

# MODELOVÁNÍ OBSAHU UHLÍKU V PŮDÁCH ČR

(Modeling soil carbon content in the Czech republic)

Mikuláš Madaras<sup>a</sup>, Rastislav Skalský<sup>b</sup>, Juraj Balkovič<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Czech Agrifood Research Center, Division of Crop Management Systems, Drnovská 507,  
161 00 Prague – Ruzyně, Czech Republic, mikulas.madaras@carc.cz

<sup>b</sup> International Institute for Applied Systems Analysis, Schlossplatz 1, 2361 Laxenburg,  
Austria

## Abstract

Process-based crop models offer an essential alternative to field experiments for predicting the SOC balance across diverse environmental and management conditions. By integrating them with regional geospatial data, complex tools are created for resource inventory and policy support. The paper introduces the regional adaptation of the EPIC-IIASA model for the Czech Republic. The platform was used to quantify C sequestration potential in arable soils under various farming strategies and climate scenarios. Simulations demonstrate a significant C sequestration potential (average 12 t C/ha over 80 years) under protective farming. The results emphasize the critical role of crop residue incorporation and optimal N use for maximizing C retention in the soil.

**Key words:** EPIC-IIASA CZ, carbon sequestration, crop models, crop residues

Hlavním zdrojem poznatků o dynamice uhlíku v půdě (SOC) je experimentální zkoumání pomocí polních pokusů nebo monitoringu. Komplexní půdní procesy lze rovněž převést do matematické formy. Matematické modely mohou usnadnit pochopení a předpověď rovnováhy SOC v široké škále variability půdně-klimatických a agronomických podmínek, kde experimentální zkoumání není možné z hlediska času, komplexity či vysokých nákladů.

Modely SOC (např. RothC, Century/DayCent, DNDC) překládají teoretické předpoklady do zjednodušeného obrazu ekosystému pomocí rovnic a schémat. Porovnáním simulací s reálnými daty lze ověřit správnost těchto předpokladů. Jakmile je model ověřen (validován), může být využit k předpovědi – např. vlivů klimatických změn nebo změn ve využívání půdy na dynamiku SOC. Model sám o sobě není ani "pravdivý", ani "nepravdivý" – jeho hodnota spočívá ve schopnosti vysvětlit a předpovědět určité jevy [1]. Modely SOC mohou být integrované do složitějších procesně orientovaných plodinových nebo ekosystémových modelů.

Existuje řada simulačních modelů, které dokážou realisticky napodobit dopady agrotechnických zásahů i změny klimatu (např. DSSAT, APSIM, WOFOST, EPIC). Tyto modely umožňují předpovídat nejen výnosy plodin, ale také různé půdní a environmentální charakteristiky.

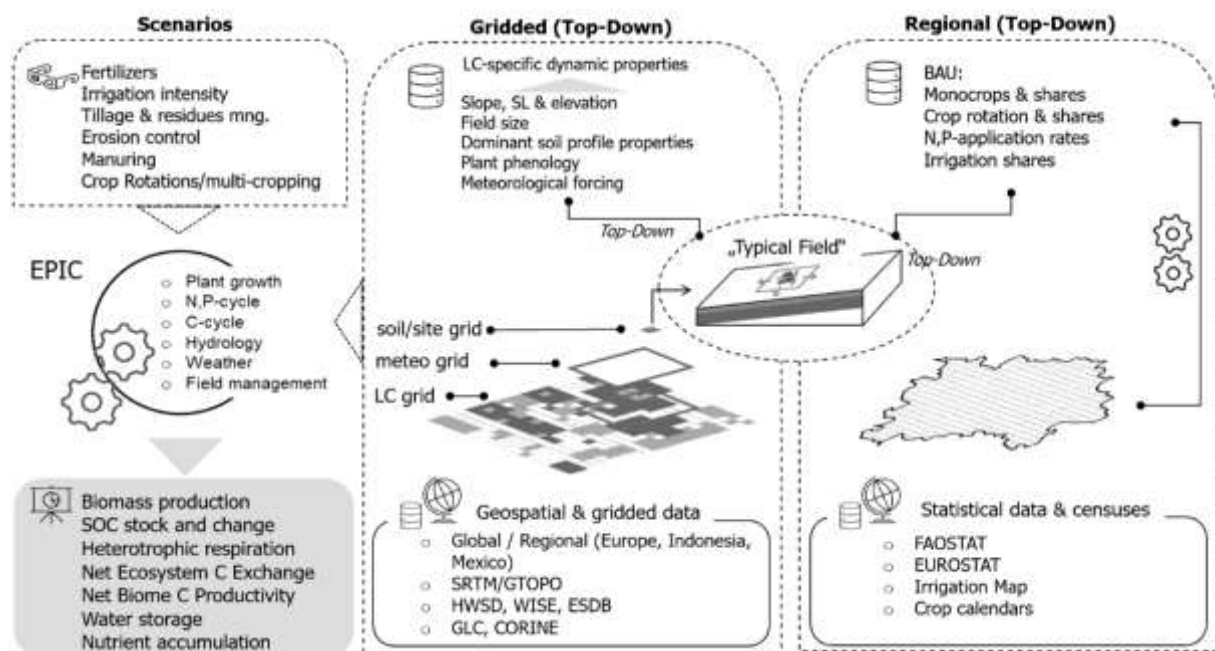
Dalším stupněm ve využití procesních modelů je jejich propojení s regionálními georeferencovanými databázemi a dalšími zdroji informací. Tím

se vytváří komplexní nástroje pro výzkum a inventarizaci přírodních zdrojů, včetně půdy a jejích funkcí, využitelné pro predikce v různých měřítkách.

Cílem tohoto příspěvku je představit regionální plodinový model EPIC-IIASA a jeho regionální modifikaci pro Českou republiku. Vytvoření této modifikace bylo motivováno výzkumnou potřebou MZe kvantifikovat potenciál sekvestrace C v orné půdě při různých podmínkách hospodaření a scénářích vývoje klimatu.

## Materiál a metody

Základem pro simulace sekvestračního potenciálu orných půd ČR je regionální plodinový model EPIC-IIASA [2, 3], který byl vytvořen pro simulaci růstu a produkce zemědělských plodin v globálním, kontinentálním a subkontinentálním měřítku (Obr. 1). Tato simulační platforma využívá již existující a mnohokrát validovaný procesní plodinový model EPIC [4, 5].



Obr. 1 Platforma EPIC-IIASA – prvky, struktura a funkčnost

Dynamika růstu plodin během vegetační sezóny je pomocí modelu EPIC-IIASA simulována v denním kroku současně pro velké množství samostatných, prostorově lokalizovaných stanovišť, obvykle v časovém horizontu několika let až desetiletí. EPIC-IIASA poskytuje na výstupu soubor dat o časové a prostorové změně produkce plodin v reakci na zaznamenané (historické) nebo předpokládané (budoucí, alternativní) faktory, které produkci plodin ovlivňují, jako např. počasí, topografie, půda a její zpracování, agrotechnika, plodina a její kultivarové vlastnosti apod.

Jádrem platformy je model EPIC, který obsahuje moduly pro simulaci růstu plodin, vodní bilanci půdy a bilanci živin (koloběh a přeměny C, N a P v půdě

a rostlině). V modelu EPIC je zakomponován ověřený a široce využívaný model dynamiky půdní organické hmoty CENTURY. Model je dále doplněn o bohatý výběr agrotechnických opatření.

Druhým prvkem je geoprostorová datová infrastruktura, která zajišťuje prostorově reprezentované vstupy pro model EPIC (počasí, polohu, geomorfologii, půdu, plodinu, vstupy živin a obhospodařování půdy), a to buď ve formě sítě (grid) nebo prostorových simulačních jednotek (SimU). Třetím prvkem jsou scénáře, které představují formulaci konkrétních výzkumných otázek s ohledem na zamýšlený účel. Scénáře ovlivňují výběr výstupů a obvykle jsou definovány pomocí alternativních vstupních dat o klimatu (historické klima, klimatické projekce) a obhospodařování půdy (adaptační a mitigační opatření, např. uhlíkové zemědělství).

Model EPIC-IIASA byl validován jako nástroj pro hodnocení dopadů klimatické změny, a to jak samostatně [2, 3, 6, 7], tak i jako součást modelových souborů (ensembles) [8]. Byla také prokázána jeho spolehlivost jako součásti integrovaných modelovacích systémů [9].

Díky široce škálovatelnému procesnímu modelu EPIC bylo v rámci projektu úkolem modifikovat platformu EPIC-IIASA pro regionální studie agroekosystémů v rámci ČR, a to zejména z pohledu hodnocení potenciálu sekvestrace C a navrhnout a ověřit účinnost modelových systémů sekvestrace C v zemědělské půdě.

## **Výsledky a diskuse**

Pro potřeby regionálních simulací zemědělských systémů ČR byla vytvořena a v prostředí LINUX implementována národní geoprostorová datová infrastruktura EPIC-IIASA CZ. Sestává z 977 prostorových SimU, vytvořených rozdělením okresů podle klimatického regionu a převládajících vlastností půdy (hloubka, půdní druh a třída obsahu humusu). Každé SimU byl přiřazen typický půdní profil a denní údaje o počasí z let 1989 – 2019 ze čtvercové sítě 10 × 10 km, a na základě příslušné výrobní oblasti také odhadovaná data setí a sklizně hlavních plodin. Dizajn umožňuje agregaci výstupů na úroveň LAU1 (okresy) a NUTS2 (kraje), což souvisí s požadavkem státní správy na úroveň kvantifikace a interpretace výsledků.

Agregace dat na územní celky zároveň umožňuje interní validaci výstupů simulací vzhledem k regionálním statistikám, zveřejňovaným ČSÚ (např. výnosy plodin), nebo i k dalším nezávislým informačním zdrojům různého charakteru (potenciální výnosy plodin, výsledky dlouhodobých pokusů a monitoring, odhady evapotranspirace apod.).

V rámci platformy EPIC-IIASA CZ je možné simulovat vlivy široké škály agrotechnických opatření s vlivem na proměny C a N v půdě (tab. I). Tato opatření umožňují analyzovat potenciál či limity různých pěstebních strategií z pohledu zavádění uhlíkového zemědělství.

Pro vyhodnocení sekvestračního potenciálu v českých regionech jsou aktuálně uvažované 2 základní modelové systémy hospodaření:

- Pěstební systém bez živočišné výroby (Cp): bez krmných plodin a bez aplikace statkových a organických hnojiv.

- Pěstební systém se živočišnou výrobou (Ap) - v osevním sledu jsou zakomponovány krmné plodiny, aplikuje se chlévský hnůj

Oba systémy jsou dále rozděleny na dva podtypy:

**Komerční (Cm)** - osevní postup s menším počtem komerčních plodin (včetně bioenergetických), uvažováno je spíše odstranění posklizňových zbytků, konvenční orba, vyšší dávky hnojiv a závlaha (CpCm, ApCm).

**Ochranný (Rg)**: vyšší počet plodin v osevním postupu (včetně netradičních), přítomnost meziplodin, uvažováno je spíše ponechávání posklizňových zbytků, redukována orba, nižší dávky hnojiv a absence závlahy (CpRg, ApRg).

Tab. I Prvky a opatření zakomponované v platformě EPIC-IIASA CZ

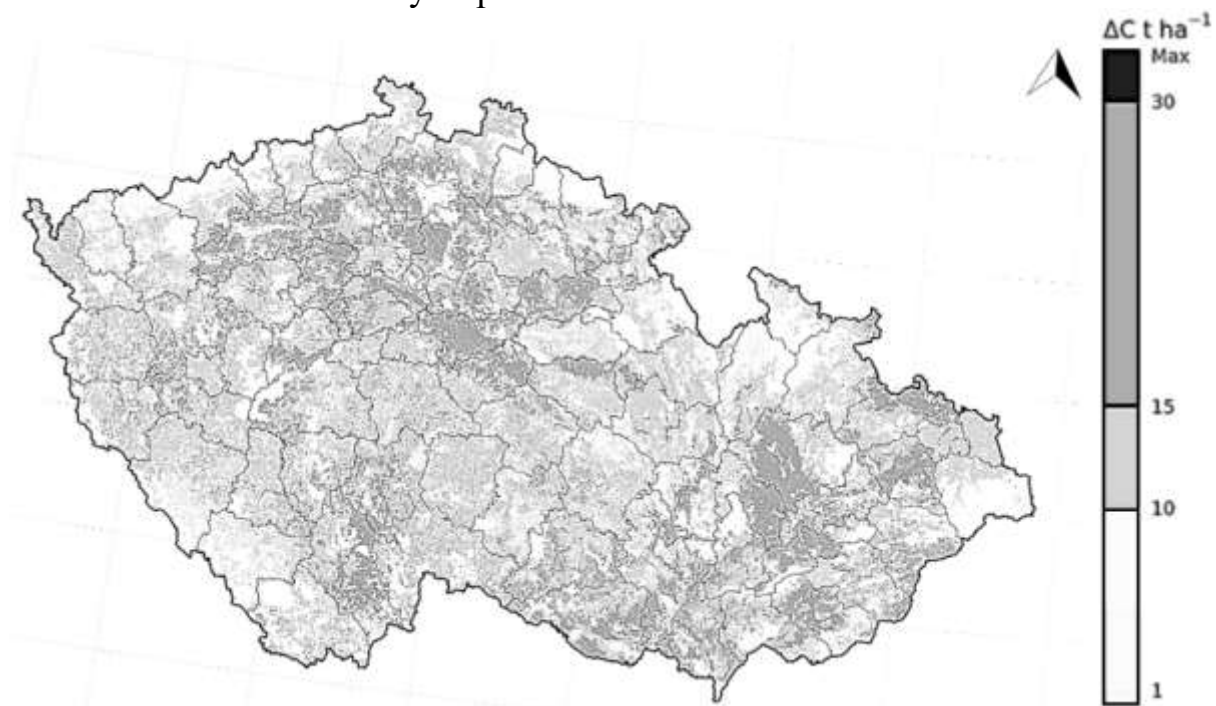
<b>Plodiny</b>	jednoroční / víceleté, pícniny, okopaniny apod., včetně kultivarových vlastností (např. ranost)
<b>Osevní postup</b>	monokultura / střídání plodin
<b>Minerální hnojiva</b>	aplikační dávka N (5 úrovní), způsob aplikace (konkrétní termín / aplikace na základě potřeby)
<b>Statková a organická hnojiva</b>	množství a typ podle složení a původu (chlévkový hnůj, čistírenský kal, kompost atd.)
<b>Závlahy</b>	bez / se závlahou, možnost omezení maximální denní a celkové roční závlahové dávky
<b>Zpracování půdy</b>	hloubka a charakter (pluh, disky, brány apod.), konvenční / redukována / bezorební argotech.
<b>Meziplodiny</b>	bez / s meziplodinou (N fixující / nefixující)
<b>Management posklizňových zbytků</b>	zbytky zcela / částečně odstraněny z pole (implementovány 4 úrovně)

Simulace jsou prováděny pro období let 1989 – 2019 (skutečná data o počasí ze sítě ČHMÚ), a pro období let 2000 – 2100 pro klimatologické scénáře RCP 2.6 (optimistický scénář), RCP 4.5 (střední) a RCP 8.5 (pesimistický). Sekvestrace C byla vyjádřena jako rozdíl v průměrném obsahu SOC v povrchové 30 cm vrstvě půdy v obdobích let 2040 – 2060 (resp. 2080 – 2100) oproti průměru za období 2000 – 2020 v klimatickém scénáři RCP 4.5. Tímto způsobem definovaný potenciál sekvestrace V v orné půdě vyjadřuje míru retence/uvolnění C v povrchové vrstvě za 40 nebo 80 let.

Pro účely tohoto příspěvku byl hodnocen vliv celkové aplikační dávky N (0 – 100 % limitu maximální dávky stanoveného nitrátovou směrnicí) a vliv intenzity

zapracování posklizňových zbytků ve 4 stupních, v rozmezí 0 – 100 %. Simulován byl půdo-ochranně orientovaný pěstební systém zaměřený na rostlinnou výrobu (CpRg), s osevním sledem: kukuřice – pšenice ozimá – ječmen jarní – řepka ozimá – hrách. Agrotechnika zahrnovala zařazení meziplodin a šetrnou kultivaci půdy pouze (do 10 cm).

Simulace ukazují, že za 80 let by v pěstebním systému CpRg došlo k sekvestraci C u všech simulačních jednotek, a to v rozmezí 2,0 – 22,6 t C/ha, přičemž sekvestrace vykazuje značné regionální rozdíly (Obr. 2). V rámci všech simulačních jednotek byla průměrná hodnota sekvestrace 11,9 t C/ha. Pro 35 % simulačních jednotek byly hodnoty sekvestrace nižší než 10 t C/ha, tj. roční přírůstek C byl nižší než 125 kg C/ha. Více než 15 t C/ha bylo sekvestrováno u 27 % simulačních jednotek. Po prostorové agregaci se zohledněním skutečné výměry orné půdy jednotlivých SimU se průměrná sekvestrace v rámci okresů pohybovala mezi 10-15 t C/ha/80 let. Nižší hodnota byla zaznamenána pouze v okrese Pardubice (9,3 t C/ha), hodnoty nad 15 t C/ha pak v okresech Olomouc a Kroměříž. Regionální rozdíly souvisí zejména s charakterem půd, iniciálním obsahem SOM a klimatickými podmínkami.

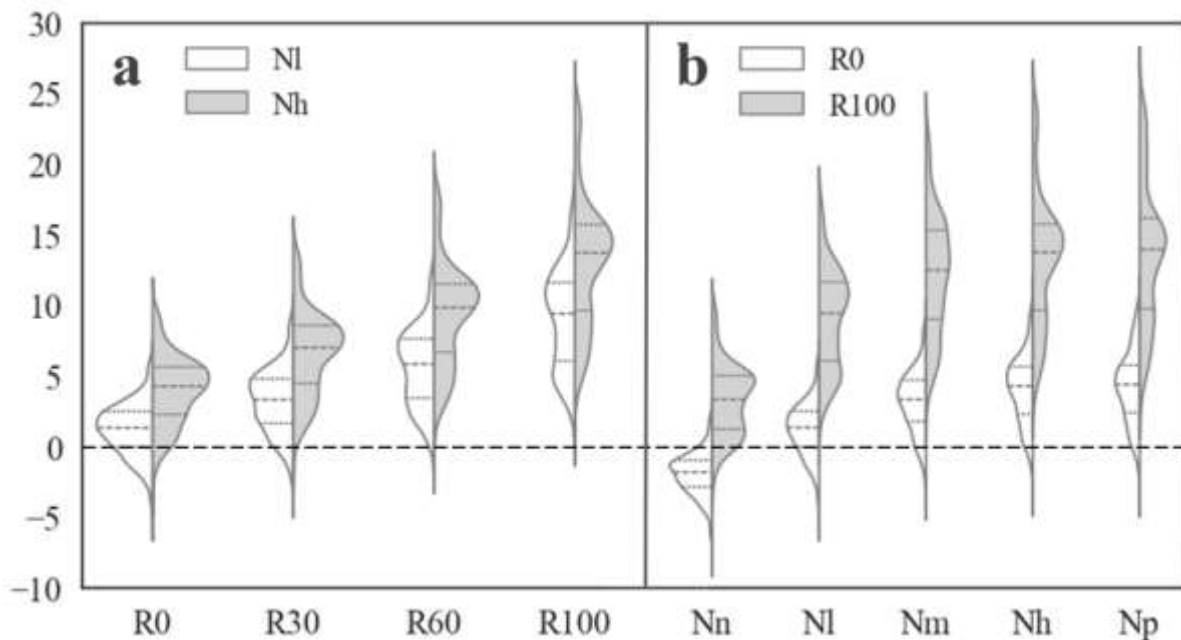


Obr. 2 Mapa potenciální sekvestrace uhlíku (t C/ha/80 let) v povrchové vrstvě půdy při agronomickém scénáři CpRg (pouze rostlinná výroba + půdoochranné technologie), při střední intenzitě hnojení N (60 % limitu dle nitrátové směrnice) a zapracování všech posklizňových zbytků.

Z výsledků dále vyplývá, že více než polovina sekvestrovaného C (60 – 70 %) je akumulována již v období prvních 40 let. Schopnost sekvestrovat C při daných půdních, klimatických a agronomických podmínkách se postupně vyčerpává. Mezi vstupy a výstupy C se postupně ustavuje rovnováha, která by

(při prodloužení simulačního období a podobných klimatických podmínkách) nastala v následujících 40 – 60 letech. Delší simulační období však již postrádá smysl kvůli nejistotám ohledně klimatického vývoje, pěstovaných plodin (kultivarů), jejich agrotechnice apod. Podstatným zjištěním je, že sekvestrace má svůj potenciální limit a že C navýšený pomocí agrotechnických postupů není do půdy uložen trvale [10], neboť přírůstek je vázán na konkrétní způsoby hospodaření.

Simulace dokládají význam úrovně zapravení posklizňových zbytků na sekvestraci C (Obr. 3a). Při odvážení veškerých posklizňových zbytků (R0) nelze očekávat zásadní navýšení půdní zásoby C, a to ani při vysoké intenzitě pěstování a dávkách N na úrovni limitu nitrátové směrnice (Nh). Ponechání a zapravení veškerých posklizňových zbytků (R100) pak navyšuje sekvestraci přibližně trojnásobně při vysoké intenzitě hnojení a více než pětinásobně při extenzivním pěstování (Nl).



Obr. 3 (a) Vliv úrovně zapravení posklizňových zbytků a intenzity hnojení dusíkem na potenciální sekvestraci uhlíku (t C/ha/80 let) v povrchové vrstvě půdy při agronomickém scénáři CpRg (R0 – všechny posklizňové zbytky sklizeny až R100 – všechny zapraveny; (b) Nn – bez hnojení dusíkem, Nl – nízká dávka, Nm – střední dávka, Nh – vysoká dávka – limit dle nitrátové směrnice, Np – dávka pro zajištění maximální produkce). Graf znázorňuje četnost výskytu v rámci souboru dat agregovaných na úroveň okresů.

Významným faktorem ovlivňujícím sekvestraci C je intenzita hnojení dusíkem (Obr. 3b), a to skrz vliv na produkci a množství biomasy zůstávající v půdě (kořeny, posklizňové zbytky). Významný nárůst sekvestračního potenciálu je patrný v gradientu od extenzivních systémů (Nn, Nl) po střední hnojení (Nm,

tj. 60 % limitu daného nitrátovou směrnicí). Další zvyšování dávky N má vliv na výnosy, ale podstatnější navýšení sekvestrovaného C již nepřináší.

Výsledky získané simulací jsou v souladu s experimentálními poznatky, že hospodaření s posklizňovými zbytky a intenzita hnojení patří k hlavním agronomickým nástrojům, které rovnováhu mezi vstupy a výstupy C ovlivňují [11]. Pochopení komplexních interakcí mezi těmito je nezbytné pro navrhování účinných postupů uhlíkového zemědělství.

Zapracování posklizňových zbytků do půdy je nejpřímější cestou ke zvýšení vstupů C. Ačkoliv se značná část uhlíku ze zbytků v krátkodobém horizontu ztratí mikrobiálním rozkladem, zbytek přispívá k tvorbě stabilních frakcí SOC. Studie konzistentně prokazují, že ponechání a zapracování zbytků (na rozdíl od jejich odstraňování) významně zvyšuje zásoby SOC, a to v různorodých půdně-klimatických podmínkách [12]. Vliv má samozřejmě způsob zapracování (orba vs. mělké zpracování vs. bezorebné technologie). Fyzická přítomnost zbytků také snižuje půdní erozi, která je hlavním zdrojem ztrát C.

Hnojení dusíkem hraje v dynamice SOC komplexní roli. Dostatečná dostupnost N je klíčová pro maximalizaci výnosu plodin, a tudíž i pro produkci podzemní biomasy (kořenů) a nadzemních zbytků. Vzhledem k tomu, že kořenový C vstupuje do půdních vrstev s nižší saturací C oproti povrchu půdy, vyšší vstup N podporující růst kořenů vede k většímu potenciálu sekvestrace C [13]. Negativní vliv aplikace N na sekvestraci C může být důsledkem tzv. priming efektu. Vysoké aplikační dávky N mohou urychlit rozklad stávajícího, stabilního SOC, neboť dostupnost N může stimulovat aktivitu mikroorganismů rozkládajících půdní organickou hmotu [14]. Tento efekt může kompenzovat zisky z vyšší produkce biomasy a vytvořit tak prostor pro stanovení optimální dávky N pro účinnou sekvestraci C.

Nejúčinnější strategie pro sekvestraci C bude vyplývat ze synergie mezi maximálním zapracováním zbytků a optimalizovanou aplikací N [15]. Cílem je dosáhnout rovnováhy, kde N stimuluje maximální vstup C bez vyvolání významných ztrát rozkladem stávajícího SOC. Náš výzkum naznačuje, že agronomický přístup spočívající v maximálním možném ponechání zbytků v kombinaci s hnojením N přizpůsobeným potřebám plodiny (tj. vyhýbání se nadměrným aplikacím) poskytuje nejvyšší potenciál sekvestrace C.

## **Závěr**

V příspěvku je prezentován nástroj EPIC-IIASA sloužící pro výzkum a inventarizaci přírodních zdrojů v globálním a (sub)kontinentálním měřítku, a jeho regionální verze EPIC-IIASA CZ, kalibrovaná a validovaná pro regionální podmínky České republiky. Nástroj je založen na kombinaci procesního plodinového modelu systému půda-rostlina-atmosféra a geoprostorových dat, která popisují podmínky klimatu, stanoviště a charakter využívání zemědělské krajiny v rámci České republiky.

Po správném sestavení, regionální kalibraci uvažovaných procesů a validaci výstupů, je vytvořený regionální plodinový model schopen generovat prostorově lokalizovaná a v čase dynamická data o reakci plodin a půdy na uvažované způsoby hospodaření, a to v podmínkách minulé, současné nebo i budoucí (předpokládané) klímy.

Díky využití procesního plodinového modelu (EPIC), který je jádrem regionálního modelu, je možné přímé napojení na výsledky dlouhodobých polních pokusů. Tím se poznatky o dopadu pozorovaných agrotechnických opatření na indikátory zdraví půdy z konkrétního stanoviště přenášejí na širší území. To přináší možnosti pro využití regionálního plodinového modelu jako spolehlivého nástroje pro podporu rozhodování v oblasti tvorby, zavádění a monitorování environmentálních politik v sektoru zemědělství.

Nástroj EPIC-IIASA CZ jsme využili pro modelování dynamiky obsahu uhlíku v půdách ČR. Kvantitativní predikce sekvestrace C v různých systémech hospodaření a scénářích vývoje klimatu poukazují na klíčový význam zapravení posklizňových zbytků do půdy, bez něhož nelze očekávat významnější navýšení (a v mnoha případech ani udržení) obsahu půdní organické hmoty.

Výstupy simulací jsou k dispozici také na stránce [www.carc.cz/agrosimulace](http://www.carc.cz/agrosimulace).

*Príspevek byl zpracován v rámci projektu QK23020056: Vytvoření a ověření modelových systémů dlouhodobé sekvestrace uhlíku v ČR. Autoři příspěvku děkují Dr. Wiktoru Želaznému za programátorské práce při implementaci simulační infrastruktury EPIC-IIASA CZ.*

## Literatura

- [1] J. Le Noë, *et al.*, *Commun. Earth Environ.* 2023, 4, 158
- [2] J. Balkovič, *et al.*, *Agric. Syst.* 2013, 120, 61.
- [3] J. Balkovič, *et al.*, *Glob. Planet. Change* 2014, 122, 107.
- [4] R. C. Izaurralde, *et al.*, in *Managing Agricultural Greenhouse Gases* (EDs.: M.A. Liebig, *et al.*), Elsevier, Amsterdam, 2012, pp. 536.
- [5] J.R. Williams, *et al.*, *Trans. ASAE* 1989, 32, 497.
- [6] J. Balkovič, *et al.*, *J. Environ. Manag.* 2020, 274, 111206.
- [7] T.W. Carr, *et al.*, *Biogeosciences* 2020, 17, 5263.
- [8] J. Jagermeyr, *et al.*, *Nat. Food* 2021, 2, 873.
- [9] C. Folberth, *et al.*, *Nat. Sustain.* 2020, 3, 281.
- [10] P. Smith, *Eur. J. Agronomy* 2004, 20, 229.
- [11] H.H. Janzen, *Soil Biol. Bioch.* 2006, 38, 419.
- [12] T. Lehtinen, *et al.*, *Soil Use Manag.* 2014, 30, 524.
- [13] D.S. Powlson, *et al.*, *Eur. J. Soil Sci.* 2011, 62, 42, .
- [14] Y. Kuzyakov, *Soil Biol. Biochem.* 2010, 42, 1363.
- [15] B.-J. Lin, *et al.*, *Resour. Conserv. Recycl.* 2024, 209, 107743.