



DIVLAND

SS02030018 Centrum pro krajinu a biodiverzitu

WP C2 Klíčové půdní vlastnosti a procesy

WA C2.2 Eroze a další faktory degradace půd

Stanovení potenciální eroze pro nehomogenní pokryv zohledňující vliv různých plodin na povrchový odtok s možným využitím pro protierozní ochranu

SS02030018-V50

Marek Bednář, Bořivoj Šarapatka, Patrik Netopil

2024

**T A
Č R**

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou
Technologické agentury ČR a Ministerstva životního
prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.ta.cz www.mzp.cz



T A
Č R

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz www.mzp.cz



Přírodovědecká
fakulta

Univerzita Palackého
v Olomouci

Recenzenti:

prof. Ing. Zlatica Muchová, Ph.D.
Ing. František Pavlík, Ph.D.

Autorský kolektiv:

Ing. Marek Bednář, Ph.D., Univerzita Palackého v Olomouci
prof. Dr. Ing. Bořivoj Šarapatka, CSc., Univerzita Palackého v Olomouci
Mgr. Patrik Netopil, Ph.D., Univerzita Palackého v Olomouci

Neoprávněné užití tohoto díla je porušením autorských práv a může zakládat občanskoprávní, správněprávní, popř. trestněprávní odpovědnost.

1. vydání

© Marek Bednář, Bořivoj Šarapatka, Patrik Netopil, 2024
© Univerzita Palackého v Olomouci, 2024

ISBN 978-80-244-6571-5

Obsah

1 Cíl metodiky	5
2 Srovnání novosti postupů	6
3 Popis uplatnění certifikované metodiky	8
4 Ekonomické aspekty	9
5 Seznam publikací, které předcházely metodice	10
6 Dedikace	11
7 Jména oponentů	11
8 Úvod do problematiky	12
8.1 Současné přístupy k výpočtu eroze a jejich limity	13
9 Teoretické základy	14
9.1 Univerzální rovnice pro dlouhodobou ztrátu půdy vodní erozí (USLE – Universal Soil Loss Equations)	14
9.2 Multiple Flow Direction (MFD, vícenásobný směr proudění)	16
9.3 Agent-Based Modeling (ABM, agentově orientované modelování)	18
10 Popis metodiky USLE-CN	19
11 Praktická část – výpočet erozního smyvu metodami USLE a USLE-CN na rozdělených půdních blocích s heterogenními plodinami a jejich porovnání	24
11.1 Dělení půdních bloků	24
11.2 Návrh simulací	27
11.3 Zdroje dat, postup zpracování a použitý software	32
12 Výsledky	33
12.1 Pásové střídání plodin – virtuální bloky	33
12.1.1 Plodiny a jejich uspořádání	33
12.1.2 Šířka a orientace pásů	34
12.1.3 Morfologie terénu	36
12.1.4 Směr odtoku	37
12.1.5 Sklon terénu	38
12.1.6 Typ půdy a srážky	39
12.2 Pásové střídání plodin – reálné bloky	41
12.3 Pásové střídání plodin – variabilní poměr šířky ochranné a chráněné plodiny	44

12.4 Varianta dělení bloku středovým pásem (SP)	48
12.5 Varianta druhé plodiny	52
12.6 Srovnání metod USLE a USLE-CN	56
13 Praktická doporučení a implikace výsledků simulací pro praxi	59
13.1 Základní principy dělení půdních bloků	59
13.2 Přizpůsobení místním podmínkám	60
13.3 Implementace a monitoring	61
13.4 Adaptace na klimatickou změnu	62
14 Závěr	62



Stanovení potenciální eroze pro nehomogenní povrchy zohledňující vliv různých plodin na povrchový odtok s možným využitím pro protierozní ochranu

SS02030018-V50

(Nmet) – certifikovaná metodika

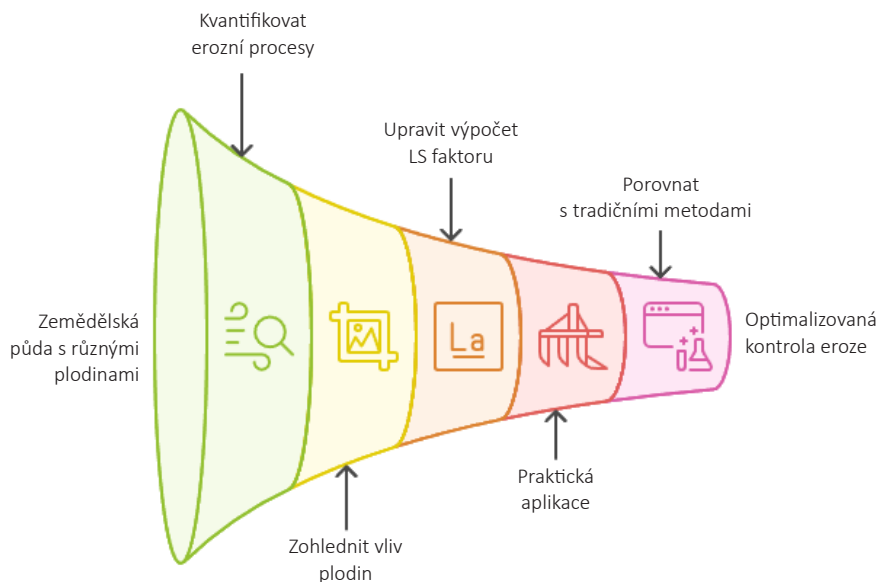
1 Cíl metodiky

Hlavním cílem této metodiky je vytvořit inovativní postup pro stanovení potenciální eroze na půdních blocích s nehomogenním povrchem, který:

- přesněji kvantifikuje erozní procesy na plochách s různými typy plodin,
- zohledňuje vliv různých plodin na povrchový odtok pomocí CN křivek,
- poskytuje modifikovaný výpočetní postup pro přesnější odhad LS faktoru,
- je prakticky aplikovatelný pro potřeby protierozní ochrany v podmínkách českého zemědělství,
- nabízí srovnání s tradičními metodami výpočtu eroze.

Metodika si klade za cíl (obrázek 1) poskytnout přesnější nástroj pro hodnocení erozního ohrožení na pozemcích s různými typy plodin, zejména v případech pásového střídání plodin a dalších forem nehomogenního pokryvu půdy. Výsledky této metodiky mohou sloužit jako podklad pro:

- přesnější stanovení erozního ohrožení na pozemcích s různými typy plodin,
- optimalizaci protierozních opatření na heterogenních plochách,
- kvantifikaci účinnosti různých způsobů střídání plodin z hlediska protierozní ochrany,
- validaci a zpřesnění stávajících modelů eroze pro nehomogenní podmínky.



Obrázek 1. Cíle metodiky

2 Srovnání novosti postupů

Současné přístupy k výpočtu eroze na zemědělských plochách často pracují se zjednodušujícími předpoklady homogenního pokryvu půdy. Tradiční metody výpočtu eroze, jako je USLE, byly primárně vyvinuty zejména pro jednotný půdní pokryv a jejich aplikace na heterogenní plochy může vést k nepřesným odhadům erozního ohrožení. Původní metodický přístup sice zvažoval možnost heterogenních ploch v podobě rozličných parametrů (typicky svažitosti, K faktoru nebo i C faktoru), nicméně doporučení pro výpočet spočívalo v rozdělení svahu, pokud možno, z hlediska vybraných parametrů homogenní plochy, kde proběhl samostatný výpočet kombinace parametrů, jehož průměrná hodnota pak vstupovala do konečné rovnice USLE (Wischmeier & Smith, 1978). Přestože tento postup se dnes prakticky realizuje při výpočtu prostřednictvím moderních GIS nástrojů, z hlediska specificky L faktoru není přesný.

Předkládaná metodika přináší inovativní řešení v podobě modifikovaného výpočtu eroze, který lépe zohledňuje reálné podmínky v zemědělské krajině. Klíčovou inovací je implementace CN křivek do výpočtu USLE, což umožňuje přesnější modelování odtokových poměrů na heterogenních plochách (obrázek 2). Tento přístup lépe zohledňuje vliv různých plodin při výpočtu povrchového odtoku a poskytuje realističtější odhady erozního ohrožení.

Metodika zahrnuje důkladnou validaci postupů prostřednictvím porovnání různých přístupů k výpočtu eroze (USLE vs. námi navrhovaná metoda USLE-CN), statistického vyhodnocení přesnosti výpočtů a ověření na reálných půdních blocích. Tím je zajištěna vysoká spolehlivost a praktická využitelnost navržených postupů. Významným přínosem je také kvantifikace vlivu různých způsobů uspořádání plodin na erozi, zejména při pásovém střídání plodin. Metodika tak poskytuje zemědělcům i odborníkům z výzkumu, projekční praxe i státní správy nástroj pro přesnější odhad eroze na plochách s nehomogenním pokryvem a umožňuje optimalizaci protierozních opatření.

Která metoda výpočtu eroze poskytuje přesnější odhady pro heterogenní zemědělskou půdu?



Tradiční USLE

Omezeno na homogenní pokryv půdy, což vede k nepřesným odhadům



Modifikovaná USLE-CN

Zahrnuje CN křivky pro heterogenní pokryv, zlepšuje přesnost

Obrázek 2. Porovnání použití USLE a navrhované metody USLE-CN

3 Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika představuje inovativní přístup k výpočtu eroze na půdních blocích s nehomogenním pokryvem a nachází uplatnění zejména v následujících oblastech.

Projektová činnost:

- Přesnější výpočty erozního ohrožení na pozemcích s různými typy plodin.
- Kvantifikace účinnosti protierozních opatření na heterogenních plochách.
- Optimalizace návrhu dělení půdních bloků z hlediska protierozní ochrany.

Státní správa:

- Objektivní hodnocení erozního ohrožení na půdních blocích s různorodým pokryvem.
- Podklady pro rozhodování o protierozních opatřeních.
- Validace účinnosti realizovaných opatření.

Zemědělská praxe:

- Přesnější odhady erozního ohrožení při různých způsobech uspořádání plodin.
- Optimalizace osevních postupů s ohledem na erozi.
- Kvantifikace protierozního účinku různých způsobů střídání plodin.

Metodika bude dostupná v elektronické podobě na webových stránkách Katedry ekologie a životního prostředí Univerzity Palackého v Olomouci (<https://www.prf.upol.cz/katedra-ekologie-a-zivotniho-prostredi>), na stránkách projektu DivLand (<https://divland.cz>) a Státního pozemkového úřadu (<https://www.spucr.cz/>). Tímto způsobem bude distribuována mezi výzkumníky, projektanty, pracovníky státní správy i uživatele zemědělské půdy. Metodika může být do budoucna podkladem pro úpravy metodik protierozní ochrany s cílem objektivizovat erozní procesy v nehomogenních podmínkách více plodin na půdních blocích. Na základě následujících diskusí v rámci vědecké komunity, projektantů, státní správy a pracovníků Státního pozemkového úřadu bude tato metodika postupně upřesňována, a to i na základě dat z jiných výzkumných organizací. Tyto diskuse budou základem pro navazující metodiku dělení půdních bloků, která by měla obsahovat i další aspekty, např. souvisejícími s krajinnými prvky zvyšujícími biodiverzitu v zemědělské krajině.

4 Ekonomické aspekty

Z hlediska přímých finančních úspor metodika umožňuje:

- přesnější dimenzování protierozních opatření díky lepšímu pochopení erozních procesů na heterogenních plochách,
- optimalizaci nákladů na protierozní ochranu prostřednictvím efektivnějšího návrhu střídání plodin,
- snížení nákladů na projektovou dokumentaci díky standardizovanému postupu výpočtu.

Dlouhodobé ekonomické přínosy zahrnují:

- zachování produkční schopnosti půdy díky lepší ochraně před erozí,
- minimalizaci škod způsobených erozními událostmi na zemědělských pozemcích,
- snížení nákladů na sanaci škod způsobených erozí v intravilánech obcí,
- efektivnější využití dotačních prostředků na protierozní ochranu.

Náklady na implementaci metodiky jsou minimální, neboť využívá běžně dostupné softwarové nástroje a data. Uživatelé metodiky (projektanti, pracovníci státní správy, zemědělci) mohou využívat stávající technické vybavení. Případné dodatečné náklady souvisejí pouze se zaškolením pracovníků v používání metodiky.

Významným ekonomickým aspektem je také skutečnost, že metodika umožňuje kvantifikovat přínosy různých protierozních opatření na heterogenních plochách. Tato kvantifikace poskytuje podklady pro ekonomické hodnocení investic do protierozní ochrany a optimalizaci nákladů na její realizaci.

Z dlouhodobého hlediska přispívá metodika k udržitelnému hospodaření na zemědělské půdě a k ochraně tohoto cenného přírodního zdroje. Ekonomická návratnost se projevuje především v podobě prevence škod a zachování hodnoty zemědělské půdy pro budoucí generace.

5 Seznam publikací, které předcházely metodice

Odborné články a metodiky:

Dumbrovský, M., Šarapatka, B. a kolektiv (2023). *Pásové střídání plodin jako protierozní a adaptační opatření v pozemkových úpravách*. Certifikovaná metodika, Univerzita Palackého v Olomouci, 49 s.

Konferenční příspěvky:

Bednář, M., Šarapatka, B. (2022). Možnosti použití prostorových agentně založených modelů pro studium erozně akumulčních procesů s využitím distribuce ¹³⁷Cs v půdě. *Pedologické dny 2022*, Zvolen, Slovenská republika.

Bednář, M., Šarapatka, B. (2024). The use of ABM for the study of erosion processes in the agricultural landscape of South Moravia. Abstract of proceedings. *Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences*, Florence, Italy.

Bednář, M., Šarapatka, B., Netopil, P. (2024). Zpřesnění predikce potenciální vodní eroze na půdních blocích s heterogenní organizací plodin prostřednictvím agentového modelování a CN křivek. *Pedologické dny 2024*, Liptovský Ján, Slovenská republika.

6 Dedikace

Certifikovaná metodika „Stanovení potenciální eroze pro nehomogenní pokryv zohledňující vliv různých plodin na povrchový odtok s možným využitím pro protierozní ochranu“ byla vytvořena s podporou Technologické agentury ČR (TA ČR) a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci programu Prostředí pro život (Projekt ID SS02030018 „Centrum pro krajinu a biodiverzitu“) a je dedikována na tento projekt. Metodika byla certifikována SPÚ Praha pod číslem 4/2024/SPU/O. Řešení této problematiky bylo zpracováno i díky dalšímu projektu TA ČR řešícímu pásové střídání plodin, a to jako adaptační opatření k optimalizaci vodního hospodářství krajiny (SS06010290).

7 Jména oponentů

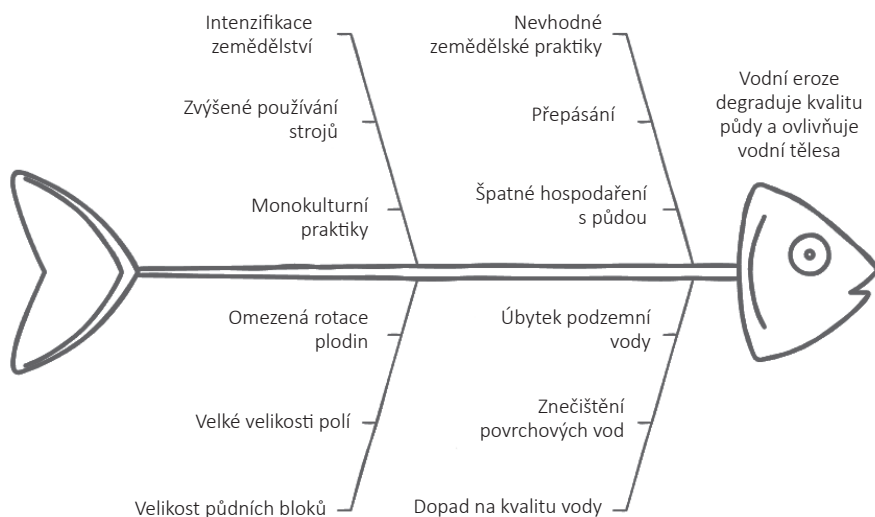
Odborný posudek: prof. Ing. Zlatica Muchová, PhD.
Ústav krajinného inžinierstva
Fakulta záhradníctva a krajinného inžinierstva
Slovenská poľnohospodárska univerzita
Hospodárská 7
949 76 Nitra

Posudek státní správy: Ing. František Pavlík, Ph.D.
Státní pozemkový úřad
Husinecká 1024/11a
130 00 Praha 3 – Žižkov

8 Úvod do problematiky

Půdní eroze představuje jednu z největších hrozeb pro udržitelnost a produktivitu zemědělství. Za posledních 40 let byla téměř třetina světové orné půdy ztracena v důsledku eroze a nadále mizí tempem více než 10 milionů hektarů ročně (Pimentel et al., 1995).

V zemědělské krajině způsobuje ztrátu úrodné svrchní vrstvy půdy, snižuje kvalitu půdy a ovlivňuje nejen její produkční schopnost, ale také kvalitu povrchových a podzemních vod. K zesilování těchto erozních procesů přispívá zvyšující se intenzifikace zemědělství, rostoucí velikost půdních bloků a nevhodné zemědělské postupy.



Obrázek 3. Příčiny vodní eroze v zemědělské krajině

8.1 Současné přístupy k výpočtu eroze a jejich limity

Současné přístupy k výpočtu eroze jsou založeny především na univerzální rovnici ztráty půdy (USLE) a jejich modifikacích. Tyto metody však byly vyvinuty a kalibrovány především pro homogenní plochy s jednotným vegetačním pokryvem. To představuje významné omezení při aplikaci na současnou zemědělskou krajinu, která je charakteristická heterogenním pokryvem půdních bloků, různými způsoby hospodaření v rámci jednoho bloku, komplexní topografií a variabilními půdními podmínkami, stejně jako přítomností různých protierozních prvků.

Hlavní limity stávajících přístupů spočívají především v zjednodušeném přístupu k heterogenitě. USLE ve své aktuální podobě předpokládá uniformní podmínky napříč celým svahem, nezohledňuje vzájemné interakce mezi plochami s různým pokryvem a nebere v potaz změny infiltračních vlastností na rozhraní různých plodin. Významná omezení se projevují také při výpočtu odtoku, kdy tradiční metody nepočítají s rozdílným povrchovým odtokem z různých částí svahu, chybí zohlednění kumulativního efektu různých plodin na odtokové poměry a je nedostatečně zachycován vliv přechodových zón mezi různými plodinami.

Problematické je rovněž určení C faktoru, kde narážíme na obtížné stanovení průměrné hodnoty pro heterogenní plochy, časté nezohlednění časové variability ochranného účinku různých plodin projektanty a absenci metodiky pro kombinace plodin. Tyto limity vedou k nepřesným odhadům eroze na heterogenních plochách, problematickému dimenzování protierozních opatření a obtížnému hodnocení účinnosti různých způsobů hospodaření.

Proto vzniká potřeba vyvinout metodiku, která by lépe zohledňovala heterogenitu zemědělské krajiny a poskytovala přesnější odhady erozního ohrožení na plochách s různorodým pokryvem. Tato metodika musí reflektovat komplexní povahu současné zemědělské krajiny a nabídnout nástroje pro efektivnější plánování protierozních opatření.

9 Teoretické základy

Tato kapitola představuje teoretické základy pro výpočet eroze na heterogenních plochách, kde se střídají různé typy vegetačního pokryvu. Vychází z univerzální rovnice ztráty půdy (USLE), kterou dále rozvíjí pro potřeby přesnějšího modelování erozních procesů na plochách s různorodým pokryvem.

9.1 Univerzální rovnice pro dlouhodobou ztrátu půdy vodní erozí (USLE – Universal Soil Loss Equations)

Univerzální rovnice pro dlouhodobou ztrátu půdy vodní erozí (Wischmeier & Smith, 1978; Renard et al., 1997) je jedním z nejrozšířenějších modelů používaných pro predikci vodní eroze na zemědělských půdách. USLE byla vyvinuta na základě empirických dat a představuje model, který kalkuluje dlouhodobou ztrátu půdy prostřednictvím následující rovnice:

$$G = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

G – dlouhodobá ztráta půdy vyjádřená v t na hektar za rok,

R – erozní potenciál srážek,

K – faktor náchylnosti půdy k erozi,

LS – kombinovaný faktor délky pozemku a sklonu,

C – faktor ochranného vlivu vegetace a zemědělských postupů,

P – faktor protierozních opatření.

USLE je široce používaná díky své jednoduchosti a relativní snadnosti aplikace. Samozřejmě existují přesnější modely, které však vyžadují mnohem větší množství vstupních parametrů (obrázek 4). USLE vychází z předpokladu, že existuje korelace mezi povrchovým odtokem z příspěvkové plochy a erozí. Tento předpoklad lze vyjádřit jako:

$$E = k \cdot Q$$

E – eroze z pixelu v rámci rastrového modelu,

k – koeficient erodibility,

Q – množství smyvu z příspěvkové plochy.

Tento pohled je však zjednodušený, neboť nezohledňuje různé typy plodin na půdním bloku a jejich vliv na erozi, ani překážky toku a zachycování sedimentů, ani komplexní interakce mezi různými částmi svahu. Přestože je USLE široce používaným modelem, má několik omezení. Model například nezahrnuje erozi v důsledku stržové eroze, nedokáže předpovídat potenciální transport sedimentů do vodních toků a má omezení při aplikaci v různých klimatických podmínkách (Benavidez et al., 2018).

Z hlediska heterogenity parametrů na počítaném pozemku sice lze při výpočtu postupovat rozdělením pozemku na jednotlivé homogenní části a celkově upravit výpočet nějakou sjednocující funkcí (většinou průměrem), nicméně tento přístup není zejména v případě L faktoru přesný. S rozvojem geografických výpočetních metod se vlastní proces výpočtu automatizoval na základě rastrových výpočtů v rámci rastrového modelu terénu. Původní heterogenita určitých parametrů je tímto způsobem automaticky zohledněna ve výpočtu. Tedy heterogenita R, K, C, S a P parametrů. Problémem zůstává vlastní L faktor, který rozebereme v samostatné kapitole.

Vlastní metoda standardního výpočtu USLE vychází v současnosti v ČR z nové metodiky *Ochrana zemědělské půdy před erozí* (Kol., 2023), která navazuje na předcházející metodiky s využitím univerzální rovnice USLE, kdy využíváme následující přístupy:

Pro každý pixel DMR je určen parametr „beta“ (McCool et al., 1989), jenž zpřesňuje hodnotu L faktoru na základě lokálního sklonu DMR:

$$beta = \frac{\sin(sklon)}{0,0896 \cdot [3 \cdot \sin^{0,8}(sklon) + 0,56]}$$

sklon – úhel sklonu odtokové linie (lokální maximální sklon) [°]

beta – parametr sklonu pro výpočet L faktoru

Následně je určen samotný L faktor (Desmet & Govers, 1996; Mitasova et al., 1996):

$$L = \left(\frac{Facc}{22,13 \cdot resolution \cdot (|\sin(aspect)| + |\cos(aspect)|)} \right)^{\frac{beta}{beta+1}}$$

L – výsledný L faktor

Facc – plocha povodí k řešenému pixelu (bodu) [m²]

aspect – azimut ve směru odtokové linie (maximálního sklonu) [°]

resolution – rozlišení vstupního rastru (délka hrany pixelu) [m]

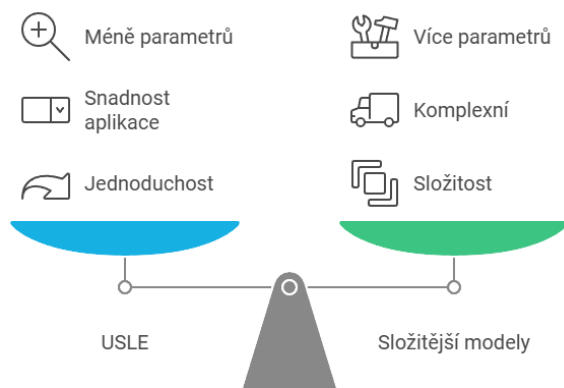
beta – parametr sklonu pro výpočet L faktoru

Pro S faktor byla využita rovnice podle Nearinga (1997) ve tvaru:

$$S = (-1,5 + \frac{17}{[1 + e^{2,3-6,1 \cdot \sin(\text{sklon})}]})$$

S – výsledný S faktor

sklon – úhel sklonu odtokové linie (lokální maximální sklon) [°]



Vyvážení jednoduchosti a přesnosti v modelech eroze půdy.

Obrázek 4. Výhody a nevýhody jednoduchých a složitých modelů eroze půdy

9.2 Multiple Flow Direction (MFD, vícenásobný směr proudění)

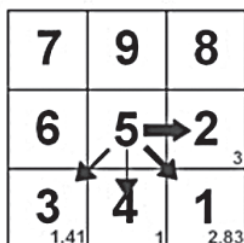
Metoda vícenásobného směru proudění (MFD) je rozšířením tradičního Single Flow Direction (SFD, jednoduchý směr proudění), kdy voda teče vždy místem nejvyššího spádu. MFD poskytuje realističtější simulaci odtoku, neboť uvažuje více-směrné proudění. MFD poskytuje realističtější simulaci odtoku ve srovnání s SFD, a to zejména na rozlehlých a přímých svazích (obrázek 5).

Existuje řada různých přístupů k modelování MFD, které proporcionálně rozdělují jednotlivé toky podle sklonu. Přesnost předpovědí distribuovaných hydrologických modelů závisí částečně na správné specifikaci odtokových cest. Metoda MFD podle Quinna (obrázek 6), kterou pro výpočty používáme, představuje robustní přístup k modelování odtoku v komplexním terénu (Quinn et al., 1991).

Algoritmus zohledňuje i cut-off points, což jsou místa, kde se vzhledem k prudké změně sklonu tok zastaví a vzniká tak překážka odtoku.



Obrázek 5. Rozdělení algoritmů pro generování směrového odtoku



Obrázek 6. MFD algoritmus směru odtoku – voda se šíří všemi možnými směry proporcionálně podle výškového rozdílu (převzato z Barták, 2009)

Míru odtoků lze popsat vzorcem:

$$A_i = A \cdot (\tan \beta_i \cdot L_i) / \sum_{j=1}^n (\tan \beta_j \cdot L_j)$$

n – celkový počet svahů směřujících dolů

A_i – je množství toku procházejícího k i -tému sousedovi ve směru dolů

$\tan \beta_i$ – sklon k i -tému sousedovi ve směru dolů (rozdíl v nadmořské výšce / vzdálenost mezi hodnotami nadmořské výšky)

L_i – je délka vrstevnice (kolmá na směr toku) i -tého směru (buď kardinální $L1 = 0,5 \cdot \text{rozlišení mřížky}$, nebo diagonální $L2 = 0,354 \cdot \text{rozlišení mřížky}$)

A – celková plocha svahu nahromaděná v současné „centrální“ buňce

j – index pro každého souseda ve směru dolů

Klíčové vlastnosti metody podle Quinna

- **Detailní rozložení odtoku:** Metoda umožňuje simulaci, kde jednotlivé proudy vody ovlivňují erozi v místních oblastech.
- **Integrace s topografickými daty:** Efektivně využívá digitální modely terénu pro přesnější simulace.
- **Vícenásobné interakce:** Schopnost modelovat interakce mezi více proudy vody, což zvyšuje realističnost simulací.

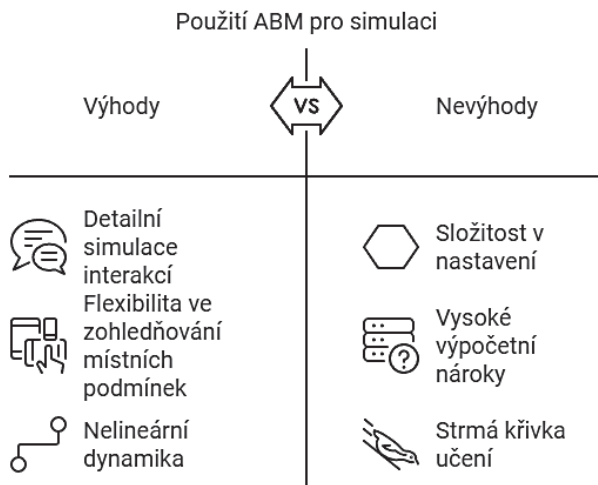
Implementace metody podle Quinna byla zvolena pro její schopnost lépe odrážet dynamické a komplexní vzory odtoku na heterogenních plochách, kde tradiční MFD metody mohou selhávat v přesném modelování proudění. Tato metoda lépe odráží variabilitu povrchových odtoků na různých typech půd a topografií, což je klíčové pro přesnější odhad eroze.

9.3 Agent-Based Modeling (ABM, agentově orientované modelování)

Agentově orientované modelování představuje pokročilý přístup k simulaci komplexních systémů, kde jednotliví „agenti“ (např. voda, půdní částice) interagují na základní úrovni a vytvářejí emergentní chování na makroúrovni, které může být značně neintuitivní. V této studii jsme využili populární platformu pro ABM **NetLogo**, a to pro její flexibilitu a schopnost vizualizovat dynamické procesy.

Výhody použití ABM (obrázek 7)

- **Detailní simulace interakcí:** ABM umožňuje modelovat interakce mezi jednotlivými částicemi vody a půdy, což poskytuje hlubší porozumění dynamice erozních procesů.
- **Flexibilita při zohledňování místních podmínek:** ABM snadno integruje různé faktory, jako např. topografii, typ půdy a vegetaci na jemnější úrovni.
- **Možnost modelování nelineárních a dynamických jevů:** ABM efektivně zachycuje složité vzory odtoku, které jsou obtížně předvídatelné klasickými metodami, jako je MFD.



Obrázek 7. Výhody a nevýhody použití ABM metod

10 Popis metodiky USLE-CN

Jedním z klíčových faktorů ovlivňujících přesnost modelu USLE je **faktor délky a sklonu svahu (LS)**, který kombinuje vliv sklonu a délky svahu na erozi. Tradiční výpočet LS faktoru v USLE z pohledu horizontální (vrstevnicové) křivosti terénu nepočítá se soustředěním povrchového odtoku vyplývajícím z této křivosti, což často neodpovídá reálným podmínkám, kde jsou svahy často rozmanité a nerovnoměrné. V návaznosti na práce Desmeta a Goverse (1996) a Mitasové et al. (1996) došlo k nahrazení délky svahu přispívající plochou.

V dnešní době se tedy pro výpočet **LS faktoru** často využívají **GIS metody**, které místo délky svahu pracují s **příspěvkovou plochou**. Tento přístup lépe odráží složitější topografické struktury povrchu a umožňuje přesnější modelování odtoku. Přestože LS faktor zahrnuje jak délku, tak sklon svahu, moderní metody se více zaměřují na charakteristiky příspěvkové plochy, aby lépe zachytily variabilitu terénu.

USLE však nebyla primárně určena pro modelování heterogenních ploch s různorodým pokryvem plodin (obrázek 8). Původní rovnice USLE primárně předpokládala použití jedné plodiny na celém svahu, což je často problematické

v reálných zemědělských podmínkách, kde jsou různé plodiny, např. v rámci jejich pásového střídání.

Původní metodický přístup sice zvažoval možnost heterogenních ploch v podobě rozličných parametrů (typicky svažitosti, K faktoru nebo i C faktoru). Ale doporučení pro výpočet spočívalo v rozdělení svahu, pokud možno, z hlediska vybraných parametrů homogenní plochy, kde proběhl samostatný výpočet kombinace parametrů, jehož průměrná hodnota pak vstupovala do konečné rovnice USLE. Toto je dnes prakticky realizováno s využitím GIS metod automaticky, avšak s jednou výjimkou, a tou je L faktor.

V tradiční metodice USLE se předpokládá, že míra eroze koreluje s příspěvkovou plochou a povrchovým odtokem z této plochy. Nicméně, tato metoda zanedbává fakt, že povrchový odtok se bude lišit na pozemcích s **heterogenními plodinami**.

Inovace našeho metodického přístupu spočívá v modifikaci výpočtu L faktoru (obrázek 9), resp. příspěvkové plochy, která je upravena pomocí určitého vypočítaného modifikačního faktoru. Tento faktor je určen na základě **CN křivek (Curve Number)** reálné krajiny v porovnání s CN křivkami předpokládanými pro jednotnou plodinu v USLE a dá se zjednodušeně vyjádřit následující rovnicí:

$$Facc_{mod} = Facc \cdot \left(\frac{Q_{struct}}{Q_{homo}} \right)$$

(Pro rychlejší výpočet a snížení potenciálních extrémních hodnot byly hodnoty Q_{struct} [mm] a Q_{homo} [mm] zaokrouhleny před dělením na desetinu mm.)

$Facc_{mod}$ – modifikovaná hodnota akumulace toku $Facc$

Q_{struct} – odtok ze strukturované příspěvkové plochy

Q_{homo} – odtok z hypotetické homogenní plochy s plodinou danou zpracovávaným pixelem (závěrem mikropovodí – příspěvkové plochy)

Odtok Q můžeme vypočítat pomocí metody CN křivek:

$$Q = \frac{(P-0,2 \cdot S)^2}{P+0,8 \cdot S} \text{ pro } P > 0,2 \cdot S, \text{ resp. } Q=0 \text{ pro } P \leq 0,2 \cdot S$$

P – úhrn srážek

S – potenciální retence, kterou lze vypočítat jako: $S = 25400/CN - 254$, kde CN je číslo odtokové křivky

Pro daný pixel rastrového modelu se pak hodnota Q_{struct} resp. Q_{homo} počítají na základě výpočtu povrchového odtoku přispívající plochy, který je založen na metodě CN křivek (Curve Number). Každý pixel přispívající plochy reprezentuje elementární odtokovou plochu s přiřazenou hodnotou CN. Tato hodnota je odvozena na základě kombinace hydrologické skupiny půdy, způsobu využití území a předchozích vláhových podmínek. Pro každý pixel příspěvkové plochy je následně pomocí vztahu mezi úhrnem srážek (P) a potenciální retencí povodí (S) vypočítána výška přímého odtoku (Q) podle výše popsanych rovnic. Dílčí odtoky z jednotlivých pixelů se agregují, čímž vznikne výsledná prostorová distribuce povrchového odtoku.

Samotný proces agregace lze popsat následovně:

1. U každého pixelu příspěvkové plochy se určí množství povrchového odtoku (Q) pomocí CN křivek.
2. Následně se prostřednictvím MFD podle Quinna provádí kumulace (flow accumulation), kdy se odtok z jednotlivých pixelů „posouvá“ po směru proudění do sousedního pixelu níže. Tento proces se opakuje, než je dosaženo vyústění – závěrný profil mikropovodí, resp. právě vyhodnocovaný pixel USLE.
3. Výsledkem je rastr kumulovaných odtoků, kde je určující hodnota v závěrném profilu povodí – tedy v právě zpracovávané buňce v procesu výpočtu USLE.

Tento výpočet nelze snadno realizovat klasickými GIS nástroji mapové algebry, proto bylo pro realizaci výpočtu zvoleno prostředí ABM NetLogo.

Výsledná modifikovaná hodnota $Facc_{mod}$ je následně integrována do USLE rovnice, resp. výpočtu L faktoru:

$$L_{mod} = \left(\frac{Facc \left(\frac{Q_{struct}}{Q_{homo}} \right)}{22.13 \cdot resolution \cdot (|\sin(aspect)| + |\cos(aspect)|)} \right)^{\frac{beta}{beta+1}}$$

Shrnutí celého přístupu:

1. Porovnání CN křivek v příspěvkové ploše pixelu:

- Analýza CN křivek reálné krajiny, které odrážejí skutečnou variabilitu odtoku a jeho rozložení.
- Porovnání těchto CN křivek s unifikovanými CN křivkami předpokládanými v USLE pro jednotnou plodinu danou plodinou, pro kterou zpracováváme příspěvkovou plochu.

2. Určení modifikačního faktoru:

- Poměr reálného CN (pro heterogenní plodiny) a unifikovaného CN (pro jednotnou plodinu) určuje modifikační faktor.
- Tento faktor slouží k modifikaci příspěvkové plochy, čímž se zlepšuje odhad eroze na půdních blocích s heterogenním pokryvem plodin.

3. Aplikace modifikovaného LS faktoru:

- Upravený LS faktor, který teď zohledňuje heterogenitu plodin, umožňuje přesnější modelování odtoku, a tím i eroze.

Tato inovace v USLE přispívá k **přesnějším modelování eroze** na různé typy půd a terénů, zejména v podmínkách, které se odchyľují od předpokladů aktuálně používané metodiky USLE. Zohlednění heterogenního pokryvu plodin skrze modifikaci příspěvkové plochy pomocí CN křivek výrazně zvyšuje schopnost modelu odhadnout reálné erozní procesy na různorodých zemědělských plochách.

Pro výpočet F_{acc} byl využit vícesměrný odtok ve variantě MFD podle Quinna.

Tradiční vs. Navrhovaný výpočet



USLE

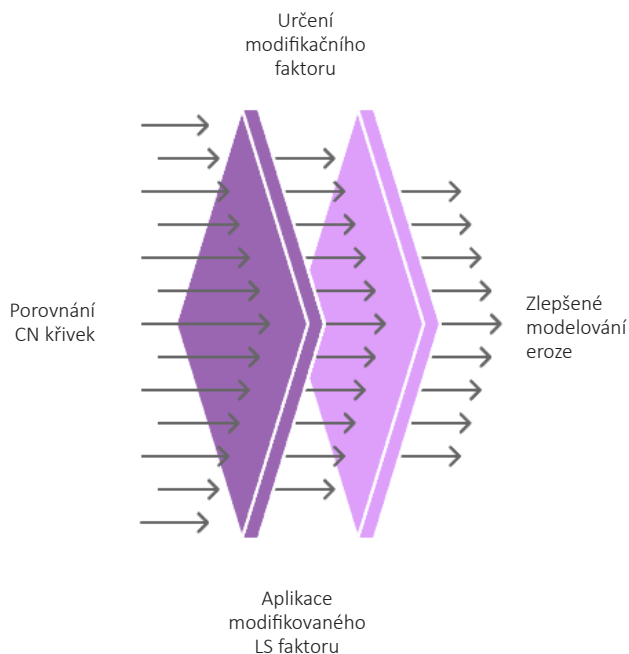
Předpokládá jednu plodinu



USLE - CN

Přizpůsobuje se variabilitě terénu
a heterogenitě plodin

Obrázek 8. Porovnání tradičního USLE výpočtu a výpočtu se zohledněním CN křivek – USLE-CN



Obrázek 9. Schematické vyjádření výpočtu modifikačního faktoru pro upřesnění příspěvkové plochy pro bloky s heterogenním pokryvem plodin

Pro realizaci tohoto výpočtu jsme vyvinuli skript v ABM prostředí NetLogo, který po vložení výškového modelu (DMT), vstupních parametrů v podobě organizace plodin (rastrová vrstva C faktoru) a typu půdy, případně navrhované srážky, dokáže vyhodnotit výsledný erozní smyv v rámci celého bloku. Prostředí ABM na rozdíl od standardních GIS systémů umožňuje realizovat složité výpočty posunu toku částic, které nelze běžně realizovat v prostředí GIS.

11 Praktická část – výpočet erozního smyvu metodami USLE a USLE-CN na rozdělených půdních blocích s heterogenními plodinami a jejich porovnání

V praktické části demonstrujeme výsledky použití přístupů USLE i USLE-CN na heterogenních pozemcích, a to konkrétně na pozemcích/blocích:

- s pásovým střídáním plodin,
- se středovým pásem pro rozdělení pozemku,
- s rozdělením půdního bloku prostřednictvím další plodiny o minimální šířce 110 m.

Nejdříve uvedeme postupy, které se vztahují k dělení půdních bloků a erozně ohroženým pozemkům, následně naznačíme design simulací a pak porovnáme výsledky. Vzhledem k tomu, že tato metodika je přípravou pro další plánovanou metodiku týkající se dělení půdních bloků i z pohledů biodiverzity či retence vody v krajině, uvádíme už zde zajímavé výsledky a doporučení pro zemědělce, jež se vztahují k tomuto dělení z pohledu erozní ohroženosti.

11.1 Dělení půdních bloků

Heterogenita pozemků vzniká často jako důsledek vysokého erozního smyvu v rámci půdního bloku, a s tím i nutností jeho dělení. V České republice i v zahraničí existuje několik přístupů, které se přímo či nepřímo týkají dělení půdních bloků s cílem snížit erozi. Tyto přístupy lze rozdělit do několika kategorií (obrázek 10). Jde zejména o přístupy legislativní, agronomické, technické, modelové, participativní a inovativní.

Legislativní přístupy

V zajištění udržitelného zemědělství a ochraně půdy hrají klíčovou roli Standardy dobrého zemědělského a environmentálního stavu (DZES). Proces dělení půdních bloků podle DZES se zaměřuje především na dva hlavní aspekty: erozní ohroženost a diverzifikaci plodin.

Podmínky standardu DZES 7B obsahují omezení plochy jedné plodiny na 30 ha. Ještě více je omezena plocha jedné plodiny na silně erozně ohrožené ploše, a to na 10 ha standardní orné půdy. Na dílu půdního bloku (DPB) se zemědělskou kulturou se standardní ornou půdou se nesmí vyskytovat plocha stejné plodiny o výměře větší než 30 ha, pokud tato plocha nebude rozdělena: ochranným pásem o minimální šířce 22 m osetým porostem vyjmenovaných plodin, plochou jiné plodiny o minimální souvislé šířce 110 m, krajinným prvkem, kombinací předcházejících opatření nebo pásy podle půdoochranné technologie pásové střídání plodin. Na DPB se zemědělskou kulturou standardní orná půda, která obsahuje souvislou plochu silně erozně ohrožené půdy větší než 2 ha, nebo jejíž výměra je z více než 50 % pokryta silně erozně ohroženou půdou, se nesmí vyskytovat plocha stejné plodiny o výměře větší než 10 ha, pokud tato plocha nebude rozdělena. Možné rozdělení je shodné s typy uvedenými výše u DPB větších než 30 ha.

Agronomické přístupy

- **Pásové střídání plodin:** Metoda, při které se střídají pásy plodin s různou ochrannou funkcí, obvykle ve směru vrstevnic.
- **Ochranné pásy:** Vytváření travnatých nebo zalesněných pásů mezi půdními bloky nebo podél vodních toků.

Technické přístupy

- **Terasování:** Vytváření teras na svazích, které přerušují délku svahu a snižují rychlost odtoku.
- **Průlehy a příkopy:** Budování těchto prvků pro zachycení a odvedení povrchového odtoku.

Modelové přístupy

- **GIS analýzy:** Využití geografických informačních systémů pro identifikaci erozně ohrožených ploch a návrh jejich rozdělení.
- **Erozní modely:** Použití modelů jako USLE nebo RUSLE pro predikci eroze a návrh optimálního dělení bloků.

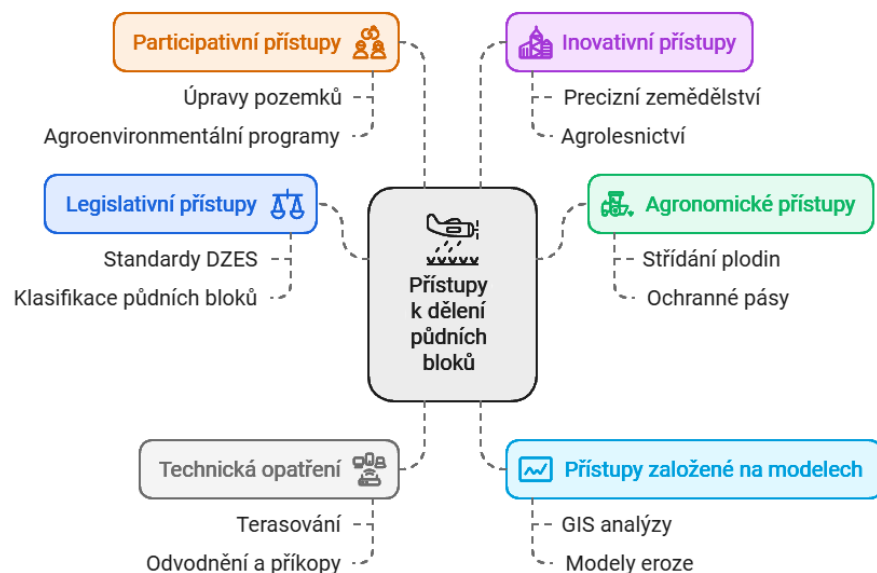
Participativní přístupy

- **Pozemkové úpravy:** Komplexní proces, který zahrnuje i protierozní opatření a může vést k optimálnějšímu rozdělení půdních bloků.
- **Agroenvironmentální programy:** Dobrovolné programy, které motivují zemědělce k implementaci protierozních opatření, včetně dělení bloků.

Inovativní přístupy

- **Precizní zemědělství:** Využití moderních technologií pro optimalizaci hospodaření na úrovni jednotlivých částí půdního bloku.
- **Agrolesnictví:** Kombinace zemědělství a lesnictví, která může vést k přirozenému dělení půdních bloků.

Přestože tyto přístupy existují, jejich implementace v praxi často naráží na ekonomické a praktické překážky. Mnoho zemědělců stále preferuje velké půdní bloky kvůli efektivitě práce s moderními zemědělskými stroji. Navíc, ne všechny tyto metody jsou systematicky aplikovány s primárním cílem optimálního dělení půdních bloků.



Obrázek 10. Přehled opatření na snížení erozní ohroženosti půdních bloků

11.2 Návrh simulací

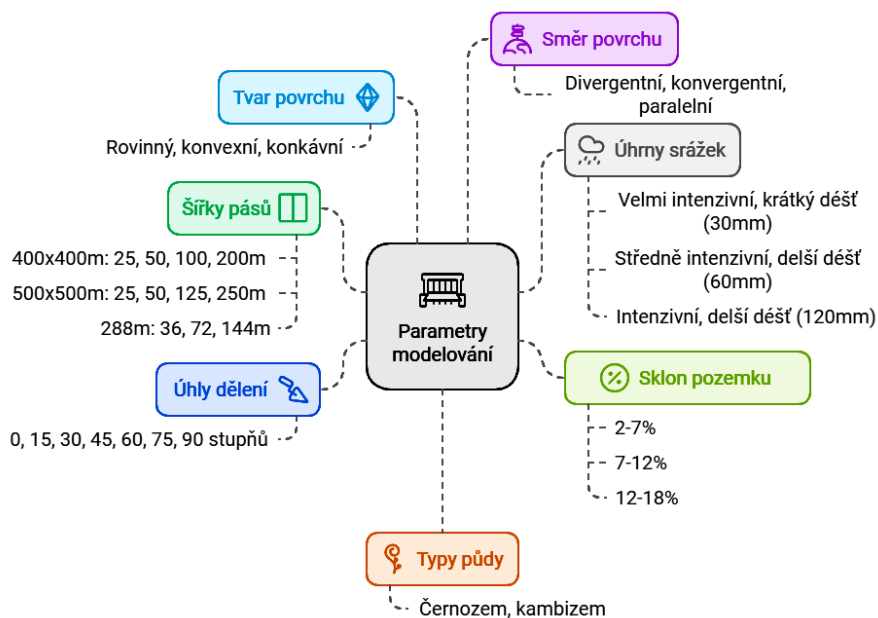
V souvislosti s dělením půdních bloků legislativa v podobě DZES 7B uvádí, jakým způsobem lze dělit půdní blok přesahující 30 ha. Zmiňuje variantu rozdělení půdního bloku středovým pásem o délce 22 m. Dále pak umožňuje rozdělit blok přidáním další plodiny o minimální šířce 110 m. V praktické části ověřování navrhované metody jsme se právě tyto přístupy snažili nasimulovat pro erozně ohrožené pozemky, abychom získali konkrétní kvantitativní údaje o jednotlivých opatřeních a jejich účinnosti.

Vedle zmíněných opatření jsme zahrnuli i pásové střídání plodin (strip cropping). Nedávné výzkumy ukazují, že toto opatření může významně zvýšit efektivitu využití půdy a výnosy. Zároveň může vést ke zvýšení celkové produktivity a příjmů v ekologickém zemědělství (Juventia et al., 2022). Campanelli et al. (2023) zjistili, že správně navržený systém pásového střídání plodin může zvýšit návrat uhlíku do půdy a zlepšit využití zdrojů v závislosti na typu plodiny.

Metodika simulací je společná pro všechny varianty s mírnými odlišnostmi z hlediska vstupních dat. V rámci pásového střídání plodin uvažujeme virtuální bloky o rozměrech 288×288, 400×400, 500×500 a 600×600 m. Jednotlivé pásy byly v poměru 1 : 1 pokryty kukuřicí a pšenicí. Vedle virtuálních bloků jsme vybrali pro porovnání i reálné bloky zemědělské krajiny na černozemích a kambizemích, což jsou rozšířené půdní typy v nížinných a podhorských oblastech. Na bloku 400×400 m jsme testovali i vliv sklonu terénu. V ostatních případech byl uvažován střední sklon z testovaných variant, a to 9,5 %.

Pásové střídání prokazatelně snižuje celkovou erozi, nicméně v praxi nemusí být toto snížení dostatečné. Proto jsme se rozhodli do simulací zahrnout i jiné poměry ochranných a chráněných ploch, konkrétně v poměrech 2 : 1 (dva pásy pšenice na jeden díl kukuřice), 3 : 1 i vyšší. V rámci tohoto designu jsme uvažovali pouze umístění ochranné plodiny ve spodní části svahu pro dosažení co nejnižší eroze.

Experimentálně jsme zkoumali vliv následujících parametrů na výslednou erozi (viz obrázek 11):



Obrázek 11. Design simulací a uvažované faktory

- Šířka pásů se liší podle zvoleného schématu. Na blocích 400×400 m (virtuálních) jsme uvažovali šířky pásů 25, 50, 100 a 200 m. Na blocích 500×500 m šířky 25, 50, 125, 250 m. Na blocích 288 m pak šířky 36, 72 a 144 m. Šířky pásů byly zvoleny tak, aby pásy rovnoměrně pokryly pozemek se stejným zastoupením obou uvažovaných plodin.
- Úhel dělení vůči spádnicí – 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90°.
- Tvar povrchu (rovinný, konvexní, konkávní).
- Směr povrchu (divergentní, konvergentní, paralelní).
- Úhny srážek:
 - Velmi intenzivní, krátký déšť (30 mm):
 - Představuje silnou bouřku nebo přivalový déšť.
 - Vysoká intenzita může rychle překročit infiltrační kapacitu půdy.
 - Typické pro letní bouřky v mírném pásmu.
 - Během nejintenzivnější 30minutové periody by spadlo asi 15,4 mm srážek (30,8 mm/h · 0,5 h).
 - Úhrn: 30 mm, Vypočtená i_{30} : $\approx 36,7$ mm/h, Přibližná doba trvání: 49 minut.

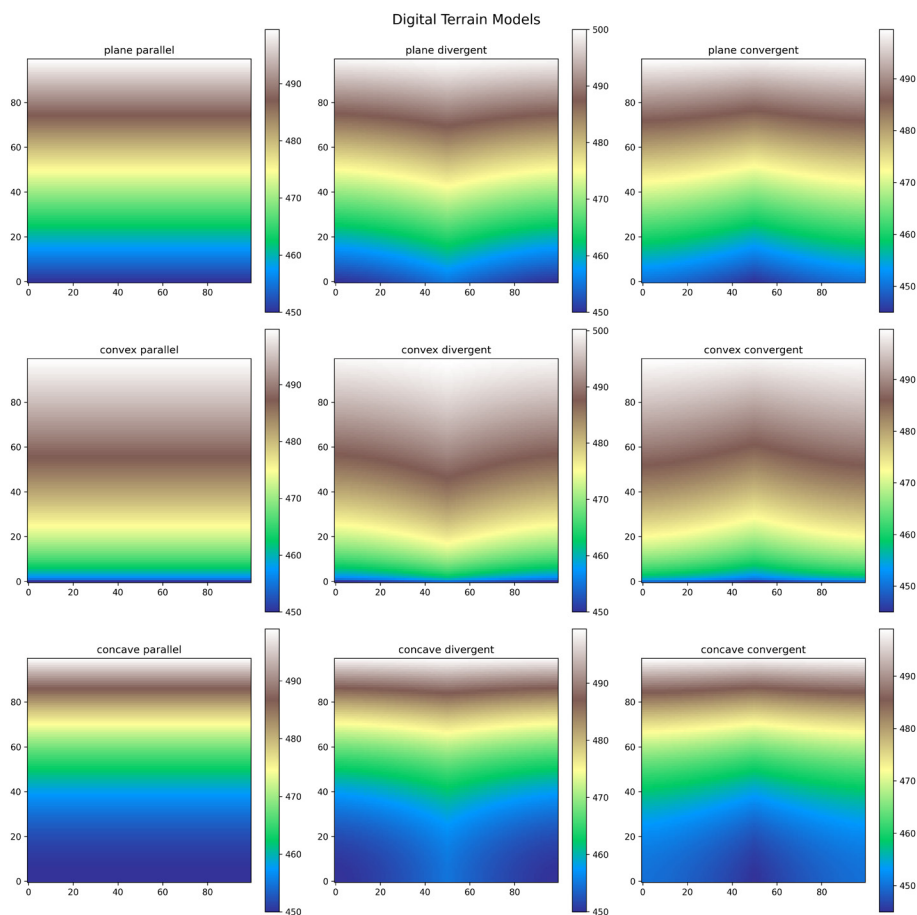
- Středně intenzivní, delší déšť (60 mm):
 - Reprezentuje výraznější srážkovou událost, např. dlouhou bouřku nebo intenzivní část frontálního systému.
 - Kombinace významného úhrnu a střední intenzity může vést k nasycení půdy a následné erozi.
 - Běžné v přechodných obdobích nebo během letních období v mírném pásmu.
 - Vypočtená i_{30} : $\approx 20,4$ mm/h, Přibližná doba trvání: 2,9 hodiny
- Mírně intenzivní, dlouhý déšť (120 mm):
 - Představuje vytrvalý déšť, např. několikadenní srážkovou epizodu.
 - Přestože intenzita je nižší, dlouhé trvání vede k nasycení půdy a potenciálně k významné erozi.
 - Vypočtená i_{30} : $\approx 10,7$ mm/h, Přibližná doba trvání: 11,2 hodiny
- Sklon pozemku:
 - 2–7 %: Tento sklon je považován za ideální pro efektivní protierozní opatření, jako je vrstevnicové obdělávání. V tomto rozsahu lze erozní ohroženost půdy snížit na polovinu.
 - 7–12 %: Sklony v tomto rozmezí jsou stále účinné, ale vyžadují kratší délku pozemku pro efektivní ochranu před erozí.
 - 12–18 %: Při těchto sklonových hodnotách účinnost protierozních opatření klesá.
 - Pro modelování jsme uvažovali průměr těchto rozsahů, tedy sklony 4,5 %, 9,5 % a 15 %.
- Typ půdy:
 - Byly zvoleny dva rozšířené půdní typy, a to kambizemě pro podhorské oblasti a černozemě pro oblasti nížinné. Hydrologické skupiny půd A a B, středně nasycené povodí a za parametr CN křivek jsme dosazovali průměr všech možných variant.

V rámci prostředí NetLogo pak byly testovány všechny kombinace základních parametrů ve všech variantách dělení půdních bloků. Celkový počet simulací dosahoval hodnoty téměř 100 000.

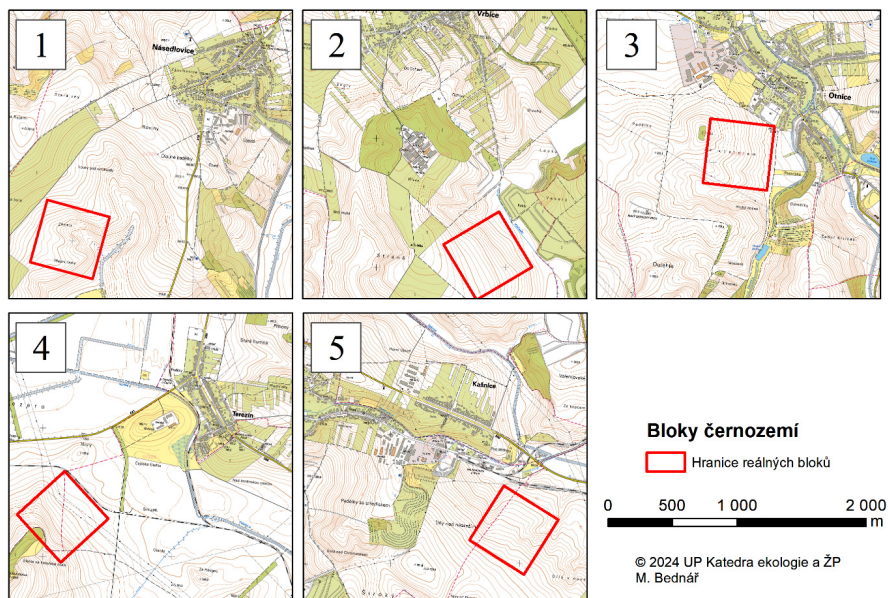
Výškové modely virtuálních bloků byly vytvořeny prostřednictvím skriptů v Pythonu vždy tak, aby byla nejvyšší část svahu orientovaná na sever. Velikost buňky byla stanovena na 5, resp. 4 m pro půdní bloky 400×400, 500×500, 600×600 m, resp. 288×288 m. Faktor sklonu pozemku jsme testovali pouze na půdním bloku 400×400 m, pro ostatní velikosti jsme uvažovali průměrný sklon, tj. 9.5 %.

Reálné půdní bloky byly vybrány náhodně z oblasti jižní Moravy (černozemě) a Vysočiny (kambizemě), vždy 5 bloků o velikostech 500×500 m. Jako výškový model byl využit DMR 4G s velikostí buňky 5×5 m. Jednotlivé bloky neodpovídají hranici reálným blokům, takové bloky by nebylo možné najít, podmínkou výběru byl pouze odpovídající převažující půdní typ a zemědělská půda. Vybrané pozemky jsou vyznačeny na obrázku 13 a obrázku 14.

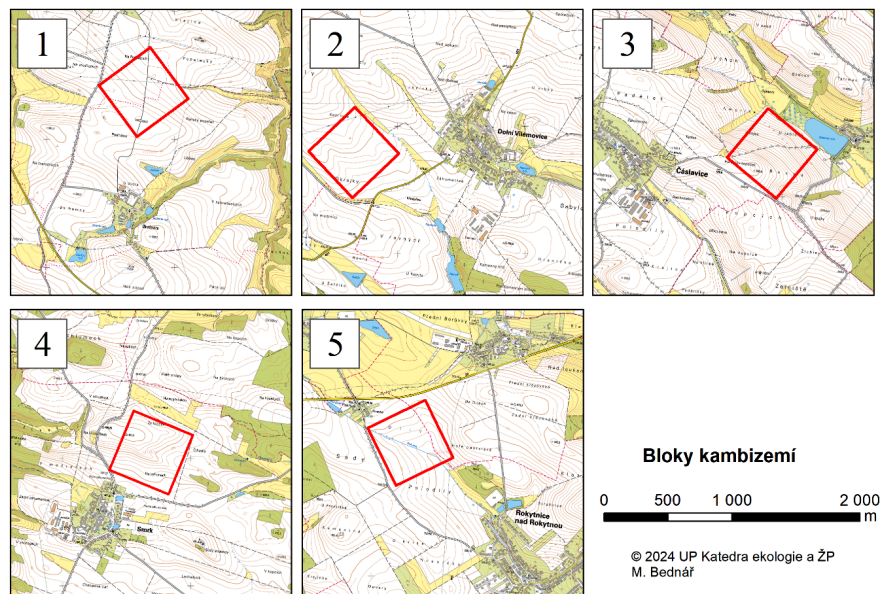
Pro potřeby vlastní simulace byly tyto následně otočeny tak, aby spádnice směřovala co nejvíce ve směru od severu k jihu, podobně jak je tomu u virtuálních bloků.



Obrázek 12. Ukázka generovaných výškových modelů pro půdní blok 500×500m



Obrázek 13. Náhodně vybrané bloky 500×500m na černozemích



Obrázek 14. Náhodně vybrané bloky 500×500m na kambizemích

11.3 Zdroje dat, postup zpracování a použitý software

Data pro tuto studii byla získána prostřednictvím následujících zdrojů a metod:

1. **Digitální modely terénu:**
 - Digitální modely terénu (DTM – DMR 4G, rozlišení 5×5 m): Byly použity pro zpracování topografických dat reálných půdních bloků.
2. **Modelování eroze pomocí USLE:**
 - Tradiční USLE: Použití k základnímu odhadu eroze na jednotné plodiny (Mitasova et al., 1996).
 - Inovovaná USLE: Implementace modifikovaného LS faktoru pomocí modifikačního faktoru akumulace soustředěného odtoku.
3. **Agentově orientované modelování (ABM) v NetLogo:**
 - Pro modelování a vizualizaci složitých vzorů odtoku jsme využili agentově orientovaný model (ABM) v prostředí NetLogo. ABM umožňuje simulačně zkoumat interakce mezi jednotlivými částmi systému (v našem případě jednotlivými částicemi vody a půdními částicemi) a lépe tak pochopit dynamiku erozních procesů. Byly vytvořeny algoritmy pozměněného výpočtu eroze podle USLE s realizací směru povrchového odtoku podle metodiky Quinna et al. (1991), která byla popsána výše.
4. **Experimentální nastavení:**
 - Varianty pásového střídání plodin: Testování různých šířek pásů, úhlů dělení vůči spádnici, tvarů povrchu a směrů povrchu.
 - Reálné podmínky vs. virtuální simulace: Porovnání výsledků získaných z virtuálních bloků s empirickými daty z reálných půdních bloků.

Použité nástroje a software

- **NetLogo 6.40:** Platforma pro agentově orientované modelování, použita pro simulaci a vizualizaci dynamických procesů odtoku a eroze.
- **GIS software (ArcGIS 10.8, QGIS 3.38):** Pro vizualizaci prostorových dat.
- **Statistické nástroje (R, Python 3.11):** Pro analýzu a interpretaci dat získaných z modelování a terénních měření.
- **Softwarové nástroje (Python):** generování rastrových DMT v různých variantách.

12 Výsledky

Praktická část metodiky zahrnuje testování navrhované metodiky na několika variantách rozdělení půdního bloku. Jedná se především o pásové střídání plodin (PSP) na virtuálních i reálných blocích, dále rozdělení bloku středovým pásem erozně neohrožené plodiny (SP) a přidání druhé plodiny (DP) o minimální souvislé šířce 110 m do horní, resp. spodní části bloku.

Některé zkoumané faktory jsou platné pro všechny uvedené varianty, jiné pouze pro specifické případy. Celkově bylo provedeno několik desítek tisíc simulací kombinujících všechny možné varianty uvažovaných faktorů. V této kapitole prezentujeme pouze nejvýznamnější zjištění, která jsou podpořena statistickou analýzou generalizovaných modelů.

Všechny varianty byly počítány jak klasickým přístupem (USLE), tak nově navrhovanou metodou (USLE-CN). V úvodních částech této sekce představujeme nejzajímavější závěry týkající se vlivu jednotlivých faktorů, v závěru kapitoly pak porovnání obou metodických přístupů.

12.1 Pásové střídání plodin – virtuální bloky

12.1.1 Plodiny a jejich uspořádání

Mimořádně zajímavá zjištění se týkají umístění pšenice na svahu. Při jejím umístění ve spodní části svahu dosahujeme nejnižší hodnoty erozního smyvu při orientaci pásů po vrstevnicích (90°). Naopak při umístění pšenice v horní části svahu je trend opačný – nejnižší eroze nastává při orientaci po spádnici (0°). Efekt se ještě stupňuje se zvyšující se šířkou pásu. Toto zjištění významně zpochybňuje tradiční doporučení umísťovat pásy vždy po vrstevnicích.

Kukuřice v nejnižší části svahu vykazuje výrazně vyšší hodnoty eroze než pšenice, přičemž tento rozdíl je výraznější u metody USLE ($\beta = -2,16$) než u USLE-CN ($\beta = -0,69$).

12.1.2 Šířka a orientace pásů

Orientace pásů a jejich šířka významně ovlivňují míru eroze, přičemž tento vliv je úzce spjatý s typem plodiny umístěné ve spodní části svahu. Při umístění pšenice ozimé (méně erozně ohrožená plodina) ve spodní části svahu dosahuje eroze nejnižších hodnot při orientaci pásů podle vrstevnic.

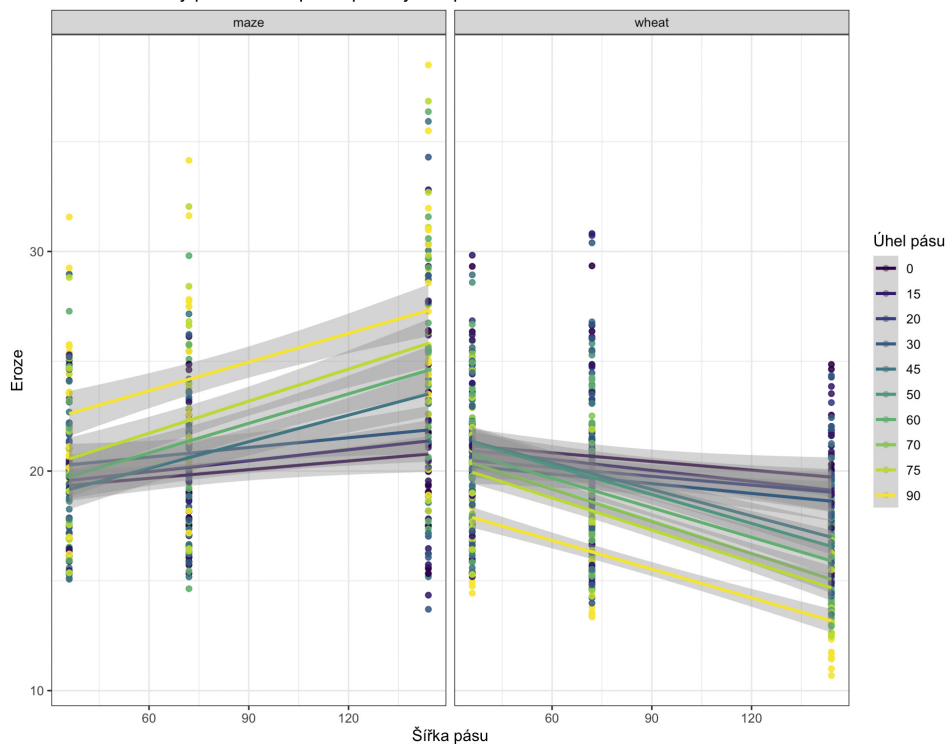
Z hlediska šířky pásů ukazuje metoda USLE pouze statisticky malý vliv na erozi, zatímco metoda USLE-CN naopak vykazuje mírně pozitivní vztah ($\beta = 0,01$). Vizualní analýza (obrázky 15 a 16) však odhaluje zřetelné trendy. Při pěstování kukuřice ve spodní části svahu se eroze zvyšuje s rostoucí šířkou pásu (zmenšujícím se počtem pásů). Nejhorší variantou je rozdělení půdního bloku na dvě části s erozně náchylnou plodinou ve spodní části svahu. Pro pásové střídání se jako optimální jeví šířky 25–50 m při pěstování kukuřice ve spodní části svahu, případně co nejširší pásy při pěstování pšenice ve spodní části. Pro variantu SP s pásem jetele uprostřed půdního bloku jsou efektivnější širší pásy v rozmezí 60–80 m.

Volba šířky pásů závisí na několika klíčových faktorech. Na pozemcích s konvergentním odtokem se jako optimální jeví užší pásy, které lépe přerušují dráhu soustředěného odtoku. Při divergentním odtoku můžeme volit pásy širší, protože riziko koncentrace odtoku je nižší. Významnou roli hraje také sklon pozemku – se zvyšujícím se sklonem je vhodnější volit užší pásy, které efektivněji přerušují dráhu povrchového odtoku.

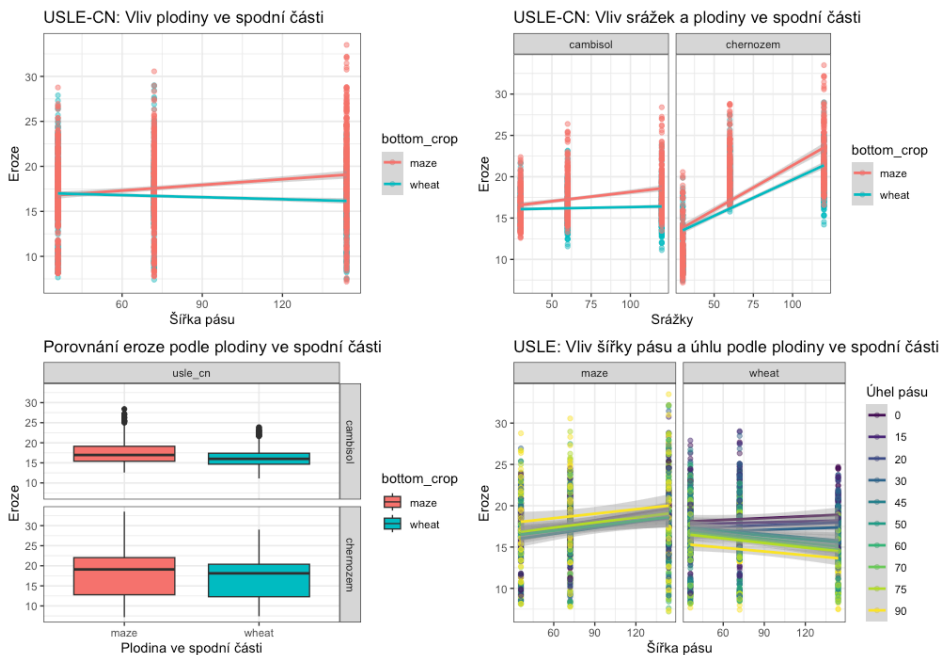
Zajímavým zjištěním je rozdílná efektivita šířky pásů v závislosti na typu půdy. Na černozemích, které jsou obecně náchylnější k erozi, je vhodnější volit užší pásy (cca 30–40 m), zatímco na kambizemích můžeme pracovat s širšími pásy (40–50 m) bez výrazného zvýšení rizika eroze.

Metodika USLE-CN navíc umožňuje zachytit vliv srážek, kde je na obrázku 16 jasně patrná pozitivní korelace mezi srážkovým úhrnem a celkovou erozí.

USLE: Vliv šířky pásu a úhlu podle plodiny ve spodní části



Obrázek 15. Vliv šířky pásu a úhlu na celkovou erozi v závislosti na uspořádání plodin (výpočet proveden podle USLE) – úhly jsou uvedeny azimutálně (orientace po vrstevnicích odpovídá úhlu 90°)



Obrázek 16. Výsledné vazby eroze na šířku pásu, umístění plodiny, úhel odklonu a typ půdy, počítáno metodou USLE-CN

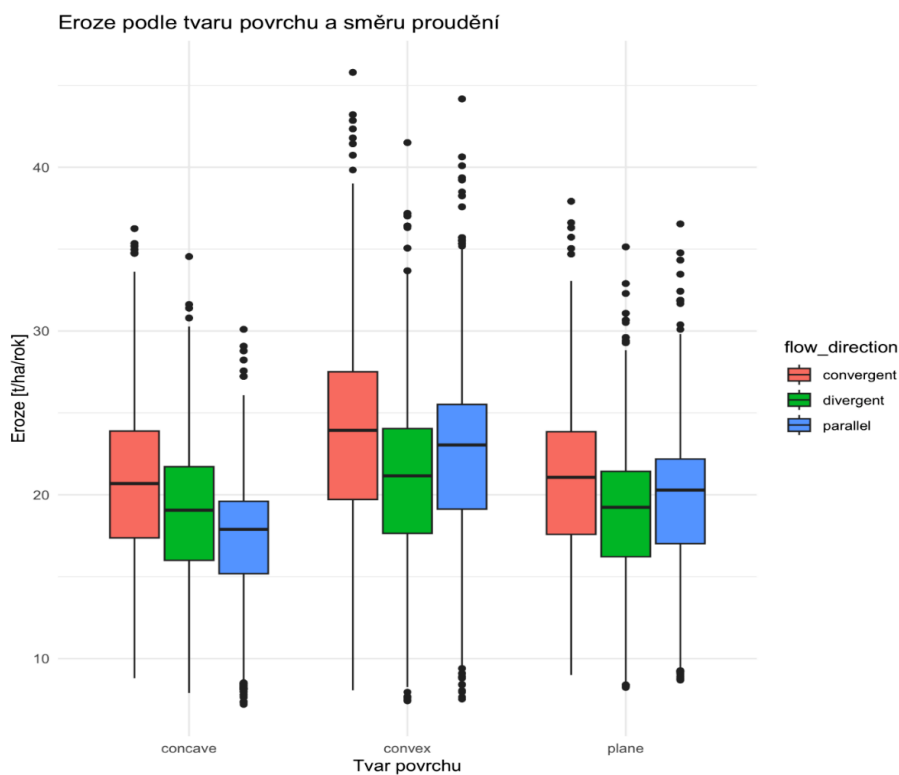
12.1.3 Morfologie terénu

Tvar terénu se ukázal jako jeden z klíčových faktorů ovlivňujících míru eroze (obrázek 17). Konvexní svahy vykazují konzistentně nejvyšší hodnoty eroze u obou testovaných metod, přičemž tento efekt je výraznější při použití klasické USLE metody ($\beta = 3,73$) oproti modifikované metodě USLE-CN ($\beta = 3,04$). Konkávní svahy naopak poskytují nejlepší přirozenou protierozní ochranu. Tento efekt lze vysvětlit tím, že na konkávních svazích dochází k postupnému snižování sklonu ve směru po spádnici, což vede ke zpomalování povrchového odtoku a snížení jeho erozní účinnosti. Navíc se zde často vytváří akumulací zóny, kde dochází k ukládání erodovaného materiálu. Přímé (paralelní) svahy představují střední variantu z hlediska erozního ohrožení. Jejich výhodou je možnost efektivnějšího využití protierozních opatření, zejména pásového střídání plodin, protože zde nedochází k výrazným změnám sklonu, které by komplikovaly geometrické uspořádání pásů.

12.1.4 Směr odtoku

Analýza vlivu směru odtoku přinesla několik významných zjištění (obrázek 17). Konvergentní odtok jednoznačně způsobuje nejvyšší hodnoty erozního smyvu, následuje paralelní a divergentní odtok. Jen v případě konkávního povrchu má paralelní směr odtoku nižší hodnoty eroze. Tento trend se konzistentně projevuje napříč všemi testovanými variantami uspořádání pozemku.

V případě konvergentního odtoku dochází ke koncentraci povrchového odtoku do užších zón, což vede ke zvýšení jeho erozní účinnosti. Tento efekt je zvláště patrný při vyšších srážkových úhrnech, kdy se vytvářejí výrazné erozní rýhy v místech soustředěného odtoku. Divergentní odtok naopak vodu rozptýluje do širší plochy, čímž snižuje její erozní potenciál.



Obrázek 17. Vztah eroze ke tvaru a typu povrchu ukazuje nejnižší hodnoty pro konkávní divergentní povrch

12.1.5 Sklon terénu

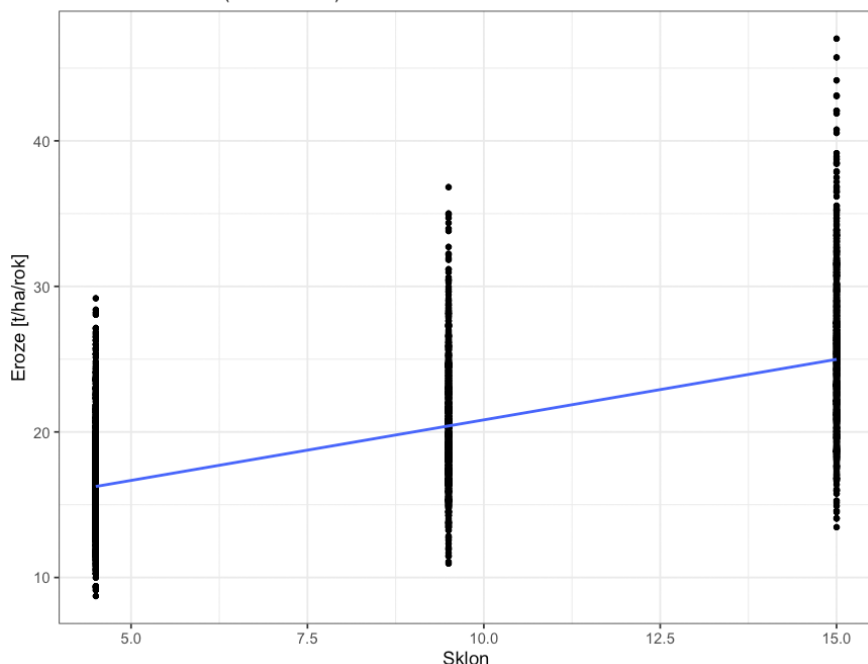
Analýza vlivu sklonu terénu přinesla několik významných zjištění. Modelování bylo provedeno na půdním bloku 400×400 m ve třech variantách sklonu: 4,5 %, 9,5 % a 15 %. Výsledky ukazují několik důležitých trendů. Podle očekávání se potvrdila téměř lineární závislost mezi sklonem svahu a mírou eroze (obrázek 18). Tento vztah je konzistentní jak pro metodu USLE, tak pro USLE-CN, přičemž hodnoty získané metodou USLE-CN jsou systematicky mírně nižší. Tento rozdíl je způsoben přesnějším zohledněním heterogenity povrchu a odtokových poměrů v modifikované metodě.

Výzkum odhalil významné interakce sklonu s několika klíčovými faktory. V případě orientace pásů při pásovém střídání plodin se ukázalo, že na mírnějších sklonech (4,5 %) je vliv orientace pásů méně výrazný. Se zvyšujícím se sklonem však roste význam správné orientace pásů, přičemž při sklonu 15 % se již jedná o kritický faktor pro účinnost protierozních opatření.

Šířka pásů představuje další důležitý aspekt. Zatímco na mírnějších sklonech lze efektivně pracovat s širšími pásy, se zvyšujícím se sklonem je třeba pásy zužovat. Při sklonu 15 % je efektivita širokých pásů výrazně snížena.

Typ plodiny hraje rovněž významnou roli v závislosti na sklonu terénu. Na mírnějších sklonech pozorujeme menší rozdíly mezi erozním účinkem kukuřice a pšenice. Tyto rozdíly se však se zvyšujícím se sklonem dramaticky zvětšují, až se při sklonu 15 % stává volba plodiny kritickým faktorem pro míru eroze.

Sklon vs. Eroze (blok 400m) – USLE



Obrázek 18. Vliv sklonu svahu na výslednou erozi (metoda USLE) na půdním bloku 400×400m

12.1.6 Typ půdy a srážky

Výsledky jasně ukazují, že černozemě vykazují vyšší náchylnost k erozi než kambizemě. Tento rozdíl je způsoben především odlišnostmi v zrnitosti půdy a množství a kvalitě organické hmoty. Černozemě, přestože jsou obecně považovány za velmi úrodné půdy, jsou náchylnější k rozplavení půdních agregátů a následné erozi.

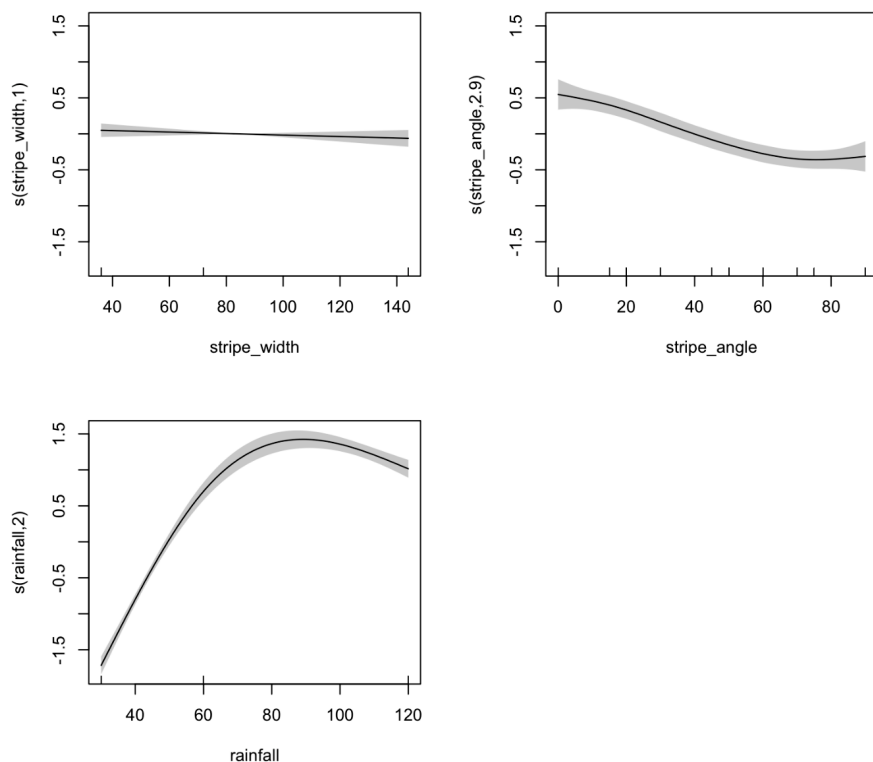
Intenzita srážek má pozitivní vztah s mírou eroze, ale tento vztah není lineární. Zajímavé je zjištění, že někde mezi úhrnem srážek 30–60 mm/h dochází k prudkému zvýšení hodnot eroze. Při vyšších hodnotách (delší době deště o nižší intenzitě) již výsledná hodnota eroze neroste tak dramaticky. Tento jev lze vysvětlit překročením infiltrační kapacity půdy a nasycením půdního profilu.

Statistické vyhodnocení v podobě generalizovaného lineárního modelu (GLM), který předpokládá lineární závislosti, bylo na hraně splnění podmínek použití metody. Proto byl nakonec vybrán generalizovaný aditivní model (GAM), který umožňuje zachytit nelineární vazby. Porovnání Akaikových kritérií ukázalo jako lepší model GAM (AIC = 28567 se 47,8 % vysvětlení variability) oproti GLM (AIC = 28822).

Výsledky ukazují (tabulka 1), že všechny parametry jsou statisticky signifikantní, až na šířku pásů, která nemá statisticky větší význam. Tady také nebyla statisticky prokázána nelinearita (obrázek 19).

Tabulka 1. Výsledky GAM modelu pro variantu pásového střídání plodin v poměru 1 : 1

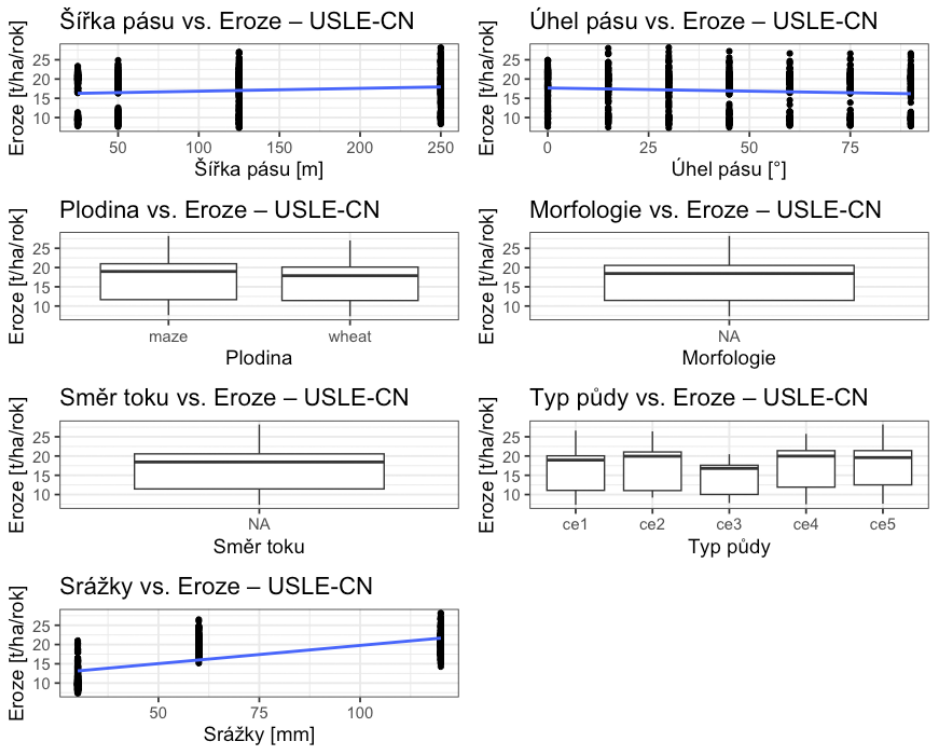
<i>Predictors</i>	Erosion			
	<i>Estimates</i>	<i>std. Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>p</i>
(Intercept)	20,24	0,13	160,03	< 0,001
crop2 [wheat]	-2,00	0,09	-22,48	< 0,001
soil type [chernozem]	2,53	0,09	29,10	< 0,001
morphology [convex]	3,13	0,11	29,31	< 0,001
morphology [plane]	0,96	0,11	8,97	< 0,001
method [usle_cn]	-2,92	0,09	-33,53	< 0,001
flow direction [divergent]	-2,87	0,11	-26,87	< 0,001
flow direction [parallel]	-2,13	0,11	-19,97	< 0,001
Smooth term (stripewidth)			1,15	0,283
Smooth term (stripeangle)			16,45	< 0,001
Smooth term (rainfall)			392,28	< 0,001
Observations	5508			
R ²	0,476			
AIC	28567,144			



Obrázek 19. Nelineární charakteristiky faktorů ve variantě pásového střídání plodin v poměru 1 : 1

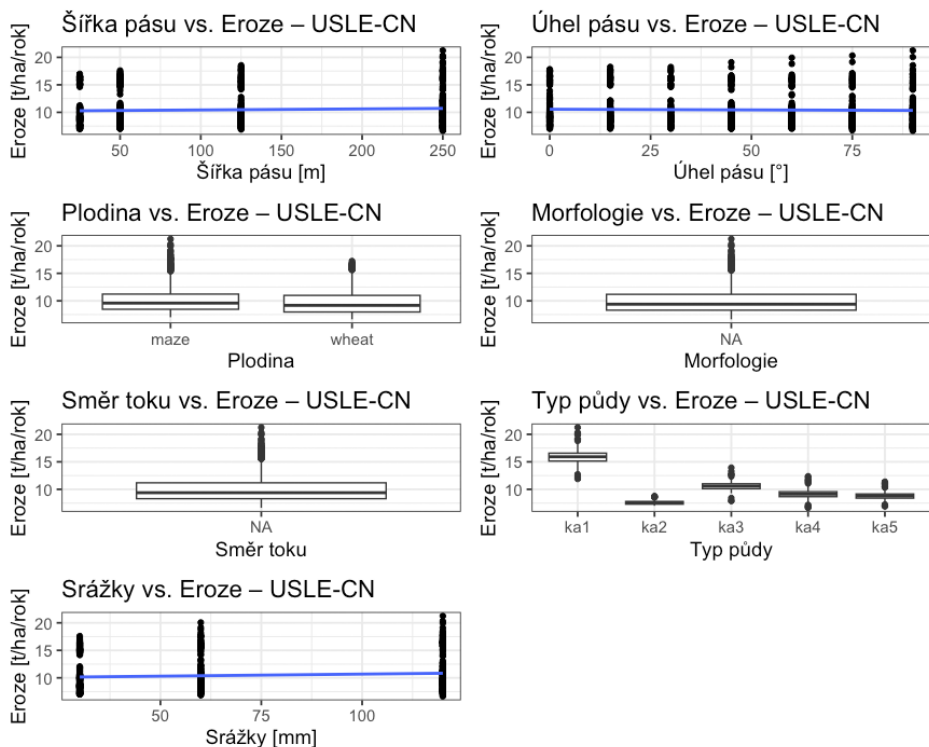
12.2 Pásové střídání plodin – reálné bloky

Z hlediska vazeb jednotlivých faktorů na erozi v černozemí nemá z hlediska úhlů odklonů pásů ve variantě USLE v zásadě žádný větší vliv, na rozdíl od metody USLE-CN, kde nižších výsledných hodnot eroze dosahují spíše pásy blížící se vrstevnicovému obdělávání (obrázek 20). Vše je podobně jako u virtuálních bloků ovlivněno pozicí méně erozně ohrožené plodiny na bloku, kde kukuřice dole představuje větší erozní nebezpečí než naopak. Tento závěr je výraznější při použití metody USLE. Zajímavý je nelineární trend srážkového úhrnu, kde někde mezi úhrnem srážek 30–60 mm/h dochází k prudkému zvýšení hodnot eroze. Při vyšších hodnotách (delší době deště o nižší intenzitě) pak již výsledná hodnota eroze neroste.



Obrázek 20. USLE-CN analýza na reálných blocích (černozemě) potvrzuje závěry z virtuálních bloků, odlišná je jen nelineární závislost eroze na úhrnu srážek

U kambizemí (obrázek 21) vidíme v zásadě podobný trend, pouze mírnější. Klíčovou roli opět hraje plodina ve spodní části svahu, srážky však u tohoto půdního typu nemají příliš výrazný dopad a vykazují spíše velice mírný lineární trend.



Obrázek 21. Analýza USLE-CN na reálných blocích (kambizemě)

12.3 Pásové střídání plodin – variabilní poměr šířky ochranné a chráněné plodiny

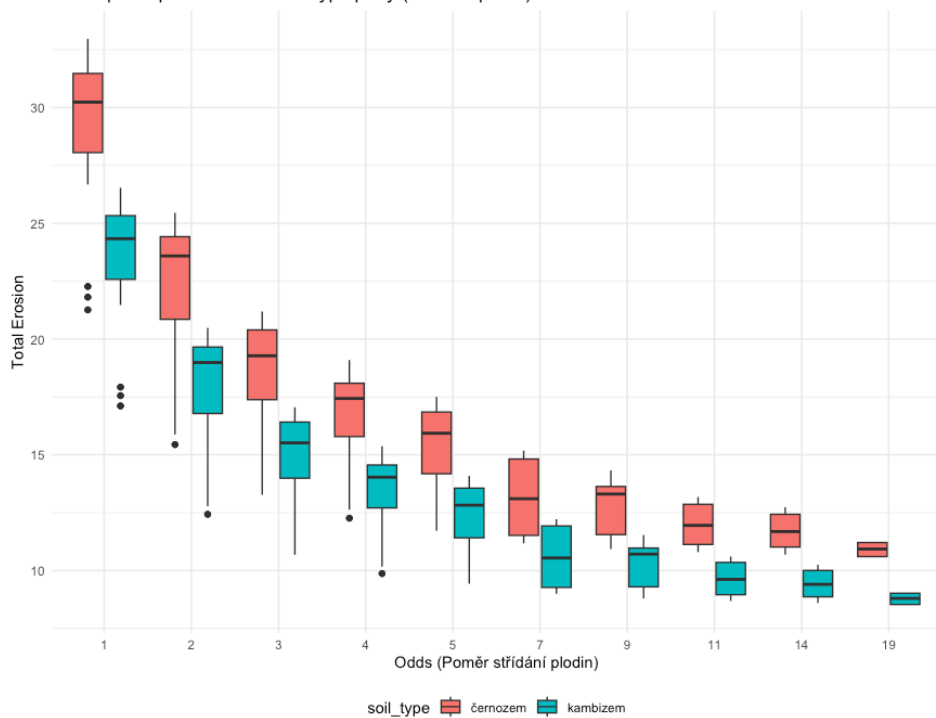
Výsledná eroze exponenciálně klesá se zvyšujícím se poměrem podílu ochranné a chráněné plodiny (odds). Závislost eroze na některých faktorech je nelineární, proto byl pro vyhodnocení použit GAM model, který číselně potvrzuje signifikanci všech faktorů, stejně jako exponenciální pokles se zvyšujícím se poměrem (obrázek 22). Závislost na srážkách je rovněž nelineární, při nižších hodnotách eroze roste, po určité hodnotě se nárůst zpomaluje a poté se křivka zplošťuje a klesá. To by mohlo znamenat, že zvýšení úhrnu srážek nad určitou úroveň už nemá tak dramatický efekt na erozi jako intenzivnější nižší úhrn. S rostoucí šířkou pásů eroze klesá, což by mohlo indikovat ochranný vliv širších pásů na erozi (obrázek 23).

Celkově tento model ukazuje (tabulka 2), že:

- u kambizemí oproti černozemím byl zaznamenán nižší erozní smyv (odhad = $-1,25$, $p < 0,001$),
- konvexní morfologie zvyšuje erozi (odhad = $1,4$, $p < 0,001$), zatímco přímá morfologie ji oproti konkávní morfologii také lehce zvyšuje, ale méně (odhad = $0,36$, $p = 0,011$),
- divergentní (odhad = $-0,84$, $p < 0,001$) a paralelní proudění (odhad = $-0,77$, $p < 0,001$) snižují erozi oproti konvergentnímu proudění,
- nelineární vztahy (hladké termy) (obrázek 24) ukazují, že různé úrovně odds, rainfall a stripe_length mají signifikantně významné složité, nelineární vlivy na erozi.

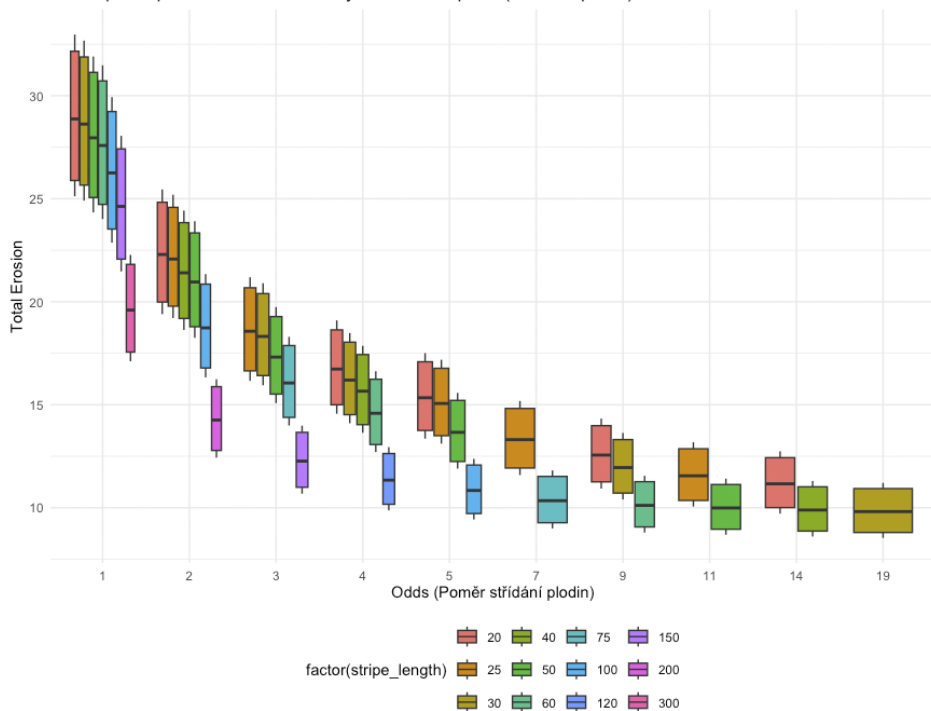
Model vysvětluje 70 % variability.

Eroze podle poměru střídání a typu půdy (USLE – plane)

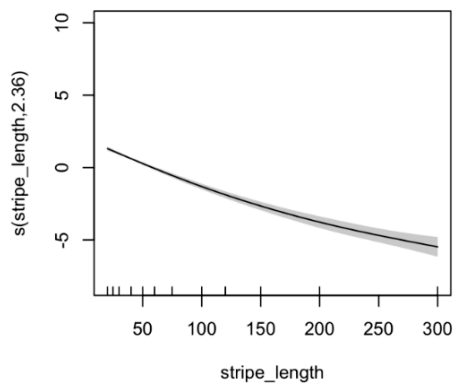
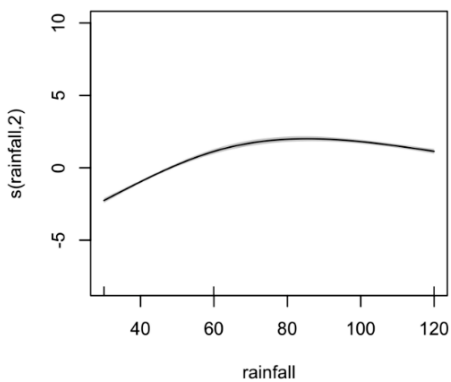
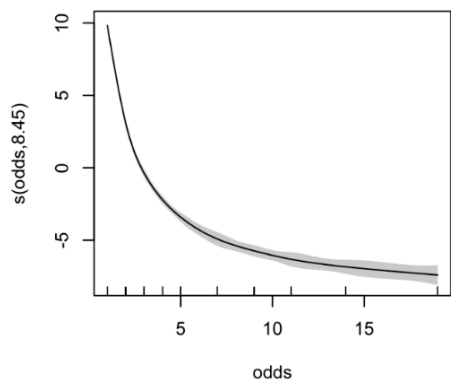


Obrázek 22. Vztah eroze a poměru střídání plodin s odlišením půdních typů, počítáno metodou USLE

Eroze podle poměru střídání a délky základního pásu (USLE – plane)



Obrázek 23. Vztah eroze a poměru střídání plodin s rozlišením délky základního pásu kukuřice, počítáno metodou USLE



Obrázek 24. Nelineární vazba faktorů na výslednou erozi, počítáno metodou USLE-CN

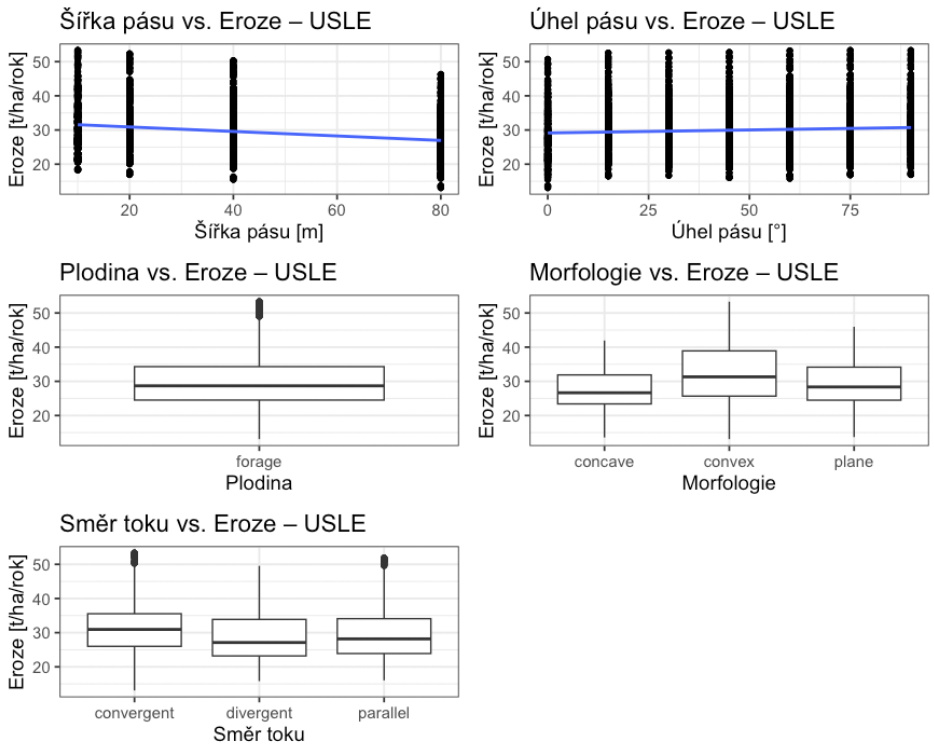
Tabulka 2. Výsledky statistické analýzy modelu GAM

<i>Predictors</i>	Total erosion			
	<i>Estimates</i>	<i>std. Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>p</i>
(Intercept)	16,46	0,14	116,95	< 0,001
soil type [kambizem]	-1,25	0,11	-10,88	< 0,001
morphology [convex]	1,40	0,14	9,97	< 0,001
morphology [plane]	0,36	0,14	2,55	< 0,001
flow direction [divergent]	-0,84	0,14	-5,97	< 0,001
flow direction [parallel]	-0,77	0,14	-5,49	< 0,001
Smooth term (odds)			921,82	< 0,001
Smooth term (rainfall)			387,80	< 0,001
Smooth term (stripelength)			218,93	< 0,001
Observations	3996			
R ²	0,702			
AIC	21670,456			

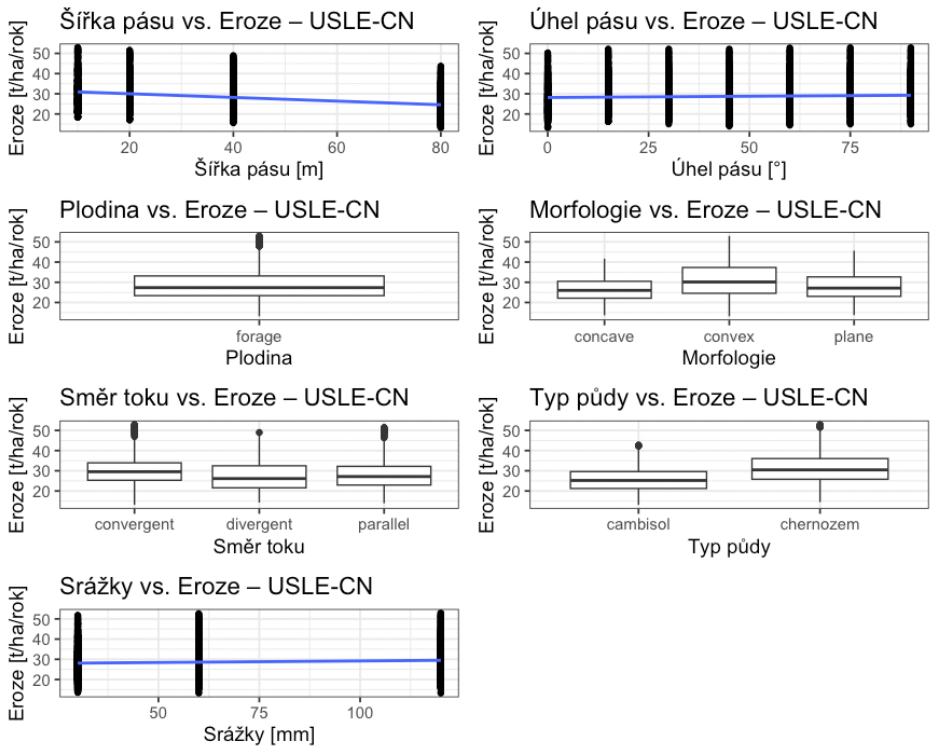
12.4 Varianta dělení bloku středovým pásem (SP)

Vlivy jednotlivých faktorů jsou obdobné, jak již bylo uvedeno, jen šířka pásu vykazuje vyšší míru negativního růstu, kdy širší pásy obecně představují lepší řešení (viz obrázky 25 a 26). Úhel středového pásu měl při výpočtech eroze na celkovou hodnotu pouze malý vliv. Metoda USLE-CN navíc umožňuje vyhodnotit vliv srážek a typu půdy, kdy srážky nehrají větší roli. Výsledná eroze je v souladu s předchozími zjištěními vyšší na černozemích.

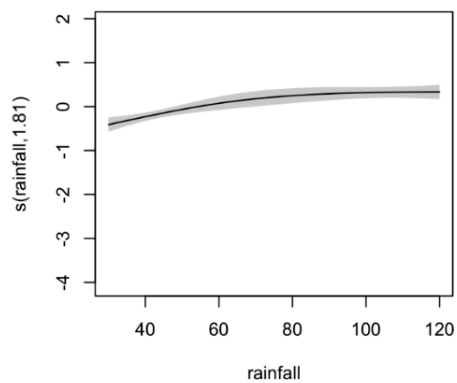
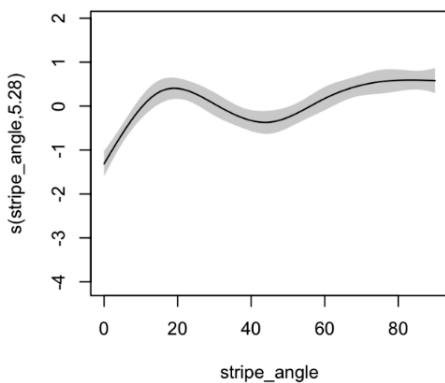
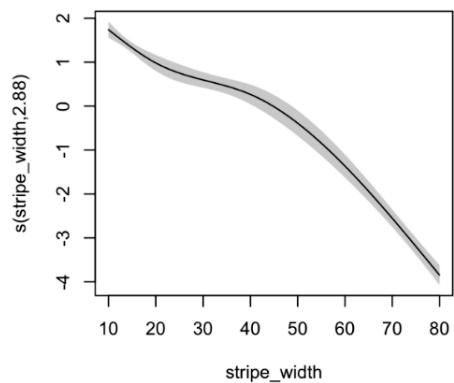
Statistické výsledky (tabulka 3) ukazují významné závislosti všech proměnných modelu GAM s nelinearitou srážek, šířky i úhlu středového pásu. Optimální nastavení vychází pro úhel 0°, lokální minimum pak kolem 45°. Se zvětšující se šířkou středového pásu se eroze výrazně snižuje.



Obrázek 25. Výsledky analýz pro variantu středového pásu a přístupu USLE



Obrázek 26. Výsledky analýz pro variantu středového pásu a přístupu USLE-CN



Obrázek 27. Statistický GAM model pro analýzu středového oddělovacího pásu ukazuje nelineární závislosti úhlu odklonu, šířky pásu a srážek

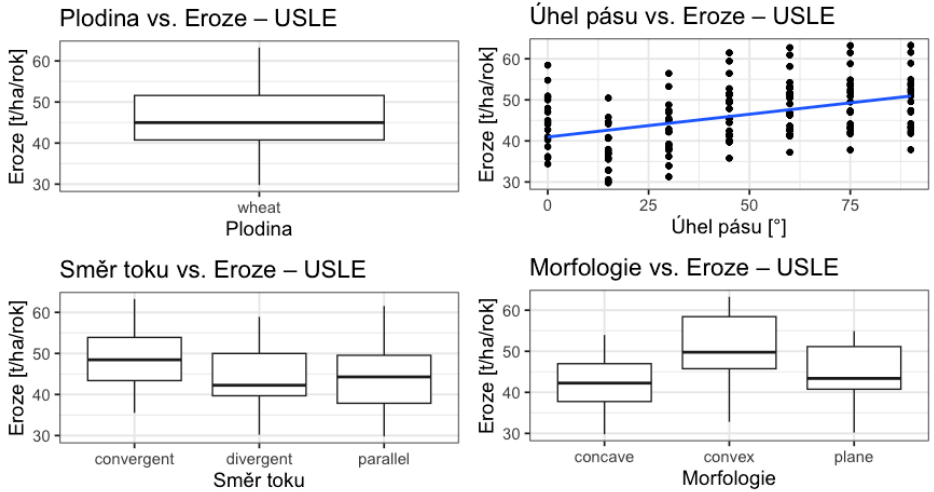
Tabulka 3. Výsledky modelu GAM pro dělení bloku středovým pásem

<i>Predictors</i>	<i>Estimates</i>	Erosion		
		<i>std. Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>p</i>
(Intercept)	26,14	0,16	167,95	< 0,001
soil type [chernozem]	6,00	0,12	50,87	< 0,001
morphology [convex]	4,77	0,14	33,24	< 0,001
morphology [plane]	1,84	0,14	12,69	< 0,001
method [usle_cn]	-1,24	0,12	-10,49	< 0,001
flow direction [divergent]	-2,37	0,14	-16,40	< 0,001
flow direction [parallel]	-1,82	0,14	-12,59	< 0,001
Smooth term (stripewidth)			421,62	0,283
Smooth term (stripeangle)			19,45	< 0,001
Smooth term (rainfall)			12,89	< 0,001
Observations	10476			
R ²	0,344			
AIC	67398,340			

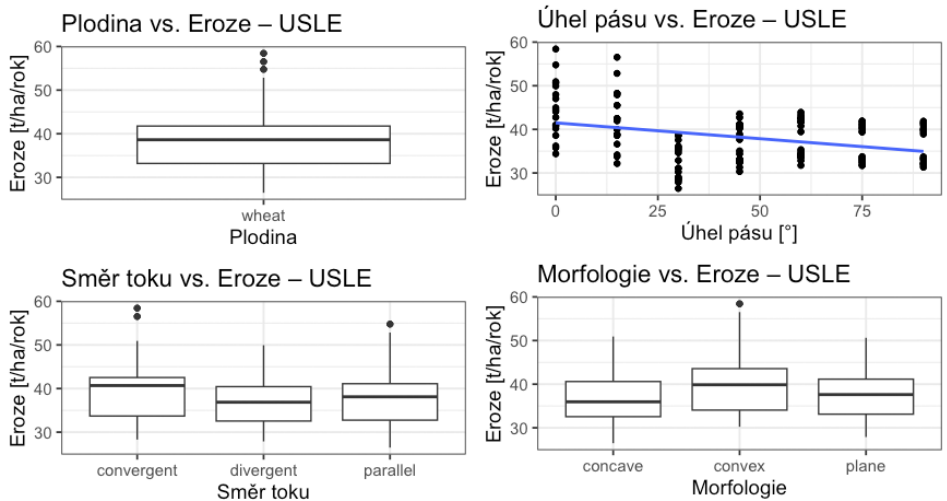
12.5 Varianta druhé plodiny

U této varianty vycházíme z doporučení DZES 7B, podle něhož lze rozdělit pozemek nad 30 ha plochou jiné plodiny o minimální souvislé šířce 110 m. Přesně v této šířce byly prováděny modelace ve variantě natočení i z hlediska umístění druhé plodiny, která byla buď v horní, nebo spodní části svahu. Obecné závěry víceméně odpovídají závěrům u pásového střídání plodin, kdy významnou roli hraje právě umístění druhé plodiny (pšenice), která zásadně mění výsledné hodnoty eroze. Podobně jako u PSP je výsledná eroze u pšenice ve spodní části výrazně menší než v opačném případě. Analýza odklonu dělicí hranice plodin navíc ukazuje optimum odklonu někde mezi 30° a 45° od spádnice.

Charakteristiky vlivu morfologie a směru toku zůstávají stejné. Výsledky podle postupu USLE-CN jsou relativně podobné se stejnými optimálními úhly odklonu (uvádíme pouze variantu USLE – viz obrázky 28 a 29).

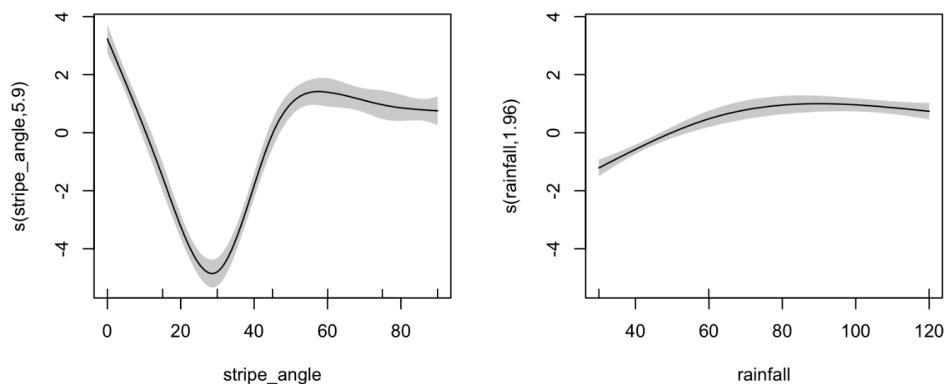


Obrázek 28. Výsledky analýzy pro rozdělení bloků s výměrou větší než 30 ha prostřednictvím umístění druhé plodiny (pšenice) ve variantě pšenice v horní části svahu



Obrázek 29. Výsledky analýzy pro rozdělení bloků s výměrou větší než 30 ha prostřednictvím umístění druhé plodiny (pšenice) ve variantě pšenice v dolní části svahu

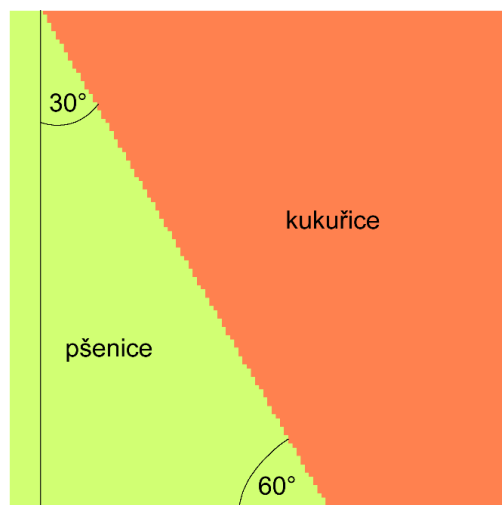
Vazba výsledné eroze na odklon pásu není lineární (obrázek 30), optimální se ukazuje úhel 30° odklonu od spádnice s rozdělením bloku podle obrázku 31. Srážkový úhrn má obdobnou nelineární závislost jako v jiných variantách s vrcholem kolem 80 mm/h (obrázek 30). Jako nejlepší statistický model se ukazuje opět GAM (AIC = 8439), který překonává model GLM (AIC = 8919) a vysvětluje 71,9 % variability (tabulka 4).



Obrázek 30. Při variantě dělení půdního bloku dělením plodiny je závislost mezi natočením dělící hranice plodin a výslednou erozí nelineární, podobně je tomu i u úhrnu srážek

Tabulka 4. Výsledky modelu GAM pro analýzu přidání jedné plodiny.

<i>Predictors</i>	Erosion			
	<i>Estimates</i>	<i>std. Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>p</i>
(Intercept)	34,87	0,29	122,32	< 0,001
orientation [top]	5,70	0,20	28,27	< 0,001
soil type [chernozem]	7,80	0,20	38,70	< 0,001
morphology [convex]	5,77	0,25	23,39	< 0,001
morphology [plane]	1,34	0,25	5,43	< 0,001
method [usle_cn]	-2,11	0,20	-10,49	< 0,001
flow direction [divergent]	-3,08	0,25	-12,48	< 0,001
flow direction [parallel]	-2,67	0,25	-10,80	< 0,001
Smooth term (stripeangle)			92,72	< 0,001
Smooth term (rainfall)			36,41	< 0,001
Observations	1512			
R ²	0,716			
AIC	8439,277			



Obrázek 31. Nejlepší sklon půdního dílu přidané plodiny z hlediska erozního ohrožení je 30°

12.6 Srovnání metod USLE a USLE-CN

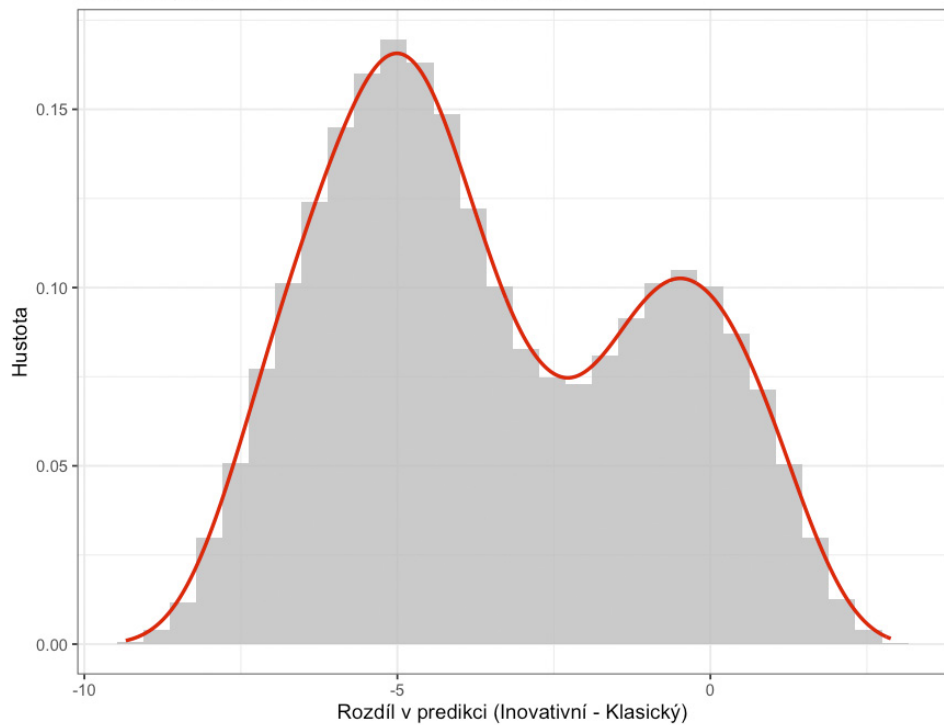
Porovnání metod USLE a USLE-CN odhalilo významné rozdíly v jejich přístupu k hodnocení eroze půdy. Kvantitativní analýza ukazuje lepší vysvětlovací schopnost metody USLE-CN s koeficientem determinace $R^2 = 0,479$ oproti USLE s $R^2 = 0,404$. Tento rozdíl potvrzuje i nižší hodnota AIC pro USLE-CN (58035,608 vs. 59574,235), což naznačuje lepší přiléhavost modelu k reálným datům.

Distribuční analýza rozdílů mezi metodami vykazuje bimodální rozdělení s hlavním vrcholem okolo -5 t/ha/rok (obrázek 32). Toto zjištění indikuje, že USLE-CN obecně predikuje nižší hodnoty eroze než klasická USLE metoda (obrázek 33). Rozdíl je nejvýraznější na černozemích a při vyšších srážkových úhrnech, kde USLE-CN lépe zohledňuje komplexní interakce mezi půdními vlastnostmi a hydrologickými podmínkami. Statistická analýza (tabulka 5) potvrdila významné rozdíly ($p < 0,001$) pro všechny sledované parametry, s nejvýraznějšími rozdíly u půdního typu a srážek.

USLE-CN vykazuje několik zásadních předností v modelování erozních procesů. V oblasti půdních podmínek metoda citlivěji reaguje na rozdíly v půdních typech a jejich vlastnostech, což je patrné zejména u černozemí, kde USLE může erozi nadhodnocovat. Z hlediska srážek USLE-CN přesněji zachycuje nelineární vztah mezi jejich intenzitou a erozí, především při vyšších úhrnech, kdy dokáže lépe modelovat výsledné hodnoty eroze. V neposlední řadě metoda lépe zohledňuje prostorovou heterogenitu terénu a její vliv na erozní procesy, což je klíčové při modelování topograficky komplikovanějších svahů s různými typy pokryvu.

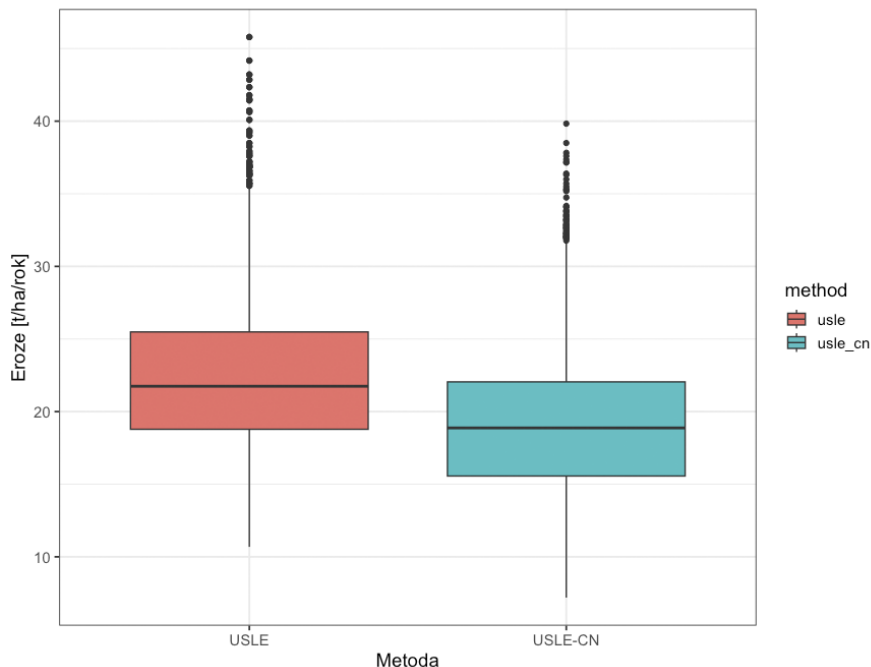
Tyto metodické rozdíly mají významné praktické důsledky pro plánování protieročních opatření. USLE-CN poskytuje přesnější podklady pro jejich dimenzování, zejména v případech heterogenního pokryvu půdy nebo složitější morfologie terénu. Díky přesnějším odhadům eroze umožňuje optimalizovat investice do protieročních opatření a lépe cílit jejich umístění. Z dlouhodobého hlediska tak poskytuje spolehlivější podklady pro plánování ochrany půdy, což je zvláště významné v kontextu měnících se klimatických podmínek.

Rozdíl v predikci eroze mezi USLE-CN a USLE



Obrázek 32. Histogram rozdílů ve výpočtu eroze metodami USLE-CN a USLE napříč variantami pásového střídání plodin

Porovnání USLE a USLE-CN



Obrázek 33. Celkové porovnání metod výpočtu USLE a USLE-CN napříč všemi variantami

Tabulka 5. Statistika rozdílů ve výpočtu eroze metodami USLE-CN a USLE

<i>Predictors</i>	Prediction error			
	<i>Estimates</i>	<i>std. Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>p</i>
(Intercept)	-7,78	0,02	-376,62	< 0,001
stripe width	0,00	0,00	38,60	< 0,001
stripe angle	-0,02	0,00	-73,54	< 0,001
soil type [chernozem]	0,68	0,01	52,04	< 0,001
rainfall	0,06	0,00	357,80	< 0,001
Observations	21492			
R ² / R ² adjusted	0,865 / 0,865			
AIC	59246,763			

13 Praktická doporučení a implikace výsledků simulací pro praxi

Následující doporučení vycházejí z výsledků výzkumu různých způsobů dělení půdních bloků. Důraz je kladen na praktickou aplikaci poznatků v různých půdních a terénních podmínkách.

13.1 Základní principy dělení půdních bloků

Výzkum prokázal, že klíčovým faktorem efektivity je správné umístění ochranných prvků a plodin. Tradiční doporučení umístit pásy po vrstevnicích při pásovém střídání plodin vyžaduje diskusi o přehodnocení podle typu plodiny ve spodní části svahu. Zatímco při umístění úzkořádkových plodin (např. pšenice) ve spodní části svahu je orientace po vrstevnicích optimální, při umístění kukuřice ve stejných místech je nutné uvažovat o jiné organizaci pásů. Stejný vliv umístění úzkořádkové plodiny byl pozorován i při rozdělení půdního bloku přidáním druhé plodiny (pšenice).

Pro pásové střídání plodin se jako optimální osvědčily šířky 25–50 m, zejména pokud je ve spodní části svahu kukuřice. Při umístění pšenice ve spodní části svahu lze využít i širší pásy. U středových ochranných pásů s víceletými pícninami jsou efektivnější šířky 60–80 m, které lépe přerušují odtokové linie.

Poměr střídání plodin významně ovlivňuje míru eroze. Vyšší poměr ochranné plodiny (např. pšenice) k chráněné plodině (např. kukuřici) vede k nižšímu eroznímu smyvu. K výraznému snížení erozního smyvu dochází už při poměrech od 2 : 1 nebo 3 : 1. Poměry nad 5 : 1 už takové snížení nepřinášejí.

13.2 Přizpůsobení místním podmínkám

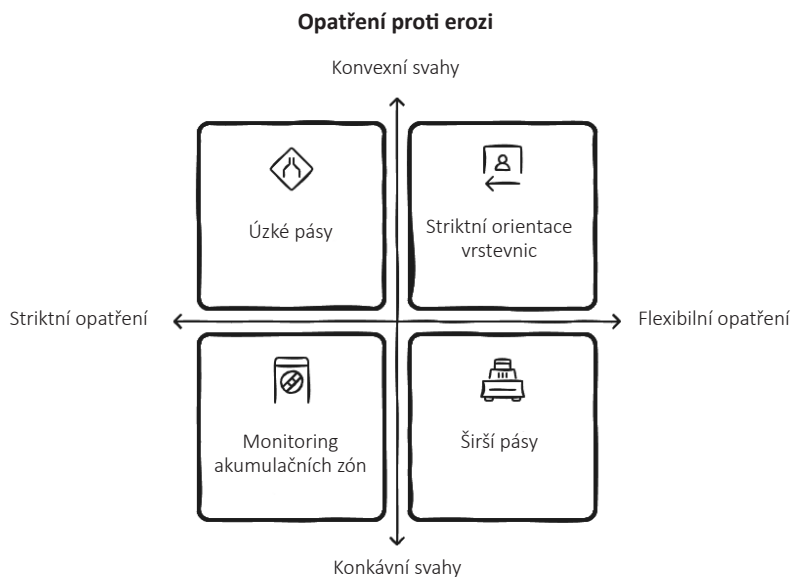
Výsledky jasně ukazují potřebu přizpůsobit protierozní opatření specifickým podmínkám každého půdního bloku:

Půdní podmínky:

- Černozemě vykazují vyšší náchylnost k erozi a vyžadují důslednější přístup včetně užších pásů, striktního dodržování vrstevnicové orientace a vyššího zastoupení ochranných plodin.
- Kambizemě umožňují větší flexibilitu v šířce pásů i geometrickém uspořádání.

Morfologie terénu (obrázek 34):

- Konvexní svahy představují nejvyšší riziko eroze a vyžadují zúžení ochranných prvků společně se striktní vrstevnicovou orientací.
- Konkávní svahy umožňují flexibilnější uspořádání, je však nutné věnovat pozornost monitoringu akumulčních zón.
- Na pozemcích s konvergentním odtokem je třeba věnovat zvýšenou pozornost šířce a orientaci pásů.



Obrázek 34. Opatření proti erozi na základě morfologie

Klimatické podmínky:

V oblastech s vyššími srážkovými úhrny je vhodné volit užší pásy a zvýšit podíl ochranných plodin. V sušších oblastech lze pracovat s širšími pásy, přičemž důraz by měl být kladen na opatření podporující zadržení vody v půdě. Při návrhu je třeba zohlednit nejen dlouhodobé průměrné srážkové vzory, ale i extrémní srážkové události.

13.3 Implementace a monitoring

Zavedení nového způsobu dělení půdních bloků vyžaduje systematický přístup zahrnující důkladnou analýzu výchozího stavu. Moderní technologie jako GPS navigace zajišťují přesné dodržování navržených opatření, zatímco drony umožňují efektivní monitoring porostů. Nezbytnou součástí je pravidelná dokumentace stavu půdy a sledování projevů eroze, zejména po významných srážkových událostech.



Obrázek 35. Výhody a nevýhody dělení půdních bloků

13.4 Adaptace na klimatickou změnu

Systém dělení půdních bloků vyžaduje průběžné přizpůsobování měnícím se klimatickým podmínkám. Klíčová je zejména podpora retenční schopnosti půdy, diverzifikace plodin a budování záchytných prvků pro přívalové srážky. Pravidelná revize účinnosti opatření a přizpůsobování šířky ochranných prvků aktuálním srážkovým poměrům jsou nezbytnou součástí adaptačního procesu.

Při návrhu protierozních opatření je třeba zohlednit nejen dlouhodobé průměrné srážkové vzorce, ale i extrémní srážkové události, které často dominují celkovým erozním ztrátám (Larson et al., 1997).

14 Závěr

Předložená metodika představuje inovativní přístup k výpočtu eroze na heterogenních plochách, který překonává omezení standardní USLE metody. Metodika přináší významné teoretické i praktické přínosy pro přesnější modelování erozních procesů v zemědělské krajině.

Z teoretického hlediska metodika rozšiřuje stávající USLE model o zohlednění heterogenity pokryvu prostřednictvím modifikovaného výpočtu příspěvkové plochy. Zavádí nový přístup k výpočtu L faktoru pomocí CN křivek, který lépe reflektuje reálné odtokové poměry na heterogenních plochách. Tím poskytuje teoretický rámec pro přesnější modelování erozních procesů v morfologicky složité zemědělské krajině.

Praktické ověření metodiky provedené na virtuálních i reálných půdních blocích prokázalo významné rozdíly ve výsledcích mezi standardní USLE a modifikovanou USLE-CN metodou. USLE-CN prokázala lepší schopnost zachytit vliv heterogenity pokryvu na erozní procesy a umožňuje přesnější dimenzování protierozních opatření díky zohlednění vzájemných interakcí různých typů pokryvu.

Z hlediska aplikačního potenciálu může nalézt metodika uplatnění především v projektování pozemkových úprav, plánování protierozních opatření, optimalizaci uspořádání plodin na svažitých pozemcích a při hodnocení účinnosti různých způsobů hospodaření na heterogenních plochách.

Pro další zdokonalení metodiky doporučujeme rozšířit validaci na větší počet reálných půdních bloků, zpřesnit stanovení CN křivek pro různé kombinace plodin a vyvinout softwarový nástroj pro automatizovaný výpočet. Vhodné by bylo také doplnit metodiku o ekonomickou analýzu navrhovaných opatření.

Metodika představuje významný krok k přesnějšímu hodnocení erozních procesů na heterogenních plochách a poskytuje praktický nástroj pro optimalizaci proti-erozní ochrany v současné zemědělské krajině. Její implementace může přispět k efektivnější ochraně půdy a udržitelnému hospodaření v podmínkách měnícího se klimatu. V rámci navazujícího výzkumu plánujeme její rozšíření i o pohled krajinných prvků, které mohou být důležité jak pro dělení půdních bloků, tak z hlediska posílení biodiverzity a zadržování vody v krajině.

Seznam použité literatury

- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. In *Science* (Vol. 348, Issue 6235). <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
- Barták, V. (2009). How to extract river networks and catchment boundaries from DEM. A review of digital terrain analysis techniques. In *Journal of Landscape Studies* (Vol. 2). <https://www.researchgate.net/publication/288867373>
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): With a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Campanelli, G., Iocola, I., Leteo, F., Montemurro, F., Platani, C., Testani, E., & Canali, S. (2023). Strip cropping in organically managed vegetable systems: Agronomic and environmental effects. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 38. <https://doi.org/10.1017/S1742170523000248>
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427–433.
- Dumbrovský, M., Šarapatka, B. a kolektiv (2023): Pásové střídání plodin jako protierozní a adaptační opatření v pozemkových úpravách. Certifikovaná metodika, Univerzita Palackého v Olomouci, 49 s.
- Juventia, S. D., Norén, I. L. M. S., Van Apeldoorn, D. F., Ditzler, L., & Rossing, W. A.H. (2022). Spatio-temporal design of strip cropping systems. *Agricultural Systems*, 201, 103455.
- Kolektiv autorů (2024). Ochrana zemědělské půdy před erozí – metodika 2024. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i., Praha, 144 s.
- Larson, W. E., Lindstrom, M. J., & Schumacher, T. E. (1997). The role of severe storms in soil erosion: A problem needing consideration. In *Journal of Soil and Water Conservation* (Vol. 52, Issue 2).
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., & Meyer, L. D. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1571–1576.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., & Iverson, L. R. (1996). International Journal of Geographical Information Science Comment on 'Modelling topographic potential for erosion and deposition using. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(2).
- Nearing, M. A. (1997). A Single, Continuous Function for Slope Steepness Influence on Soil Loss. *Soil Science Society of America Journal*, 61(3), 917–919. <https://doi.org/10.2136/SSSA-J1997.03615995006100030029X>
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., & Blair, R. (1995). Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science*, 267(5201), 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.267.5201.1117>
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5(1), 59–79. <https://doi.org/10.1002/HYP.3360050106>

- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). In: U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.703, 404 pp.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (2019). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 4 Storm Rainfall Depth and Distribution. Available online: <https://directives.nrcs.usda.gov/...pdf>.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. In: U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537, 57 pp.

Seznam obrázků

Obrázek 1. Cíle metodiky	6
Obrázek 2. Porovnání použití USLE a navrhované metody USLE-CN	7
Obrázek 3. Příčiny vodní eroze v zemědělské krajině	12
Obrázek 4. Výhody a nevýhody jednoduchých a složitých modelů eroze půdy	16
Obrázek 5. Rozdělení algoritmů pro generování směrového odtoku	17
Obrázek 6. MFD algoritmus směru odtoku – Voda se šíří všemi možnými směry proporcionálně podle výškového rozdílu (převzato z Barták, 2009)	17
Obrázek 7. Výhody a nevýhody použití ABM metod	19
Obrázek 8. Porovnání tradičního USLE výpočtu a výpočtu se zohledněním CN křivek	22
Obrázek 9. Schematické vyjádření výpočtu modifikačního faktoru pro upřesnění příspěvkové plochy pro bloky s heterogenním pokryvem plodin	23
Obrázek 10. Přehled opatření na snížení erozní ohroženosti půdních bloků	26
Obrázek 11. Design simulací a uvažované faktory	28
Obrázek 12. Ukázka generovaných výškových modelů pro půdní blok 500×500 m	30
Obrázek 13. Náhodně vybrané bloky 500×500 m na černozemích	31
Obrázek 14. Náhodně vybrané bloky 500×500 m na kambizemích	31
Obrázek 15. Vliv šířky pásu a úhlu na celkovou erozi v závislosti na uspořádání plodin (výpočet proveden podle USLE) – úhly jsou uvedeny azimutálně (orientace po vrstevnicích odpovídá úhlu 90°)	35
Obrázek 16. Výsledné vazby eroze na šířku pásu, umístění plodiny, úhel odklonu a typ půdy, počítáno metodou USLE-CN	36
Obrázek 17. Vztah eroze ke tvaru a typu povrchu ukazuje nejnižší hodnoty pro konkávní divergentní povrch	37
Obrázek 18. Vliv sklonu svahu na výslednou erozi (metoda USLE) na půdním bloku 400×400 m	39
Obrázek 19. Nelineární charakteristiky faktorů ve variantě pásového střídání plodin v poměru 1 : 1	41
Obrázek 20. USLE-CN analýza na reálných blocích (černozemě) potvrzuje závěry z virtuálních bloků, odlišná je jen nelineární závislost eroze na úhrnu srážek	42
Obrázek 21. Analýza USLE-CN na reálných blocích (kambizemě)	43
Obrázek 22. Vztah eroze a poměru střídání plodin s odlišením půdních typů, počítáno metodou USLE	45
Obrázek 23. Vztah eroze a poměru střídání plodin s rozlišením délky základního pásu kukuřice, počítáno metodou USLE	46
Obrázek 24. Nelineární vazba faktorů na výslednou erozi, počítáno metodou USLE-CN	47
Obrázek 25. Výsledky analýz pro variantu středového pásu a přístupu USLE	49

Obrázek 26. Výsledky analýz pro variantu středového pásu a přístupu USLE-CN	50
Obrázek 27. Statistický GAM model pro analýzu středového oddělujícího pásu ukazuje nelineární závislosti úhlů odklonu, šířky pásu a srážek	51
Obrázek 28. Výsledky analýzy pro rozdělení bloků s výměrou větší než 30 ha prostřednictvím umístění druhé plodiny (pšenice) ve variantě pšenice v horní části svahu	53
Obrázek 29. Výsledky analýzy pro rozdělení bloků s výměrou větší než 30 ha prostřednictvím umístění druhé plodiny (pšenice) ve variantě pšenice v dolní části svahu	53
Obrázek 30. Při variantě dělení půdního bloku dělením plodiny je závislost mezi natočením dělící hranice plodiny a výslednou erozí nelineární, podobně je tomu i u úhrnu srážek	54
Obrázek 31. Nejlepší sklon půdního dílu přidané plodiny z hlediska erozního ohrožení je 30°	55
Obrázek 32. Histogram rozdílů ve výpočtu eroze metodami USLE-CN a USLE napříč variantami pásového střídání plodin	57
Obrázek 33. Celkové porovnání metod výpočtu USLE a USLE-CN napříč všemi variantami	58
Obrázek 34. Opatření proti erozi na základě morfologie	60
Obrázek 35. Výhody a nevýhody dělení půdních bloků	61

Seznam tabulek

Tabulka 1. Výsledky GAM modelu pro variantu pásového střídání plodin v poměru 1 : 1	40
Tabulka 2. Výsledky statistické analýzy modelu GAM	48
Tabulka 3. Výsledky modelu GAM pro dělení bloku středovým pásem	52
Tabulka 4. Výsledky modelu GAM pro analýzu přidání jedné plodiny.	55
Tabulka 5. Statistika rozdílů ve výpočtu eroze metodami USLE-CN a USLE	58

Seznam zkratek

- ABM – Agent-Based Modeling (Agentově orientované modelování)
- AIC – Akaike Information Criterion (Akaikeho informační kritérium)
- CN – Curve Number (Číslo odtokové křivky)
- DMR – Digitální model reliéfu
- DMR 4G – Digitální model reliéfu 4. generace
- DP – Druhá plodina (varianta dělení půdního bloku)
- DZES – Dobrý zemědělský a environmentální stav
- DPB – Díl půdního bloku
- GAM – Generalizovaný aditivní model
- GLM – Generalizovaný lineární model
- GIS – Geografický informační systém
- GPS – Global Positioning System (Globální polohovací systém)
- MFD – Multiple Flow Direction (Vícenásobný směr proudění)
- PSP – Pásové střídání plodin
- RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation (Revidovaná univerzální rovnice ztráty půdy)
- SFD – Single Flow Direction (Jednoduchý směr proudění)
- SP – Středový pás (varianta dělení půdního bloku)
- SPÚ – Státní pozemkový úřad
- USLE – Universal Soil Loss Equation (Univerzální rovnice ztráty půdy)
- USLE-CN – Modifikovaná verze USLE zohledňující CN křivky

Stanovení potenciální eroze pro nehomogenní pokryv zohledňující vliv různých plodin na povrchový odtok s možným využitím pro protierozní ochranu

Marek Bednář, Bořivoj Šarapatka, Patrik Netopil

Odpovědná redaktorka Tereza Vintrová
Layout a design obálky DivLand, Lenka Wünschová
Sazba Lenka Wünschová

Vydala Univerzita Palackého v Olomouci, Křížkovského 8, 779 00 Olomouc
vydavatelstvi.upol.cz
vupshop.cz

1. vydání
Olomouc 2024

ISBN 978-80-244-6571-5
VUP 2024-0470

Neprodejná publikace