

Metodika pro hodnocení úrovně kontaminace plodin a rizika vzniku kontaminovaného odpadu

Certifikovaná metodika

Autoři

Ing. Jan Procházka, Ph.D.¹

doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.¹

Ing. Hana Vinciková¹

Ing. Václav Nedbal¹

Ing. Jiří Hůlka²

¹Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, Katedra krajinného managementu, sekce Laboratoř aplikované ekologie, Studentská 13, 370 05 České Budějovice, prochaz@zf.jcu.cz

²Státní ústav radiační ochrany, v. v. i., Bartoškova 28, 140 00 Praha 4, jiri.hulka@suro.cz

Tato 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

1 CÍL METODIKY	1
2 VLASTNÍ POPIS METODIKY	1
2.1 ÚVOD	1
2.2 POPIS ÚZEMÍ A OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PLODIN NA ORNÉ PŮDĚ V ČESKÉ REPUBLICE	2
2.3 VÝVOJ A VÝNOSY HLAVNÍCH POLNÍCH PLODIN A AGROTECHNICKÉ LHŮTY	5
2.4 HODNOCENÍ DISTRIBUCE A STAVU PLODIN V ÚZEMÍ	8
2.5 VÝPOČET CHARAKTERISTIK PLODIN A RADIOAKTIVNÍ KONTAMINACE PLODIN A PŮDY POMOCÍ MATEMATICKÉHO MODELU.....	10
2.6 POUŽITÍ PROGRAMU SARCA PRO ODHAD NADZEMNÍ BIOMASY ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN A RADIOAKTIVNÍ KONTAMINACE PLODIN A PŮDY	12
2.6.1 Popis programu SARCA	12
2.6.2 Vstupy programu SARCA.....	14
2.6.3 Výstupy programu SARCA.....	14
2.7 ANALÝZA NÁKLADOVOSTI OPATŘENÍ ZA ÚČELEM SNÍŽENÍ ÚROVNĚ KONTAMINACE ZEMĚDĚLSKÝCH PLOCH	16
2.8 ODHAD RADIOAKTIVNÍ KONTAMINACE ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN A PŮDY NA PŘÍKLADU HAVÁRIE JE TEMELÍN – PŘÍPADOVÁ STUDIE	16
2.8.1 Analýza prostorové distribuce plodin v zájmovém území	17
2.8.2 Analýza radioaktivní kontaminace pomocí programu SARCA	19
2.9 ODHAD RADIOAKTIVNÍ KONTAMINACE ZEMĚDĚLSKÝCH PLODIN A PŮDY NA PŘÍKLADU HAVÁRIE JE DUKOVANY – PŘÍPADOVÁ STUDIE	30
2.9.1 Analýza prostorové distribuce plodin v zájmovém území	30
2.9.2 Analýza radioaktivní kontaminace pomocí programu SARCA	32
2.10 SOUHRN	42
3 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	42
4 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY	43
5 SEZNAM SOUVISEJÍCÍ POUŽITÉ LITERATURY	43
6 SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE	45

1 Cíl metodiky

Cílem metodiky je rychlý odhad množství a distribuce nadzemní biomasy vegetace (plodin) na zemědělsky obhospodařovaných pozemcích a odhad rozdělení depozice radioaktivního materiálu mezi porost a povrch půdy v případě radiační kontaminace. Metodika bude sloužit pro strategické rozhodování v oblasti radiační ochrany, kdy na základě znalosti plošné kontaminace zjištěné z modelu, leteckých či pozemních měření bude možné odhadnout rizika a navrhnout opatření pro snížení kontaminace na zemědělských pozemcích. Metodika řeší ranou fázi případné radiační nehody, získání potřebných dat a postup hodnocení dotčeného území.

2 Vlastní popis metodiky

2.1 Úvod

Zemědělské hospodaření je významné jak z hlediska produkce potravin a dalších produktů, tak i z hlediska utváření krajiny a tvorby životního prostředí. V tomto pohledu pak případná radiační kontaminace v důsledku havárie představuje problém nejenom hospodářský, ale i environmentální a kulturní.

Otázky ochrany zemědělské produkce a krajiny před kontaminací radioaktivním materiálem a opatření v případě radiační havárie zasahující zemědělskou činnost a životní prostředí jsou intenzivně diskutovány (viz např. dokumenty EURANOS, <http://www.euranos.fzk.de/>). Možnosti následných opatření po radiační havárii jsou dány dostupnými technickými prostředky na jedné straně a množstvím adekvátních informací na straně druhé. V případě zemědělské produkce jsou potřebnými informacemi údaje o prostorové distribuci jednotlivých druhů zemědělských plodin v zájmovém území postiženém radiační havárií a kvantitativní údaje o vývoji a produkčních charakteristikách těchto plodin, jako je množství biomasy, výška, pokryvnost listoví a podobně.

Pro hodnocení prostorové distribuce zemědělských plodin je možné použít nástroje geografických informačních systémů (GIS) (viz např. Priya a Shibasaki 2001) a metod dálkového průzkumu Země (DPZ) (viz Oetter et al. 2000, Pinter et al. 2003, Fumin et al. 2010). Pro hodnocení kvantitativních produkčních charakteristik lze využít buď přímých měření v terénu, DPZ nebo matematických modelů (přehled uvádí Ahamed et al. 2011). Matematické modely umožňují, na základě metod růstové analýzy (viz např. Květ et al. 1971), odhadnout řadu produkčních a vegetačních charakteristik, jako je množství biomasy na ploše a její sušiny, index listové plochy, výši výnosu plodin a další potřebné ukazatele. V současné době je k dispozici řada matematických modelů různé složitosti a přesnosti, sloužících zejména pro účely odhadu výnosu zemědělských plodin, např. Systém Mars (The Mars Crop Yield Forecasting System), CERES atd. Současné komplexní systémy odhadu zemědělské produkce poskytují věrohodné výsledky s dobrou přesností odhadu sledovaných veličin, nicméně jejich využití v oblasti radiační ochrany zemědělských plodin je poněkud komplikované z důvodu požadavku na velké množství vstupních dat, jako jsou data meteorologická, informace o hospodářských zásazích (kultivace půdy, hnojení, použití pesticidů), satelitní data a podobně. Vzhledem k tomu, že získávání a zpracování těchto dat je z hlediska uvažovaného plošného rozsahu radiační havárie a nutnosti rychlosti jednání časově, personálně a finančně velmi náročné, je potřeba využít jednoduššího přístupu, založeného na menším počtu datových vstupů, byť i na úkor přesnosti odhadu.

Předkládaná metodika vychází z jednoduchého přístupu odhadu nadzemní biomasy zemědělských plodin založeného na růstovém modelu, který je parametrizován pro jednotlivé sledované plodiny a modelu rozdělování depozice radioaktivního kontaminantu mezi povrch zemědělských plodin a povrch půdy založeného na výpočtu intercepčního faktoru podle Müller a Pröhl (1993). Primárními daty o havárii a následném šíření kontaminace mohou být pro účely výpočtu výstupy z modelů (např. Havar, Este) nebo údaje získávané za účelem doplnění a zpřesnění situace pomocí leteckých či pozemních měření. Vlastní výpočet všech parametrů v prostorovém měřítku je zajištěn pomocí softwaru SARCA (**S**patial **A**ssessment of **R**adioactive **C**ontamination of **A**gricultural **C**rops).

2.2 Popis území a obecná charakteristika plodin na orné půdě v České republice

Metodika odhadu úrovně kontaminace je zpracovávána pro podmínky ČR, není tedy vázána na konkrétní specifickou oblast. Předpokládá se proto využití obecně dostupných podkladů z kteréhokoliv území. Vzhledem k účelu použití metodiky (kontaminace zemědělských plodin) se uvažuje primárně s hodnocením území s významným zastoupením zemědělské půdy.

Důležitým podkladem potřebným pro výpočet množství biomasy plodin a distribuce radioaktivního kontaminantu mezi porost a půdu je výměra a rozmístění zemědělských pozemků v dotčené oblasti. Nejkomplexnější dostupná data v tomto směru obsahuje centrální databáze evidence půdy na úrovni jednotlivých farmářských bloků - databáze LPIS (LPIS MZe). Jedná se o GIS (geografický informační systém) databázi pod správou Ministerstva zemědělství ČR, která je vedena primárně jako evidence zemědělské půdy dle uživatelských vztahů pro přidělování zemědělských dotací (SITEWELL LPIS 2, 2004). Od roku 2009 zahrnuje i jiné druhy evidencí a to evidenci krajinných prvků, evidenci umístění objektů hospodářství a evidenci obnovy travního porostu. Základní jednotkou je farmářský blok (půdní blok), kterou se rozumí souvislá plocha zemědělské půdy s jednou kulturou užívanou jedním farmářem v jednom režimu hospodaření (konvenční vs. přechodné vs. ekologické hospodaření). Kulturou se zde rozumí rozdělení na ornou půdu, travní porosty, ovocné sady, vinice, chmelnice či jiné kultury. Výhodou databáze LPIS je skutečnost, že je celá ve vektorové podobě a lze s ní jednoduše pracovat v prostředí GIS. Aktualizace dat v LPIS probíhá on-line v reálném čase přímo z regionálních pracovišť Ministerstva Zemědělství. Nevýhodou je, že v databázi nejsou zahrnuty všechny zemědělsky využívané půdy, např. opuštěné nebo extenzivně využívané louky. Samotní zemědělci nemají povinnost aktuálně hlásit běžně pěstované plodiny, pouze změny ve využití jednotlivých bloků. V důsledku toho není možné pro daný okamžik zjistit rozmístění plodin na jednotlivých plochách bez pozemního nebo dálkového průzkumu, případně bez vyžádání konkrétních informací od jednotlivých hospodařících subjektů. Data k LPIS jsou dostupná na vyžádání na regionálních odborech MZe (v papírové i digitální podobě). Databáze je vedena ve třech základních modulech. 1. Registr půdy pro farmáře (iLPIS) je určený evidovaným farmářům. Vybraná data jsou pak přístupná i veřejnosti ve formě 2. Veřejného registru půdy (pLPIS) či 3. jako WMS/WFS¹ služba.

WMS služba je vhodná pro vizualizaci půdních bloků ve vlastním softwaru, neumožňuje však další statistické vyhodnocení či práci s daty.

Na rozdíl od WMS služby pLPIS (pLPIS, online) umožňuje export vybraných dat ve vektorové podobě s připojenou atributovou tabulkou. Tato data pak lze snadno doplňovat, upravovat a využívat

¹ WMS – Web Map Service; WFS – Web Feature Service

k nejrůznějším výpočtům. Při potřebě získání dat pro větší území je nevýhodou export dat po jednotlivých katastrálních územích a tedy velká časová náročnost získání těchto dat.

Souhrnná data o půdním fondu a jeho členění na jednotlivé složky v rámci ČR i jednotlivých krajů každoročně aktualizuje Český statistický úřad (ČSÚ). Z těchto údajů vyplývá, že zemědělská půda zaujímá plošně významnou část území ČR. Podobně je tomu na úrovni jednotlivých krajů, kde se nachází naše dvě jaderné elektrárny Temelín a Dukovany (Tab. 1 a 2).

Tabulka 1. Kategorizace půdního fondu a rozdělení zemědělského půdního fondu České republiky
(zdroj: ČSÚ, 2012a, [online]; data platná pro rok 2012)

	[ha]	% z celkové výměry	% ze zemědělské půdy
Celková výměra	7 886 619		
Zemědělská půda	4 224 389	53,6	
Orná půda	2 993 236	38,0	70,9
Chmelnice	10 355	0,1	0,2
Vinice	19 562	0,2	0,5
Zahrady	163 320	2,1	3,9
Ovocné sady	46 393	0,6	1,1
Trvalé travní porosty	991 523	12,6	23,5
Nezemědělská půda	3 662 230	46,4	
Lesní pozemky	2 661 889	33,8	
Vodní plochy	163 965	2,1	
Zastavěné plochy	131 800	1,7	
Ostatní plochy	704 577	8,9	

Tabulka 2. Půdního fond a rozdělení zemědělského půdního fondu v krajích
(zdroj: ČSÚ, 2012b, [online]; data platná k 31.5. 2012)

	Jihočeský kraj		Vysočina+Jihomoravský kraj	
	[ha]	% z celkové výměry	[ha]	% z celkové výměry
Celková výměra	1 005 635		1 399 060	
Zemědělská půda	490 527	48,8	835 511	59,7
Orná půda	312 285	31,1	669 620	47,9
Chmelnice	-	-	-	-
Vinice	-	-	17 825	1,3
Zahrady	12 449	1,2	26 469	1,9
Ovocné sady	2 256	0,2	9 544	0,7
Trvalé travní porosty	163 537	16,3	112 053	8
Nezemědělská půda	515 109	51,2	563 550	40,3
Lesní pozemky	378 005	37,6	408 875	29,2
Vodní plochy	44 075	4,4	27 503	2
Zastavěné plochy	10 958	1,1	23 030	1,7
Ostatní plochy	82 071	8,2	104 141	7,4

Nepostradatelným podkladem o hodnoceném území je informace o aktuálním zastoupení plodin na dotčených pozemcích. Tato konkrétní informace není ovšem součástí žádné centrální databáze, proto je ji poměrně obtížné získat. Obecně je z tohoto pohledu žádoucí mít alespoň souhrnnou informaci o skladbě běžně pěstovaných plodin na hodnoceném území (Tab. 3 a 4). To systematicky, ale bohužel až zpětně, zajišťují pro jednotlivé oblasti na úrovni krajů pracoviště ČSÚ (Veřejná

databáze, [online]) a MZe (Zelené zprávy o stavu zemědělství, [online]). Informace o konkrétních plodinách pěstovaných na konkrétních pozemcích je tedy potřeba prozatím zjišťovat jinými způsoby (viz kapitola 2.4.).

Tabulka 3. Plošné zastoupení plodin na orné půdě ČR v roce 2013
(zpracováno dle údajů ČSÚ (2013a), online)

Skupina plodin	Osevní plocha [ha]	% na orné půdě	Plodina	Osevní plocha [ha]	% zastoup. ve skupině
Osevní plocha celkem	2 476 922	100			
Obiloviny celkem	1 428 171	57,7	Pšenice ozimá	788 422	55
			Pšenice jarní	40 970	3
			Žito ozimé a jarní	37 498	3
			Ječmen ozimý	106 265	7
			Ječmen jarní	242 727	17
			Oves	43 559	3
			Triticale	46 816	3
			Kukuřice na zrno	111 931	8
Luskoviny na zrno celkem	17 851	0,7	Hrách setý	12 934	72
Okopaniny celkem	86 151	3,5	Brambory	23 205	27
			Cukrovka technická	62 401	72
Olejniny celkem	486 908	19,7	Řepka ozimá	418 808	86
Pícniny na orné půdě	436 354	17,6	Jednoleté	265 030	61
			Víceleté	171 325	39
Zelenina konzumní	8 557	0,3			
Orná půda neosetá a úhor	23 784	1,0			

Tabulka 4. Plošné zastoupení plodin na orné půdě [ha] a procentické vyjádření dané plodiny v kraji z celkového množství pěstovaném v ČR v roce 2013 (zpracováno dle údajů ČSÚ (2013b), online)

	Jihočeský kraj		Vysočina+Jihomoravský kraj	
Skupina plodin	Osevní plocha [ha]	% z celk. množství v ČR	Osevní plocha [ha]	% z celk. množství v ČR
Obiloviny celkem	143 642	10,1	350 925	24,6
z toho: Pšenice	78 804		185 755	
Žito	5 727		9 904	
Ječmen	35 052		84 426	
Luskoviny na zrno celkem	1 628	9,1	5 318	29,8
Brambory celkem	2 986	12,9	9 812	42,3
Cukrovka technická	-	-	5 772	9,2
Řepka	45 409	10,8	84 740	20,2

Pícniny na orné půdě	53 417	12,2	110 690	25,4
z toho: Kukuřice na zeleno a na siláž	30 890		53 613	

2.3 Vývoj a výnosy hlavních polních plodin a agrotechnické lhůty

Kromě rozmístění jednotlivých plodin na pozemcích je pro odhad případné kontaminace důležitá informace o jejich stavu a množství. Jako orientační informace z tohoto pohledu mohou posloužit i údaje o průměrných výnosech plodin obecně pro podmínky příslušného státu nebo konkrétněji v dané (hodnocené) oblasti (Tab. 5 a 6).

Tabulka 5. Výnosy zemědělských plodin (Zdroj: ČSÚ, 2005-2012, online)

Plodina		Výnos (t/ha)		
		Min	Max	Průměr
Obilniny	Pšenice ozimá	4,34	5,78	5,06
	Pšenice jarní	4,09	4,41	4,25
	Žito ozimé a jarní	3,33	4,83	4,40
	Ječmen ozimý	3,98	4,64	4,31
	Ječmen jarní	4,31	4,95	4,63
	Oves	2,64	3,63	3,06
	Triticale	3,20	4,52	4,06
	Kukuřice na zrno	6,71	8,79	7,50
Olejniny	Řepka	2,76	3,18	2,93
	Slunečnice na semeno	2,11	2,49	2,30
	Sója	1,70	2,36	2,05
	Mák	0,46	0,85	0,66
	Hořčice na semeno	0,58	0,95	0,82
	Len setý olejný	0,66	1,63	1,19
Pícniny na orné půdě				
Jednoleté	Obilniny na zeleno	39,47	40,76	40,12
	Kukuřice na zeleno a na siláž	32,66	41,79	36,46
	Jetel červený	7,44	8,11	7,81
Víceleté	Vojtěška	7,23	8,51	8,01
	Ostatní	4,02	7,34	4,93

Tabulka 6. Výnosy zemědělských plodin v příslušných krajích – průměr let 2005-2012 (Zdroj: ČSÚ, 2005-2012, online)

Plodina		Výnos (t/ha)		
		Jihočeský kraj	Vysočina+Jihomoravský kraj	
			Průměr	JM
Obilniny celkem	Pšenice	4,44	4,73	4,38
	Žito	4,80	4,84	4,79
	Ječmen	4,50	4,26	4,51
		3,99	4,02	3,93
Luskoviny		1,97	2,21	2,08
				2,33

Brambory	28,51	24,94	27,79	22,10
Cukrovka technická	-	55,38	57,28	53,48
Řepka	2,87	2,88	2,86	2,90
Pícniny na orné půdě	6,66	6,41	6,30	6,53
Kukuřice na zeleno a na siláž	36,05	35,78	36,07	35,49

Dalšími podpůrnými podklady pro modelový odhad kontaminace plodin v příslušném období hodnocení jsou termíny fenofází, kdy průměrná data jejich nástupu lze získat ze sledování na fenologických stanicích ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav). Ty jsou vztaženy vždy pro danou oblast a její klimatické podmínky (např. údaje pro strategické plodiny v oblasti Temelínska v Tab. 7 -9.

Tabulka 7. Fenologické fáze obilovin I. skupiny

(Zdroj: Data z fenologické stanice Březnice, rok 2009, pobočka České Budějovice, Oddělení meteorologie a klimatologie ČHMÚ; Atlas fenologických poměrů Česka ČHMÚ)

			Datum nástupu fenofáze			
	Fenofáze	Kód	Pšenice ozimá	Ječmen jarní	Oves	Žito ozimé
1.	Setí	ST	10.9. -12.9.	23.3. -16.4.	3.-19.4.	24.9.-2.10.
2.	Vzcházení	VZ	20.9. -4.10.	10.-30.4.	15.4.-7.5.	1.-13.10.
3.	Počátek odnožování	OD	11.10.-17.10.	30.4.-15.5.	4.-12.5.	26.10.-10.11.
4.	Počátek prodlužování	PP	5.4. -8.4.	2.5.-22.5.		
5.	První kolénko	PN	28.4. -30.4.	cca 29.5.		
6.	Druhé kolénko	DN	7.5. -9.5.	25.5.-14.6.		
7.	Naduření pochvy	NP	18.5.	cca 11.6.	9.-17.6.	17.-21.5.
8.	Metání	ME	24.5.	11.6.-29.6.	17.-22.6.	21.-26.5.
9.	Počátek kvetení	PK	2.6. -7.6.	14.6.-29.6.	kol. 25.6.	3.-12.6.
10.	Konec kvetení	KK	24.6. -27.6.	28.6.		12.-20.6.
11.	MLéčná zralost	ZM	3.7. -5.7.	8.7.	10.-21.7.	29.6.-9.7.
12.	Žlutá zralost	ZZ	16.7. -19.7.	13.7.-2.8.		
13.	Plná zralost	ZP	24.7. -26.7.	25.7.-14.8.	9.-21.8.	28.7.-11.8.
14.	Sklizeň	SK	1.8.	10.8.	10.-30.8.	12.-25.8.

Tabulka 8. Fenologické fáze obilovin II. skupiny

(Zdroj: Data z fenologické stanice Březnice, rok 2009, pobočka České Budějovice, Oddělení meteorologie a klimatologie ČHMÚ)

Kukuřice				
	Fenofáze	Kód	Datum nástupu fenofáze	
1.	Setí	ST	15.4.	
2.	Vzcházení	VZ	30.4.-2.5.	
3.	Počátek metání	ME	14.7.-17.7.	
4.	Kvetení samčích a samičích květů	KA-	21.7.-23.7.	

5.	Mléčná zralost	KG	26.7.
6.	Mléčně vosková zralost	ZM	13.8.-14.8.
7.	Plná zralost	MV	22.8.-23.8.
8.	Sklizeň	SK	4.9.

Tabulka 9. Fenologické fáze olejnin (Zdroj: Data z fenologické stanice Březnice, rok 2009, pobočka České Budějovice, Oddělení meteorologie a klimatologie ČHMÚ; Atlas fenologických poměrů Česka, ČHMÚ)

Datum nástupu fenofáze				
Fenofáze	Kód	Řepka ozimá		Mák setý
1. Setí	ST	27.8.		11.-14.4.
2. Vzcházení	VZ	5.9.		26.4.-7.5.
3. První listy	PL	28.9.		
4. Počátek prodlužování	PP	3.4.		3.-19.6.
5. Počátek kvetení	PK	2.5.		27.6.-6.7.
6. Plný rozkvět	PR	5.5.		
7. Konec kvetení	KK	25.5.		10.7.-23.7.
8. Žlutá zralost	ZZ	11.7.		20.8.-5.9.
9. Sklizeň	SK	22.7.		23.8.-13.9.

Z hlediska hodnocení stavu a vývoje porostů polních plodin pro účely radiační ochrany jsou vedle znalosti jejich vývoje důležité zejména agrotechnické lhůty výsevu a sklizně. Tabulka 10 udává přehled o agrotechnických lhůtách hlavních polních plodin včetně ekvivalentní hodnoty pořadového čísla dne v roce, které je využito při zadávání dat do programu SARCA (viz dále). Tabulka dále udává orientační maximální hmotnost sušiny nadzemní hmoty odhadnutou na základě statistických údajů, měření a literárních zdrojů.

Tabulka 10. Přehled agrotechnických lhůt pro výsev a sklizeň hlavních polních plodin. V tabulce jsou uvedeny ekvivalentní hodnoty pořadí dne v roce. Pokud se jedná o plodiny s počátečním termínem v předchozím roce (ozimé plodiny), je uveden ekvivalent pro začátek vegetačního období 15. 3. V případě píceň odpovídá termín setí termínu předchozí sklizně, tzn. začátku nového cyklu růstu porostu.

Plodina		Termín setí	Termín sklizně	Sušina nadz. biomasy [t.ha ⁻¹]
Řepka ozimá		15. 8. (74)	15. 7. (196)	8,5
Pšenice ozimá		1. 10. (74)	10. 8. (222)	8,2
Pšenice Jarní		25. 3. (84)	15. 8. (227)	7,8
Ječmen ozimý		15. 9. (74)	10. 7. (191)	7,3
Ječmen jarní		5. 4. (95)	5. 8. (217)	7,2
Žito ozimé		20. 9. (74)	10. 8. (222)	9,0
Triticale ozimé		20. 9. (74)	10. 8. (222)	8,5
Oves		5. 4. (95)	15. 8. (227)	7,8
Hrách		5. 4. (95)	31. 7. (212)	7,5
Mák		25. 3. (84)	5. 8. (217)	8,5
Brambory (pozdní)		20. 4. (110)	20. 9. (263)	7,0
Kukuřice na siláž		1. 6. (152)	20. 9. (263)	10,8
TTP	1. seč	15. 9. (74)	20. 5. (140)	2,5
	2. seč	20. 5. (140)	15. 7. (196)	1,5
	3. seč	15. 7. (196)	15. 9. (258)	1,0
Vojtěška 1. rok	1. seč	5. 4. (95)	15. 7. (196)	5,0

	2. seč.	15. 7. (196)	1. 10. (274)	3,5
Vojtěška 2. rok	1. seč	1. 10. (74)	10. 5. (130)	3,8
	2. seč	10. 5. (130)	1. 7. (182)	3,0
	3. seč	1. 7. (182)	20. 9. (263)	1,7
Jetel 1. rok	1. seč	5. 4. (95)	20. 6. (171)	5,0
	2. seč.	20. 6. (171)	20. 8. (232)	3,5
Jetel 2. rok	1. seč	20. 8. (74)	5. 6. (156)	3,8
	2. seč	5. 6. (156)	20. 7. (201)	3,0
	3. seč	20. 7. (201)	15. 9. (258)	1,7
JTS	1. seč	5. 4. (95)	15. 6. (166)	4,5
	2. seč	15. 6. (166)	20. 8. (232)	3,0

Agrotechnické lhůty uvedené v tabulce 10 jsou uvedeny jako střední hodnoty, kdy je potřeba uvažovat rozmezí přibližně +/- 10 dní v závislosti na lokalitě, průběhu počasí a dalších faktorech. S ohledem na možnosti hodnocení množství nadzemní biomasy plodiny v daném roce je jako počátek růstu ozimých plodin uvažován počátek vegetačního období (15. 3.).

2.4 Hodnocení distribuce a stavu plodin v území

Účelem hodnocení zájmového území z hlediska aktuálně pěstovaných plodin je včasné zjištění distribuce jednotlivých druhů plodin a jejich produkčních vlastností a charakteristik. Aktuální distribuci plodin v zájmovém území neviduje žádná centrální databáze, je proto nutné hledat alternativní zdroje informací. V případě kontaminace plodin a řešení následných opatření je potřeba získání relevantních informací otázkou několika málo dnů. Z tohoto důvodu je možné z mnoha rozličných metod využít jen omezené množství. I vybrané metody mají pro tento účel své výhody i nevýhody (Tabulka 11).

Tabulka 11. Metody pro hodnocení plodinové skladby – výhody (+) a nevýhody (-)

Metoda	+	-
Terénní šetření	Přesnost (ale v závislosti na způsobu mapování)	Pracnost, časová náročnost,
Informace od hospodařících subjektů+zpracování v GIS	Časová nenáročnost sběru dat	Přesnost závisí na pravdivosti poskytnutých informací
Monitorování změn krajinného krytu s využitím dat DPZ	Dobrá kvalita optická i geometrická (u dat s velkým prostorovým rozlišením) Pořizovány v široké části spektra Možnost využití daná rozlišovací schopností a rozsahem vlnových délek snímaného odraženého záření Nízká cena na jednotku plochy dat	Softwarová, technická náročnost Chyby v interpretaci Závislost na meteorologických podmínkách u optického a termálního DPZ

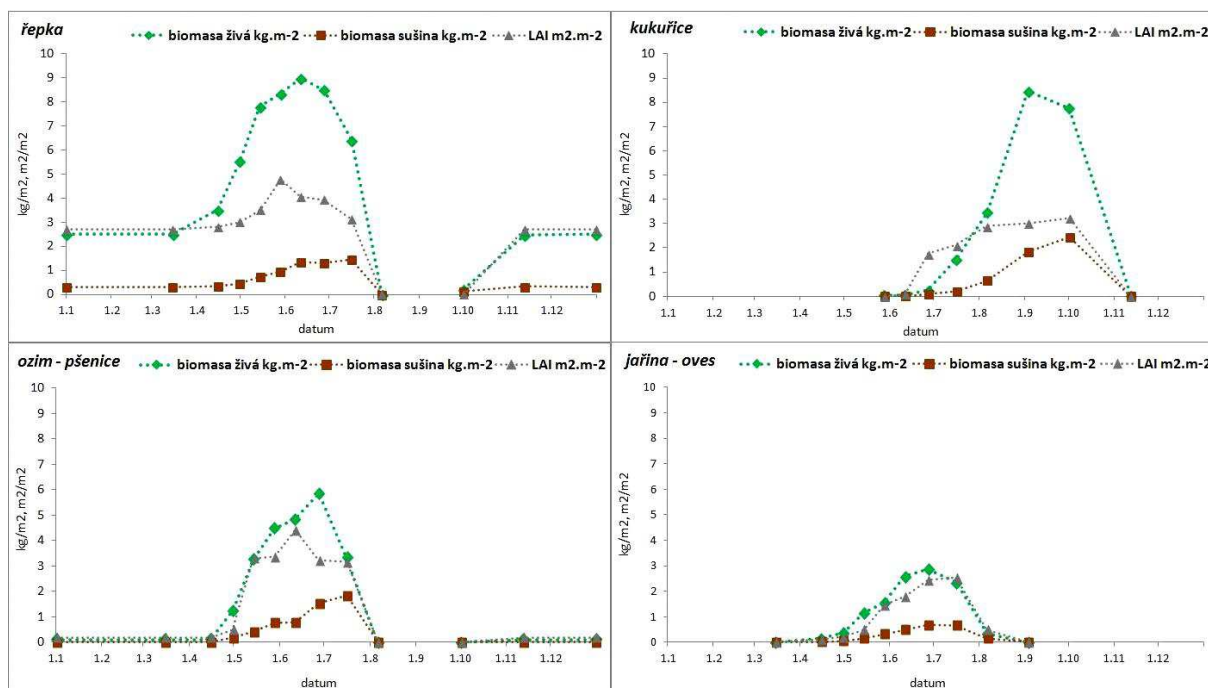
Do hodnocení se promítají také informace o klimatické charakteristice, ať už dlouhodobé nebo aktuální. Od toho se odvíjí i obecná znalost růstových podmínek pro jednotlivé plodiny.

Pro hodnocení množství biomasy a její vývoj během růstu je možné použít následující přístupy:

- dálkový průzkum Země (odhady na základě spektrálních indexů)
- vlastní měření
- využití matematických modelů

Distanční data dálkového průzkumu Země (DPZ) umožňují klasifikaci krajinného krytu pro velká území. Klasifikací družicových snímků lze zjistit druhové složení plodin v zájmovém území a jejich prostorovou distribuci a vypočítat jejich plošné zastoupení. Kvantitativní ukazatele, jako je množství biomasy, lze z distančních dat odhadnout s využitím spektrálních (vegetačních) indexů. Tyto indexy využívají odrazivosti povrchů v červené viditelné a blízké infračervené části elektromagnetického spektra (Schultz et Engman 2000). Mezi nejpoužívanější vegetační indexy patří Difference vegetation index (DVI) a Ratio Vegetation index (RVI), Leaf area index (LAI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Tasseled Cap (Yang et al. 2007; Dymond et al. 2002; Suming, Sader 2005). Nejlépe poznaným indexem je index NDVI, využitelný v široké mapovací škále prostřednictvím DPZ, při různém prostorovém rozlišení. Využívá se jako nepřímý nástroj pro studium biofyzikálních vlastností vegetace a jejich vztahu k celkové biomase (Teillet et al. 1997).

Výhodou vlastního měření je získání reálných a relativně přesných dat pro příslušné plodiny, které lze následně využít pro celou hodnocenou oblast s podobnými podmínkami. Nevýhodou je časová a materiální náročnost a vliv různých sezónních podmínek (počasí, agrotechnika). Ukázku výsledků z vlastního měření v oblasti Temelínska pro řepku, kukuřici, ozimou a jarní obilninu představují hodnoty v grafech za sezónu 2013 (Obr. 1).



Obr. 1. Sezónní hodnoty nadzemní biomasy (živá a sušina) a listové pokrývnosti (LAI) pro vybrané plodiny v okolí JE Temelín z roku 2013 (Hakrová a kol. 2013)

Jako nejvhodnější přístup hodnocení zájmového území pro účely odhadu radiační kontaminace plodin se z aktuálně dostupných metod ukázalo využití informací o prostorové distribuci plodin od hospodařících subjektů, které jsou dále využity pro výpočet množství nadzemní biomasy pomocí matematického modelu, v případě dostupnosti relevantních družicových dat i s použitím metod DPZ.

2.5 Výpočet charakteristik plodin a radioaktivní kontaminace plodin a půdy pomocí matematického modelu

Produkční charakteristiky plodin lze, vedle zjišťování vlastním terénním průzkumem nebo analýzou družicových dat, zjišťovat a analyzovat též pomocí matematických modelů růstové analýzy rostlin. Výhodou využití modelů růstové analýzy je možnost odhadu studovaných vlastností v průběhu celého sledovaného období, respektive v konkrétním čase a možnost propojení s dalšími vstupy, jako jsou např. informace o radioaktivní kontaminaci porostů. Nevýhodou je naopak jistá schematičnost, která je dána na jedné straně matematickým postupem, na straně druhé kvalitou a dostupností použitých dat. Souhrnný přehled přístupů růstové analýzy rostlin udávají např. Květ et al. (1971) a Paine et al. (2012).

V předkládané metodice uvádíme růstový model, který se snaží odhadovat změny růstových parametrů v čase s ohledem na minimalizaci vstupních dat, tak, aby byl model bez větších problémů se získáváním dat využitelný i poučeným laikiem. Model zároveň umožňuje odhad rozdělování radioaktivní kontaminace mezi povrch porostu a povrch půdy za podmínek suché i mokré depozice radioaktivního materiálu. Růstový model je založen na modelování růstu zemědělských plodin, kdy předpokladem je, že přírůstek sušiny plodin odpovídá sigmoidní (logistické) křivce v závislosti na čase. Hmotnost živé biomasy je pak dána součtem hmotnosti sušiny a obsahu vody v pletivech rostlin. Obsah vody v pletivech má, v relativní škále, předpokládaný klesající trend v průběhu sezóny.

Množství sušiny lze vypočítat na základě logistické funkce:

$$W = \frac{W_{\max}}{1 + e^{-t}} \quad [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (1)$$

kde $W_{\max}$ je maximální množství sušiny v produkci plodiny a t je škálovanou funkcí času, za předpokladu, že se křivka při zvolené hodnotě asymptoticky blíží limitním hodnotám. Hodnotu t vypočteme podle vzorce:

$$t = m \cdot t_s - n \quad [\text{bezrozm.}] \quad (2)$$

kde m a n jsou parametry specifické pro jednotlivé plodiny a t_s je škálovaná hodnota času vypočtená podle vzorce:

$$t_s = \frac{t_{akt} - t_0}{t_{\max} - t_0} \quad [\text{bezrozm.}] \quad (3)$$

kde t_{akt} je hodnota pro daný den v rámci uvažovaného období, t_0 je minimální uvažovaná hodnota (např. den výsevu) a $t_{\max}$ je maximální hodnota (např. den sklizně), kdy množství sušiny dosahuje maxima.

Vlastní parametry plodin n a m lze zjistit na základě kalibrace růstového modelu skutečným průběhem růstu dané plodiny během vegetačního období pomocí úpravy rovnice (1) a s využitím lineární regrese následujícím způsobem:

$$e^{-t} = \frac{W_{\max}}{W} - 1 \quad (4)$$

Logaritmováním rovnice získáváme výraz

$$-t = \ln\left(\frac{W_{\max}}{W} - 1\right) \quad (5)$$

a kombinací rovnic 2 a 5 získáváme výsledný tvar

$$-\ln\left(\frac{W_{\max}}{W} - 1\right) = m \cdot t_s - n \quad (6)$$

kdy na základě známých hodnot $W_{\max}$ a W lze s využitím lineární regrese vypočítat hodnoty m a n . Pro účely použití modelu v rámci předkládané metodiky byly parametry m a n stanoveny na základě změny sklonu regresní křivky mezi předpokládanou minimální a maximální hodnotou množství sušiny a hodnot t_s pro počáteční a konečný termín sledovaného období. S ohledem na matematické vyjádření rovnice (5), kdy nelze vypočítat přirozený logaritmus nulové a záporné hodnoty, byla rovnice (5) upravena následovně:

$$-t = \ln\left(\frac{W_{\max}}{W - 0,001} - 1\right) \quad (7)$$

kde W představuje minimální hodnotu množství sušiny v případě počátečního termínu a maximální hodnotu v případě konečného uvažovaného termínu ($W = W_{\max}$).

Uvedený způsob výpočtu produkce nadzemní biomasy, respektive její sušiny, je srovnatelný s postupy asymptotických tří a čtyřparametrových modelů, které uvádí Paine et al. (2012), nicméně zde je použit odlišný způsob parametrizace modelu.

Je potřeba poznamenat, že model uvažuje pouze s jednoduchým průběhem růstu plodiny s obdobími minimální a maximální biomasy, který nezahrnuje např. periodické seče travních porostů a podobně, kdy je potřeba každou periodu uvažovat samostatně. V případě ozimých plodin, permanentních kultur a přírodních porostů je, s ohledem na minimální biomasu v podzimním období, jako počátek vegetačního období brán do úvahy začátek vegetace ve sledovaném roce, tj. na jaře a je zároveň potřeba zohlednit již stávající množství (hmotnost) biomasy při parametrizaci modelu.

Výpočet hmotnosti živé biomasy na plochu závisí na obsahu vody v pletivech, který můžeme charakterizovat pomocí relativního obsahu vody v pletivech (RWC , %). Zde lze uvažovat postupný pokles obsahu vody v pletivech v průběhu vegetační sezóny, kdy předpokládáme, že vyšší cévnaté rostliny jsou v průběhu vegetačního cyklu z hlediska vodního provozu značně konzervativní (Larcher 1998). V tomto pohledu lze výpočet relativního obsahu vody v pletivech zobecnit podle rovnice:

$$RWC = \min\left(RWC_{\max}; \frac{2 \cdot RWC_{\min} \cdot t_s - RWC_{\max} \cdot (t_s^2 + t_s - 2)}{2}\right) \quad [\%] \quad (8)$$

kde $RWC_{\max}$ je předpokládaná maximální hodnota a $RWC_{\min}$ je předpokládaná minimální hodnota RWC v průběhu vegetační sezóny.

Vlastní hmotnost živé biomasy (B) na ploše vypočteme z hodnot RWC a sušiny následovně:

$$B = \frac{100 \cdot W}{100 - RWC} \quad [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (9)$$

Hodnotu maximálního možného množství biomasy ($B_{\max}$) vypočteme analogicky:

$$B_{\max} = \frac{100 \cdot W}{100 - RWC_{\max}} \quad [\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}] \quad (10)$$

Dalším významným produkčním ukazatelem porostu je index listové plochy (LAI), který je využit pro výpočty radiační kontaminace biomasy a povrchu půdy. Vlastní průběh vypočtené křivky LAI je značně generalizován na základě testovacích dat, kdy je křivka pro LAI vypočtena v krocích následovně:

$$LAI \approx \begin{cases} LAI_{max}^2 \frac{W}{\max W}; & t_s < 0.7 \\ X; & t_s \geq 0.7 \\ LAI_{max}; & LAI > LAI_{max} \end{cases} \quad [m^2 \cdot m^{-2}] \quad (11)$$

kde LAI je listová plocha ($m^2 \cdot m^{-2}$) a LAI_{max} je maximální listová plocha pro danou plodinu ($m^2 \cdot m^{-2}$). X je empirická funkce:

$$X = (-3,6511 \cdot LAI + 0,19993 \cdot RWC_{min} - 6,66309) \cdot t_s^2 + (3,9841 \cdot LAI_{max} - 0,14 \cdot RWC_{min} + 4,6668) \cdot t_s \quad (12)$$

Pro rozhodování o množství depozice radioaktivního materiálu na povrchu porostu a povrchu půdy je vypočten intercepční faktor f_w , který je ukazatelem, jak velká frakce depozice zůstává na povrchu porostu. Hodnota závisí na indexu listové plochy porostu a úhrnu srážek v průběhu depozice.

Podle Müllera a Pröhla (1993) lze intercepční frakci (faktor) depozice radioizotopu f_w v časné fázi radiační havárie vypočítat podle vzorce:

$$f_w = \min \left(1; \frac{LAI \cdot k \cdot S \cdot \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{3S}(R)} \right)}{R} \right) \quad [rel.] \quad (13)$$

kde k je specifický faktor pro daný kontaminant (I: $k = 0.5$; Sr, Ba: $k = 2$; Cs a ostatní radionuklidy: $k = 1$), S je tloušťka vodního filmu na rostlinách (mm) a R je úhrn srážek (mm). Hodnota S je zpravidla 0,15 – 0,3 mm se střední hodnotou 0,2 mm (Pröhl, 2003).

Výpočet depozice na povrchu rostlin vychází z předpokladu, že depozice na povrchu rostlin je poměrnou částí celkové depozice danou intercepčním faktorem:

$$D_{biomasa} = D_{celk} \cdot f_w \quad [Bq \cdot m^{-2}] \quad (14)$$

kde $D_{biomasa}$ je měrná depozice radioizotopu na povrchu rostlin a D_{celk} je celková měrná radioaktivní depozice zadávaná jako vstup do modelu. Měrná depozice radioizotopu na povrchu půdy (D_{puda}) je pak rozdílem mezi celkovou měrnou depozicí a měrnou depozicí na povrchu porostu:

$$D_{puda} = D_{celk} - D_{biomasa} \quad [Bq \cdot m^{-2}] \quad (15)$$

V případě, že jsou hodnoty produkčních ukazatelů rovny nule, je vypočtena pouze měrná depozice radioaktivního materiálu na povrchu půdy.

2.6 Použití programu SARCA pro odhad nadzemní biomasy zemědělských plodin a radioaktivní kontaminace plodin a půdy

2.6.1 Popis programu SARCA

Pro odhad nadzemní biomasy zemědělských plodin a kontaminace zemědělských plodin a půdy radioaktivním materiálem v prostorovém měřítku byl vytvořen program SARCA (akronym názvu **S**patial **A**ssessment of **R**adioactive **C**ontamination of **A**gricultural **C**rops), který používá výše uvedený způsob výpočtu sledovaných parametrů. Program byl vytvořen a koncipován jako samostatný, volně stažitelný a instalovatelný produkt zaměřený na práci s daty geografických informačních systémů

(GIS). Důvodem tohoto řešení je bezproblémová a všestranná využitelnost širokou skupinou uživatelů, kteří budou moci program bez problémů ovládat. Program je napsán v programovacím jazyce Python™, který zároveň představuje běhové prostředí programu SARCA a je k dispozici jako svobodný software. Program SARCA je multiplatformní, lze jej tedy provozovat jak pod MS Windows, tak i pod Linuxem. Program SARCA je licencován v rámci licence BSD 3 Clause License, je tedy volně šiřitelný a upravovatelný. V současné době je k dispozici u autorů.

Oproti předchozím verzím (modul Biomasa-Kontaminace, Kepka et al. 2010, Brom et al. 2012), které byly koncipovány jako modul programu ESRI® ArcMap 9.2 ArcInfo (k dispozici na <http://kkm.zf.jcu.cz/content/biomasa-kontaminace>), bylo zpřehledněno uživatelské prostředí a zvýšena funkcionality, kterou lze rozdělit do tří částí:

1. Odhady produkčních parametrů zemědělských plodin

Program umožňuje orientační výpočet, respektive odhad základních parametrů produkce biomasy zemědělských plodin pro jednotlivé obhospodařované plochy v zájmovém území, tj. odhad hmotnosti živé nadzemní biomasy a její sušiny na plochu ($t \cdot ha^{-1}$), relativní obsah vody v pletivech rostlin (%) a index listové plochy ($m^2 \cdot m^{-2}$). Hmotnostní charakteristiky jsou přepočteny na plochu daného pozemku. Produkční charakteristiky jsou dále použity pro výpočty spojené s otázkou radioaktivní kontaminace zemědělské půdy a pro ekonomické hodnocení následných zásahů.

2. Prostorové hodnocení radioaktivní kontaminace zemědělských ploch

Program SARCA umožňuje vypočítat průměrnou měrnou aktivitu depozice radionuklidu pro jednotlivé zemědělské plochy na základě zadání vrstvy měrné depozice daného radionuklidu ve sledovaném prostoru (např. výstupy z předpovědních modelů). Prostřednictvím výpočtu intercepčního faktoru lze následně rozdělit úroveň radioaktivní depozice na depozici radionuklidu na rostlinách a na povrchu půdy. Výpočet zahrnuje otázku atmosférických srážek, které se významně uplatňují v distribuci kontaminantu mezi povrch porostu a povrch půdy. Podle úrovně kontaminace jsou podle referenčních úrovní OIL (IAEA 1997) plochy rozděleny do tří tříd v návaznosti na další možné zásahy na jednotlivých plochách zemědělské půdy, tzn. na plochy bez zásahu, s omezeným zásahem a plochy s měrnou aktivitou radiace ohrožující zdraví člověka. Jako defaultní referenční úrovně a intervaly byly stanoveny hodnoty $0 - 5 \text{ kBq} \cdot m^{-2}$, $5 \text{ kBq} \cdot m^{-2} - 3 \text{ MBq} \cdot m^{-2}$ a $> 3 \text{ MBq} \cdot m^{-2}$. Byly zvoleny jako typické plošné kontaminace pro Cs-137, při nichž se očekává překročení mezních hodnot obsahu radionuklidů v plodinách pro trh, tj. plošná kontaminace ve vegetační sezoně $5 \text{ kBq} \cdot m^{-2}$ a mimo vegetační sezonu $3 \text{ MBq} \cdot m^{-2}$, v rámci zadávání dat do vstupního formuláře aplikace je možné defaultní referenční úrovně podle potřeby upravit. S ohledem na další možné využití biomasy byl do výpočtu zařazen i výpočet hmotnostní kontaminace biomasy, jehož hodnota představuje hranici hygienického limitu a byla stanovena na úroveň $1000 \text{ Bq} \cdot kg^{-1}$ živé biomasy. Hodnotu zadaného hygienického limitu lze podle potřeby upravit při zadávání dat do programu SARCA.

3. Orientační ekonomické zhodnocení zásahů

Pomocí programu SARCA lze orientačně odhadnout cenu sklizně, případně odstranění biomasy z ploch. Částka na dané aktivity je zde brána jako komplexní hodnota pro danou plodinu, zahrnující všechny potřebné náklady, kdy výsledná hodnota nákladů je vypočtena jako součin hodnoty nákladů na ha a plochy daného pozemku. Pro účely předkládané metodiky byly v dále uvedených případových studiích použity hodnoty z tabulky 12.

Všechny vypočtené parametry jsou vztaženy k danému časovému okamžiku (dni) v roce, který zpravidla koresponduje s okamžikem radiační havárie nebo s obdobím rané depoziční fáze případné kontaminace.

2.6.2 Vstupy programu SARCA

Vstupy programu jsou:

- Prostorová distribuce plodin na sledovaném území (vektorová vrstva plodin)
- Produkční parametry pěstovaných plodin a další potřebné tabulkové údaje
- Den v roce, pro který má být proveden výpočet, respektive den, kdy došlo k radiační havárii
- Prostorová distribuce měrné depozice radioizotopu pro daný stav. Data jsou zadávána buď jako tabulka datového výstupu programu HARP RP nebo jako rastrová vrstva ve formátu tif. Tento přístup umožňuje využití i jiných zdrojů dat, jako je například letecké snímkování měrné aktivity v zájmovém prostoru.
- Druh kontaminantu
- Referenční úrovně radioaktivity pro nakládání s rostlinným materiálem a půdou podle OIL (IAEA 1997)
- Hygienický limit měrné kontaminace biomasy (Vyhláška SÚJB 307/2002 Sb.)
- Vrstva nebo hodnota úhrnu srážek v zájmovém území v průběhu depozice radionuklidu

Detailní popis jednotlivých vstupů do programu SARCA obsahuje dokumentace programu. Vstupní formulář programu ukazuje obr. 2.

The screenshot shows the SARCA input form with the following sections:

- Parametry plodin**
 - Choose polygon layer (shp): [] Otevrit
 - Primary crop key: []
 - Choose attributes (csv): [] Otevrit
 - Datum udalosti**
 - Den: []
 - Mesic: []
 - Rok: []
- Radioaktivní kontaminace**
 - ☒ Výpočet depozice na základě dat HAVAR/HARP RP
 - ☐ Vložení připravené rastrové vrstvy depozice
 - Choose data deposition: [] Otevrit
 - Choose raster layer deposition: [] Otevrit
 - Choose contaminant: Cs []
 - Estimated area: JETE []
 - Reference level RU1 (Bq.m⁻²): 5000
 - Reference level RU2 (Bq.m⁻²): 3000000
 - Hygienic limit of biomass contamination (Bq.kg⁻¹): 1000
- Uhrn srážek**
 - ☒ Constant precipitation value for the area of interest
 - ☐ Raster distribution of precipitation
 - Precipitation value (mm): 0
 - Choose raster layer of precipitation: [] Otevrit
 - Choose path and name of output layer (shp): [] Otevrit

Buttons: Close, OK

Obr. 2. Vstupní formulář programu SARCA.

2.6.3 Výstupy programu SARCA

Výstupem programu je vektorová polygonová vrstva ve formátu ESRI shapefile (shp), která prostorově odpovídá vrstvě plodin v zájmovém území. K vektorové vrstvě je připojena databázová tabulka, ve které jsou uvedeny hodnoty vypočtených veličin, které je možné dále zobrazovat a zpracovávat buď přímo pomocí nástrojů GIS, nebo pomocí tabulkových a databázových nástrojů. Výstupní vrstva obsahuje vedle vlastní polohové informace následující údaje o jednotlivých plochách:

- Název subjektu, který danou plochu obhospodařuje.
- Název plodiny, např. pšenice ozimá.

- Kód plodiny – zkratka pro pěstovanou plodinu na dané ploše. Hodnota koresponduje s vrstvou plodin a hodnotou atributů plodin.
- Plocha – plocha jednotlivých polygonů ve vrstvě (ha).
- Množství sušiny v $t \cdot ha^{-1}$ a v t na daném pozemku.
- Množství živé biomasy v $t \cdot ha^{-1}$ a v t na daném pozemku.
- Průměrná hodnota indexu listové plochy ($m^2 \cdot m^{-2}$)
- Hodnota úhrnu srážek v průběhu depozice radionuklidu (mm)
- Průměrná depozice radionuklidu vypočtená pro danou plochu z vrstvy kontaminace ($Bq \cdot m^{-2}$). Pokud není zadána vrstva kontaminace, není součástí výstupu.
- Hodnoty depozice radionuklidu na rostlinné biomase a na povrchu půdy ($Bq \cdot m^{-2}$). Pokud není zadána vrstva kontaminace, není součástí výstupu.
- Hmotnostní kontaminace porostu radioaktivním materiálem ($Bq \cdot kg^{-1}$). Pokud není zadána vrstva kontaminace, není součástí výstupu.
- Referenční úrovně hodnoty radioaktivní depozice na dané ploše. 0 – hodnota pro úroveň radioaktivní depozice pro neomezené nakládání s rostlinným materiálem a půdou (např. do $5 \text{ kBq} \cdot m^{-2}$); 1 – hodnota depozice mezi zvolenými úrovněmi, kdy lze předpokládat omezené nakládání s rostlinným materiálem a půdou (nastaveno od $5 \text{ kBq} \cdot m^{-2}$ do $3 \text{ MBq} \cdot m^{-2}$); 2 – hodnota depozice nad zvolenou referenční úrovní, kdy může dojít k bezprostřednímu ohrožení zdraví člověka, aktivity v daném prostoru jsou značně omezené a podléhají přísné regulaci (nastavena hodnota nad $3 \text{ MBq} \cdot m^{-2}$). Pokud není zadána vrstva kontaminace, není součástí výstupu.
- Hygienický limit radioaktivní kontaminace vyjádřený jako třídy: 0 – nepřekračuje stanovený hygienický limit; 1 – stanovený hygienický limit překračuje. Pokud není zadána vrstva kontaminace, není součástí výstupu.
- Orientační přehled nákladů na sklizeň biomasy z jednoho hektaru plochy. Pokud není zadána tabulka přehledu nákladů, není součástí výstupu. Odstranění biomasy je doporučeno s ohledem na celkovou kontaminaci dané plochy, tedy na kategorii referenční úrovně (pouze RU 1), s ohledem na množství biomasy na ploše (pokud je hmotnost biomasy větší než $0,5 \text{ t} \cdot ha^{-1}$) a na velikost intercepčního faktoru (pro intercepční faktor větší než 0,3).
- Doporučení pro odstranění biomasy z jednotlivých pozemků

Z důvodu snadnější práce s výstupní datovou tabulkou provádí program SARCA export dat do formátu csv, který lze bez problémů načíst pomocí tabulkového procesoru (např. MS Excel, LibreOffice apod.). Export je proveden pod stejným názvem jako výstupní vrstva shp. Ukázku výstupní datové tabulky uvádí obr. 3.

FID	Shape	SUBJEKT	NAZEV	plodina	PLOCHA	W_HA	W_POL	B_HA	B_POL	LAI	SRAZKY	DEPOZ	DEP_POR	DEP_PUD	IF	KONT_POR	RU	HYG_LIM	NAKLADY	ODSTR
69	Polygon			TTP	3.260757	0.014271	0.046534	0.142709	0.465338	0.071354	0	0.078556	0.001295	0.077261	0.016485	0.090747	0	0	5543.28682	NE
70	Polygon			RE	7.280855	8.498525	61.876527	11.828247	86.119754	1.6936	0	0.011642	0.004596	0.007086	0.391328	0.003852	0	0	13195.538837	NE
71	Polygon			OB_SKL	7.178632	0	0	0	0	0	0	78.202972	0	78.202972	0	0	0	0	0	NE
72	Polygon			RE	1.065002	8.498525	9.220919	11.828247	12.633675	1.6936	0	9110.924805	3565.362587	5545.562216	0.391328	3014.277981	1	1	1953.004109	ANO
73	Polygon			IAA	5.932332	8.497631	50.411195	13.466757	79.889849	2.280666	0	530.745667	230.88422	249.861446	0.529226	208.575886	0	0	10678.287577	NE
74	Polygon			KU	14.282755	5.612242	80.158278	56.12242	801.582786	2.858086	0	0	0	0	0.66032	0	0	0	58559.296776	NE
75	Polygon			OB_SKL	5.913861	0	0	0	0	0	0	1498400	0	1498400	0	0	1	0	0	NE
76	Polygon			PS	4.977864	8.1967	40.800422	12.61084	62.772526	2.762676	0	1034073.25	660025.573228	374047.676772	0.638277	523379.554138	1	1	8959.795503	ANO
77	Polygon			RE	1.703619	8.498525	14.478251	11.828247	20.15083	1.6936	0	571401.8125	223605.691886	347796.120634	0.391328	189643.806065	1	1	3086.514623	ANO
78	Polygon			JO	5.004334	7.298571	36.524489	10.158152	50.634786	1.6936	0	6357.3875	2487.825553	3889.561947	0.391328	2449.092756	1	1	9007.80165	ANO
79	Polygon			TTP	2.420685	0.014271	0.034545	0.142709	0.345453	0.071354	0	0	0	0	0.016485	0	0	0	4115.165092	NE
80	Polygon			OB_SKL	20.060926	0	0	0	0	0	0	435487.078947	0	435487.078947	0	0	1	0	0	NE
81	Polygon			None	0.862882	0	0	0	0	0	0	13327.271484	0	13327.271484	0	0	1	0	0	NE
82	Polygon			KU	0.850202	5.612242	4.771541	56.12242	47.715411	2.858086	0	0	0	0	0.66032	0	0	0	3485.829459	NE
83	Polygon			KU	2.632007	5.612242	14.771457	56.12242	147.714574	2.858086	0	0	0	0	0.66032	0	0	0	10791.226719	NE
84	Polygon			OB_SKL	7.35394	0	0	0	0	0	0	4.399721	0	4.399721	0	0	0	0	0	NE
85	Polygon			RE	59.11959	8.498525	502.429311	11.828247	699.281137	1.6936	0	62516.46371	24464.460596	38052.003123	0.391328	20683.051472	0	1	106415.261577	ANO
86	Polygon			TTP	16.479741	0.014271	0.23516	0.142709	2.351602	0.071354	0	49.184639	0.810029	48.37381	0.016485	56.817041	0	0	28015.59324	NE
87	Polygon			OV	2.80566	7.786608	21.847292	12.956635	36.352171	3.45359	0	0.138743	0.110703	0.02804	0.787903	0.085441	0	0	5050.223782	NE

Obr. 3. Ukázka atributové tabulky výstupní vrstvy z programu SARCA.

2.7 Analýza nákladovosti opatření za účelem snížení úrovně kontaminace zemědělských ploch

Ekonomický dopad na zemědělskou výrobu a produkci polních plodin představuje rozsáhlou kapitolu, která zahrnuje jak otázku vlastních opatření, prováděných v případě radiační havárie, tak i problematiku ekonomických ztrát vzniklých vlastním poškozením plodin, zemědělských ploch, orné půdy a omezením využití zemědělských ploch pro další produkci v budoucnosti. Nutné je zmínit i poškození životního prostředí.

Hodnocení nákladovosti opatření za účelem snížení úrovně kontaminace zemědělských plodin a zemědělských ploch vychází z použitelných scénářů uvedených v příručce opatření EURANOS (Nisbet et al. 2006) a opatřeních po jaderné havárii v oblasti zemědělské produkce, která uvádějí autoři Turcanu, Carlé, Hardeman (2008). V obou případech se jedná zejména o jednotlivá opatření - scénáře, která by se navrhovala realizovat v případě havárie v jednotlivých růstových fázích zemědělských plodin. Logistika opatření za účelem snížení či likvidace kontaminace zemědělských plodin a půdy bude samozřejmě závislá na úrovni aktuální kontaminace. Důležitými faktory ovšem následně budou zdroje a možnosti nasazení osob při navrhovaných opatřeních, použití strojů a techniky a v neposlední řadě i nákladovost takových opatření.

Pro účely předkládané metodiky byla provedena pouze ekonomická analýza nákladovosti odstranění biomasy zemědělských plodin z pozemků. Jedná se především o vlastní odstranění biomasy z pozemku (sečení, odvoz) a uskladnění sklizené biomasy na deponie, buď přímo na pozemcích, nebo na centrálních skládkách v blízkosti pozemků. Ceny jsou kalkulovány na základě dostupných cenových nabídek firem provádějících zemědělské služby. S ohledem na použitou rozdílnou techniku, náročnost jednotlivých prací a specifčnost situace při radioaktivní kontaminaci plodin, lze očekávat jistou variabilitu v potřebných nákladech a je potřeba brát výpočet nákladovosti opatření s jistou rezervou. Tabulka 12 uvádí přehled jednotlivých prací a cenové kalkulace na plošnou jednotku. Z pohledu sklizně nadzemní biomasy lze obiloviny, společně s řepkou ozimou, mákem a hořčicí bílou, chápat jako píceiny na orné půdě. Kalkulace nákladů se tedy významně liší od ceny sklizně vlastního zemědělského produktu. V případě nadzemní biomasy brambor je kalkulována cena odpovídající sklizni jetelovin a jetelotravní směsky. Údaje uvedené v tabulce 12 jsou dále použity pro kalkulaci nákladů v případových studiích (viz dále).

Tabulka 12. Kalkulace nákladů na jednotlivé činnosti při odstranění nadzemní biomasy zemědělských plodin za účelem snížení úrovně radioaktivní kontaminace zemědělských ploch.

Plodina	Sečení [Kč]	Shrnování [Kč]	Sběr a odvoz [Kč]	Celkem [Kč]	Zaokrouhleno [Kč]
Kukuřice	2405		1600	4005	4100
Jeteloviny a JTS	1800		1185	2985	3000
TTP	570	405	700	1675	1700
Obiloviny	620	375	800	1795	1800
Brambory	1800		1185	2985	3000

2.8 Odhad radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a půdy na příkladu havárie JE Temelín – případová studie

Jaderná elektrárna Temelín (JE Temelín), jako jedna z významných jaderných zařízení na území České republiky, představuje potenciální zdroj radioaktivního znečištění životního prostředí a tedy

i zemědělských plodin a půdy. V předkládané práci uvádíme případovou studii vyhodnocení kontaminace zemědělských plodin a půdy v zájmovém území zóny havarijního plánování JE Temelín na příkladu modelové situace radiační havárie generované modelem HARP RP (ÚTIA AV ČR v.v.i.). Analýza byla provedena pro termín 27. 7. 2013, kdy již došlo ke sklizni na části ploch a u některých plodin je patrná senescentní fáze růstu, respektive fáze zralosti, zejména u obilovin a řepky, kdy dochází ke snižování obsahu vody v pletivech a snižuje se tedy i množství živé biomasy na plošnou jednotku.

2.8.1 Analýza prostorové distribuce plodin v zájmovém území

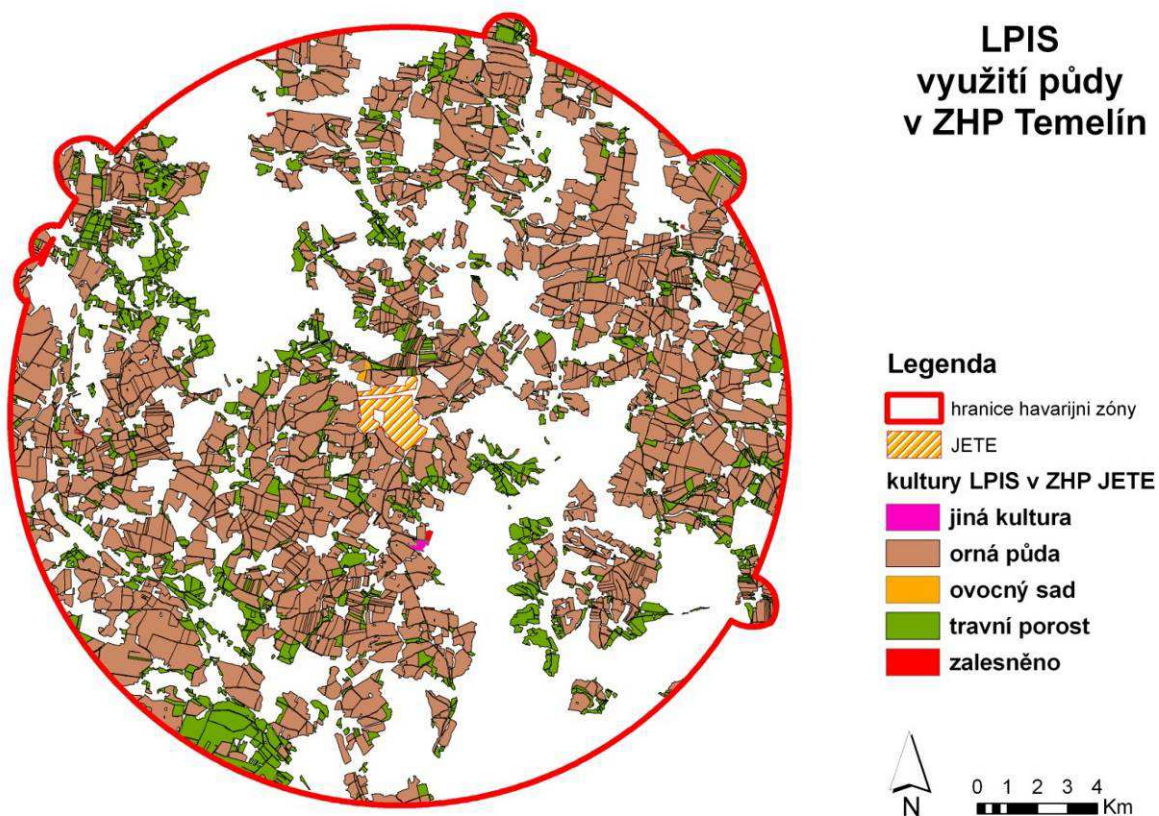
Prvním krokem pro analýzu a hodnocení zájmového území JE Temelín je příprava aktuální digitální vrstvy prostorové distribuce plodin v prostředí GIS na základě dostupných zdrojů dat. Jako modelová oblast testování odhadu kontaminace zemědělských plodin a půdy pomocí programu SARCA byla primárně zvolena zóna havarijního plánování (ZHP) jaderné elektrárny. Oblast ZHP JE Temelín byla vymezena Státním úřadem pro jadernou bezpečnost kružnicí o poloměru 13 km se středem v kontejnmentu prvního bloku JE.

Z celkové plochy ZHP JE Temelín (53 822 ha) tvoří dle údajů zjištěných z LPIS 51 % zemědělská půda a 49 % území připadá na ostatní využití (lesy, vodní plochy, zástavba, plochy nezahrnuté v LPIS).

Rozdělení zemědělské půdy v roce 2013, zjištěné z údajů LPIS, uvádí tabulka 13. Rozmístění jednotlivých kategorií využití půdy je znázorněno na obr. 4.

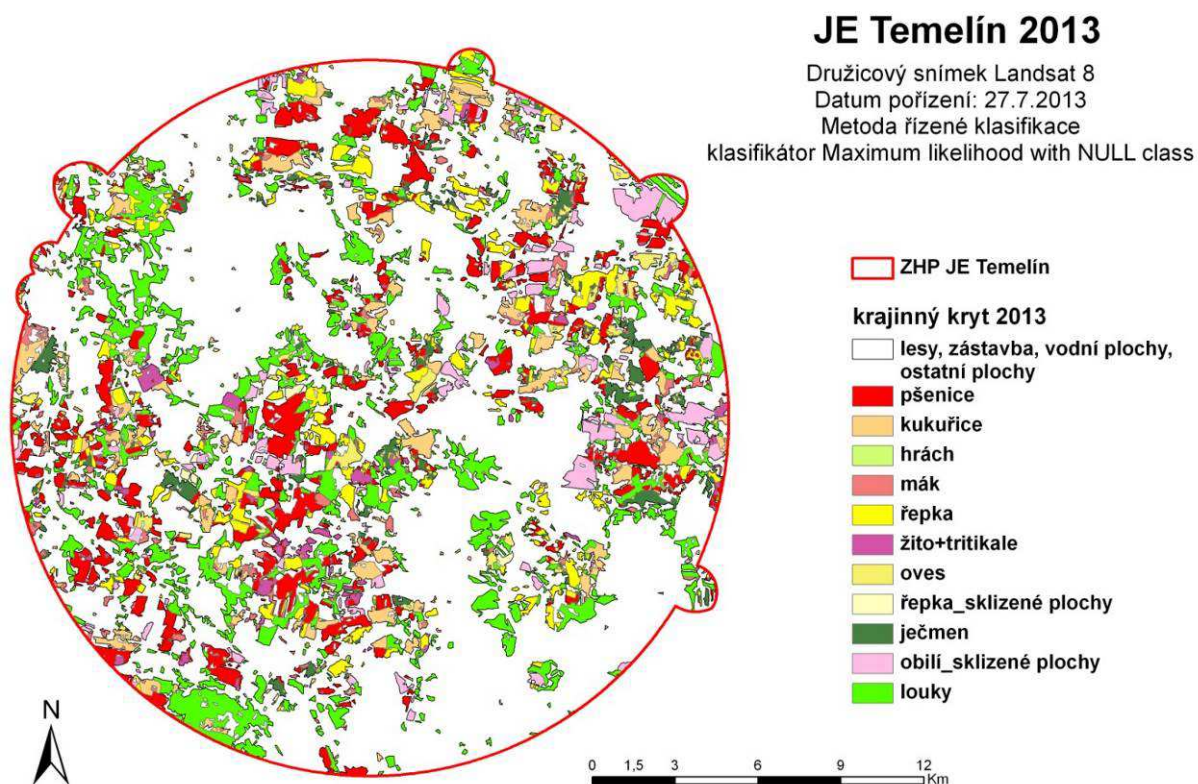
Tabulka 13. Struktura zemědělské půdy v ZHP JE Temelín v roce 2013 (Analýza dat LPIS 2013)

	Plocha [ha]	% ze zemědělské půdy
Zemědělská půda	27 676	
z toho:		
Orná půda	21 522	77,8
Ovocný sad	225	0,8
Porost RRD	19	0,1
Školka	12	0,04
Travní porost	5 863	21,2
Zalesněná půda	34	0,1
Jiná	0,83	0,003



Obr. 4. Využití půdy v ZHP JE Temelín (Zdroj dat: vrstva LPIS 2013).

Řízenou klasifikací družicového snímku družice Landsat 8 ze dne 27. 7. 2013 bylo na základě podkladových dat o pěstovaných plodinách klasifikováno území ZHP JE Temelín z hlediska plodinové skladby (Obr. 5). Plošné zastoupení pěstovaných plodin shrnuje tabulka 14, kdy plochy jednotlivých plodin získaných klasifikací dat k aktuálnímu termínu nemusí vzhledem k systému jejich získávání zcela odpovídat plochám zjištěným zpětně z databáze LPIS.



Obr. 5. Plodinová skladba v ZHP JE Temelín získaná řízenou klasifikací dat družice Landsat 8 z 27. 7. 2013.

Tabulka 14. Plodinová skladba a louky v ZHP JE Temelín (klasifikace distančních dat)

Plodina	Plocha [ha]	% zastoupení na zemědělské půdě
Pšenice	4015	21,7
Kukuřice	2187	11,8
Hrách	9	0,05
Mák	711	3,8
Řepka	2146	11,6
Žito+tritikale	541	2,9
Oves	742	4
Ječmen	994	5,4
Obilí_sklizené plochy	1433	7,7
Louky	5741	31

Jak ukazuje tabulka 14, dominantní zastoupení ve sledované oblasti zaujímají trvalé travní porosty (31 % z výměry zemědělské půdy) a porosty pšenice (21,7 %).

2.8.2 Analýza radioaktivní kontaminace pomocí programu SARCA

Pro vlastní hodnocení depozice radioaktivního materiálu byl využit program SARCA.

Vstupní data

Vstupními daty jsou pro účely případové studie digitální vrstva prostorové distribuce plodin, atributy plodin pro výpočet biomasy plodin a dalších charakteristik pomocí růstového modelu a modelový datový soubor depozice radioaktivního cesia ^{137}Cs z modelu HARP RP (ÚTIA AV ČR v.v.i.). Byla použita data odpovídající termínu, pro který bylo provedeno hodnocení prostorové distribuce plodin, tedy pro 27. 7. 2013.

Problematika tvorby digitální vrstvy prostorové distribuce plodin je diskutována výše. Pro účely metodiky byly použity parametry růstového modelu, který shrnuje tabulka 15. Součástí tabulky je i orientační parametr nákladovosti likvidace jednotlivých plodin v Kč na ha. Je potřeba upozornit, že stanovení parametrů růstového modelu je otázkou konkrétních podmínek daného území a vlastností pěstovaných plodin. Zde uvedený příklad nelze chápat jako univerzální.

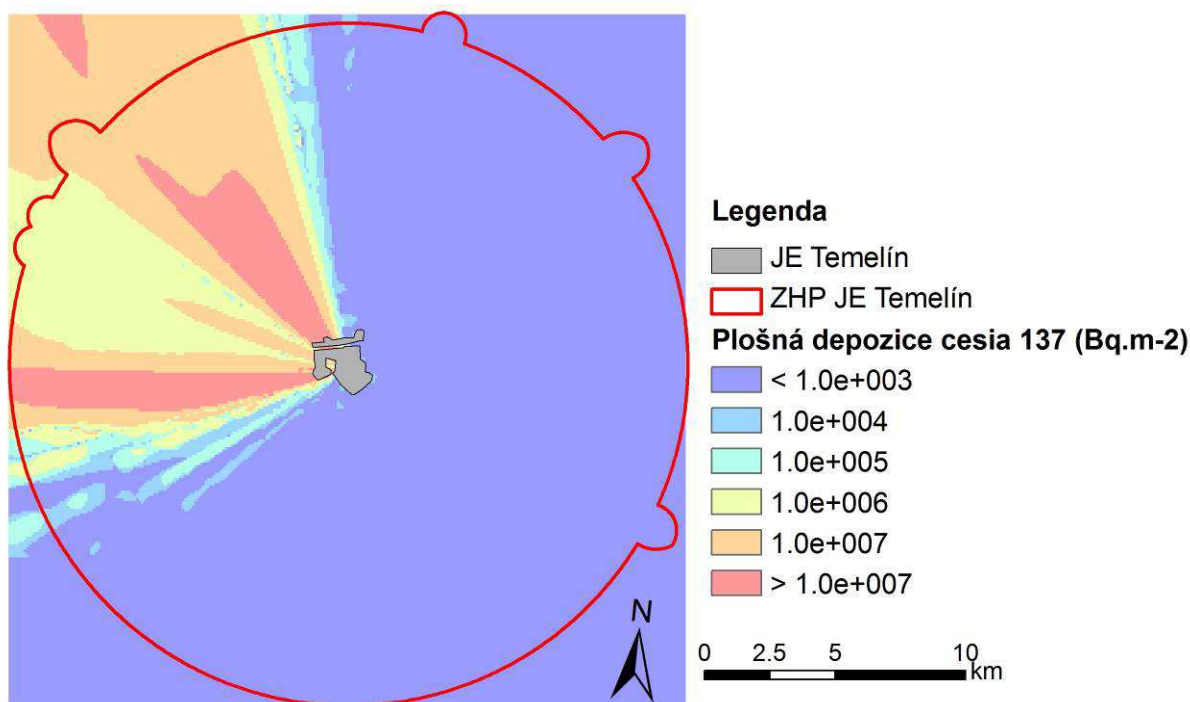
Tabulka 15. Parametry růstového modelu a ekonomické náklady odstranění biomasy pro jednotlivé druhy zemědělských plodin. $W_{\max}$ – maximální množství sušiny nadzemní biomasy, T_0 a $T_{\max}$ – den začátku (osev) a konce (sklizeň) vegetačního období plodiny zadané jako pořadí dne v roce, $R_{\max}$ a $R_{\min}$ – relativní obsah vody na začátku a konci vegetačního období plodiny, $LAI_{\max}$ – maximální hodnota indexu listové plochy, M a N – parametry růstového modelu stanovené podle rovnic (8) a (7), Náklady – orientační náklady potřebné na sklizeň biomasy.

NAZEV	$W_{\max}$ [t.ha ⁻¹]	T_0	$T_{\max}$	$R_{\max}$ [%]	$R_{\min}$ [%]	$LAI_{\max}$	M	N	Náklady [Kč.ha ⁻¹]
Pšenice	8,2	74	222	90	25	5	12,71	3,69	1800
Kukuřice	10,8	152	263	90	70	5,5	18,57	9,29	4100
Hrách	7,5	95	212	95	40	4	17,85	8,92	1800
Mák	8,5	84	217	90	30	4,5	12,78	3,73	1800
Řepka	8,5	74	212	90	25	5	13,49	4,44	1800
Žito+triticale	9	74	222	90	25	5,5	12,89	3,79	1800
Oves	7,8	95	227	90	25	5	17,92	8,96	1800
Ječmen	7,3	74	212	90	25	5	12,47	3,57	1800
Travní porosty	1	196	258	90	70	5	13,82	6,91	1700

Tabulka atributů plodin s parametry pro růstový model je vkládána do programu SARCA ve formátu csv. Jak vyplývá z tabulky 15, nesouhlasí údaj sklizně ječmene ozimého s údajem uvedeným v tabulce 10, který odpovídá předpokládanému termínu sklizně. V předkládané modelové studii byl termín sklizně, s ohledem na průběh počasí a postup sklizně posunut na 31. 7. 2013.

Datové podklady o prostorové distribuci depozice radioaktivního cesia ^{137}Cs byly generovány modelem HARP RP jako integrál depozice za 48 hodin po radiační události. On-line verze modelu HARP RP je k dispozici na <https://dss.utia.cas.cz/>. Do programu SARCA se zadává přímo výstup z modelu HARP RP v textovém formátu (txt), který je následně převeden do geografického souřadného systému a je interpolován do rastrového formátu metodou bilineární interpolace². Grafické znázornění interpolované vrstvy radioaktivní depozice ^{137}Cs v zájmovém území ukazuje obrázek 6.

² Tento způsob lze použít pouze pro území Jaderné elektrárny Temelín a Jaderné elektrárny Dukovany, pro které je v programu SARCA přednastavena možnost interpolace dat v geografickém zobrazení S-JTSK. Pro jiná území, případně pro jiné geografické zobrazení je potřeba do programu zadávat již interpolovanou rastrovou vrstvu depozice radioaktivního materiálu v použitém geografickém zobrazení.



Obr. 6. Grafické znázornění interpolované vrstvy modelové situace radioaktivní depozice ^{137}Cs (Bq.m⁻²) generované modelem HARP RP pro zájmové území ZHP JE Temelín.

S ohledem na nulový úhrn srážek ve sledovaném období byla použita hodnota úhrnu srážek rovna nule pro celé zájmové území.

Výstupy výpočtu

Výstupem výpočtu je digitální vektorová vrstva ve formátu shp, která prostorově odpovídá specifikaci vstupní digitální vrstvy prostorové distribuce plodin. Pro rozhodovací proces o aktivitách v zájmovém území jsou podstatné informace uvedené ve sloupcích:

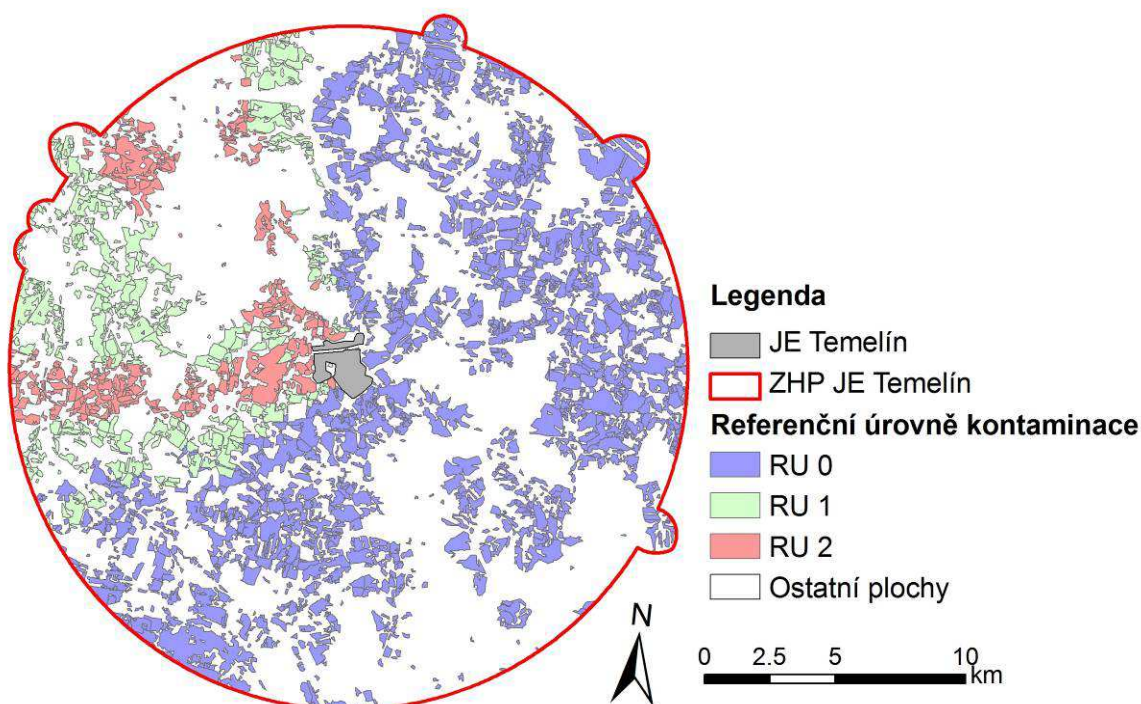
- RU – referenční úroveň. Hodnoty 0, 1 a 3 podávají přehled o úrovni celkové depozice radionuklidu na dané ploše v Bq.m⁻² v rámci použitých referenčních úrovní, umožňují tedy orientační přehled o možných zásazích na jednotlivých plochách. Rozdělení jednotlivých ploch do kategorií referenčních úrovní ukazuje obrázek 7.
- B_HA a B_POL – množství biomasy v t.ha⁻¹ a v t na pozemek – umožňuje přehled o množství živé nadzemní biomasy na jednotlivých pozemcích ve sledovaném území. Množství nadzemní biomasy v t.ha⁻¹ a v t na pozemek ukazují obrázky 8 a 9.
- DEP_POR a DEP_PUD – depozice radioaktivního materiálu na povrchu porostu a půdy – sloupce podávají přehled o rozsahu kontaminace porostů a půdy, mohou tudíž být vodítkem pro rozhodování o odstranění nadzemní biomasy z ploch za účelem ochrany půdy. Velikost radioaktivní depozice ^{137}Cs na nadzemní biomase plodin a na povrchu půdy ukazují obrázky 10 a 11.
- HYG_LIM a KONT_POR – úroveň kategorie hygienického limitu (0 a 1) a velikost hmotnostní kontaminace nadzemní biomasy plodin – údaje podávají informaci o nedosažení/překročení zadaného hygienického limitu a o velikosti kontaminace nadzemní biomasy v Bq.kg⁻¹ a jsou tedy vodítkem pro rozhodování o následném využití nadzemní biomasy plodin. Prostorové zařazení jednotlivých ploch do kategorií hygienického limitu radioaktivní kontaminace biomasy a její velikost ukazují obrázky 12 a 13.
- NAKLADY – náklady na odstranění nadzemní biomasy (Kč na plochu) – sloupec podává orientační informaci o finanční náročnosti odstranění biomasy z jednotlivých ploch. Náklady

na odstranění jsou zde počítány pro všechny plochy zájmového území, na kterých je přítomna biomasa. Přehled orientačních nákladů pro odstranění nadzemní biomasy z jednotlivých ploch v zájmovém území ukazuje obrázek 14.

- ODSTR – doporučení odstranění biomasy s ohledem na možné omezení orné půdy. Odstranění biomasy je doporučeno s ohledem na celkovou kontaminaci dané plochy, tedy na kategorii referenční úrovně (pouze RU 1), s ohledem na množství biomasy na ploše (pokud je hmotnost biomasy větší než $0,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) a na velikost intercepčního faktoru (pro intercepční faktor větší než 0,3). Přehled doporučení pro jednotlivé plochy udává obrázek 15.

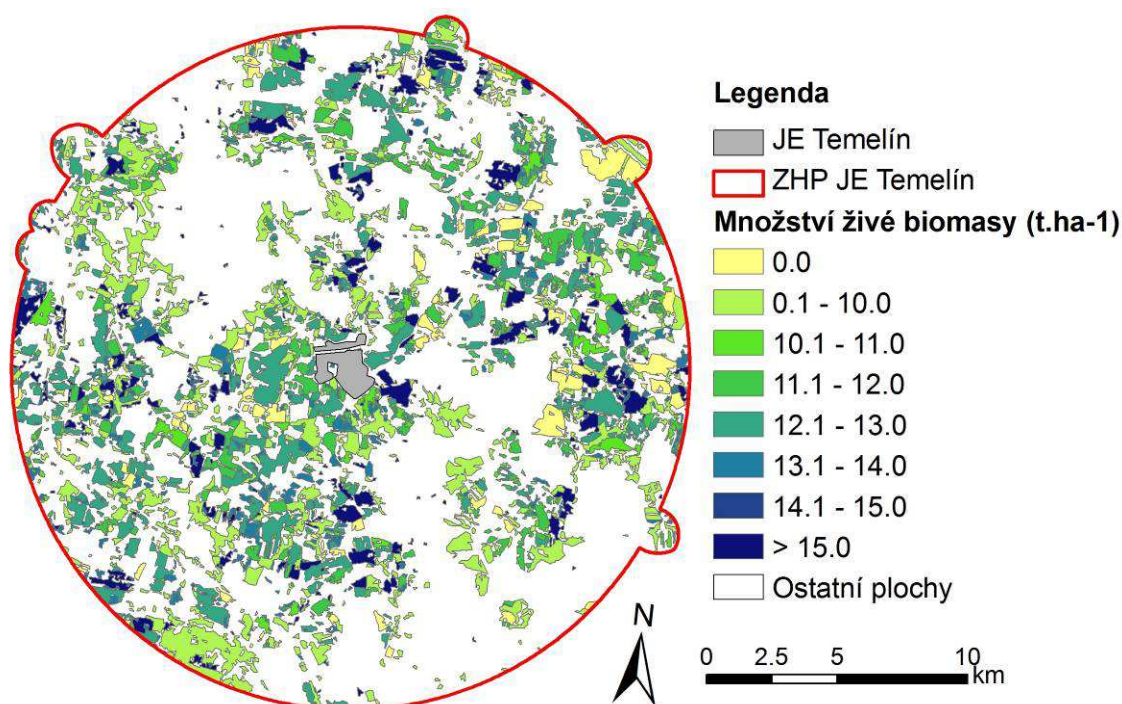
Ostatní informace uvedené v atributové tabulce představují podpůrná data využitelná pro rozhodování, případně jsou využitelné pro jiné aplikace.

Jedním z konkrétních výstupů je prostorová distribuce kontaminovaných ploch v jednotlivých kategoriích referenčních úrovní, která souhlasí s celkovou depozicí radioaktivního cesia ^{137}Cs zobrazenou v obrázku 7.

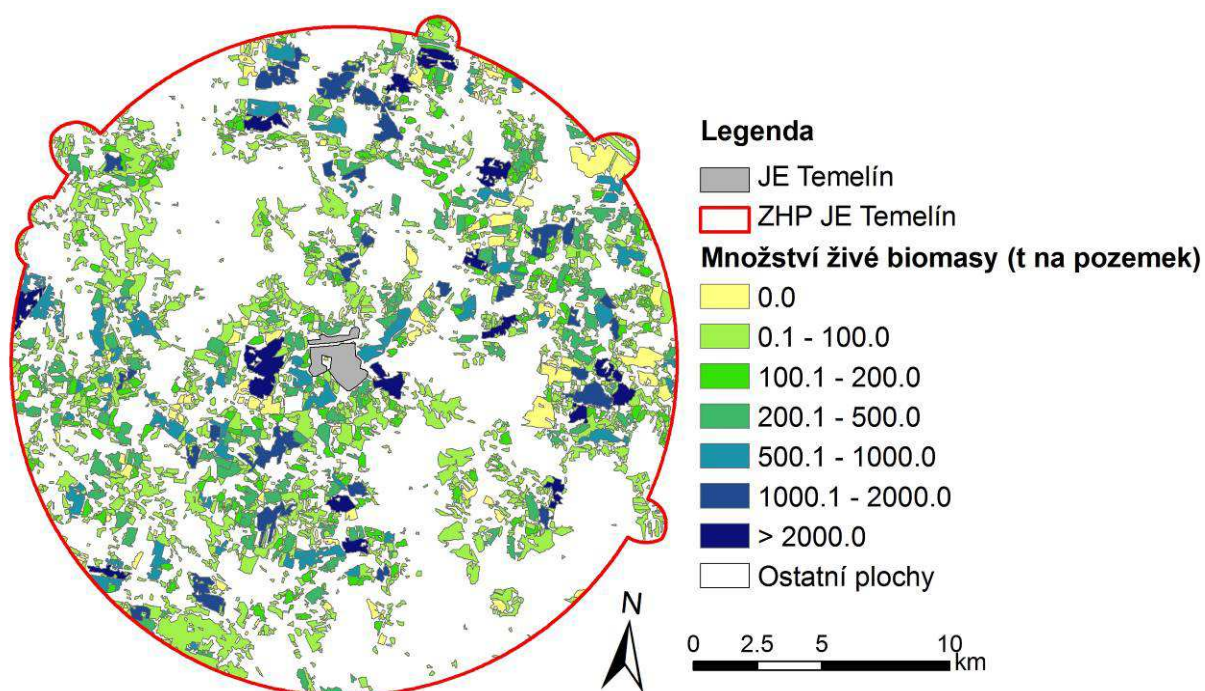


Obr. 7. Přehled prostorové distribuce vymezených referenčních úrovní depozice ^{137}Cs ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$) pro modelovou situaci radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Temelín.

Obrázky 8 a 9 podávají přehled o množství živé nadzemní biomasy na jednotlivých zemědělských plochách v rámci zájmového území ZHP JE Temelín. Zde je patrné, že hmotnost nadzemní biomasy na dané ploše je dána nejenom jednotkovým údajem v $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$, ale též vlastní výměrou konkrétní plochy. Tyto údaje poskytují zpracovateli jednoduchý grafický přehled o případné potřebné kapacitě prostředků pro opatření v průběhu časné fáze radiační havárie. Samozřejmostí GIS prostředků je možnost zobrazení ploch, které odpovídají zadané podmínce, například zobrazení množství biomasy na plochách pouze pro RU 1 apod.

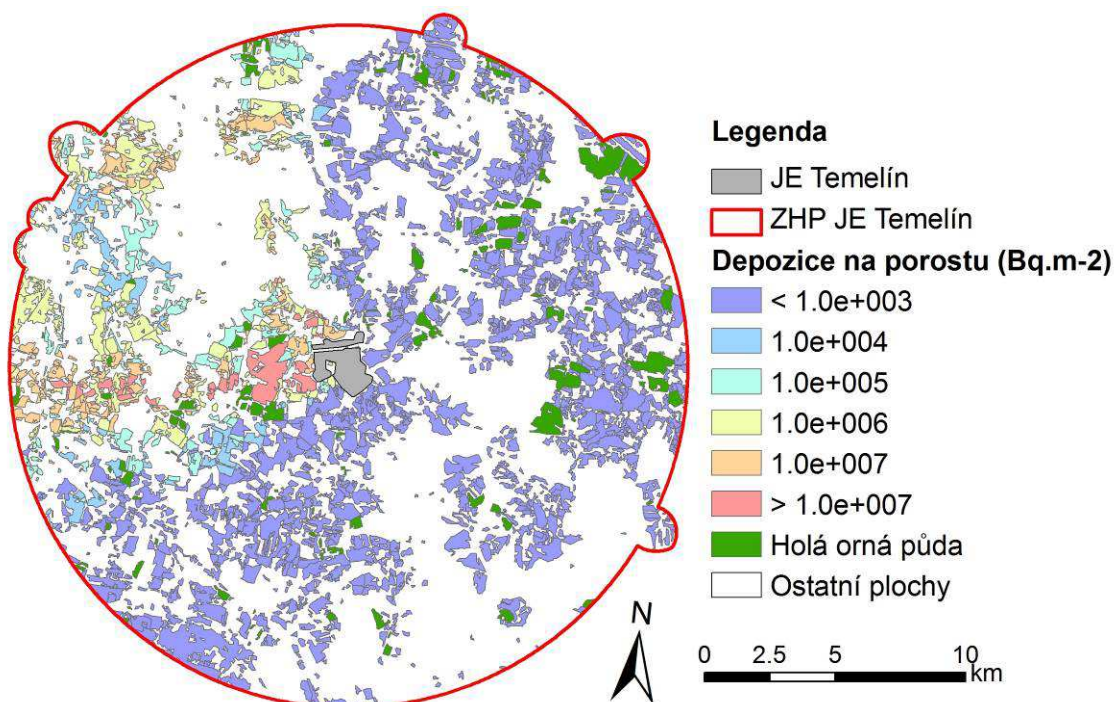


Obr. 8. Prostorová distribuce hmotnosti nadzemní živé biomasy vypočtené programem SARCA v t.ha⁻¹ v zájmovém území ZHP JE Temelín. Výpočet byl proveden pro 27. 7. 2013.

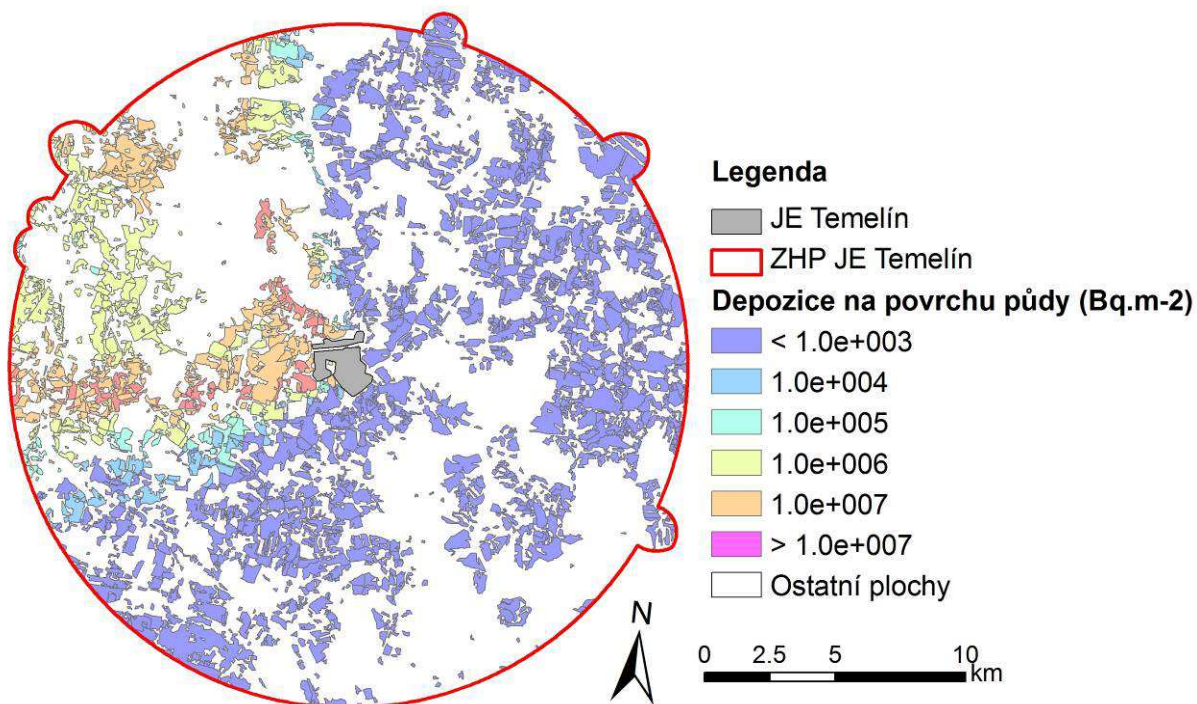


Obr. 9. Prostorová distribuce hmotnosti nadzemní živé biomasy vypočtené programem SARCA v t na jednotlivé sledované pozemky v zájmovém území ZHP JE Temelín. Výpočet byl proveden pro 27. 7. 2013.

Program SARCA umožňuje výpočet rozdělení depozice radioaktivního materiálu mezi porost (obrázek 10) a povrch půdy (obrázek 11) na základě výpočtu intercepčního faktoru (viz rovnice 13). Poměr s jakým se bude množství kontaminantu zachycovat na povrchu porostu a půdy závisí především na velikosti listové plochy porostu a na úhrnu srážek v průběhu události a jeho prostorové heterogenitě. Uvedený modelový příklad počítal s nulovou hodnotou srážek.

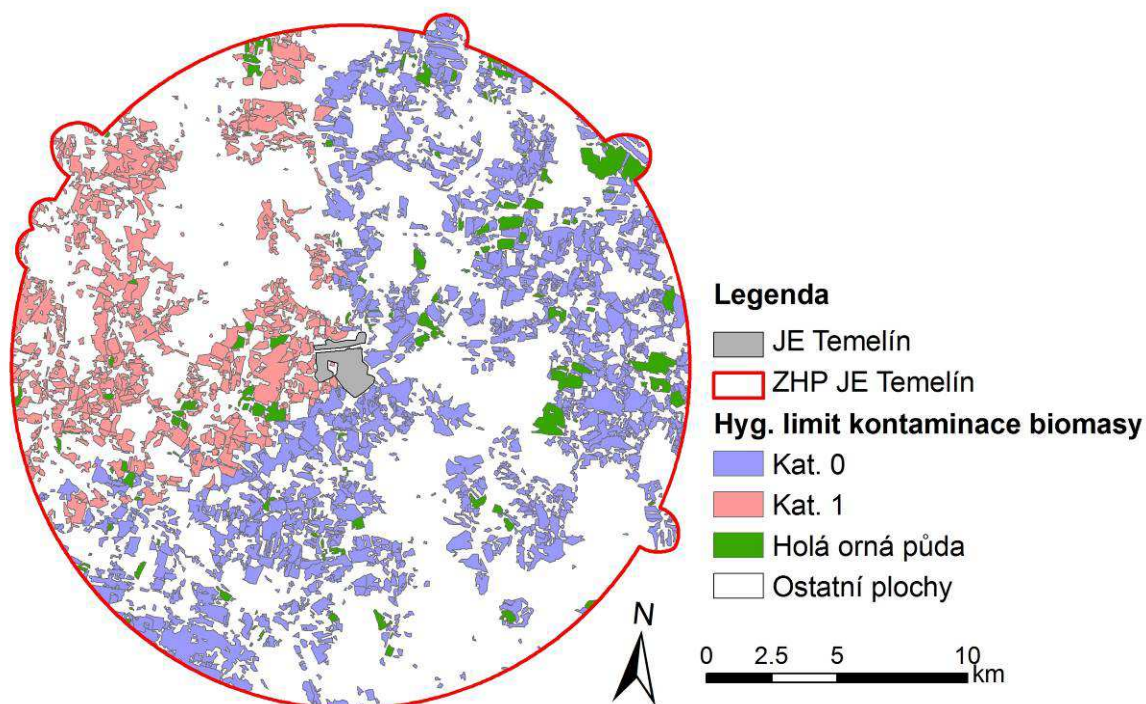


Obr. 10. Přehled prostorové distribuce depozice radioaktivního ^{137}Cs (Bq.m^{-2}) na povrchu porostu vypočtené programem SARCA na základě růstového modelu a modelové situace radiální havárie v rámci zájmového území ZHP JE Temelín.

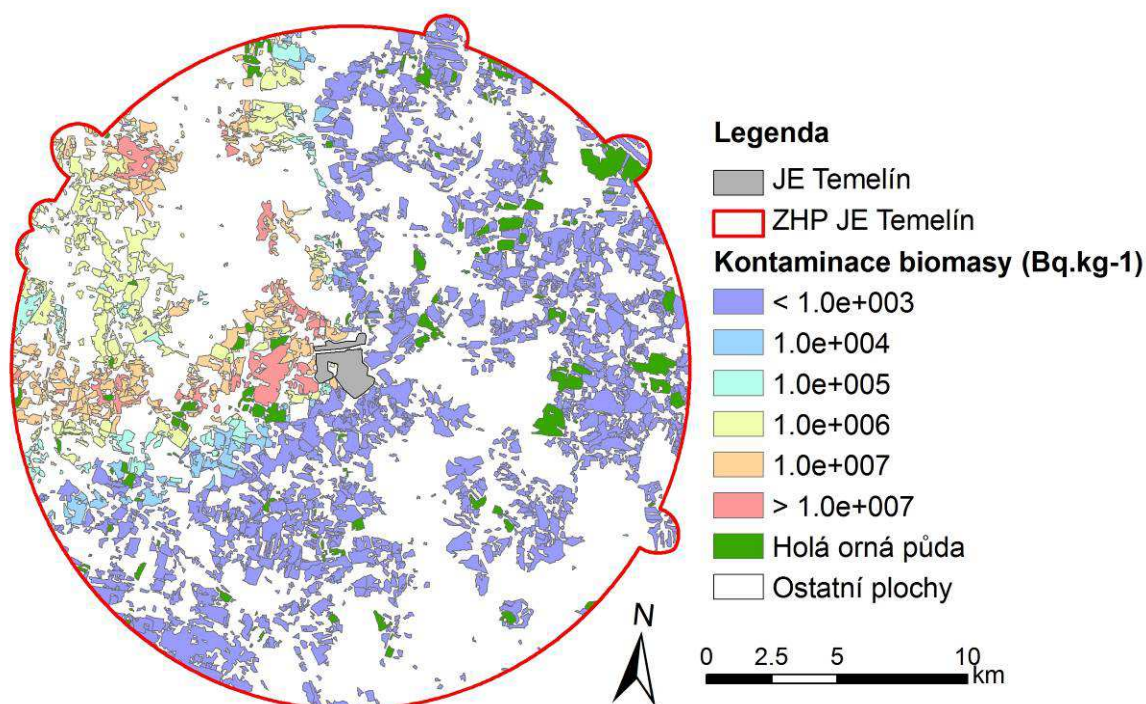


Obr. 11. Přehled prostorové distribuce depozice radioaktivního ^{137}Cs (Bq.m^{-2}) na povrchu půdy vypočtené programem SARCA na základě růstového modelu a modelové situace radiální havárie v rámci zájmového území ZHP JE Temelín.

Obrázky 12 a 13 zachycují přehled o hmotnostní kontaminaci nadzemní biomasy (Bq.kg^{-1}), a v rámci kategorií hygienického limitu i přehled o prostorové distribuci dále využitelné biomasy pro další zpracování v rámci zájmového území. Pomocí prostředků GIS je opět možné provést výběr pouze ploch, které odpovídají zadané specifikaci, tzn. například výběr ploch, které odpovídají kategorii hygienického limitu 1 a zároveň kategorii referenční úrovně RU 1.



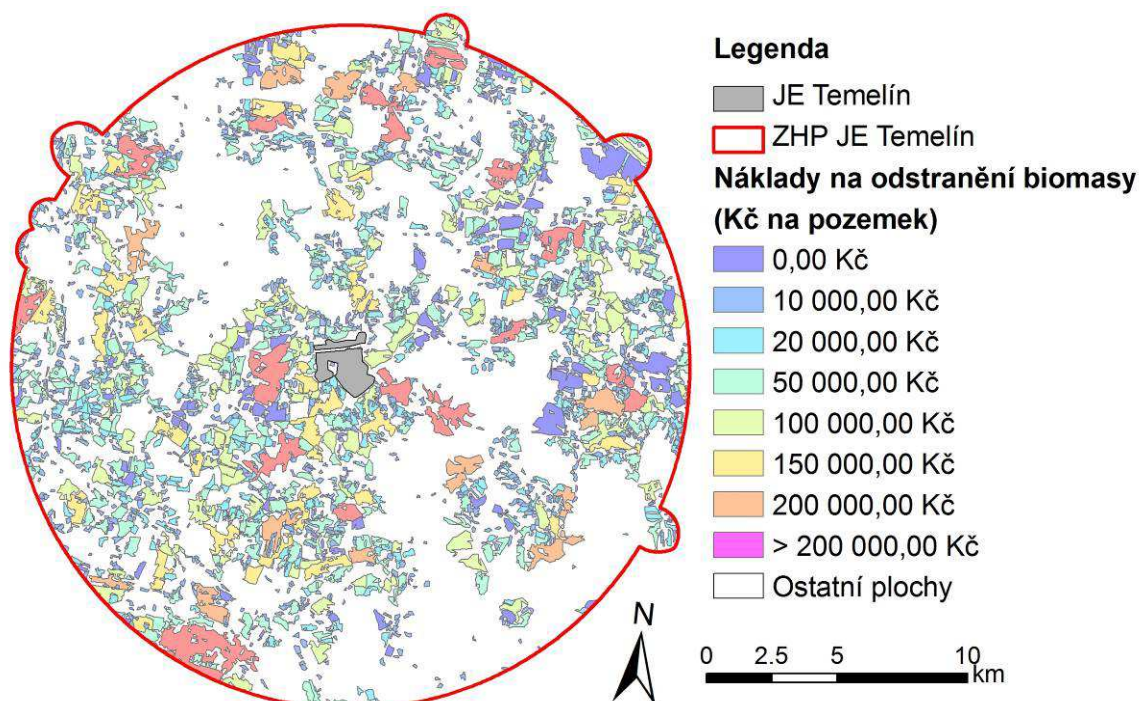
Obr. 12. Prostorové rozdělení kategorií hygienického limitu hmotnostní kontaminace biomasy (Bq.kg^{-1}) zemědělských plodin pro modelovou situaci radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Temelín.



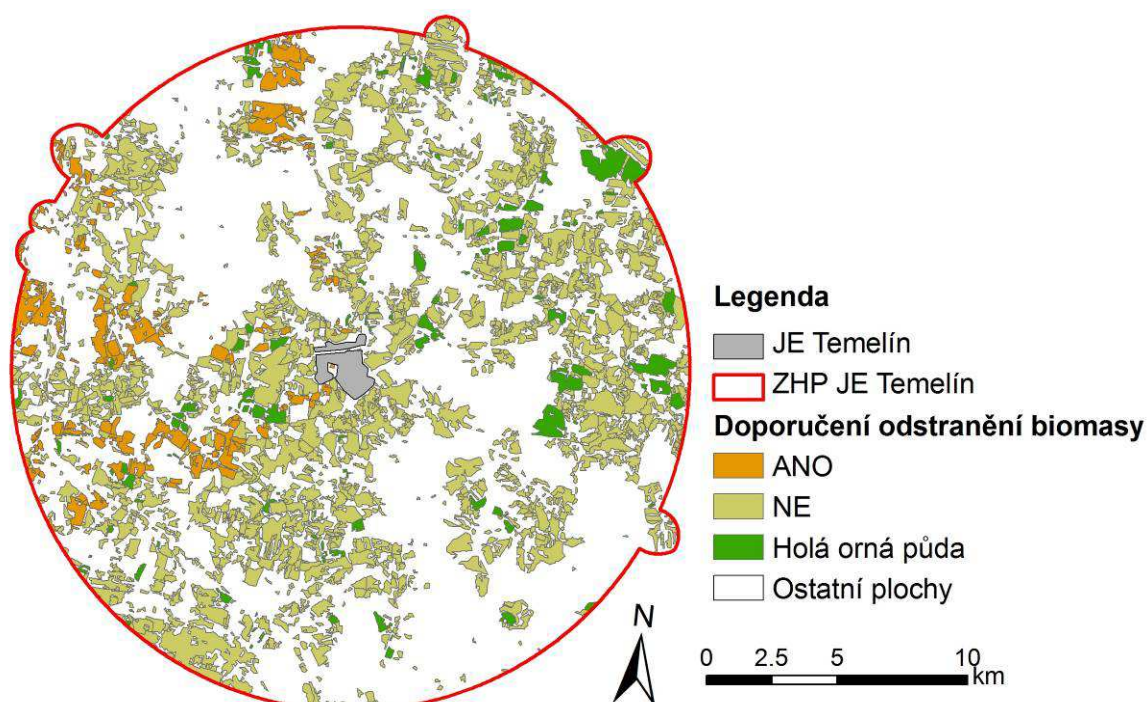
Obr. 13. Prostorové rozdělení průměrné hmotnostní kontaminace biomasy (Bq.kg^{-1}) zemědělských plodin pro modelovou situaci radiační havárie pro jednotlivé pozemky v rámci zájmového území ZHP JE Temelín.

Přehled o nákladovosti opatření v časně fázi radiační havárie ukazuje obrázek 14 a doporučení pro odstranění biomasy ukazuje obrázek 15. Zde je opět možné pomocí specifikovaného výběru získat rychlý přehled o plochách, na kterých je možné nebo vhodné provést opatření a zároveň o předpokládané výši nákladů. Z obrázku 15 je patrné, že doporučení pro odstranění biomasy v ZHP

JE Temelín se pro uvedený modelový příklad týká pouze malého množství ploch v západní a severozápadní části území, konkrétně 11,2 % plochy zemědělské půdy. Důvodem je vymezení doporučení pouze pro kategorii RU 1, kde je možné provádět opatření, dále množství biomasy na jednotlivých plochách (větší než $0,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) a velikost intercepčního faktoru, kdy pro účinnou ochranu zemědělské půdy je předpoklad zachycení více než 30 % kontaminantu porostem.



Obr. 14. Přehled prostorové distribuce orientačních nákladů na odstranění biomasy z jednotlivých pozemků v rámci zájmové oblasti ZHP JE Temelín pro modelovou situaci radiační havárie.



Obr. 15. Doporučení odstranění biomasy v rámci zájmového území ZHP JE Temelín pro modelovou situaci radiační havárie.

Zhodnocení výsledků

Z hodnocení výstupu z programu SARCA vyplývá, že na základě modelové radiační situace lze zařadit 69,6 % (12895 ha) sledované plochy zemědělské půdy v zájmovém území do referenční úrovně 0, 18,1 % (3358 ha) do referenční úrovně 1 a 12,2 % (2267 ha) do referenční úrovně 2. V rámci těchto kategorií je celková nadzemní živá biomasa plodin 165997 t pro RU 0, 42963 t pro RU 1 a 26640 t pro RU 2. Celkové orientační náklady potřebné pro odstranění nadzemní biomasy ze všech zemědělských ploch v ZHP JE Temelín se pohybují na úrovni více než 35 milionů Kč. Vzhledem k tomu, že se pro RU 0 a RU 2 nepředpokládá odstranění biomasy, lze celkové náklady vztáhnout pouze pro RU 1, kde náklady na odstranění biomasy činí více než 6 milionů Kč. Přehled výměr zemědělských ploch, hmotnost nadzemní biomasy a náklady na odstranění biomasy pro jednotlivé plodiny v rámci referenčních úrovní pro zájmové území ZHP JE Temelín ukazuje tabulka 16 a obrázky 8, 9 a 14.

Tabulka 16. Přehled výměry (ha), množství živé nadzemní biomasy (t) a nákladů na odklizení biomasy jednotlivých zemědělských plodin pro jednotlivé referenční úrovně radioaktivní depozice ¹³⁷Cs v území ZHP JE Temelín pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Referenční úroveň	Plodina	Plocha [ha]	Hmotnost [t]	Náklady [Kč]
RU 0	Hrách	8,5	113	15370
	Řepka sklizená	29,4	0	0
	Žito	349,8	4841	629552
	Mák	511,5	6889	920776
	Oves	557,2	7219	1002871
	Ječmen ozimý	733,3	7449	1319939
	Obilí sklizené	1169,6	0	0
	Řepka	1425,9	16866	2566703
	Kukuřice	1578,6	88595	6472262
	Pšenice	2654,2	33472	4777593
	Travní porosty	3876,7	553	6590405
RU 1	Řepka sklizená	40,4	0	0
	Mák	117,8	1587	212067
	Oves	126,1	1633	226926
	Žito	155,9	2158	280584
	Obilí sklizené	189,3	0	0
	Ječmen ozimý	191,7	1948	345137
	Řepka	357,4	4227	643265
	Kukuřice	392,6	22032	1609554
	Pšenice	731,8	9228	1317170
RU 2	Travní porosty	1054,7	151	1792948
	Řepka sklizená	5,9	0	0
	Žito	35,7	494	64215
	Oves	59,1	765	106323
	Ječmen ozimý	68,5	696	123281
	Obilí sklizené	73,7	0	0
	Mák	81,9	1103	147417
	Kukuřice	216,3	12138	886753
	Řepka	286,6	3390	515850

	Pšenice	629,5	7939	1133122
	Travní porosty	809,8	116	1376638
Celkem RU 0		12894,8	165997	24295471
Celkem RU 1		3357,5	42963	6427651
Celkem RU 2		2267,0	26640	4353600
Celkem plochy		18519,2	235601	35076722

Jak ukazuje tabulka 16, jsou v rámci RU 1 z hlediska množství (hmotnosti) biomasy a celkových nákladů na odstranění biomasy zásadní porosty kukuřice a pšenice, následované řepkou. Údaj uvedený u travních porostů lze považovat za ilustrační s ohledem na odhadnutou hmotnost nadzemní biomasy.

Z hlediska kategorií hygienického limitu hmotnostní aktivity nepřekračuje použitou hodnotu 1000 Bq.kg^{-1} 67,8 % (11542 ha) z výměry zemědělské půdy, na které je přítomna vegetace (celkem 17 tis. ha), 32,2 % výměry plochy hodnotu překračuje (5469 ha). Celkově se jedná o 69,7 tisíc t kontaminované biomasy, která překračuje hodnotu hygienického limitu. Jak ukazuje tabulka 13, hodnotu hygienického limitu překračuje i část ploch zařazených v referenční úrovni RU 0 (167,5 ha). Přehled pro sledované území a pro jednotlivé plodiny, včetně průměrné úrovně kontaminace biomasy udává tabulka 17 a obrázky 12 a 13.

Tabulka 17. Souhrn výměry zemědělské půdy a hmotnosti živé nadzemní biomasy v kategoriích hygienického limitu hmotnostní aktivity pro jednotlivé plodiny v zájmovém území ZHP JE Temelín. Hygienický limit byl stanoven na 1000 Bq.kg^{-1} pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Referenční úroveň	Hyg. Limit	Plodina	Plocha [ha]	Kontaminace biomasy [Bq.kg^{-1}]	Hmotnost biomasy [t]
RU 0	HL 0	Hrách	8,5	10	113
		Žito	348,3	20	4821
		Mák	507,9	20	6840
		Oves	553,8	20	7176
		Ječmen ozimý	733,3	30	7449
		Řepka	1395,2	30	16503
		Kukuřice	1578,6	10	88595
		Pšenice	2627,9	30	33140
		Travní porosty	3774,7	30	539
	HL 1	Žito	1,5	2390	20
		Oves	3,3	1320	43
		Mák	3,6	1100	49
		Pšenice	26,3	1090	332
		Řepka	30,7	1350	363
		Travní porosty	102,0	3070	15
RU 1	HL 0	Kukuřice	13,5	910	756
	HL 1	Mák	117,8	259000	1587
		Oves	126,1	563000	1633
		Žito	155,9	194000	2158
		Ječmen ozimý	191,7	194000	1948
		Řepka	357,4	175000	4227
		Kukuřice	379,1	124000	21276

RU 2	HL 1	Pšenice	731,8	349000	9228
		Travní porosty	1054,7	745000	151
		Žito	35,7	6556000	494
		Oves	59,1	7158000	765
		Ječmen ozimý	68,5	4741000	696
		Mák	81,9	5398000	1103
		Kukuřice	216,3	1313000	12138
		Řepka	286,6	6038000	3390
		Pšenice	629,5	5466000	7939
		Travní porosty	809,8	12958000	116
Celkem RU 0	HL 0		11528,3		165175
	HL 1		167,5		822
Celkem RU 1	HL 0		13,5		756
	HL 1		3114,4		42207
Celkem RU 2	HL 1		2187,3		26640

Význam vegetačního krytu pro rozdělování radioaktivní depozice mezi povrch porostu a povrch půdy ukazují tabulka 18 a obrázky 10 a 11, ze kterých je zřejmé, že za daných podmínek množství nadzemní biomasy a radiační situace dochází k významnému zachycování radioaktivního materiálu na povrchu porostu. Největší procento zachycení kontaminantu na povrchu porostu lze sledovat u obilovin a kukuřice (více než 60 %). Poměrně nízká úroveň zachycení kontaminantu na povrchu porostů je dána především termínem, kdy je většina plodin v senescentním stádiu vývoje a dochází k významné defoliaci porostů. Význam zachycování radioaktivního materiálu na povrchu vegetačního krytu v tomto ohledu spočívá v omezení kontaminace povrchu půdy.

Tabulka 18. Procentní vyjádření intercepce kontaminantu na povrchu zemědělských plodin a povrchu půdy v zájmovém území ZHP JE Temelín pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Plodina	Plocha [ha]	Intercept na plodinách [%]	Intercept na povrchu půdy [%]
Hrách	8,5	48,8	51,2
Řepka sklizená	75,7	0,0	100,0
Žito	541,3	70,9	29,1
Mák	711,3	52,9	47,1
Oves	742,3	79,8	20,2
Ječmen ozimý	993,5	39,1	60,9
Obilí sklizené	1432,6	0,0	100,0
Řepka	2069,9	39,1	60,9
Kukuřice	2187,5	66,0	34,0
Pšenice	4015,5	63,8	36,2
Travní porosty	5741,2	1,6	98,4

2.9 Odhad radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a půdy na příkladu havárie JE Dukovany – případová studie

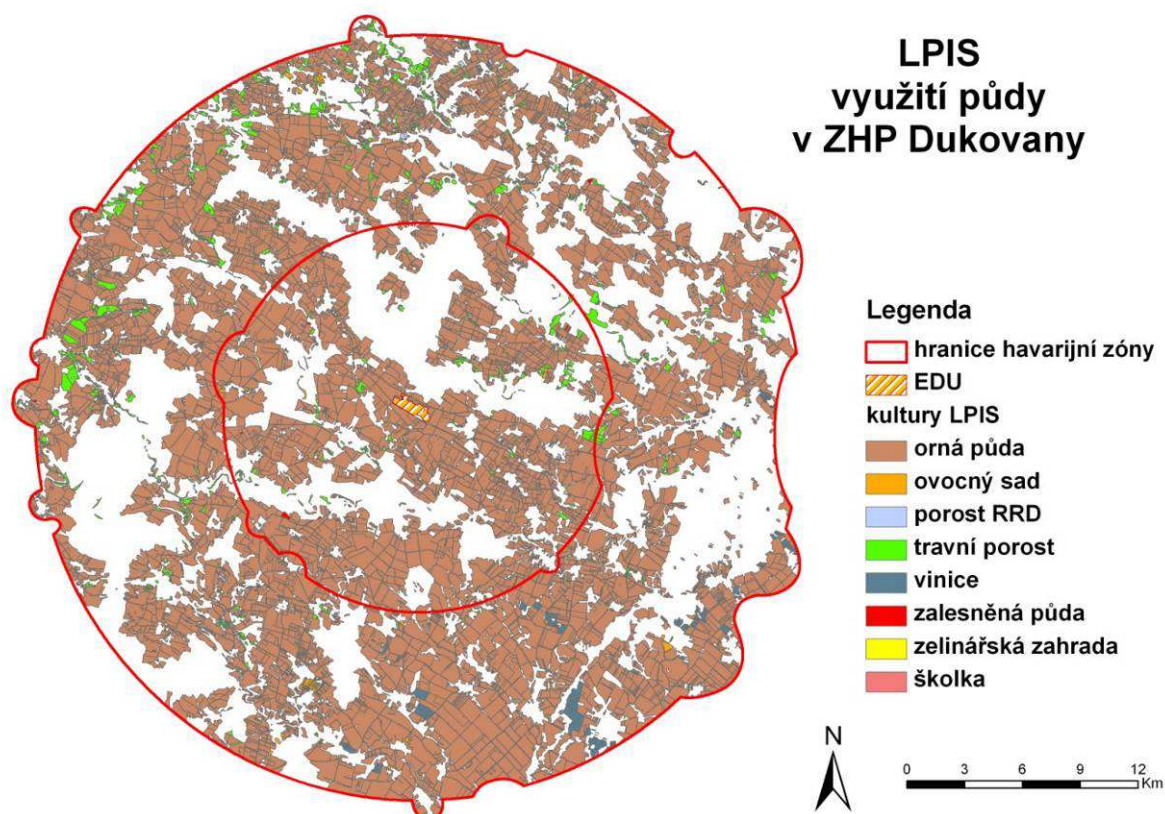
Obdobně jako Jaderná elektrárna Temelín, představuje i Jaderná elektrárna Dukovany (JE Dukovany) významný potenciální zdroj radioaktivního znečištění životního prostředí a tedy i zemědělských plodin a půdy. V předkládané práci uvádíme případovou studii vyhodnocení kontaminace zemědělských plodin a půdy v zájmovém území zóny havarijního plánování JE Dukovany na příkladu modelové situace radiační havárie generované modelem HARP RP (ÚTIA AV ČR v.v.i.). Oproti předchozí studii pro JE Temelín bylo hodnocení provedeno pro termín 18. 6. 2013, kdy ještě nedošlo ke sklizni plodin a je zachyceno období, kdy teprve začíná docházet k senescenci, zejména ozimých obilovin a řepky.

2.9.1 Analýza prostorové distribuce plodin v zájmovém území

Analýza a hodnocení zájmové oblasti JE Dukovany bylo provedeno ve stejném schématu jako v případě JE Temelín. Prvním krokem byla příprava aktuální digitální vrstvy prostorové distribuce plodin v prostředí GIS na základě dostupných zdrojů dat. Jako modelová oblast testování odhadu kontaminace zemědělských plodin a půdy pomocí programu SARCA byla primárně zvolena zóna havarijního plánování (ZHP) jaderné elektrárny. ZHP byla v případě JE Dukovany vymezená kružnicí o poloměru 20 km, tedy o přibližně dvojnásobném poloměru ve srovnání s ZHP JE Temelín. Z celkové plochy ZHP JE Dukovany (125 754 ha) je 58 % tvořeno zemědělskou půdou a 42 % území připadá na ostatní využití (lesy, vodní plochy, zástavba). Rozdělení zemědělské půdy v roce 2013, zjištěné z údajů LPIS, uvádí tabulka 19, distribuce jednotlivých kategorií využití půdy na území ZHP je znázorněno na obr. 16.

Tabulka 19. Struktura zemědělské půdy v ZHP JE Dukovany v roce 2013 (Analýza dat LPIS 2013)

	Plocha [ha]	% ze zemědělské půdy
Zemědělská půda	72 606	
z toho:		
Orná půda	68 937	94,9
Ovocný sad	194	0,27
Porost RRD	33	0,05
Školka	17	0,02
Travní porost	2 808	3,9
Vinice	563	0,8
Zalesněná půda	52	0,07
Zelinářská zahrada	2	0,003



Obr. 16. Využití půdy v ZHP JE Dukovany (Zdroj dat: vrstva LPIS 2013)

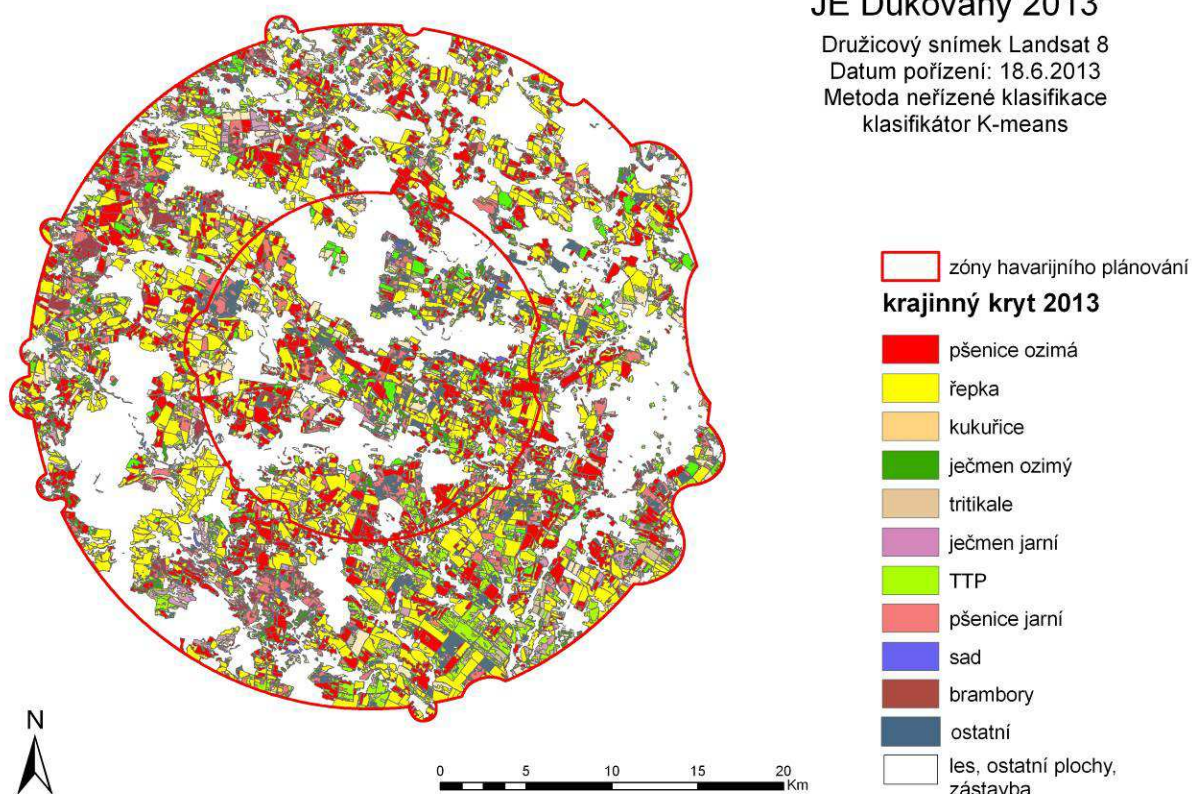
Klasifikací družicového snímku družice Landsat 8 z 18. 6. 2013 bylo na základě podkladových dat o pěstovaných plodinách klasifikováno území ZHP JE Dukovany z hlediska plodinové skladby (Obr. 17). Plošné zastoupení pěstovaných plodin shrnuje tabulka 20. Z důvodu absence kvalitních podkladových dat o pěstovaných plodinách byla zvolena metoda neřízené klasifikace. Klasifikací bylo 70 % území klasifikováno jako zemědělské půdy. Při srovnání s údaji zjištěnými z databáze LPIS jsou výsledky nadhodnocené. Důvodem je jednak skutečnost, že LPIS nezahrnuje všechny zemědělsky obhospodařované plochy, tedy pouze plochy, na které lze uplatnit nárok na dotace, tudíž v klasifikaci jsou klasifikovány i plochy, které nejsou evidované, ale na kterých se také daná plodina pěstuje. Dalším důvodem nadhodnocení výsledků klasifikace je spektrální podobnost některých tříd krajinného krytu. Díky tomu a díky absenci kvalitních podkladových dat o pěstovaných plodinách tak dochází k tomu, že jsou některé plochy nesprávně přiřazeny k jednotlivým třídám krajinného krytu. Pro přesnější stanovení množství pěstovaných plodin lze výsledky klasifikace korigovat pomocí polygonové vrstvy LPIS a následnou manuální opravou (Obr. 17 a tabulka 20), zpracování s sebou ovšem nese větší pracnost a delší časovou dotaci na zpracování.

JE Dukovany 2013

Družicový snímek Landsat 8

Datum pořízení: 18.6.2013

Metoda neřízené klasifikace
klasifikátor K-means



Obr. 17. Plodinová skladba v ZHP JE Dukovany – získaná klasifikací družicových dat.

Tabulka 20. Plodinová skladba ZHP JE Dukovany (klasifikace distančních dat)

Plodina	Plocha [ha]	% zastoupení plodin na orné půdě
Pšenice ozimá	18 147	26,7
Řepka	21 382	31,4
Kukuřice	4 678	6,88
Ječmen ozimý	2 520	3,7
Tritikale	1 724	2,5
Ječmen jarní	1 787	2,6
Travní porosty	8 837	13,0
Pšenice jarní	4 229	6,2
Sad	322	0,5
Brambory	1 543	2,3
Ostatní	2 879	4,2

2.9.2 Analýza radioaktivní kontaminace pomocí programu SARCA

Pro vlastní hodnocení depozice radioaktivního materiálu v ZHP JE Dukovany byl využit program SARCA.

Vstupní data

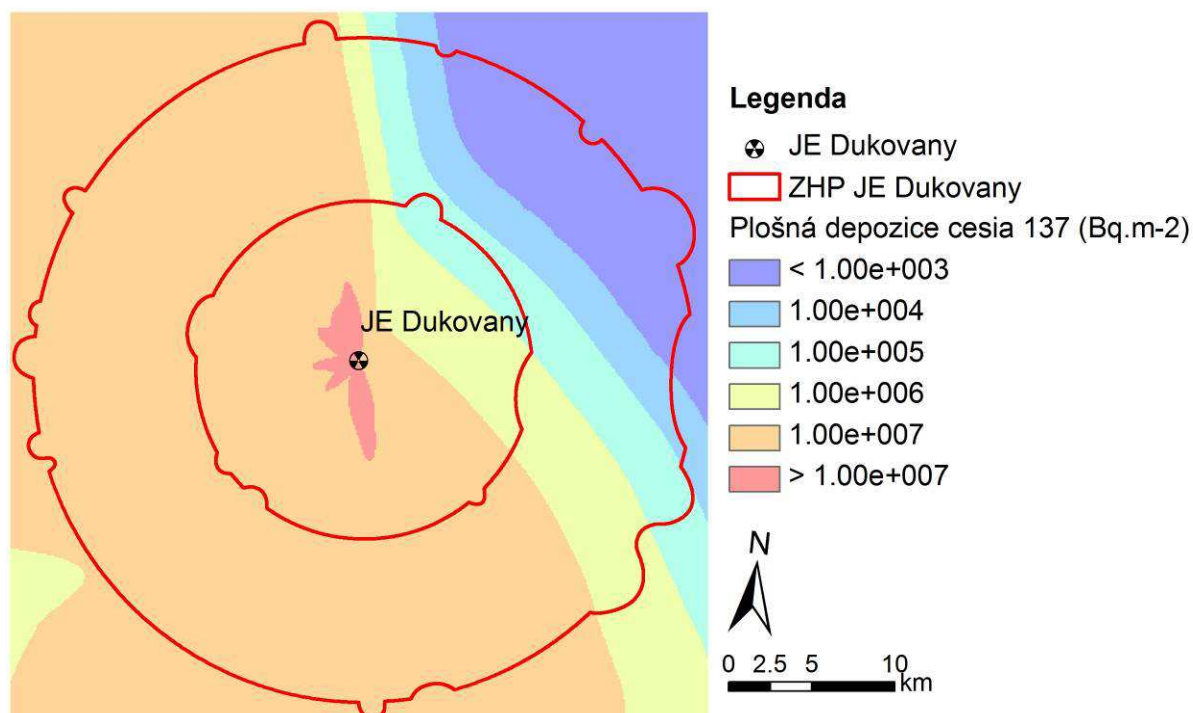
Vstupními daty jsou pro účely případové studie digitální vrstva prostorové distribuce plodin, atributy plodin pro výpočet biomasy plodin a dalších charakteristik pomocí růstového modelu a modelový datový soubor depozice radioaktivního cesia ^{137}Cs z modelu HARP RP (ÚTIA AV ČR v.v.i.). Byla použita data odpovídající termínu, pro který bylo provedeno hodnocení prostorové distribuce plodin, tedy pro 18. 6. 2013.

Problematika tvorby digitální vrstvy prostorové distribuce plodin je diskutována výše. Pro účely metodiky byly použity parametry růstového modelu a parametry nákladů na odstranění biomasy, které shrnuje tabulka 21.

Tabulka 21. Parametry růstového modelu a ekonomické náklady odstranění biomasy pro jednotlivé druhy zemědělských plodin. $W_{\max}$ – maximální množství sušiny nadzemní biomasy, T_0 a $T_{\max}$ – den začátku (osev) a konce (sklizeň) vegetačního období plodiny zadané jako pořadí dne v roce, $R_{\max}$ a $R_{\min}$ – relativní obsah vody na začátku a konci vegetačního období plodiny, $LAI_{\max}$ – maximální hodnota indexu listové plochy, M a N – parametry růstového modelu stanovené podle rovnic 8 a 7, Náklady – orientační náklady potřebné na sklizeň biomasy.

NAZEV	$W_{\max}$ [t.ha ⁻¹]	T_0	$T_{\max}$	$R_{\max}$ [%]	$R_{\min}$ [%]	$LAI_{\max}$	M	N	Náklady [Kč.ha ⁻¹]
Pšenice ozimá	8,2	74	222	90	25	5	12,71	3,69	1800
Řepka	8,5	74	196	90	25	5	13,49	4,44	1800
Kukuřice	10,8	152	263	90	70	5,5	18,57	9,29	4100
Ječmen ozimý	7,3	74	191	90	25	5	12,47	3,57	1800
Triticale	8,5	74	222	90	25	5,5	12,78	3,73	1800
Ječmen jarní	7,2	95	217	90	25	4,5	17,76	8,88	1800
Travní porosty	1,5	140	196	90	70	5	14,63	7,31	1700
Pšenice jarní	7,8	84	227	90	25	5	17,92	8,96	1800
Brambory	7	110	263	90	40	5	17,71	8,85	3000

Datové podklady o prostorové distribuci depozice radioaktivního cesia ¹³⁷Cs byly generovány pomocí on-line verze modelu HARP RP (<https://dss.utia.cas.cz/>) jako integrál depozice za 48 hodin po radiační události. Grafické znázornění interpolované vrstvy radioaktivní depozice ¹³⁷Cs v zájmovém území ukazuje obrázek 18.



Obr. 18. Grafické znázornění interpolované vrstvy modelové situace radioaktivní depozice ¹³⁷Cs (Bq.m-2) generované modelem HARP RP pro zájmové území ZHP JE Dukovany.

S ohledem na nulový úhrn srážek ve sledovaném období byla použita hodnota úhrnu srážek rovná nule pro celé zájmové území.

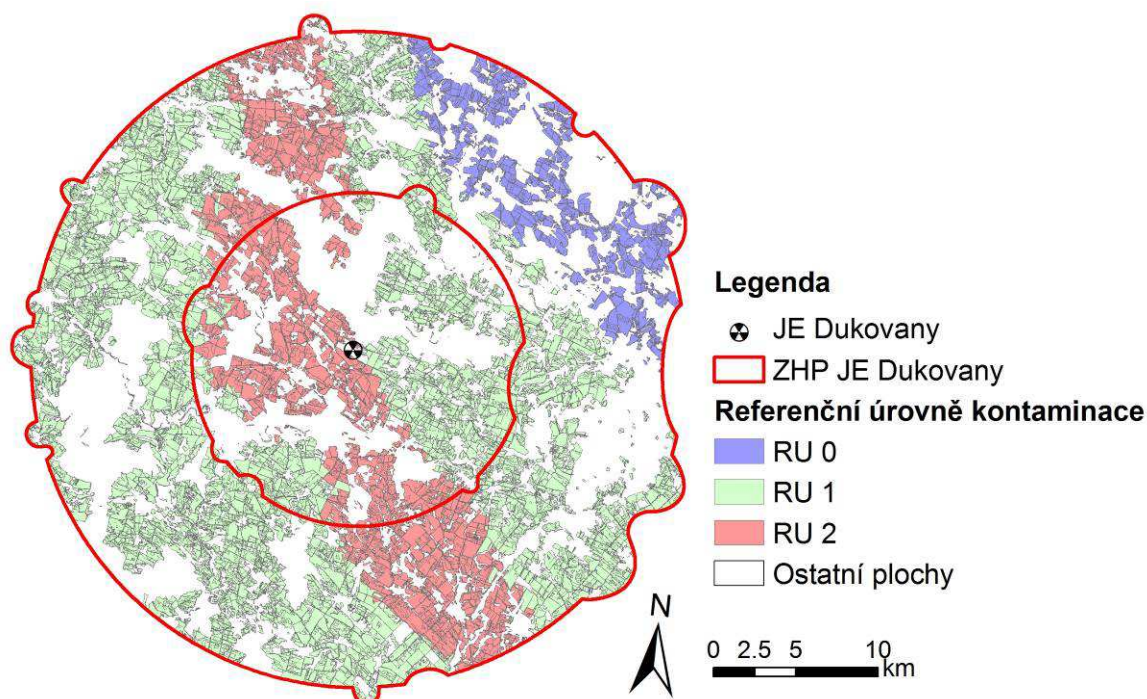
Výstupy výpočtu

Výstupem výpočtu je, stejně jako v případě příkladu pro JE Temelín, digitální vektorová vrstva ve formátu shp, která prostorově odpovídá specifikaci vstupní digitální vrstvy prostorové distribuce plodin. Pro rozhodovací proces o aktivitách v zájmovém území jsou podstatné informace uvedené ve sloupcích:

- RU – referenční úroveň. Hodnoty 0, 1 a 3 podávají přehled o úrovni celkové depozice radionuklidu na dané ploše v Bq.m^{-2} v rámci použitých referenčních úrovní, umožňují tedy orientační přehled o možných zásazích na jednotlivých plochách. Rozdělení jednotlivých ploch do kategorií referenčních úrovní ukazuje obrázek 19.
- B_HA a B_POL – množství biomasy v t.ha^{-1} a v t na pozemek – umožňuje přehled o množství živé nadzemní biomasy na jednotlivých pozemcích ve sledovaném území. Množství nadzemní biomasy v t.ha^{-1} a v t na pozemek ukazují obrázky 20 a 21.
- DEP_POR a DEP_PUD – depozice radioaktivního materiálu na povrchu porostu a půdy – sloupce podávají přehled o rozsahu kontaminace porostů a půdy, mohou tudíž být vodítkem pro rozhodování o odstranění nadzemní biomasy z ploch za účelem ochrany půdy. Velikost radioaktivní depozice ^{137}Cs na nadzemní biomase plodin a na povrchu půdy ukazují obrázky 22 a 23.
- HYG_LIM a KONT_POR – úroveň kategorie hygienického limitu (0 a 1) a velikost hmotnostní kontaminace nadzemní biomasy plodin – údaje podávají informaci o nedosažení/překročení zadaného hygienického limitu a o velikosti kontaminace nadzemní biomasy v Bq.kg^{-1} a jsou tedy vodítkem pro rozhodování o následném využití nadzemní biomasy plodin. Prostorové zařazení jednotlivých ploch do kategorií hygienického limitu radioaktivní kontaminace biomasy a její velikost ukazují obrázky 24 a 25.
- NAKLADY – náklady na odstranění nadzemní biomasy (Kč na plochu) – sloupec podává orientační informaci o finanční náročnosti odstranění biomasy z jednotlivých ploch. Náklady na odstranění jsou zde počítány pro všechny plochy zájmového území, na kterých je přítomna biomasa. Přehled orientačních nákladů pro odstranění nadzemní biomasy z jednotlivých ploch v zájmovém území ukazuje obrázek 26.
- ODSTR – doporučení odstranění biomasy s ohledem na možné omezení orné půdy. Odstranění biomasy je doporučeno s ohledem na celkovou kontaminaci dané plochy, tedy na kategorii referenční úrovně (pouze RU 1), s ohledem na množství biomasy na ploše (pokud je hmotnost biomasy větší než $0,5 \text{ t.ha}^{-1}$) a na velikost intercepčního faktoru (pro intercepční faktor větší než 0,3). Přehled doporučení pro jednotlivé plochy udává obrázek 27.

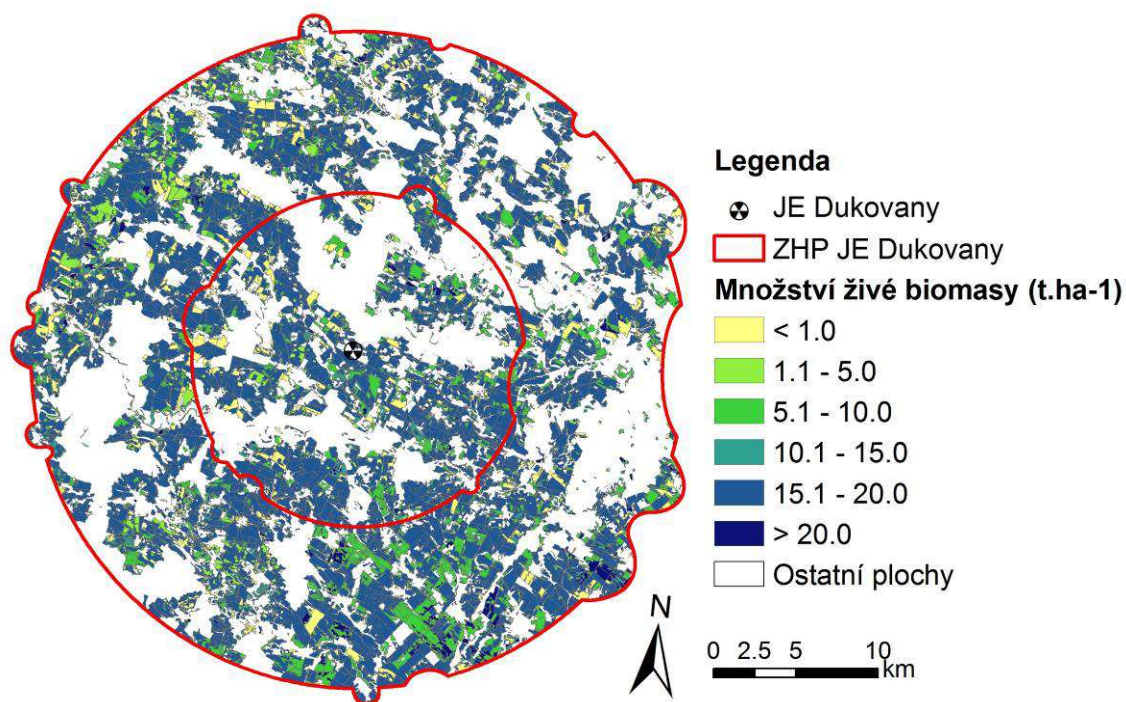
Ostatní informace uvedené v atributové tabulce představují podpůrná data využitelná pro rozhodování, případně jsou využitelná pro jiné aplikace.

Obrázek 19 ukazuje prostorové rozložení jednotlivých kategorií referenčních úrovní. Zde je patrné, že plochy patřící do RU 0 jsou zastoupeny v menším množství v severovýchodní části území, naopak plochy v RU 1 představují většinu plochy území.

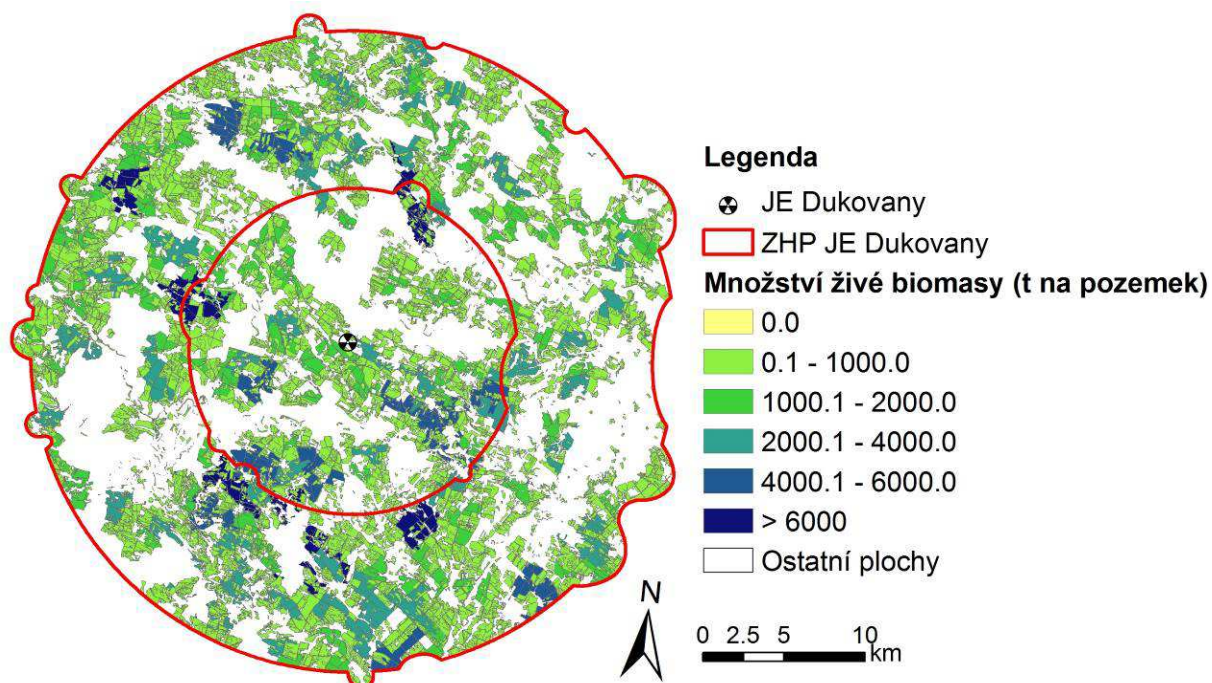


Obr. 19. Přehled prostorové distribuce vymezených referenčních úrovní depozice ^{137}Cs (Bq.m^{-2}) pro modelovou situaci radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany.

Obrázky 20 a 21 podávají přehled o množství živé nadzemní biomasy na jednotlivých zemědělských plochách v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany. Ve srovnání s modelovým příkladem pro JE Temelín je evidentní, že hmotnost nadzemní biomasy na jednotku plochy i na jednotlivých pozemcích je výrazně větší. To je dáno především odlišnou fází vývoje porostů, kdy v případě příkladu pro JE Temelín bylo hodnoceno období konce vegetačního cyklu většiny plodin (zejména obiloviny a řepka), kdy je obsah vody v pletivech již nízký. V modelovém příkladu pro JE Dukovany se jedná o období, kdy se množství živé nadzemní biomasy blíží maximu.

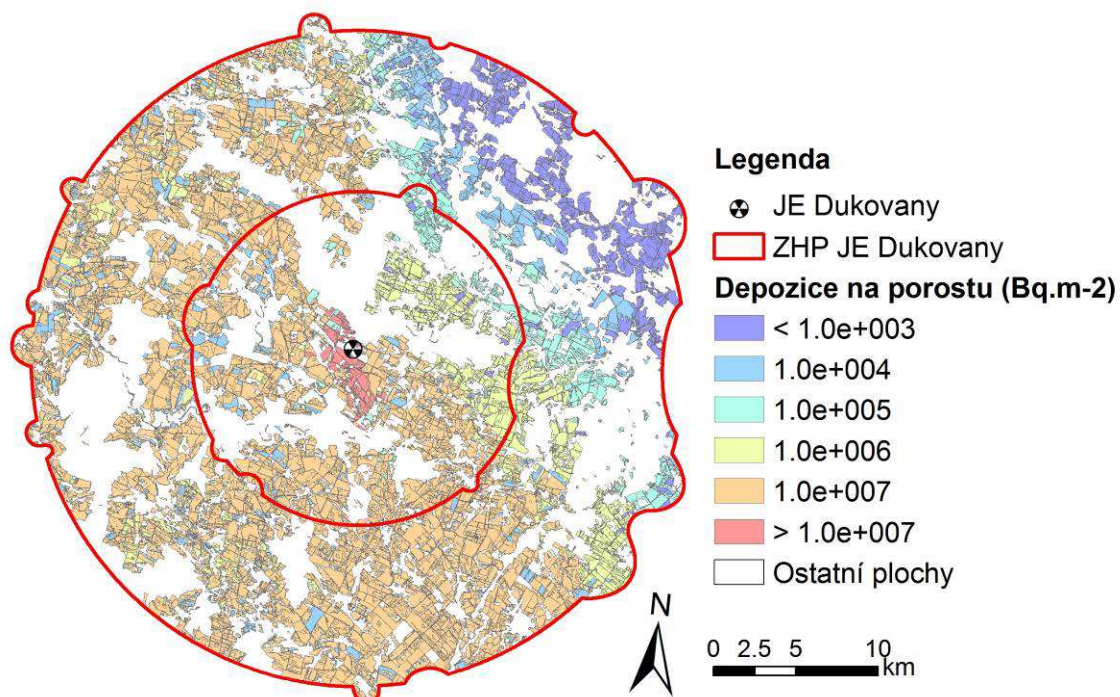


Obr. 20. Prostorová distribuce hmotnosti nadzemní živé biomasy vypočtené programem SARCA v t.ha^{-1} v zájmovém území ZHP JE Dukovany. Výpočet byl proveden pro 18. 6. 2013.

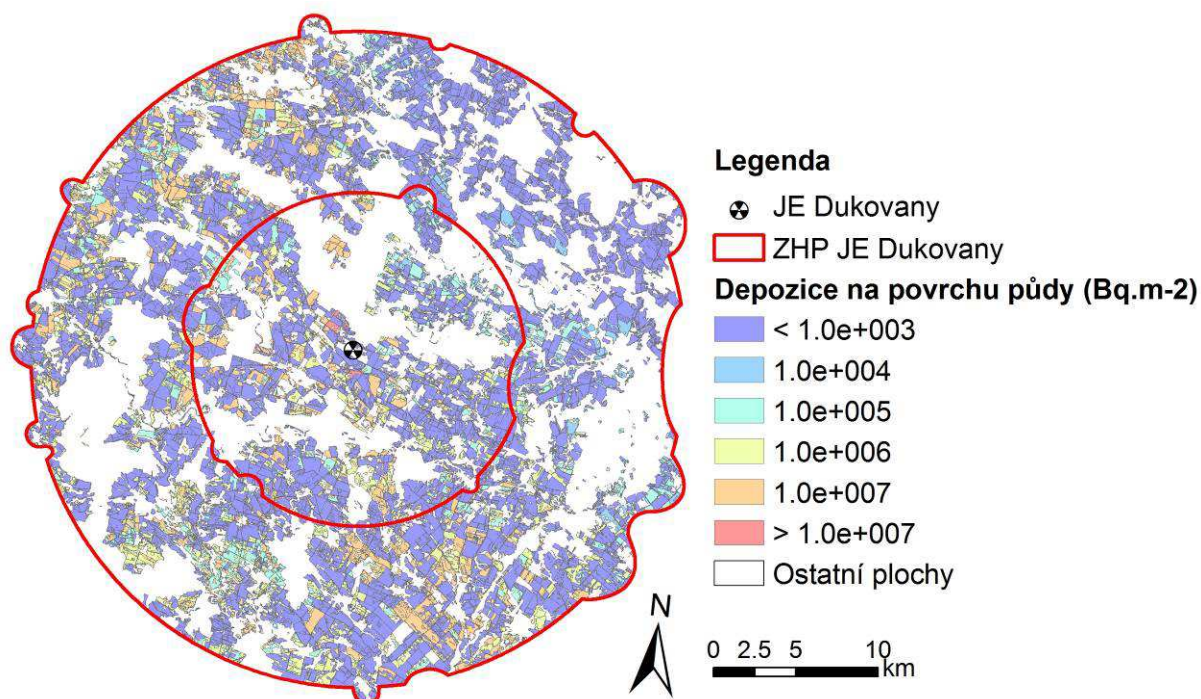


Obr. 21. Prostorová distribuce hmotnosti nadzemní živé biomasy vypočtené programem SARCA v t na jednotlivé sledované pozemky v zájmovém území ZHP JE Dukovany. Výpočet byl proveden pro 18. 6. 2013.

Obrázky 22 a 23 ukazují distribuci radioaktivního kontaminantu (^{137}Cs) mezi povrchem porostů a povrchem půdy zemědělských ploch. Zde je zřejmé, že díky velké biomase a listové pokrývnosti dochází k zachycování většiny kontaminujícího materiálu povrchem rostlin, v případě odstranění nadzemní biomasy tak může dojít k efektivní ochraně zemědělské půdy před zvýšenou radioaktivní kontaminací.

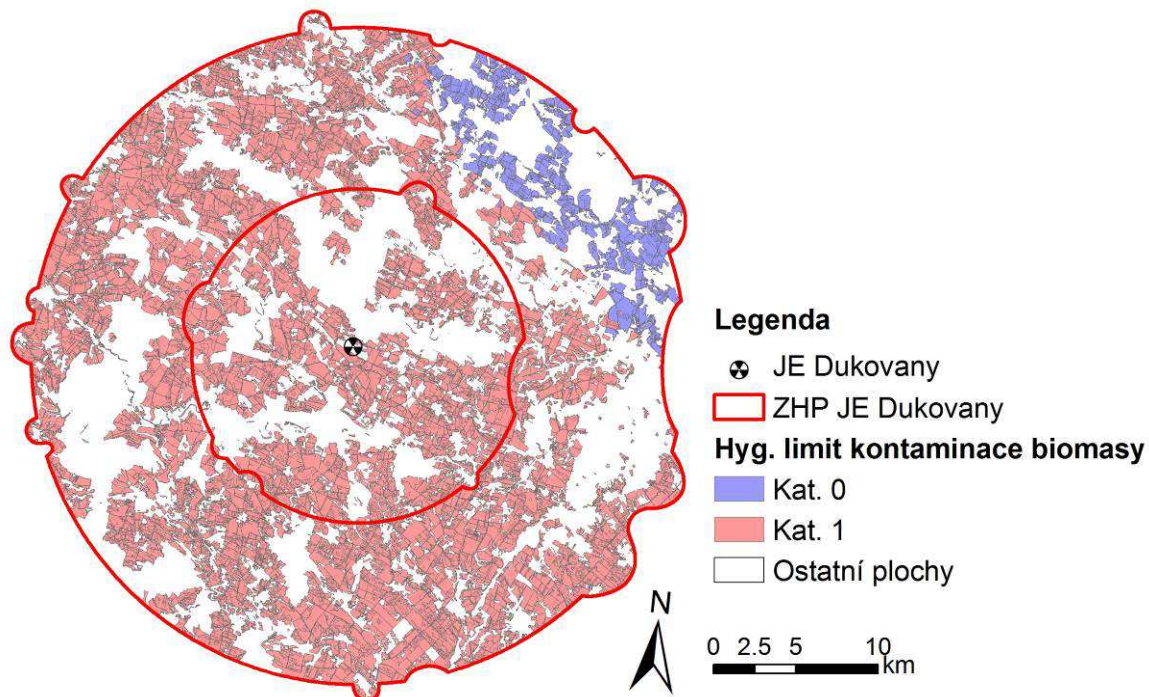


Obr. 22. Přehled prostorové distribuce depozice radioaktivního ^{137}Cs (Bq.m^{-2}) na povrchu porostu vypočtené programem SARCA na základě růstového modelu a modelové situace radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany.

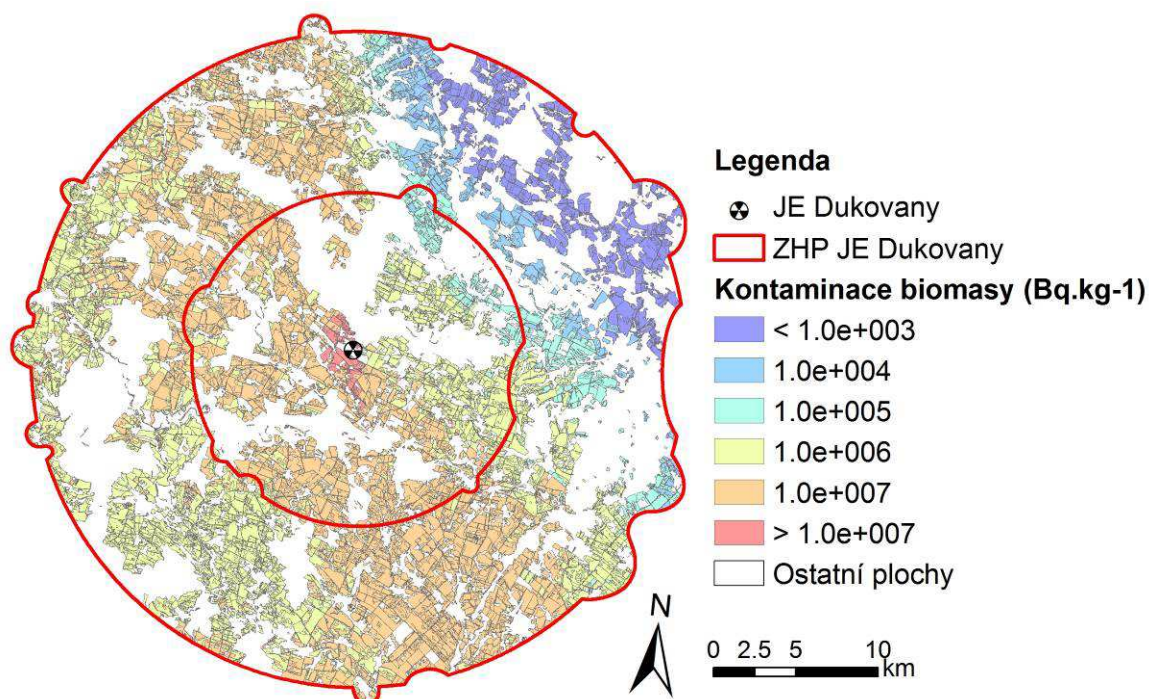


Obr. 23. Přehled prostorové distribuce depozice radioaktivního ^{137}Cs (Bq.m⁻²) na povrchu půdy vypočtené programem SARCA na základě růstového modelu a modelové situace radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany.

Obrázky 24 a 25 zachycují přehled o hmotnostní kontaminaci nadzemní biomasy (Bq.kg⁻¹), a v rámci kategorií hygienického limitu i přehled o prostorové distribuci dále využitelné biomasy pro další zpracování v rámci zájmového území. Zde je patrné, že využitelná pro další zpracování je nadzemní biomasa pouze na malé části sledovaného území.

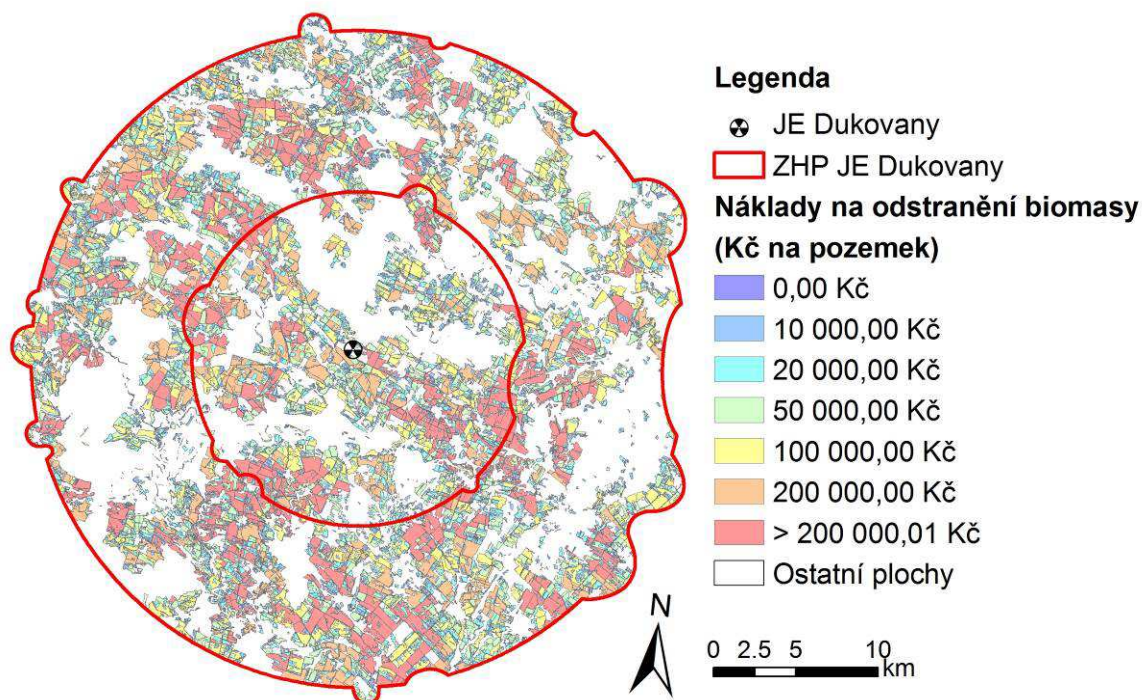


Obr. 24. Prostorové rozdělení kategorií hygienického limitu hmotnostní kontaminace biomasy (Bq.kg⁻¹) zemědělských plodin pro modelovou situaci radiační havárie v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany.

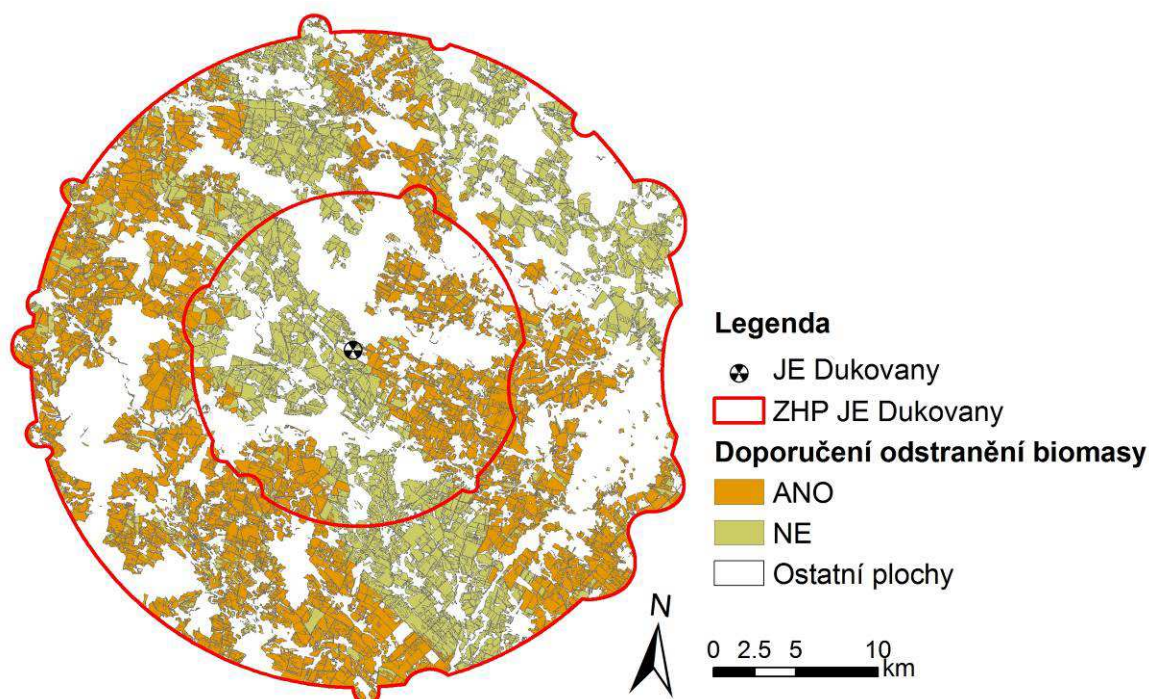


Obr. 25. Prostorové rozdělení průměrné hmotnostní kontaminace biomasy (Bq.kg⁻¹) zemědělských plodin pro modelovou situaci radiační havárie pro jednotlivé pozemky v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany.

Přehled o nákladovosti opatření v časně fázi radiační havárie ukazuje obrázek 26 a doporučení pro odstranění biomasy ukazuje obrázek 27, ze kterého vyplývá, že na základě pravidel uvedených výše lze doporučit odstranění biomasy na většině území, konkrétně na 56,7 % plochy.



Obr. 26. Přehled prostorové distribuce orientačních nákladů na odstranění biomasy z jednotlivých pozemků v rámci zájmové oblasti ZHP JE Dukovany pro modelovou situaci radiační havárie.



Obr. 27. Doporučení odstranění biomasy v rámci zájmového území ZHP JE Dukovany pro modelovou situaci radiační havárie.

Zhodnocení výsledků

Z hodnocení výstupu z programu SARCA vyplývá, že ve sledované oblasti JE Dukovany je poněkud odlišná situace od příkladu uvedeného pro JE Temelín. Na základě modelové radiační situace lze zařadit 11,5 % (7488 ha) sledované plochy zemědělské půdy v zájmovém území do referenční úrovně 0, 62,8 % (40751 ha) do referenční úrovně 1 a 25,6 % (16609 ha) do referenční úrovně 2. V rámci těchto kategorií je celková nadzemní živá biomasa plodin téměř 108 tisíc t pro RU 0, 603 tisíc t pro RU 1 a přibližně 241 tisíc t pro RU 2. Celkové orientační náklady potřebné pro odstranění nadzemní biomasy ze všech zemědělských ploch v ZHP JE Dukovany se pohybují na úrovni více než 128,5 milionů Kč. Vzhledem k tomu, že se pro RU 0 a RU 2 nepředpokládá odstranění biomasy, lze celkové náklady vztáhnout pouze pro RU 1, kde náklady na odstranění biomasy činí více než 80,8 milionů Kč. Přehled výměr zemědělských ploch, hmotnost nadzemní biomasy a náklady na odstranění biomasy pro jednotlivé plodiny v rámci referenčních úrovní pro zájmové území ZHP JE Dukovany ukazuje tabulka 22 a obrázky 20, 21 a 26.

Tabulka 22. Přehled výměry (ha), množství živé nadzemní biomasy (t) a nákladů na odklizení biomasy jednotlivých zemědělských plodin pro jednotlivé referenční úrovně radioaktivní depozice ^{137}Cs v území ZHP JE Dukovany pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Referenční úroveň	Plodina	Plocha [ha]	Hmotnost [t]	Náklady [Kč]
RU 0	Brambory	96,6	425	289715
	Ječmen jarní	129,2	2090	232612
	Tritikale	184,2	3742	331625
	Pšenice jarní	195,4	3407	351783
	Ječmen ozimý	425,7	5551	766258
	Kukuřice	650,4	111	2666521

RU 1	Travní porosty	1046,5	8888	1779066
	Pšenice ozimá	2044,0	40046	3679146
	Řepka	2715,9	43571	4888597
	Tritikale	1071,4	21759	1928450
	Brambory	1108,0	4876	3323873
	Ječmen jarní	1144,4	18508	2059840
	Ječmen ozimý	1581,6	20623	2846939
	Pšenice jarní	2578,2	44941	4640817
	Kukuřice	2898,5	496	11883760
RU 2	Travní porosty	4840,0	41104	8228082
	Pšenice ozimá	11664,8	228539	20996618
	Řepka	13864,3	222425	24955805
	Brambory	338,8	1491	1016520
	Tritikale	468,2	9509	842752
	Ječmen ozimý	512,6	6684	922691
	Ječmen jarní	513,0	8296	923336
	Kukuřice	1129,5	193	4631096
	Pšenice jarní	1455,7	25374	2620238
Celkem RU1		7487,9	107830	14985323
Celkem RU 2		40751,2	603272	80864182
Celkem RU3		16608,7	240601	32605114
Celkem plochy		64847,8	951702	128454619

Jak ukazuje tabulka 22, jsou v rámci RU 1 z hlediska množství (hmotnosti) biomasy a celkových nákladů na odstranění biomasy zásadní porosty řepky, pšenice a travní porosty. Porosty kukuřice lze s ohledem na množství biomasy zanedbat.

Z hlediska kategorií hygienického limitu hmotnostní aktivity nepřekračuje použitou hodnotu 1000 Bq.kg^{-1} 9,8 % (6350 ha) z výměry zemědělské půdy na které je přítomna vegetace (celkem 64,8 tis. ha), 90,2 % hodnotu překračuje (58497 ha). Celkově se jedná o více než 862 tisíc tun kontaminované biomasy, která překračuje hodnotu hygienického limitu. Jak ukazuje tabulka 19, hodnotu hygienického limitu překračuje zároveň i část ploch zařazených v referenční úrovni RU 0 (1174,8 ha). Přehled pro sledované území a pro jednotlivé plodiny udává tabulka 23 a obrázky 24 a 25.

Tabulka 23. Souhrn výměry zemědělské půdy a hmotnosti živé nadzemní biomasy v kategoriích hygienického limitu hmotnostní aktivity pro jednotlivé plodiny v zájmovém území ZHP JE Dukovany. Hygienický limit byl stanoven na 1000 Bq.kg^{-1} pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Referenční úroveň	Hyg. Limit	Plodina	Plocha [ha]	Kontaminace biomasy [Bq.kg^{-1}]	Hmotnost biomasy [t]
RU 0	HL 0	Brambory	96,6	20	425
		Ječmen jarní	122,4	20	1980
		Ječmen ozimý	391,7	20	5107
		Kukuřice	650,4	20	111

		Pšenice jarní	189,8	20	3308
		Pšenice ozimá	1725,8	20	33811
		Řepka	2138,3	30	34304
		Tritikale	148,8	20	3022
		Travní porosty	849,4	20	7214
	HL 1	Ječmen jarní	6,8	1710	110
		Ječmen ozimý	34,0	1930	444
		Pšenice jarní	5,7	2420	99
		Pšenice ozimá	318,2	1620	6235
		Řepka	577,6	1760	9267
		Tritikale	35,4	1900	720
		Travní porosty	197,1	2190	1674
RU 1	HL 0	Kukuřice	37,7	750	6
	HL1	Brambory	1108,0	509000	4876
		Ječmen jarní	1144,4	761000	18508
		Ječmen ozimý	1581,6	868000	20623
		Kukuřice	2860,7	170000	490
		Pšenice jarní	2578,2	790000	44941
		Pšenice ozimá	11664,8	694000	228539
		Řepka	13864,3	881000	222426
		Tritikale	1071,4	638000	21759
		Travní porosty	4840,0	965000	41105
RU 2	HL 1	Brambory	338,8	1579000	1491
		Ječmen jarní	513,0	3600000	8296
		Ječmen ozimý	512,6	5191000	6684
		Kukuřice	1129,5	578000	193
		Pšenice jarní	1455,7	2877000	25374
		Pšenice ozimá	4438,4	4268000	86958
		Řepka	4801,9	3801000	77037
		Tritikale	468,2	2912000	9509
		Travní porosty	2950,5	4592000	25058
Celkem RU 0	HL 0		6313,1		89283
	HL 1		1174,8		18547
Celkem RU 1	HL 0		37,7		6
	HL 1		40713,5		603265
Celkem RU 2	HL 1		16608,7		240601

Význam vegetačního krytu pro rozdělování radioaktivní depozice mezi povrch porostu a povrch půdy ilustračně ukazují tabulka 24 a obrázky 22 a 23, ze kterých je zřejmé, že za daných podmínek množství nadzemní biomasy a radiační situace dochází k významnému zachycování radioaktivního materiálu na povrchu porostu. V porovnání s příkladem pro ZHP JE Temelín je zde vliv vegetačního krytu více patrný (viz obrázek 23), kdy se významně uplatňuje velká listová plocha plodin a značné množství biomasy, které se blíží maximálním hodnotám. V případě modelového příkladu pro JE Dukovany jsou významně vyšší i hodnoty intercepčního faktoru, respektive procenta zachycení kontaminantu na povrchu porostů, které se u obilovin a řepky blíží 100 %.

Tabulka 24. Procentní vyjádření intercepce kontaminantu na povrchu zemědělských plodin a povrchu půdy v zájmovém území ZHP JE Dukovany pro uvedený modelový příklad radiační havárie.

Plodina	Plocha [ha]	Intercept na plodinách [%]	Intercept na povrchu půdy [%]
Brambory	1543,4	13,5	86,5
Ječmen jarní	1786,5	90,4	9,6
Ječmen ozimý	2519,9	92,2	7,8
Kukuřice	4678,4	0,2	99,8
Pšenice jarní	4229,4	97,5	2,5
Pšenice ozimá	18147,2	100,0	0,0
Řepka	21382,1	100,0	0,0
Tritikale	1723,8	100,0	0,0
Travní porosty	8837,1	65,4	34,6

2.10 Souhrn

Cílem metodiky je rychlý odhad množství a distribuce nadzemní biomasy vegetace (plodin) na zemědělsky obhospodařovaných pozemcích a odhad rozdělení depozice radioaktivního materiálu mezi porost a povrch půdy v případě radiační kontaminace. Metodika řeší na základě znalosti plošné kontaminace zjištěné z modelu, leteckých či pozemních měření ranou fází případné radiační nehody. V metodice je popsán aktuální stav pěstovaných plodin na zemědělské půdě zjištěný různými metodami a sloužící jako podklad pro následný odhad kontaminace. Metodika je založena na výpočtu plošné kontaminace pomocí softwaru SARCA pracující s příslušnými podklady a vrstvami v prostředí GIS. Výpočet zahrnuje intercepční faktor pro každou plodinu a časové období, otázku atmosférických srážek, je tedy umožněn výpočet jak suché, tak i mokré depozice daného radionuklidu. Podle úrovně kontaminace jsou s ohledem na referenční úroveň OIL (IAEA 1997) plochy rozděleny do tří tříd v návaznosti na další možné zásahy na jednotlivých plochách zemědělské půdy, tzn. na plochy bez zásahu, s omezeným zásahem a plochy s měrnou aktivitou radiace ohrožující zdraví člověka. Funkčnost, postupy řešení a ukázky výstupů jsou zde aplikovány na příkladu havárie a úniku radiace z jaderných elektráren Temelín a Dukovany pro oblast jejich zón havarijního plánování. Na základě výstupů získaných pomocí předloženého metodického postupu bude možné odhadnout rizika a navrhnout opatření pro snížení kontaminace na zemědělských pozemcích. Otázka operativního snížení kontaminace zemědělské půdy jsou důležité jak z pohledu možnosti využívání zemědělské půdy aktuálně, tak i z dlouhodobého hlediska.

3 Srovnání novosti postupů

Metodika řeší analýzu rizika kontaminovaného krajinného krytu v důsledku události, která spočívá ve včasném hodnocení distribuce a stavu zemědělských plodin. Do současné doby v rámci České republiky neexistovala metodika, která by řešila odhad kontaminace zemědělských plodin pro případ nečekané události spojené s únikem radioaktivity do přírodního popředí. Metodika by měla napomoci standardizovat postupy a opatření pro případ takových událostí. Uvedený metodický postup slouží pro odhad kontaminace plodin a povrchu půdy na dotčeném území, kdy je možné na základě zadání vrstvy měrné depozice daného radionuklidu v prostoru (např. výstupy

z předpovědních modelů, letecká či pozemní měření) vypočítat průměrnou měrnou aktivitu depozice radionuklidu pro jednotlivé zemědělské plochy. Dosavadní metody odhadu úrovně kontaminace neřeší aktuální stav a rozmístění plodin na jednotlivých pozemcích, ale jen obecně zemědělskou krajinu. Zanedbává se tím tak problematika charakteristiky jednotlivých plodin, různé agrotechniky a možnosti zpracování nebo následného využití. V tomto především spočívá novost předkládaného postupu. Metodika navíc řeší orientační náklady na sklizeň, případně odstranění celkové nadzemní biomasy z dotčených ploch.

4 Popis uplatnění certifikované metodiky

Použití metodiky je cíleno především na problematiku včasného stanovení radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a zemědělské půdy v rané fázi radiační havárie. Zde je důležité prostorové hledisko zpracování dat, které umožňuje, prostřednictvím nástrojů GIS, vyhodnocení stavu celého zájmového území zasaženého radiační havárií v co nejkratším čase po havárii. Metodika je tak určena pro použití při rozhodovacích procesech při radiační havárii a pro rozhodování o následných opatřeních na zemědělských plochách s cílem snížení radioaktivní kontaminace těchto ploch. Předpokládanými uživateli metodiky budou dotčené orgány státní správy zodpovědné za radiační ochranu zemědělské krajiny (SÚJB, SÚRO, Krizový štáb kraje, Ministerstvo vnitra, Ministerstvo zemědělství, atd.).

5 Seznam související použité literatury

Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., Ting, K.C. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35, 2455-2469.

Brom, J., Procházka, J., Nedbal, V., Vinciková, H. Modul „Biomasa_kontaminace“ pro ESRI®ArcMap 9.2 ArcInfo. SW + návod k použití. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, České Budějovice, 2012, unpubl.

Dymond, C., C., Mladenoff, D., J., Radeloff, V., C. Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80 (3), 460-472.

Fumin, Z., Zaichun, Z., Yaozhong, P., Tangao, H., Jinshui Z. Application of remote sensing technology in crop acreage and yield statistical survey in China. Meeting on the Management of Statistical Information Systems (MSIS 2010). Daejeon, Republic of Korea, 2010, 26-29.

Hájková, L., Voženílek, V., Tolasz, R. (2012): Atlas fenologických poměrů Česka/Atlas of the Phenological Conditions in Czechia. ČHMÚ Praha, UP Olomouc, ISBN 978-80-244-3005-8.

Hakrová, P., Procházka, J., Vinciková, H., Nedbal, V., Křováková, K., Šimová, I., Vácha, A. Sledování sezónní dynamiky množství nadzemní biomasy pro odhad radioaktivní kontaminace v ZHP JE Temelín. Výzkumná zpráva projektu BV II - MV ČR č. VG20122015100 - Minimalizace dopadů radiační kontaminace na krajinu v zóně havarijního plánování JE Temelín. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2013, 21 s.

IAEA (1997): Generic Assessment Procedures for Determining Protective Actions During a Reactor Accident. IAEA-TECDOC-955, IAEA, Vídeň.

Kepka, P., Brom, J., Procházka, J., Vinciková, H., Pecharová E. Vývoj nástrojů GIS pro rozhodovací proces při radiologické kontaminaci zemědělské půdy. *Bezpečnost jaderné energie*, 2010, 18(56), No. 5-6, 172-173.

Květ, J., Nečas, J., Ondok, J.P. Metody růstové analýzy (Studijní zpráva). Ústav vědeckotechnických informací, Praha, 1971.

Larcher, W. Fyziologická ekologie rostlin. Academia, Praha, 1988.

Müller, H., Pröhl, G. ECOSYS-87: A dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. Health Physics, 1993, 64, 232–252.

Nisbet, A.F., Rice, H., Jones, A., Jullien, T., Pupin, V., Ollagnon, H., Hardeman, F., Carlé, B., Turcanu, C., Papachristodoulou, C., Ioannides, K., Hänninen, R., Rantavaara, A., Solatie, D., Kostiainen, E. and Oughton, D. Generic handbook for assisting in the management of contaminated food productions systems in Europe following a radiological emergency. EURANOS (CAT1)-TN(06)- 06, 2006.

Oetter, R., Cohen, W.B., Berterretche, M., Maiersperger, T.K., Kennedy, R.E. Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. Remote Sensing of Environment, 2000, 76, 139-155.

Paine, C.E.T., Marthens, T.R., Vogt, D.R., Purves, D., Rees, M., Hector, A., Turnbull, L.A., 2012. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists: Nonlinear plant growth models. Methods in Ecology and Evolution 3, 245–256.

Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T. and Upchurch, D.R. Remote Sensing for Crop Managment. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, Vol. 69. No. 6, 647-664.

Priya, S., Shibasaki, R. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. Ecological Modelling, 2001, 135, 113–129.

Pröhl, G. Radioactivity in the terrestrial environment. In Scott, E.M. (ed.): Modelling Radioactivity in the Environment. Elsevier, Amsterdam; Boston, 2003, pp. 87-108.

Schultz, G. A., Engman, E. T. Remote sensing in hydrology and water management. Springer Verlag, Berlin, 2000, pp. 483.

Suming, J., Sader, S., A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference monture index in detecting forest disturbances. Remote Sensing of Environment, 2005, 94 (3), 364-372.

Teillet, P., M., Staenz, K., Williams, D., J. Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions. Remote Sensing of Environment, 1997, 61, 139-149.

Turcanu, C., Carlé, B., Hardeman, F. Agricultural countermeasures in nuclear emergency management: a stakeholders' survey for multi-criteria model development. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59 (3), 305-312.

Yang, P., Wu, W., Tang, H., Zhou, Q., Zou, J., Zhang, L. (2007): Mapping Spatial and Temporal Variations of Leaf Area Index for Winter Wheat in North China. Agricultural Sciences in China, 6 (12): 1437-1443.

Internetové zdroje:

ČSÚ (2012a). Veřejná databáze. Balance půdy k 31.12.2012. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2013-08-22]. Dostupné z:

http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislotab=ZPR9010CU&&kapitola_id=10

ČSÚ (2012b). Veřejná databáze. Balance půdy v krajích k 31.12.2012. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2013-08-22]. Dostupné z:

http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislotab=RSO0010PU_KR&&kapitola_id=10

ČSÚ (2013a). Statistická ročenka České republiky 2013. Osevní plochy zemědělských plodin k 31.5.2013. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2013-11-5]. Dostupné z: http://www.czso.cz/csu/2013edicniplan.nsf/kapitola/0001-13-r_2013-1300

ČSÚ (2013b). Veřejná databáze. Plocha osevů k 31.5.2013. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2013-11-5]. Dostupné z: http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislatab=ZEM0020UU&&kapitola_id=11

ČSÚ (2005-2012). Veřejná databáze. Hektarové výnosy sklizně zemědělských plodin. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2013-11-5]. Dostupné z: http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislatab=ZEM5022PU_KR&&kapitola_id=11

pLPIS, [online]. © Sitewell Podkladová data @ 2014 ČÚZK [cit. 2013-02-016]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny/>

SITWELL LPIS 2. Implementace systému LPIS. Případová studie projektu (2004): Sitewell s.r.o. Informační systémy. Praha 4. Dostupné online: http://www.lpis.cz/down/CZLPIS_pripadova_studie_CZ.pdf

Veřejná databáze ČSÚ: Životní prostředí, zemědělství. [online]. © Český statistický úřad [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: http://vdb.czso.cz/vdbvo/tabparam.jsp?voa=tabulka&cislatab=RSO0010PU_KR&&kapitola_id=10

„ZELENÉ ZPRÁVY“: ZPRÁVA O STAVU ZEMĚDĚLSTVÍ ČR 1997-2012. [online]. © 2009-2013 Ministerstvo zemědělství, 2012 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo-zemedelstvi/vyrocní-a-hodnotící-zpravy/zpravy-o-stavu-zemedelstvi/?pos=0>

6 Seznam publikací, které předcházely metodice

Brom J., Procházka J., Nedbal V., & Vinciková H. Nástroj GIS pro včasné prostorové hodnocení radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a půdy. Bezpečnost jaderné energie, 2013, 21(59), 48–52.

Brom, J., Procházka, J., Nedbal, V., Vinciková, H. Odhad radioaktivní kontaminace zemědělských plodin a půdy pomocí nástroje GIS. XXXIV. Dny radiační ochrany. Sborník abstraktů. 5.-9. 11. 2012, Třeboň, Česká republika, p.37.

Procházka, J., Brom, J., Nedbal, V., Vinciková, H. Modelování radioaktivní kontaminace zemědělských plodin na příkladu okolí JE Temelín a JE Dukovany. XXXV. Dny radiační ochrany. Sborník abstraktů. 11.-15. 11. 2013, Třeboň, Česká republika, p.41. ISBN 978-80-01-05356-0.

Kepka P., Brom J., Procházka J., Vinciková H. Vývoj nástrojů GIS pro rozhodovací proces při radiologické kontaminaci zemědělské půdy. Bezpečnost jaderné energie, 2010, 18(56) č.5/6. ISSN 1210 – 7085.

Vinciková, H., Hais, M., Brom, J., Procházka, J., Pecharová, E. Use of remote sensing methods in studying agricultural landscapes – a review. Journal of Landscape Studies, 2010, 3: 53-63. ISSN 1802 – 4416.

Vinciková, H., Procházka, J., Brom, J. Timely Identification of Agricultural Crops in the Temelín NPP Vicinity Using Satellite Data in the Event of a Radiation Contamination. Journal of Agrobiology, 2010, 27(2): 73-83, 2010. ISSN 1803 – 4403.