Český hydrometeorologický ústav

Česká zemědělská univerzita v Praze

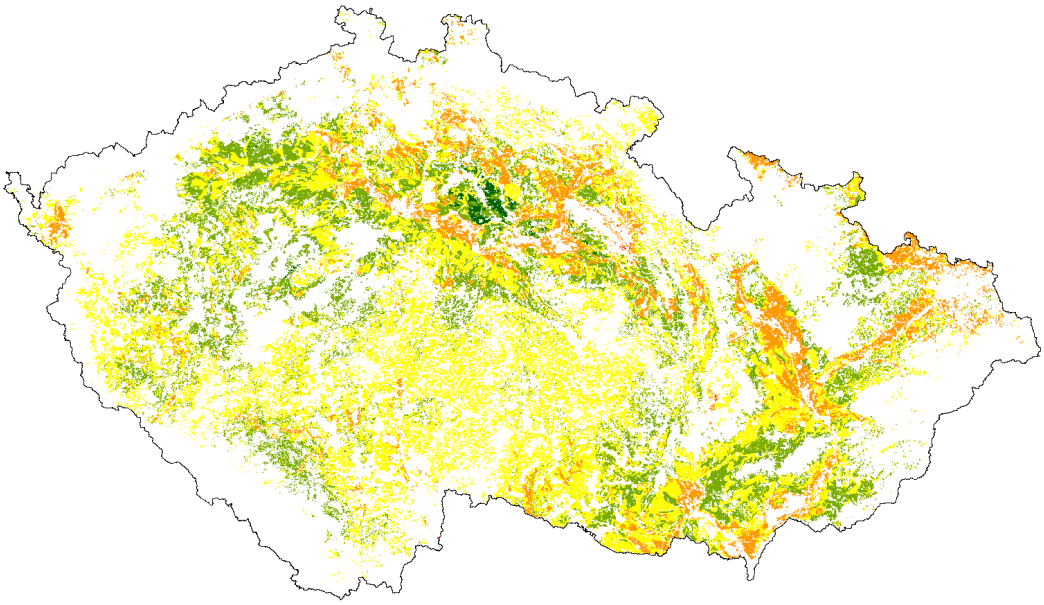
Fakulta rybářství a ochrany vod
Faculty of Fisheries and Protection of Waters

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
University of South Bohemia in České Budějovice

Mapy mobility látek v půdním prostředí a specifické zranitelnosti podzemních vod pro emergentní organické mikropolutanty:

1,3-diphenylguanidin, triethylcitrát, kyselina naftalen-2-sulfonová, kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová, 4-acetamidoantipyrin, 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina

Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., MSc. Alina Sadchenko, Ph.D., Ing. Miroslav Fér, Ph.D., Ing. Martin Kočárek, Ph.D., Ing. Antonín Nikodem, Ph.D., Ing. Helena Švecová, Ph.D., Ing. Aleš Klement, Ph.D., Ing. Jindřich Zelinka, doc. Mgr. Roman Grabic, Ph.D., Mgr. Markéta Ackermanová



Specializovaná mapa s odborným obsahem

2025

Mapy mobility látek v půdním prostředí a specifické zranitelnosti podzemních vod pro emergentní organické mikropolutanty:

1,3-diphenylguanidin, triethylcitrát, kyselina naftalen-2-sulfonová, kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová, 4-acetamidoantipyrin, 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina

Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., MSc. Alina Sadchenko, Ph.D., Ing. Miroslav Fér, Ph.D., Ing. Martin Kočárek, Ph.D., Ing. Antonín Nikodem, Ph.D., Ing. Helena Švecová, Ph.D., Ing. Aleš Klement, Ph.D., Ing. Jindřich Zelinka, doc. Mgr. Roman Grabic, Ph.D., Mgr. Markéta Ackermanová

Specializovaná mapa s odborným obsahem

2025

Autoři:

Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., Český hydrometeorologický ústav

prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., Česká zemědělská univerzita v Praze

MSc. Alina Sadchenko, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Ing. Miroslav Fér, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Martin Kočárek, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Antonín Nikodem, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Helena Švecová, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Ing. Aleš Klement, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze

Ing. Jindřich Zelinka, Česká zemědělská univerzita v Praze

doc. Mgr. Roman Grabic, Ph.D., Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Mgr. Markéta Ackermanová, Český hydrometeorologický ústav

Oponenti:

Mgr. Petr Ferbar, Povodí Labe s.p.

Mgr. Tomáš Gremlica, Ministerstvo zemědělství, odbor vodohospodářské politiky

Specializovaná mapa s odborným obsahem byla schválena Ministerstvem zemědělství (osvědčení č. 2/2025)

© Český hydrometeorologický ústav, 2025

ISBN 978-80-7653-085-0 (pdf)

Obsah

1. Úvod 4
2. Cíl 4
3. Metody 5
3.1. Výběr látek, jejich sorpce v reprezentativních půdách ČR a rovnice pro předpověď sorpčních koeficientů na základě znalosti relevantních půdních vlastností 5
3.2. Mapy koeficientů K_F a tříd mobility látek v půdách 8
3.3. Specifická zranitelnost podzemních vod 10
4. Novost mapy 10
5. Rozsah využití mapy 10
6. Přínos mapy 11
7. Seznam literatury 11
8. Seznam publikací, které předcházely zpracování map 13
9. Oponenti 13
10. Dedikace 13
Přílohy 14

1. Úvod

Ochrana vodních zdrojů je důležitá pro udržení zdravého životního prostředí i udržení životní úrovně obyvatel ČR. Nejen nedostatek vody ale i špatná kvalita vody ve vodních zdrojích se může stát limitujícím faktorem pro rozvoj společnosti. Organické mikropolutanty různého původu jsou dnes běžnými látkami nacházejícími se v podzemních vodách ČR (ČHMÚ, 2025). Pro zajištění ochrany jakosti podzemních vod je vhodné znát oblasti, kde je podzemní voda zranitelná vůči negativním vlivům antropogenního původu. V tomto smyslu může být zranitelnost definována jako podstatná vlastnost systému podzemních vod, která závisí na jeho citlivosti vůči antropogenním a/nebo přírodním vlivům (Vrba and Zaporozec, 1994).

Zdrojem kontaminace podzemních vod často bývá zemědělská půda, která může být kontaminována různými organickými mikropolutanty. Mezi běžné mikropolutanty patří různé pesticidy používané k ochraně rostlin a hubení plevele, a jejich metabolity (např. Alaoui et al., 2024; Sabzevari and Hofman, 2022; Sadchenko et al., 2025). Dalším zdrojem kontaminace může být závlahová voda. V oblastech s nedostatkem vody lze vyčištěnou odpadní vodu, která může obsahovat například léčiva, hormony, produkty osobní péče a různé průmyslové chemikálie, použít přímo k zavlažování (např. Kodešová et al., 2024; Mordechay et al., 2021, 2022). Avšak i říční voda, která se často používá k zavlažování, může být kontaminována sloučeninami vypouštěnými do řek spolu s vyčištěnou odpadní vodou, odtokem ze zemědělské nebo městské půdy atd. (např. Høisæter at Breedveld, 2022; Schulze et al., 2019; Kuntz et al., 2024; Xu et al., 2025). Akumulace různých znečišťujících látek v půdě nebo jejich vyplavování z půdy a migrace do podzemních vod závisí na klimatických podmínkách, vlastnostech prostředí vadózní zóny a chování sloučenin, tj. jejich sorpci do půd a sedimentů a stabilitě v prostředí půda-voda. Sorpce je klíčovou vlastností stabilních sloučenin, která určuje jak jejich akumulaci v půdě (tj. stupeň kontaminace půdy těmito látkami), tak jejich šíření ve vadózní zóně.

Zranitelnost podzemních vod, která zohledňuje pouze přírodní podmínky a vlastnosti půdního a horninového prostředí je nazývána obecnou zranitelností. Pokud se při zpracování navíc zohlední chování a interakce dané látky s půdním a horninovým prostředím (např. sorpce a perzistence látky v půdách), hovoříme o specifické zranitelnosti podzemních vod danou látkou.

2. Cíl

Cílem bylo: 1) identifikovat reprezentativní mikropolutanty s různým sorpčním chováním v půdách zavlažovaných říční vodou, které se navíc díky jejich širokému využití mohou do půdy dostávat i z jiných zdrojů; 2) vyhodnotit sorpci těchto sloučenin v reprezentativních půdách ČR; 3) odvodit rovnice pro predikci Freundlichových sorpčních koeficientů (K_F) s využitím vlastností půdy. 4) vytvořit mapy koeficientů K_F, které budou dále použity k posouzení pravděpodobné mobility studovaných sloučenin v půdách v zavlažovaných oblastech. 5) zkonstruovat mapy specifické zranitelnosti podzemních vod těmito látkami, které indikují možný průnik těchto látek do podzemních vod po jejich vstupu na zemědělskou půdu. Výsledný soubor map má poskytnou informace jak o zvýšeném nebezpečí kontaminace podzemních vod, tak nebezpečí akumulace látek v půdním prostředí. Zatímco v oblastech s nízkou sorpcí polutantů existuje zvýšené nebezpečí jejich perkolace do podzemních vod, v oblastech s vysokou sorpcí může dojít k jejich akumulaci v půdách. Tyto mapy tak mohou být použity jak pro monitoring a ochranu podzemních vod, tak i zemědělských půd.

3. Metody

3.1. Výběr látek, jejich sorpce v reprezentativních půdách ČR a rovnice pro předpověď sorpčních koeficientů K_F na základě znalosti relevantních půdních vlastností

Látky byly vybrány na základě výsledků našeho předběžného screeningu provedeného v roce 2023, který byl zaměřen na zmapování výskytu mikropolutantů v povrchových a podzemních vodách a půdách v intenzivně zavlažovaných zemědělských oblastech. Hlavní kritéria pro výběr látek byla: 1) Častý výskyt v analyzovaných vzorcích vod a půd; 2) Jiný zdroj kontaminace, než je ochrana rostlin na dotčených půdách; 3) Rozdílné fyzikálně-chemické charakteristiky sloučenin určující jejich chování v půdním prostředí, a tak i rozdílný potenciál akumulace látek v půdě, či naopak kontaminace podzemních vod. Důraz byl především kladen na látky s vyšším potenciálem migrovat ve vadózní zóně. Dále se jednalo o látky, které se mohou do půdy, díky jejich širokému využití, dostávat i z více zdrojů, např. emisemi těchto látek z průmyslu, nepesticidní aplikací komerčních produktů využívaných jak v zastavěném, tak zemědělském území atd. Pomocí necílené analýzy bylo identifikováno šest sloučenin (tab. 1).

Tab. 1. Vybrané látky a jejich použití.

Látka	CAS číslo	Molekulová hmotnost (g mol^{-1})	log K_{ow}	Rozpustnost ve vodě (mg L^{-1})	Použití
1,3-diphenylguanidin	102-06-7	211,268	2,67 - 3,13	377	Urychlovač vulkanizace, pryž, pneumatiky, stavební materiály
triethylcitrát	77-93-0	276,285	0,19 - 1,17	10700	Změkčovadlo, rozpouštědlo a emulgátor, potraviny, léčiva, kosmetika
kyselina naftalen-2-sulfonová	120-18-3	208,234	-0,38 - 2,14	328	Meziprodukt barviva, povrchově aktivní látka, dispergační činidlo
kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová	941-57-1	215,3	1,5	rozpustná	Meziprodukt barviva / pigmentu, pryž, pneumatiky
4-acetamidoantipyrin	83-15-8	245,282	1,01	4430	Metabolit metamizolu (analgetikum)
6:2 fluorotelomersulfonová kyselina	27619-97-2	428,17	3,9	658000	Hasicí pěny, pokovování

Vzhledem k tomu, že se tyto sloučeniny nacházely v životním prostředí, jedná se o relativně stabilní sloučeniny. Pro stanovení jejich mobility v různých půdních prostředích byla použita metodika dříve popsaná Kodešovou et al. (2023) a Kodešem et al. (2023). Pro každou látku a 16 reprezentativních půd ČR (označenými písmeny B–Z) byly provedeny standardní sorpční experimenty. Body sorpčních izoterem popisující vztah mezi rovnovážnými koncentracemi látky rozpuštěné ve vodě a sorbované na půdní částice byly vyhodnoceny při 5 počátečních koncentracích aplikované látky a 2 opakování pro každou koncentraci. Následně byly podle rovnice (1) vypočteny Freundlichovy sorpční izotermy.

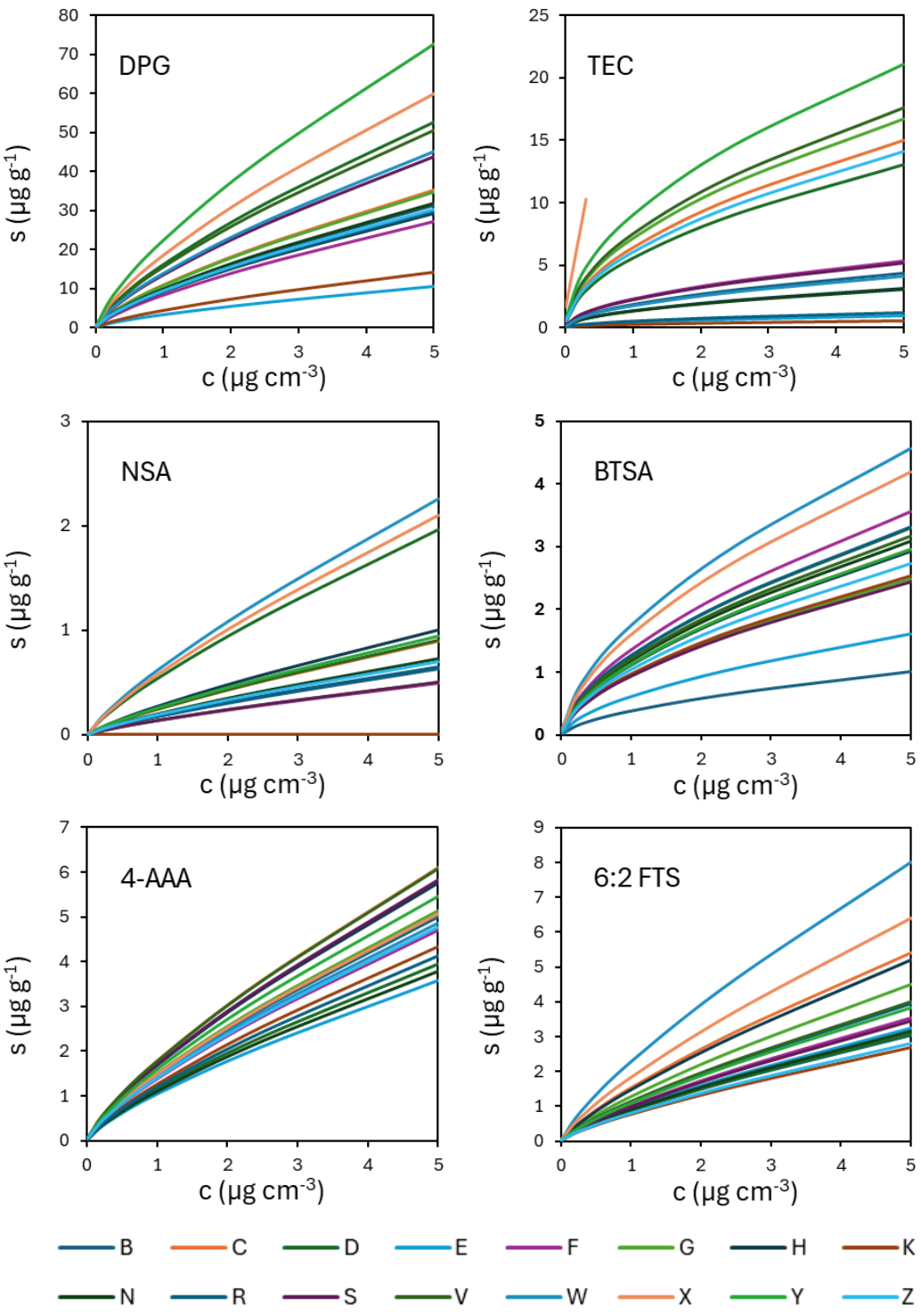
$$s = K_F . c^{1/n} \quad (1)$$

kde s (µg g^{-1}) je koncentrace látky sorbované na půdní částice, c (µg cm^{-3}) je koncentrace látky rozpuštěné ve vodě, K_F (cm$^{3/n}$µg$^{1-1/n}$g^{-1}) je Freundlichův sorpční koeficient a n (-) je exponent. Protože hodnoty K_F závisely na hodnotách n, nebylo by matematicky správné přímo použít tyto hodnoty K_F k posouzení vlivu vlastností půdy na jejich sorpční afinitu. Proto byl nejprve pro každou sloučeninu vypočítán průměrný koeficient n_{avg}. Poté byla k proložení experimentálních datových bodů a k získání nové sady hodnot K_F opět použita Freundlichova rovnice (1), ve které bylo n fixováno na hodnotu n_{avg} (tab. 2, obr. 1)

Tab. 2. Freundlichovy sorpční koeficienty, K_F (cm$^{3/n}$ µg$^{1-1/n}$ g^{-1}), pro průměrné hodnoty n, n_{avg} (-), vyhodnocené pro 16 reprezentativních zemědělských půd v ČR (B–Z) a 6 vybraných látek: 1,3-diphenylguanidin (DPG), triethylcitrát, (TEC), kyselina naftalen-2-sulfonová (NSA), kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová (BTSA), 4-acetamidoantipyrin (4-AAA) a 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina (6:2 FTS).

Látka			DPG	TEC	NSA	BTSA	4-AAA	6:2 FTS
n_{avg}			1,37	1,90	1,25	1,68	1,31	1,28
Kód	Půdní typ	Půdní druh	K_F					
B	kambizem modální	písčitohlinitý	9,67	1,85	0,17	0,39	1.46	0.87
C	šedozem modální	hlinitý	11,0	6,42	0,25	1,14	1.79	1.54
D	hnědozem modální	jílovitohlinitý	16,3	5,59	0,54	1,26	1.15	0.87
E	regozem arenická	hlinitopísčitý	3,29	0,40	–	0,62	1.04	0.93
F	fluvizem modální	hlinitý	8,41	2,28	0,14	1,37	1.37	1.01
G	fluvizem modální	hlinitý	10,7	7,14	0,14	0,96	1.50	1.29
H	kambizem modální	jílovitohlinitý	9,05	1,35	0,28	1,12	1.68	1.48
K	černozem arenická	hlinitý	4,38	0,24	–	0,97	1.26	0.76
N	regozem arenická	písčitohlinitý	9,85	1,31	0,20	1,18	1.11	0.90
R	fluvizem modální	písčitohlinitý	9,20	0,52	0,18	1,27	1.21	1.13
S	hnědozem modální	hlinitý	13,6	2,22	0,14	0,94	1.70	0.98
V	černozem modální	jílovitohlinitý	15,7	7,53	0,25	1,22	1.77	1.14
W	kambizem dystrická	jílovitohlinitý	13,9	1,77	0,62	1,75	1.42	2.28
X	černice modální	jílovitohlinitý	18,5	19,4	0,58	1,61	1.48	1.82
Y	fluvizem modální	jílovitý	22,5	9,03	0,26	1,13	1.60	1.09
Z	černozem arenická	písčitohlinitý	9,38	6,03	0,19	1,05	1.39	0.80
Průměr			11,6	4,57	0,28	1,12	1,43	1,18
Směrodatná odchylka			5,0	4,91	0,17	0,33	0,24	0,42
Maximum			22,5	19,4	0,62	1,75	1,79	2,28
Minimum			3,29	0,24	0,14	0,39	1,04	0,76
Rozsah			19,2	19,2	0,49	1,36	0,74	1,52

Poznámka: pro NSA v půdách E a K nebylo možné sorpční izotermy vyhodnotit, protože sorpce byla velmi nízká a výsledné ustálené koncentrace v roztoku byly velmi variabilní.



Obr. 1. Sorpční izotermy vyhodnocené pro 16 reprezentativních zemědělských půd v ČR (B–Z) a 6 vybraných látek: 1,3-diphenylguanidin (DPG), triethylcitrát, (TEC), kyselina naftalen-2-sulfonová (NSA), kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová (BTSA), 4-acetamidoantipyrin (4-AAA) a 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina (6:2 FTS).

Pro získání rovnic pro odhad hodnot K_F na základě vlastností půdy byly použity vícenásobné lineární regrese. Byly zvažovány dva přístupy: A) zahrnutí pouze vlastností dostupných pro zemědělské půdy České republiky (Žížala et al., 2022), tj. obsahu organického uhlíku (C_{ox}), obsah jílu a pH_{KCl}; a B) využití všech naměřených vlastností půdy, které byly dále

dostupné pouze ve dvou vymezených oblastech zavlažovaných říční vodou, pro které bylo provedeno mapování půdních vlastností. Je třeba poznamenat, že některé datové sady nevykazovaly normální rozdělení, a proto byly logaritmicky transformovány. Výsledné rovnice jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3. Rovnice (základní A a rozšířené B) pro předpověď koeficientů K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) s použitím A) pouze obsahu oxidovatelného organického uhlíku, Cox (%), obsahu jílu (%) a pH_{KCl} , které jsou dostupné v půdních mapách (Žížala et al., 2022) a B) všech relevantních vlastností půdy včetně kationtové výměny kapacity, KVK ($mmol^{+}$ 100 g^{-1}), magnetické susceptibility měřené při vysoké frekvenci, χHF (–), a indexu potenciální smáčivosti, PWI (–) vyhodnocené z DRIFT spekter.

Látka	Model	Rovnice
1,3-diphenylguanidin	A	$K_{F\text{-}DPG}$ = 0,173 + 0,395 jíl + 1,48 Cox
	B	$K_{F\text{-}DPG}$ = 0,168 + 0,319 jíl + 0,256 KVK
triethylcitrát	A	$K_{F\text{-}TEC}$ = 2,718 ^ (-3,74 + 0,682 pH_{KCl} + 0,0347 Jíl)
	B	$K_{F\text{-}TEC}$ = 2,718 ^ (-3,98 + 0,719 pH_{KCl} + 0,0532 KVK)
kyselina naftalen-2-sulfonová	A	$K_{F\text{-}4\text{-}AAA}$ = 1,09 - 0,0679 Cox + 0,0492 pH_{KCl} + 0,00740 jíl
	B	$K_{F\text{-}4\text{-}AAA}$ = 2,62 - 0,443 Cox + 0,0387 KVK + 0,295 ln(PWI)
kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová	A	$K_{F\text{-}NSA}$ = 2,718 ^ (-2,36 + 0,427 Cox + 0,0262 jíl - 0,0644 pH_{KCl})
	B	$K_{F\text{-}NSA}$ =2,718 ^ (-3,19 + 0,497 Cox + 0,0217 jíl + 0,0143 χHF)
4-acetamidoantipyrin	A	$K_{F\text{-}BTSA}$ = 0,462 + 0,318 Cox + 0,00777 jíl
	B	$K_{F\text{-}BTSA}$ = 1,73 + 0,0284 KVK + 0,336 ln(PWI) + 0,00682 χHF
6:2 fluorotelomersulfonová kyselina	A	$K_{F\text{-}6:2\ FTS}$ = 2,718 ^ (-0,261 + 0,249 Cox)
	B	$K_{F\text{-}6:2\ FTS}$ = 2,718 ^ (2,34 - 0,283 Cox + 0,0297 KVK + 0,595 ln(PWI))

Základní půdní vlastnosti (C_{ox}, jíl a pH_{KCl}) mohou určovat sorpci díky hydrofobním interakcím mezi molekulami látek a organickou hmotou, či dalším silám, jako jsou vodíkové vazby, π-π interakce a Van der Waalsovy síly. Reakce půdy (pH) určuje disociaci látek. Kombinace obsahu jílu a organického uhlíku indikuje sorpční místa pro sorpci látek v kationtové formě. V těchto rovnicích dále vystupuje běžně stanovovaná kationtová výměnná kapacita (KVK), která zpřesňuje informaci o sorpční kapacitě pro látky v kationtové formě. Navíc byl pomocí difúzní reflexní infračervené spektroskopie vyhodnocen Index potenciální smáčivosti (PWI). Hodnota PWI udává stupeň hydrofobicity organické hmoty v půdě, která může hrát významnou roli v sorpci studovaných organických sloučenin prostřednictvím hydrofobních interakcí. Dále byla při vysoké frekvenci (4,7 kHz) pomocí měřicího přístroje Bartington MS2 a senzoru MS2B (https://www.bartington.com/products/ms2-ms3/) měřena magnetická susceptibilita, která může indikovat sorpční místa pro látky v aniontové formě (tab. 4).

3.2. Mapy koeficientů K_F a tříd mobility látek v půdách

Vzhledem k tomu, že k získání rovnic pro predikci hodnot K_F byly použity dva přístupy (A a B), byly dva přístupy použity také ke generování map hodnot K_F s využitím: 1) modelů A pro predikci hodnot K_F a půdní mapy České republiky a související databáze (Žížala et al., 2022); a 2) modelů A a B a map všech naměřených půdních vlastností generovaných na základě našeho průzkumu v zavlažovaných oblastech u řeky Dyje a Labe. Mapy půdních vlastností (obsahu Cox a jílu, a pH_{KCL}) s vysokým rozlišením 20 m $pixel^{-1}$ (Žížala et al., 2022) byly vytvořeny pomocí metod digitálního mapování půdy v kombinaci s rozsáhlou databází starších

a současných charakteristik půdy. Mapy půdních vlastností naměřených v zavlažovaných oblastech (rozlišení 20 m pixel^{-1}) byly vytvořeny na základě polygonů půdních jednotek vymezených v rámci Komplexního průzkumu zemědělských půd (https://kpp.vumop.cz/?core=app). Každému polygonu byly přiřazeny průměrné hodnoty zjištěné v daném polygonu. Statistické charakteristiky souborů vlastností půd použitých pro sorpční experimenty, a půd vzorkovaných v rámci půdního průzkumu v zavlažovaných oblastech v Podyjí a Polabí jsou pro srovnání uvedeny v tab. 4.

Tab. 4. Průměr, směrodatná odchylka, maximum, minimum a rozsah měřených vlastností půd použitých pro sorpční experimenty a pro mapování půdních vlastností v Podyjí a Polabí: pH_{H2O}, pH_{KCl}, pH_{CaCl2} (ISO, 10390:2005), obsah Cox (%) (Skjemstad and Baldock, 2008), písku (%), prachu (%) a jílu (%) (Gee and Or 2002), kationtová výměnná kapacita – KVK (mmol^{+} 100 g^{-1}) (Bower and Hatcher 1966), index potenciální smáčivosti – PWI (Pavlů et al., 2023), a magnetická susceptibilita měřená pří nízké (0,47 kHz) – χLF a vysoké (4,7 kHz) – χHF frekvenci (Pavlů et al., 2022).

	pH_{H2O}	pH_{KCl}	pH_{CaCl2}	Cox	Písek	Prach	Jíl	KVK	PWI	χLF	χHF
Půdy pro sorpční experimenty											
Průměr	6,70	5,68	6,05	1,52	40,3	36,5	23,2	15,7	0,025	34,2	33,0
Sm. odchylka	1,04	1,22	1,07	0,65	23,8	17,9	9,7	6,8	0,012	24,5	22,3
Maximum	7,97	7,48	7,61	3,14	82,3	68,4	39,8	29,2	0,058	88,4	83,5
Minimum	5,30	4,19	4,67	0,58	7,0	7,9	9,8	5,0	0,011	8,6	9,9
Rozsah	2,66	3,28	2,95	2,56	75,3	60,5	29,9	24,2	0,047	79,8	73,6
Půdy v Podyjí											
Průměr	6,95	6,19	5,97	1,60	37,1	39,3	23,5	17,5	0,017	44,7	40,9
Sm. odchylka	0,70	0,61	0,76	0,39	21,3	14,9	8,05	7,14	0,007	27,0	23,3
Maximum	8,11	7,04	7,24	2,43	74,8	65,3	40,1	34,8	0,046	98,1	89,2
Minimum	5,63	5,00	4,44	0,82	6,60	16,7	7,95	8,30	0,004	9,71	9,99
Rozsah	2,48	2,04	2,80	1,61	68,2	48,6	32,2	26,5	0,042	88,4	79,2
Půdy v Polabí											
Průměr	7,33	6,47	6,54	1,19	57,0	22,5	20,5	11,2	0,018	15,79	14,7
Sm. odchylka	1,01	1,17	0,98	0,53	21,7	11,84	12,4	6,94	0,006	7,90	7,61
Maximum	8,28	7,58	7,49	2,38	85,3	48,83	50,5	30,2	0,030	36,81	34,7
Minimum	5,15	3,95	4,24	0,50	11,3	6,00	6,83	2,51	0,010	4,72	4,45
Rozsah	3,12	3,63	3,24	1,88	74,0	42,83	43,7	27,6	0,020	32,08	30,3

Pro výpočet prostorově rozložených hodnot K_F byly použity prostorově rozložené hodnoty půdních vlastností. Predikční mapy byly vytvořeny pomocí rastrových nástrojů v ArcGIS verze 10.8.1 (ESRI). Výsledné mapy byly použity k vymezení oblastí se zvýšeným potenciálem vyplavování studovaných látek směrem k podzemní vodě. Pro tento účel bylo specifikováno šest tříd, které charakterizují potenciální mobilitu látek v půdách: $K_F < 2{,}5$ – velmi vysoká mobilita, $2{,}5 \leq K_F \leq 5$ – vysoká mobilita, $5 < K_F \leq 10$ – střední mobilita, $10 < K_F \leq 20$ – nízká mobilita, $20 < K_F \leq 40$ – velmi nízká mobilita, $40 < K_F$ – žádná mobilita.

Mapy půdních vlastností, vyhodnocených koeficientů K_F i tříd mobility jsou uvedeny v přílohách a jsou k dispozici i v digitální formě. Z měřených dat (tab. 2) i vyhodnocených map jasně vyplývá, že kyselina naftalen-2-sulfonová (NSA), kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová

(BTSA), 4-acetamidoantipyrin (4-AAA) a 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina (6:2 FTS) jsou ve všech půdách velmi mobilní a hrozí zvýšené nebezpečí perkolace do podzemních vod.

3.3. Specifická zranitelnost podzemních vod

Zranitelnost podzemních vod vybranými látkami byla vyhodnocena pomocí modifikované metody DRASTIC, která byla podrobně popsána Kodešem et al., (2023). Tato metodika vychází z všeobecně používané metody pro odhad obecné zranitelnosti DRASTIC (Aller et al., 1987), která patří mezi tzv. Index and Overlay metody. Metoda DRASTIC byla vyvinuta ve dvou variantách. Jedna pro zranitelnost látkami, které neinteragují s půdním prostředím a dochází u nich ke konzervativnímu transportu, tj. např. dusičnany. Druhá varianta byla modifikována pro pesticidy, tj. obecně organické látky, které s půdním prostředím interagují. Tyto dvě varianty se liší přiřazením různých vah jednotlivým parametrům. Největší váhu mají v případě varianty pro pesticidy hloubka hladiny podzemní vody a materiál půdního pokryvu. Naopak nejmenší důležitost mají hydraulické parametry kolektoru. Tato druhá varianta byla vybrána pro aplikaci konstrukce map obecné zranitelnosti podzemních vod organickými mikropolutanty na území ČR v rozlišení 100 m pixel^{-1}. Metoda DRASTIC používá 7 vstupních parametrů:

D – depth to groundwater (hloubka hladiny podzemní vody) (m)

R – net recharge (dotace podzemních vod) (mm rok^{-1})

A – aquifer media (petrografie kolektoru)

S – soil media (materiál půdního pokryvu)

T – topography (sklonitost terénu) (%)

I – impact of the vadoze zone (vliv vadózní zóny)

C – hydraulic conductivity (hydraulická vodivost kolektoru) (m den^{-1})

Modifikace této metody popsaná Kodešem et al. (2023) spočívá v zahrnutí dalších dvou parametrů, které zohledňují sorpci a perzistenci látek v půdě, tj. indexu mobility I_K a indexu stability I_{ST}. Protože se u studovaných látek předpokládá vysoká perzistence v prostředí, byl uvážen jen index mobility I_K. Mapy specifické zranitelnosti podzemních vod jsou opět uvedeny v přílohách a jsou k dispozici v digitální formě.

4. Novost mapy

Do současné doby pro ČR neexistovaly mapy popisující sorpci (tj. mobilitu) studovaných emergentních organických mikropolutantů, které se například mohou vyskytovat v povrchové vodě využívané pro závlahu zemědělských půd a mapy specifické zranitelnosti podzemních vod zohledňující tuto mobilitu v půdním prostředí. Pro odhad sorpčních koeficientů byly navíc použity dříve nevyužívané půdní vlastnosti, které zpřesnily předpověď pro sloučeniny přítomné v aniontové formě.

5. Rozsah využití mapy

Studované látky se mohou do půdy dostávat z mnoha zdrojů, tj. nejen díky závlaze vodou z kontaminovaných recipientů nebo přímo z čistíren odpadních, ale i například po aplikaci kalů z čistíren odpadních vod, či emisemi z průmyslových oblastí, uvolňováním z produktů užívaných v intravilánu i extravilánu a podobně. Mapy specifické zranitelnosti podzemních vod zahrnující kromě běžně používaných charakteristik zranitelnosti podzemních vod i mobilitu v

půdním prostředí ČR, mohou být využity v rámci činností týkajících se správy povodí, v rámci analýzy rizik vodárenských systémů, k obecné ochraně podzemních vod a efektivního nastavení jejich monitoringu. Mapy popisující sorpci látek v půdním prostředí mohou podobným způsobem sloužit při ochraně a monitoringu zemědělských půd ČR.

6. Přínos mapy

Předpokládané přínosy map specifické zranitelnosti podzemních vod spočívají v prevenci znehodnocení jakosti podzemních vod zamezením vstupu specifických organických mikropolutantů do podzemních vod, vymezením zranitelných oblastí specifických pro jednotlivé látky a možnosti zacílit monitoring těchto látek v rizikových oblastech. Vzhledem k objemu podzemních vod, které by mohly být zasaženy těmito látkami a velmi pomalé dynamice změn v chemismu podzemních vod, je vhodné předcházet takovému znečištění, jelikož jejich následné odstranění by bylo pouze teoreticky možné za nepřiměřeně vysokých nákladů. Navíc by náprava stavu trvala dlouhé roky až desítky let. Z tohoto důvodu je zabránění vstupu cizorodých látek vyskytujících se v závlahových vodách do podzemních vod ve zranitelných oblastech tou nejméně nákladnou a z pohledu efektivity nejekonomičtější metodou. Zároveň umožní efektivní využití nákladů na monitoring podzemních vod tím, že monitoring těchto látek bude moci být cílen do zranitelných oblastí. Další vedlejší (neméně důležitý) přínos vyplývá z možné aplikace map popisujících sorpci zkoumaných látek v půdách ČR pro hodnocení kontaminace zemědělských půd. V tomto případě v oblastech, ve kterých jsou predikovány zvýšené sorpce emergentních mikropolutantů, může dojít k akumulaci látek v půdním prostředí, a tak k jeho znehodnocení. I v tomto případě mohou být tyto mapy použity pro regulaci zdrojů jejich kontaminace i pro zacílení monitoringu těchto látek v půdách ČR v případě, že by tyto zdroje byly v dané oblasti využity.

7. Seznam literatury

ALAOUI, A., CHRIST, F., ABRANTES, N., SILVA, V., GONZÁLEZ, N., GAI, L., HARKES, P., NAVARRO, I., DE LA TORRE, A., MARTÍNEZ, M.A., NORGAARD, T., VESTED, A., SCHLÜNSSEN, V., APARICIO, V.C., CAMPOS, I., PASKOVIC, I., POLIC PASKOVIC, M., GLAVAN, M., RITSEMA, C., GEISSEN, V. (2024): Assessing pesticide residue occurrence and risks in the environment across Europe and Argentina. *Environmental Pollution,* **363**(1), 125056

ALLER, L., BENNET, T., LEHER, J.H., PETTY, R.J., HACKETT, G. (1987): DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. EPA 600/2-87-035, 622 pp.

BOWER, C.A., HATCHER, J.T. (1966): Simultaneous determination of surface area and cation exchange capacity. *Soil Science Society of America, Proceedings*, **30**, 525–527.

ČHMÚ [online], (2025): Hydrologická ročenka České republiky 2024. [cit. 2025-11-07]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/documents/42501/444212/Hydrologicka_rocenka_CR_2024.pdf

ČSN 75 7143 (757143) Jakost vod. Jakost vody pro závlahu.

GEE, G.W., OR, D. (2002): Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc, Madison, USA, pp. 255–294.

HØISÆTER, Å., BREEDVELD, G.D. (2022): Leaching potential of per- and polyfluoroalkyl substances from source zones with historic contamination of aqueous film forming foam - a surfactant mixture problem. *Environmental Advances*, **8**, 100222.

KODEŠ, V., KODEŠOVÁ, R., ACKERMANOVÁ, M., GRABIC, R. (2023): Mapy specifické zranitelnosti podzemních vod vybranými organickými mikropolutanty původem z odpadních vod a kalů. Český hydrometeorologický ústav, ISBN 978-80-7653-065-2 (online.pdf), pp 42.

KODEŠOVÁ, R., FEDOROVA, G., KODEŠ, V., KOČÁREK, M., RIEZNYK, O., FÉR, M., ŠVECOVÁ, H., KLEMENT, A., BOŘÍK, A., NIKODEM, A., GRABIC, R. (2023): Assessment of potential mobility of selected micropollutants in agricultural soils of the Czech Republic using their sorption predicted from soil properties. *Science of The Total Environment*, **865**, 161174.

KODEŠOVÁ, R., ŠVECOVÁ, H., KLEMENT, A., FÉR, M., NIKODEM, A., FEDOROVA, G., RIEZNYK, O., KOČÁREK, M., SADCHENKO, A., CHROŇÁKOVÁ, A., GRABIC, R. (2024): Contamination of water, soil, and plants by micropollutants from reclaimed wastewater and sludge from a wastewater treatment plant. *Science of The Total Environment*, **907**, 167965.

KUNTZ, V., ZAHN, D., REEMTSMA, T. (2024): Quantification and occurrence of 39 tire-related chemicals in urban and rural aerosol from Saxony, Germany. *Environtal International*, **194**, 109189.

MORDECHAY, E.B., MORDEHAY, V., TARCHITZKY, J., CHEFETZ, B. (2021): Pharmaceuticals in edible crops irrigated with reclaimed wastewater: Evidence from a large survey in Israel. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, 126184.

MORDECHAY, E.B., MORDEHAY, V., TARCHITZKY, J., CHEFETZ, B. (2022): Fate of contaminants of emerging concern in the reclaimed wastewater-soil-plant continuum. *Science of The Total Environment*, **822**, 153574.

Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2020/741 ze dne 25. 5. 2020 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vod.

PAVLŮ, L, BALÍK, J., PROCHÁZKOVÁ, S., VOKURKOVÁ, P., GALUŠKOVÁ, I., SEDLÁŘ, O. (2023): Soil organic matter quality of variously managed agricultural soil in the Czech Republic evaluated using DRIFT spectroscopy. *Soil and Water Research*, **18**(4), 281–291.

PAVLŮ, L., KODEŠOVÁ, R., VAŠÁT, R., FÉR, M., KLEMENT, A., NIKODEM, A., KAPIČKA, A. (2022): Estimation of the stability of topsoil aggregates in areas affected by water erosion using selected soil and terrain properties. *Soil and Tillage Research*, **219**, 105348.

SABZEVARI, S., HOFMAN, J. (2022): A worldwide review of currently used pesticides' monitoring in agricultural soils. *Science of The Total Environment,* **812**, 152344.

SCHULZE, S., ZAHN, D., MONTES, R., RODIL, R., QUINTANA, J.B., KNEPPER, T.P., REEMTSMA, T., BERGER, U. (2019): Occurrence of emerging persistent and mobile organic contaminants in European water samples, *Water Research*, **153**, 80-90.

SKJEMSTAD, J.O., BALDOCK, J.A. (2008): Total and organic carbon. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), Soil Sampling and Method of Analysis. Taylor and Francis Group, USA, pp. 225–237.

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/118/ES ze dne 12. prosince 2006 o ochraně podzemních vod před znečištěním a zhoršováním stavu

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/3019 ze dne 27. listopadu 2024 o čištění městských odpadních vod

ŽÍŽALA, D., MINAŘÍK, R., SKÁLA, J., BEITLEROVÁ, H., JUŘIČKOVÁ, A., ROJAS, J.R., PENÍŽEK, V., ZÁDOROVÁ, T. (2022): High-resolution agriculture soil property maps from digital soil mapping methods, Czech Republic. *Catena*, **212**, 106024.

VRBA, J. and ZAPOROZEC, A. [Eds.] (1994): Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH International Contributions to Hydrogeology, Vol 16. Heise Verlag, Hannover, 131 pp.

XU, S., ZHANG K., LAO, J.Y., WANG, Q., JIANG, Y., LI, C., KWOK, J.K., CAO, G., CHEN, C., DENG, Y., LEUNG, K.M.Y. (2025): Rubber-derived chemicals in urban sewer networks and receiving waters: Fingerprints, driving factors and ecological impacts. *Water Research*, **282**, 123629.

Zákon č. 254/2001 Sb. zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) , ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 334/1992 Sb. zákon České národní rady o ochraně zemědělského půdního fondu, ve znění pozdějších předpisů

8. Seznam publikací, které předcházely zpracování map

KODEŠOVÁ, R., KODEŠ, V., SADCHENKO, A., KOČÁREK, M., FÉR, M., KLEMENT, A., ŠVECOVÁ, H., NIKODEM, A., GRABIC, R. (2025): Mobilita látek v půdách na území ČR, problematika emergentních organických mikropolutantů vyskytujících se v odpadních a povrchových vodách. Kabelková, I., Benáková, A., Nábělková, J., Bareš, V. (eds): Sborník příspěvků 16. bienální konference CzWA 2025, ISBN 978-80-908629-5-1, 445-448.

SADCHENKO, A., NOVÁKOVÁ, P., ŠVECOVÁ, H., KODEŠOVÁ, R., KODEŠ, V., KLEMENT, A., FÉR, M., NIKODEM, A., GRABIC, R. (2025): Výskyt a distribuce léčiv, pesticidů a jejich metabolitů mezi závlahovou vodou, půdou, plodinami a podzemní vodou v Polabí a Podyjí. Kabelková, I., Benáková, A., Nábělková, J., Bareš, V. (eds): Sborník příspěvků 16. bienální konference CzWA 2025, ISBN 978-80-908629-5-1, 449-452.

9. Oponenti

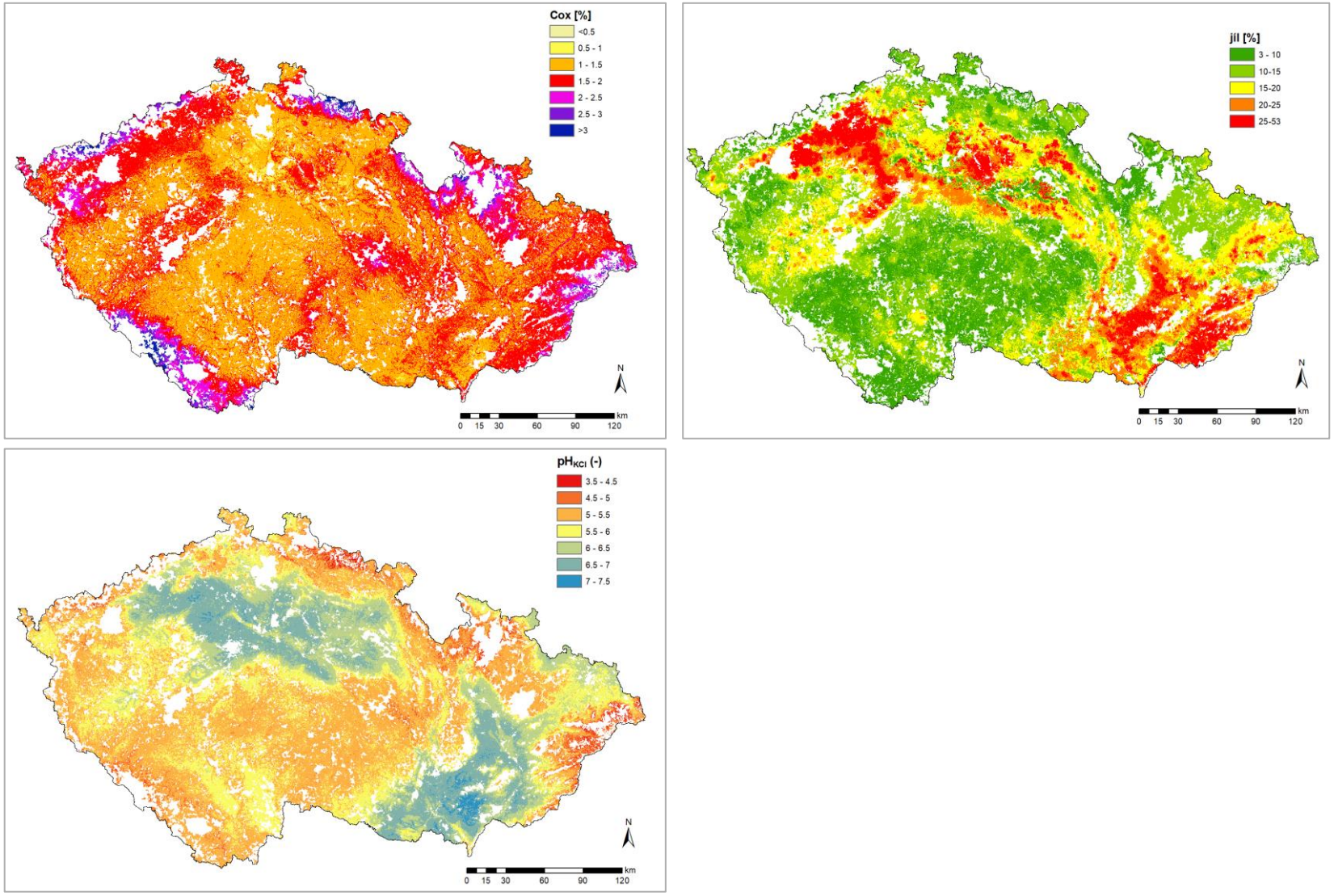
Posudek odborný: Mgr. Petr Ferbar, Povodí Labe, s.p.

Posudek ze státní správy: Mgr. Tomáš Gremlica, Ministerstvo zemědělství, odbor vodohospodářské politiky

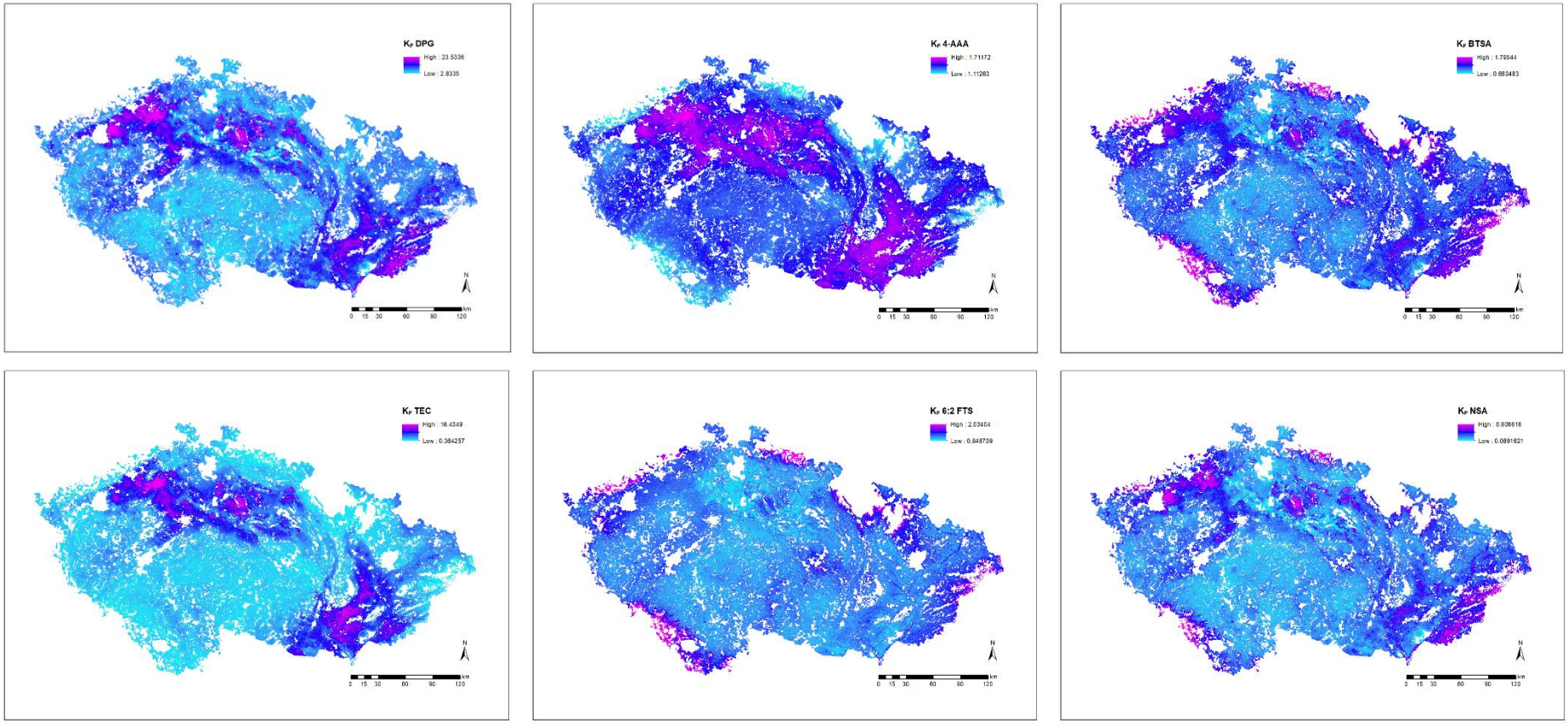
10. Dedikace

Tyto mapy vznikly za finanční podpory projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum QK23020018, Co nevíme o organickém znečištění zdrojů pitné a závlahové vody: Identifikace emergentních sloučenin pomocí necíleného screeningu.

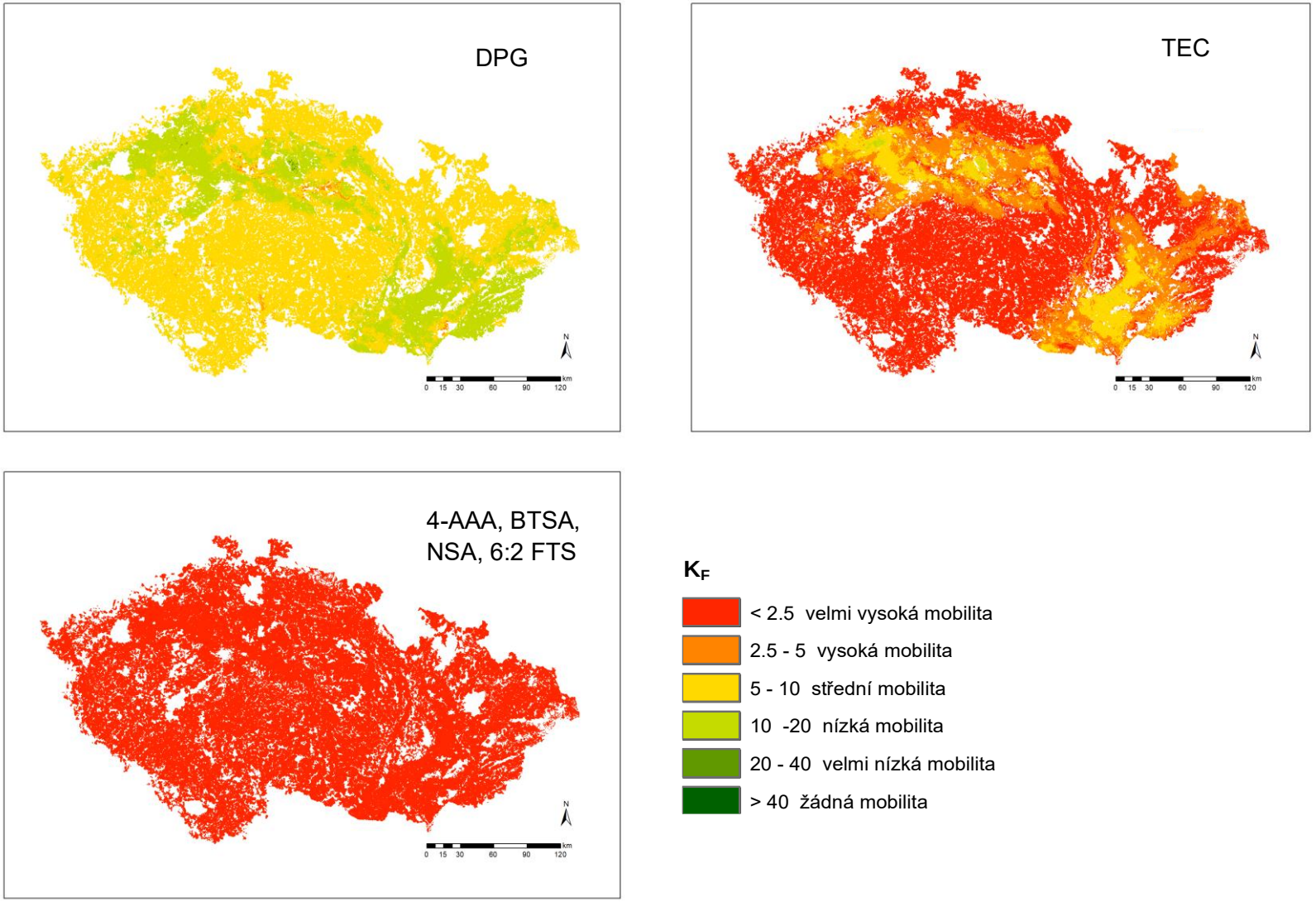
Přílohy



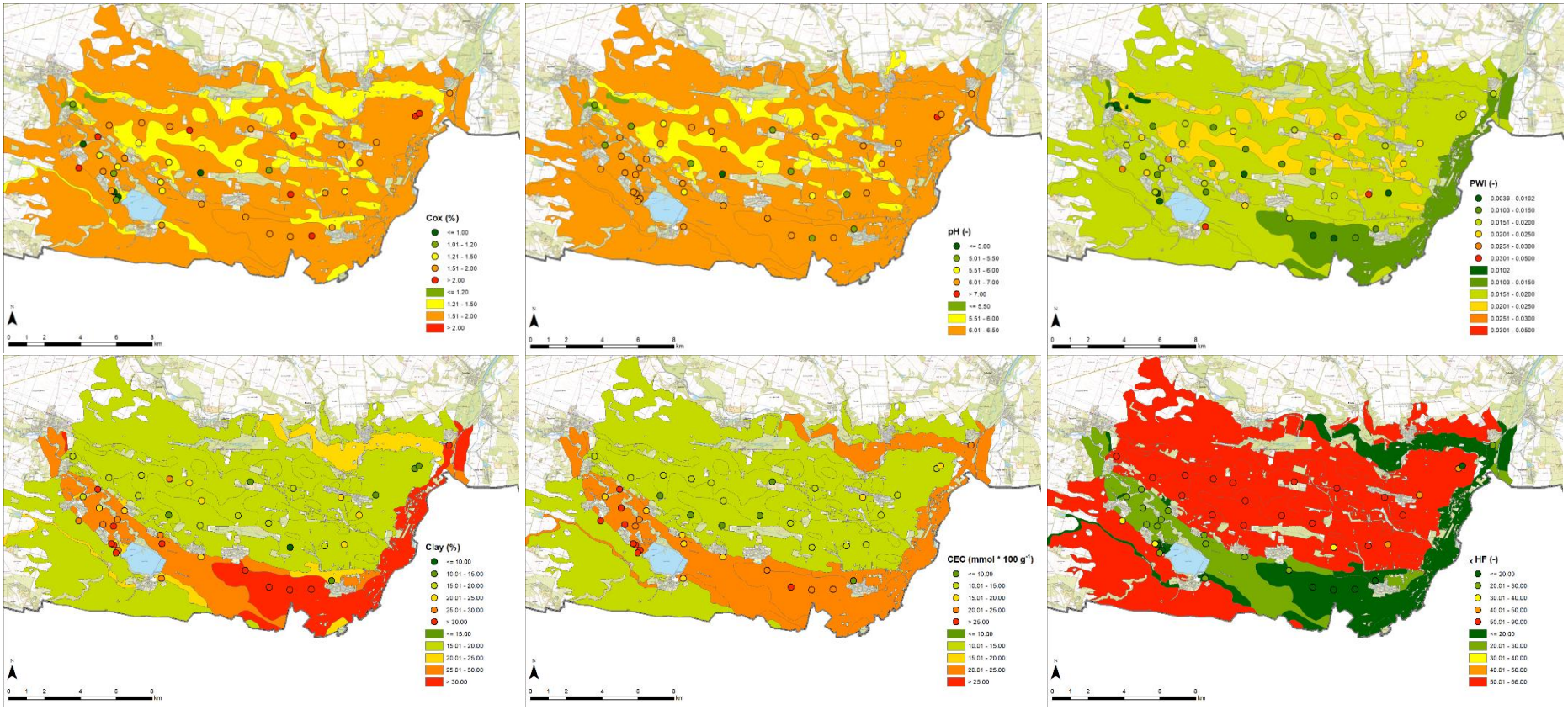
Obr. 2. Mapy půdních vlastností (Cox, jíl a pH_{KCl}) zemědělských půd České republiky (Žížala et al., 2022).



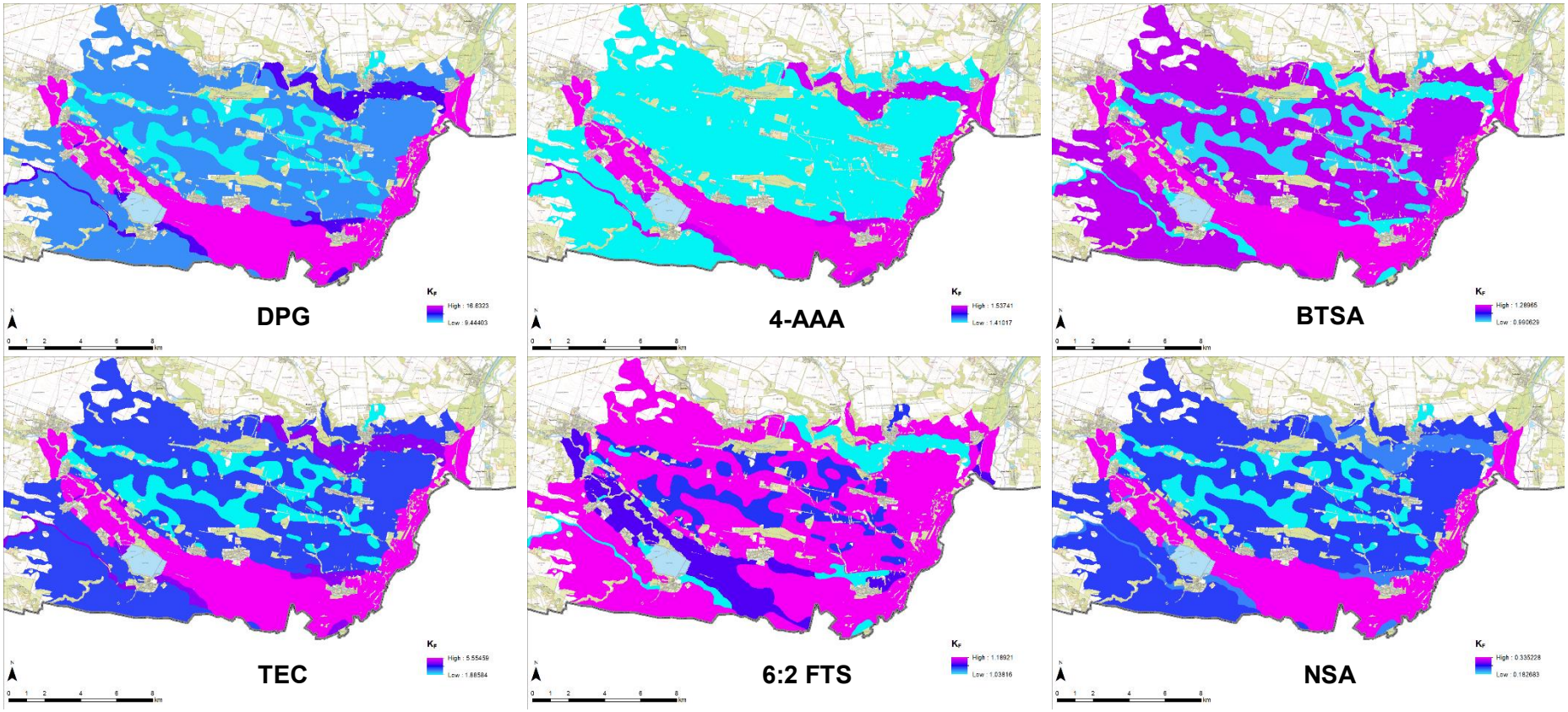
Obr. 3. Předpovězené rozložení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) pro zemědělské půdy České republiky s využitím základních rovnic (model A).



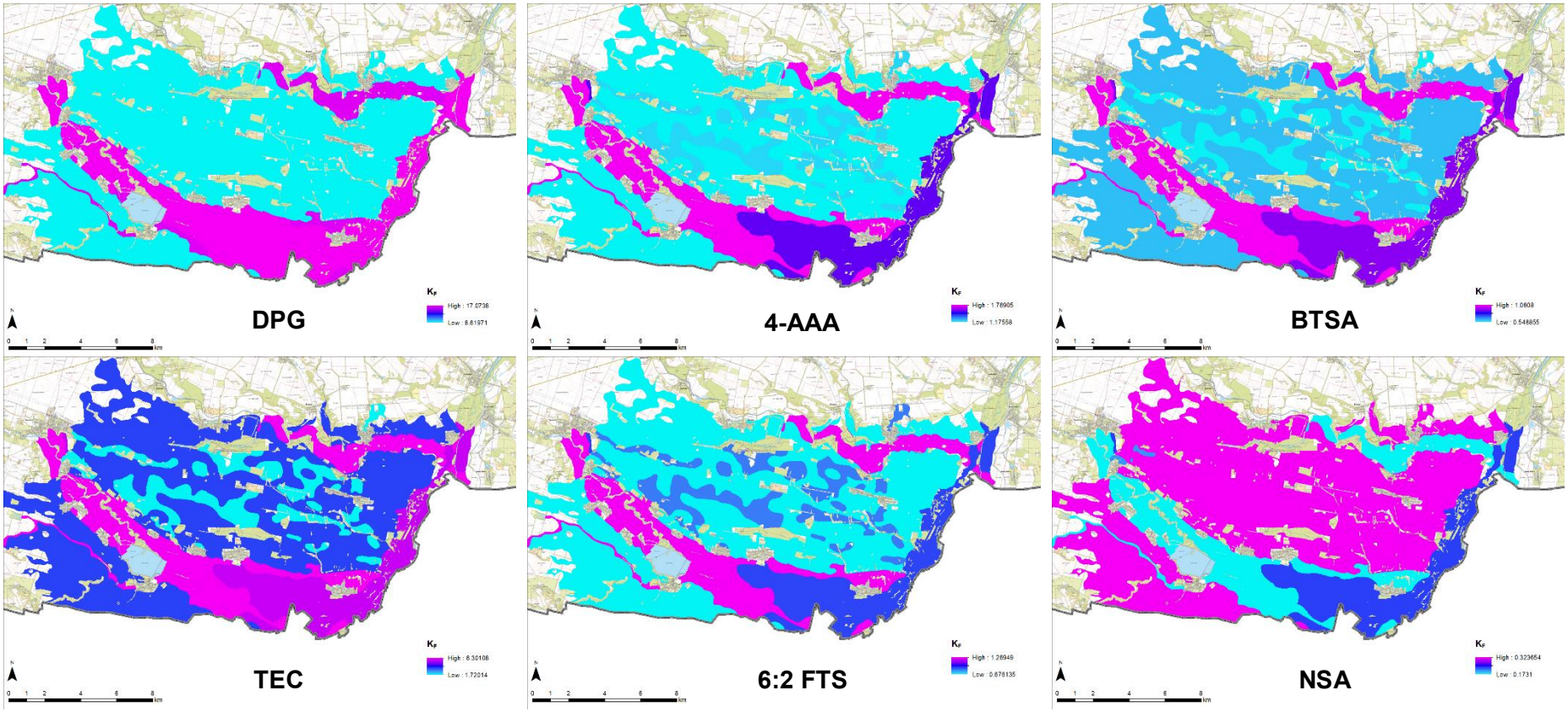
Obr. 4. Třídy mobility látek v zemědělských půdách České republiky odvozené z hodnot K_F ($cm^{3/n}\,\mu g^{1-1/n}\,g^{-1}$) (obr. 3).



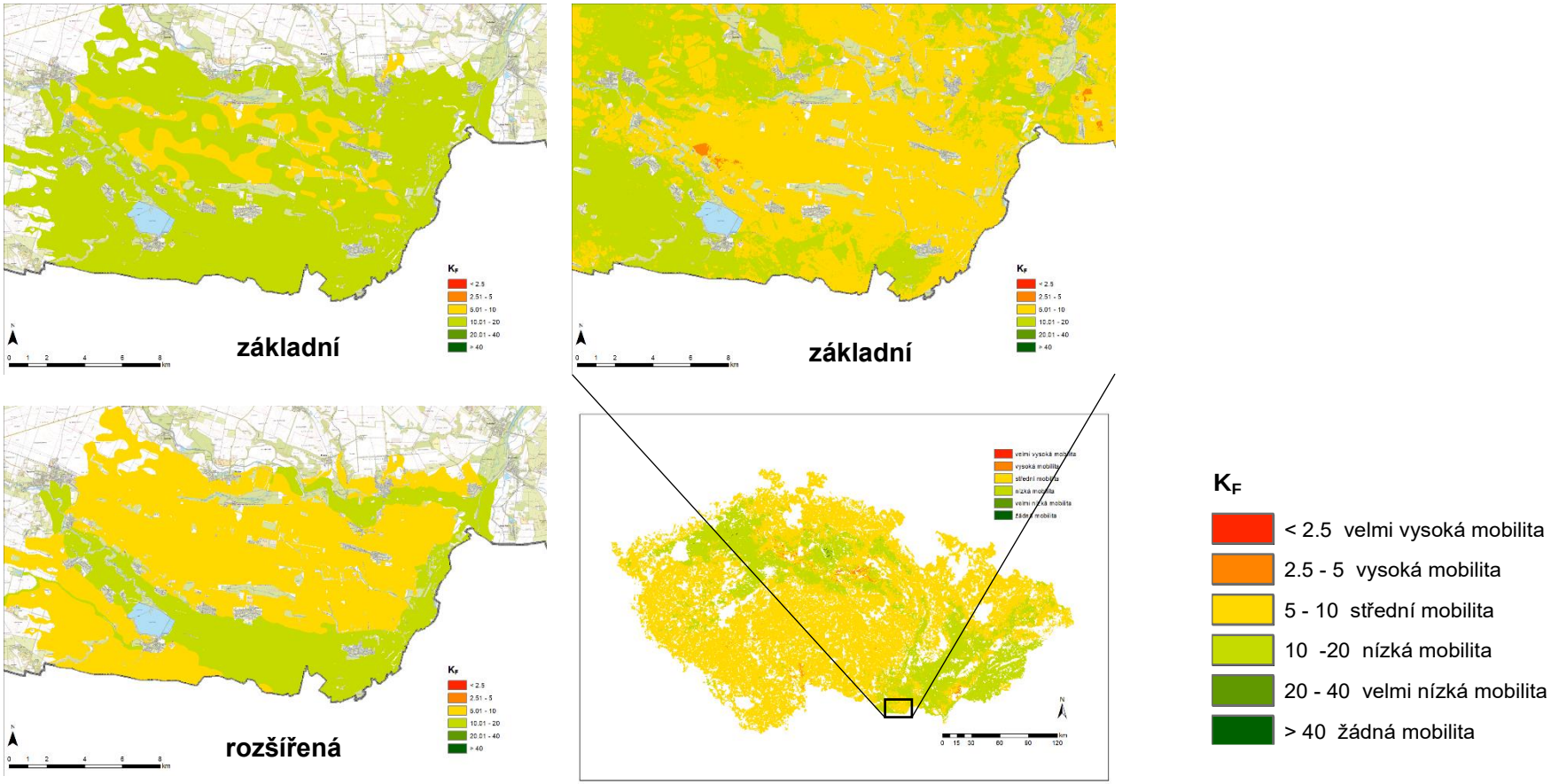
Obr. 5. Mapy půdních vlastností (Cox, jíl (clay), pH_{KCl}, KVK (CEC), PWI a χHF) v půdních vzorcích (body) a odvozených průměrných hodnot v jednotlivých půdních typech (polygony), které byly následně použity k predikci hodnot K_F v oblasti Dyje.



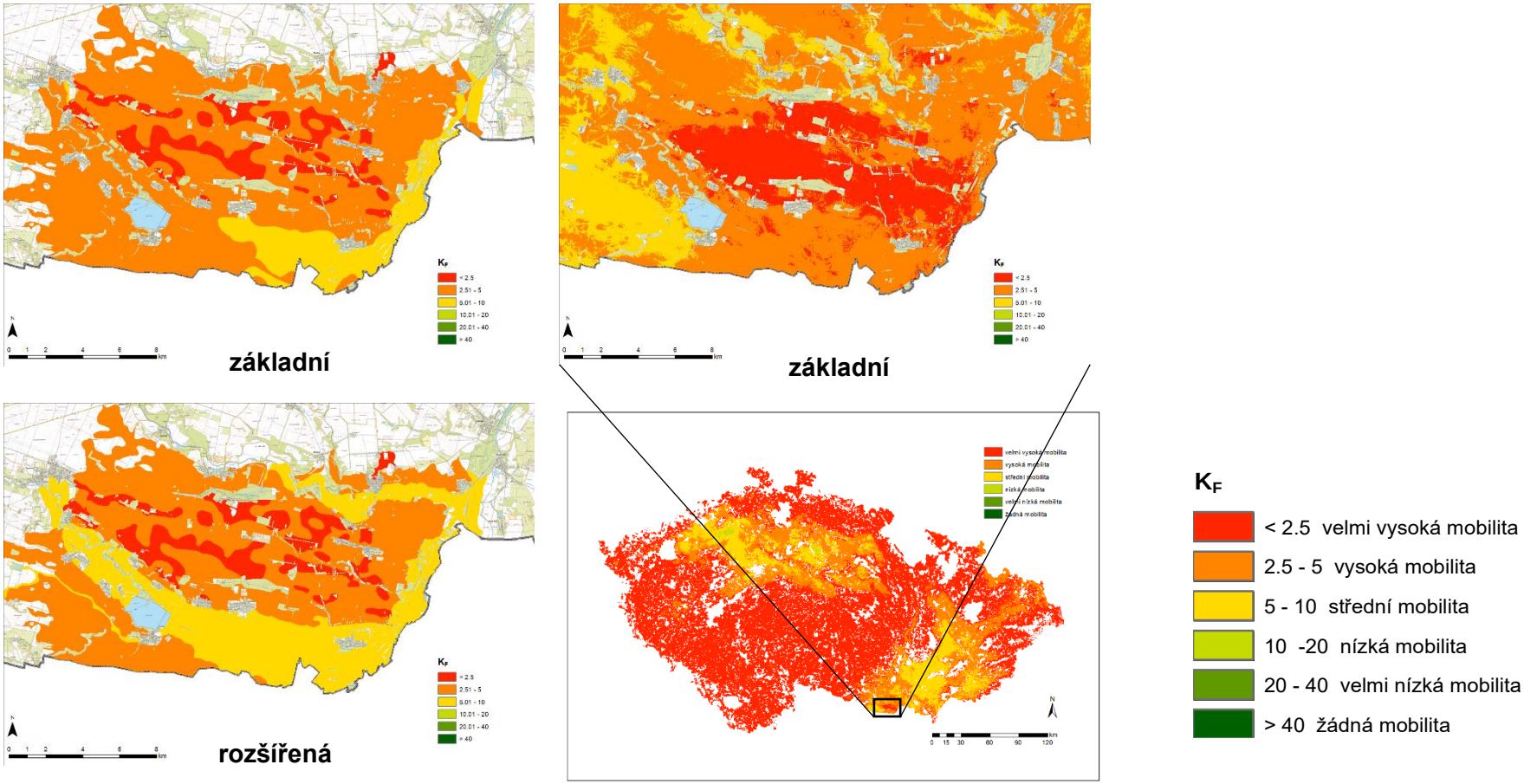
Obr. 6. Předpovězené rozložení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) s využitím základních rovnic (model A) pro oblast Dyje.



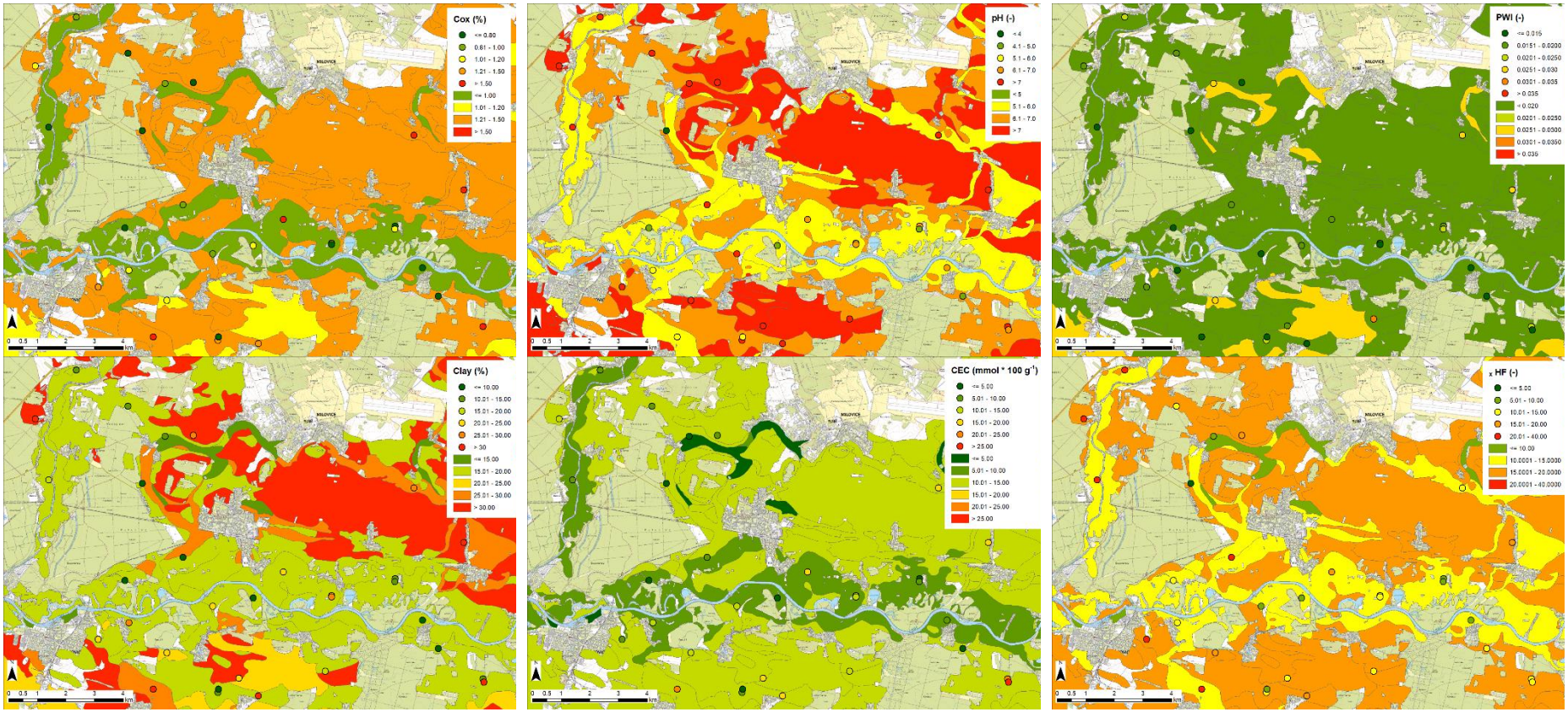
Obr. 7. Předpovězené rozložení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) s využitím rozšířených rovnic (model B) pro oblast Dyje.



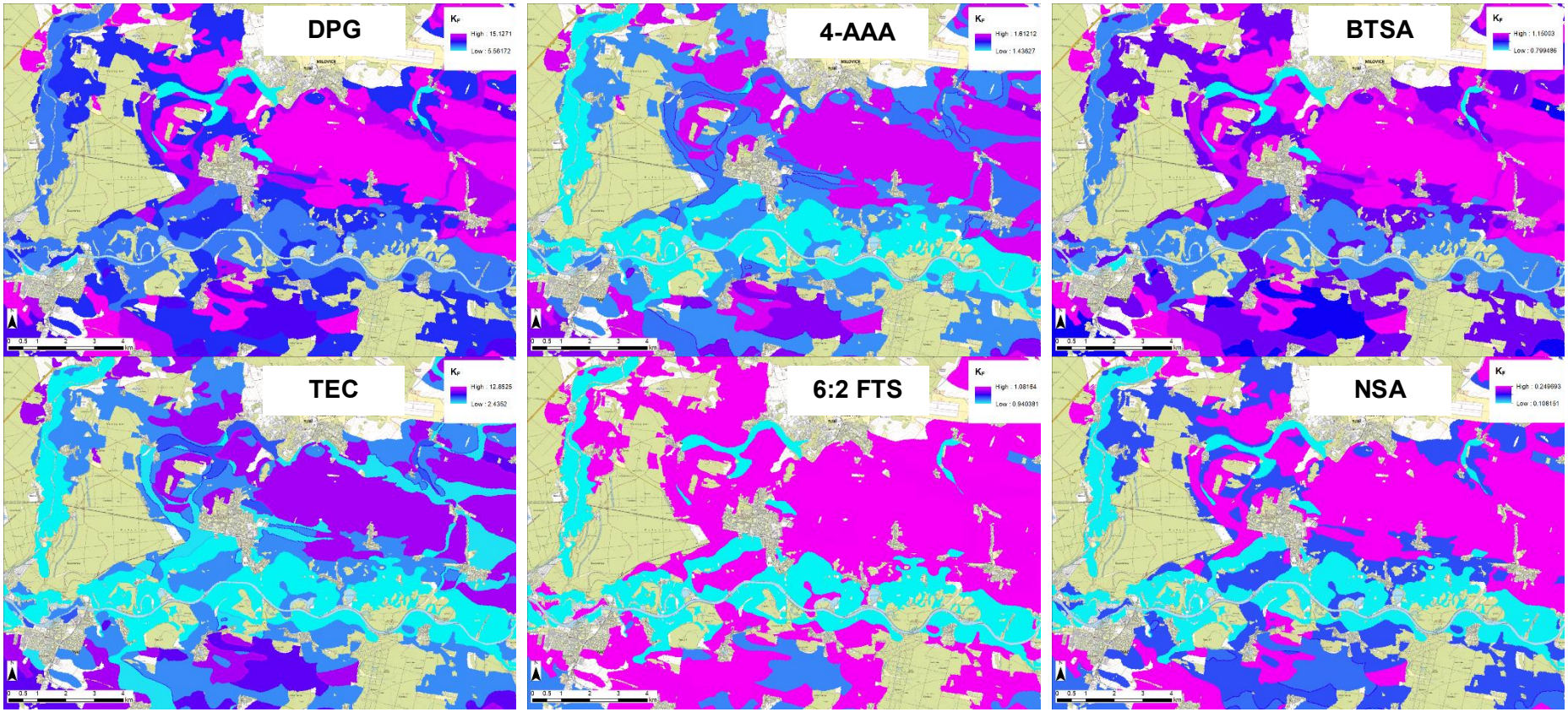
Obr. 8. Třídy mobility DPG v půdách v oblasti Podyjí odvozené z rozdělení hodnot K_F ($cm^{3/n}\,\mu g^{1-1/n}\,g^{-1}$) vypočítaného pomocí základní (vlevo nahoře) a rozšířené (vlevo dole) rovnice a map vlastností půdy z terénního průzkumu a z rozdělení hodnot K_F vypočítaného pomocí základní rovnice a map vlastností pro zemědělské půdy České republiky (vpravo).



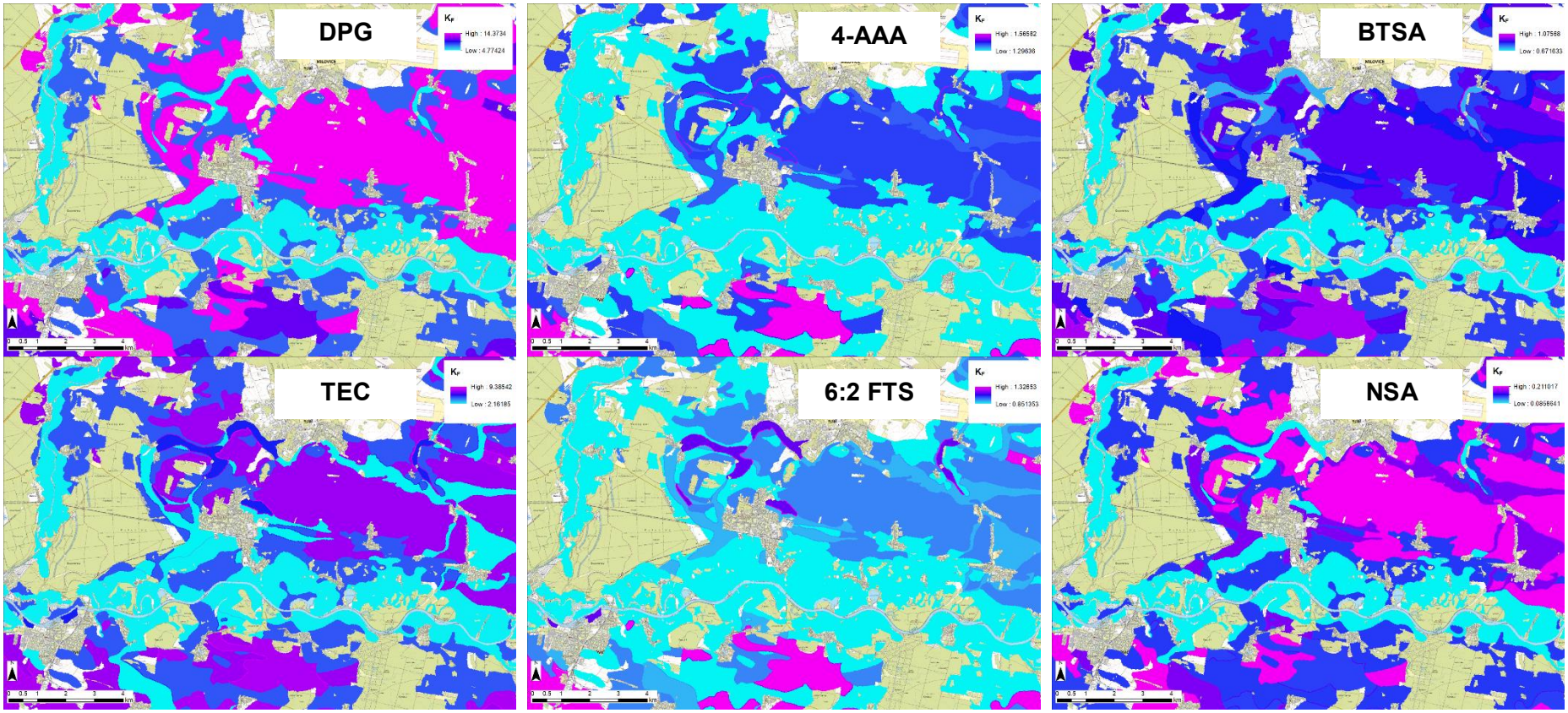
Obr. 9. Třídy mobility TEC v půdách v oblasti Podyjí odvozené z rozdělení hodnot K_F ($cm^{3/n}\,\mu g^{1-1/n}\,g^{-1}$) vypočítaného pomocí základní (vlevo nahoře) a rozšířené (vlevo dole) rovnice a map vlastností půdy z terénního průzkumu a z rozdělení hodnot K_F vypočítaného pomocí základní rovnice a map vlastností pro zemědělské půdy České republiky (vpravo).



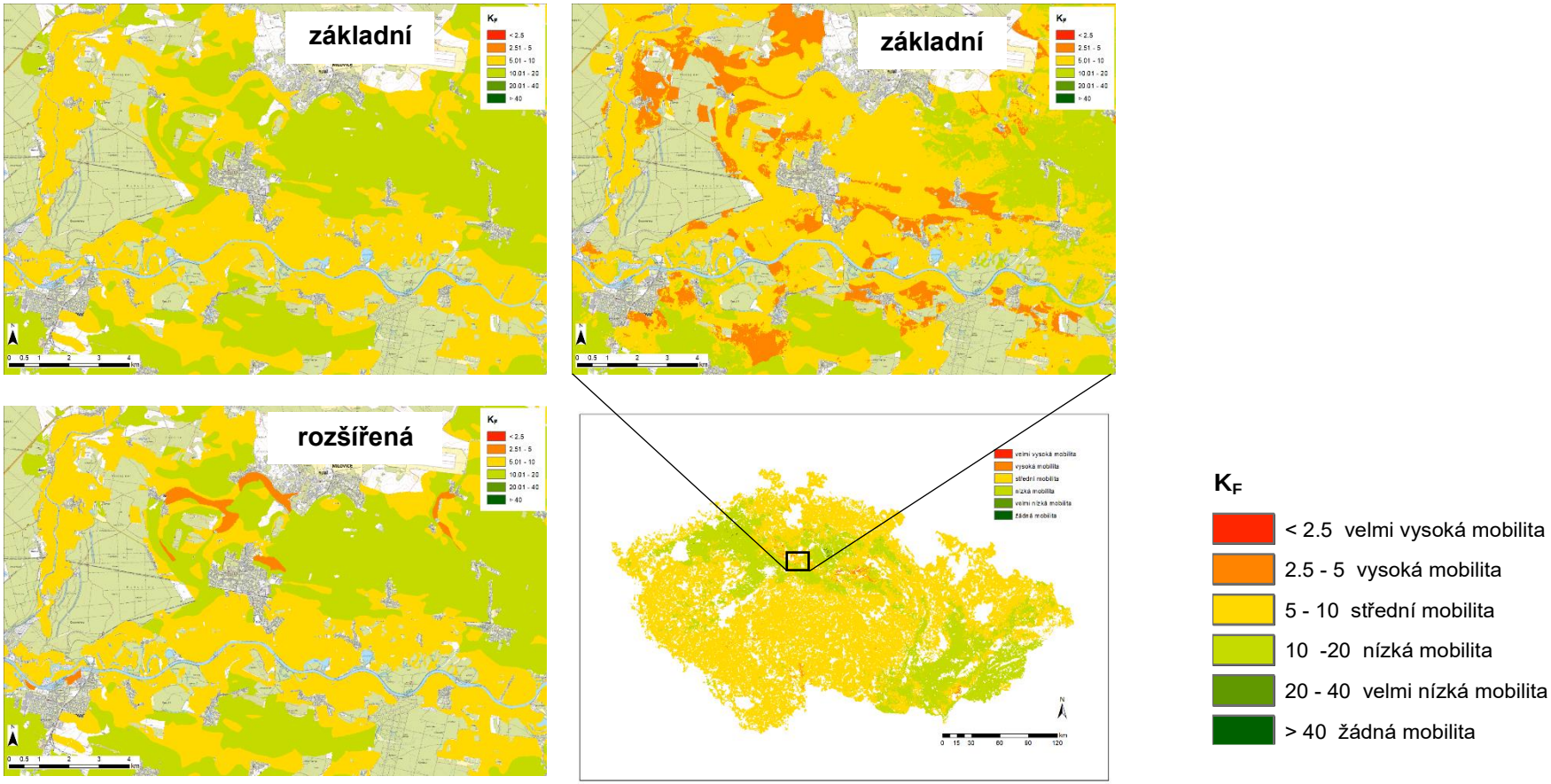
Obr. 10. Mapy půdních vlastností (Cox, jíl (clay), pH_{KCl}, KVK (CEC), PWI a χHF) v půdních vzorcích (body) a odvozených průměrných hodnot v jednotlivých půdních typech (polygony), které byly následně použity k predikci hodnot K_F v oblasti Labe.



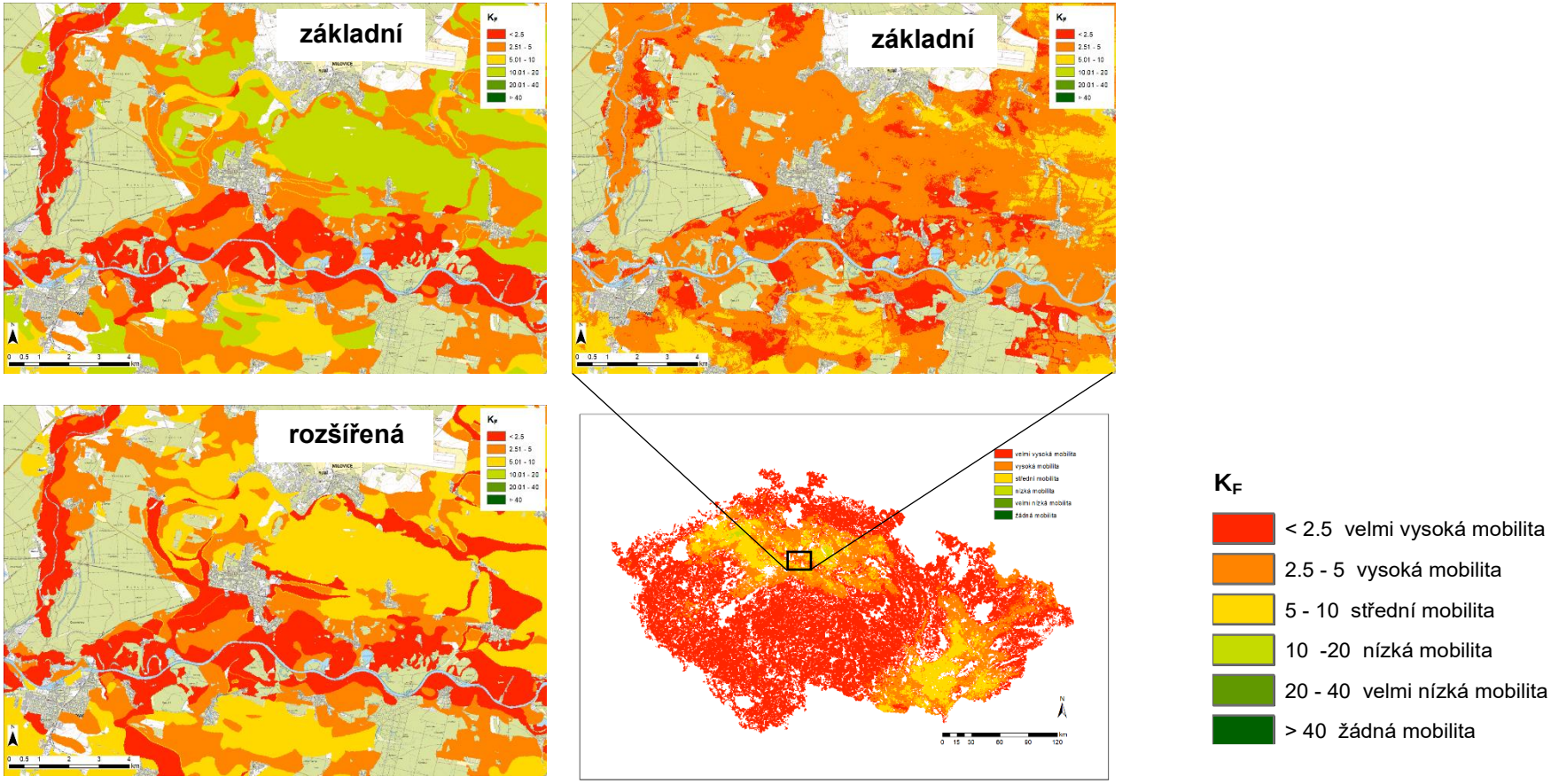
Obr. 11. Předpovězené rozložení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) s využitím základních rovnic (model A) pro oblast Labe.



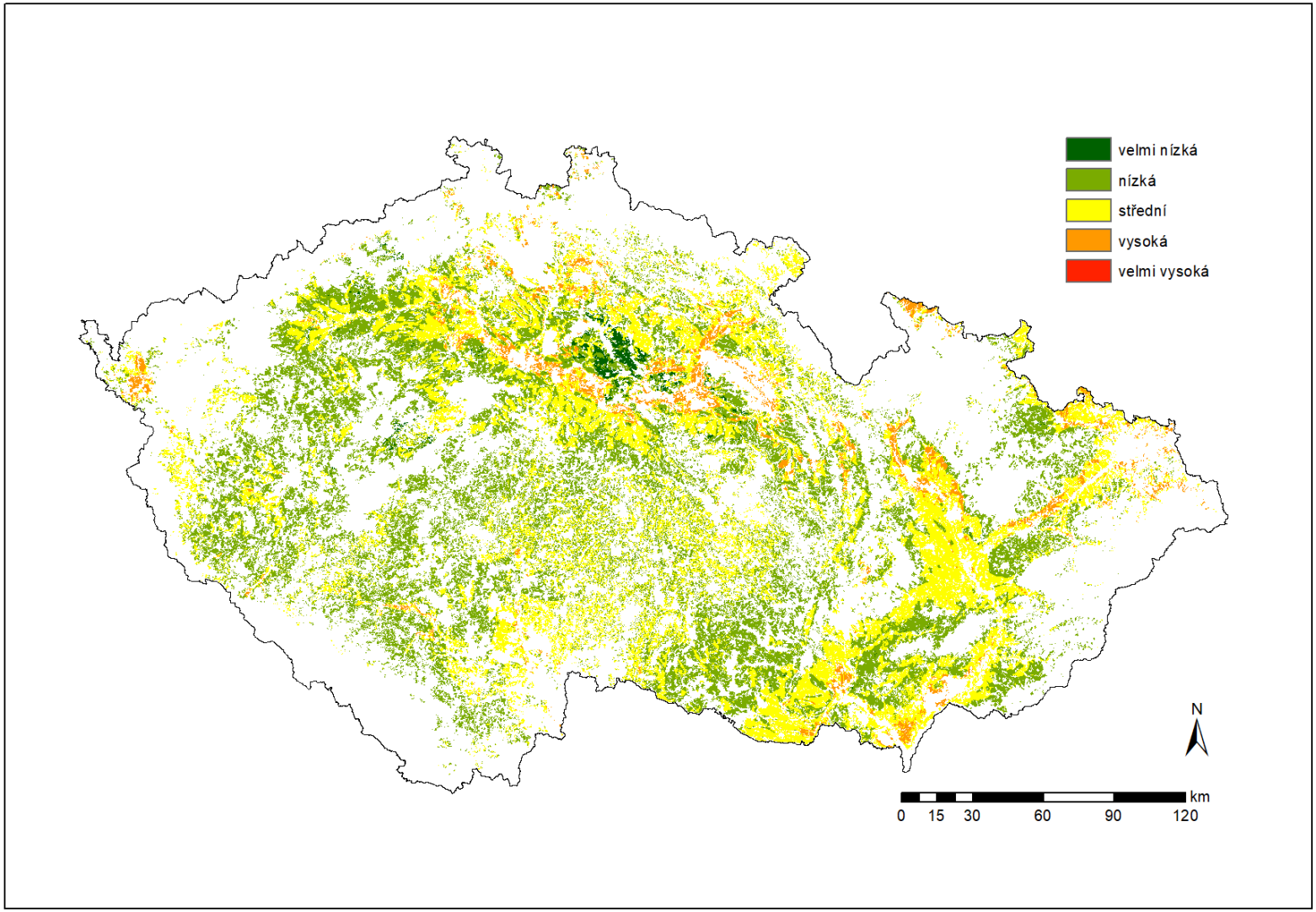
Obr. 12. Předpovězené rozložení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) s využitím rozšířených rovnic (model B) pro oblast Labe.



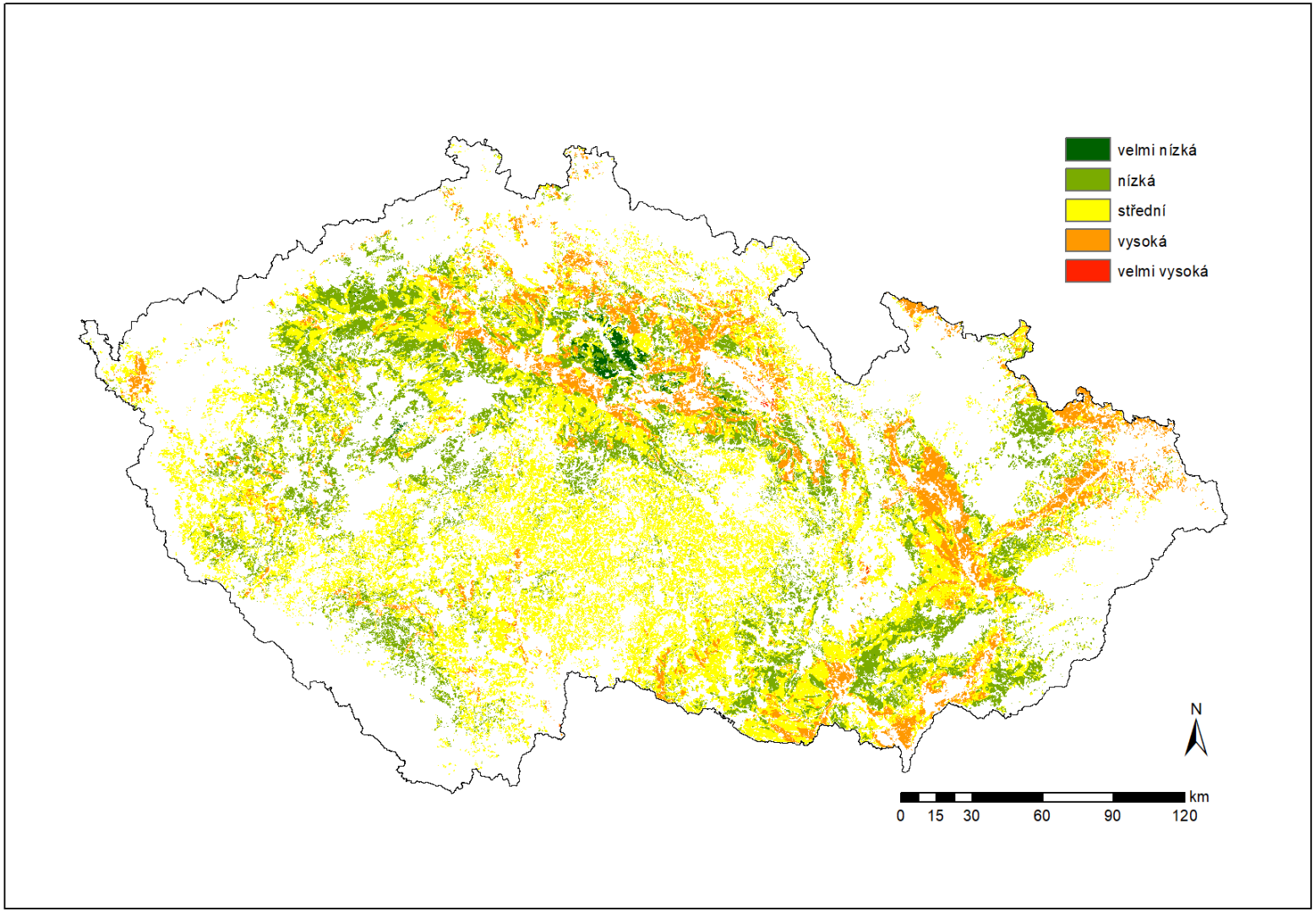
Obr. 13. Třídy mobility DPG v půdách v oblasti Labe odvozené z rozdělení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) vypočítaného pomocí základní (vlevo nahoře) a rozšířené (vlevo dole) rovnice a map vlastností půdy z terénního průzkumu a z rozdělení hodnot K_F vypočítaného pomocí základní rovnice a map vlastností pro zemědělské půdy České republiky (vpravo).



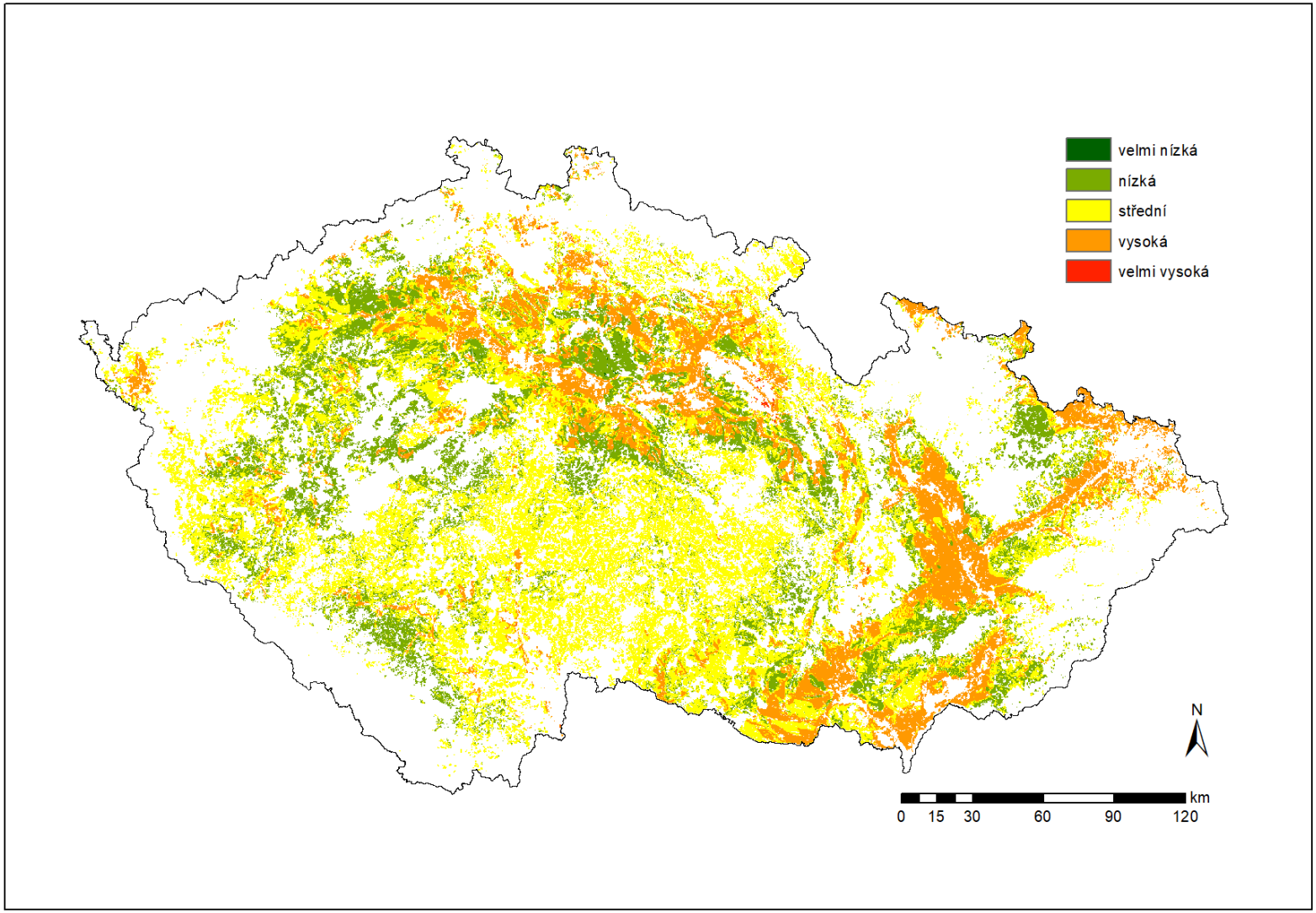
Obr. 14. Třídy mobility TEC v půdách v oblasti Labe odvozené z rozdělení hodnot K_F ($cm^{3/n}\ \mu g^{1-1/n}\ g^{-1}$) vypočítaného pomocí základní (vlevo nahoře) a rozšířené (vlevo dole) rovnice a map vlastností půdy z terénního průzkumu a z rozdělení hodnot K_F vypočítaného pomocí základní rovnice a map vlastností pro zemědělské půdy České republiky (vpravo).



Obr. 15. Mapa specifické zranitelnosti podzemních vod pro DPG na orné půdě v území ČR



Obr. 16. Mapa specifické zranitelnosti podzemních vod pro TEC na orné půdě v území ČR



Obr. 17. Mapa specifické zranitelnosti podzemních vod pro 4-AAA, BTSA, NSA a 6:2 FTS na orné půdě v území ČR

Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., MSc. Alina Sadchenko, Ph.D.,
Ing. Miroslav Fér, Ph.D., Ing. Martin Kočárek, Ph.D., Ing. Antonín Nikodem, Ph.D.,
Ing. Helena Švecová, Ph.D., Ing. Aleš Klement, Ph.D., Ing. Jindřich Zelinka,
doc. Mgr. Roman Grabic, Ph.D., Mgr. Markéta Ackermanová

Mapy mobility látek v půdním prostředí a specifické zranitelnosti podzemních vod pro emergentní organické mikropolutanty:

1,3-diphenylguanidin, triethylcitrát, kyselina naftalen-2-sulfonová, kyselina benzo(d)thiazol-2-sulfonová, 4-acetamidoantipyrin, 6:2 fluorotelomersulfonová kyselina

Vydal Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06 Praha 4
Praha 2025, 1.vydání, 32 stran

Publikace neprošla jazykovou úpravou. Za věcnou a jazykovou správnost díla odpovídají autoři.
Mapy jsou poskytovány bezplatně.

ISBN 978-80-7653-085-0 (pdf)