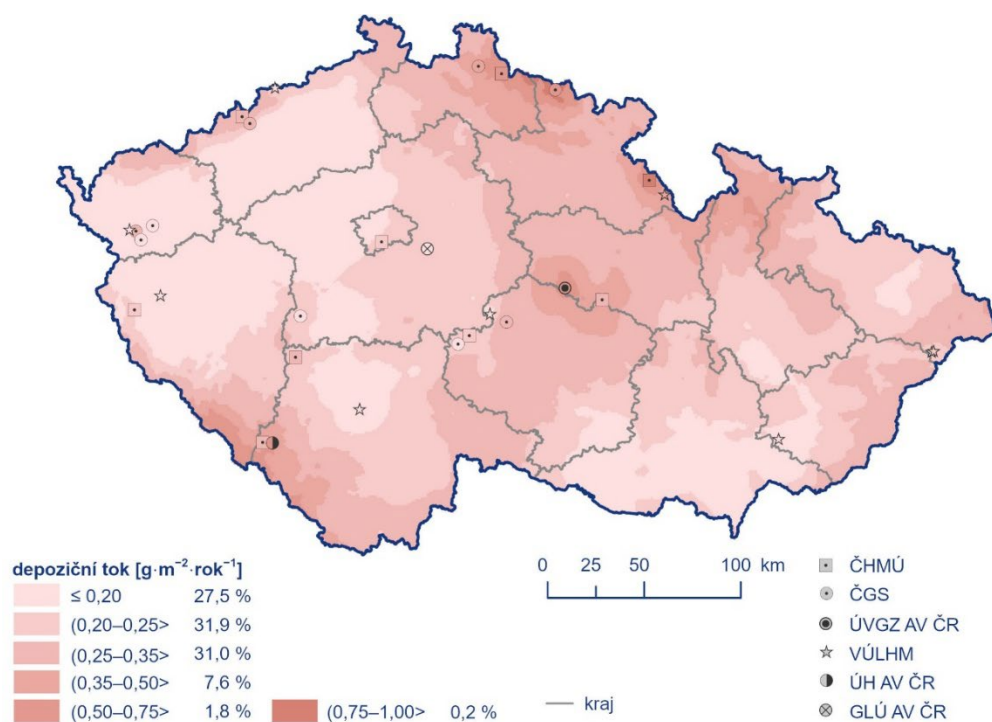
		Cl^-			Pb^{2+}			Cd^{2+}			Ni^{2+}		
		IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging	IDW	RBF	Kriging
2020	Count	34	34	34	27	27	27	27	27	27	27	27	27
	Mean	0,005	0,001	0,002	0,000	0,003	0,006	0,001	0,001	-0,003	0,058	0,047	-0,135
	RMSE	0,105	0,103	0,092	0,310	0,310	0,327	0,028	0,028	0,025	1,771	1,812	1,591
2021	Count	34	34	34	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	Mean	0,008	0,003	-0,004	-0,016	-0,008	-0,015	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,014
	RMSE	0,199	0,197	0,167	0,385	0,387	0,361	0,033	0,033	0,030	0,883	0,903	0,699
2022	Count	34	34	34	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	Mean	0,012	0,005	0,001	-0,028	-0,013	-0,022	0,000	0,000	-0,002	0,008	0,007	-0,004
	RMSE	0,103	0,102	0,089	0,363	0,369	0,329	0,025	0,025	0,023	0,734	0,745	0,740
2023	Count	30	30	30	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	Mean	-0,002	-0,004	0,000	-0,006	-0,002	-0,009	0,001	0,001	0,000	-0,189	-0,089	-0,133
	RMSE	0,093	0,092	0,084	0,268	0,269	0,249	0,024	0,025	0,019	3,069	2,838	3,008
2024	Count	39	39	39	28	28	28	28	28	28	28	28	28
	Mean	0,002	0,000	-0,001	0,001	0,004	0,008	0,001	0,000	-0,002	0,009	0,008	-0,001
	RMSE	0,081	0,083	0,081	0,260	0,264	0,264	0,038	0,039	0,034	0,360	0,368	0,285



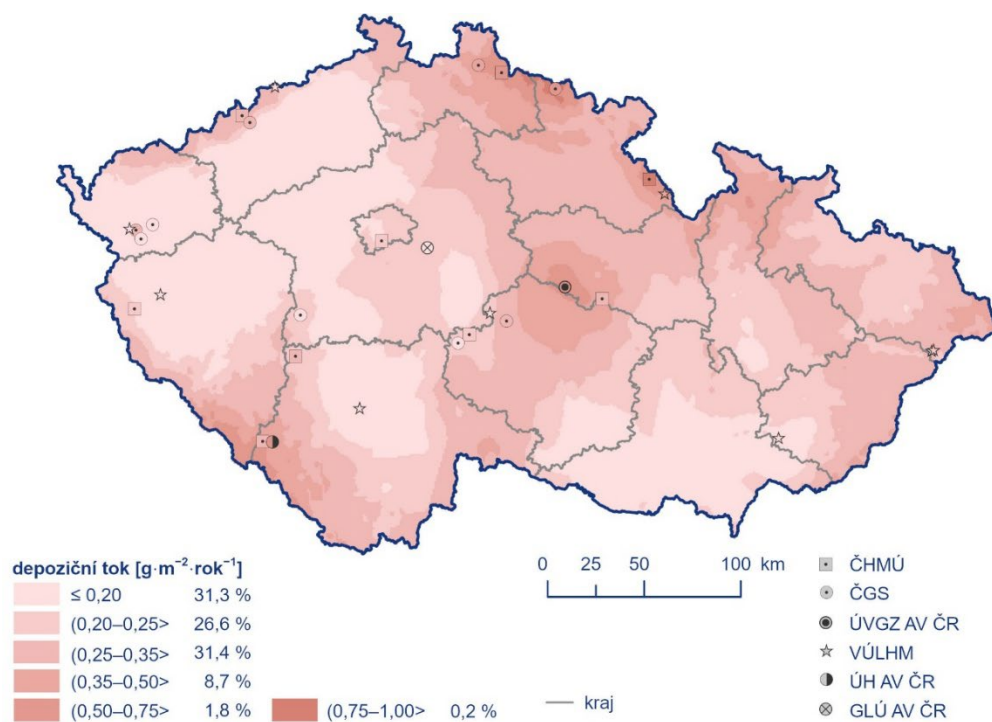
Obr. 1 Mapa depozičního toku N_NO_3^- z ročenky 2023 (IDW)



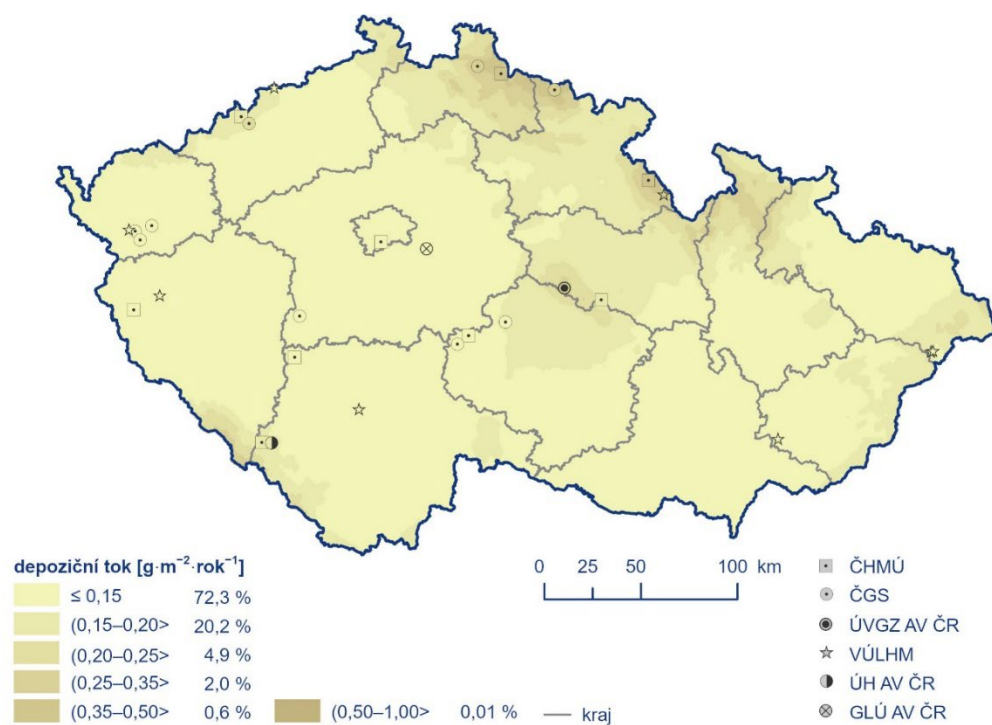
Obr. 2 Mapa depozičního toku N_NO_3^- , nově ordinary kriging



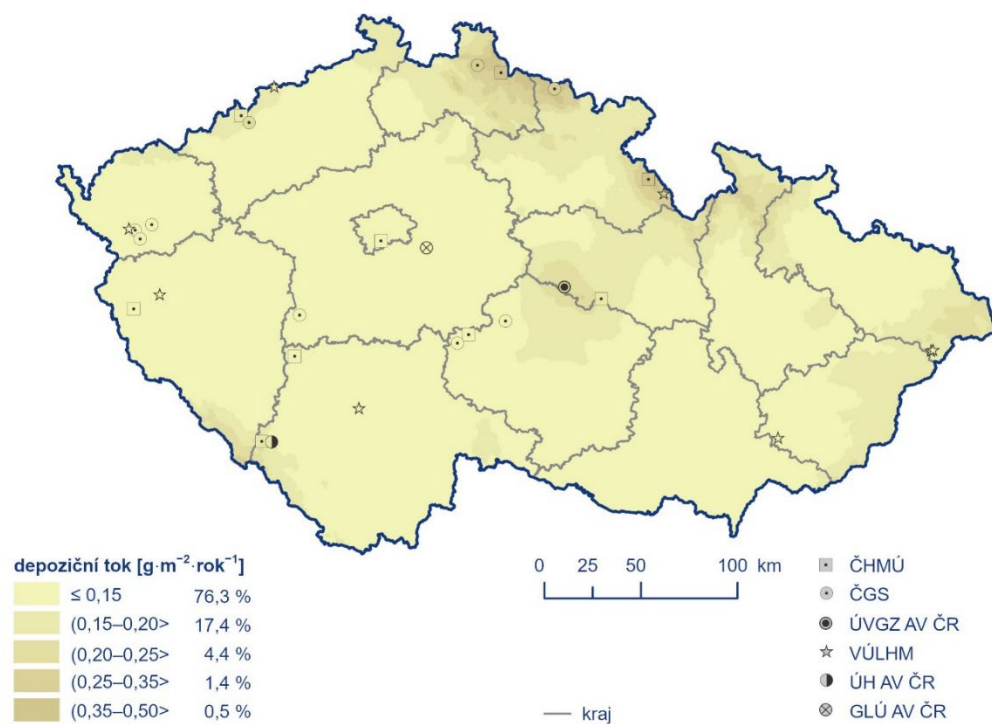
Obr. 3 Mapa depozičního toku $N_NH_4^+$ z ročenky 2023 (IDW)



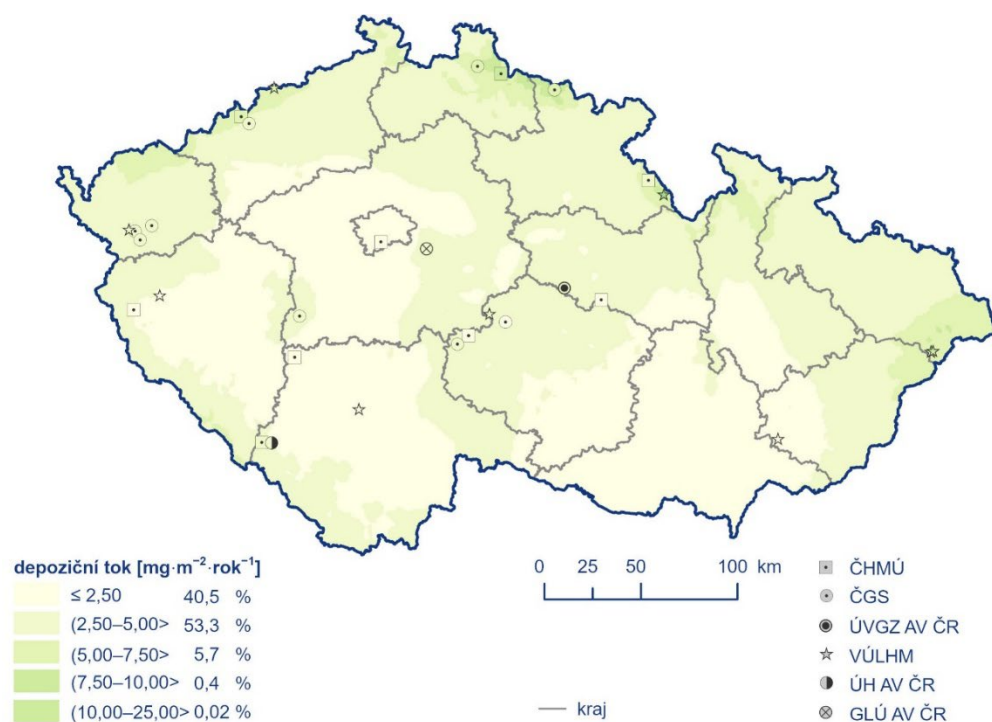
Obr. 4 Mapa depozičního toku $N_NH_4^+$, nově ordinary kriging



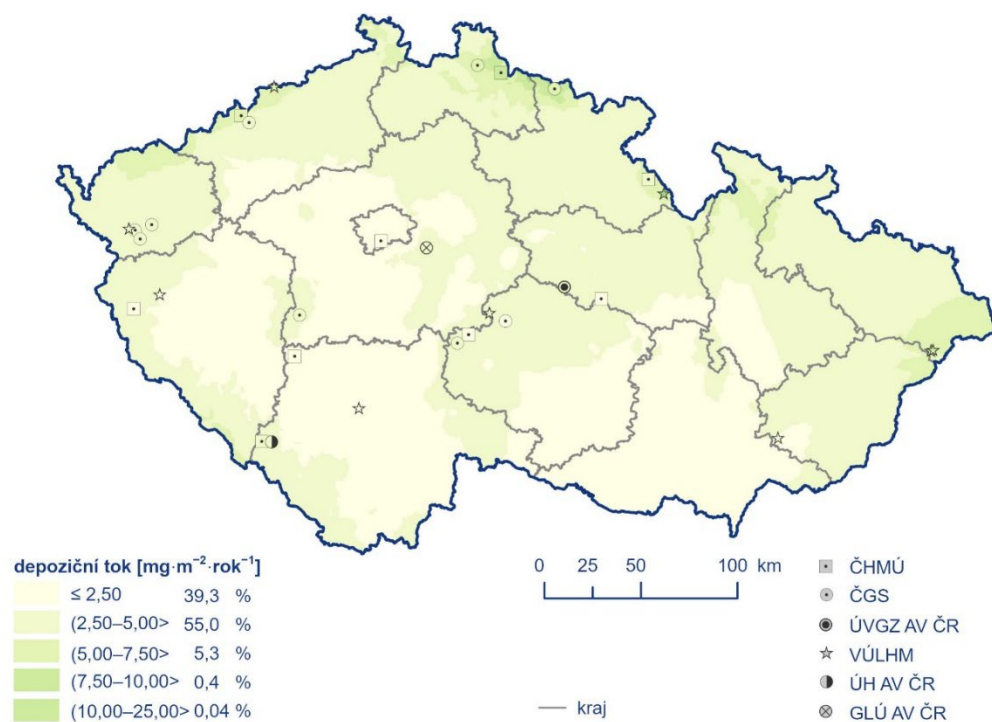
Obr. 5 Mapa depozičního toku $S_{SO_4^{2-}}$ z ročenky 2023 (IDW)



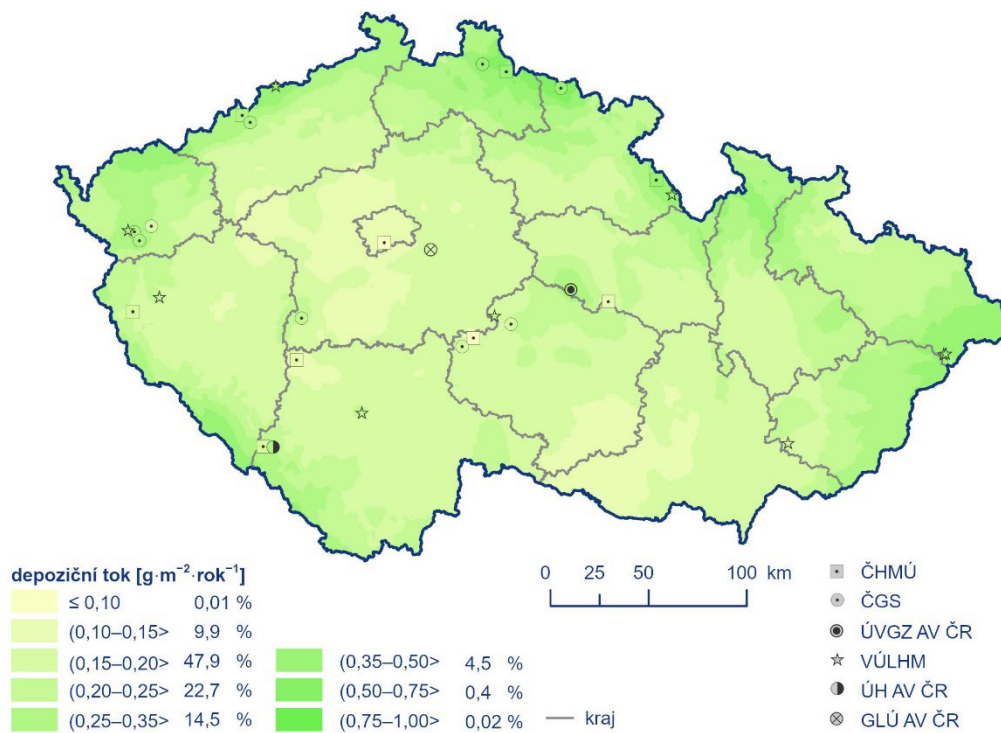
Obr. 6 Mapa depozičního toku $S_{SO_4^{2-}}$, nově ordinary kriging



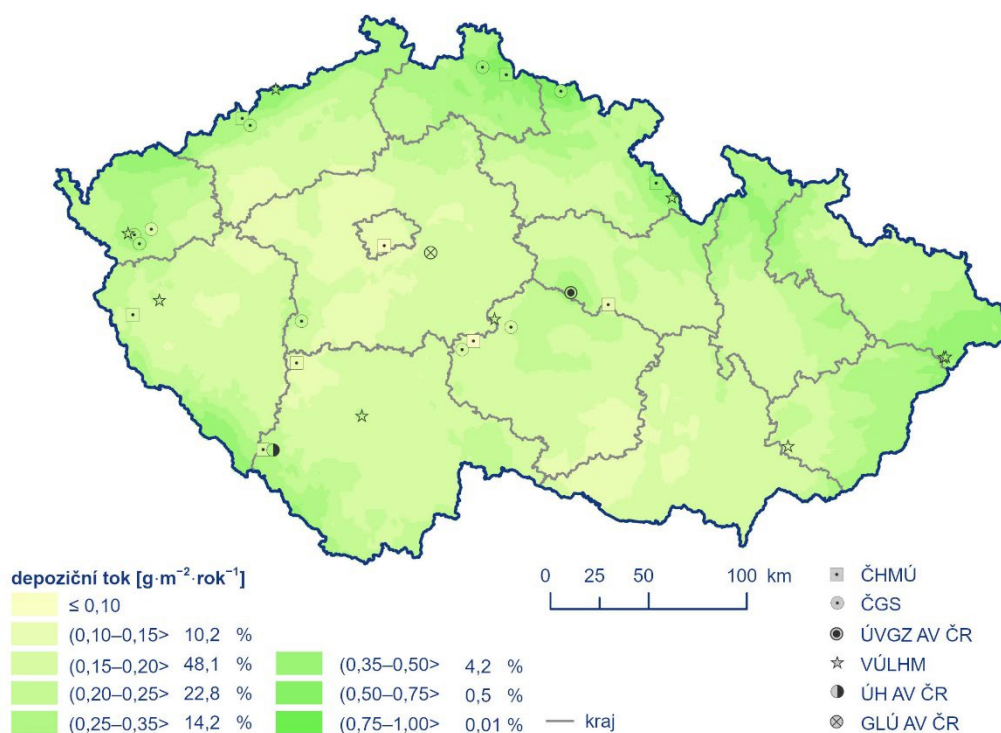
Obr. 7 Mapa depozičního toku H^+ z ročenky 2023 (IDW)



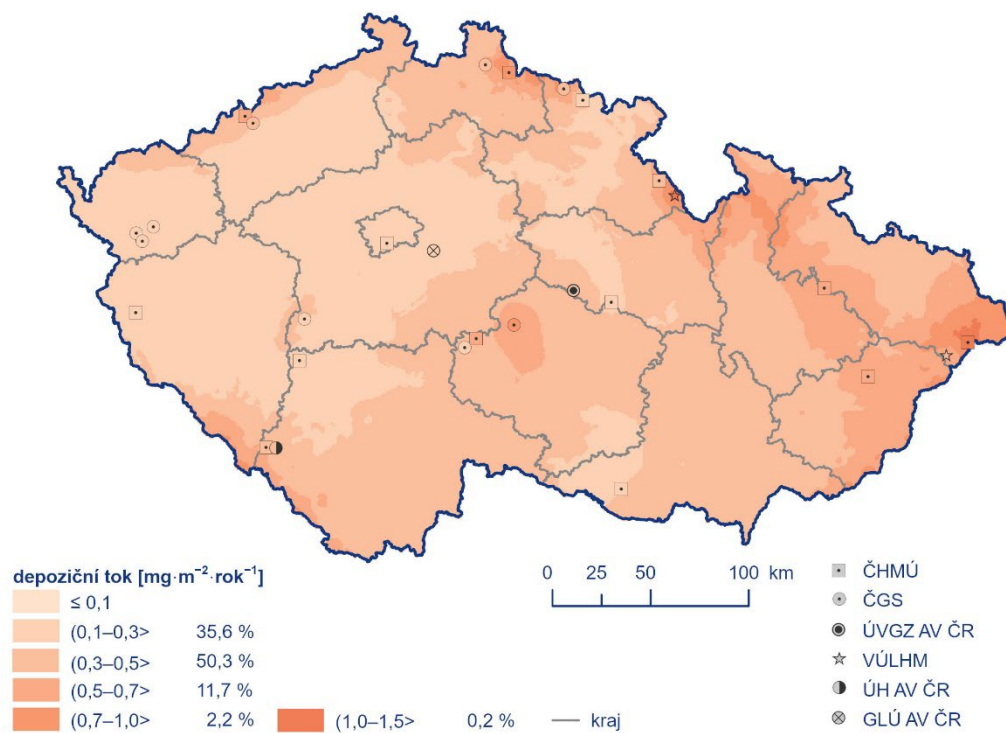
Obr. 8 Mapa depozičního toku H^+ , nově ordinary kriging



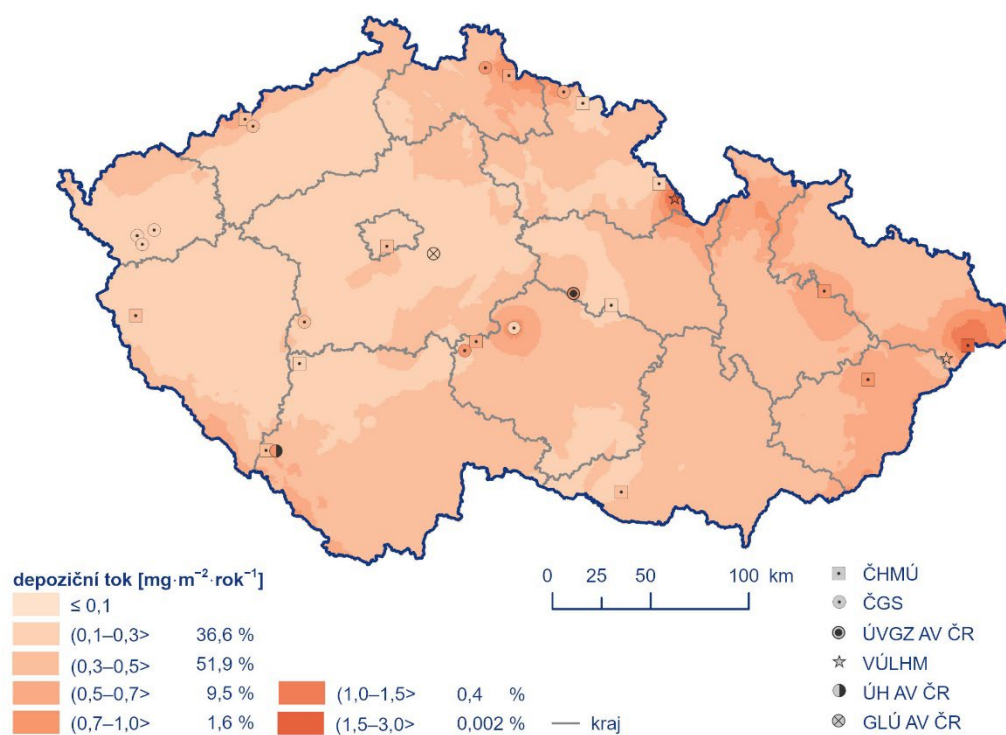
Obr. 9 Mapa depozičního toku CF z ročenky 2023 (IDW)



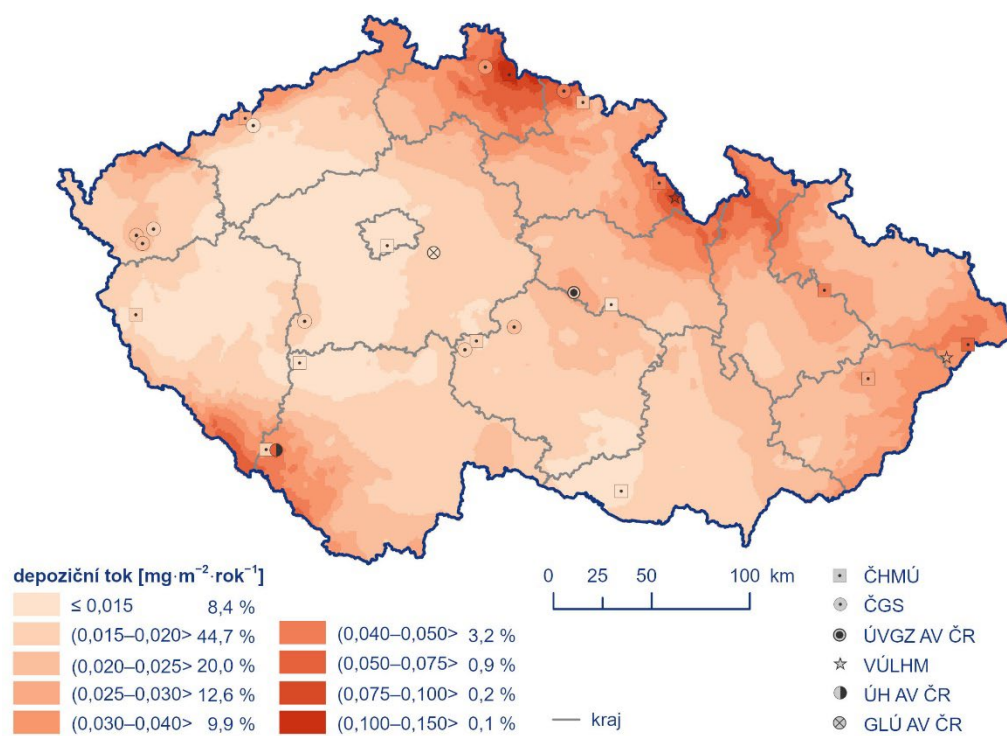
Obr. 10 Mapa depozičního toku CF, nově ordinary kriging



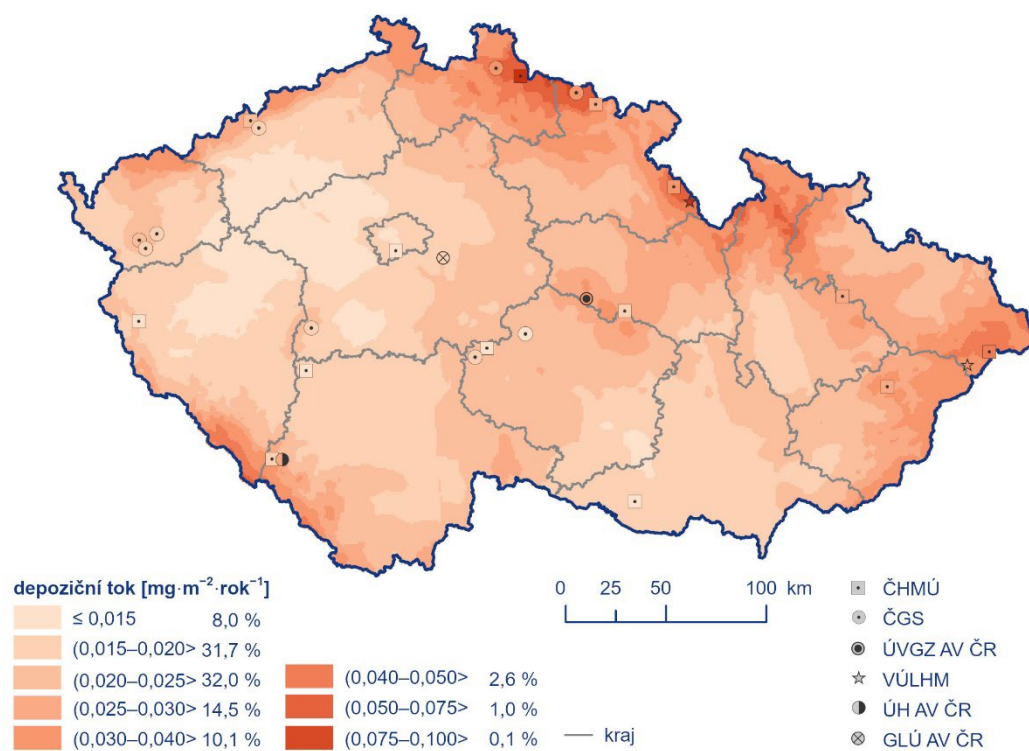
Obr. 11 Mapa depozičního toku Pb^{2+} ročenky 2023 (IDW)



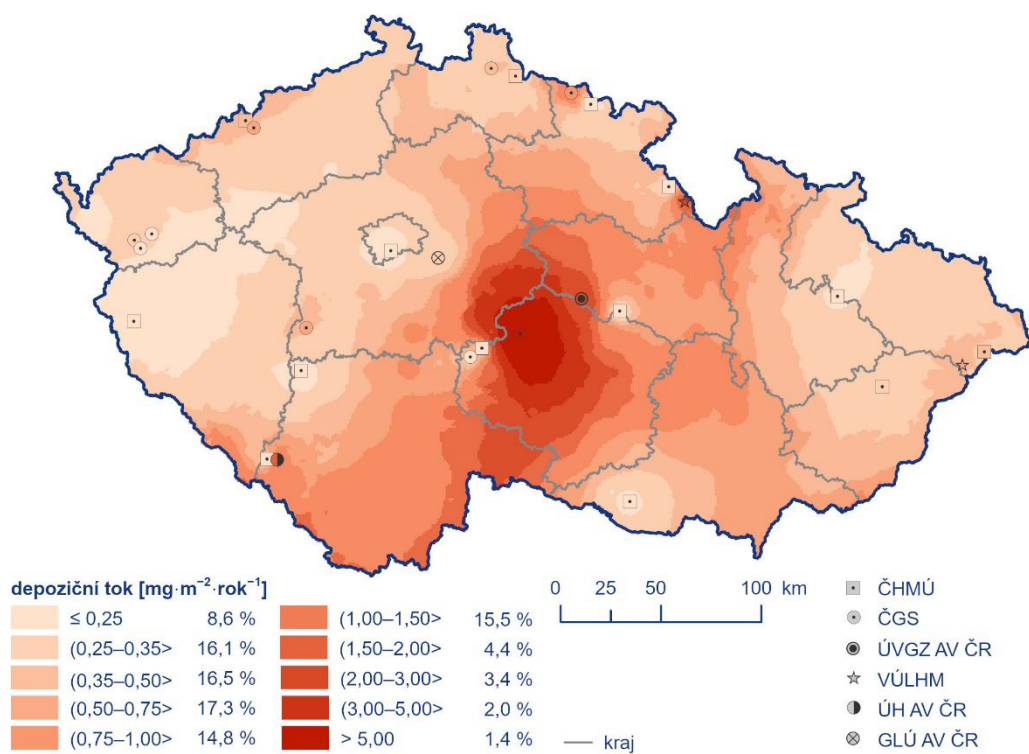
Obr. 12 Mapa depozičního toku Pb^{2+} , nově ordinary kriging



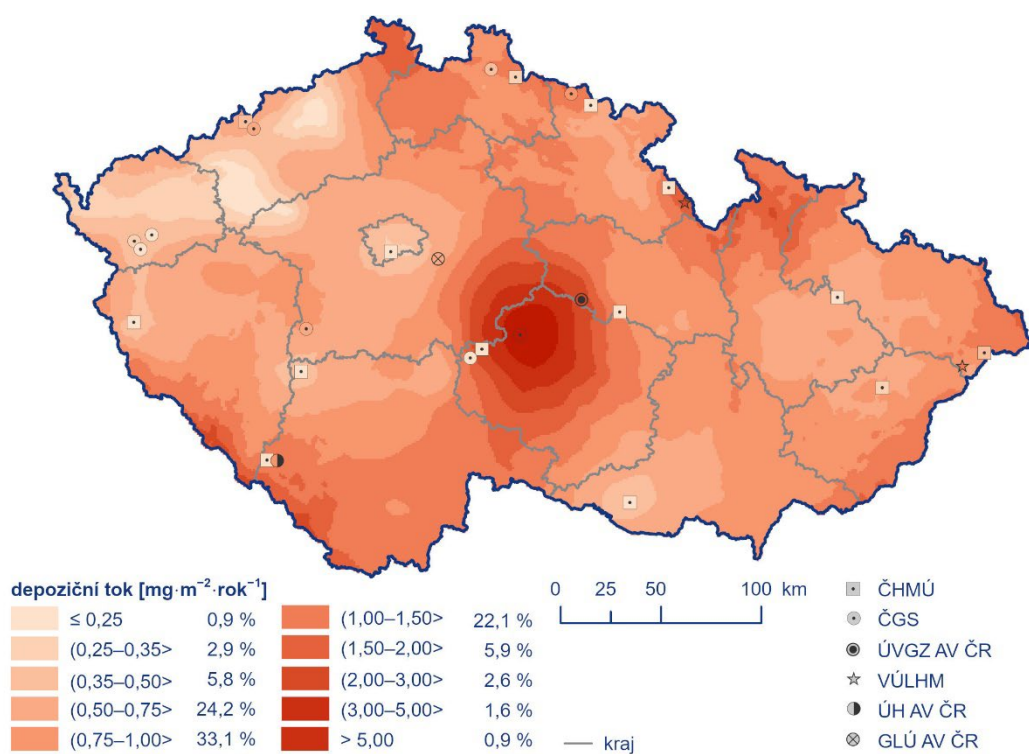
Obr. 13 Mapa depozičního toku Cd^{2+} ročenky 2023 (IDW)



Obr. 14 Mapa depozičního toku Cd^{2+} , nově ordinary kriging



Obr. 15 Mapa depozičního toku Ni^{2+} z ročenky 2023 (IDW)



Obr. 16 Mapa depozičního toku Ni^{2+} , nově ordinary kriging

Tab. 3 Mokr  depozice [t] spo ten  různými interpolačními metodami, celkov  depoziční tok,  R

	Ordinary Kriging	IDW	rozdíl [%]
2023			
S_SO₄²⁻	10 115	10 512	−3,93
N_NO₃⁻	10 932	10 853	0,72
N_NH₄⁺	19 671	19 646	0,13
H⁺	234	233	0,35
2024			
S_SO₄²⁻	9 999	10 013	−0,14
N_NO₃⁻	11 789	11 582	1,76
N_NH₄⁺	19 925	19 327	3,00
H⁺	201	200	0,71