



POTENCIÁL SEKVESTRAČE UHLÍKU V ORNÝCH PŮDÁCH ČR

MODELOVÉ SYSTÉMY, PŘÍLEŽITOSTI,
PŘEKÁŽKY A EKONOMICKÉ ASPEKTY

RNDr. Mikuláš Madaras, Ph.D., Mgr. Markéta Mayerová, Ph.D.,
Ing. Tomáš Šimon, CSc., Ing. Martin Dědina, Ph.D., Ing. Ladislav Menšík, Ph.D.,
Ing. Jan Klír, CSc., Ing. Jana Wollnerová, Ph.D., Mgr. Milan Horňák

Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.

prof. Ing. Jiří Balík, CSc., dr.h.c., prof. Ing. Lukáš Čechura, Ph.D.,
doc. Ing. Jana Poláková, Ph.D.

Česká zemědělská univerzita v Praze

Mgr. Rastislav Skalský, Ph.D., RNDr. Juraj Balkovič, Ph.D.

International Institute for Applied Systems Analysis

Mgr. Petr Štěpánek, Ph.D., prof. Ing. Mgr. Miroslav Trnka, Ph.D.

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

Ing. Jan Trávníček, Ing. Adam Brezáni

Czech Organics, s. r. o.

Název metodiky: **POTENCIÁL SEKVESTRACE UHLÍKU V ORNÝCH PŮDÁCH ČR**
– **MODELOVÉ SYSTÉMY, PŘÍLEŽITOSTI, PŘEKÁŽKY A EKONOMICKÉ ASPEKTY.**

Autoři: **Mikuláš Madaras¹, Markéta Mayerová¹, Tomáš Šimon¹, Martin Dědina¹, Milan Horňák¹, Ladislav Menšík¹, Jan Klír¹, Jana Wollnerová¹, Jiří Balík², Jana Poláková², Lukáš Čechura², Rastislav Skalský³, Juraj Balkovič³, Petr Štěpánek⁴, Miroslav Trnka⁴, Jan Trávníček⁵, Adam Brezání⁵**

¹ Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.,
Drnovská 507/73, 161 00 Praha 6 – Ruzyně, Česká republika

² Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 165 00 Praha – Suchdol,
Česká republika

³ International Institute for Applied Systems Analysis, Schloßpl. 1, 2361
Laxenburg, Rakousko

⁴ Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Bělidla 986/4a, 603 00 Brno,
Česká republika

⁵ Czech Organics, s.r.o., Lipová 39, 788 32 Staré Město pod Sněžníkem, Česká
republika

Dedikace: **Metodika vznikla jako výsledek řešení projektu MZe QK23020056**

Oponentní posudky vypracovali: **doc. RNDr. Štefan Koco, PhD.**, Národné poľnohospodárske
a potravinárske centrum, Slovenská republika

Ing. Václav Kadlec, PhD., Ministerstvo zemědělství ČR

Publikaci bylo dne 27. 5. 2026 uděleno **Osvědčení č. MZE-43220/2026-13124** o uznání
v souladu s podmínkami Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje.

Vydal: **Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 2026**

Tisk: **Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i.**

ISBN: 978-80-7427-467-1

Souhrn:

Metodika v úvodní části popisuje současný stav a perspektivy zavádění uhlíkového zemědělství v České republice v kontextu vyvíjející se evropské legislativy, jako je nařízení CRCF a směrnice CSRD. Jsou srovnávány přístupy k podpoře sekvestrace uhlíku v různých zemích EU. V další části je popsán simulační přístup k hodnocení sekvestračního potenciálu orných půd ČR. Jsou definovány modelové systémy navržené pro hodnocení sekvestračního potenciálu opatření uhlíkového zemědělství. Analýza porovnává čtyři modelové systémy hospodaření, které se liší intenzitou a přítomností živočišné výroby – od intenzivních komerčních systémů po regenerativní postupy. Pro modelové systémy jsou prezentovány trendy změn organického uhlíku v půdě pro období let 2000–2100 s využitím klimatických scénářů SSP2-4.5 a SSP5-8.5. Výsledky srovnávají a interpretují změny zásob uhlíku (t C/ha) v horizontu 40 a 80 let. Ve vazbě na výsledky je prezentována kalkulace stínových cen sekvestrace při variantách managementu posklizňových zbytků a biomasy píce v jednotlivých systémech. Metodika dále uvádí možnosti modelování sekvestrace pomocí modelu EPIC na regionální a faremní úrovni.

Klíčová slova:

sekvestrace uhlíku, orná půda, půdní organická hmota, model EPIC, změna klimatu, uhlíkové zemědělství, simulační modelování

Summary:

The introductory section describes the current state and perspectives of implementing carbon farming in the Czech Republic within the context of evolving European legislation, such as the CRCF Regulation and the CSRD Directive. Approaches to supporting carbon sequestration in various EU countries are compared. The subsequent section details a simulation-based approach to assessing the sequestration potential of arable soils in the Czech Republic. Model systems designed to evaluate the sequestration potential of carbon farming measures are defined. The analysis compares four model farming systems that differ in intensity and the presence of livestock production—ranging from intensive commercial systems to regenerative practices. For these model systems, trends in SOC changes are presented for the period 2000–2100, utilizing climate scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The results compare and interpret changes in carbon stocks (t C/ha) over 40 and 80-year horizons. In connection with these findings, a calculation of shadow prices for sequestration is presented under various management scenarios for crop residues and forage biomass within the respective systems. An approach to C sequestration modelling by model EPIC on regional and farm level is presented.

Keywords:

carbon sequestration, arable soil, soil organic carbon, EPIC model, climate change, carbon farming, simulation modelling

Obsah

Rámec metodiky

1. Cíl metodiky	1
2. Úvod.....	2
3. Zavádění uhlíkového zemědělství v ČR	3
Uhlíkové zemědělství	3
Situace ve vybraných zemích EU	4
Situace v ČR	7
Implementace a zkušenosti zemědělců	9
Ekonomická dynamika a trh s uhlíkovými kredity.....	11
Výzkumná podpora	12
Perspektivy.....	13

Vlastní popis metodiky

4. Výpočet potenciálu sekvestrace C v modelových systémech	15
Metodika.....	15
Výsledky	24
Výnosy plodin – aktuální a budoucí klima.....	24
Sekvestrace SOC v ornici v aktuálním klimatu.....	28
Sekvestrace SOC v ornici za budoucího klimatu.....	33
Dílní závěry	42
5. Ekonomické aspekty sekvestrace C v modelových systémech.....	43
Metodika.....	43
Výsledky	45
Dílní závěry	48
6. Predikce sekvestrace C se zohledněním skutečné plodiny skladby	49
Metodika.....	49
Výsledky	51
Dílní závěry	54
7. Predikce sekvestrace C na faremní úrovni	55
Metodika.....	55
Výsledky	56
Dílní závěry	59
8. Ekonomické aspekty metodiky	60
9. Srovnání novosti postupů.....	60
10. Popis uplatnění metodiky.....	60
11. Seznam použité související literatury	61
12. Seznam odborných podkladů, které předcházeli vypracování výsledku	61

1. Cíl metodiky

Hlavním cílem metodiky je navrhnout způsob stanovení potenciálu sekvestrace uhlíku (C) v orných půdách ČR pomocí simulačního přístupu.

Dílní cíle metodiky jsou:

- Přinést aktuální informace a perspektivy zavádění uhlíkového zemědělství v ČR.
- V regionálním měřítku vyhodnotit potenciál sekvestrace C pomocí simulací čtyř modelových systémů hospodaření.
- Pro modelové systémy vyhodnotit jejich ekonomické aspekty.
- Demonstrovat využití navrženého přístupu pro studie na úrovni regionů a zemědělských podniků.

Za účelem dosažení cílů byla vytvořena a testována simulační platforma EPIC-IIASA CZ, využívající biofyzikální simulační model EPIC, propojený s regionálními podklady o topografii, půdách a klimatu.

2. Úvod

Uhlíkové zemědělství v ČR je dynamicky se rozvíjející oblastí, jejíž rozvoj byl doposud primárně řízen inovacemi a investicemi ze soukromého sektoru. Dominantní roli doposud hrály technologické startupy a agro-technologické platformy, které se snaží o vytvoření obchodně životaschopných finančních modelů financování opatření uhlíkového zemědělství.

Přicházející evropská a národní legislativa oblast uhlíkového zemědělství zásadně transformuje a pro všechny aktéry – stát, soukromý sektor obchodující s uhlíkovými kredity, zemědělce, odbornou i laickou veřejnost – je důležité, aby systém uhlíkového zemědělství byl transparentní a efekty projektů sekvestrace uhlíku předvídatelné. Z tohoto důvodu byl Národní agenturou pro zemědělský výzkum v r. 2022 podpořen projekt Vytvoření a ověření modelových systémů dlouhodobé sekvestrace uhlíku v ČR (QK23020056), jehož výsledky mají odpovědět na důležité otázky, týkající se sekvestrační kapacity půd ČR při různých typech hospodaření.

Lze formulovat několik motivací zemědělců pro přechod na uhlíkové zemědělství. Na jedné straně stojí environmentální přínosy, jako je zlepšení zdraví půdy, zvýšená biodiverzita a lepší odolnost vůči klimatickým extrémům. Aplikace některých postupů může rovněž přinést finanční výhody plynoucí ze snížení nákladů na vstupy a pohonné hmoty. Příjem z prodeje uhlíkových kreditů pak může pomoci pokrýt počáteční investiční náklady, případně kompenzovat dočasné poklesy výnosů.

Přes pokrok v zavádění uhlíkového zemědělství je jednou z největších překážek absence legislativního ukotvení a trhu pro produkty vypěstované v šetrných systémech hospodaření, což brání farmářům plně kapitalizovat své úsilí. Další bariérou je nedostatek poradenství, vzdělání a neochota ke změnám, zejména u starší generace zemědělců.

Budoucí rozvoj bude záviset na efektivním propojení regionálních technologických řešení a na vytvoření robustního regulačního prostředí, které by definovalo rámec uhlíkového zemědělství a podpořilo jak producenty, tak spotřebitele.

Věříme, že k úspěšnému nastartování uhlíkového zemědělství přispěje i tato metodika.

3. Zavádění uhlíkového zemědělství v ČR

Uhlíkové zemědělství

Koncept uhlíkového zemědělství, známý také jako Carbon Farming, je založen na postupech, které aktivně odstraňují uhlík z atmosféry a ukládají ho do půdy prostřednictvím zvýšení obsahu půdní organické hmoty. Tyto metody přispívají nejen ke snižování koncentrace skleníkových plynů v atmosféře, ale zároveň zlepšují zdraví a úrodnost půdy („Soil Health“), což z ní činí odolnější a produktivnější agro-ekosystém. V ČR je uhlíkové zemědělství často zaměnitelně vnímáno s regenerativním zemědělstvím, které je širším pojmem a zahrnuje holistický přístup k obhospodařování půdy a krajiny.

Offsetový přístup k uhlíkovým kreditům v rámci uhlíkového zemědělství přináší vedle potenciálních přínosů také významné metodické a koncepční výzvy. Jednou z hlavních otázek zůstává spolehlivost environmentální integrity kreditů, zejména pokud jde o prokazování adicionality a dlouhodobosti ukládání uhlíku v půdě. Půdní uhlík je dynamická složka ekosystému a jeho stabilita je ovlivněna řadou faktorů, včetně klimatických extrémů, změn hospodaření či ekonomických tlaků na farmy, což komplikuje dlouhodobé závazky spojené s offsety. Další výzvou je nejistota spojená s měřením, vykazováním a verifikací, kde rozdílné metodické přístupy mohou vést k nejednoznačným výsledkům a omezené srovnatelnosti mezi projekty. Z pohledu klimatické politiky je rovněž diskutováno riziko, že offsetové mechanismy mohou být využívány především jako doplněk ke kompenzaci emisí v jiných sektorech, aniž by dostatečně podporovaly jejich přímé snižování. V tomto smyslu je důležité, aby uhlíkové zemědělství nebylo vnímáno pouze jako nástroj produkce uhlíkových kreditů, ale jako součást širší transformace zemědělských systémů se zaměřením na odolnost půdy, kvalitu ekosystémových služeb a dlouhodobou udržitelnost venkovských oblastí.

Paralelně s rozvojem dobrovolných uhlíkových programů existuje v ČR již zavedený rámec ekologického zemědělství (EZ), který poskytuje jasně definovaný standard, kontrolu a certifikaci, a tím i ověřitelnou auditní stopu, poradenské kapacity a tržní rozpoznatelnost. Pro vyjasnění pojmů je proto vhodné vedle regenerativního zemědělství odlišit také EZ: zatímco regenerativní přístup je často definován spíše souborem principů a praktik, EZ představuje dlouhodobě ukotvený systém governance (standards, kontroly, poradenství, značení produktu), který může snížit transakční náklady a zvýšit důvěryhodnost uhlíkového zemědělství zejména u spotřebitelů a ve veřejných politikách. Z hlediska uhlíkového zemědělství je EZ zároveň důležitým referenčním bodem, protože řada postupů podporujících půdní uhlík (diverzifikace osevních postupů, práce s organickou hmotou, šetrné hospodaření s půdou a krajinou) je v EZ systémově ukotvena. Budoucí národní rámec CF by proto měl být navržen tak, aby EZ farmy nebyly znevýhodněny tím, že adicionalita bude posuzována bez zohlednění jejich dlouhodobé praxe a přínosů.

Mezi hlavní agrotechnická opatření spadající pod uhlíkové zemědělství patří minimalizace nebo úplné vynechání zpracování půdy, pěstování meziplodin včetně krycích plodin, efektivní management rostlinných zbytků a uplatňování regenerativního pastevního chovu. Tyto postupy

vedou k vyšší retenci vody v krajině, snížení eroze a zvýšení biodiverzity. Součástí ekonomického modelu uhlíkového zemědělství je pak směna uhlíku sekvestrovaného v půdě na obchodovatelné uhlíkové kredity. Tyto kredity mohou zemědělci následně prodat korporacím a dalším subjektům, které usilují o snížení své uhlíkové stopy.

Zavádění uhlíkového zemědělství představuje jeden z nejvýznamnějších posunů v evropské zemědělské politice. S přijetím Nařízení (EU) 2024/3012 o certifikačním rámci pro pohlcování uhlíku (CRCF) přechází tato oblast z fáze dobrovolných a izolovaných aktivit do fáze standardizovaného trhu. Do národního rámce bude kromě povinných prvků možné integrovat osvědčené prvky ze zemí s podobnými podmínkami.

Osm členských států EU (Německo, Polsko, Dánsko, Španělsko, Chorvatsko, Litva, Nizozemsko a Kypr) ve svých strategických plánech SZP vyčlenilo prostředky na intervence přímo související s uhlíkovým zemědělstvím prostřednictvím ekoschémat nebo agro-environmentálních a klimatických opatření. Většina ostatních členských států sice podporuje jednotlivé postupy související se zvyšováním zásob organického uhlíku v půdě nebo snižováním emisí, ale výše uvedené země mají pro tyto aktivity specificky vyčleněné fondy přímo v rámci uvedených schémat.

V současné době je uhlíkové zemědělství v České republice primárně řízeno soukromými iniciativami, jelikož mu chybí pevné legislativní ukotvení. Na rozdíl od ekologického zemědělství, které je podpořeno státní certifikací a dotacemi, regenerativní postupy a uhlíkové zemědělství zatím nepožívají přímé státní podpory ani legislativního uznání. Tato absence je dočasná. Přechodnými aktivitami financovanými Evropskou unií je např. projekt „Síť poradenství pro udržitelné zemědělství s nižší uhlíkovou stopou na území ČR“, který je financován v rámci Národního plánu obnovy a realizuje jej organizace Člověk v tísni ve spolupráci s partnerskými organizacemi. Tento projekt se zaměřuje na analýzu a podporu poradenství v oblasti udržitelného zemědělství.

Situace ve vybraných zemích EU

Německo

Německo využívá nejpropracovanější systém kombinace národních a evropských veřejných zdrojů, které směřují k ochraně klimatu skrze zemědělství. Na rozdíl od ČR, kde jsou postupy CF často rozptýleny v obecných titulech, Německo zavedlo cílené platby za konkrétní aktivity CF, jako je podpora agrolesnictví na orné půdě a trvalých travních porostech nebo pěstování mezplodin s vysokým potenciálem zachytu uhlíku. Tyto platby jsou nastaveny tak, aby motivovaly k postupům nad rámec povinné podmíněnosti. Dalším prvkem je akční program přirozené ochrany klimatu (ANK) - významný národní dotační mechanismus pod gescí Spolkového ministerstva ŽP a Ministerstva zemědělství. Program se zaměřuje na oblasti, které SZP pokrývá jen omezeně. Klíčovou prioritou je zde revitalizace rašelinišť a organických půd. Německý model využívá Federální výzkumný ústav pro venkovské oblasti, lesnictví a rybolov

(Thünen-Institut) jako vědeckého garanta, který vyvíjí metodiky pro hybridní MRV (kombinace modelování a měření). Tento veřejný dohled zajišťuje, že aktivity financované z dotací jsou v souladu s národní inventurou skleníkových plynů a minimalizují riziko greenwashingu.

Polsko

Polsko zvolilo cestu nejširší možné integrace CF do I. pilíře Společné zemědělské politiky (SZP). Jejich strategický plán vyčlenil na ekoschéma uhlíkového zemědělství mimořádně vysokou částku. Mechanismem CF je bodový systém, kde jsou propláceny konkrétní agrotechnické postupy (např. bezorební hospodaření, zapravení hnoje). Hlavním přínosem tohoto systému bylo rychlé zapojení statisíců farmářů díky přímé finanční motivaci skrze dotační kanály. Negativem je, že model je zaměřen na dotaci činností namísto měřitelných výsledků, což může oslabit skutečný efekt uložení C. Navíc je zde riziko nízké adicionality, kdy jsou dotovány postupy, které by farmáři prováděli i bez finanční stimulace.

Rakousko

I přesto, že Rakousko nemá zavedené přímé dotace na CF, jeho systém efektivně kombinuje veřejné dotace s fungujícím dobrovolným trhem a směřuje k cíli dosáhnout klimatické neutrality již do roku 2040. Základním pilířem rakouského přístupu je model „Ökoregion Kaindorf“, který slouží jako celosvětově uznávaný vzor pro výsledkově orientované programy. Farmáři dostávají finanční odměnu až na základě skutečně prokazaného nárůstu humusu v půdě, což je ověřováno v laboratorních cyklech trvajících tři až pět let. Tento dobrovolný trh úspěšně propojuje lokální zemědělce s regionálními firmami a bankami, které nákupem certifikátů kompenzují svou emisní stopu v místě svého působení.

Vedle soukromých iniciativ hraje důležitou roli masivní státní podpora realizovaná skrze národní agro-environmentální program ÖPUL, do něhož je zapojeno přes 80 % všech rakouských farem. Tento veřejný mechanismus proplácí zemědělcům konkrétní postupy šetrné ke klimatu, jako je udržování trvalých travních porostů, pěstování meziplodin nebo omezování půdní eroze.

Systém je podpořen silným institucionálním zázemím a výzkumem, který se zaměřuje nejen na ornou půdu, ale i na ochranu mokřadů a rašelinišť. Synergie mezi státními dotacemi za provedené akce a soukromými platbami za měřitelné výsledky poskytuje rakouským farmářům finanční stabilitu i motivaci k maximalizaci environmentálních přínosů jejich hospodaření.

Estonsko

Estonsko patří k evropským lídrům v digitálních inovacích uhlíkového zemědělství, zejména díky globálnímu úspěchu estonské platformy eAgronom. Strategický plán SZP vyčleňuje 456 milionů EUR na environmentální cíle, přičemž pohlcování uhlíku je prioritou pro více než 70 % zemědělské plochy. Model vyniká silným propojením soukromého sektoru s mezinárodními certifikačními registry (např. Verra), což umožňuje tvořit kredity s vysokou tržní hodnotou a transparentností.

Slovensko

Slovensko podporuje CF nepřímo skrze standardní AEKO a celofaremní ekoschémat. Roli vědeckého garanta zde plní *Národné poľnohospodárske a potravinárske centrum*. V rámci iniciativy REPOWER vytváří mapu produkčního potenciálu pro sekvestraci C, v projektu Carbon Farming CE se podílí na vývoji regionálních standardů pro klimaticky šetrné potraviny.

V nedávném období byla zásadní státní iniciativou „Uhlíková a vodná banka“, která měla sloužit jako národní certifikační systém. Iniciativa vedla k návrhu zákona *“o Klimatickom fonde pre pôdu”*, předloženém k připomínkovému řízení již v r. 2022. Klimatický fond měl být financovaný primárně z výnosů z dražeb emisních povolenek a umožnil by poskytovat platby nad rámec zdrojů SZP.

Důležitým prvkem systému mělo být vyplácení kreditů nejenom za sekvestraci, ale i za zvyšování retenční kapacity půd. Uhlíkový pilíř by motivoval ke zvyšování obsahu POH pomocí kreditů; hodnota zvýšení o 1 t C/ha se odvíjí od ceny CO₂ (v době prezentace konceptu naceněno na 280 €). Vodní pilíř se zaměřuje na zvyšování vodozadržné kapacity krajiny s odměnou 4–6 € za m³ na ha zemědělské a lesní půdy a řádově vyšší platbou na zastavěném území. Jádrem celého rámce se měla stát znalostní báze NEXUS, která analyzuje vazby mezi vodou, půdou, vegetací a klimatem. Banka by umožnila vlastníkům zakládat účty a získávat „Certifikáty shody“ na základě indexu klimatického dopadu kvality půdy.

Tento integrovaný přístup propojuje ochranu půdy s efektivním managementem srážkových vod a obnovou biodiverzity. Po změnách ve vedení ministerstva iniciativa prozatím stagnuje.

Od roku 2026 začíná desetiletý projekt LIFE NatAdapt zaměřený na propagaci adaptačních opatření v krajině a dlouhodobé sledování vlivu regenerativního hospodaření na zdraví půdy a emise. Nejvýraznějším příkladem komerční spolupráce je kooperace f. Carboneg s podnikem PD Krakovany. Dle sdělení slovenských kolegů širšímu zapojení praxe brání absence specifické národní dotační podpory pro CF a skutečnost, že pro dosažení ekonomické rentability z kreditů je nutné zavádět komplexní regenerativní systémy namísto izolovaných agrotechnických opatření. Nedostatek praktických zkušeností a robustního poradenského systému tak i přes existenci menších osvětových iniciativ (např. Bioprutex, Živá zahrada či Platforma pre pôdu) zůstává hlavní bariérou rozvoje.

Maďarsko

Maďarský model AÖP (Agro-ekologický program) v rámci dotovaných činností podporuje postupy vedoucí k akumulaci uhlíku v půdě. Podobně jako v Polsku, farmáři musí získat body pro každý typ využívané půdy (orná půda, trvalé travní porosty, plantáže/trvalé kultury) za definované postupy, kterými jsou kromě standardních CF opatření např. aplikace bakteriálních přípravků a přípravků na zlepšení půdní struktury na orné půdě nebo technologie precizního zemědělství (precizní hnojení nebo aplikaci postřiků pomocí digitálně řízené techniky).

Situace v ČR

V popředí vývoje uhlíkového zemědělství v ČR prozatím stojí globální technologické společnosti, které do sektoru přinášejí škálovatelné a inovativní obchodní modely, jako např. v českém prostředí působící Agreeena a eAgronom. Vedle těchto „carbon program“ platform se v ČR rozvíjejí také místní iniciativy a podpůrná infrastruktura: jednak platformy typu Carboneg, které propojují zemědělce s firmami skrze uhlíkové kredity a podporu regenerativních postupů, jednak komunitně a vzdělávací aktivity (peer-to-peer sdílení), a nově i platforma pro regenerativní zemědělství sdružující zemědělce zavádějící regenerativní postupy (REGEZEM), vytvořená Spolkem pro regenerativní zemědělství ve spolupráci s Nadací Partnerství.

Soukromé iniciativy

Agreeena

Agreeena je dánská agrotechnologická společnost, která se etablovala jako lídr v oblasti uhlíkového zemědělství v Evropě. Její program AgreeenaCarbon, který se již rozšířil na dva miliony hektarů v 17 zemích včetně České republiky, je postaven na finanční podpoře zemědělců, kteří přecházejí na regenerativní postupy. Společnost funguje jako zprostředkovatel mezi zemědělci a korporacemi, které mají zájem nakupovat vysoce kvalitní uhlíkové kredity k dosažení svých dekarbonizačních cílů.

Klíčovou konkurenční výhodou Agreeeny je její pokročilá technologie pro měření, vykazování a ověřování (MRV). Tradiční ověřovací procesy, založené na manuálních auditech, jsou pro rozsáhlou adopci uhlíkového zemědělství neefektivní, pomalé a finančně náročné. Agreeena řeší tento problém pomocí digitálního přístupu, který využívá umělou inteligenci, satelitní data a dálkové snímání. Tato technologie umožňuje přesné monitorování postupů a výsledků přímo na úrovni pole, což zajišťuje integritu a transparentnost uhlíkových kreditů s bezprecedentní přesností. Díky tomu se Agreeeně podařilo transformovat proces z drahé a komplexní činnosti na škálovatelný a obchodně životaschopný model, který výrazně snižuje administrativní zátěž pro farmáře a zároveň posiluje důvěru v celý systém.

Po vstupu do ČR začátkem roku 2023 není jasné, zda bude f. Agreeena v aktivitách dále pokračovat.

eAgronom

Estonský agtech startup eAgronom aktivně expanduje do České republiky. Jeho řešení je postaveno na komplexní platformě, která kombinuje software pro řízení farmy s uhlíkovými programy. Cílem eAgronomu je asistovat zemědělcům při přechodu na regenerativní zemědělství, pomáhat jim optimalizovat výnosy a zároveň snižovat náklady na vstupy.

Jedním z nejvýraznějších prvků obchodního modelu eAgronomu je strategické partnerství s finančními institucemi, jako je například Swedbank. Tato spolupráce umožňuje zemědělcům přístup k výhodnému financování a úvěrům, což přímo řeší jednu z hlavních bariér pro masovou adopci regenerativních postupů – vysoké počáteční investiční náklady a obavy z návratnosti

investic (ROI), jak na to poukazuje průzkum společnosti Agreeena. Integrací uhlíkových programů s finančními službami vytváří eAgronom ucelený ekosystém, který je pro zemědělce atraktivní z ekon. hlediska, a pro investory z hlediska minimalizace rizika a dosahování cílů udržitelnosti.

Carboneg

Carboneg je česká iniciativa, založená v roce 2021, která se zaměřuje na propojení zemědělců s firmami směřujícími k uhlíkové neutralitě. Carboneg poskytuje zemědělcům vzdělávání, měří sekvestrovaný uhlík a generuje uhlíkové kredity, jejichž prodejem zajistí farmářům finanční odměnu. Iniciativa deklaruje, že její model je založen na budování přímé důvěry a osobním kontaktu, což je obzvláště důležité v sektoru, kde existuje generační propast a nedostatek vzdělávání typu peer-to-peer. Projekt Carboneg se snaží řešit tuto bariéru nejen přímou podporou a poradenstvím, ale i prostřednictvím podcastu "Půdcast", kde vystupují zemědělci a sdílejí své praktické zkušenosti s širší veřejností. Takový místní přístup je nezbytný pro překonání nedůvěry a pro postupné šíření znalostí a osvědčených postupů v rámci lokálních komunit.

Zasad' život (platforma Dream Green)

Dalším významným lokálním hráčem je startup Zasad' život s platformou Dream Green, který je inkubován v ESA BIC Czech Republic. Přestože se primárně specializuje na tradiční uhlíkové kompenzace a zalesňování, jeho platforma je zaměřena na monitorování a ověřování sekvestrace uhlíku s využitím satelitních technologií a pokročilých algoritmů. Platforma Dream Green se zaměřuje na malé projekty, které jsou často vyloučeny z globálního trhu s uhlíkovými kredity kvůli vysokým finančním a administrativním nákladům. Platforma je cíleně navržena tak, aby snížila vstupní náklady a učinila uhlíkové zemědělství dostupnějším pro místní vlastníky půdy, nevládní organizace a komunitní iniciativy. Díky svému zaměření na střední a východní Evropu platforma zajišťuje, že místní ekosystémy a aktéři jsou plně integrováni do globálního trhu s kompenzacemi. Tento přístup podporuje diverzitu a distribuci uhlíkového zemědělství a ukazuje, že technologie může sloužit nejen ke škálování velkých projektů, ale také k demokratizaci trhu pro menší hráče.

Podpora státu

V rámci aktuálního stavu, kdy je uhlíkové zemědělství prozatím poháněno zejména soukromými iniciativami, představuje důležitý prvek státní podpory základní celofaremní ekoplatba. Ta funguje od roku 2023 jako doplněk k povinnému standardu DZES 3 „Zachování organické hmoty v orné půdě“ (dle nařízení vlády č. 83/2023 Sb.) a podmiňuje výplatu udržitelným hospodařením s organickou hmotou. Do schématu se v ČR zapojili téměř všichni žadatelé o dotace s ornou půdou, přičemž subjekty nad 30 ha (cca 7 tisíc žadatelů) musí plnění dokládat výpočtem pomocí Modelu OH. Sazba ekoplatby ve výši 1,6–1,7 tis. Kč na hektar tak vedle příjmů z prodeje uhlíkových kreditů tvoří finanční základ pro implementaci postupů, které zvyšují kvalitu půdy a odolnost agro-ekosystému.

Implementace a zkušenosti zemědělců

Praktická implementace uhlíkového zemědělství v ČR se neomezuje pouze na teoretické modely startupů, ale je aktivně prováděna na široké škále farem s rozmanitými výsledky a zkušenostmi.

Uhlíkové zemědělství a regenerativní zemědělství jsou úzce provázané koncepty, které jsou v praxi (bohužel) často používány jako synonyma. Z pohledu vědecké literatury a politických dokumentů je však mezi nimi jasný rozdíl. Regenerativní zemědělství postrádá jasnou definici (minimálně ze strany státu) a představuje širší, holistický přístup, jehož cílem je komplexní obnova půdního zdraví, biodiverzity, vodních cyklů a odolnosti ekosystémů. Uhlíkové zemědělství je pak konkrétní, výsledkově orientovaný model, který se zaměřuje na zvyšování množství uhlíku uloženého v půdě za účelem mitigace klimatických změn a získání finanční odměny, například prostřednictvím uhlíkových kreditů.

Filozofie regenerativního zemědělství jako základ úspěšného zavedení postupů předpokládá určitou změnu myšlení a přístupu k hospodaření, kde je příroda vnímána jako spojenec, nikoli jako nepřítel. Pro úspěšný přechod je klíčové aktivně se vzdělávat, učit se z vlastních chyb a nebát se neúspěchu. Sdílení praktických zkušeností a návštěvy fungujících farem, ať už v Česku, nebo v zahraničí, hrají zásadní roli při překonávání počátečních obav a nedostatku peer-to-peer vzdělávání.

Všechny tři rámce – ekologické, regenerativní, konvenční – mohou přispívat k sekvestraci C v půdě a být tedy součástí uhlíkového zemědělství. Provozování postupů v obou systémech má mnoho motivací (ekonomických, praktických), přičemž navyšování obsahu půdní organické hmoty může být pouze jejich sekundárním efektem. Tento však může být v rámci uhlíkového zemědělství ekonomicky zhodnocen.

Regenerativní postupy

Praktické zkušenosti ze zahraničí naznačují, že přechod na regenerativní zemědělství může přinést řadu výhod, které kompenzují počáteční investice a nejistoty. Jedním z hlavních přínosů jsou snížené provozní náklady. Farmáři, kteří přešli na regenerativní postupy, deklarují úspory na vstupech, jako jsou minerální hnojiva, pesticidy a pohonné hmoty, což vede ke stabilnějším ziskům. Například některé studie uvádějí snížení nákladů na pohonné hmoty až o 50 % a celkový nárůst ziskovosti o 20–40 %. Podle průzkumu mezi průkopníky regenerativního zemědělství v Evropě dosáhli farmáři srovnatelných výnosů, ale se snížením spotřeby minerálních hnojiv o 62 % a pesticidů o 76 %.

Regenerativní metody zvyšují odolnost půdy vůči suchu a erozi, což minimalizuje riziko ztrát v důsledku extrémních klimatických jevů. To přímo souvisí s lepším hospodařením s vodou, protože půda s vyšším obsahem organické hmoty dokáže absorbovat a zadržet více srážek. Kromě toho lze v rámci regenerativního zemědělství využít pastevní chov zvířat, což v některých případech umožňuje zvýšit počet zvířat na dané ploše a považuje se to za ekonomičtější přístup než použití strojů. I přes tyto interní úspory však někteří farmáři poukazují na to, že pro jejich produkci chybí trh, což znamená, že zisky jsou primárně generovány efektivitou, nikoli prémiovou cenou za produkty pěstované regenerativně.

Struktura členů Spolku pro regenerativní zemědělství (regenerative.cz) odhaluje značnou diverzitu uhlíkového a regenerativního zemědělství v ČR. Spolek má aktuálně 62 členů s regenerativními přístupy a deklaruje, že tímto přístupem obhospodařuje více než 10 tis. ha půdy. Členství není omezeno na jeden typ hospodaření, ale je široce rozšířené jak z geografického, tak z ekonomického hlediska.

Praktikující farmy se výrazně liší velikostí hospodařené plochy, která sahá od malých hospodářství o rozloze 1 hektaru až po větší akciové společnosti hospodařící na více než 832 hektarech. Prozatím nejsou příliš zapojeny velké zemědělské podniky. Je patrné, že uhlíkové zemědělství není výhradní doménou velkých firem a lze jej implementovat na rodinných farmách s chovem zvířat, stejně jako na velkých podnicích s rostlinnou výrobou. Geografické rozmístění farem – Orlické hory, jižní Morava, Podkrkonoší, Vysočina apod. dokládá, že regenerativní metody jsou přizpůsobitelné různým klimatickým a půdním podmínkám.

Tradiční postupy

Principy a technologie uhlíkového zemědělství mohou přinášet významné ekonomické a ekologické přínosy i pro tradičně hospodařící zemědělce, kteří se snaží zmírnit dopady klimatických změn a zároveň zlepšit finanční stabilitu svých podniků.

Je podstatné vnímat argumenty některých konvenčně hospodařících subjektů a sdružení, že i intenzivní zemědělství může přispívat ke snížení uhlíkové stopy. Dle představitelů Zemědělského svazu ČR může být uhlíkové zemědělství pro zemědělce novým zdrojem příjmů skrze uhlíkové kredity. ZS však varuje před vysokou byrokracií a připomíná potřebu jasných metodik certifikace. I velké zahraniční svazy (např. v Německu) kritizují byrokracii a nedostatek flexibility v rámci současných unijních politik, ale zároveň poukazují na to, že efektivní, moderní zemědělské postupy mohou vést k pozitivním klimatickým výsledkům, což je důležité pro udržení konkurenceschopnosti v globalizovaném tržním prostředí.

Představitelé Asociace soukromých zemědělců a zástupci ekologického zemědělství vnímají uhlíkové zemědělství jako přirozenou součást tradičního hospodaření. Pro rodinné farmy jsou tyto postupy základem péče o úrodnost a zadržování vody. Vzhledem k aktuálním trendům rovněž varují před vlnou byrokracie a rizikem, že se z uhlíkových kreditů stane pouhý „korporátní byznys s odpustky“, přičemž odmítají model, kde by si znečišťovatelé kupovali certifikáty bez reálné změny chování.

Ekologické zemědělství

Ekologické zemědělství představuje v ČR již zavedený, kontrolovaný systém hospodaření, který přináší řadu systémových spolu-přínosů relevantních pro uhlíkové zemědělství. V praxi EZ typicky posiluje půdní úrodnost a biologickou aktivitu (vyšší důraz na organickou hmotu, pestřejší osevní postupy, šetrnější práce s půdou) a podporuje diverzitu plodin i krajinných prvků, což zvyšuje stabilitu agro-ekosystému. Zároveň omezuje pesticidní tlak a zvyšuje funkční biodiverzitu, která může přispívat k lepšímu koloběhu živin a odolnosti vůči extrémům počasí (např. suchu). Uhlíkové zemědělství je převážně výsledkově orientovaný přístup a samotná certifikace EZ automaticky neznamená vyšší sekvestraci půdního uhlíku bez ohledu na konkrétní

praxi a výchozí stav půdy. EZ ale často vytváří příznivé podmínky pro dlouhodobou stabilitu půdy a krajiny, což může snižovat riziko reverzí a zvyšovat environmentální integritu CF projektů. Z pohledu návrhu politik je proto vhodné vnímat EZ jako kompatibilní a potenciálně synergický rámec, který může CF doplnit o širší rozměr udržitelnosti.

Ekonomická dynamika a trh s uhlíkovými kredity

Hlavní finanční přínos uhlíkového zemědělství pro zemědělce spočívá v duálním modelu příjmu. Na jedné straně dochází k interním úsporám nákladů. Změna postupů vede k významnému snížení výdajů na vstupy, což vede ke stabilnějším ziskům, a to i v méně příznivých letech. Na straně druhé je tu dodatečný příjem z prodeje uhlíkových kreditů. Tyto kredity slouží jako finanční kompenzace za environmentální služby poskytované zemědělci. Tento příjem pomáhá překonat jednu z hlavních ekonomických bariér pro přechod, a sice počáteční investiční náklady na nové vybavení či případný dočasný pokles výnosů v prvních letech. Čím více regenerativních postupů je implementováno a čím větší je zapojená plocha, tím více kreditů může zemědělec získat, což posiluje ekonomickou odolnost farmy.

Trh s uhlíkovými kredity je poháněn silnou poptávkou ze strany korporací a firem, které se zavázaly k dosažení uhlíkové neutrality. Tyto společnosti kupují přírodně založené uhlíkové kredity, aby kompenzovaly své nevyhnutelné emise, a tím dosáhly svých cílů udržitelnosti. To vytváří rostoucí dobrovolný trh, na kterém mohou zemědělci kapitalizovat své úsilí.

Z pohledu ekologického zemědělství je klíčové, aby se uhlíkové zemědělství nestalo náhradou za skutečnou transformaci dodavatelských řetězců. Pokud bude hlavním monetizačním kanálem pouze prodej kreditů, hrozí oslabení motivace budovat trh pro potraviny z udržitelných systémů (včetně EZ), který přináší dlouhodobější a společensky srozumitelnější signál než abstraktní jednotka uhlíku. Strategickým cílem by proto měla být kombinace: (i) veřejné platby za veřejné statky, (ii) inseting v dodavatelských řetězcích¹, a (iii) tržní prémie za certifikované produkty – přičemž EZ může sloužit jako existující systém pro ověřování a komunikaci přínosů.

Rostoucí zájem o uhlíkové zemědělství je patrný i na investičním trhu. Investiční fondy a venture kapitálové společnosti, jako je český Soulmates Ventures, aktivně financují agtech startupy, jako je eAgronom. Tato investiční aktivita signalizuje, že uhlíkové zemědělství a související technologie jsou vnímány jako lukrativní oblast s obrovským růstovým potenciálem. Příliv kapitálu do sektoru umožňuje těmto firmám rychle rozvíjet a škálovat svá technologická řešení, což je nezbytné pro plnou transformaci zemědělství.

Bankovní sektor v České republice začíná aktivněji podporovat uhlíkové zemědělství a širší témata udržitelnosti, a to zejména v kontextu ESG (Environmental, Social, Governance) reportingu a specializovaného financování.

¹ Strategie udržitelnosti, při níž společnosti investují do projektů snižování emisí přímo ve vlastním dodavatelském řetězci, nikoliv mimo něj.

ČSOB nabízí zvýhodněné úvěry pro zemědělce, které lze využít na financování provozních potřeb, jako jsou nákup osiv a hnojiv a také na investice do techniky a půdy. Tyto úvěry jsou často podporovány Podpůrným a garančním rolnickým a lesnickým fondem (PGRLF). Pro firemní klienty má banka k dispozici uhlíkovou kalkulačku, která pomáhá s výpočtem uhlíkové stopy.

Komerční banka (KB) v rámci své ESG strategie poskytuje řešení pro dekarbonizaci zemědělského sektoru. Pořádá například webináře zaměřené na výpočet uhlíkové stopy v zemědělství a možnosti jejího snižování. Banka nabízí i standardní úvěrové produkty pro zemědělce, včetně úvěrů na financování zemědělské půdy nebo techniky, přičemž některé z nich mohou být spojeny s podporou PGRLF.

Česká spořitelna nabízí financování investičních projektů a nákupu zemědělské půdy, kde zohledňuje dotace od PGRLF a Státního zemědělského intervenčního fondu (SZIF) pro snížení úrokových sazeb. Banka také poskytuje vzdělávací ESG zónu s webináři a průvodci, které firmám pomáhají s udržitelným podnikáním. V rámci digitálních služeb nabízí uhlíkovou kalkulačku, která usnadňuje výpočet uhlíkové stopy.

UniCredit Bank vnímá specifické podmínky podnikání v zemědělství a přizpůsobuje jim financování, např. splátky úvěrů sezónním příjmům. Podporuje udržitelné zemědělství a chov hospodářských zvířat.

Raiffeisenbank se zaměřuje na zvyšování povědomí o udržitelnosti u běžných klientů a ve své mobilní aplikaci nabízí zobrazení odhadu uhlíkové stopy u jednotlivých plateb.

Autoři této analýzy prozatím nemají dostatek přímých informací o zkušenostech s uhlíkovými kredity od samotných zemědělců. Tento nedostatek by bylo potřeba překlenout, neboť realita aktuálních tržních procesů a postojů zemědělců nemusí reflektovat teoretická očekávání či oficiální proklamace.

Výzkumná podpora

Vládní programy a výzkumné projekty se zaměřují na podporu celého zemědělského sektoru, tj. všech typů zemědělských subjektů. Skrze evropské zdroje (Interreg, Horizon Europe) a několik národních grantových agentur (NAZV, GA ČR, TA ČR) je v ČR z veřejných prostředků finančně podporován poměrně rozsáhlý výzkum a vývoj poznatkové základny a technologií pro ochranu klimatu v zemědělství, např. se zaměřením na optimalizaci agrotechniky a hospodaření s hnojivy, inovativní procesy v živočišné výrobě, alternativní pohonné technologie nebo obecně sociálně-ekonomickou dimenzí přizpůsobení se klimatické změně. Je předpoklad, že výsledky mohou pomoci všem typům farem s implementací postupů uhlíkového zemědělství, snižováním emisí skleníkových plynů a zvyšováním energetické účinnosti bez nutnosti kompletní změny způsobu hospodaření. Tato témata jsou navíc řešena i v rámci institucionální podpory či vnitřních výzkumných záměrů desítek výzkumných organizací a vysokých škol.

Značná komplexita technických požadavků na monitoring, reporting a verifikaci (MRV) uhlíkových kreditů podle evropské legislativy však znamená, že ve výzkumu stále existují důležité

nepokryté mezery, např. po stránce provázanosti existujících modelů s daty v LPIS a dalších databázích, kvality dat reportovaných zemědělci, kalibrace a validace modelů včetně strategií modelování chyb a nejistot. Zásadní je i prozatímní neukončenost existujících modelových postupů pro účely ex-post monitoringu. Metodické zlepšování modelových nástrojů v těchto oblastech by mělo být zastřešeno veřejnými zdroji, aby byla zajištěna konzistence s evropskou legislativou.

Je potřeba konstatovat, že výzkum týkající se uhlíkového zemědělství je značně roztržštěn, projekty jsou řešeny izolovaně. Ministerstvo zemědělství dohlíží na poznatkovou základnu tvořenou v rámci projektů financovaných vlastní agenturou (NAZV), výstupy dalších projektů se ke státní správě většinou dostanou jen díky vlastní aktivitě řešitelů. I přes určitou sjednocující iniciativu Spolku pro inovace a udržitelné zemědělství (SIUZ), řešitelské týmy různých projektů nejsou propojeny a nekoordinují své aktivity a výstupy. Dopad některých výsledků pro implementaci uhlíkového zemědělství tak může být omezený nebo zpožděný.

Řada zemědělských subjektů ze všech tří skupin (konvenční, ekologické, regenerativní) je zapojena do výzkumných projektů a sledování sekvestrace na svých pozemcích. Objem doposud získaných podkladů souvisí s proporčním zastoupením skupin a historií sledování – nejvyšší míra výzkumné spolupráce se doposud odehrávala na konvenčně obhospodařovaných pozemcích a v této formě hospodaření existuje řada hodnotných dlouhodobých pokusů. Méně je tomu v ekologickém zemědělství, před více než 10 lety založil stacionární dlouhodobé pokusy na 4 stanovištích ÚKZÚZ. Nejméně pokryté je sledování na pozemcích regenerativně hospodařících zemědělců, v této oblasti se angažuje ÚVGZ AV ČR, který před několika lety založil na svých pozemcích polní pokusy.

Perspektivy

Největším systémovým nedostatkem je absence regulace a transparentnost trhu. Chybí jak národní implementace a metodiky, tak i trh pro certifikované regenerativní produkty, což brání farmářům plně kapitalizovat své úsilí. Zásadními milníky pro širší implementaci uhlíkového zemědělství bude vytvoření a národní adaptace legislativního rámce a nastartování poradenského systému pro překonání generační propasti a neochota ke změně, která je často způsobena nedostatkem informací a důvěry v nové postupy. Významnou bariérou jsou také počáteční investiční náklady a nejistota ohledně návratnosti, což dle průzkumů několika projektů znepokojuje většinu zemědělců. Ačkoli uhlíkové kredity a partnerství s bankami tento problém částečně řeší, riziko zůstává.

Aktuální vývoj v oblasti uhlíkového zemědělství v České republice, který byl doposud řízen primárně inovacemi soukromého sektoru, čeká zásadní transformace v souvislosti s publikovanými návrhy metodických aktů Evropské komise (Commission Delegated Regulation (EU) .../... supplementing Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the Council by establishing the certification methodologies for carbon farming activities + Annex).

Tyto dokumenty doplňují Nařízení (EU) 2024/3012 a poprvé konkrétně definují pravidla, za kterých bude možné pohlcování uhlíku v EU oficiálně certifikovat.

Přestože jsou tyto akty aktuálně ve fázi návrhů, lze predikovat směřování trhu – dojde k posunu od dominance vlastních metodik s připravovanými evropskými standardy (rámec CRCF). Návrhy zavádějí striktní požadavky na tzv. Q.U.A.L.I.T.Y kritéria (kvantifikace, adicionalita, dlouhodobé uložení a udržitelnost), která zásadně ovlivní ekonomiku projektů:

- Certifikaci by měly získat pouze aktivity, které nejsou vyžadovány zákonem a jejichž finanční životaschopnost je přímo závislá na příjmech z uhlíkových kreditů, což bude muset farmář prokázat analýzou investic.
- Návrhy počítají s povinným využitím mechanismů ručení, jako jsou rezervní fondy jednotek (buffer pools), které mají pokrýt riziko neplánovaného uvolnění C do atmosféry.
- Důraz je kladen na povinnost účastníků se zemědělci připravovat informace v rámci Plánu aktivit a Monitorovacího plánu k zajištění požadavku monitorování, reportování a verifikace (MRV) uhlíkových kreditů.

Předpokládá se, že existence těchto oficiálních návrhů urychlí profesionalizaci českého sektoru CF. Bankovní domy (ČSOB, KB, Česká spořitelna), které již nyní do svých ESG strategií zahrnují uhlíkovou stopu, pravděpodobně začnou své produkty ladit podle unijních metodik. Protože ESG je zaštitěno samostatnou legislativou s odlišnými definicemi mandatorních typů emisí k započtení, v nejbližším období pravděpodobně bude docházet k prolínání požadavků na MRV podle legislativy pro uhlíkové zemědělství s ESG. Kompatibilita těchto dvou oblastí by měla být rovněž zaštitěna dalším výzkumem. Přechodné období stanovené v návrzích by mělo umožnit uznání aktivit zahájených po 1. lednu 2023, což dává stávajícím průkopníkům v ČR šanci integrovat se do nového systému, pokud jejich postupy obstojí v přísném hodnocení doplňkovosti a udržitelnosti.

4. Výpočet potenciálu sekvestrace C v modelových systémech

Využití simulačních modelů představuje v současné pedologii a environmentální ekonomii zásadní nástroj pro kvantifikaci dynamiky půdního organického uhlíku. Vzhledem k vysoké prostorové variabilitě půdních vlastností a časové náročnosti terénních měření umožňují simulace predikovat dopady různých agrotechnických opatření v horizontu desítek let. Tento přístup je klíčový pro hodnocení sekvestračního potenciálu orných půd, neboť dokáže integrovat proměnné, jako jsou klimatické scénáře (např. SSP), pedologické parametry, osevnické postupy a intenzita hnojení.

Simulační modely (např. RothC, Century) pracují s konceptem půdních zásobníků C s různou dobou obratu, což umožňuje modelovat nejen okamžitý nárůst biomasy, ale především dlouhodobou stabilizaci uhlíku v půdním profilu. V kontextu metodiky uhlíkového zemědělství je simulační přístup nezbytný pro stanovení referenčních úrovní (baselines) a pro predikci doplňkovosti (adicionality) navržených opatření. Umožňuje také identifikovat regiony s nejvyšším saturačním deficitem, kde je aplikace organické hmoty (např. zaorávání posklizňových zbytků či pícnin) z hlediska klimatické mitigace nejefektivnější.

Výstupy simulací slouží jako vědecký podklad pro tvorbu dotačních politik a tržních mechanismů. Stanovení stínových cen sekvestrace na základě modelovaných dat poskytuje farmářům i tvůrcům legislativy jasnou informaci o ekonomické náročnosti a environmentálním přínosu transformace hospodaření. Simulační přístup tak překlenuje mezeru mezi teoretickým potenciálem půdy a praktickou realizací klimaticky chytrého zemědělství, přičemž minimalizuje rizika spojená s nejistotou budoucího vývoje klimatu.

Metodika

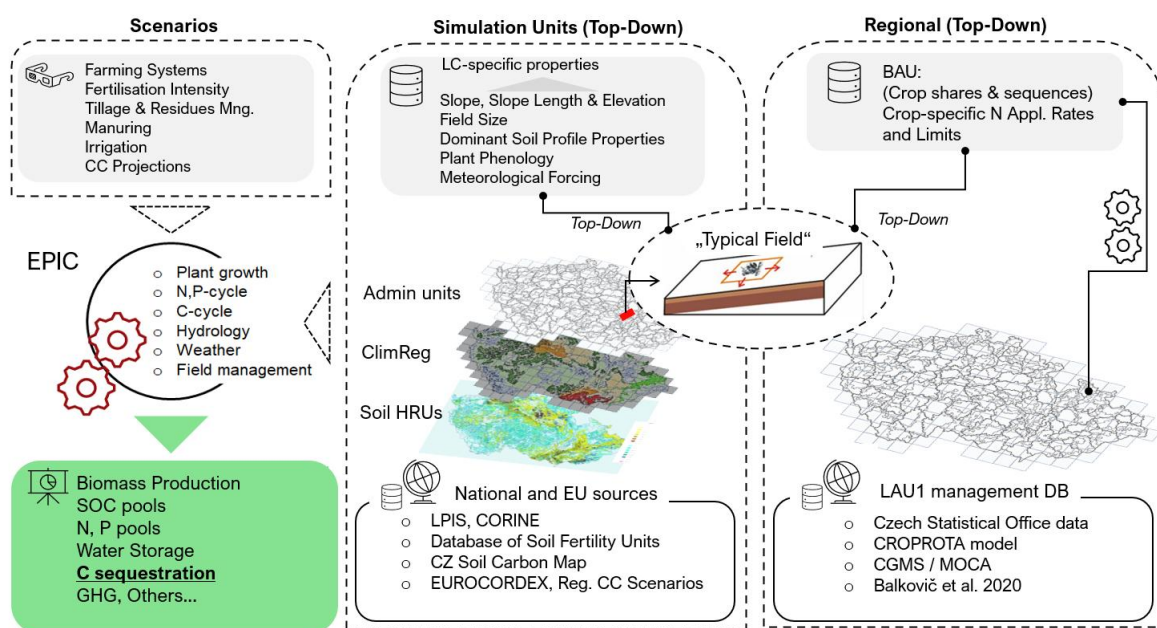
Jako základ pro simulace sekvestračního potenciálu orných půd ČR jsme využili regionální plodinový model EPIC-IIASA, který byl vytvořen pro simulaci růstu a produkce zemědělských plodin v globálním, kontinentálním a subkontinentálním měřítku. Tato simulační platforma využívá již existující a mnohokrát validovaný procesní plodinový model EPIC.

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.

Jádrum 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).

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



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

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

Pro potřeby regionálních simulací zemědělských systémů ČR byla vytvořena a v prostředí LINUX implementována národní geoprostorová datová infrastruktura EPIC-IIASA CZ (Obr. 1). 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 sítě a sklizně hlavních plodin. Design umožňuje agregaci výstupů na úroveň LAU1 (okresy) a NUTS2 (kraje), což souvisí s požadavkem státní správy na úroveň kvantifikace a interpretace výsledků.

Počáteční hodnoty obsahu C v půdní organické hmotě byly odvozeny z digitálního podkladu *Mapa zásoby humusu v zemědělských půdách ČR* (Žížala, 2020).

Kvalita predikcí změn obsahu C v půdě se podstatným způsobem odvíjí od kvality predikce výnosů plodin, neboť do půdního cyklu C vstupují posklizňové zbytky a kořenová hmota, která v modelu EPIC standardně představuje 20 % celkové biomasy plodiny. Pro simulace bylo využito výchozí plodinové nastavení modelu EPIC. Na základě vlastností aktuálně pěstovaného sortimentu kultivarů byly přizpůsobeny teplotní nároky plodin, sklizňový index, délka vegetační doby dle klimatických podmínek příslušných simulačních jednotek apod. V rámci validace výsledků byly potenciálně dosažitelné výnosy plodin pro okresy ČR srovnávány s výnosovými potenciály plodin dle Voltra a kol. (2011); meziroční variabilita výnosů byla srovnávána s výsledky publikovanými Českým statistickým úřadem pro NUTS3 regiony.

Tab. 1 Prvky a opatření zakomponované v platformě EPIC-IIASA CZ

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

* v této metodice nezahrnuto

Sekvestrační potenciál půdy je pro účely tohoto výsledku definován jako kvantifikace schopnosti půdy navýšit při zavedení určitého modelového typu hospodaření obsah půdní organické hmoty ve svrchní 30 cm vrstvě. 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 (vyjádřeno v t C/ha), a to při simulaci stejného pěstebního systému (a jeho varianty) v celém období. Tímto způsobem definovaný potenciál sekvestrace v orné půdě vyjadřuje míru retence/uvolnění C v povrchové vrstvě za 40 nebo 80 let.

Pro vyhodnocení sekvestračního potenciálu v českých regionech uvažujeme 2 základní modelové systémy hospodaření:

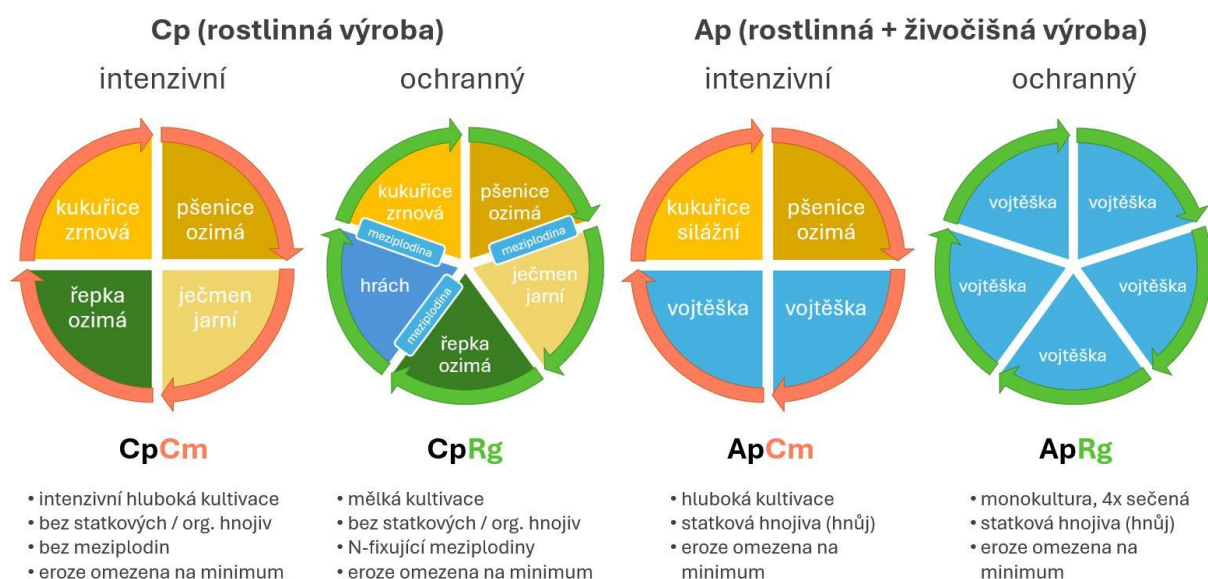
- **Pěstební systém bez živočišné výroby** (Cp – crop production): bez pícnin a bez aplikace statkových a organických hnojiv.
- **Pěstební systém se živočišnou výrobou** (Ap – animal production)- v osevním sledu jsou zakomponovány krmné plodiny, 2/3 dávky dusíku jsou aplikovány formou chlívského hnoje.

Oba systémy jsou dále rozděleny na dva podtypy:

- **Komerční** (Cm – commercial) - osevní postup s menším počtem komerčních plodin (včetně bioenergetických), uvažováno je spíše odstranění posklizňových zbytků, hluboká orba, vyšší dávky hnojiv a závlaha (CpCm, ApCm).
- **Ochranný** (Rg – regenerative): vyšší počet plodin v osevním postupu (včetně méně tradičních), zařazení meziplodin, uvažováno je spíše ponechávání posklizňových zbytků, redukována orba, nižší dávky hnojiv a absence závlahy (CpRg, ApRg).

Popis základních charakteristik 4 modelových systémů a koncept tvorby dílčích variant těchto systémů jsou uvedeny na obr. 2 a 3.

Obr. 2 Základní modelové systémy sekvestrace.



Komerční systém hospodaření zaměřený na produkci plodin (CpCm) představuje vysoce intenzivní a komerčně orientovanou produkci dlouhodobě dobře prodejných plodin, které jsou využívány buď pro potravinářství, nebo výrobu bioenergie. Tento systém nepředpokládá žádnou integrovanou živočišnou výrobu. Spoléhá se převážně na střední až vysoké vstupy živin z minerálních hnojiv, konvenční zpracování půdy včetně hluboké orby, diskování a meziřádkové

kultivace širokořádkových plodin. Maximálně se využívá vyprodukovaná nadzemní biomasa – sklízí se nejen hlavní produkt (zrna, hlízy), ale i posklizňové zbytky, které se odstraňují z pole.

I když je při simulacích v systému CpCm povolen zelený úhor po sklizni, žádné další strategie meziplodin se neuplatňují. Kromě pěstování ozimých plodin je půda v listopadu hluboce zoraná a zůstává bez vegetačního pokryvu až do další vegetační sezóny.

Ochranný systém hospodaření zaměřený na produkci plodin (CpRg) představuje méně intenzivní strategii hospodaření, která klade důraz na efektivní využití zdrojů. Předpokládá širší spektrum pěstovaných plodin (ekonomicky výhodné plodiny, ale i alternativní a méně běžné plodiny), přičemž hlavním účelem je potravinářská produkce, i když část produkce může být využita pro bioenergie. Tento systém rovněž nepředpokládá žádnou integrovanou živočišnou výrobu.

Na rozdíl od CpCm, systém CpRg stále spoléhá na nízké až střední vstupy minerálních hnojiv, ale velká část živin je dodávána rozkladem vstupující organické biomasy nebo statkových, resp. organických hnojiv. Půda se zpracovává minimálně – místo orby se provádí pouze diskování, které připravuje seťové lůžko a částečně promíchává rostlinné zbytky s půdou. Systém CpRg se snaží maximalizovat využití vyprodukované nadzemní biomasy, přičemž většina nebo všechny posklizňové zbytky zůstávají na poli. Po sklizni hlavní plodiny je zaveden jak zelený úhor, tak pěstování krycích plodin mimo hlavní sezónu.

Systém hospodaření s orientací na živočišnou produkci – komerční (ApCm) představuje velmi intenzivní a komerčně zaměřenou produkci dobře prodejných plodin, které se využívají buď k potravinářským účelům, jako krmivo pro hospodářská zvířata, nebo částečně i k výrobě bioenergie. Strategie systému ApCm se odvíjí od přítomnosti živočišné produkce.

Systém je navržen tak, aby se spoléhal především na střední až vysoké vstupy živin, které pocházejí jak z minerálních hnojiv (jedna třetina roční dávky), tak ze statkových/organických hnojiv (hnůj tvoří dvě třetiny roční dávky). Používají se konvenční způsoby obdělávání půdy, včetně hluboké orby, diskování a meziřádkové kultivace u širokořádkových plodin. Maximálně se využívá nadzemní biomasa – jak sklizené produkty, tak posklizňové zbytky jsou odstraněny z pole (sláma pro krmivo nebo bioenergetické využití).

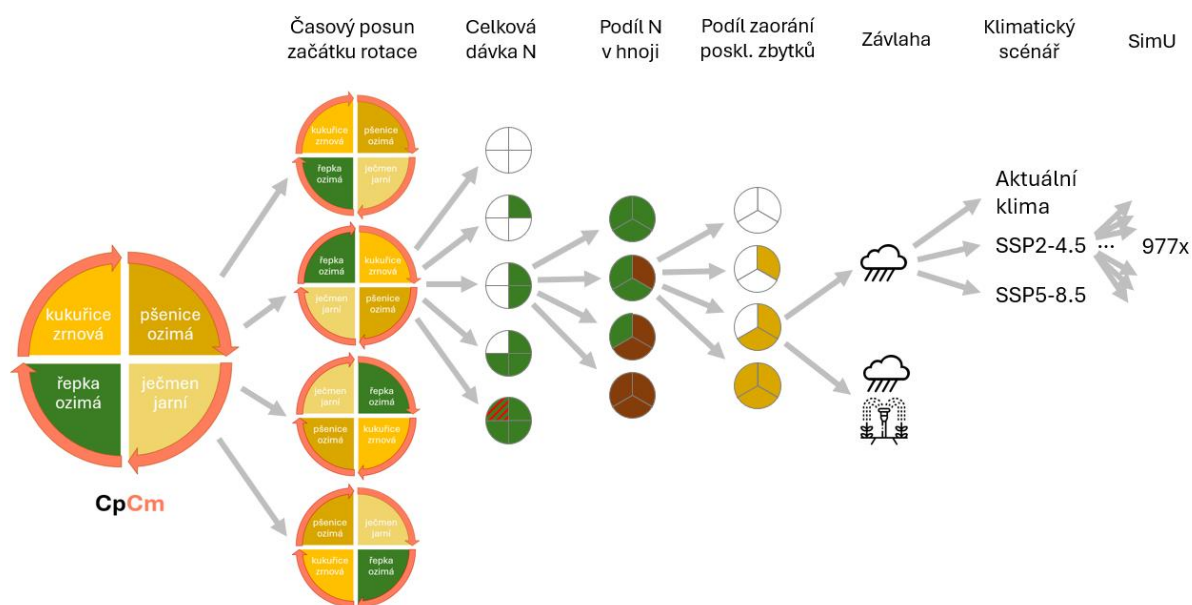
Ačkoli se po sklizni plodiny v systému ApCm předpokládá zelená úhorová plocha, žádné další specifické strategie ozelenění se po hlavní sklizni neuplatňují. S výjimkou ozimých plodin je půda na podzim oraná hluboce (zpracování statkových/organických hnojiv) a zůstává bez vegetačního pokryvu až do začátku další vegetační sezóny.

Systém hospodaření s orientací na živočišnou produkci – ochranný (ApRg) představuje méně intenzivní až extenzivní strategii, která klade důraz na ochranu půdy při intenzivní produkci píče jako krmiva pro hospodářská zvířata, nebo částečně i k výrobě bioenergie. Strategie systému ApRg se odvíjí od přítomnosti živočišné produkce.

Na rozdíl od ApCm systém ApRg integruje porosty s N-fixující pícninou a předpokládá částečný návrat živin do půdy pouze formou statkových hnojiv (nebo digestátu), a to v maximální výši 10 t hnoje na hektar ve dvou ročních dávkách po sečích. Půda se zpracovává minimálně, pouze při

založení porostů, obnova porostů se předpokládá jednou za 5 let. Systém ApRg se podobně jako CpRg snaží maximalizovat využití vyprodukované nadzemní biomasy, přičemž část může být ponechána na poli (mulčována), aby byla více posílena akumulace uhlíku. Intenzita tohoto opatření však silně závisí na ekonomické rentabilitě systému uhlíkových kompenzací (viz dále).

Obr. 3 Schematické znázornění dílčích variant modelových systémů sekvence.



Tab. 2 Celková dávka dusíku v minerálních hnojivech a hnoji k jednotlivým plodinám dle kategorií intenzity hnojení (Nh=high, m – medium, l – low, n – none).

	Modelový systém				Úroveň hnojení dusíkem (celková dávka k plodině, kg N/ha)			
	CpCm	CpRg	ApCm	ApRg	Nh	Nm	Nl	Nn
Pšenice ozimá	+	+	+		230	138	69	0
Řepka ozimá	+	+			230	138	69	0
Ječmen jarní	+	+			160	96	48	0
Kukuřice zrnová	+	+			240	144	72	0
Hrách polní		+			80	48	24	0
Vojtěška			+	+	40	24	12	0
Kukuřice silážní			+		240	144	72	0
Meziplodiny (N-fixující)		+			0	0	0	0

Při simulacích jsme uvažovali pouze vybrané agronomicky smysluplné způsoby zemědělského využití orné půdy, a to v gradientu od intenzivních, pro ukládání C méně vhodných až nevhodných způsobů, přes udržitelné a v rámci uhlíkového zemědělství doporučené zemědělské postupy, jakými jsou redukované zpracování půdy, vyšší míra zapravení

posklizňových zbytků, používání meziplodin, diverzifikace plodin, aplikace statkových nebo organických hnojiv a závlaha. Koncovým prvkem gradientu je pak systém silně zaměřený na navýšování obsahu C v půdě, kterým je mulčovaná a statkovým hnojivem hnojená monokultura vojtěšky. Domníváme se, že pro většinu skutečných, zemědělci využívaných systémů lze v rámci navržených modelových systémů najít analog, který jejich hospodaření odpovídá. V simulacích nebyly uvažovány varianty jako změna kultury (převod OP na TTP / les nebo kombinované kultury – např. agrolesnictví), aplikace biouhlu apod.

Poznatky z dlouhodobých pokusů, jakožto i simulace dokládají, že sekvestrační kapacita půdy je limitovaná, a to ne pouze fyzikálně-chemicky (tzv. saturace), ale i bilančně. Při určitém setrvalém způsobu hospodaření je po čase dosažena rovnováha mezi vstupem organických látek do půdy a mineralizací půdní organické hmoty. Po dosažení této rovnováhy se již obsah SOC nezvyšuje. Další navýšení je možné pouze přechodem na systém hospodaření s vyšší intenzitou vstupů organických látek nebo dodatečnými opatřeními směřujícími k akumulaci C.

Klimatické scénáře

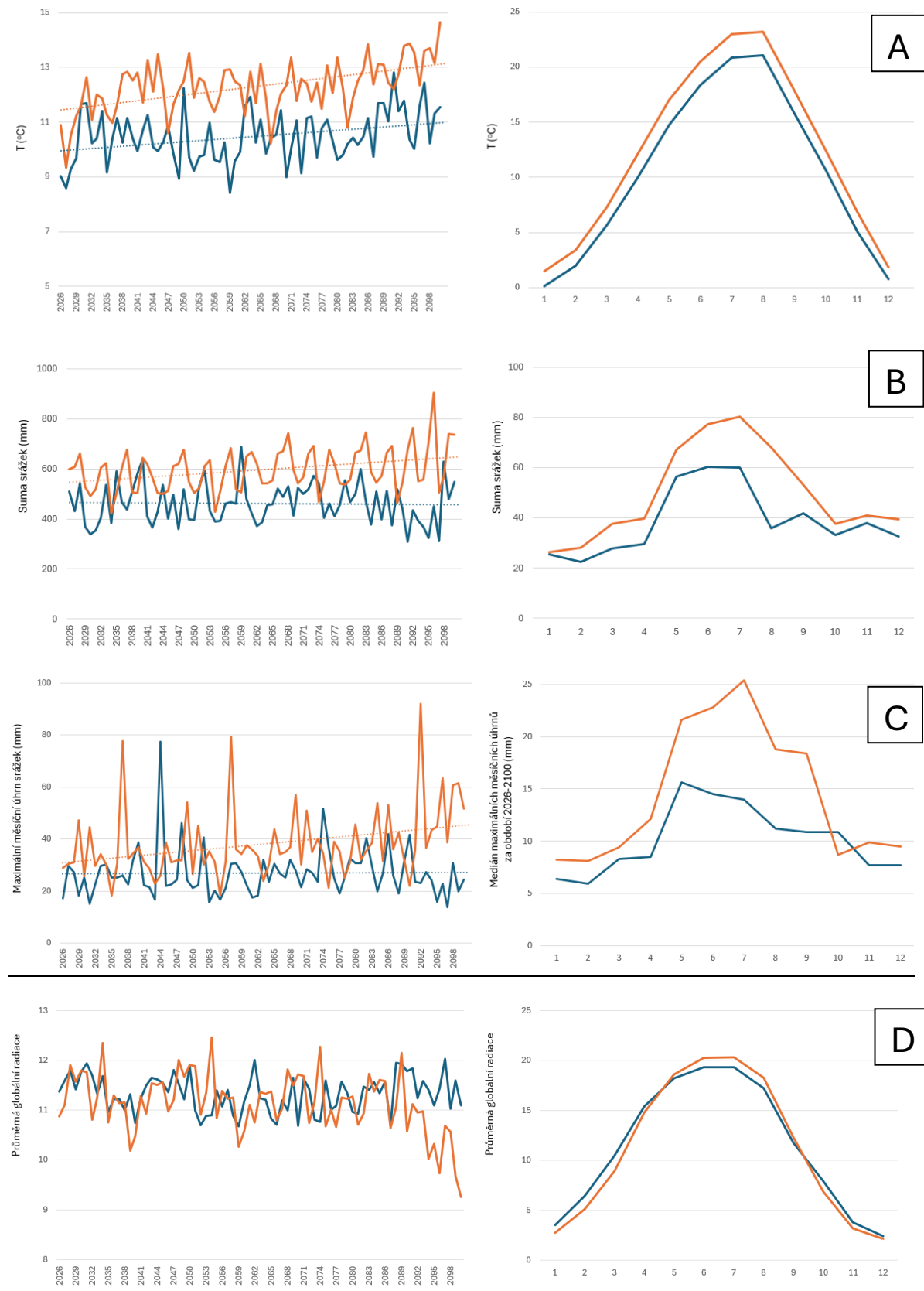
Analýza dlouhodobé akumulace SOC v ornici pro budoucí období směrem k polovině (2040–2060) nebo konci (2080–2100) 21. století vyžaduje zohlednění změny klimatu, jak ji projektují dostupné regionální cirkulační modely. Proto byl dlouhodobý (20letý) bilanční stav SOC v ornici analyzován a vyhodnocen zvláště pro jednotlivé systémy využívání půdy v rámci scénářů klimatických změn, které se vyznačují očekávaným zvyšováním koncentrace CO₂ v nadcházejícím století. To má za následek budoucí oteplování klimatu, změny srážkových vzorců a nárůst četnosti extrémních povětrnostních událostí s různou rychlostí a intenzitou.

Simulace byly provedeny pro období let 2000-2100 na základě regionálního cirkulačního modelu EC-Earth3. EC-Earth3 je evropský model pozemského systému vyvinutý pro simulace klimatických změn v rámci projektu CMIP6. Integruje komponenty atmosféry, oceánu, mořského ledu a pevninského povrchu, aby poskytoval komplexní pohled na globální klima. Model využívá scénáře SSP k předpovědi budoucího vývoje teplot, srážek a extrémních jevů až do roku 2100. Díky modulární struktuře umožňuje také studium specifických procesů, jako je dynamika vegetace nebo atmosférická chemie. Uvažované klimatologické scénáře byly SSC2-4.5 a SSC5-8.5. V rámci projektu byly v r. 2025 pro simulace využívány rovněž scénáře RCP 2.6, RCP 4.5 a RCP 8.5, generované na základě regionálního cirkulačního modelu CSC_REMO2009_MPI-ESMLR a exportované z veřejně přístupné databáze EuroCORDEX.

SSP2-4.5 scénář představuje „střední cestu“, kdy emise skleníkových plynů rostou do poloviny století a poté začínají klesat. V modelu EC-Earth3 se tento vývoj projevuje mírným nárůstem teplot a srážek, který v českém kontextu (např. v Jeseníkách) odpovídá oteplení o přibližně 2,3 °C do konce století.

SSP5-8.5 je nejextrémnějším scénářem s velmi vysokými emisemi z intenzivního využívání fosilních paliv. Simulace EC-Earth3 pro tento scénář predikují výrazné oteplení (v ČR až o 4,7 °C) a silnější klimatickou variabilitu, což vede k častějšímu výskytu sucha i extrémních srážek.

Obr. 4 Srovnání klimatických scénářů RCP 4.5 (modrá) a SSP2-4.5 (oranžová) pro lokalitu Brno – roční a měsíční průměry teploty vzduchu (A, °C) a globální radiace (D, MJ/m²/den), roční a měsíční úhrny srážek (B, mm) a statistiky maximálních úhrnů srážek (maximální denní úhrn v daném roce a medián maximálních denních úhrnů v příslušném měsíci (C, mm).



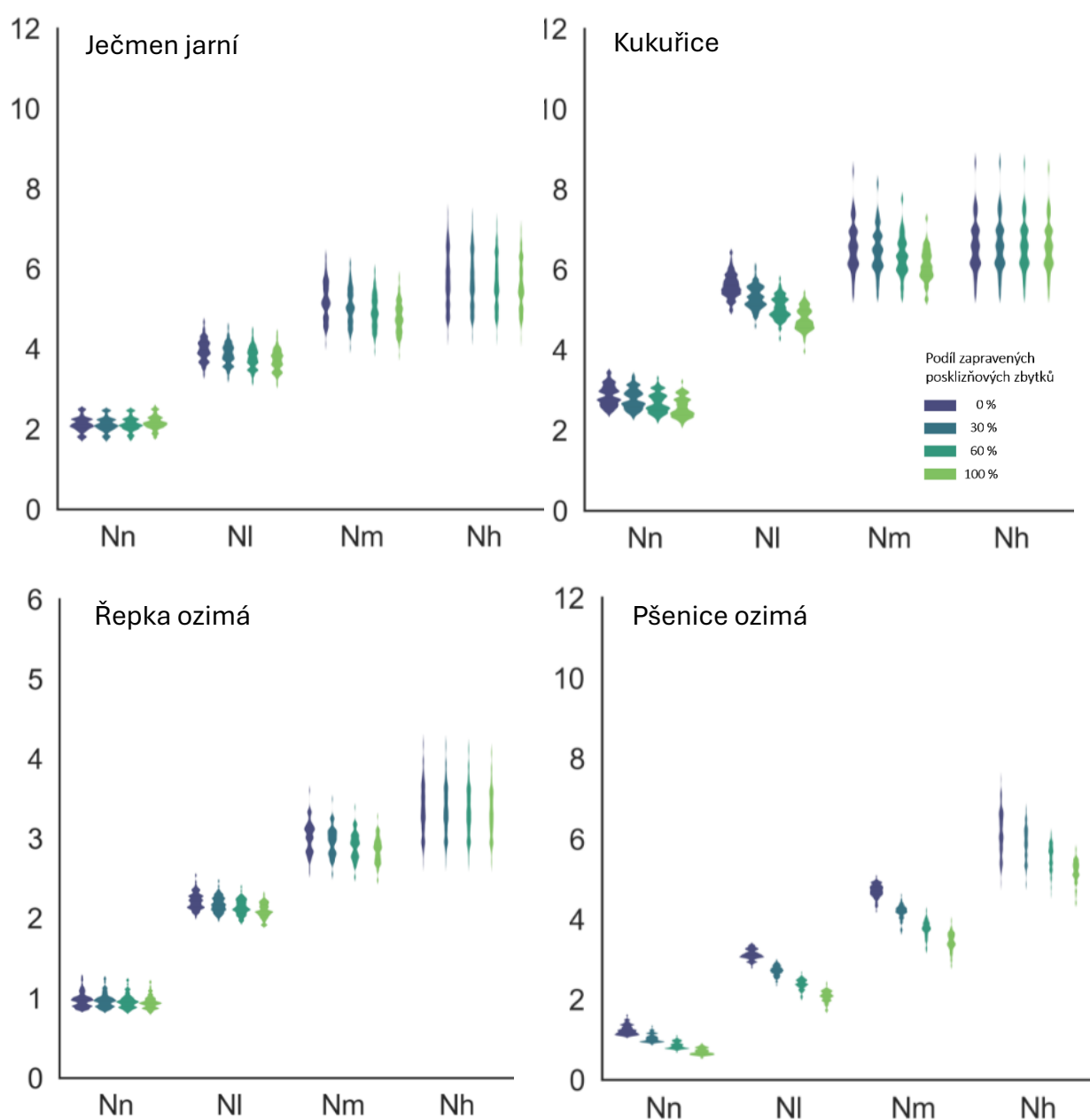
Scénář SSP2-4.5 se ve srovnání s RCP 4.5 jeví jako teplejší (o ca. 2°C), přičemž v letních měsících jsou rozdíly vyšší. Roční úhrny srážek jsou ve scénáři SSP2-4.5 vyšší o ca. 20-25 % v první polovině 21. století, ke konci století jsou vyšší o ca. 50 %, přičemž největší rozdíly jsou v letních měsících. Oproti scénáři RCP 4.5 roste také četnost přívalemých dešťů, také zejména v letních měsících. Efektivní globální radiace je v novém scénáři o něco vyšší v letních měsících a nižší v podzimních až jarních měsících. Ke konci simulačního období efektivní globální radiace významně klesá, a to zejména v jarních měsících.

Výsledky

Výnosy plodin – aktuální a budoucí klima

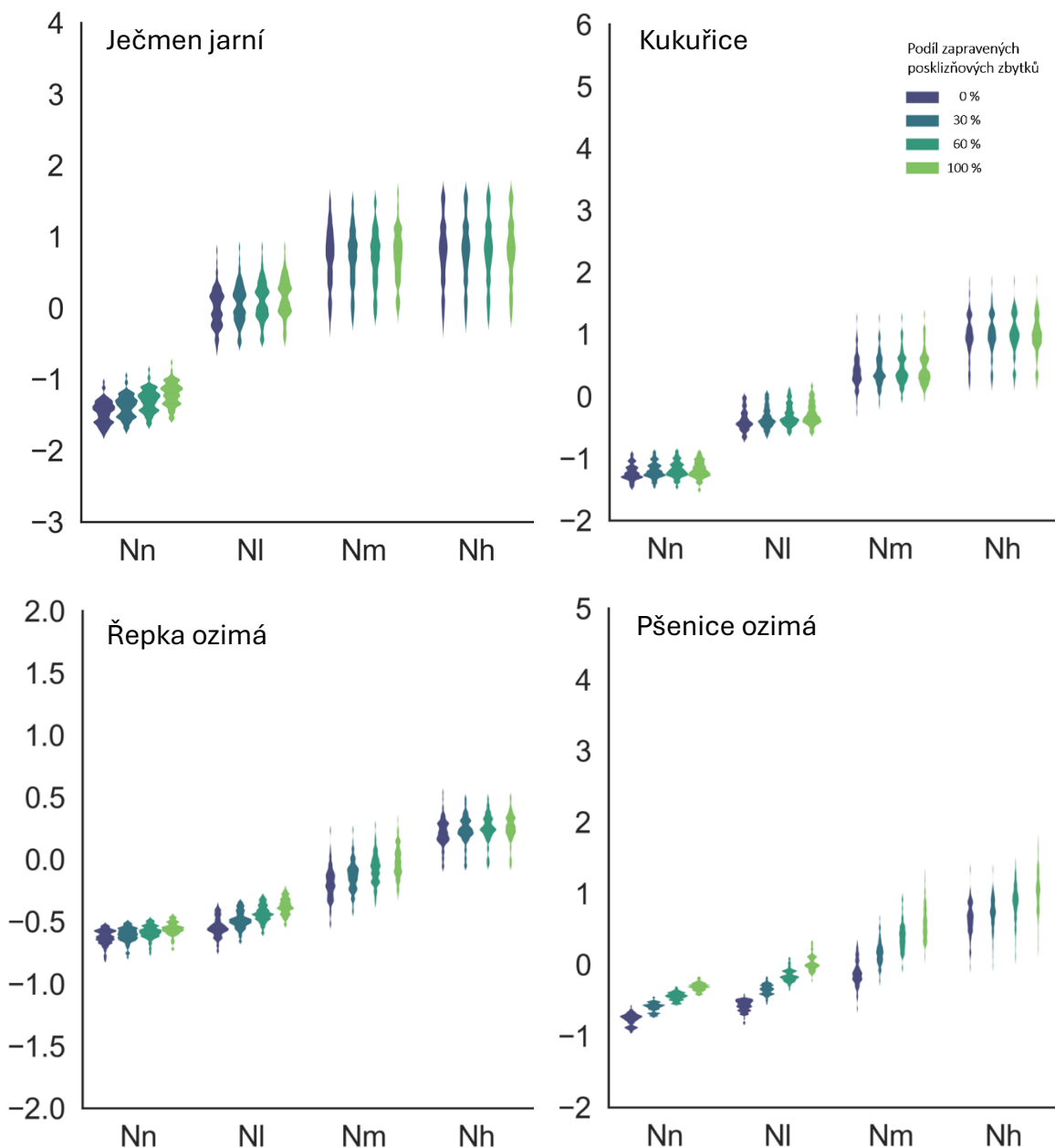
Simulované výnosy plodin v referenčním období 2000-2019 pro modelový systém CpCm jsou uvedeny v grafech na obr. 5. Je patrná reakce na intenzitu hnojení N (pozitivní u všech plodin) a míru zapravení posklizňových zbytků (bez reakce nebo při vyšším % zapravení mírně snižující výnosy). Rovněž je patrná variabilita výnosů mezi jednotlivými okresy.

Obr. 5 Výnosy zrna plodin pěstovaných v modelovém systému CpCm (t/ha; průměr za referenční období 2000-2019; agregace LAU1), v závislosti od intenzity hnojení a úrovně zapravení posklizňových zbytků.



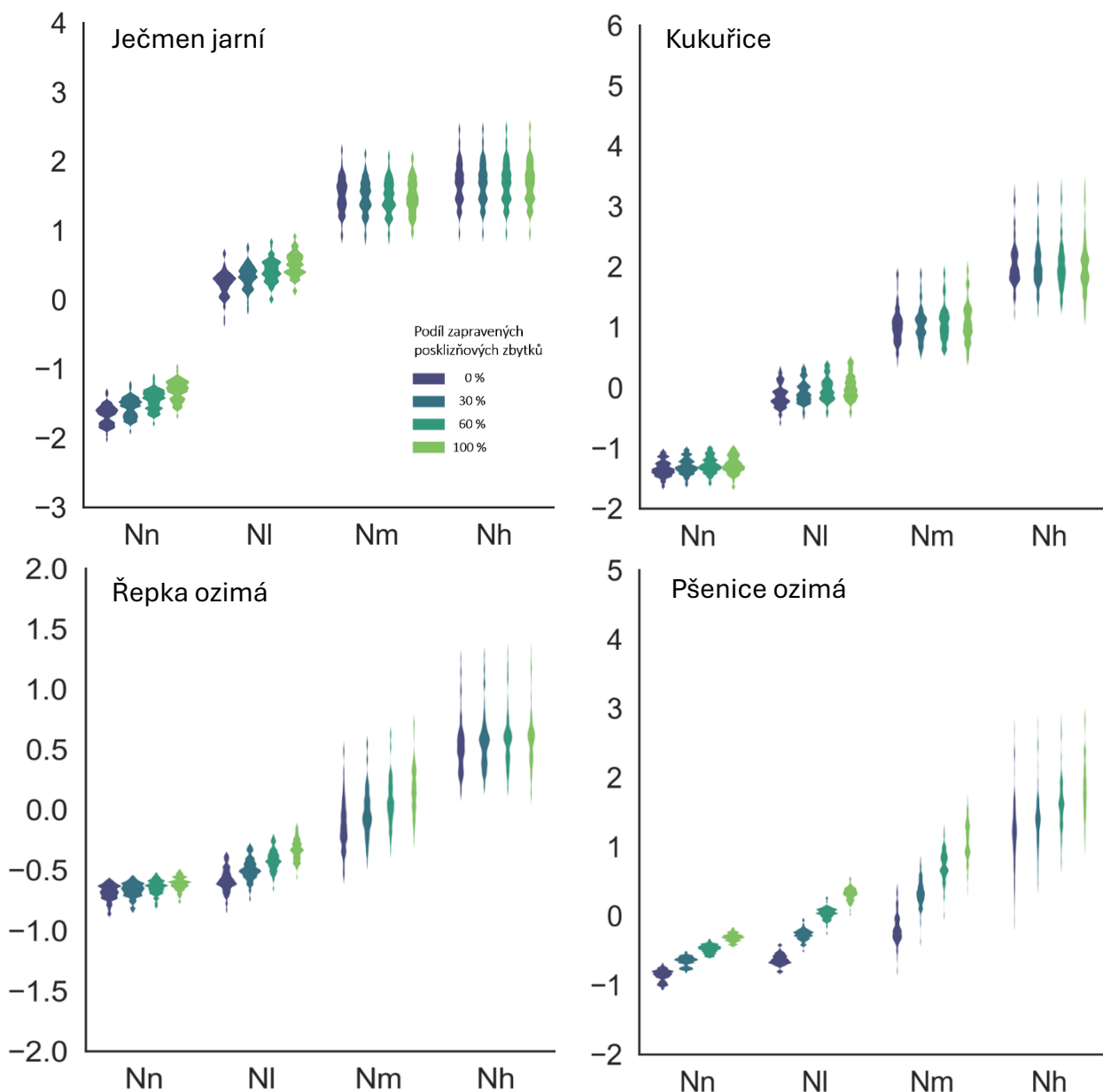
V polovině století (2040-2060) model pro úrovně hnojení Nm a Nh predikoval nárůst výnosů u všech systémů v obou scénářích. Ve scénáři SSP5-8.5 byl nárůst výnosů vyšší v průměru o 40 % oproti nárůstu simulovanému pro scénář SSP2-4.5. Protože trendy byly u obou scénářů analogické, pro uvádíme pouze výsledky pro SSP2-4.5 (Obr. 6, 7).

Obr. 6 Rozdíl ve výnosech zrna plodin pěstovaných v modelovém systému CpCm (t/ha; průměr za období 2040–2060 mínus průměr za referenční období 2000–2019; scénář SSP2-4.5; agregace LAU1), v závislosti od intenzity hnojení a úrovně zapravení posklizňových zbytků.



Výnosy ječmene jarního vzrostly při nejvyšší úrovni hnojení o ca. 20 % (1 t/ha). O něco menší pozitivní nárůst byl simulován i pro kukuřici, řepku a ozimou pšenici. Při úrovni Nm bylo zvýšení výnosů predikováno pouze u kukuřice, u ostatních plodin bylo zvýšení pouze mírné, nebo výnosy stagnovaly. Při nízké úrovni hnojení a bez hnojení výnosy poklesly. Ke konci století jsou výnosové trendy podobné, avšak rozdíly oproti referenčnímu období jsou výraznější, zejména u více hnojených variant. Zároveň je kompenzován negativní efekt zapravení posklizňových zbytků.

Obr. 7 Rozdíl ve výnosech zrna plodin pěstovaných v modelovém systému CpCm (t/ha; průměr za období 2080–2100 minus průměr za referenční období 2000–2019; scénář SSP2-4.5; agregace LAU1), v závislosti na intenzitě hnojení a úrovni zapravení posklizňových zbytků.



Zvyšování výnosů může být důsledkem synergie rostoucí koncentrace atmosférického CO₂ a dostupnosti živin při vyšší úrovni hnojení. Fertilizační efekt CO₂ funguje na principu stimulace fotosyntézy, kdy vyšší parciální tlak oxidu uhličitého v atmosféře potlačuje fotorespiraci u C3 rostlin, mezi které patří pšenice, ječmen i řepka. Tento pozitivní efekt je závislý na dostupnosti dusíku, což koresponduje s výsledky simulací, kdy je při nízké úrovni hnojení predikován pokles výnosů navzdory oteplování a vyššímu obsahu CO₂.

Zapravení posklizňových zbytků má obecně tendenci výnosy v simulacích mírně snižovat, což je způsobeno imobilizací dusíku mikroorganismy při rozkladu organické hmoty. Tento proces se projevil v referenčním období, nicméně zejména ke konci století je jeho efekt ve značné míře kompenzován, zřejmě urychlením mineralizace organických zbytků a zvýšení dostupnosti živiny pro plodiny.

Specifickou reakci v simulacích vykazuje kukuřice, na nárůst koncentrací CO₂ v atmosféře nereaguje tak citlivě jako pšenice. Přesto u kukuřice model predikuje nárůst i při střední úrovni hnojení, což může souviset s její adaptací na vyšší teploty a efektivnějším hospodařením s vodou v predikovaných podmínkách.

Celkově lze shrnout, že simulovaný růst výnosů není automatickým důsledkem klimatické změny, ale je podmíněn intenzivní výživou rostlin, která umožňuje využít fyziologický potenciál změněného složení atmosféry. Zároveň je nutné brát v úvahu rostoucí variabilitu výnosů mezi okresy, která naznačuje vyšší nestabilitu produkce v jednotlivých regionech. Pro simulace sekvestrace je podstatné, že s rostoucími výnosy se do půdy dostává víc rostlinných zbytků, a to jak kořenovou biomasou, tak i posklizňovými zbytky. Naopak, v systémech s predikcí poklesu výnosů bude vstup C do půdy nižší.

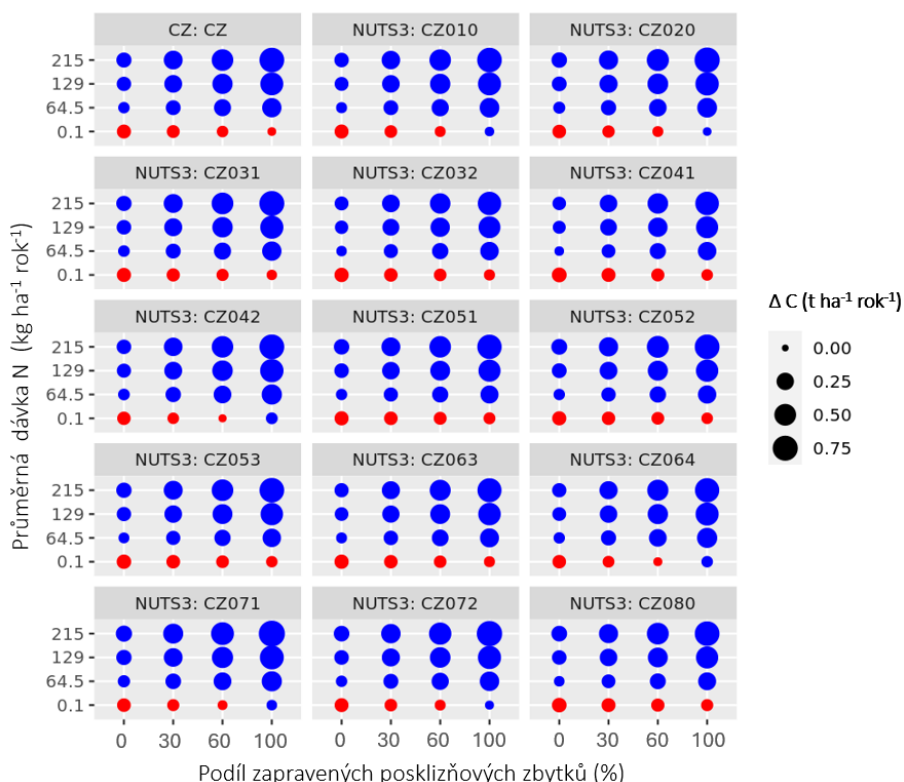
Sekvestrace SOC v ornici v aktuálním klimatu

Předdefinované systémy hospodaření na půdě představují kontrastní přístupy k pěstování plodin, které mohou účinně ovlivňovat akumulaci C v ornici. Toho lze dosáhnout různým množstvím organického C vstupujícího do půdy a dostupností N pro mikrobiální rozklad rostlinných zbytků v půdě a růst plodin během vegetačního období. Reakce SOC v ornici na specifické vstupy C a N v rámci jednotlivých modelových systémů je dále ovlivněna regionálně specifickými klimatickými a půdními podmínkami. To znamená, že účinnost opatření CF se v jednotlivých regionech liší.

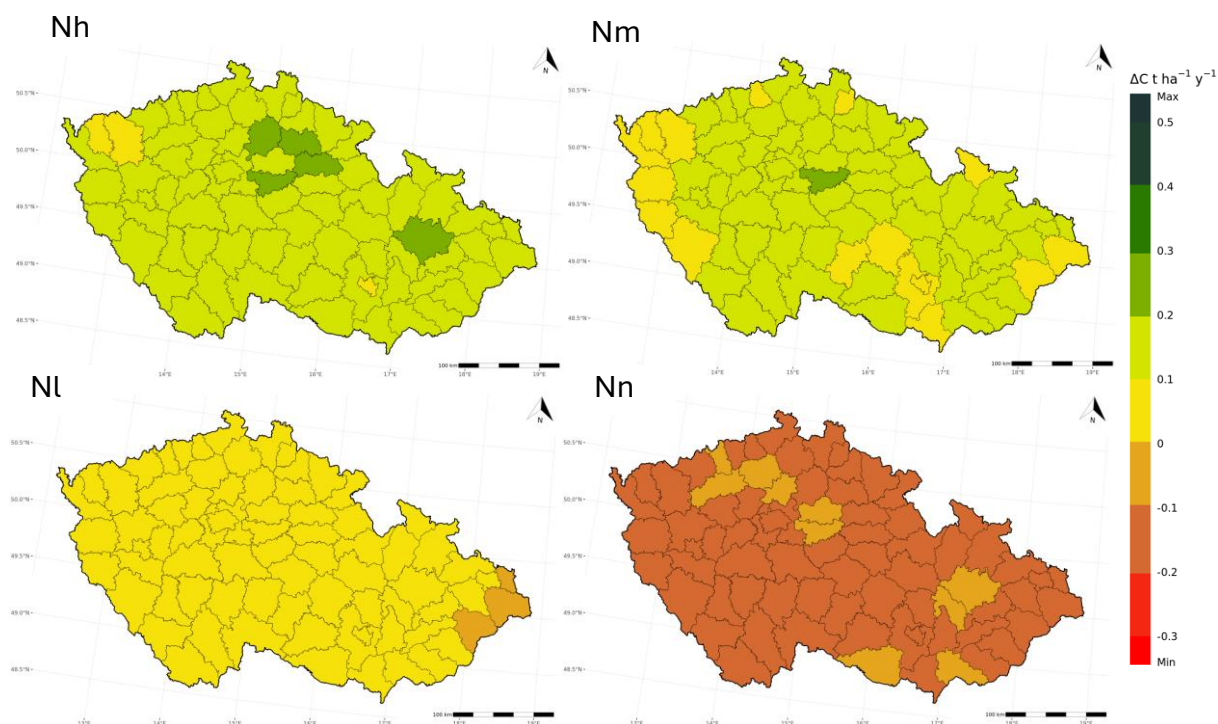
Komerční systém hospodaření zaměřený na produkci plodin

Průměrná simulovaná sekvestrace SOC v ornici v systému CpCm se v letech 2000–2019 pohybovala mezi 109 kg C/ha/rok a 622 kg C/ha/rok při vstupech N 129 kg N/ha/rok (střední vstup N) a 215 kg N/ha/rok (vysoký vstup N). Nejvyšší hodnota sekvestrace za okres byla 1 165 kg C/ha/rok (Nh vč. zapravení všech posklizňových zbytků). Pokud by zůstalo na poli 30 % až 60 % posklizňových zbytků, změna SOC se pohybuje mezi 214 kg C/ha/rok až 452 kg C/ha/rok při středním a vysokém vstupu N. Míra sekvestrace je pozitivní již od nižší úrovně intenzity hnojení. Vzor odezvy SOC v ornici se obecně zachovává i na úrovni jednotlivých regionů NUTS3. Na úrovni regionů LAU1 je odezva ve zvolené škále poměrně homogenní.

Obr. 8 Průměrná roční sekvestrace C v NUTS3 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému CpCm (modře – přírůstek, červeně – úbytek).



Obr. 9 Průměrná roční sekvestrace C (t/ha/rok) v LAU1 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému CpCm při 4 úrovních hnojení (bez zapravení posklizňových zbytků).



Ochranný systém hospodaření zaměřený na produkci plodin

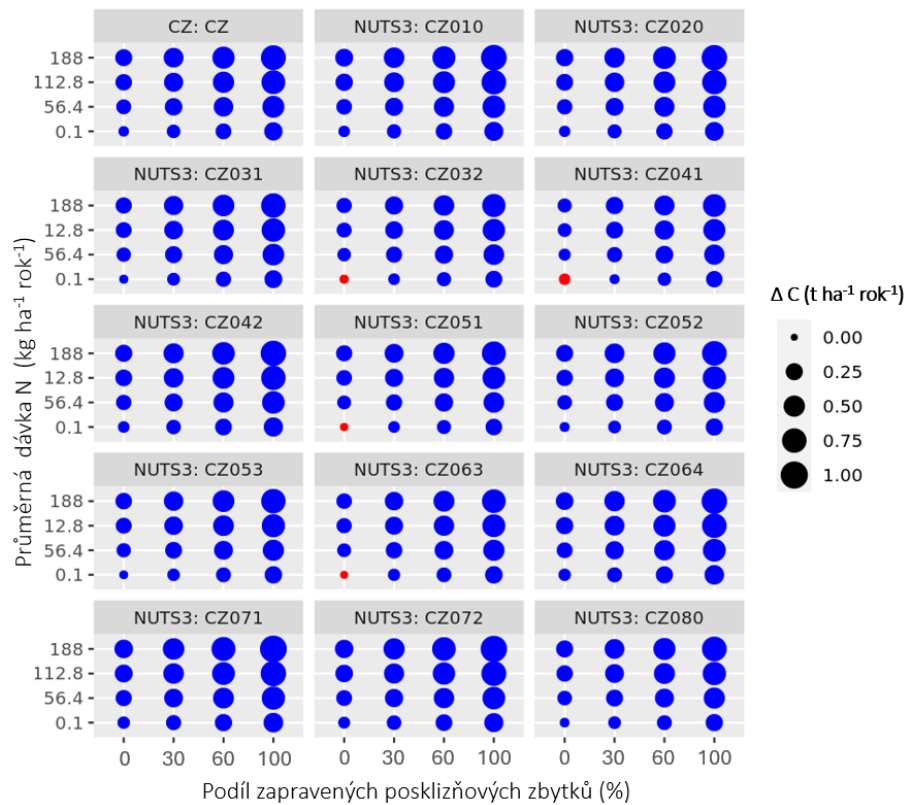
Průměrná simulovaná akumulace SOC v ornici v systému CpRg v České republice se v letech 2000–2019 pohybovala mezi 125 kg C/ha/rok a 628 kg C/ha/rok při vstupech 56,4 kg N/ha/rok (nízký vstup N) a 112,8 kg N/ha/rok (střední vstup N). Pokud na poli zůstává 30 % posklizňových zbytků, průměrná roční změna SOC se pohybuje mezi 77 kg C/ha/rok (Nn) až 355 kg C/ha/rok při vysokém vstupu N. Nejvyšší míra sekvestrace je dosažena pro vysokou intenzitu hnojení a 100% zapravení posklizňových zbytků, a to průměrně 714 kg C/ha/rok (max. 766 kg C/ha/rok).

Míra sekvestrace je pozitivní téměř pro všechny kombinace úrovně výživy N a stupně zapravení posklizňových zbytků. Vzor odezvy SOC v ornici je zachován i na úrovni jednotlivých regionů NUTS3, kde všechny regiony vykazují stejný trend a velikost dlouhodobé bilance SOC jako celostátní průměr. Na úrovni okresů je patrná vyšší míra sekvestrace v nižších polohách.

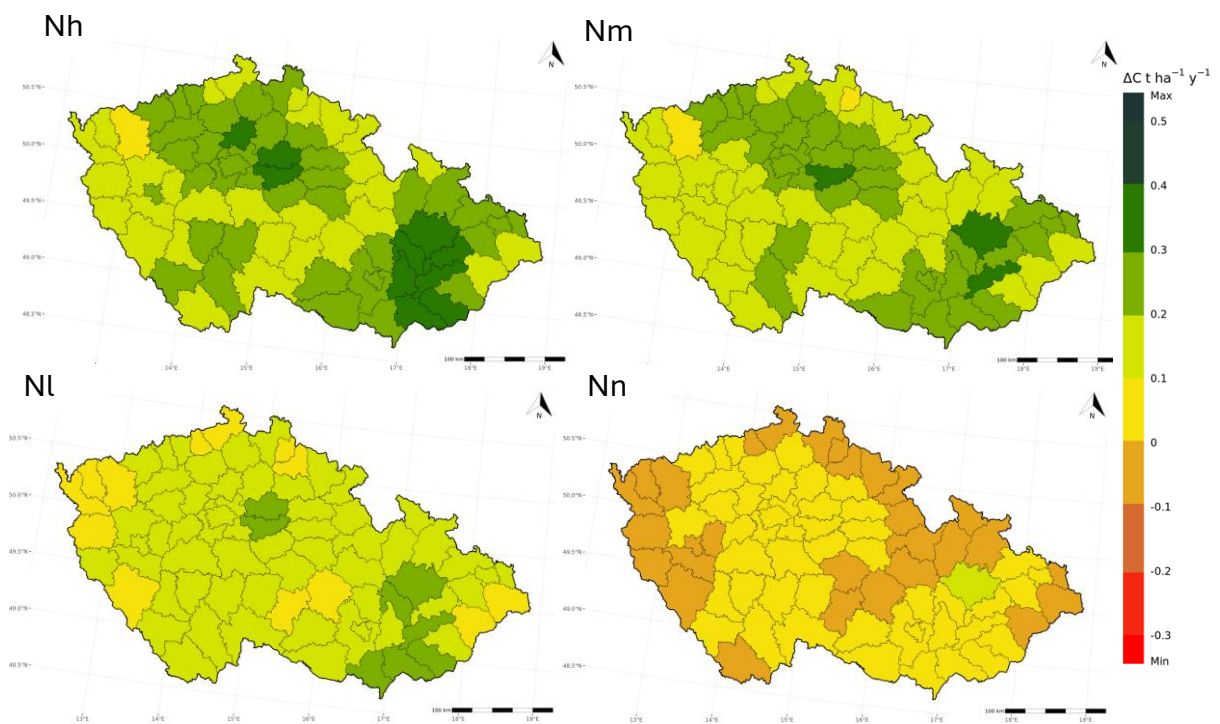
Systém hospodaření s orientací na živočišnou produkci – komerční

Průměrná roční akumulace SOC v ornici v systému ApCm se pohybovala v rozmezí 314–867 kg C/ha/rok, přičemž odpovídající vstupy činily 76,5 kg N/ha/rok (střední vstup) a 127,5 kg N/ha/rok (vysoký vstup). Při zapravení posklizňových zbytků v rozsahu 30 % až 60 %, akumulace SOC se v průměru pohybovala od 441 do 682 kg C/ha/rok při středním a vysokém vstupu N. Míra sekvestrace je pozitivní pro všechny kombinace úrovně výživy N a stupně zapravení posklizňových zbytků. Modelovaný vzorec akumulace SOC v ornici v systému ApCm zůstává obecně zachován i na úrovni jednotlivých krajů NUTS3. Na úrovni LAU1 je patrná nižší míra sekvestrace v nejzápadnějších a nejvýchodnějších okresech republiky.

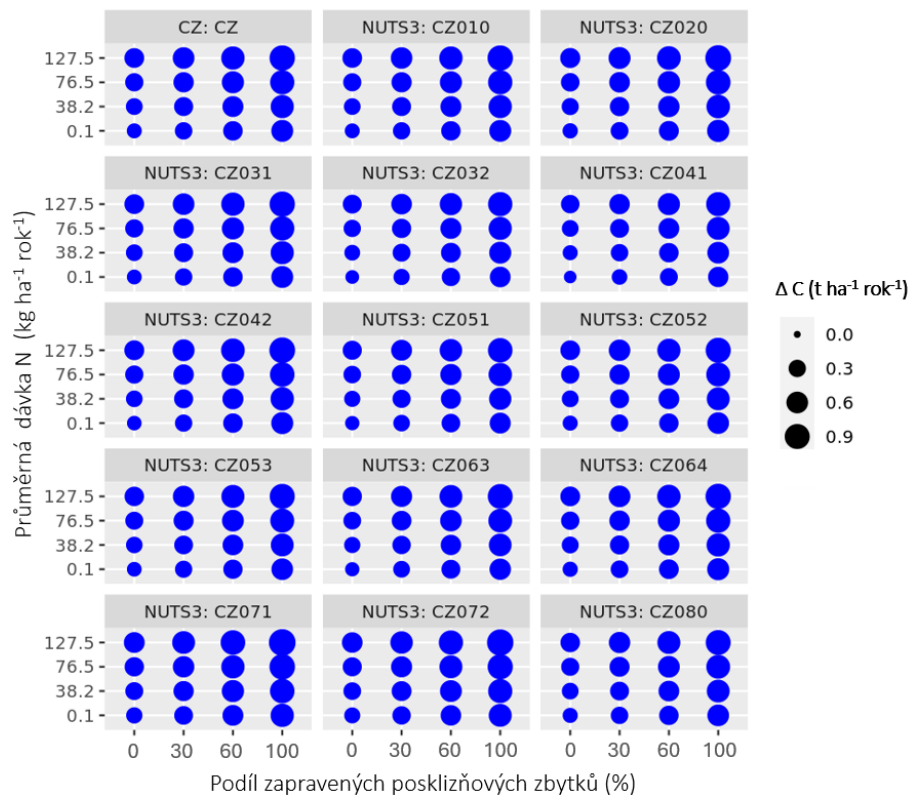
Obr. 10 Průměrná roční sekvestrace C v NUTS3 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému CpRg.



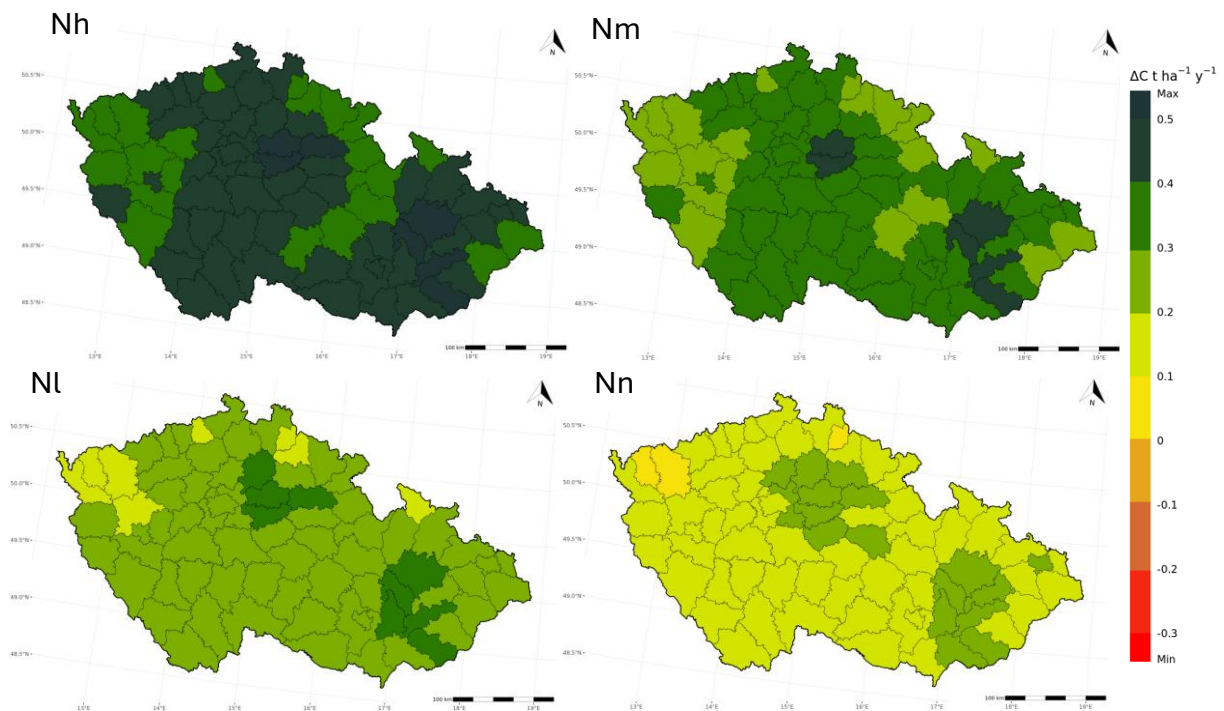
Obr. 11 Průměrná roční sekvestrace C (t/ha/rok) v LAU1 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému CpRg při 4 úrovních hnojení (bez zapravení posklizňových zbytků).



Obr. 12 Průměrná roční sekvestrace C v NUTS3 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému ApCm.



Obr. 13 Průměrná roční sekvestrace C (t/ha/rok) v LAU1 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému ApCm při 4 úrovních hnojení (bez zapravení posklizňových zbytků a nadzemní biomasy vojtěšky).



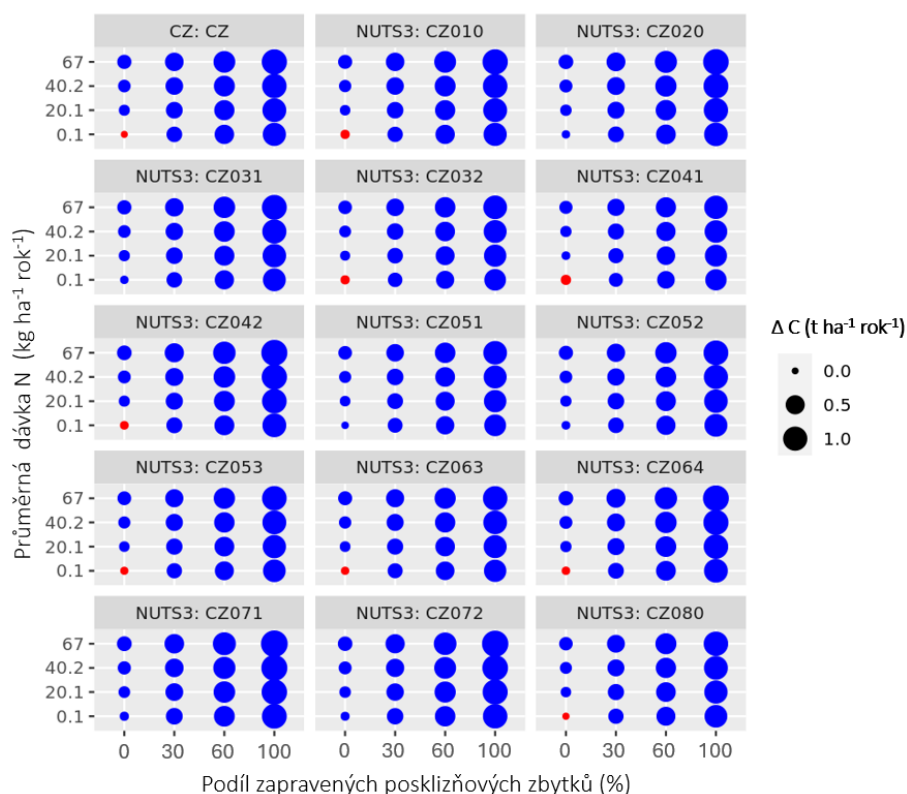
Systém hospodaření s orientací na živočišnou produkci – ochranný

Průměrná roční akumulace SOC v ornici v systému ApRg se pohybovala v rozmezí 90 až 1 022 kg C/ha/rok, přičemž odpovídající vstupy N v chlévském hnoji činily 40,2 kg N/ha/rok (střední vstup) a 67 kg N/ha/rok (vysoký vstup). Pokud se posklizňové zbytky ponechávaly na poli v rozsahu 30 %, akumulace SOC se v průměru pohybovala od 441 do 544 kg C/ha/rok při středním a vysokém vstupu N.

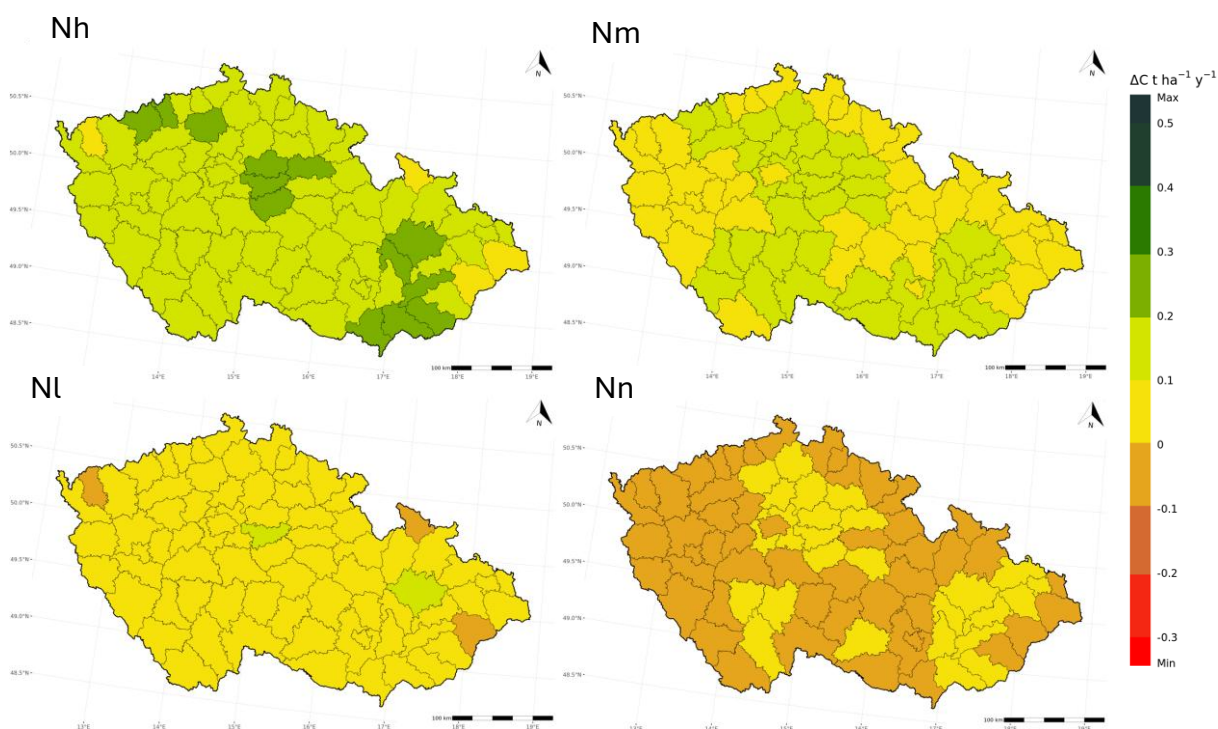
Míra sekvestrace je negativní pouze pro nehnojenou variantu se sklízením veškeré biomasy, pro všechny další kombinace úrovně výživy N a stupně zapravení posklizňových zbytků je pozitivní. Modelovaný vzorec akumulace SOC v ornici v systému ApCm zůstává obecně zachován i na úrovni jednotlivých krajů NUTS3. V oblastech s nižší nadmořskou výškou je míra sekvestrace vyšší.

Celkově výsledky poukazují na to, že účinnost opatření CF v různých regionech se liší v závislosti na konkrétních systémech hospodaření a klimatických podmínkách. Zatímco intenzivní komerčně orientované zemědělství (CpCm) vykazuje nižší potenciál sekvestrace C, ochranné formy kultivace půdy a vyvážená plodinná skladby systému rostlinné výroby (CpRg), integrované živočišné hospodaření (ApCm) a systémy setrvalého pěstování pícnin (ApRg) přispívají k dlouhodobému ukládání C do půdy, zejména pokud je alespoň část posklizňových zbytků nebo biomasy pícnin zapravena do půdy.

Obr. 14 Průměrná roční sekvestrace C v NUTS3 regionech za aktuálního klimatu (2000-2019) v modelovém systému ApRg.



Obr. 15 Průměrná roční sekvestrace C (t/ha/rok) v LAU1 regionech za aktuálního klimatu (2000–2019) v modelovém systému ApRg při 4 úrovních hnojení (bez zapravení nadzemní biomasy).



Sekvestrace SOC v ornici za budoucího klimatu

Dlouhodobá akumulace organického uhlíku v ornici (SOC) v rámci všech modelových systémů byla projektována za předpokladu kontinuální aplikace souvisejících postupů hospodaření po celé století (2000–2100), bez jakékoli změny agrotechniky, kultivarových vlastností a množství nebo kvality vstupů organického uhlíku a dusíkatých hnojiv do systému. Délka vegetační doby plodin byla nastavena tak, aby zohlednila rostoucí teploty během celého simulačního období.

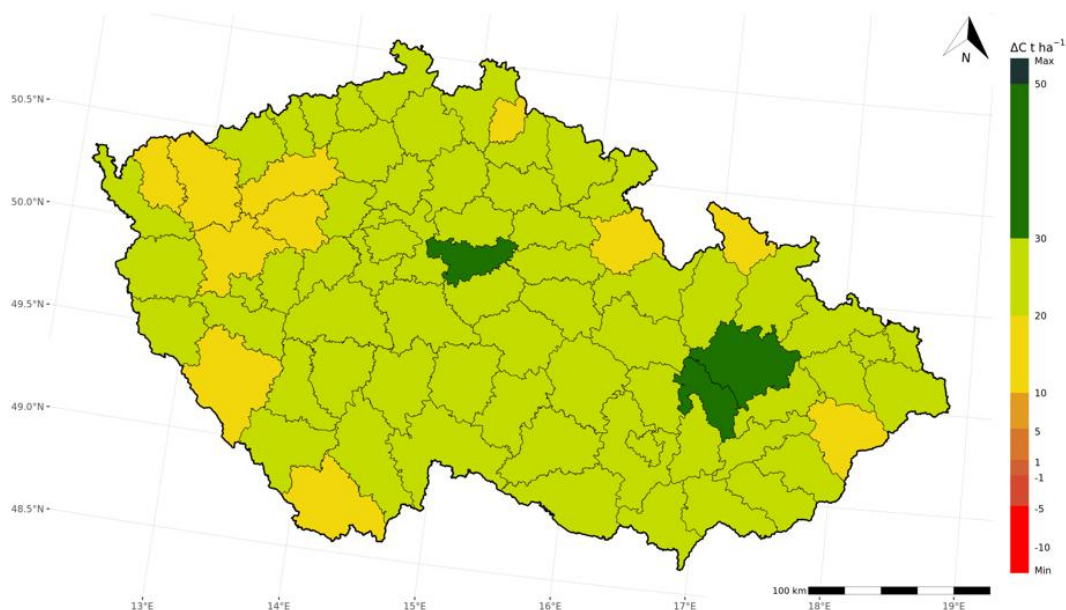
System komerčního hospodaření zaměřený na produkci plodin

Ve srovnání se začátkem století se průměrná projektovaná dlouhodobá bilance akumulace SOC v ornici ve scénáři SSP2-4.5 pro období 2040–2060 i 2080–2100 zvýšila v intenzivněji hnojených systémech (Nm, Nh) v rozmezí od ca. 100 kg C/ha/rok bez zaorávání posklizňové biomasy až do 400–500 kg C/ha/rok při zaorání všech posklizňových zbytků. Při nízké úrovni hnojení (NI) lze sekvestraci předpokládat pouze při zaorání podstatné části posklizňových zbytků, a to do úrovně ca. 200 kg C/ha/rok. Regionální rozložení dlouhodobé akumulace SOC v ornici je poměrně vyrovnané, mírně snížené hodnoty jsou patrné pro některé okresy na západě a severu Čech a severu Moravy.

Tab. 3 Sekvestrace C v systému CpCm (průměr, minimum – maximum; t C/ha/rok) v období 2040-2060 vzhledem k referenčnímu období (R – podíl zapravených posklizňových zbytků). Scénář SSP2-4.5.

Systém / intenzita hnojení		R0	R30	R60	R100
CpCm	Nh	0,11 (0,05 - 0,18)	0,23 (0,16 - 0,34)	0,35 (0,27 - 0,50)	0,51 (0,39 - 0,72)
	Nm	0,07 (0,03 - 0,13)	0,17 (0,11 - 0,24)	0,26 (0,19 - 0,36)	0,38 (0,29 - 0,50)
	NI	0,00 (-0,04 - 0,04)	0,06 (0,01 - 0,10)	0,12 (0,06 - 0,18)	0,19 (0,11 - 0,28)
	Nn	-0,12 (-0,14 - -0,10)	-0,11 (-0,13 - -0,08)	-0,10 (-0,12 - -0,07)	-0,08 (-0,11 - -0,04)

Obr. 16 Mapa sekvestračního potenciálu orných půd ČR (t C/ha) v horizontu 80 let pro modelový systém CpCm a klimatologický scénář SSP2-4.5 (varianta: vysoká intenzita hnojení N, bez statkových hnojiv živočišného původu, zapravení 60 % posklizňových zbytků).



Systém ochranného hospodaření zaměřený na produkci plodin

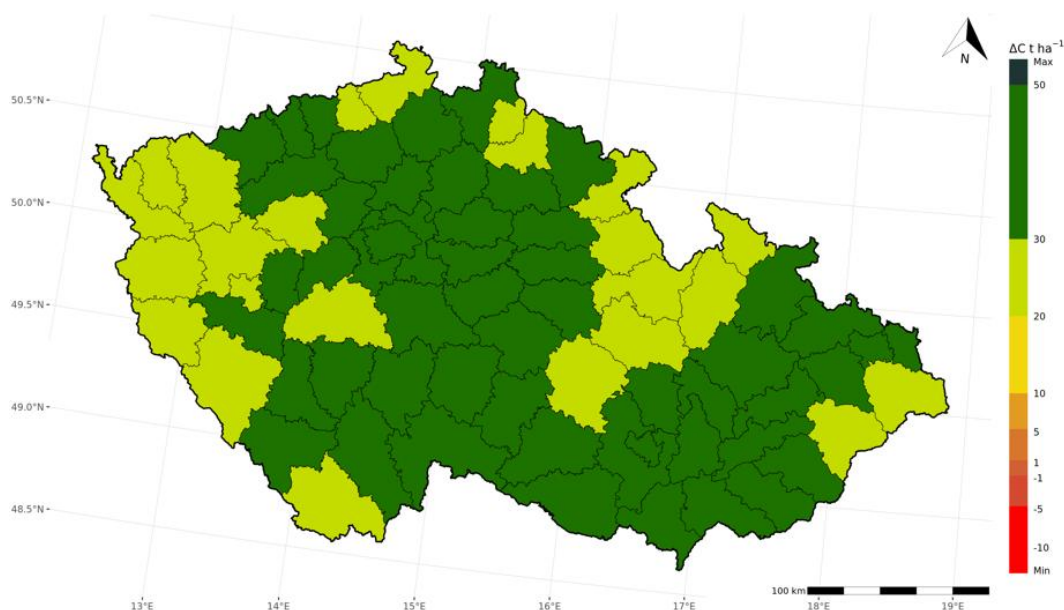
Ve srovnání se začátkem století je průměrná projektovaná dlouhodobá bilance akumulace SOC v ornici pozitivní, a to i při nízké úrovni výživy a nižším % zaorání posklizňových zbytků. V intenzivněji hnojených systémech (Nm, Nh) se roční sekvestrace pohybovala v rozmezí od ca. 200 kg C/ha/rok bez zaorávání posklizňové biomasy až do 500-600 kg C/ha/rok při zaorání všech posklizňových zbytků. Při nízké úrovni hnojení (NI) lze sekvestraci předpokládat pouze na úrovni od 130 kg C/ha/rok bez zaorávání slámy, až po ca 400 kg C/ha/rok při zaorání veškerých

posklizňových zbytků. Ještě nižší – ca. poloviční – je míra sekvestrace v nehojených systémech. Oproti předchozímu modelovému systému jsou hodnoty sekvestrace vyšší a vyrovnanější (o něco menší vliv intenzity hnojení), což souvisí jak se zařazením N-fixujících plodin (hrách) a meziplodin, tak i uplatňováním půdoochranných postupů kultivace. Regionální rozložení dlouhodobé akumulace SOC v ornici je poměrně vyrovnané, mírně snížené hodnoty jsou patrné pro některé okresy na západě a severu Čech a Moravy a v Beskydech.

Tab. 4 Roční sekvestrace C v systému CpRg (průměr, minimum – maximum; t/ha) v období 2040-2060 vzhledem k referenčnímu období 2000-2019 (R0-R100 – podíl zapravených posklizňových zbytků). Scénář SSP2-4.5.

Systém / intenzita hnojení		R0	R30	R60	R100
CpRg	Nh	0,23 (0,11 - 0,36)	0,34 (0,21 - 0,51)	0,46 (0,31 - 0,67)	0,61 (0,46 - 0,88)
	Nm	0,19 (0,09 - 0,29)	0,29 (0,17 - 0,42)	0,39 (0,26 - 0,54)	0,53 (0,39 - 0,72)
	Nl	0,13 (0,04 - 0,21)	0,20 (0,11 - 0,30)	0,28 (0,18 - 0,40)	0,39 (0,28 - 0,53)
	Nn	0,03 (-0,04 - 0,09)	0,07 (0,00 - 0,15)	0,12 (0,04 - 0,21)	0,20 (0,12 - 0,30)

Obr. 17 Mapa sekvestračního potenciálu orných půd ČR (t C/ha) v horizontu 80 let pro modelový systém CpRg a klimatologický scénář SSP2-4.5 (varianta: vysoká intenzita hnojení N, bez statkových hnojiv živočišného původu, zapravení 60 % posklizňových zbytků, bez dodatečné závlahy).



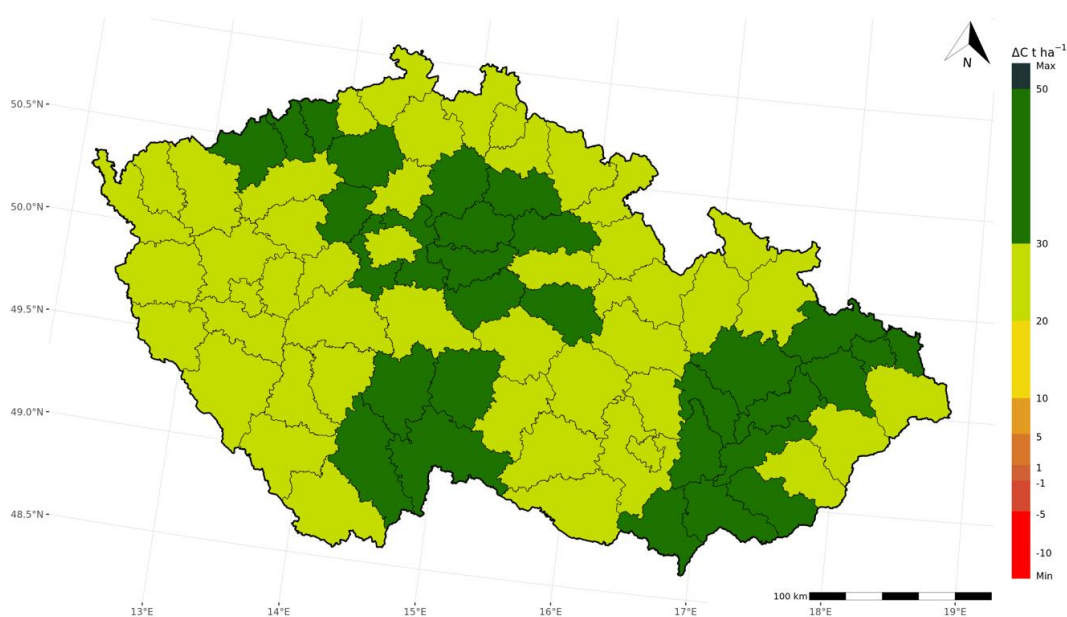
Systém komerčního hospodaření zaměřený na živočišnou výrobu

Ve srovnání se začátkem století vykazovala průměrná projektovaná dlouhodobá bilance akumulace SOC v ornici pozitivní odezvu ve scénáři SSP2-4.5 pro období 2040–2060 i 2080–2100, v rozmezí průměrů od 140 kg C/ha/rok u nehnojené varianty bez zaorání posklizňových zbytků (biomasy) až po 680 kg C/ha/rok u varianty s nejvyšší intenzitou hnojení i zaorání slámy, resp. biomasy vojtěšky. Oproti předchozím systémům je patrný nižší vliv intenzity hnojení, což je dáno zařazením dusík-fixující plodiny (vojtěšky), která tvoří 50% podíl v rotaci. Regionální variabilita v rámci okresů je poměrně nízká, při detailnějším pohledu na jednotlivé simulační jednotky jsou patrné významnější rozdíly, podmíněné charakterem půd a klimatu.

Tab. 5 Roční sekvestrace C v systému ApCm (průměr, minimum – maximum; t/ha) v období 2040-2060 vzhledem k referenčnímu období 2000-2019 (R0-R100 – podíl zapravených posklizňových zbytků). Scénář SSP2-4.5.

Systém / intenzita hnojení		R0	R30	R60	R100
ApCm	Nh	0,32 (0,25 - 0,44)	0,42 (0,33 - 0,59)	0,54 (0,43 - 0,74)	0,68 (0,55 - 0,94)
	Nm	0,25 (0,19 - 0,36)	0,35 (0,28 - 0,49)	0,46 (0,37 - 0,64)	0,61 (0,49 - 0,85)
	Nl	0,19 (0,13 - 0,29)	0,29 (0,22 - 0,42)	0,40 (0,31 - 0,56)	0,55 (0,43 - 0,76)
	Nn	0,14 (0,08 - 0,22)	0,23 (0,15 - 0,34)	0,33 (0,24 - 0,48)	0,47 (0,35 - 0,67)

Obr. 18 Mapa sekvestračního potenciálu orných půd ČR (t C/ha) v horizontu 80 let pro modelový systém komerčního hospodaření, se živočišnou výrobou (ApCm) a klimatologický scénář SSP2-4.5 (varianta: vysoká intenzita hnojení N, zapravení 30 % posklizňových zbytků/biomasy).



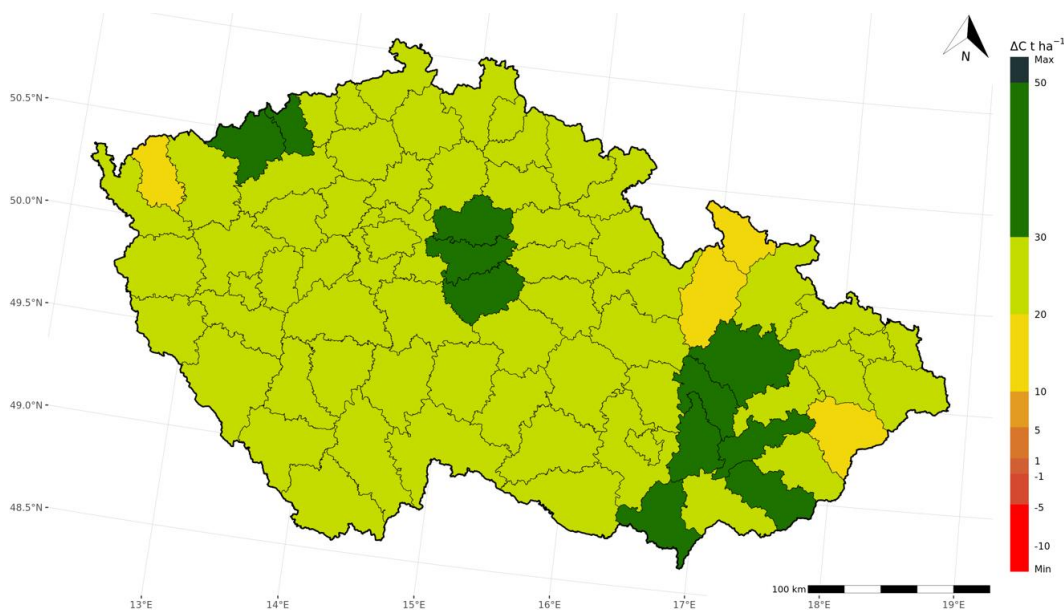
Systém hospodaření s orientací na živočišnou produkci – ochranný

Ve srovnání se začátkem století vykazovala ve scénáři SSP2-4.5 průměrná akumulace SOC v ornici pozitivní odezvu pro období 2040–2060 i 2080–2100 a pro všechny úrovně hnojení i retence biomasy. Průměrná míra sekvestrace se pohybovala v rozmezí od 20 kg C/ha/rok u nehnojené varianty bez zaorání biomasy až po 880 kg C/ha/rok u varianty s nejvyšší intenzitou hnojení i zaorání biomasy. Oproti předchozím systémům (zejména CpCm a CpRg) je patrný nižší vliv intenzity hnojení, což je dáno přítomností pouze N-fixující plodiny. Regionální variabilita v rámci okresů je poměrně nízká, při detailnějším pohledu na jednotlivé simulační jednotky jsou patrné významnější rozdíly, podmíněné charakterem půd a klimatu.

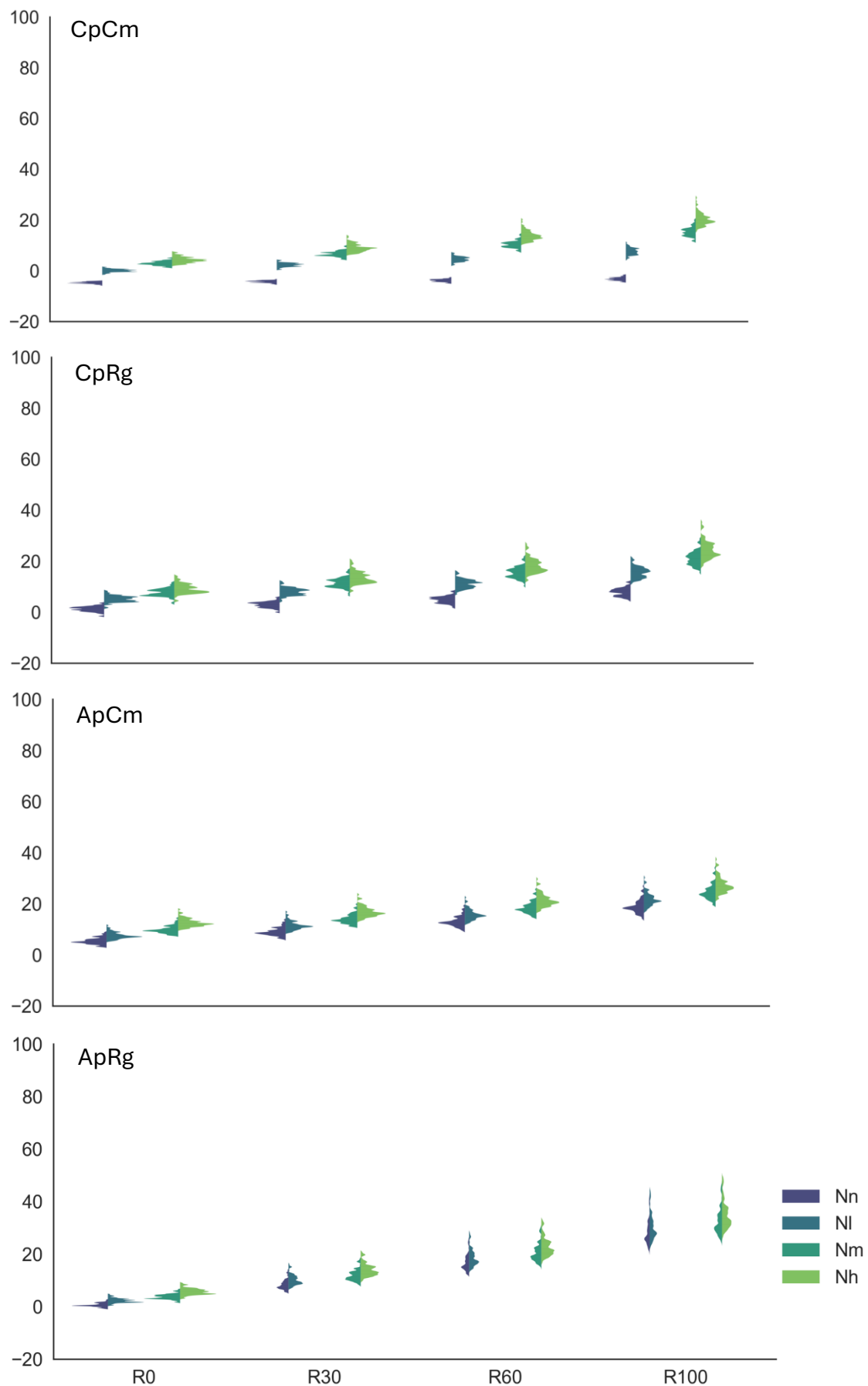
Tab. 6 Roční sekvestrace C v ApRg (průměr, minimum – maximum; t/ha) v období 2040-2060 vzhledem k referenčnímu období 2000-2019 (R0-R100 – podíl zapravených posklizňových zbytků). Scénář SSP2-4.5.

Systém / intenzita hnojení		R0	R30	R60	R100
ApRg	Nh	0,14 (0,08 - 0,22)	0,35 (0,25 - 0,52)	0,58 (0,43 - 0,82)	0,88 (0,67 - 1,23)
	Nm	0,10 (0,04 - 0,16)	0,30 (0,21 - 0,45)	0,52 (0,38 - 0,75)	0,81 (0,62 - 1,16)
	Nl	0,06 (0,01 - 0,12)	0,26 (0,18 - 0,40)	0,47 (0,35 - 0,70)	0,76 (0,58 - 1,10)
	Nn	0,02 (-0,02 - 0,07)	0,21 (0,14 - 0,35)	0,42 (0,31 - 0,64)	0,71 (0,53 - 1,04)

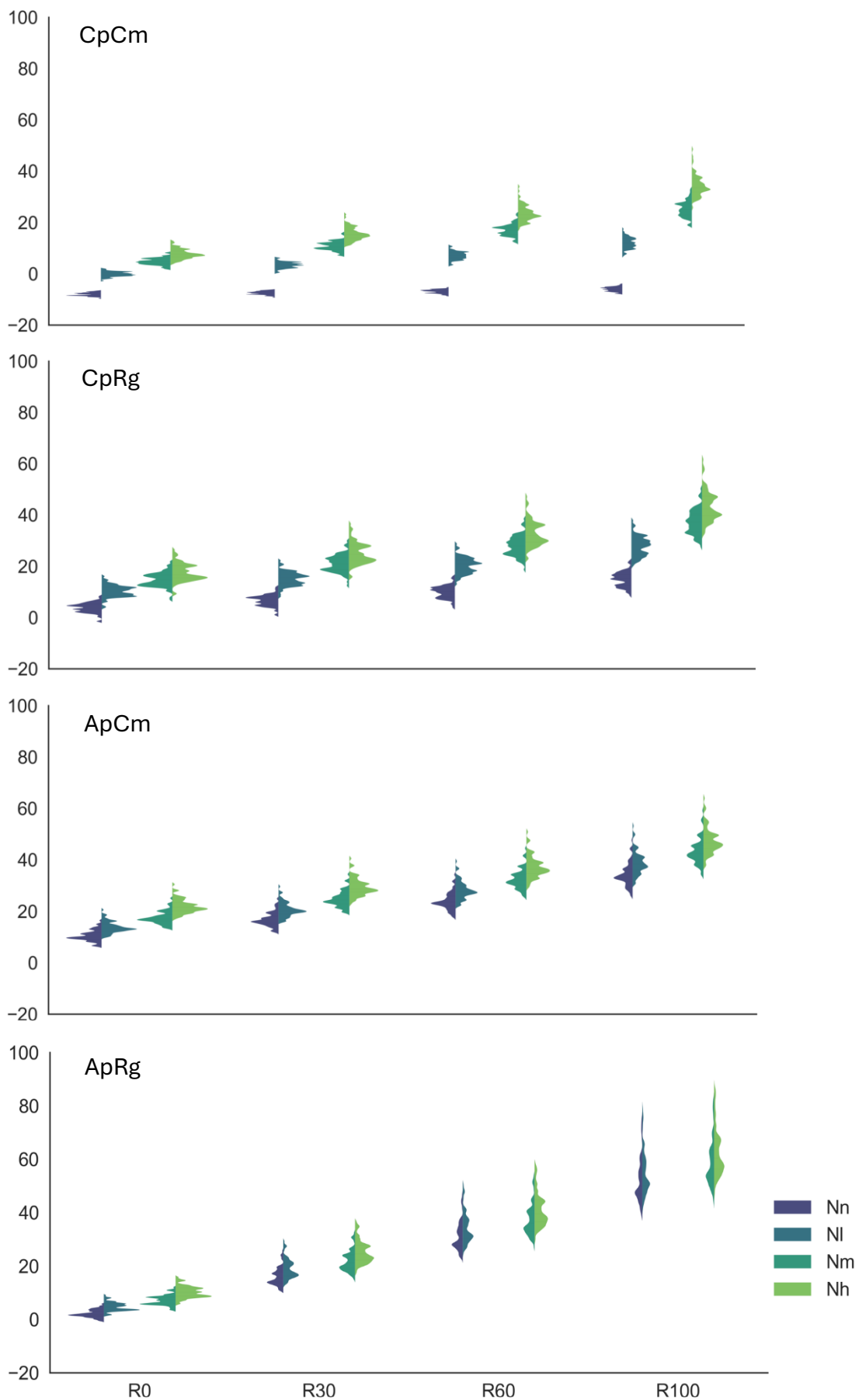
Obr. 19 Mapa sekvestračního potenciálu orných půd ČR (t C/ha) v horizontu 80 let pro modelový systém komerčního hospodaření, se živočišnou výrobou (ApRg) a klimatologický scénář SSP2-4.5 (varianta: vysoká intenzita hnojení N, zapravení 30 % biomasy).



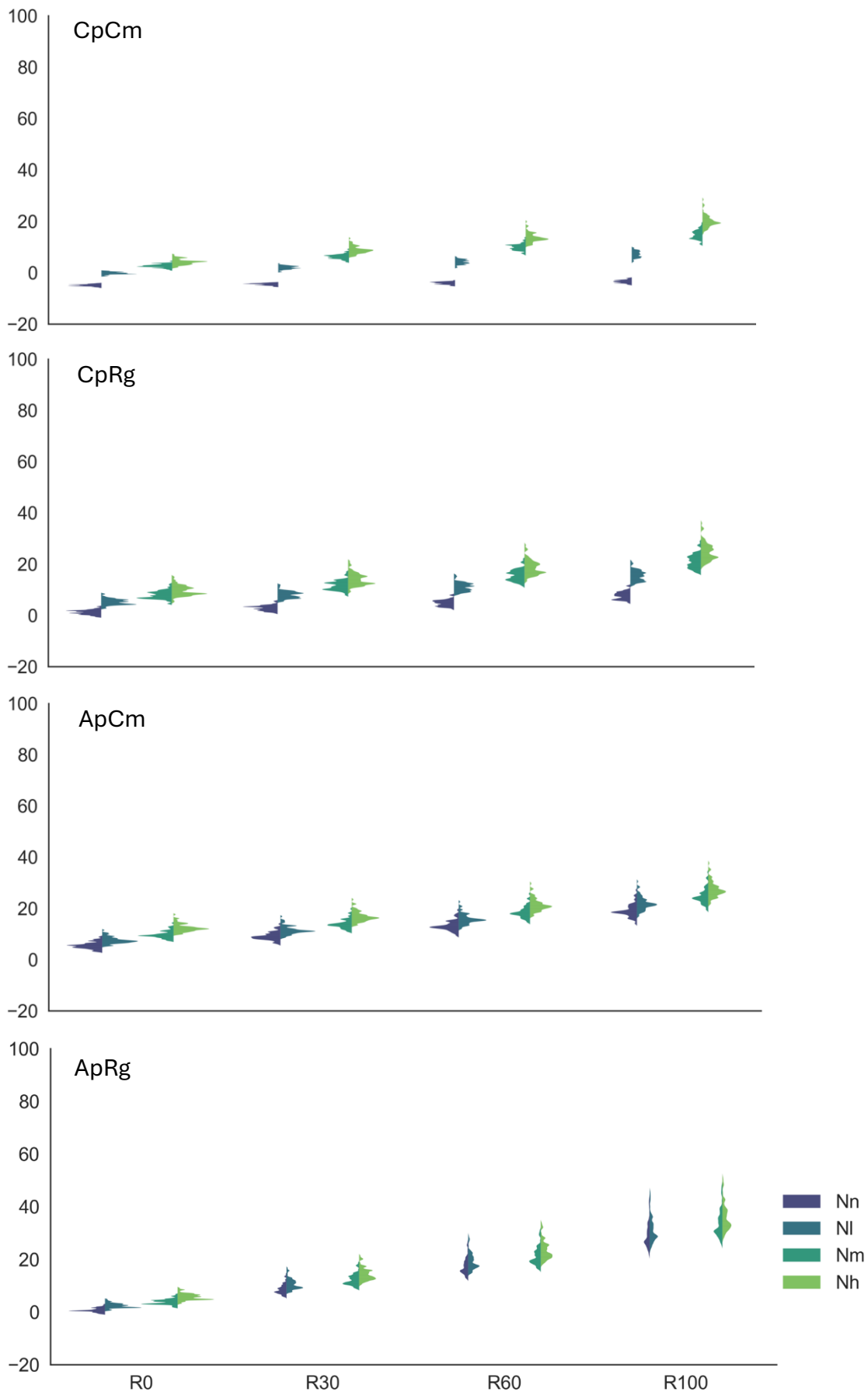
Obr. 20 Sekvestrační potenciál C v povrchové 30 cm vrstvě půdy za období 40 let (t/ha; změna mezi obdobími 2040-2060 a 2000-2019; scénář SSP2-4.5; agregace LAU1), v závislosti na systému hospodaření, intenzitě hnojení a úrovni zapravení posklizňových zbytků.



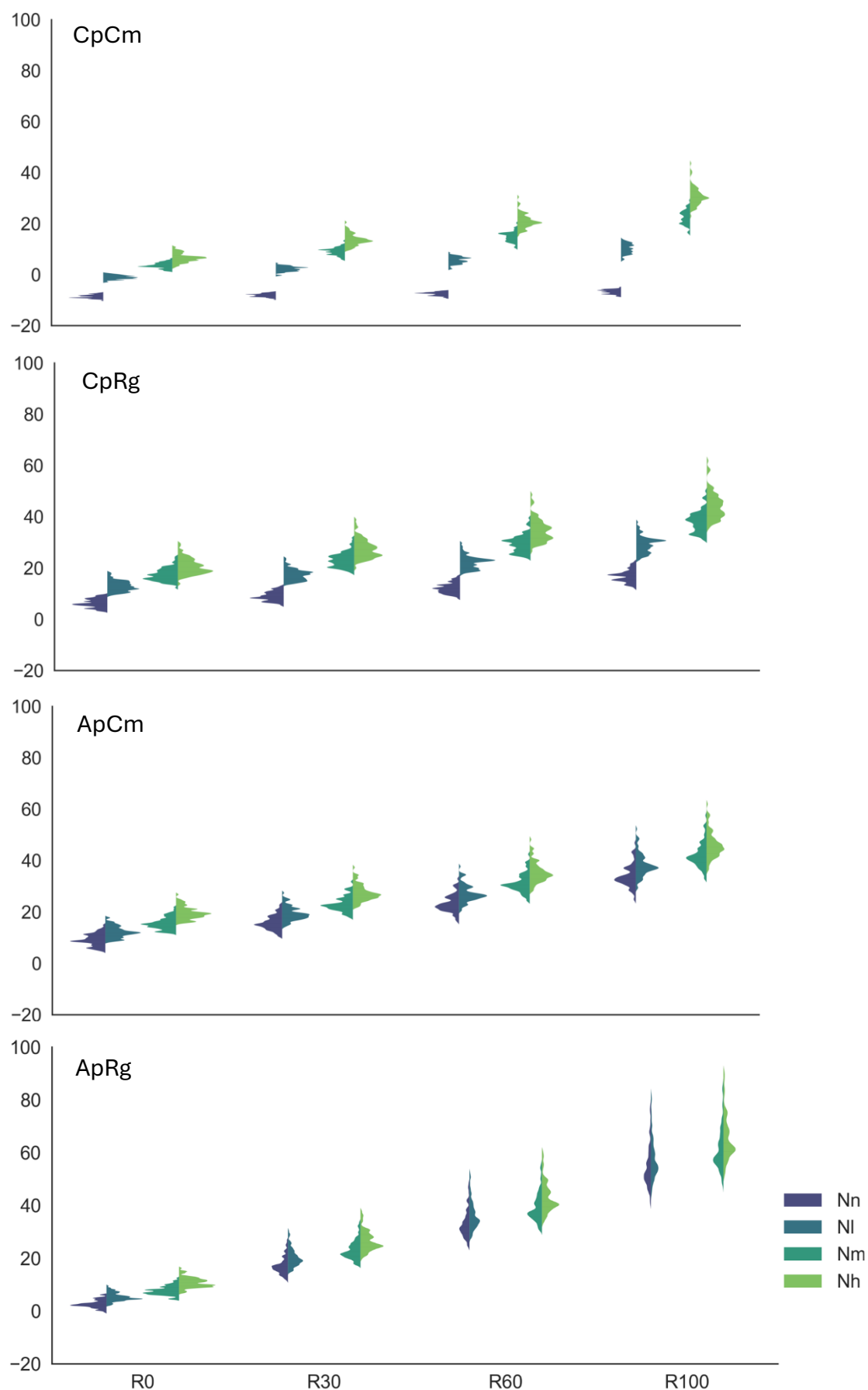
Obr. 21 Sekvestrační potenciál C v povrchové 30c m vrstvě půdy za období 80 let (t/ha; změna mezi obdobími 2080-2100 a 2000-2019; scénář SSP2-4.5; agregace LAU1), v závislosti na systému hospodaření, intenzitě hnojení a úrovni zapravení posklizňových zbytků.



Obr. 22 Sekvestrační potenciál C v povrchové 30 cm vrstvě půdy za období 40 let (t/ha; změna mezi obdobími 2040-2060 a 2000-2019; scénář SSP5-8.5; agregace LAU1), v závislosti na systému hospodaření, intenzitě hnojení a úrovni zapravení posklizňových zbytků.



Obr. 23 Sekvestrační potenciál C v povrchové 30 cm vrstvě půdy za období 80 let (t/ha; změna mezi obdobími 2080-2100 a 2000-2019; scénář SSP5-8.5; agregace LAU1), v závislosti na systému hospodaření, intenzitě hnojení a úrovni zapravení posklizňových zbytků.



Dílčí závěry

Výsledky simulací naznačují, že v příštích desetiletích lze pozitivní sekvestraci C v orné půdě dosáhnout v komerčně i ochranně zaměřených systémech a při různé plodinové skladbě. Potenciál sekvestrace C je zároveň silně závislý na systému hospodaření, intenzitě výživy rostlin a stupni zaorání posklizňových zbytků.

V systémech zaměřených na intenzivní produkci komerčně uplatnitelných komodit bez dodatečného vstupu statkových hnojiv je potenciál sekvestrace vyšší, pokud pěstební systém zahrnuje také redukované zpracování půdy, zlepšující plodiny (leguminózy) a meziplodiny. Bez těchto prvků je potenciál sekvestrace silně závislý na intenzitě hnojení a míře zapravení posklizňových zbytků. Vyšší potenciály sekvestrace – alespoň 20 t C/ha/80 let – jsou v těchto systémech predikovány pouze při vyšší intenzitě výživy a při zaorání alespoň 60 % posklizňových zbytků. Při spolupůsobení všech pro-sekvestračních opatření (zlepšující plodina, meziplodiny, minimalizace, zaorání posklizňových zbytků) lze v intenzivně hnojených systémech předpokládat potenciál dodatečné akumulace C v ornici až dvojnásobný, a to ve výši 35-45 t C/ha/80 let.

Tato úroveň je dosažitelná rovněž v systémech s částečnou nebo plnou orientací na produkci píce a s návratem organické hmoty ve formě statkových hnojiv. Reálně zde nelze předpokládat vyšší míru zaorání posklizňových zbytků a píce kvůli jejich užití v chovech zvířat (krmivo, podestýlka), při 30% zaorání byl potenciál sekvestrace predikován na úrovni 20-25 (30) t C/ha/80 let.

U všech simulovaných systémů a jejich variant se projevila půdně-klimatická heterogenita přírodních podmínek. Rozdíly v sekvestračním potenciálu mezi okresy byly v mnoha případech více než dvojnásobné. Tato skutečnost se může významně proplat do rentability příslušných pro-sekvestračních opatření, což zakládá možnost regionalizace opatření a jejich cílené aplikace pouze v regionech s nejvyšším očekávaným efektem. Poznání regionálních rozdílů při stejném opatření tak mohou ovlivnit rozhodování zemědělců o nastavení parametrů projektů uhlíkového zemědělství.

5. Ekonomické aspekty sekvestrace C v modelových systémech

Předložené ekonomické hodnocení demonstruje možnosti spojení biofyzikálních simulací a ekonomického modelování pro hodnocení implementačního potenciálu opatření uhlíkového zemědělství. Cílem analýzy je vyčíslit mezní náklady opatření uhlíkového zemědělství na příkladu opatření, kterým je inkorporace posklizňových zbytků obilnin a biomasy vojtěšky seté do půdního profilu namísto jejich tržní či krmné valorizace. Použitý metodologický rámec se zaměřuje na kvantifikaci stínové ceny sekvestrace (Čechura a kol., 2025). Stínová cena sekvestrace půdního organického uhlíku je zde definovaná jako taková prahová cena uhlíku (Break-even Carbon Price), která představuje ekonomický bod indiference mezi konvenčním a regenerativním managementem biomasy. Stínová cena je kvantifikována v rámci čtyř modelových systémů hospodaření, které jsou validovány pro různé úrovně intenzity dusíkaté výživy, což umožní posoudit interakci mezi úrovní hnojení a efektivitou ukládání uhlíku. Komparativní analýza vychází z modelování ztráty marginálního zisku, kde zaorání organické hmoty posklizňových zbytků snižuje úroveň její potenciální kapitalizace, popřípadě v systémech se živočišnou výrobou přímo konkuruje jejímu využití jako krmivového zdroje. Výsledná stínová cena tak definuje minimální úroveň externí kompenzace (např. formou uhlíkových kreditů či dotačních titulů), nezbytnou pro eliminaci ekonomické disparity mezi nejziskovější variantou s nulovým podílem zaorávání a environmentálně cíleným managementem s progresivní inkorporací biomasy.

Metodika

Výpočet vychází z ekonomické bilance farem zahrnutých v šetření nákladovosti zemědělských výrobků, prováděného Ústavem zemědělské ekonomiky a informací, v referenčním období let 2020–2024. Pro zajištění časové srovnatelnosti jsou využity stálé ceny. U tržních komodit (obilniny, řepka, hrách) byl do výpočtu zahrnut hrubý zisk, tj. rozdíl mezi vlastními náklady výrobku a průměrnou realizační cenou (za celé šetření; v Kč/t). U komodit využitých v rámci zemědělského podniku (pícniny – silážní kukuřice, vojtěška) byla místo zisku využita nákladová cena dle šetření ÚZEI (vč. amortizace založení porostu u víceleté pícniny). Tento přístup zohledňuje potřebu náhrady nutriční hodnoty pícnin při jejich (částečném) zaorání. Cena vedlejšího produktu (slámy) byla stanovena paušálně ve výši 2 000 Kč/ha, v souladu s metodikou výpočtu nákladů a výnosů The Teagasc Crops Costs & Returns (Collins and Phelan, 2026).

Pro predikci sekvestračního potenciálu orných půd byl ilustrativně využit simulační přístup zohledňující klimatický scénář SSP2-4.5. Modelování probíhá pro čtyři úrovně intenzity managementu biomasy:

- Scénář 0 (referenční): R0- 0% podíl zapravení (odvoz veškeré biomasy).
- Scénáře R30 / R60 / R100: Progresivní podíl inkorporace posklizňových zbytků (obilnin, řepky nebo hrachu), nebo biomasy vojtěšky.

Simulace výnosů plodin a sekvestrace C byly realizovány na 977 simulačních jednotkách a následně agregovány na úroveň LAU1. Výpočet stínové ceny byl proveden pro každý okres.

Tab. 7 Vlastní náklady výroby komodity a průměrné realizační ceny v Kč/t výrobku (zrno, píče).

		2020	2021	2022	2023	2024	průměr	hrubý zisk
Kukuřice na zrno	Vlastní náklady	3 155	3 236	4 241	4 660	4 423	3 943	1 026
	Prům. realizační cena	3 633	4 638	6 414	5 676	4 486	4 969	
Řepka ozimá	Vlastní náklady	10 054	11 767	13 475	14 094	15 923	13 063	-1 011
	Prům. realizační cena	9 882	11 512	16 041	11 695	11 126	12 051	
Pšenice ozimá	Vlastní náklady	3 681	3 688	4 633	4 896	4 815	4 343	651
	Prům. realizační cena	3 916	4 624	6 735	5 293	4 401	4 994	
Ječmen jarní	Vlastní náklady	3 824	3 888	4 432	5 301	4 642	4 417	1 143
	Prům. realizační cena	4 404	4 668	6 728	6 549	5 452	5 560	
Hrách	Vlastní náklady	7 514	7 197	7 611	9 714	12 430	8 893	-2 642
	Prům. realizační cena	4 890	5 654	7 145	6 761	6 808	6 252	
Kukuřice silážní	Vlastní náklady	758	797	936	1 082	1 033	921	-
Víceleté pícniny na OP	Vlastní náklady	491	503	641	687	611	587	-

Stínová cena sekvestrace 1 t CO₂e byla vypočtena jako podíl marginální ztráty zisku a marginálního přírůstku sekvestrovaného C oproti referenční variantě:

$$P_{SCO_2} = \frac{Z_{ref} - Z_{scen}}{\Delta C_{sekv} \cdot 3,67}$$

Z_{ref} - hrubý zisk při nulovém zapravení biomasy.

Z_{scen} - hrubý zisk při testované úrovni zapravení (30, 60, 100 %).

ΔC_{sekv} - dodatečné množství uloženého čistého uhlíku (t C/ha) zjištěné simulací.

Faktor 3,67 – přepočtení z čistého C na CO₂ eq.

Vzhledem k časovému horizontu simulace (2040–2060) je stínová cena kalkulována jako reálná stínová cena založená na pětiletém průměru referenčního období 2020–2024. Tento přístup vychází z předpokladu zachování současných ekonomických relací mezi vstupy a výstupy (tzv. *ceteris paribus* u tržních podmínek). Předpoklad fixních cenových relací (cenová parita) mezi vstupy a výstupy pro horizont 2040–2060 je zvolen z důvodu eliminace spekulativních vlivů a umožnění přímého srovnání environmentální efektivity zvolených agrotechnických opatření v čase.

Výsledná hodnota tak nepředstavuje predikci budoucí nominální tržní ceny uhlíkového kreditu, nýbrž vyjadřuje environmentální efektivitu opatření v dnešních ekonomických souvislostech. Pro účely srovnání s klimatickými scénáři SSP je tato cena uvažována jako základní nákladová hladina, od které se odvíjí ochota farmáře k adopci regenerativních opatření bez ohledu na budoucí míru inflace.

Výsledky

Výsledná stínová cena definuje ekonomickou bariéru adopce opatření uhlíkového zemědělství v modelových systémech sekvestrace. Pokud je tržní cena uhlíkových certifikátů na úrovni CRCF nebo podpora v rámci CSRD vyšší než vypočtená stínová cena, stává se opatření pro zemědělský podnik ekonomicky motivujícím bez nutnosti dalších dotací.

Tab. 8 Průměrné stínové ceny sekvestrace (Kč/t CO₂ eq.) pro modelové systémy, 4 úrovně hnojení a 3 úrovně intenzity opatření (zaorání posklizňových zbytků nebo biomasy vojtěšky: R30 – 30 % / R60 – 60 % / R100 – 100 %).

		R30	R60	R100
CpCm	Nh	1 215 Kč	1 196 Kč	1 195 Kč
	Nm	1 798 Kč	1 790 Kč	1 776 Kč
	NI	3 215 Kč	3 183 Kč	3 120 Kč
	Nn	16 895 Kč	16 321 Kč	15 581 Kč

CpRg	Nh	1 240 Kč	1 206 Kč	1 183 Kč
	Nm	1 543 Kč	1 474 Kč	1 406 Kč
	NI	1 975 Kč	1 882 Kč	1 770 Kč
	Nn	3 099 Kč	2 873 Kč	2 627 Kč

ApCm	Nh	8 271 Kč	8 315 Kč	8 446 Kč
	Nm	8 034 Kč	8 065 Kč	8 074 Kč
	NI	7 110 Kč	7 195 Kč	7 407 Kč
	Nn	5 951 Kč	6 195 Kč	6 421 Kč

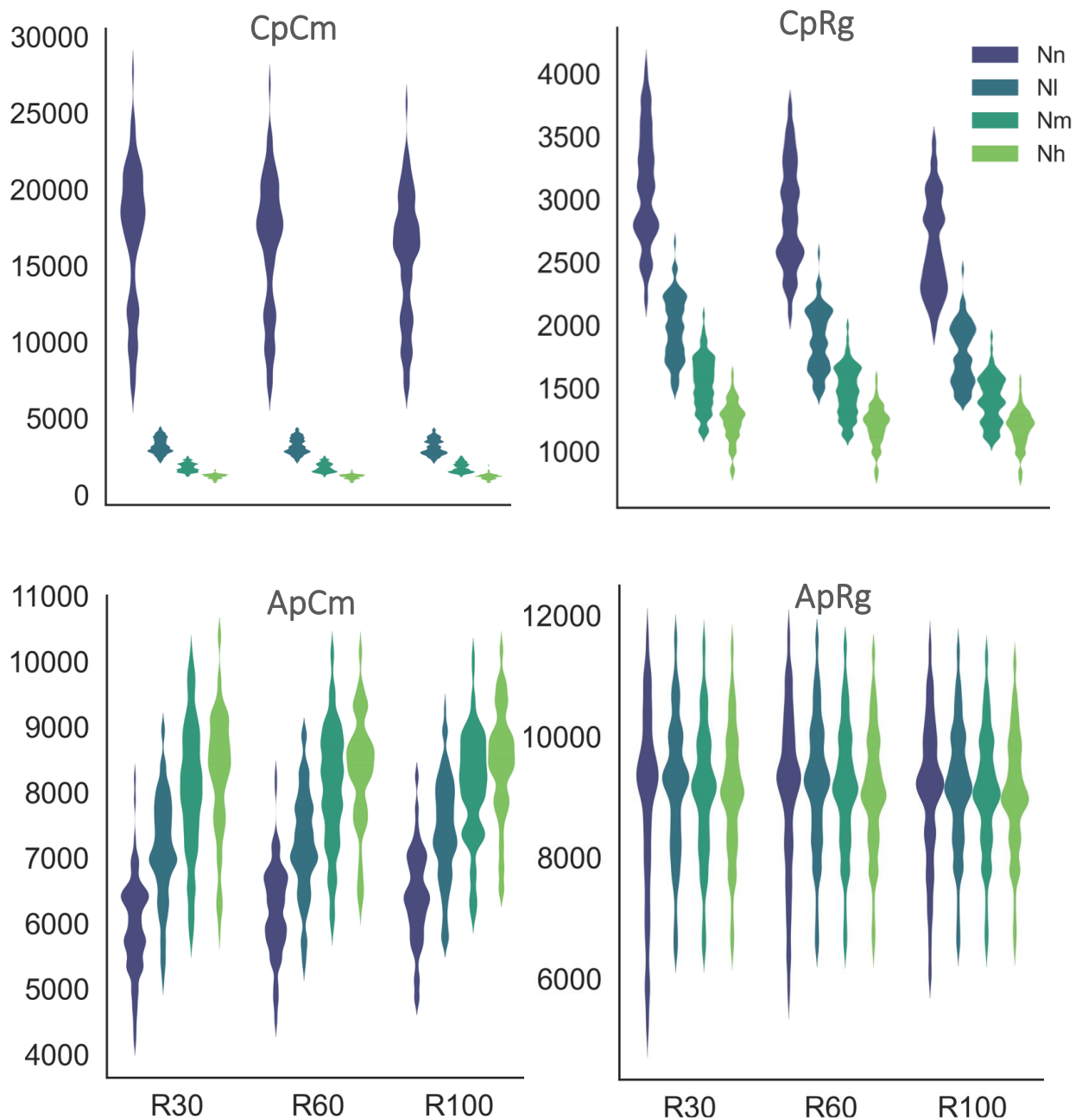
ApRg	Nh	9 060 Kč	9 066 Kč	9 016 Kč
	Nm	9 073 Kč	9 123 Kč	9 069 Kč
	NI	9 152 Kč	9 198 Kč	9 128 Kč
	Nn	8 871 Kč	9 044 Kč	9 044 Kč

Stínové ceny se podstatným způsobem liší mezi systémy pouze s rostlinnou výrobou (CpCm, CpRg) a kombinovanými systémy (ApCm, ApRg).

V systémech s pouze rostlinnou výrobou stínové ceny PS_{CO₂} klesají s rostoucí intenzifikací, přičemž v obou systémech dosahují při nejvyšší intenzitě pěstování (Nh) velmi podobné úrovně, v průměru kolem 1 200 Kč/t CO₂ eq. (mezi okresy v rozmezí 772–1936 Kč). Intenzita zapravení posklizňových zbytků má pouze marginální vliv, s rostoucím % zapravení hodnota PS mírně klesá. S klesající intenzitou hnojení hodnota PS narůstá, přičemž tento trend je progresivnější pro komerční systém rostlinné produkce (CpCm). Při úrovni hnojení Nm jsou stínové hodnoty sekvestrace mezi okresy v rozsahu 1 226 až 2 502 Kč, pro regenerativní variantu (CpRg) v rozsahu 1 105 až 1 914 Kč. Při nižších úrovních hnojení (NI, Nn) je nárůst stínových cen sekvestrace ještě

výraznější, a zejména při nehnojené variantě (Nn) u komerčního systému CpCm dosahuje vůbec nejvyšších hodnot v celém výsledkovém souboru (ca. 28 tis. Kč).

Obr. 24 Distribuce hodnot stínových cen sekvence (Kč/t CO₂ eq.) v jednotlivých okresech ČR (úroveň LAU1) pro 4 modelové systémy, 4 úrovně hnojení a 3 úrovně intenzity opatření (zaorání posklizňových zbytků nebo biomasy vojtěšky: R30 – 30 % / R60 – 60 % / R100 – 100 %).



Rozdíl oproti regenerativnímu systému vyplývá z absence N-fixujících plodin (hrách, meziplodiny). Při nižších úrovních hnojení jsou v systému CpCm bez dodatečného vstupu N dosahovány velmi nízké výnosy plodin, čímž se zvyšuje významnost paušálně stanoveného zisku z nezpracovaného vedlejšího produktu (pozn. tento poznatek není pro praxi příliš relevantní; nehnojené varianty jsou v simulacích nutné pouze jako krajní elementy intenzifikačního gradientu).

Z výsledků vyplývá, že pokud by cena uhlíkového kreditu byla stanovená v rozmezí 1 500 – 1 800 Kč/t CO₂ eq., ve většině půdně-klimatických podmínek a pro situace se střední a vyšší úrovní hnojení bude platba za sekvestraci dostatečně kompenzovat náklady (resp. ztráty) zemědělce plynoucí z provedení opatření (pokles výnosů hlavního produktu, ztráta zisku z prodeje slámy, případně dodatečné – zde nezapočtené – provozní náklady). Pro systémy s nízkou intenzitou aplikace N hnojiv, kde vstup N supluje např. leguminózy, bude takto stanovená cena atraktivní pouze v méně než polovině regionů.

V systémech se živočišnou výrobou se hodnocené opatření promítá do ekonomiky hospodaření mnohem intenzivněji, a to nejenom snížením zisku z prodeje komerčně uplatnitelných komodit (pšenice ozimá v systému ApCm), ale zejména snížením produkce píce. Píce má pro pěstitele vysokou finanční hodnotu, při zachování rozsahu chovu je nutné zapravený podíl biomasy kompenzovat nákupem, který by pro zachování rentability měl být krytý z příjmu za sekvestrovaný C. I přesto, že po zapravení biomasy je v těchto systémech predikována vysoká míra sekvestrace, stínové ceny C jsou násobně vyšší ve srovnání se systémy s pouze rostlinnou výrobou. Hodnoty PS při středně (Nm) a intenzivně hnojených variantách jsou při různé intenzitě zapravení biomasy v rozmezí průměrů 8 000 – 9 100 Kč. Vysoká stínová cena tedy reflektuje značné oportunitní náklady spojené s nutností kompenzovat nutriční deficit vzniklý zaoráním vojtěškové biomasy. Půdně-klimatické podmínky se promítají do variability hodnot PS velmi intenzivně, rozdíly jsou téměř dvojnásobné.

Aktuální tržní cena dobrovolných uhlíkových kreditů se pohybuje kolem 800–1 500 Kč/t CO₂ eq., navrhované opatření je v této formě vysoce nerentabilní. Vysoké stínové ceny sekvestrace indikují, že pro dosažení rentability v rámci realistických cen uhlíkových kreditů musí být navrhované opatření synergicky doprovázeno opatřeními v části živočišné výroby.

Výsledky ukazují, že intenzita minerální výživy dusíkem sehrává v ekonomické efektivitě sekvestrace klíčovou roli. Vyšší intenzita sice zvyšuje variabilní náklady na pěstování komodity, efekt vyšších nákladů je ale ve zvoleném přístupu kompenzován (ekonomická bilance se odvíjí od nákladů a výnosů na 1 t produktu). Optimální dusíkatá výživa stimuluje tvorbu nadzemní i podzemní biomasy, čímž se zvyšuje absolutní množství uhlíku vstupujícího do cyklu půdního uhlíku a inkorporace C narůstá. Z dlouhodobých pokusů (např. Šimon a Madaras, 2020) i z provedených simulací vyplývá, že v intenzivních systémech převládá produkční efekt a vyšší výnos biomasy při optimálním hnojení efektivněji rozkládá fixní náklady na jednotku sekvestrovaného C. Vyšší úroveň hnojení tedy vede ke snížení stínové ceny ve srovnání s extenzivními systémy, kde je sekvestrační potenciál limitován nedostatečným vstupem C pro tvorbu stabilního humusu. Intenzivní systémy jsou tedy z pohledu nákladů na tunu uloženého

CO_2 eq. efektivnější, neboť dokážou lépe využít fyziologický potenciál plodiny v daných půdně-klimatických podmínkách.

Zatímco v rostlinných systémech se stínové ceny blíží dosažitelným tržním hodnotám uhlíkových kreditů, v podnicích se živočišnou výrobou dosahují úrovně 8 000–9 100 Kč/t CO_2 eq, což reflektuje vysokou krmnou a nákladovou hodnotu vaječného žito. Zvolený ekonomický model není dostatečně komplexní pro zohlednění širšího kontextu vnitřních vztahů v podnicích se živočišnou výrobou a (cíleně) opomíjí prvky dotačního systému. Zohlednění dalších veřejných podpor, segmentace ploch za účelem precizního hnojení statkovými hnojivy na půdy s predispozicí pro vyšší sekvestraci a zohlednění technologických trendů mohou reálnou ekonomickou bariéru významně snižovat.

Pro dosažení reálné ekonomické motivace farmářů v souladu s evropským rámcem pro certifikaci pohlcování uhlíku (CRCF) bude nezbytné kombinovat tržní výnosy z prodeje uhlíkových kreditů s dalšími prvky veřejné podpory. Aktuální tržní cena uhlíku na dobrovolných trzích totiž nepokrývá marginální náklady sekvestrace, zejména v intenzivních systémech se živočišnou výrobou. Uhlíkové zemědělství by proto mělo být integrováno do širšího rámce nefinančního reportingu (CSRD), kde zapojení do dodavatelsko-odběratelských řetězců a kumulace dotačních titulů (např. ekoschémata SZP) umožní snížit reálnou ekonomickou bariéru a motivovat zemědělce k adopci těchto klimaticky pozitivních opatření.

Dílčí závěry

Předkládaná pilotní studie kvantifikuje ekonomickou náročnost sekvestrace C skrze stínové ceny, které definují nezbytný bod zvratu pro adopci vybraného opatření. Zvolený postup umožňuje hodnocení agro-technologických postupů a opatření, které harmonizují klimatické cíle s ekonomickou stabilitou, uzavřeným koloběhem živin a nutriční soběstačností zemědělských podniků v horizontu příštích desetiletí. Z hlediska zaměření projektu QK23020056 byly zvoleny typové (modelové) pěstební postupy a jednoduchá ekonomická kalkulace, avšak cílenější specifikace postupů a detailnější ekonomický model rozšířený pro podniky se živočišnou výrobou nebo provozující BPS mohou vytvořit klíčové podklady pro stanovení rozsahu půdně-klimatických podmínek nebo typů podniků, pro které by příslušné pro-sekvestrační opatření bylo rentabilní při reálných cenách uhlíkových kreditů.

6. Predikce sekvestrace C se zohledněním skutečné plodinové skladby

Modelové systémy hospodaření představené v předchozí kapitole reprezentují odlišné zaměření farem a rozdíly v intenzitě hospodaření, nicméně plodinová skladba i agrotechnika jsou značně zjednodušené. Tento přístup je adekvátní cíli vypočítat dosažitelné hodnoty sekvestrace C při různém hospodaření, informace však není dostatečně přesná pro odhad skutečné míry sekvestrace C v určitém regionu či podniku.

Z hlediska veřejně dostupných dat není prozatím možné ve větším měřítku provádět simulace skutečných sekvencí plodin a reálně aplikované agrotechniky např. na dílech půdních bloků. K překlenutí nedostatku empirických dat o rotacích pro biofyzikální a ekonomické modely je využíván postup generování osevních sledů podle zastoupení plodin, který představuje akceptovatelnou míru zjednodušení a zároveň poskytuje lepší shodu simulované plodinové skladby se skutečností. Sestavení sledů vychází z informací o podílech pěstovaných plodin v daném regionu či podniku. S přihlédnutím k míře vhodnosti plodin po zařazení do osevního postupu po sobě lze iterativním modelem generovat sadu sledů s definovanou maximální délkou. Každý osevní sled má na daném území své proporční zastoupení tak, aby celkové zastoupení plodin v modelovém systému osevních sledů bylo totožné se vstupní hodnotou.

Tato aproximace je využívána v regionálních studiích (např. Frank a kol., 2015, Balkovič a kol., 2020). Jako příklad možného využití zde uvádíme kalkulaci sekvestrace C v systémech ekologického (EZ) a konvenčního (KZ) zemědělství.

Metodika

Pro sestavení osevních sledů byly využity statistické údaje o výměrách pěstovaných plodin získané z LPIS z let 2020 až 2022. Do seznamu plodin vybraných pro simulace byly zařazeny pouze plodiny s nejvyšším plošným zastoupením, a to do celkového podílu ca 75–85 % výměry ČR. Za dané období bylo vypočteno jejich průměrné plošné zastoupení, které bylo následně proporčně upraveno tak, aby součet podílů činil 100 % (Tab. 9).

Výchozím bodem výpočetního postupu je seznam plodin s přiřazenými podíly zastoupení za celé území ČR v rámci KZ a EZ.

K sestavení osevních sledů na základě relativního zastoupení plodin byl zvolen model CropRota (Schönhart a kol., 2011). Tento lineární optimalizační model byl vyvinutý ke generování agronomicky optimálních osevních postupů na základě pozorovaných dat o využití půdy. Model propojuje agronomická kritéria s historickými údaji o zastoupení plodin na úrovni pole, farmy nebo regionu. Hlavním principem fungování je maximalizace celkové agronomické hodnoty sledu plodin v rámci rotace. Model využívá expertní matici bodových hodnot, která kvantifikuje vhodnost následných plodin, a aplikuje omezení pro frekvenci výskytu určitých plodin (např. maximálně jednou za 4 roky). Vstupem do modelu jsou relativní podíly plodin v daném časovém úseku.

Tab. 9 Upravené podíly plodin (standardizovaný hektar) pro generování osevních sledů.

Plodina	KZ	EZ
Pšenice ozimá	36%	13%
Řepka ozimá	17%	
Kukuřice	15%	2%
Ječmen jarní	10%	4%
Ječmen ozimý	6%	1%
Pšenice jarní	3%	3%
Cukrovka	3%	
Vojtěška	3%	12%
Jetel	3%	12%
Oves	2%	12%
Mák setý jarní	2%	

Plodina	KZ	EZ
Trávy		8%
Jetelotravní směs		8%
Tritikale ozimé		3%
Žito ozimé		3%
Slunečnice		
Hrách		2%
Pšenice špalda		8%
Luskoobilné směsy		2%
Kmín kořený		2%
Tritikale jarní		2%
Pohanka obecná		2%

Původní autorská verze CropRota, naprogramovaná v softwaru GAMS, byla pro účely vytvoření tohoto výstupu nahrazena programem *freecrot* (Želazny, 2025), který implementuje v programovacím jazyce Python model osevních sledů a volitelně jej rozšiřuje k podpoře dvou – a víceletých plodin. V prvním kroku byly generovány osevní postupy s periodou nejvíce šesti let. Plodiny s vyšším podílem ve vstupních datech mají ve vygenerovaných osevních postupech vyšší zastoupení (a naopak). Vytvořené postupy zároveň upřednostňují dvojice po sobě jdoucích plodin, jejichž častější výskyt zrcadlí reálnou zemědělskou praxi. Matice vhodnosti následování plodin po sobě byla převzata z původní práce Schönhart a kol., 2011.

Výše uvedené dvě podmínky se mohou někdy dostat do vzájemného rozporu, z tohoto důvodu byly pro každý systém generovány tři sady osevních postupů, přičemž těmto podmínkám byly přikládány různé váhy. Výsledné osevní postupy byly následně sloučeny.

Definice hospodaření v pěstebních systémech

Pěstování v rámci každého osevního postupu bylo poté simulováno s využitím prvků modelu EPIC-IIASA CZ. Simulovaná agrotechnika v osevních postupech ekologického systému zahrnovala hlubší zpracování půdy než v konvenčním systému, což reflektuje odlišné strategie pro regulace plevelů (případně výdrolu). K plodinám konvenčního systému byla zvolena celková dávka N na střední úrovni (tj. 60 % maximální dávky definované nitrátovou směrnicí), přičemž 30 % této dávky bylo aplikováno ve formě statkových hnojiv.

U ekologického systému byl vstup N z hnojiv nastaven na poloviční úroveň (30 % maximální dávky dle NS) a pouze ve formě statkových hnojiv. Toto nastavení vychází z předpokladu, že dodatečný N se do systému dostává prostřednictvím vyššího zastoupení N-fixujících plodin. U obou systémů bylo simulováno zaorání 60 % posklizňových zbytků, resp. biomasy pícnin.

Postup simulací

Simulace byly pro oba systémy (KZ a AZ) sestaveny tak, aby pokryly všechny simulační jednotky. Tj. každý systém byl simulován na území celé ČR samostatně.

Nastavení modelu EPIC (verze 0810) vycházelo z výchozích hodnot, které bylo nutné adaptovat na podmínky ČR. Úpravy se zaměřily na plodinově specifické parametry, zejména sklizňový index (HI), biomasu (WA) a teplotní nároky. Parametry chybějících plodiny (např. špalda, mák) byly odvozeny z příbuzných druhů s podobnou dynamikou růstu. U některých plodin byly mírně modifikovány růstové charakteristiky pro aproximaci současného sortimentu kultivarů. Parametrizace probíhala iterativně skrze testovací simulace tak, aby výnosy odpovídaly průměrům v ČR, ovšem bez ovlivnění cílové proměnné obsahu půdního uhlíku.

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 (vyjádřeno v t C/ha), a to při simulaci stejného pěstebního systému (a jeho varianty) v celém období. Tímto způsobem definovaný potenciál sekvestrace v orné půdě vyjadřuje míru retence/uvolnění C v povrchové vrstvě za 40 nebo 80 let. Na základě získaných hodnot byly vytvořeny mapy a tabulky popisující rozložení sledovaných výstupních hodnot napříč simulačními jednotkami.

Simulace byly provedeny pro období let 2000–2100 na základě regionálního cirkulačního modelu CSC_REMO2009_MPI-ESM-LR. Uvažované klimatologické scénáře byly RCP 2.6 (optimistický scénář, předpokládající rychlé snížení globálních emisí CO₂), RCP 4.5 (střední) a RCP 8.5 (pesimistický, uvažující, že snahy o snižování emisí CO₂ nebudou úspěšné).

Výsledky

Osevní sledy vygenerované programem *freecrot* pro zadané vstupní podíly plodin jsou uvedeny v Tab. 10 a 11. Je patrné, že ve snaze o dosažení shody se zadáním algoritmus v některých případech upřednostnil sekvence plodin, které dle matice vhodnosti měly být upozaděny (např. pšenice po pšenici).

Tab. 10. Osevní sledy a jejich podíly v rámci ČR – konvenční zemědělství.

Systém - oblast	Podíl osevního sledu	1. rok	2. rok	3. rok	4. rok	5. rok	6. rok
KZ - ČR	23,9%	kukuřice	ječmen jarní	kukuřice	ječmen jarní	kukuřice	pšenice ozimá
	17,5%	řepka ozimá	pšenice ozimá	řepka ozimá	pšenice ozimá	cukrovka	pšenice ozimá
	11,8%	řepka ozimá	pšenice ozimá	kukuřice	pšenice jarní	ječmen ozimý	
	9,9%	vojtěška		pšenice ozimá	řepka ozimá	pšenice ozimá	ječmen jarní
	8,2%	oves	pšenice ozimá	řepka ozimá	pšenice ozimá		
	7,8%	řepka ozimá	pšenice ozimá				
	5,9%	mák setý	pšenice ozimá	ječmen ozimý	řepka ozimá	pšenice ozimá	
	5,8%	jetel		pšenice ozimá	ječmen ozimý		
	4,6%	mák setý	pšenice ozimá	řepka ozimá	pšenice ozimá	řepka ozimá	pšenice ozimá
	2,6%	řepka ozimá	pšenice ozimá			ječmen jarní	
	1,8%	kukuřice	pšenice jarní	ječmen ozimý			

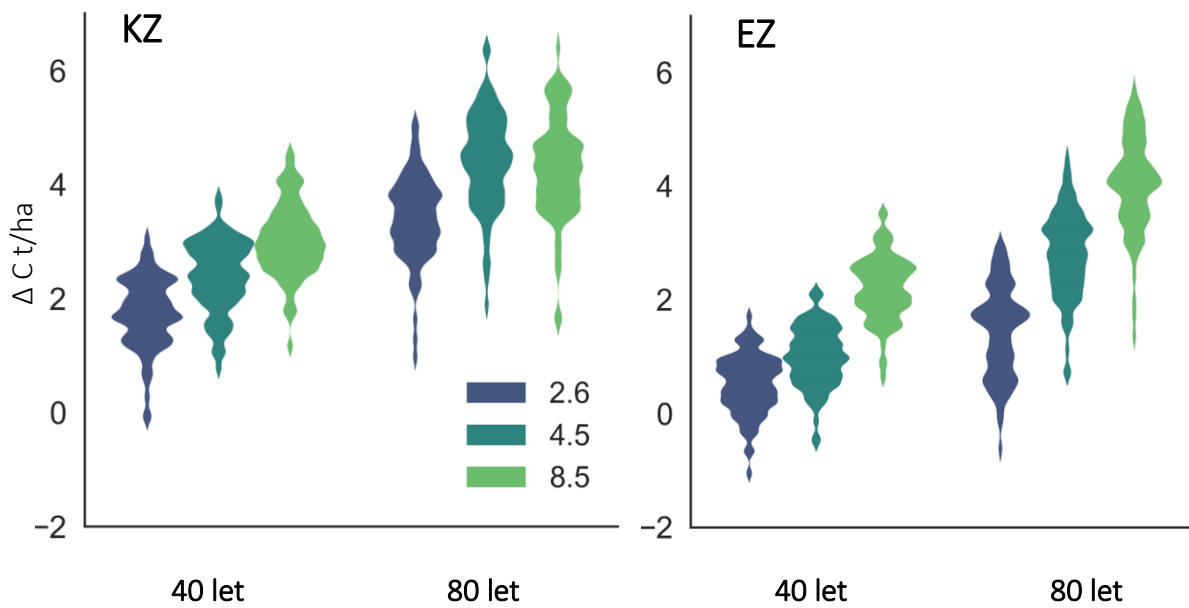
V některých případech by zemědělec jistě volil jinou souslednost plodin, jako např. u 4letého porostu vojtěšky, následované 2x obilninou, nebo 5letého porostu trav na orné půdě, následovaný pšenicí ozimou. I přes nesporné výhody standardizovaného přístupu k vytvoření osevních sledů ze statistických regionálních dat, mohou mít tyto nedostatky určitý efekt na snížení simulované produktivity systému, např. využití dusíku akumulovaného porostem vojtěšky nebude dostatečně efektivní. Do budoucna je možné generované sekvence přiblížit současné zemědělské praxi úpravou matice s novým definováním parametrů vhodnosti následnictví plodin tak, aby reflektovaly reálnou situaci (např. analýzou databáze LPIS).

Tab. 11. Osevní sledy a jejich podíly v rámci ČR– ekologické zemědělství.

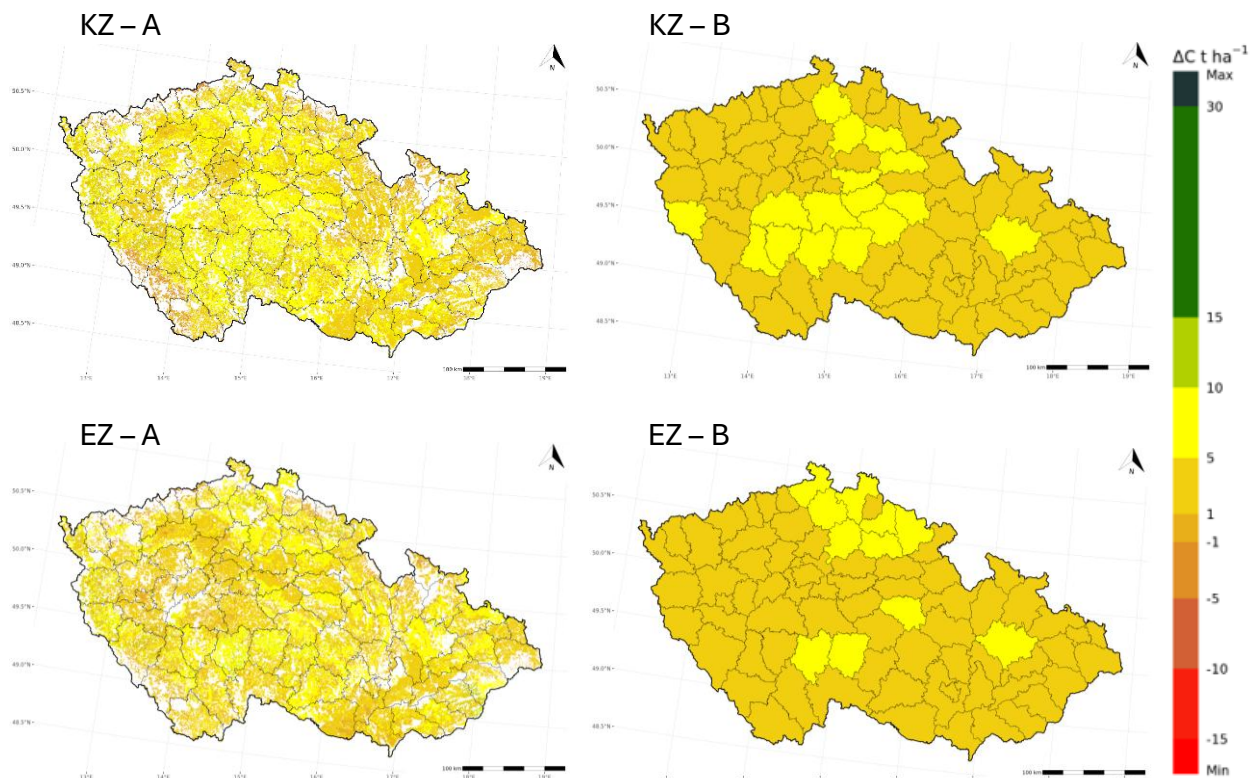
Systém - oblast	Podíl osevního sledu	1. rok	2. rok	3. rok	4. rok	5. rok	6. rok
EZ - ČR	14,0%	oves	pšenice špalda	oves	pšenice ozimá		
	12,9%	vojtěška				pšenice ozimá	oves
	10,3%	vojtěška		pšenice špalda	kmín kořenný	tritikale ozimé	ječmen jarní
	10,2%	trávy					pšenice ozimá
	9,4%	tritikale jarní	hrách	pšenice ozimá	kukuřice	pšenice jarní	žito ozimé
	7,4%	jetelotavní směs				ječmen jarní	
	6,3%	pohanka	jetel				pšenice špalda
	5,6%	oves	tritikale ozimé	jetel		pšenice špalda	
	4,6%	oves	jetel				pšenice špalda
	4,0%	luskoob. směs	pšenice ozimá	kukuřice	pšenice jarní	žito ozimé	ječmen ozimý
	3,2%	luskoob. směs	pšenice ozimá	luskoob. směs	pšenice ozimá	hrách	pšenice ozimá
	2,7%	jetel				pšenice jarní	ječmen ozimý
	2,4%	pohanka	jetelotavní směs				
	2,3%	oves	pšenice ozimá	hrách	pšenice ozimá	luskoob. směs	pšenice ozimá
	1,7%	tritikale jarní	luskoob. směs	pšenice ozimá	oves	žito ozimé	
	1,2%	kmín kořenný	tritikale ozimé	ječmen jarní			
	0,9%	kmín kořenný	tritikale ozimé	jetel		pšenice ozimá	
	0,8%	pšenice jarní	žito ozimé	ječmen ozimý			

Co se týče potenciálu sekvestrace C v horizontu 40 a 80 let, vykazují oba simulované systémy podobnou odezvu (Obr. 25), sekvestrace je ve většině okresů pozitivní (i přes značné regionální rozdíly) a u obou systémů se zvyšuje od scénáře RCP 2.6 ke scénáři RCP 8.5. Tento efekt může být způsoben vyšší percepcí CO₂ v důsledku jeho vyšší koncentrace v atmosféře. V systému ekologického zemědělství jsou simulované sekvestrace C o 1-2 t C/ha/40 let nižší, zřejmě kvůli nižší intenzitě hnojení dusíkem. Nižší vstup živin z hnojiv by měl být dostatečně kompenzován vyšším zastoupením N-fixujících plodin (viz tab. 9) a vyšší mírou zapravení posklizňových zbytků. Je možné, že pro některé regiony by bylo vhodnější místo celorepublikových průměrů použít regionální statistiky. U scénáře RCP 8.5 jsou již rozdíly v sekvestraci mezi oběma systémy poměrně malé, je však patrná rozdílná časová dynamika. Zatímco mezi polovinou a koncem století je v systému KZ přírůstek C v ornici necelých 1,5 t C/ha/40 let, u systému EZ je přírůstek vyšší a dlouhodobý potenciál sekvestrace C je v obou systémech srovnatelný.

Obr. 25 Sekvestrační potenciál C v povrchové 30 cm vrstvě půdy za období 40 a 80 let (t/ha; změna mezi obdobími 2040-2060 a 2000-2019; scénáře RCP 2.6, 4.5 a 8.5; agregace LAU1) pro konvenční (KZ) a ekologický (EZ) systém hospodaření (specifikace systémů v textu).



Obr. 26 Mapa sekvestračního potenciálu orných půd ČR (t C/ha) v horizontu 80 let pro hospodaření v rámci konvenčního (KZ) a ekologického zemědělství (EZ). Scénář RCP 4.5, var. A – členění na simulační jednotky / var. B. agregace na základě výměř orné půdy na úrovni okresů).



Dílčí závěry

Studie představuje příklad přístupu, kterým lze pomocí simulačního modelu predikovat sekvestraci C v reálných pěstebních systémech. Přes řadu aproximací a omezení, simulace na základě skutečné plodinové skladby v systémech konvenčního a ekologického zemědělství přináší oproti modelovým systémům přidanou hodnotu v přiblížení se zemědělské praxi. Za předpokladu zachování definovaných agrotechnických postupů mají oba systémy potenciál přispívat k retenci C v povrchové vrstvě půdy. Míra sekvestrace se paradoxně zvyšuje u pesimističtějších klimatických scénářů (RCP 8.5) ve srovnání s mírnějšími, což je pravděpodobně způsobeno vyšší koncentrací CO₂ v atmosféře, která stimuluje intenzivnější nárůst biomasy rostlin (za předpokladu zachování produktivity, kdy výnosy plodin nejsou zásadně ovlivněny vláhovým deficitem).

Modelování indikuje, že v obou systémech má orná půda v ČR potenciál fungovat jako významný prvek pohlcování uhlíku v horizontu příštích desetiletí. Zatímco z pohledu sekvestrace C profitují intenzivní konvenční systémy (i přes jejich omezenou plodinovou skladbu) z vysokých vstupů živin a tím vyššího vstupu biomasy do půdy, ekologické systémy dosahují srovnatelné dlouhodobé retence uhlíku skrze diverzifikované osevní postupy a vyšší míru zapravované biomasy.

Výsledky sekvestrace vykazují značnou geografickou proměnlivost. Půdně-klimatické charakteristiky určitých okresů (Tábor, Pelhřimov, Olomouc, Česká Lípa, Mladá Boleslav, Jičín, Chrudim) se projevují vyšším potenciálem sekvestrace v obou systémech. Tento výsledek by si zasloužil hlubší analýzu, která by mohla vyústit v cílená pro-sekvestrační opatření v okresech, kde je potenciál sekvestrace nižší.

7. Predikce sekvestrace C na faremní úrovni

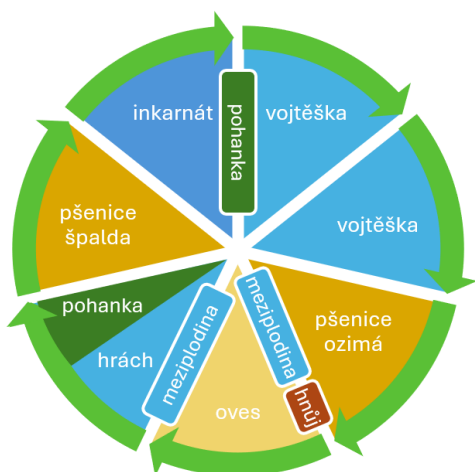
Zachování validity předpovědí při přechodu z regionální na sub-regionální, faremní či lokální úroveň vyžaduje zpřesnění vstupních parametrů dle místních podmínek. Zatímco při simulacích v regionálním měřítku jsou heterogenita topografických vlastností, půdního pokryvu, plodinové struktury, výživy, agrotechniky atd. do velké míry zobecněny, při vyšší míře lokalizace je nutné získat přesnější informace, a to např. terénním průzkumem nebo využitím dostupných detailnějších podkladů. Pro simulace na úrovni farmy je rovněž podstatná důkladná specifikace hospodaření, používaných odrůd plodin, fenologie a dosahovaných výnosů. Pro simulaci příštích období je rovněž důležité znát předpokládaný / zamýšlený vývoj zaměření a agrotechniky farmy a popsat uvažované změny plodinové struktury, odrůd apod. Cílem simulací sekvestrace na faremní úrovni pak může být kromě analýzy trendů výnosů plodin také indikace, jakou míru sekvestrace lze očekávat v konkrétních podmínkách příslušného podniku.

Metodika

Na třech reprezentativních pozemcích obhospodařovaných podnikem Ekofarma PROBIO ve Velkých Hostěrádkách (systém ekologického zemědělství) byly během let 2023 až 2025 odebírány půdní vzorky ornice pro zjištění celkového obsahu půdní organické hmoty. V r. 2025 byly odebrány vzorky celého půdního profilu a dodatečné odběry ornice napříč plochami pro zjištění prostorové variability půdních vlastností. Údaje o místních podmínkách (terén, půdy) byly dále zpřesněny pomocí digitálního modelu terénu a výsledků půdních rozborů z databáze Komplexního průzkumu půd. Dále byly získány údaje o plodinách pěstovaných v předchozím období (druh plodiny, agrotechnika – provedení a termíny, výnosy plodin apod.).

Na základě podkladů byly vytvořeny vstupní soubory modelu EPIC. Simulace byly provedeny pro osevnické sledy modelových systémů sekvestrace (kap. 5) a pro sedmiletý osevnický sled a agrotechniku specificky navrženou pro ekologické hospodaření v místních podmínkách.

Obr. 27 Osevnický sled navržený pro Ekofarmu PROBIO a potenciální výnosy plodin, odhadované na základě dosavadních zkušeností a aktuálního sortimentu kultivarů.



Plodina	Výnos zrna t/ha	Výnos slámy/píce t/ha (č.h. / sušina)
Vojtěška	-	80-85 (č. h.)
Vojtěška	-	105-115 (č. h.)
Pšenice ozimá	5	6
Oves nahý	3,5	6
Hrách setý	2,8	3
Pšenice špalda	4,5	7
Jetel nachový	0,6	16
Pohanka obecná	1,8	2

Osevní sled zahrnuje 7 plodin a meziplodiny, kultivace půdy předpokládá ve 4 případech hlubokou orbu, v ostatních případech mělké zapravení/kypření (radličky) nebo prutové brány. Aplikace hnoje je v dávce 25 t/ha jednou za osevní sled. Sláma obilnin je zaorávána, biomasa vojtěšky je sklízena v rámci 1. seče, v rámci dalších sečí je mulčována pro zvýšení zásoby dusíku v půdě.

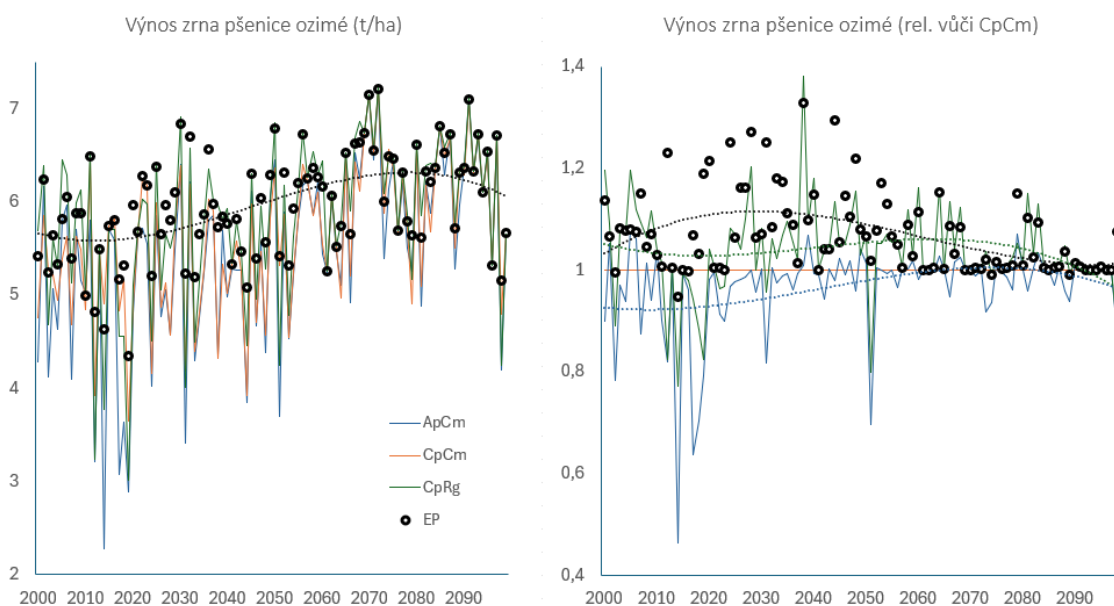
Uvažované klimatické scénáře byly SSP2-4.5 a SSP5-8.5 (pro období let 2020-2100), vycházející z regionálního cirkulačního modelu EC-Earth3. V simulačním období 1993-2020 byly využity podklady vycházející z měření ČHMÚ. Období 1993-1999 (první osevní sled) v simulacích tvořilo tzv. spin-up periodu (ustálení předem nedefinovaných hodnot některých parametrů). Osevní sled byl simulován v sedmi variantách (počátek simulace v každém roce osevního postupu).

V rámci predikce produktivity farmy v příštích desetiletích byly analyzovány trendy výnosů plodin, stresových faktorů a další prvky významné pro nastavení adaptačních opatření. V této metodice uvádíme pouze výsledky související se sekvestrací C.

Výsledky

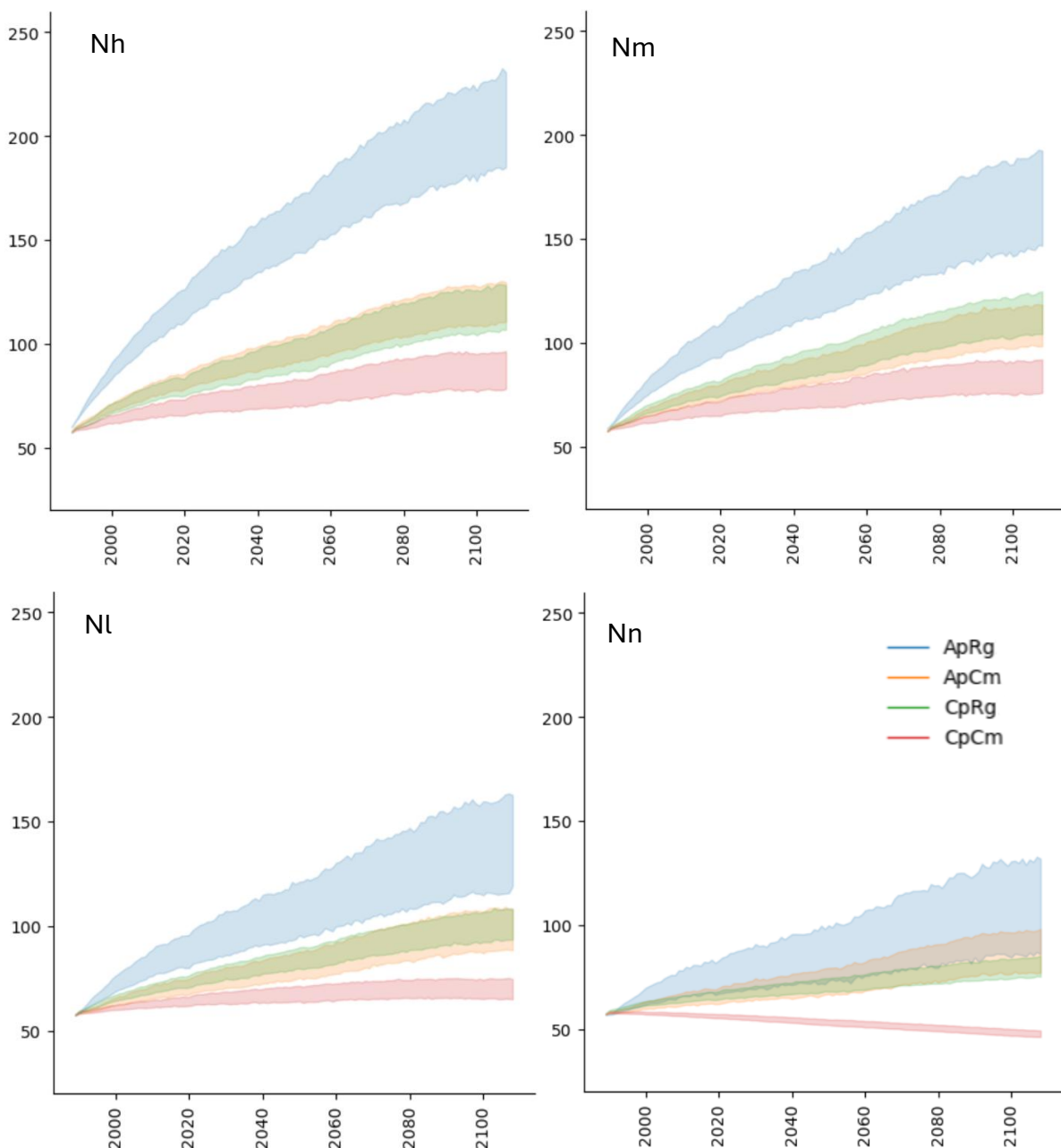
Osevní sled navržený pro Ekofarmu PROBIO (dále EP) vykazoval produktivitu na úrovni vysoce hnojených modelových systémů CpCm, CpRg a ApCm (Obr. 28). Výnosy ozimé pšenice byly v první polovině století o ca. 10 % vyšší než výnosy v komerčních modelových systémech. Produktivita reflektuje vysoký podíl N-fixujících plodin a vysokou míru zapravení jejich biomasy. Ve druhé polovině století se výnosy zrna ozimé pšenice ustálily na průměrné ca 6,0 t/ha, a to nejenom v osevním sledu EP, ale i ve třech modelových systémech s pšenicí ozimou.

Obr. 28 Srovnání výnosů zrna pšenice ozimé v modelových systémech sekvestrace (nejvyšší stupeň hnojení N, zaorání 30 % posklizňových zbytků) a ve specifickém osevním sledu navrženém pro Ekofarmu PROBIO (EP, popis viz text). Scénář SSP2-4.5 (bez závlahy).



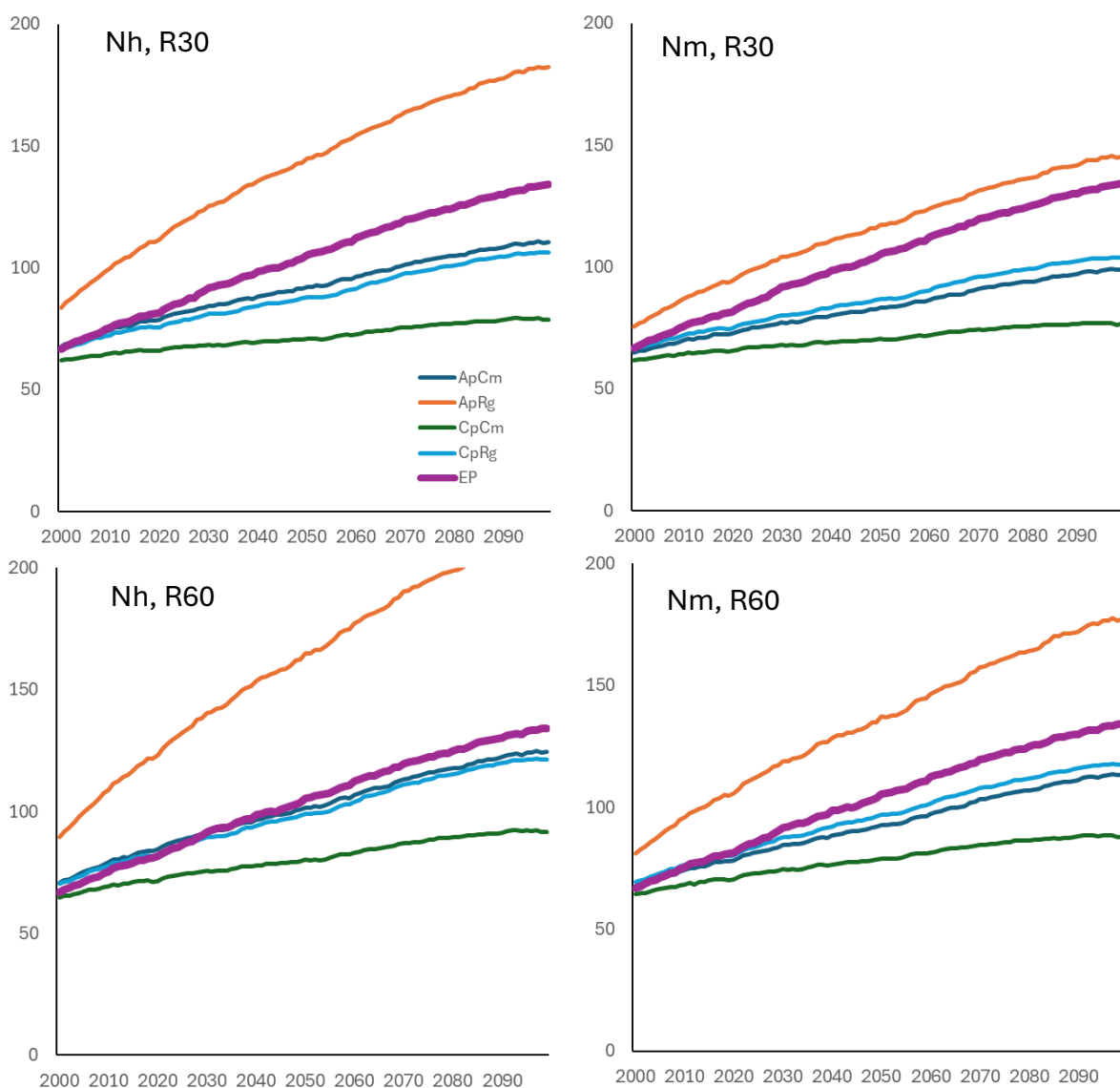
Výnosy v druhé polovině století oscilují v rozsahu 5,5 až 6,5 t/ha v reakci na podmínky počasí, nicméně reakce je ve všech systémech podobná. Toto vyrovnání zřejmě vychází z dosažení srovnatelných půdních podmínek ve všech systémech, tudíž stresová odezva plodin na podmínky počasí je ve všech systémech v podobném rozsahu. Ve 2. polovině století se rovněž stres suchem objevuje méně intenzivně než v první polovině století, a to zřejmě díky charakteru počasí, zejména vyšším srážkám v šesté a posledních dvou dekádách století. Analogické výnosové výsledky byly získány rovněž pro scénář SSP5-8.5.

Obr. 29 Vývoj obsahu C v ornici (t C/ha) při 4 modelových systémech hospodaření a 4 úrovních hnojení. Spodní část pásu představuje systém při nulové retenci posklizňových zbytků (R0), vrchní část při zapravení všech posklizňových zbytků i biomasy víceletých píceňin (R100). Scénář SSP2-4.5, bez závlahy.



Vývoj obsahu C v povrchové vrstvě půdy má rostoucí tendenci téměř ve všech kombinacích modelových systémů a úrovní hnojení (Obr. 29, 30). Výjimkou je pouze komerčně orientovaný modelový pěstební systém bez živočišné výroby (CpCm), kde při absenci zaorání posklizňových zbytků (R0) výnosy při nižší úrovni hnojení stagnují, resp. při absenci hnojení N mírně klesají (Nn). Při dostatečném hnojení (Nm, Nh) a zaorání alespoň části posklizňových zbytků lze v modelových systémech do konce století dosáhnout navýšení množství C v povrchové vrstvě půdy o 60-80 % oproti počáteční úrovni.

Obr. 30 Vývoj obsahu C v ornici (t C/ha) při hospodaření podle osevního sledu Ekofarmy PROBIO ve srovnání s modelovými systémy hospodaření (intenzivní a střední hnojení dusíkem: Nh/Nm; zapravení posklizňových zbytků a biomasy pícnin na úrovni 30 a 60 %: R30/R60). Scénář SSP2-4.5, bez závlahy.



Dílčí závěry

Provedené simulace pěstebního postupu specificky navrženého pro místní podmínky Ekofarmy PROBIO a čtyř modelových systémů hospodaření ukazují, že pro příští desetiletí lze pomocí navrženého hospodaření postupně navyšovat produktivitu pěstování a zvyšovat akumulaci uhlíku v povrchové vrstvě půdy. Navržený osevní postup, způsob kultivace a podíl zapracování posklizňových zbytků a biomasy udržuje pěstování na vysoké úrovni, srovnatelné s nejintenzivnějšími variantami konvenčních i ochranných modelových systémů hospodaření.

Biofyzikální simulační modely systémů půda-rostlina jsou obecně koncipovány jako jednorozměrné a lokální. Jsou sestaveny tak, aby věrně – i když ve zjednodušené podobě – simulovaly procesy v půdním profilu a v něm kořenicí rostlině (plodině), popřípadě několika rostlinných druzích. Povrchové procesy, jako jsou odtok vody a eroze, jsou modelovány na úrovni typického pole, tj. jednotky s určitou velikostí, sklonem a povrchovou strukturou.

Přístup využitý v této studii – tj. zobecnění variability přírodních a pěstebních podmínek farmy do jednoho (nebo několika) typických polí – je vhodný spíše pro malé farmy nebo testování konkrétních agrotechnických hypotéz v dané lokalitě. Spojením několika typických polí a definováním jejich vzájemných prostorových vztahů lze vytvořit komplexnější nástroje, jakým je např. model APEX, využívající v jádru model EPIC. Apex je určen pro správu celých farem nebo malých povodí za účelem dosažení udržitelné efektivity produkce a zachování kvality životního prostředí. Model farmy či povodí umožňuje vyhodnocovat interakce mezi poli s ohledem na povrchový přítok, usazování a degradaci sedimentů, transport živin a pesticidů a podpovrchový odtok.

Při simulacích velkých farem nebo jednotlivých regionů pak může být využita prostorová struktura simulačních jednotek modelu EPIC-IIASA CZ (kap. 2), v kombinaci se specifikací sortimentu pěstovaných plodin a generovanou (případně následně upravenou) sadou osevních sledů (kap. 4).

8. Ekonomické aspekty metodiky

Metodika byla vytvořena jako součást širšího komplexu výzkumných a odborných studií, s cílem připravit podklady pro úspěšné zavedení uhlíkového zemědělství v ČR, funkčního po stránce legislativní, procesní i ekonomické. Bez zavedení centrálního systému plateb za uhlíkové kredity nemá samotná metodika pro uživatele ekonomické přínosy. Poznatky v ní obsažené, nebo aplikace postupů navržených pro úroveň zemědělského podniku, však mohou přinést uživatelům podněty, které přispějí k optimalizaci jejich hospodaření, zvýšení produktivity a odolnosti půdy vůči extrémům počasí. Tyto aspekty plynou z faktu, že zvyšování obsahu organické hmoty v půdě je potřeba považovat – vedle mitigačního účinku – zejména za adaptační opatření pro úspěšné hospodaření na půdě v příštích desetiletích. Ekonomické hodnocení těchto environmentálně-produkčních aspektů zvyšování obsahu organické hmoty v půdě je však mimo rámec této metodiky.

9. Srovnání novosti postupů

Předložená metodika je první svého druhu v národním měřítku.

Metodika se zaměřením na stanovení potenciální sekvestrace C v orných půdách pomocí simulací bio-fyzikálním modelem EPIC-IIASA CZ nebo metodika s podobným zaměřením využívající ke stanovení potenciální sekvestrace C v regionální úrovni nebyla prozatím pro území ČR vytvořena.

Co se týče výstupů s podobným zaměřením, pro lesní půdy byl zpracován mapový soubor „Předpokládané změny sekvestrace uhlíku v důsledku očekávané změny druhové skladby lesů“ (Vašát a kol., 2025).

10. Popis uplatnění metodiky

Rozsah využití metodiky není omezený. Výsledek lze využívat státní správou (např. odborným orgánem státní správy, odpovídajícím za agendu uhlíkového zemědělství), odbornou veřejností i zemědělci samotnými.

V rámci státní správy lze výsledek využít jako podpůrný podklad ke kalkulaci či predikci reálně dosažitelných sekvestračních cílů na úrovni ČR nebo regionů. Na základě popsaného simulačního přístupu je možné kvantifikovat efektivitu podpůrných opatření (např. ve smyslu diverzifikace osevních sledů, zavedení minimální úrovně zpracování posklizňových zbytků, podporu redukování zpracování, podpůrná opatření pro rozvoj živočišné výroby apod.), kvantifikovat vliv omezujících opatření (např. snížení limitů aplikačních dávek N hnojiv k plodinám) nebo vliv vývoje zemědělského sektoru, např. ve smyslu rozvoje, útlumu či transformace určitých sektorů a odvětví. Ekonomická kalkulace stínových cen dává představu o ekonomické rentabilitě vybraných pro-sekvestračních opatření v různých systémech hospodaření.

Uživatel výsledku z řad zemědělců si může sám zvážit, který modelový systém (a jeho varianta) jsou nejbližší jeho vlastnímu hospodaření, a na základě mapových či datových podkladů provést odhad potenciálu sekvestrace v podmínkách svého podniku, popřípadě půdního bloku. Dále si uživatel může mezi simulovanými variantami modelových pěstebních systémů najít realizovatelné alternativy ke svému hospodaření a zvážit, zda by některá opatření (zvýšení intenzity zapravení posklizňových zbytků, zařazení meziplodin apod.) mohlo vést k vyšší míře sekvestrace C.

11. Seznam použité související literatury

ŽÍŽALA, D.; MINAŘÍK, R.; ZÁDOROVÁ, T.; JUŘICOVÁ, A. Mapa zásoby humusu v zemědělských půdách ČR: Specializovaná mapa s odborným obsahem. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., 2020, 14 s.

VOLTR, V. a kol. Hodnocení půdy v podmínkách ochrany životního prostředí. Ústav zemědělských a ekonomických informací, Praha, 2011, 480 s.

COLLINS, C., PHELAN, S. Crop Costs and Returns 2026. Teagasc. 2026: 1–12

SCHÖNHART, M., SCHMID, E., SCHNEIDER, U.E. CropRota – A crop rotation model to support integrated land use assessments, European Journal of Agronomy, 2011:34, 263-277

VAŠÁT, R., a kol. Předpokládané změny sekvestrace uhlíku v důsledku očekávané změny druhové skladby lesů. Mapy predikce vývoje zásob organického uhlíku v celém profilu lesních půd pro roky 2030 a 2050. Soubor map. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., 2025, 20 s.

12. Seznam odborných podkladů, které předcházeli vypracování výsledku

BALKOVIČ, J.; MADARAS, M.; SKALSKÝ, R. a kol. Verifiable soil organic carbon modelling to facilitate regional reporting of cropland carbon change: A test case in the Czech Republic. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 2020, 274

BALKOVIČ, Juraj; VAN DER VELDE Marijn; SCHMID Erwin; SKALSKÝ Rastislav a kol. Pan-European crop modelling with EPIC: Implementation, up-scaling and regional crop yield validation. AGRICULTURAL SYSTEMS. 2013, 120, 61

BALKOVIČ, Juraj; VAN DER VELDE Marijn; SKALSKÝ Rastislav a kol. Global wheat production potentials and management flexibility under the representative concentration pathways. GLOBAL AND PLANETARY CHANGE. 2014, 122

ČECHURA, L., ŘEZBOVÁ, H., VACEK, J., ŽÁKOVÁ KROUPOVÁ, Z., MLEZIVOVÁ, I. Shadow Values of Carbon Sequestration: A Case Study of the Czech Republic. AGRIS on-line Papers in Economics and Informatics, 2025: 17, 17-25

FRANK, S., SCHMID, E., HAVLÍK, P., SCHNEIDER, U.A., BÖTTCHER, H., BALKOVIČ, J., OBERSTEINER, M. The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Glob. Environ. Change*. 2015: 35, 269–78

MADARAS, M.; SKALSKÝ, R.; BALKOVIČ, J. Potenciál sekvestrace uhlíku v orných půdách České republiky (soubor map). Specializovaná mapa s odborným obsahem. Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 2025

MADARAS, M.; HORŇÁK, M.; MAYEROVÁ, M. a kol. *Carbon Sequestration Potential in Model Systems of Conventional and Organic Farming. Dataset Generated Using the EPIC-IIASA CZ Simulation Model*. SPECIALIZOVANÁ VEŘEJNÁ DATABÁZE. Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 2026

MADARAS, M.; SKALSKÝ, R.; BALKOVIČ, J. *Potenciál sekvestrace uhlíku v orných půdách České republiky*. SPECIALIZOVANÁ VEŘEJNÁ DATABÁZE. Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 2025

MADARAS, M.; SKALSKÝ, R.; BALKOVIČ, J. *Carbon Sequestration Potential in Arable Soils of the Czech Republic – Values Aggregated at the District Level (dataset)*. SPECIALIZOVANÁ VEŘEJNÁ DATABÁZE. Národní centrum zemědělského a potravinářského výzkumu, v. v. i., 2025

STEHLÍKOVÁ, Iva; KODEŠOVÁ, Radka; KUNZOVÁ, Eva a kol. Sixty-year impact of manure and NPK on soil aggregate stability. *Geoderma Regional*. 2024: 39

ŠIMON, Tomáš; MADARAS, Mikuláš; MAYEROVÁ, Markéta a kol. Soil Organic Carbon Dynamics in the Long-Term Field Experiments with Contrasting Crop Rotations. *AGRICULTURE-BASEL*. 2024, 14. (6), 818., DOI: 10.3390/agriculture14060818

ŠIMON, Tomáš; MADARAS, Mikuláš. Chemical and Spectroscopic Parameters Are Equally Sensitive in Describing Soil Organic Matter Changes After Decades of Different Fertilization. *AGRICULTURE-BASEL*. 2020, 10. (9), DOI: 10.3390/agriculture10090422

ŽELAZNY, W. R. freecrot: A free implementation of the CropRota model. Software. 2025., zenodo.org/records/15355107

Dedikace

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu č. QK23020056: Vytvoření a ověření modelových systémů dlouhodobé sekvestrace uhlíku v ČR.

Poděkování

Autoři děkují Dr. Wiktoru Želaznému za programátorské práce při implementaci procesů souvisejících s provozem simulační platformy EPIC-IIASA CZ.

Výsledky, analýzy a další podklady
související s modelovým přístupem ke sekvestraci C v orné půdě
jsou dostupné na

carc.cz/agrosimulace

