

Metodika pro modelové prognózní stanovení kontaminace plodin (v prvním a dalších letech po havárii)

Certifikovaná metodika

Autoři:

Ing. Jan Procházka, Ph.D.¹

doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.¹

Ing. Václav Nedbal¹

Ing. Hana Vinciková¹

Ing. Jiří Hůlka²

Ing. Irena Malátová, CSc.²

RNDr. Petr Rulík²

Ing. Jan Škrkal²

¹Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta

²Státní ústav radiální ochrany, v. v. i., Praha

metodika vznikla na základě řešení výzkumného projektu:

VF20102015014 „Výzkum pokročilých metod detekce, stanovení a následného zvládnutí radioaktivní kontaminace“, v rámci programu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR

Oponenti:

doc.RNDr.Jan Pokorný,CSc, ENKI o.p.s., Třeboň

Rok uplatnění metodiky:

2015

Obsah:

ZKRATKY A POJMY:	2
CÍLMETODIKY.....	3
VLASTNÍ POPIS METODIKY	3
ÚVOD:.....	3
KAPITOLA 1. METODICKÝ POSTUP PRO PROGNÓZU V PŘÍPADĚ HAVÁRIE V OBDOBÍ MIMO VEGETAČNÍ SEZONU.....	4
1.1. PILOTNÍ ODHAD VÝZNAMNÉ MEZNÍ HODNOTY PLOŠNÉ KONTAMINACE PRO KOŘENOVÝ PŘESTUP	4
1.2. ZPŘESNĚNÍ ODHADU.....	4
1.3. PRVNÍ POSTUP: ODHAD BUDOUCÍ KONTAMINACE PLOŠNÉ VÝPOČTEM ZE ZMĚŘENÉ HMOTNOSTNÍ AKTIVITY Cs-137 V PŮDĚ A TABELOVANÉHO KOEFICIENTU PŘESTUPU Cs-137 Z PŮDY DO PLOŠNÉ.....	5
1.4. DRUHÝ POSTUP: ODHAD BUDOUCÍ KONTAMINACE PLOŠNÉ VÝPOČTEM NA ZÁKLADĚ HISTORICKÉ ANALOGIE: VÝPOČTU Z PLOŠNÉ KONTAMINACE A AGREGOVANÝCH PŘESTUPOVÝCH KOEFICIENTŮ	8
KAPITOLA 2. METODICKÝ POSTUP PRO PROGNÓZU V PŘÍPADĚ HAVÁRIE V OBDOBÍ BĚHEM VEGETAČNÍ SEZONY	14
2.1. PILOTNÍ HRUBÝ ODHAD VÝZNAMNÉ MEZNÍ HODNOTY PLOŠNÉ KONTAMINACE PRO RIZIKO POVRCHOVÉ KONTAMINACE ROSTLIN	14
2.2. ZPŘESNĚNÍ ODHADU KONTAMINACE ROSTLIN VE VEGETAČNÍ SEZONĚ VÝPOČTEM.....	15
2.3. POZNÁMKA PRO PŘÍPAD KONTAMINACE I-131:	19
SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	21
POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY.....	21
SEZNAM SOUVISEJÍCÍ POUŽITÉ LITERATURY	22

Zkratky a pojmy:

A	hmotnostní aktivita v plodině/rostlině ($Bq \cdot kg^{-1}$)
A_p	změřená hmotnostní aktivita v půdě ($Bq \cdot kg^{-1}$)
A_S	plošná aktivita ($Bq \cdot m^{-2}$)
F	faktor intercepce - poměr kontaminace rostlin k celkové plošné kontaminaci
JE	jaderná elektrárna
LAI	index listové plochy (listová pokrývnost) - plocha listů (m^2) nad plochou půdy (m^2)
T_f	přestupový koeficient kořenovým systémem ($Bq \cdot kg^{-1} / Bq \cdot kg^{-1}$)
$T_{f-agreg}$	agregovaný přestupový koeficient pro přestup kořenovým systémem ($Bq \cdot kg^{-1} / Bq \cdot m^{-2}$)
SARCA	Software pro hodnocení prostorové radioaktivní kontaminace zemědělských plodin
V	výnos - hmotnost nadzemní biomasy v kg/m^2 , respektive části plodin, které jsou sklizeny

Cíl metodiky

Cílem metodiky je poskytnout zjednodušený návod na odhad kontaminace plodin (v prvním a dalších letech po mimořádné události) v případech, kdy je po mimořádné události známa depozice radionuklidů na plochu (plošná kontaminace) a to buď na půdu (mimo vegetační sezonu) nebo na plodiny (ve vegetační sezoně) nebo je známa hmotnostní aktivity kontaminované půdě.

Vlastní popis metodiky

Úvod:

Tato metodika navazuje na obecné doporučení popisující strategii při zjišťování a hodnocení kontaminovaných plodin a vymezení různých oblastí kontaminace. Metodika se zabývá zjednodušeným postupem, jak na základě jednoduchých dostupných informací odhadnout kontaminaci plodin v prvním a dalších letech po nehodě na konkrétním pozemku a to bez pokročilých výpočetních programů. Pokročilé metody výpočtu kontaminace plodin, jejich objemu včetně mapových zobrazení jsou zpracovány v sofistikovanější *Metodice pro hodnocení úrovně kontaminace plodin a rizika vzniku kontaminovaného odpadu*, na níž je navázán software SARCA.

Metodika vychází z předpokladu, že v časovém rozmezí dnů až týdnů po nehodě budou k dispozici minimálně odhady plošné kontaminace krajinného krytu – zejména prognózy na základě počítačových modelů a následně o výsledky leteckých, případně pozemních měření. To umožní provést pilotní výpočty a odhady kontaminace plodin v prvním a dalších letech. Metodika počítá i s přímým měřením plodin a půd avšak s vědomím, že kapacity kompetentních laboratoří jsou omezené a to řádově na 1000 vzorků/den.

Metodika je zcela pragmaticky cílena na problém kontaminace izotopem Cs-137 (včetně Cs-134) a to z těchto důvodů:

Koncentrace krátkodobých radionuklidů, včetně jinak významného izotopu I-131 s poločasem rozpadu 8 dní, se v důsledku radioaktivního rozpadu v časovém horizontu jednotek týdnů zásadně sníží a problém kontaminace plodin I-131 se dá řešit odložením sklizně a podobných prací o 1-2 měsíce. Další dlouhodobé izotopy, z nichž potenciálně nejvýznamnější je Sr-90, představují po nehodě JE kontaminaci o řád menší ve vztahu k Cs-137. Problémem mohou být jen v těsné blízkosti jaderných elektráren. Dlouhodobé izotopy transuranů (např. Pu) jsou problémem ještě nižšího řádu opět v blízkosti JE, zejména v případě rozptylu paliva. Obě poslední skupiny budou v případě potřeby řešeny expertně.

Metodický postup prognózy je odlišný podle toho, zda došlo ke kontaminaci ve vegetační sezoně nebo mimo vegetační sezonu, proto je další postup rozdělen na dvě samostatné kapitoly:

Kapitola 1: k radioaktivnímu spadu došlo mimo vegetační sezonu
(tento postup je jednodušší),

Kapitola 2: k radioaktivnímu spadu došlo během vegetační sezony.

Kapitola 1. Metodický postup pro prognózu v případě havárie v období mimo vegetační sezonu

Postup pro prognózu v období kontaminace mimo vegetační sezonu je jednodušší než v době vegetační sezony, proto je uveden nejprve.

Období *mimo vegetační sezonu* chápeme jako období, kdy na půdě nejsou rostliny/plodiny, které by mohly být suchým nebo mokřým spadem povrchově kontaminovány, tzn. období po sklizni a před růstem nových plodin. V případě, že se takové rostliny vyskytují na poli i v tuto dobu (ozimy, apod.), použije se pro ně postup odpovídající postupu během vegetační sezony – viz níže kapitola 2.

1.1. Pilotní odhad významné mezní hodnoty plošné kontaminace pro kořenový přestup

Pro základní a *velmi hrubou představu* o riziku plošné kontaminace z hlediska budoucího využití plodin v dalších letech po nehodě, lze jako **základní vodítko** použít orientační hodnotu plošné kontaminace 1 MBq/m^2 (Cs-137). Pro přepočtení plošné kontaminace na hmotnostní aktivitu půdy (sušiny) platí odhadem: 1 MBq/m^2 odpovídá přibližně 10 kBq/kg – přepočtení platí za předpokladu, že již došlo k homogenizaci do cca 10 cm hloubky.

Při překročení některé z uvedených hodnot lze s určitou mírou nejistoty očekávat překročení referenční hodnoty 1000 Bq/kg v plodinách/rostlinách pěstovaných na kontaminované půdě **v důsledku kořenového přestupu** Cs do rostlin/plodin. Tato hodnota může být použita v první fázi, než dojde ke zpřesnění podrobnějším šetřením a měřením, pro pilotní vymezení oblasti, kde může být problém pěstovat plodiny pro trh.

1.2. Zpřesnění odhadu

Pro zpřesnění odhadu o budoucí kontaminaci plodin přestupem kořenovým systémem, je možné postupovat několika způsoby. Uvádíme dva z hlediska proveditelnosti nejjednodušší. První vychází ze znalosti hmotnostní aktivity radionuklidu v půdě, druhý ze znalosti plošné kontaminace půdy:

První postup:

Výpočtem na základě konkrétní změřené hmotnostní aktivity Cs-137 v půdě a přestupového koeficientu z půdy do plodin. Tento výpočet může být zatížen velkou nejistotou bez znalosti konkrétního přestupového koeficientu pro konkrétní půdu, neboť variabilita přestupových koeficientů je velká (viz tabulka 1.1),

Druhý postup:

Výpočtem na základě zjištěné plošné kontaminace tj., *plošné aktivity* půdy a podobnosti s historickým vývojem kontaminace plodin v České republice po Černobylské havárii. V tomto případě jsou použity průměrné agregované přestupové koeficienty přestupu do plodin stanovené v České republice za předpokladu, že průměrná plošná kontaminace (geometrický průměr) Cs-137 byla $2,2 \text{ kBq/m}^2$.

1.3. První postup: Odhad budoucí kontaminace plodin výpočtem ze změřené hmotnostní aktivity Cs-137 v půdě a tabelovaného koeficientu přestupu Cs-137 z půdy do plodin

Tento postup předpokládá, že je změřená hmotnostní aktivita Cs-137 v půdě a je přibližně homogenní.

Vzhledem k postupné migraci radionuklidu do půdy je však první týdny po nehodě většina radionuklidů ve svrchní vrstvě cca 3 cm, později radionuklid postupně migruje do větší hloubky, pokud není plocha obdělávána zpravidla do cca 10-30 cm, v případě orby a následných prací dojde k promíchání do hloubky odpovídající hloubce orby rychleji. Pro stanovení přestupu je vhodné změřit homogenizovaný vzorek půdy do hloubky cca 10 cm.

Pro odhad očekávané budoucí hmotnostní aktivity Cs-137 v plodinách v důsledku kořenového přestupu v dalších letech se použije následující výpočet:

$$A = T_f \times A_p$$

kde je :

- A očekávaná hmotnostní aktivita v rostlině [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$]
- T_f přestupový koeficient kořenovým systémem ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} / \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$) (viz tabulka 1.1)
- A_p změřená hmotnostní aktivita v půdě [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$] – předpokládá homogenní obsah Cs-137 v oblasti kořenového systému rostliny

Hodnoty přestupových koeficientů T_f včetně jejich rozpětí pro různé typy půd a skupin plodin jsou v tabulce 1.1.

Poznámky k tabelovaným hodnotám

- přestupový koeficient je odvozen pro sušinu půdy a rostlinné biomasy,
- přestupový koeficient je zatížen velkou nejistotou. Jde o celosvětový přehled přestupových koeficientů a pokud není k dispozici lepší odhad, doporučujeme použít průměrnou hodnotu s uvážením rozpětí (viz tabulka 1.1)

Tabulka 1.1: Přestupové koeficienty Cs z půdy do rostlin v sušině (IAEA, 2009) ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Plodina	Orgán	Druh půdy	Geometrický průměr	Minimum	Maximum
listová zelenina	Listy	písčité	0,12	0,002	0,98
		Hlinitá	0,074	0,0003	0,7
		Jílovitá	0,018	0,0005	0,7
		Organická (bohatá na organické látky)	0,023	0,004	0,46
Tráva	stéblo/výhonky	písčité	0,084	0,01	0,99
		Hlinitá	0,048	0,012	0,21
		Jílovitá	0,012	0,0048	0,043
		Organická (bohatá na organické látky)	0,28	0,01	0,34
nelistová zelenina	bobule, plody,	písčité	0,035	0,012	0,73
		Hlinitá	0,033	0,0063	0,3
		Jílovitá	0,009	0,0007	0,016
Luštěniny	Plody	písčité	0,087	0,0035	0,71
		Hlinitá	0,02	0,001	0,42
		Jílovitá	0,013	0,002	0,081
Hlízy	Hlízy	písčité	0,093	0,004	0,6
		Hlinitá	0,035	0,0048	0,14
		Jílovitá	0,025	0,005	0,09
		Organická (bohatá na organické látky)	0,058	0,016	0,54
Obilí	Zrno	písčité	0,039	0,002	0,66
		Hlinitá	0,02	0,0008	0,2
		Jílovitá	0,011	0,0002	0,09
		Organická (bohatá na organické látky)	0,043	0,01	0,73
	stéblo/výhonky	písčité	0,21	0,041	1,9
		Hlinitá	0,11	0,0065	1,5
		Jílovitá	0,056	0,0043	0,53
Kukuřice	Zrno	písčité	0,049	0,008	0,26
		Hlinitá	0,016	0,003	0,07
		Jílovitá	0,012	0,003	0,07
	stéblo/výhonky	písčité	0,1	0,014	0,49
		Hlinitá	0,015	0,003	0,052
		Jílovitá	0,022	0,008	0,06
		Organická (bohatá na organické látky)	0,14	0,1	0,16
kořenová zelenina	Kořenová část	písčité	0,062	0,008	0,4
		Hlinitá	0,03	0,001	0,16
		Jílovitá	0,024	0,005	0,06
		Organická (bohatá na organické látky)	0,059	0,016	0,88
	Listová část	písčité	0,11	0,051	0,45
	Hlinitá	0,03	0,009	0,043	
	Jílovitá	0,026	0,006	0,047	

Příklad použití:

Předpokládejme, že je kontaminovaná písčítá půda, byla změřena měrná hmotnostní aktivita (Cs-137) vysušené půdy 1500 Bq/kg. Jaké hodnoty se očekávají v plodinách? (výsledky viz tabulka 1.2)

Tabulka 1.2: Odhad hmotnostní měrné aktivity (v Bq/kg sušiny) v různých plodinách pomocí výše uvedeného postupu. Hodnoty jsou zaokrouhleny, aby nevytvářely dojem přesného odhadu:

Plodina	Orgán	Druh půdy	Očekávaná měrná aktivita v sušině (Bq/kg)		
			Střední hodnota (<i>Geometrický průměr</i>)	Minimum	Maximum
listová zelenina	Listy	písčítá	180	3	1500
Tráva	stéblo/výhonky	písčítá	130	15	1500
nelistová zelenina	bobule, plody,	písčítá	50	18	1000
Luštěniny	Plody	písčítá	130	5	1000
Hlízy	Hlízy	písčítá	140	6	900
Obilí	Zrno	písčítá	60	3	1000
	stéblo/výhonky	písčítá	320	60	3000
Kukuřice	Zrno	písčítá	75	12	400
	stéblo/výhonky	písčítá	150	21	750
kořenová zelenina	Kořen	písčítá	90	12	600
	Listy	písčítá	170	80	700

1.4. Druhý postup: Odhad budoucí kontaminace plodin výpočtem na základě historické analogie: výpočtu z plošné kontaminace a agregovaných přestupových koeficientů

Dopady černobylské havárie na naše území s geometrickým průměrem plošné kontaminace 2,2 kBq/m² a dlouhodobý vývoj kontaminace plodin ukázaly reálný vývoj měrné kontaminace rostlin a plodin při známé kontaminaci krajinného krytu. Tento nezamýšlený experiment se stal unikátním zdrojem dat, která ukazují lépe než modely reálné krátko i dlouhodobé chování Cs-137 v krajinném krytu, plodinách i potravinách. Podstatou metodiky odhadu budoucí kontaminace plodin na základě zjištěné plošné aktivity Cs-137 je využití zmíněných empirických dat z dlouhodobého vývoje měrné aktivity vybraných plodin v České republice v důsledku dopadů černobylské havárie na naše území a stanoveného agregovaného přestupového koeficientu Cs z půdy vztaženého na plošnou kontaminaci do plodin podle vzorce:

$$A = T_{f-agreg} \times A_s$$

kde je:

A	hmotnostní aktivita v plodině (Bq.kg ⁻¹)
T _{f-agreg}	agregovaný přestupový koeficient - pro přestup kořenovým systémem (Bq.kg ⁻¹ / Bq.m ⁻²)
A _s	plošná aktivita (Bq.m ⁻²).

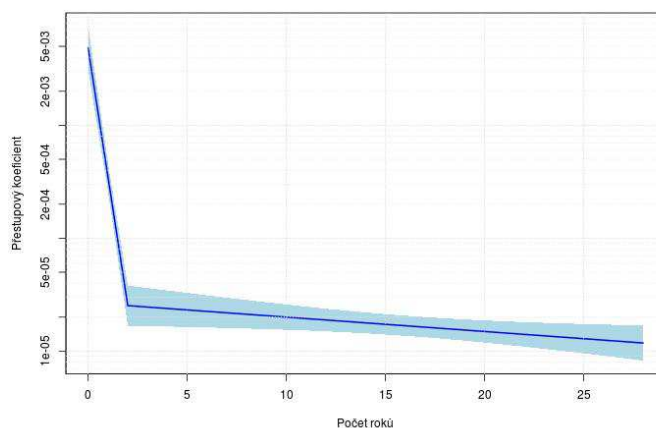
Agregované přestupové koeficienty přestupu Cs-137 do plodin kořenovým systémem byly pro účely této metodiky vypočteny nově z původních dat kontaminovaných plodin v České republice po havárii JE Černobyl tj., ze skutečně změřených hmotnostních aktivit Cs-137 v plodinách a geometrického průměru 2,2 kBq/m² spadu Cs-137 v České republice. Hodnoty spadu u konkrétních jednotlivých měřených plodin nebyly po nehodě stanoveny, je však známá distribuce a rozpětí hodnot tohoto spadu v České republice: jde o přibližně log-normální distribuci hodnot; interval, kde se nachází 68% hodnot, je od 0,7 kBq/m² do 7,3 kBq/m². Hodnoty agregovaného přestupového koeficientu jsou proto zatíženy nejistotou a ve výpočtu je uveden konfidenční interval.

Byl vypočten časový vývoj průměrných agregovaných přestupových koeficientů vč. konfidenčních intervalů v 26 letech následujících po nehodě pro 4 skupiny plodin - obilniny, zelenina, ovoce, brambory (tabulky 1.3-1.6). Pod tabulkami je i grafické znázornění vývoje T_{f-agreg} včetně zvýrazněného rozpětí konfidenčního intervalu. Přibližně po 2 letech dochází u uvedených plodin ke změně průběhu T_{f-agreg}, který je dán zřejmě změnou sorpce Cs v půdě a změnou jeho uvolňování do kořenových systémů.

Tabulka 1.3: $T_{f-agreg}$ agregovaný přestupový koeficient s konfidenčními intervaly a jeho časový vývoj: *obilniny-produkt*

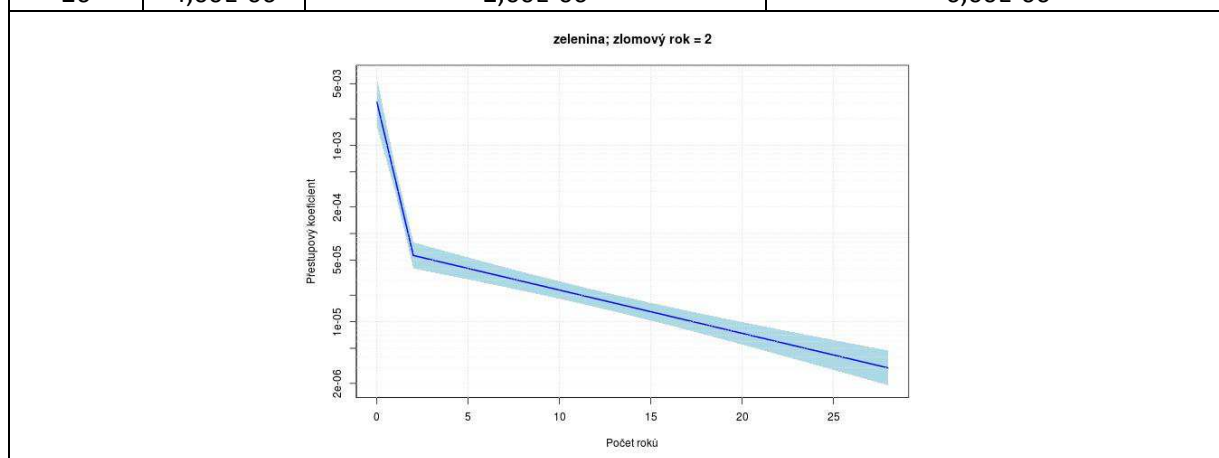
rok od nehody	$T_{f-agreg}$	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (dolní mez)	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (horní mez)
0	4,8E-03	3,1E-03	7,5E-03
1	3,49E-04	2,6E-04	4,7E-04
2	2,50E-05	1,70E-05	3,80E-05
3	2,50E-05	1,70E-05	3,60E-05
4	2,40E-05	1,70E-05	3,40E-05
5	2,30E-05	1,60E-05	3,30E-05
6	2,20E-05	1,60E-05	3,10E-05
7	2,20E-05	1,60E-05	3,00E-05
8	2,10E-05	1,60E-05	2,80E-05
9	2,10E-05	1,60E-05	2,70E-05
10	2,00E-05	1,50E-05	2,60E-05
11	1,90E-05	1,50E-05	2,50E-05
12	1,90E-05	1,50E-05	2,40E-05
13	1,80E-05	1,50E-05	2,30E-05
14	1,80E-05	1,40E-05	2,20E-05
15	1,70E-05	1,40E-05	2,10E-05
16	1,70E-05	1,40E-05	2,10E-05
17	1,60E-05	1,30E-05	2,00E-05
18	1,60E-05	1,30E-05	2,00E-05
19	1,50E-05	1,20E-05	1,90E-05
20	1,50E-05	1,20E-05	1,90E-05
21	1,40E-05	1,10E-05	1,80E-05
22	1,40E-05	1,10E-05	1,80E-05
23	1,40E-05	1,00E-05	1,80E-05
24	1,30E-05	1,00E-05	1,80E-05
25	1,30E-05	1,00E-05	1,70E-05
26	1,30E-05	9,00E-06	1,70E-05

obiloviny; zlomový rok = 2



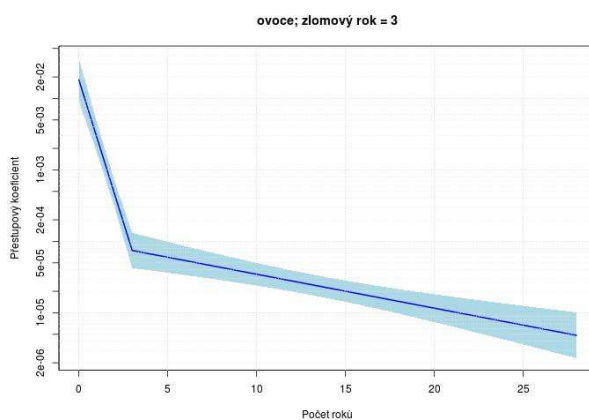
Tabulka 1.4: $T_{f-agreg}$ agregovaný přestupový koeficient s konfidenčními intervaly a jeho časový vývoj: zelenina

rok od nehody	$T_{f-agreg}$	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (dolní mez)	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (horní mez)
0	3,10E-03	1,70E-03	5,90E-03
1	4,20E-04	3,00E-04	5,90E-04
2	5,60E-05	4,00E-05	7,90E-05
3	5,00E-05	3,70E-05	7,00E-05
4	4,50E-05	3,30E-05	6,10E-05
5	4,00E-05	3,00E-05	5,40E-05
6	3,60E-05	2,70E-05	4,70E-05
7	3,20E-05	2,50E-05	4,20E-05
8	2,90E-05	2,20E-05	3,70E-05
9	2,60E-05	2,00E-05	3,20E-05
10	2,30E-05	1,80E-05	2,90E-05
11	2,00E-05	1,60E-05	2,60E-05
12	1,80E-05	1,50E-05	2,30E-05
13	1,60E-05	1,30E-05	2,00E-05
14	1,50E-05	1,20E-05	1,80E-05
15	1,30E-05	1,00E-05	1,60E-05
16	1,20E-05	9,00E-06	1,50E-05
17	1,00E-05	8,00E-06	1,30E-05
18	9,00E-06	7,00E-06	1,20E-05
19	8,00E-06	6,00E-06	1,10E-05
20	7,00E-06	6,00E-06	1,00E-05
21	7,00E-06	5,00E-06	9,00E-06
22	6,00E-06	4,00E-06	8,00E-06
23	5,00E-06	4,00E-06	7,00E-06
24	5,00E-06	3,00E-06	7,00E-06
25	4,00E-06	3,00E-06	6,00E-06
26	4,00E-06	2,00E-06	6,00E-06



Tabulka 1.5: $T_{f-agreg}$ agregovaný přestupový koeficient s konfidenčními intervaly a jeho časový vývoj: ovoce

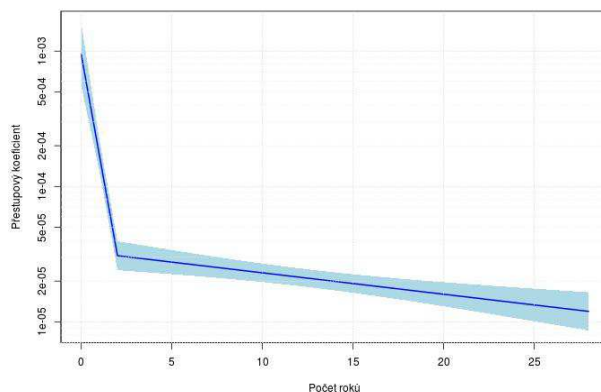
rok od nehody	$T_{f-agreg}$	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (dolní mez)	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (horní mez)
0	1,80E-02	9,10E-03	3,70E-02
1	2,90E-03	1,80E-03	4,70E-03
2	4,60E-04	3,10E-04	7,10E-04
3	7,50E-05	4,20E-05	1,30E-04
4	6,70E-05	3,90E-05	1,10E-04
5	6,00E-05	3,60E-05	9,90E-05
6	5,40E-05	3,40E-05	8,60E-05
7	4,80E-05	3,10E-05	7,50E-05
8	4,30E-05	2,90E-05	6,50E-05
9	3,90E-05	2,60E-05	5,70E-05
10	3,50E-05	2,40E-05	5,00E-05
11	3,10E-05	2,20E-05	4,40E-05
12	2,80E-05	2,00E-05	3,90E-05
13	2,50E-05	1,80E-05	3,50E-05
14	2,20E-05	1,60E-05	3,10E-05
15	2,00E-05	1,40E-05	2,80E-05
16	1,80E-05	1,30E-05	2,60E-05
17	1,60E-05	1,10E-05	2,30E-05
18	1,40E-05	1,00E-05	2,10E-05
19	1,30E-05	9,00E-06	2,00E-05
20	1,20E-05	7,00E-06	1,80E-05
21	1,00E-05	6,00E-06	1,70E-05
22	9,00E-06	6,00E-06	1,60E-05
23	8,00E-06	5,00E-06	1,40E-05
24	8,00E-06	4,00E-06	1,30E-05
25	7,00E-06	4,00E-06	1,30E-05
26	6,00E-06	3,00E-06	1,20E-05



Tabulka 1.6: $T_{f-agreg}$ agregovaný přestupový koeficient s konfidenčními intervaly a jeho časový vývoj: brambory

rok od nehody	$T_{f-agreg}$	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (dolní mez)	$T_{f-agreg}$ - konfidenční interval (horní mez)
0	9,42E-04	5,55E-04	1,60E-03
1	1,70E-04	1,30E-04	2,23E-04
2	3,10E-05	2,40E-05	3,90E-05
3	3,00E-05	2,40E-05	3,60E-05
4	2,90E-05	2,30E-05	3,50E-05
5	2,80E-05	2,30E-05	3,40E-05
6	2,70E-05	2,20E-05	3,20E-05
7	2,60E-05	2,10E-05	3,10E-05
8	2,50E-05	2,10E-05	2,90E-05
9	2,40E-05	2,00E-05	2,80E-05
10	2,30E-05	2,00E-05	2,70E-05
11	2,20E-05	1,90E-05	2,60E-05
12	2,10E-05	1,80E-05	2,50E-05
13	2,10E-05	1,80E-05	2,40E-05
14	2,00E-05	1,70E-05	2,30E-05
15	1,90E-05	1,60E-05	2,20E-05
16	1,90E-05	1,60E-05	2,20E-05
17	1,80E-05	1,50E-05	2,10E-05
18	1,70E-05	1,40E-05	2,10E-05
19	1,70E-05	1,40E-05	2,00E-05
20	1,60E-05	1,30E-05	2,00E-05
21	1,50E-05	1,20E-05	1,90E-05
22	1,50E-05	1,20E-05	1,90E-05
23	1,40E-05	1,10E-05	1,80E-05
24	1,40E-05	1,10E-05	1,80E-05
25	1,30E-05	1,00E-05	1,80E-05
26	1,30E-05	1,00E-05	1,70E-05

brambory; zlomový rok = 2



Vývoj tohoto agregovaného přestupového koeficientu je experimentálně zjištěnou informací, kterou lze použít k výpočtu při odhadu vývoje možné kontaminace na území ČR v případě havárie s dopadem na krajinný kryt.

Příklad:

Předpokládejme, že je zjištěna plošná aktivita (Cs-137) 100 kBq/m². Zaokrouhlené hodnoty **odhadů hmotnostní měrné aktivity (v sušině) pro obilniny zde pěstované v dalších letech pomocí výše uvedeného postupu je jsou v tabulce 1.7:**

Tabulka. 1.7: Vývoj hmotnostní aktivity v obilovinách v sušině v čase v Bq/kg			
Rok po nehodě	Očekávaná průměrná hodnota	Konfidenční interval (dolní mez)	Konfidenční interval (horní mez)
0	482	309	752
1	35	26	47
2	3	2	4
3	3	2	4
4	2	2	3
5	2	2	3
6	2	2	3
7	2	2	3
8	2	2	3
9	2	2	3
10	2	2	3
11	2	2	3
12	2	2	2
13	2	2	2
14	2	1	2
15	2	1	2
16	2	1	2
17	2	1	2
18	2	1	2
19	2	1	2
20	2	1	2
21	1	1	2
22	1	1	2
23	1	1	2
24	1	1	2
25	1	1	2
26	1	1	2
27	1	1	2
28	1	1	2

Kapitola 2. Metodický postup pro prognózu v případě havárie v období během vegetační sezony

Metodický postup je i zde zaměřen obecně na kontaminaci izotopem Cs-137 (vč. Cs-134) z důvodů uvedených výše. Pouze pokud budou plodiny využívány jako potraviny nebo krmiva v čase od nehody kratším než je doba významného poklesu radioizotopu I-131 tj., vzhledem k poločasu 8 dní, poklesne za cca 2 měsíce jeho koncentrace více než 1000x, je třeba se zabývat i tímto izotopem.

V případě radioaktivního spadu během vegetační sezony je třeba vzít v úvahu následující:

- dojde k povrchové kontaminaci plodin a to jak využívaných částí (např. jedlé části), tak ostatních částí rostlin, část kontaminantu propadá na půdu
- poměr kontaminace rostlin k celkové plošné kontaminaci je dán faktorem intercepce
- kontaminace, která „propadne“ na půdu, přestupuje do rostlin kořenovým systémem částečně již v roce nehody, zejména však v dalších letech
- povrchová kontaminace rostlin ze spadu má zpravidla o několik řádů vyšší podíl na celkové kontaminaci rostliny, než následek kořenového přestupu radionuklidu z půdy
- při růstu rostlin/plodin dochází jak ke snižování měrné hmotnostní kontaminace v důsledku nárůstu hmoty rostliny, tak i k transpozici radioaktivity do jiných částí rostlin.

2.1. Pilotní hrubý odhad významné mezní hodnoty plošné kontaminace pro riziko povrchové kontaminace rostlin

Pro základní a velmi hrubou představu o riziku plošné kontaminace z hlediska využití plodin po nehodě lze jako hrubé základní vodítko použít orientační hodnotu plošné kontaminace Cs-137 1 kBq/m^2 . Při jejím překročení je možné s velkou mírou nejistoty, že dojde k překročení referenční hodnoty 1000 Bq/kg v plodinách/rostlinách v důsledku povrchové kontaminace plodin bezprostředně po radioaktivním spadu. Tento odhad vychází z velmi pesimistického odhadu, že na 1 m^2 je výnos 1 kg plodiny (tzn. 10 t/ha) a faktor intercepce (záchytu) je 1 tj., že se na rostlinách zachytí všechna kontaminace. Pokud nejsou k dispozici lepší odhady (např. viz program SARCA), může být uvedená hodnota v první fázi

použita pro velmi konzervativní pilotní vymezení oblasti, kde mohou být vzrostlé plodiny povrchově kontaminovány tak, že by nemusely vyhovět přípustné hodnotě pro trh.

2.2. Zpřesnění odhadu kontaminace rostlin ve vegetační sezoně výpočtem

Ke zpřesnění odhadu kontaminace rostlin/plodin při povrchové kontaminaci ve vegetační sezoně v prvním roce nehody je možné použít odhad výpočtem z následujících údajů: plošné kontaminace, množství nadzemní biomasy, respektive výnosu (kg/m^2) a faktoru intercepce.

Plošnou kontaminaci lze odhadnout buď na základě výsledků disperzních modelů (ESTE, HARP RP, apod.) nebo na základě leteckých případně pozemních měření prováděných kompetentními orgány.

Výnosem je chápána hmotnost nadzemní biomasy v kg/m^2 , respektive části plodin, které jsou sklizeny. Zde je potřeba poznamenat, že hmotnost nadzemní biomasy je hmotností živých rostlin, respektive aktuální hmotností nadzemní biomasy. V případě, že bychom chtěli znát přepočtenou sušinu biomasy, bylo by nutné znát obsah vody v biomase, který lze zjistit vážením nativního (živého) a usušeného vzorku. Faktor intercepce je ukazatel poměru plošné aktivity, která je zachycena porostem.

Pro odhad hmotnostní aktivity v plodinách použijte následující výpočet:

$$A = F \times A_s / V$$

kde je

- A - hmotnostní aktivita v rostlině (Bq/kg)
- F - faktor intercepce
- A_s - plošná aktivita (Bq/m^2)
- V - výnos (kg/m^2)

Hodnoty plošné aktivity a množství biomasy na dané ploše jsou parametry, které lze zjistit přímo v terénu měřením, na základě modelů nebo odborným odhadem. Faktor intercepce závisí na několika proměnných. Zásadní je zde index listové plochy, tedy pokryvnost listová (LAI; m^2/m^2), tj. plocha listů v průmětu nad plochou povrchu půdy. Druhým faktorem je hodnocený radionuklid, kdy např. jód se chová jinak než cesium. Třetím zásadním faktorem je úhrn srážek za sledované období od radiační havárie. Zpravidla se jedná o období 48 hodin. Pro předpoklad suché deponice jsou hodnoty intercepčního faktoru pro vybrané radionuklidy při různé listové pokryvnosti uvedeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1. Hodnoty intercepčního faktoru pro suchou depozici a pro různý index listové plochy (LAI), respektive pokryvnost a vybrané radionuklidy (přepočteno podle Metodika SARCA 2015).

LAI (m ² /m ²)	Pokryvnost (%)	Intercepční faktor		
		I	Cs	Sr
0	0	0,00	0,00	0,00
0,5	12,5	0,06	0,12	0,23
1	25	0,12	0,23	0,46
1,5	37,5	0,17	0,35	0,69
2	50	0,23	0,46	0,92
2,5	62,5	0,29	0,58	1,00
3	75	0,35	0,69	1,00
3,5	87,5	0,40	0,81	1,00
4	100	0,46	0,92	1,00
4,5	100	0,52	1,00	1,00
5	100	0,58	1,00	1,00
5,5	100	0,64	1,00	1,00
6	100	0,69	1,00	1,00

Z tabulky 2.1 je patrná jasná závislost hodnoty intercepčního faktoru na listové pokryvnosti, která se ovšem obtížně stanovuje. Praktickým vodítkem pro odhad LAI může být zápoj vegetačního krytu. Ve většině případů, tj. u většiny plodin lze pro zapojený porost uvažovat hodnoty LAI větší než 4. Pro nezapojený porost doporučujeme uvažovat hodnotu LAI úměrnou pokryvnosti, tedy pokud je pokryvnost 25 %, potom odhadnutá hodnota LAI bude 1, pro 50 % 2 a pro 75 % lze uvažovat hodnotu LAI = 3.

Poněkud komplikovanější je situace v případě mokrého spadu, při kterém dochází k většímu přechodu radioaktivního materiálu na povrch půdy (propadávající kapky, stékání, smývání, apod.). Pro odhad intercepčního faktoru pro mokrý spad existuje sice vzorec pro výpočet, nicméně pro značnou komplikovanost výpočtu a zpravidla nedostatek dat o průběhu a intenzitě srážek během kontaminace, je vhodnější brát v úvahu konzervativnější odhad pro suchý spad. Jen pro ilustraci, při plném zápoji porostu (LAI = 5) a úhrnu srážek 10 mm je intercepční faktor roven hodnotě 0,10, zatímco pro suchý spad je hodnota intercepčního faktoru rovna jedné.

Výše uvedený přístup lze považovat za orientační, kdy odhady jsou zatíženy řadou nejistot. V případě povrchové kontaminace plodin je proto potřeba vycházet z přímých měření. Pro pokročilejší odhad povrchové kontaminace plodin a zemědělské půdy na širším území a pro odhad a stanovení řady dalších parametrů byl vytvořen program SARCA

(Software pro hodnocení prostorové radioaktivní kontaminace zemědělských plodin (Spatial Assessment of Radioactive Contamination of Agricultural Crops)), který pracuje v prostředí GIS a je popsán podrobně v samostatné metodice. Zde uvádíme jen stručný popis jeho funkcí: Program SARCA umožňuje orientační výpočty různých parametrů produkce zemědělských plodin v prostředí GIS, jako např. výpočet hmotnosti sušiny nadzemní biomasy, hmotnosti živé biomasy a LAI (index listové plochy). Vedle toho je určen k odhadu radioaktivní depozice na povrchu zemědělských plodin a povrchu půdy v časné fázi radiační havárie za podmínek suché i mokré depozice. Software dokáže rozdělit plochy v zájmovém území podle úrovně depozice na třídy podle způsobu možného následného managementu v závislosti na úrovni depozice na plochu a dále v závislosti na úrovni hmotnostní kontaminace. Program SARCA umožňuje orientačně odhadnout výši nákladů na odstranění, respektive sklizeň biomasy ze zemědělských ploch a pro každou vymezenou plochu navrhuje možnost dalšího zásahu. Představuje tak komplexní nástroj využitelný pro rozhodovací procesy při radiační havárii, které se týkají zemědělských ploch a možnosti snížení radioaktivní kontaminace na těchto plochách. Software je určen všem, kdo chtějí získat představu o produkčních charakteristikách zemědělských plodin na určitém území, případně o radioaktivní kontaminaci povrchu zemědělských plodin a povrchu půdy po radiační havárii. Dále je určen kompetentním orgánům, rozhodujícím o managementu zemědělských ploch zasažených radioaktivní depozicí, kterým může poskytnout představu o prostorové distribuci radioaktivity na zemědělských plochách v kontaminovaném území a o nákladech spojených s odstraněním radioaktivního materiálu.

Příklad výpočtu (zjednodušený přístup podle 2.1):

Předpokládejme, že je

- zjištěna plošná kontaminace terénu (např. leteckým měřením) Cs-137 na úrovni 50000 Bq.m^{-2} .
- odhadovaný výnos zde pěstované plodiny 5 kg.m^{-2}
- obtížné určit faktor intercepce, proto z opatrnosti použijeme konzervativní hodnotu $F=1$.

Hrubý odhad očekávané hmotnostní měrné aktivity v plodině pomocí výše uvedeného postupu:

$$A = F \times A_s / V$$

$$A = 1 \times 50\,000 \text{ Bq.m}^{-2} / 5 \text{ kg.m}^{-2} = 10\,000 \text{ Bq.kg}^{-1}$$

Pro odhad kontaminace plodin v dalších letech se postupuje analogicky podle kapitoly 1:

- pokud se kontaminované rostliny neodvezou tj., ponechají se na místě a např. zaorají, pak v takovém případě se očekává 100% přestup do půdy - odhad se provede s použitím údajů o plošné aktivitě podle 1.2., ev. měrné aktivitě podle 1.3.
- pokud se kontaminované rostliny odvezou, zjistí se zbytková kontaminace na/v půdě a dále se postupuje obdobně.

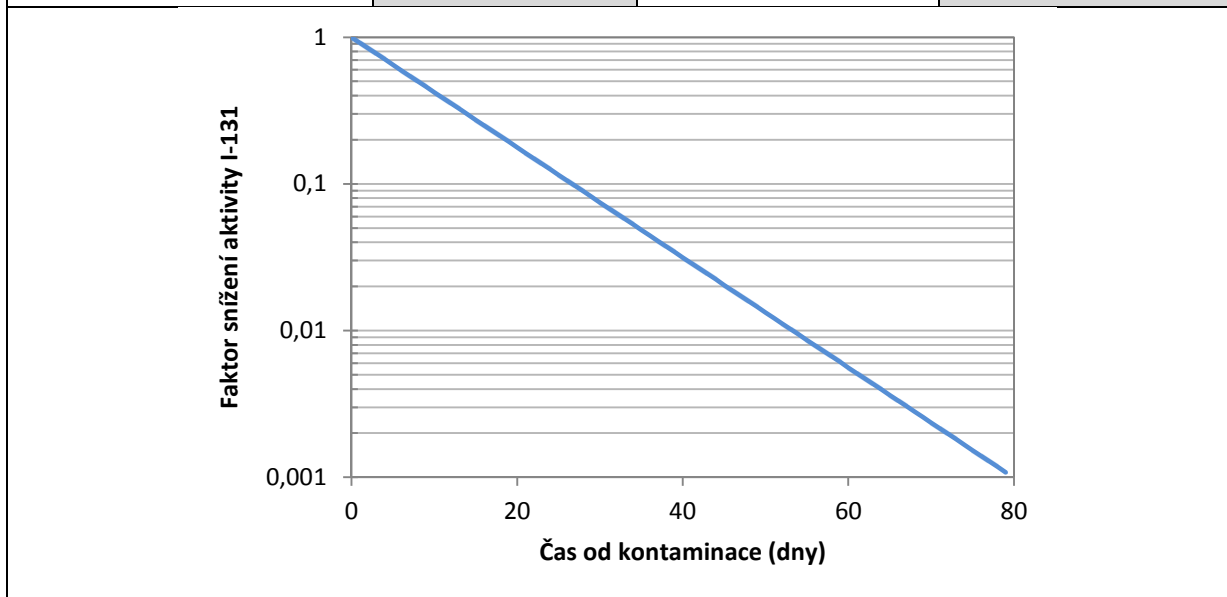
2.3. Poznámka pro případ kontaminace I-131:

Jak je popsáno v úvodu, uvedený výpočet je určen pro odhad kontaminace hlavních dlouhodobých a nejproblematičtějších izotopů Cs-137 a Cs-134, jejichž poločas je delší než vegetační sezona a analogicky je možno postupovat i u Sr-90. V případě povrchové kontaminace plodin dalším významným avšak krátkodobým izotopem I-131 s poločasem rozpadu 8 dní je v případě odložení sklizně aktivita v době sklizně nižší v důsledku radioaktivní přeměny, pro tento účel se použije faktor snížení kontaminace I-131 v důsledku radioaktivního rozpadu uvedený v tabulce 2.2.

Tabulka 2.2. Faktor snížení kontaminace I-131 v důsledku radioaktivního rozpadu

Čas, který uplynul mezi kontaminací a sklizní (dny)	Faktor snížení aktivity I-131 rozpadem	Čas, který uplynul mezi kontaminací a sklizní (dny)	Faktor snížení aktivity I-131 rozpadem
0	1,000	40	0,031
1	0,917	41	0,029
2	0,841	42	0,026
3	0,771	43	0,024
4	0,707	44	0,022
5	0,648	45	0,020
6	0,595	46	0,019
7	0,545	47	0,017
8	0,500	48	0,016
9	0,459	49	0,014
10	0,421	50	0,013
11	0,386	51	0,012
12	0,354	52	0,011
13	0,324	53	0,010
14	0,297	54	0,009
15	0,273	55	0,009
16	0,250	56	0,008
17	0,229	57	0,007
18	0,210	58	0,007
19	0,193	59	0,006
20	0,177	60	0,006
21	0,162	61	0,005
22	0,149	62	0,005
23	0,136	63	0,004
24	0,125	64	0,004
25	0,115	65	0,004
26	0,105	66	0,003
27	0,096	67	0,003

28	0,088	68	0,003
29	0,081	69	0,003
30	0,074	70	0,002
31	0,068	71	0,002
32	0,063	72	0,002
33	0,057	73	0,002
34	0,053	74	0,002
35	0,048	75	0,002
36	0,044	76	0,001
37	0,041	77	0,001
38	0,037	78	0,001
39	0,034	79	0,001



SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

Metodika pro modelové prognózní stanovení kontaminace plodin (v prvním a dalších letech po havárii) nebyla dosud v České republice zpracována, jedná se tedy o zcela novou metodiku.

POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Uplatnění metodiky je cíleno na problematiku včasného odhadu radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a je určena pro použití při rozhodovacích procesech při radiační havárii a pro rozhodování o následných opatřeních na zemědělských plochách. Předpokládanými uživateli metodiky budou dotčené orgány státní správy zodpovědné za radiační ochranu zemědělské krajiny (SÚJB, SÚRO, Krizový štáb kraje, Ministerstvo vnitra, Ministerstvo zemědělství, atd.). Metodika poskytuje zjednodušený návod, jak bez použití pokročilých výpočetních programů z dat o plošné kontaminaci nebo hmotnostní kontaminaci půdy odhadnout kontaminaci plodin v prvním a dalších letech po nehodě jaderné elektrárny pro klíčové radionuklidy (zejména Cs-137). Uvedené výpočty jsou ovšem zatíženy značnými nejistotami, které jsou v metodice naznačeny v podobě konfidenčních intervalů. V každém případě je třeba ověřit tyto prognózní odhady přímým měřením hmotnostní aktivity vzorků plodin.

SEZNAM SOUVISEJÍCÍ POUŽITÉ LITERATURY:

- IAEA 472/2010 : HANDBOOK OF PARAMETER VALUES FOR THE PREDICTION OF RADIONUCLIDE TRANSFER IN TERRESTRIAL AND FRESHWATER ENVIRONMENTS
- Databáze MONRAS SÚJB
- Závěrečná výzkumná zpráva projektu „Vývoj, ověřování a zavádění nových postupů, metod a metodik monitorování radiační situace a ozáření osob se zaměřením na hodnocení výpustí radionuklidů do životního prostředí z JE a monitorování jejich okolí a na expresní metodiky“ SÚJB č.3/2006, Praha 2006
- Zpráva SURO č.5/2015 Statistické zpracování agregovaných přestupových koeficientů
- Metodika pro hodnocení úrovně kontaminace plodin a rizika vzniku kontaminovaného odpadu, další výstup tohoto projektu VF20102015014 (v tisku)
- SARCA : Software pro hodnocení prostorové radioaktivní kontaminace zemědělských plodin (Spatial Assessment of Radioactive Contamination of Agricultural Crops), další výstup tohoto projektu VF20102015014