

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra plánování krajiny a sídel



Modelování větrné eroze

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Gregar Ph.D.

Bakalant: Marek Pitner

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Marek Pitner

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Modelování větrné eroze

Název anglicky

Wind erosion modelling

Cíle práce

Cílem práce je představení větrné eroze, zhodnocení existujících možností modelování větrné eroze a jejich použitelnost v různých prostředích. Práce se bude zabývat nejen teoretickými základy modelů větrné eroze, ale také jejich aplikacemi v praxi a následnému zhodnocení, který model je nejefektivnější a který je ideální pro podmínky v České republice.

Metodika

Bakalářská práce bude zpracována formou literární rešerše na základě studia domácí a zahraniční literatury zabývající se větrnou erozí a modelování větrné eroze. Popsány budou základní informace týkající se větrné eroze, výskytu větrné eroze, představení a specifikace určitých druhů modelů používaných na ochranu proti větrné erozi. Součástí práce bude i jednotlivé posouzení užívaných modelů větrné eroze ve světě a v České republice. Popsání nejvíce užívaných metod v České republice a na závěr zhodnocení nevhodnějšího typu modelu pro podmínky v České republice.

Doporučený rozsah práce

dle Nařízení děkana č.01/2020 – Metodické pokyny pro zpracování bakalářské práce na FŽP

Klíčová slova

Větrná eroze, opatření proti větrné erozi, modelování větrné eroze, WEPS, RWEQ, WECON

Doporučené zdroje informací

- BUSCHIAZZO, D. E., ZOBECK T. M., 2008: Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 (12), 1839–1850.
- DOLEŽAL P., et kol., 2017: Řízení rizika větrné eroze. Certifikovaná metodika. Brno. © Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy. 53 stran, ISBN 978-80-263-1158-4
- GOOSSENS D., RIKSEN M., 2004: Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modelling. HAUPTMAN, Ivo; KUKAL, Zdeněk; POŠMOURNÝ, Karel; BIČÍK, Ivan; CIBULKA, Jiří; ČESKO. MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, ; ČESKO. MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Půda v České republice*. Praha: Pro Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zemědělství vydal Consult, 2009. ISBN 978-80-903482-4-0.
- HOLÝ, Miloš. *Eroze a životní prostředí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01078-3.
- CHEPIL, W. S., SIDDOWAY, F.H., ARMBRUST, D.V., 1962: Climatic Factor for Estimating Wind Erodibility of Farm Fields. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1, 162-165.
- JANEČEK, Miloslav; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Základy erodologie*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2008. ISBN 978-80-213-1842-7.
- MAHBOUBE J., MAYEL S., TATARKO J., FUNK R., KUKA K., 2020: A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity, CATENA
- PIVCOVÁ J., 1998: Větrná eroze půdy. VÚMOP, Praha.
- RIKSEN, Michael J. P. M., 2006: Wind born(e) landscapes: the role of wind erosion in agricultural land management and nature development: proefschrift. 1. vyd. Wageningen: Wageningen Universiteit, 231 s. ISBN 90-8504-386-7.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Jan Gregar

Garantující pracoviště

Katedra plánování krajiny a sídel

Elektronicky schváleno dne 19. 12. 2023

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 12. 2023

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 04. 01. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: "Modelování větrné eroze" vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektrická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 27.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Gregarovi Ph.D. za odborné vedení a připomínky. Rád bych také poděkoval manželce a celé rodině za trpělivost a pomoc při celém mém studiu.

Modelování větrné eroze

Abstrakt

Bakalářská práce se v úvodu zabývá představením větrné eroze. Zabývá se příčinami vzniku větrné eroze, popisuje pohyby půdních částic a dopady které má větrná eroze. Je zde představena větrná eroze vyskytující se ve světě a v České republice. Popsány jsou různé ochranné opatření před vznikem větrné eroze, nebo k jejímu zmírnění. Dále je představeno modelování větrné eroze a pozornost je věnována konkrétnímu představení jednotlivých modelů užívaných pro predikci větrné eroze.

Klíčová slova: Větrná eroze, opatření proti větrné erozi, modelování větrné eroze, WEPS, RWEQ, WECON

Wind erosion modelling

Abstract

The bachelor thesis starts with an introduction to wind erosion. I deal with the causes of wind erosion, describe the movements of soil particles and the effects that wind erosion has. Wind erosion occurring in the world and in the Czech Republic is presented. Various protective measures to prevent or mitigate wind erosion are described. Furthermore, wind erosion modelling is presented and attention is paid to the specific introduction of the different models used for wind erosion prediction.

Keywords: Wind erosion, wind erosion measures, wind erosion modelling, WEPS, RWEQ, WECON

Obsah

1 Úvod	9
2 Cíl práce a metodika	10
2.1 Cíl práce	10
2.2 Metodika.....	10
3 Literární rešerše	11
3.1 Větrná eroze	12
3.1.1 Příčiny větrné eroze	13
3.1.2 Pohyby půdních částic	14
3.1.3 Dopady větrné eroze	15
3.2 Větrná eroze ve Světě.....	16
3.3 Větrná eroze v České republice.....	17
3.4 Ochrana před erozí	18
3.5 Vědecký výzkum	19
3.6 Modelování větrné eroze	19
3.6.1 WEQ (Wind Erosion Equation).....	22
3.6.2 WEPS (Wind Erosion prediction System).....	23
3.6.3 WINDGEN	25
3.6.4 SWEEP (Single-event Wind Erosion Evaluation).....	26
3.6.5 RWEQ (Revised Wind Erosion Equation)	26
3.6.6 WECON (Wind Erosion from CONstruction activities).....	27
3.6.7 AERO (Aeolian Transport Model)	28
3.6.8 WELD (Wind Erosion and Landscape Dynamics).....	29
3.6.9 LEP (Landscape Erosion and Prediction Model).....	29
4 Výsledné zhodnocení	30
5 Diskuse	32
6 Závěr	35
7 Přehled literatury a použitých zdrojů	38
7.1 Použité zdroje	38
7.2 Seznam použitých obrázků a rovnic.....	46

1 Úvod

Půda je jedním z nejcennějších přírodních zdrojů, proto je zapotřebí jí chránit a předcházet její degradaci. Jde o samostatný přírodní útvar, který vzniká působením půdotvorných procesů. Půda má několik velice významných funkcí. Slouží jako úložiště jak nebezpečných, tak potřebných látek, které infiltruje a filtruje. Půda má schopnost transformace, kdy za pomoci mineralizace, nebo činností mikroorganismů dochází k přeměně toxických, nebo nebezpečných látek (Bičík et al. 2009). Úrodná půda je neobnovitelným zdrojem a důvodem proč bychom ji měli ještě více chránit. Degradaci půdy způsobuje mnoho faktorů a mezi jeden z faktorů patří větrná eroze (MZE 2018).

Větrná eroze představuje závažný environmentální problém s globálním dopadem. Vlivem klimatických změn a lidské činnosti se větrná eroze stává stále významnějším faktorem ovlivňujícím krajinnou dynamiku, kvalitu půdy a životní prostředí. Z tohoto důvodu se stává modelování větrné eroze klíčovým nástrojem pro predikci a monitorování těchto procesů.

Jedná se o přenos půdy a organického materiálu v důsledku působení větru, který vytváří erozní síly.

Následky větrné eroze v České republice nemají tak ničivé rozměry jako v jiných státech, ale i tak způsobuje v určitých oblastech značné škody. V České republice jsou nejvíce ohrožené oblasti Polabí a jižní Moravy. Tyto oblasti patří v České republice mezi nejúrodnější. Dle Pivcové (1998) došlo v České republice v období socialistické intenzifikace zemědělské výroby v padesátých letech k výraznému rozšíření větrné eroze na území ČR.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je představení větrné eroze, zhodnocení existujících možností modelování větrné eroze a jejich použitelnost v různých prostředích. Práce se zabývá nejen teoretickými základy modelů větrné eroze, ale také jejich aplikacemi v praxi a následnému zhodnocení, který model je nejefektivnější a který je ideální pro podmínky v České republice.

2.2 Metodika

Při zpracování bakalářské práce jsem vyhledával a zpracovával informace, které jsem převážně čerpal z odborné literatury zapůjčené v knihovnách, z vědeckých článků, které jsem vyhledával na internetových databázích, nebo si je zapůjčil v knihovně. Nejdříve jsem popisoval větrnou erozi, její výskyt, příčiny a dopady. Dále jsem se zaměřil na modelování větrné eroze a dostupné modely, které jsem jednotlivě popsal. Poté jsem zhodnotil na základě dostupné literatury, které modely se nejvíce využívají a na co jsou vhodné. V závěru práce jsem zhodnotil dle popsaných modelů, který z modelů je nejvíce vhodný pro krajinu České republiky.

3 Literární rešerše

Obecně lze erozi definovat jako proces, při kterém je rozrušován zemský povrch a následně je tato půda transportována na jiné místa, kde dochází k její akumulaci. Z hlediska intenzity eroze v čase rozlišujeme dva typy eroze. Jde o normální (geologickou) a působením člověka zrychlenou erozi. „*Geologická eroze vzniká přirozeně, postupně přetváří reliéf území a je v souladu s půdotvorným procesem.*“ (Doležal et al. 2017).

Erozi lze rozdělit podle činitelů, který erozi způsobuje. Můžeme ji rozdělit na větrnou, vodní, nebo sněhovou (Šarapatka et al. 2010).

Základními faktory ovlivňujícími větrnou erozi jsou síla větru, expozice půdy a vegetační pokryv. Tento proces má rozsáhlý dopad na kvalitu půdy a ztrátu úrodného povrchu.

Eroze je přirozený jev, ale v dnešní době je díky antropogenní činnosti mnohem intenzivnější a dochází k ní rychleji. Děje se tak díky nerovnováze mezi ztrátou půdy a její přirozenou tvorbou (Sklenička 2003).

V průběhu posledních let se více než třetina zemské souše potýká s větrnou erozí, která je přirozeným procesem, k němuž dochází většinou za sucha a při vysoké rychlosti větru nebo na holých půdách, kde je málo rostlinné biomasy (Weinan et Fryrear 1996).

Nadměrná sklizeň vegetace, odlesňování, nebo ponechání obdělávané půdy dlouho ladem urychluje proces eroze (Chen et al. 2014, He et al. 2006).

Problém eroze zemědělsky využívaných půd vyžaduje patřičnou pozornost, protože tento problém se stal problémem celosvětovým. Každým rokem se na zemi v důsledku eroze ztratí tisíce km² zemědělské půdy. V poslední době se na prohlubování problémů erozní ohroženosti půd výrazně podílí také globální změny klimatu, které ovlivňují celkový způsob využívání půdy a krajiny (Duniway et al. 2019).

Větrná eroze je pohyb hrubých a jemných částic větrem v krajině různými mechanismy, při nichž se dostávají do atmosféry a následně jsou rozptýleny po zemském povrchu. Účinek uvolňovaných částic na životní prostředí závisí na tom, jakou mají velikost a složení jednotlivé částice (Goossens et Riksen 2004). Měření větrné eroze může zlepšit naše poznatky o mechanismech tohoto procesu a hodnocení vlivu větrné eroze na životní prostředí. Od 40. let 20. století se v rámci terénních

a laboratorních studií hodnotily například vlivy jednotlivých faktorů na větrnou erozi (Fryrear et al. 1999). Ale vzhledem ke složitému vzájemnému působení fyzikálních procesů životního prostředí a působením člověka působilo sledování těchto procesů značné potíže.

Pro kvantitativní vyhodnocení větrné eroze se používají empirické a procesní modely. Údaje o větru jsou zásadně důležitá pro přesné modelování větrné eroze (Mahboube et al. 2020).

Často se používají modely větrné eroze doplněné o terénní a laboratorní měření, aby se zvažil vliv různých větrných faktorů větrné eroze současně. Tyto modely mohou poskytovat různé úrovně podrobných informací o větrné erozi a pohybu půdních částic v různých úrovních a v určitém časovém a prostorovém měřítku (Bhuyan et al. 2002). Tyto poznatky jsou zásadní a mohou pomoci vlastníkům půdy sledovat a předpovídat, jak přispívající faktory ovlivňují větrnou erozi jako i při provádění ochranných opatření (Bhuyan et al. 2002).

Zlepšení našich poznatků o větrné erozi je v dnešní době nezbytné pro účinné řízení půdních zdrojů a celkově pro ochranu životního prostředí. Terénní, laboratorní studie a šetření doplněné o modelování větrné eroze, jsou klíčovými nástroji pro pochopení tohoto komplexního procesu a navrhování nejvhodnějších opatření pro jeho snížení, nebo zpomalení.

3.1 Větrná eroze

Hlavním činitelem větrné eroze je vítr (Janeček et al., 2008). Vítr je dle Wegeové (2000) horizontální proudění vzduchu v atmosféře. Kvůli rozdílu tlaku vzduchu a směru proudění z oblastí s vyšším tlakem vzduchu do oblastí s nižším atmosférickým tlakem. Větrná eroze je pohyb hrubých a jemných částic větrem v krajině prostřednictvím různých mechanismů, kterými vstupují do atmosféry a následně jsou rozptýleny po zemském povrchu. Účinek uvolněných částic na životní prostředí závisí na složení a velikosti částic, jakož i na délce jejich vzdušné trajektorie, což může vyvolat obavy, a to jak na místě, tak i mimo něj (Goossens et Riksen 2004).

Větrná eroze může způsobit jak značné hospodářské škody, škody na životním prostředí, tak také ovlivňovat kvalitu půdy. Ztráta půdy v důsledku eroze snižuje plodnost a schopnost půdy udržet v sobě vodu a živiny. Větrná eroze může být hrozbou pro produktivitu zemědělství a udržitelnost přírodních zdrojů na zemi.

Větrnou erozi může způsobovat jak lehký vítr, který valí půdní částice podél povrchu půdy, tak i silný vítr, při kterém se zvedá velké množství půdních částic do vzduchu a tím dochází k prachovým bouřím.

Eolická neboli větrná eroze je výraznější v suchých oblastech a v oblastech, kde není dostatek srážek pro podporu vegetace a kořenových systémů.

3.1.1 Příčiny větrné eroze

Větrnou erozi ovlivňují dva základní faktory:

- Meteorologické – Doba trvání větru, četnost výskytu a rychlost.
- Půdní – vlhkost a struktura půdy.

Vlhkost půdy je dána množstvím srážek, teplotou, větrem a vlhkostí obsaženou v ovzduší. Vliv meteorologických podmínek na intenzitu a rozšíření větrné eroze nejlépe popisuje rovnice, která v sobě zahrnuje všechny uvedené meteorologické prvky. Tuto rovnici nazval Chepil et al. (1962) erozně klimatický faktor C. Ten vyjadřuje vliv průměrné vlhkosti půdního povrchu a průměrnou rychlost větru na průměrnou erodovatelnost půdy větrem.

Dle Holého (1994) jsou hlavní činitelé ovlivňující větrnou erozi:

- Klima
- Půdní vlhkost
- Drsnost povrchu
- Vegetační kryt
- Délka pozemku
- Činnosti člověka

Větrná eroze vzniká mechanickou činností větru, který rozrušuje půdní povrch, dochází k odnosu uvolněných půdních částic a dále k jejich uložení na jiném místě. Větrná eroze je typická v aridních a semiaridních oblastech, ale také v oblastech humidních na vysychavých půdách málo pokrytých vegetací s nepříznivými fyzikálními vlastnostmi. Vlivem intenzivního zemědělství jsou plochy, které jsou souvisle chráněné vegetačním pokryvem zmenšovány a tím dochází ke vzniku zrychlené eroze (Doležal et. al 2017).

Vítr obecně způsobuje erozi deflací, nebo abrazi (otěrem).

Deflace je proces, při němž vítr unáší volný povrchový materiál, jako je písek, prach, či jiné drobné půdní částice na jiná místa, kde se mohou tvořit písečné duny. Tento proces může vést k postupnému odstranění půdní vrstvy na určitém území, což má za následek vznik půdní eroze.

Deflace se obvykle vyskytuje v oblastech s nízkou vegetací, kde půda nemá dostatečnou ochranu proti větrné erozi.

Abraze (otěr) vzniká tak, že vítr unáší písek a prach a tře jej proti pevným povrchům, což způsobuje mechanické opotřebení. Tento proces může vést k erozi povrchových hornin, skal nebo jiných pevných materiálů. Abraze je typická v oblastech s výskytem větrné eroze.

Oba tyto mechanismy jsou vzájemně provázané a spolu s faktory jako jsou síla větru, déšť a vegetační kryt mohou způsobit významné změny v krajině a kvalitě půdy.

Toy et Foster (2002) uvádí, že 90% větrné eroze se vyskytuje na obdělávané půdě.

3.1.2 Pohyby půdních částic

Autoři (Holý 1994, Janeček et al. 2008, Shao 2008) se shodují, že vzdálenost a množství unášených částic je závislé na síle větru a velikosti půdních částic. Potřebná rychlost větru, aby se částice daly do pohybu se pohybuje v rozmezí 21 až 48 km.h⁻¹ (Holý 1994).

Známy jsou tři základní druhy transportu půdního materiálu větrnou erozí.

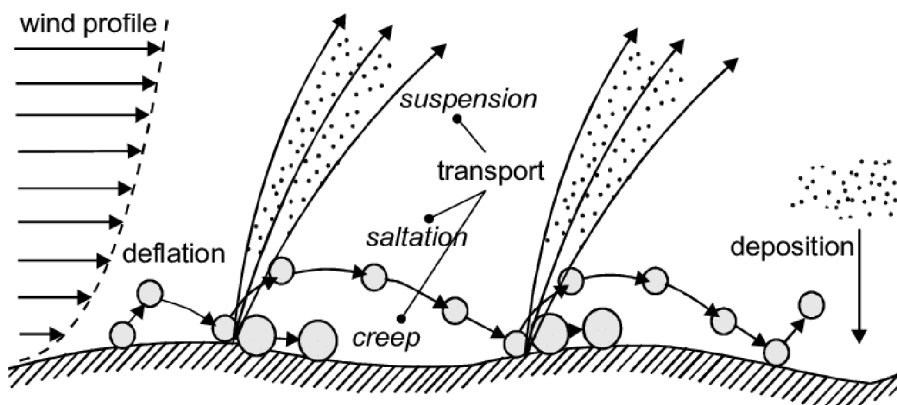
- Reptační
- Saltační
- Suspensní

Reptační transport je relativně krátký, jen zřídka jsou půdní částice transportovány dál než několik metrů. Částice jsou o velikosti 0,5 – 2,0 mm. Výsledkem jsou čeřiny, přesypy, duny a barchany.

Saltační transport má největší podíl na transportu materiálu větrem u písčitéch a lehkých typů půd. Půdní částice jsou díky vztlaku větru odděleny od povrchu a podél parabolické dráhy se skákavým pohybem dostávají do okolního proudění vzduchu. Takto jsou přesouvány půdní částice o velikosti 0,1 až 0,4 mm.

Suspenzní transport spočívá v přesunu menších půdních částic, které jsou menšího průměru než 0,01mm, a to do velkých vzdáleností. Klesání těchto půdních částic zpět na zem je pomalé.

Pokud jsou částice dostatečně velké, nebo jsou seskupené, mohou odolávat působení větru (Vrána 1978). Pohyb půdních částic je znázorněn v obrázku číslo 1.



Obrázek 1: Pohyby půdních částic

Zdroj: www.researchgate.net

3.1.3 Dopady větrné eroze

Eroze půdy větrem činí půdu méně produktivní tím, že odstraňuje nejúrodnější část půdy, toto odstranění snižuje přirozenou produktivitu půdy a poškozuje strukturu půdy a její biologickou aktivitu.

Kromě ztráty půdy může větrná eroze poškozovat rostliny, především abrazivním působením solných částic na sazenice. Erodovaná půda může být také odnesena do vodních toků, kde ovlivňuje kvalitu vody anebo může být emitována do ovzduší, kde degraduje vzdušné zdroje a dále dochází k nánosům na silnice (Dumbrovský et al. 2004). Vlivem těchto zdrojů se větrná eroze může stát zdravotním rizikem pro lidi a zvířata.

Půda odnášená větrem je považována za vážný zdravotní a environmentální problém, který je spojen se zhoršenou kvalitou ovzduší, viditelností a ztrátou důležitých živin v půdě (Chepil et Woodruff 1959, Hagen et Skidmore 1999). Na obrázku číslo 2 je vidět odnos půdy na komunikaci.



Obrázek 2: Větrná eroze na písčítých půdách

Zdroj: Ekolist, Kryštof Chytrý

3.2 Větrná eroze ve Světě

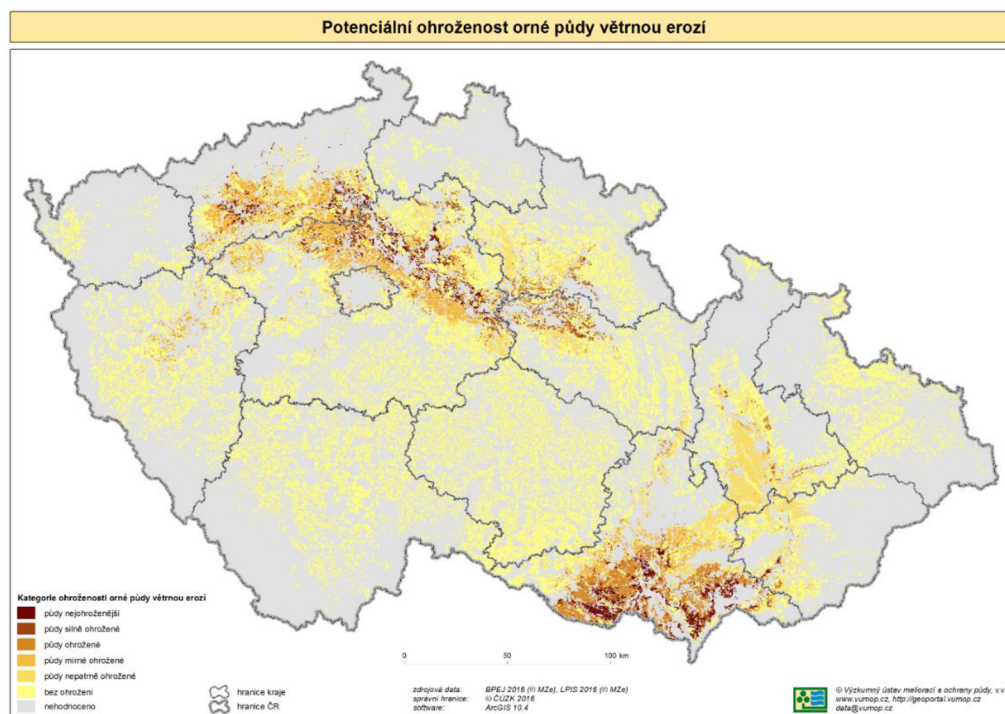
Větrná eroze je problémem týkající se celého světa. Některé oblasti jsou zasaženy méně a některé více. Mezi nejvíce zasažené patří oblasti aridní a semiaridní. (Buschiazzo et. Zobeck 2008) provedli studii v Argentině, která měla za cíl otestovat použitelnost modelů WEPS, RWEQ a WEQ k předpovědi větrné eroze pro argentinské podmínky. Testovali citlivost WEQ k předpovědím větrné eroze za použití dvou různých klimatických podmínek. Porovnávali odhad eroze provedený pomocí samostatného modelu WEPS a RWEQ pro jednotlivé události s terénními údaji pro různé zemědělské podniky. Větrná eroze byla měřena na třech polních parcelách o výměře 1x1 ha. Jedno z polí bylo během větru holé a s minimální drsností půdního povrchu (RP). Zatímco zbylé dvě plochy byly podrobeny různým intenzitám obdělávání půdy. Bezorebné (NT) a konvenční (CT). Testy WEPS a RWEQ pro jednotlivé události s údaji referenční plochy dobře korelovaly. Celkově s 28 naměřenými prachovými událostmi. Sklon a intercepce byli u WEPS o něco lepší než u RWEQ. Oba tyto modely měli tendenci podhodnocovat pozorovaná měření větrné eroze. Naměřené hodnoty byli podobné těm, kterých dosáhli (Zobeck et al. 2001) a (Van Pelt et al. 2004). Původ těchto podhodnocených hodnot není jasný. Buschiazzo

a Zobeck (2008) zjistili, že použití různých rovnic pro výpočet horizontálního hmotnostního toku může vést k velkým rozdílům v množství erodovaného materiálu. Tito autoři také zmínili, že výsledky terénních měření větrné eroze mohou být velice variabilní v závislosti na výšce, ve které je umístěn vzorkovač prachu.

3.3 Větrná eroze v České republice

Nárůst nebezpečí větrné eroze v České republice je díky vytváření velkých celků orné půdy v minulosti. Velikost půdních celků, které nejsou nijak odděleny různými krajinnými prvky, jako jsou například větrolamy jsou jedním z několika hlavních příčin větrné eroze v České republice (Vopravil et al 2011).

V České republice je větrnou erozí ohroženo zhruba 15 % zemědělských půd. Nejvíce jsou ohroženy půdy prachové, tudíž jde o zemědělsky hodnotné půdy jako je například černozem, hnědozem a další (Vopravil et al. 2011), potenciální ohroženost půdy je vyobrazena na obrázku číslo 3. Různorodost půd, které se vyskytují na území České republiky jako je černozem, hnědozem, hory, nížiny a kopce přispívá k problematice větrné eroze na území České republiky. Klimatické podmínky zejména vítr a časté srážky mají vliv na intenzitu větrné eroze. Nadměrná těžba dřeva, nevhodně zvolené zemědělské postupy a nadměrná orba mohou zhoršovat stav půdy a tím zvyšovat náchylnost k větrné erozi. Účinná prevence zahrnuje vegetační kryt, zalesňování a implementaci udržitelných zemědělských postupů, jako je střídání plodin a sadba ochranných plodin. V období jara je půda nejvíce ohrožena větrnou erozí z důvodu ještě nedostatečně vyvinutého vegetačního krytu.



Obr.3- Potenciální ohroženost orné půdy větrnou erozí
Zdroj: eAGRI© 2009-2021

3.4 Ochrana před erozí

Pod pojmem ochrana půd před erozí se skrývá velký soubor opatření, které mají za úkol zabránit vzniku eroze, nebo zajišťovat, aby následky nebyly tak rozsáhlé. Hlavním důvodem ochranných opatření je zabezpečit půdy před větrem a omezit jeho sílu. Velmi účinné opatření na omezení unášecí síly větru je sázení větrolamů, dělení velkých částí celků a zachování vegetačního pokryvu celý rok (Šarapatka 2014). Dle Vopravila (2011) jsou pozemkové úpravy účinným nástrojem. Součástí pozemkových úprav jsou návrhy organizační, agrotechnické i technické, které se vzájemně doplňují. Větrolamy jsou prvky, které jsou nejen krajino-estetické, ale mají za následek omezení unášené síly větru a tím dochází k ochraně před větrnou erozí.

Nejúčinnější ochranou před erozí jsou rostliny. Nadzemní část rostlin tvoří překážku větru, jelikož tlumí jeho sílu, podzemní části rostlin působí jako pevné vázání půdy. Souvislá trvalá rostlinná pokrývka je tedy dokonalá pro ochranu půdy před větrem. Vytvoření trvalé rostlinné pokrývky po celý rok je však v naší krajině nedosažitelné. Na základě určení intenzity větrné eroze a po vyhodnocení terénních šetření se navrhuje vhodné způsoby protierozní ochrany organizačního, agrotechnického a biotechnického charakteru.

3.5 Vědecký výzkum

Vědecký výzkum ohledně větrné eroze je klíčový v porozumění tohoto procesu a nalezení efektivních způsobů, jak předcházet jejímu vzniku a jak snižovat následky větrné eroze. Výzkum týkající se větrné eroze provádí řada vědců, univerzit a výzkumných institucí. Výzkum větrné eroze je interdisciplinární, jelikož je založen na spolupráci s geology, biology, klimatology a dalšími odborníky.

Do výzkumu patří satelitní technologie, které hrají klíčovou roli v monitorování a mapování větrné eroze po celém světě. Satelitní data umožňují sledovat pohyb půdních částic a také analyzovat změny na povrchu země v důsledku větrné eroze (Wang et al. 2020). Tato data jsou důležitá pro identifikaci oblastí s vysokým rizikem vzniku eroze.

Jedním z hlavních cílů je vytváření nových technologií, které minimalizují vznik větrné eroze a testování nových osevních postupů (Bhutto et al. 2022).

3.6 Modelování větrné eroze

V posledních letech se vynaložilo velké úsilí na zjištění rozsahu větrem vyvolané eroze půdy za různých environmentálních podmínek a postupů v hospodaření.

S rozvojem výpočetní techniky a geografických informačních systémů (GIS) došlo k vývoji modelů větrné eroze. Výpočetní modely lze rozdělit podle různých kritérií, jako je velikost zájmového území, účel výzkumu nebo dostupnost datových podkladů (Wagner 2013).

S příchodem modelů větrné eroze je poskytnuto lepší pochopení dynamiky a základních mechanismů větrné eroze jak základ pro posouzení nejen erodibility půdy, ale také různých postupů ochrany půdy (Mahboube et. al 2020). Modely větrné eroze se často používají za doprovodu terénních a laboratorních měření, aby se zvážil vliv různých faktorů větrné eroze současně. Tyto modely mohou poskytnout různé úrovně podrobných informací o větrné erozi a pohybu půdních částic ve specifických časových a prostorových měřících. Modely větrné eroze se liší složitostí, požadovanými vstupními daty a generovanými výstupy modelu. Vhodnost modelu proto závisí na cílech uživatelů modelu (Merritt et al. 2003).

Modelování větrné eroze je klíčovým nástrojem pro pochopení a předpověď erozních událostí. Pomocí modelů můžeme analyzovat různé faktory ovlivňující větrnou erozi, jako je typ půdy, vegetační pokryv, sklon terénu a rychlost větru. Modelování umožňuje také zkoumat dopady eroze na půdní vrstvy a transport sedimentů do vodních toků.

V posledních letech bylo vyvinuto několik typů modelů pro modelování větrné eroze. Tyto modely se liší přesností a úrovní složitosti. Modely mají různé predikční schopnosti a vlastnosti, které se dělí do tří kategorií. Jedná se o kategorie empirické, koncepční a založené na procesech (Merritt et al. 2003).

Jiní autoři rozdělují modely na dva typy: modely s hybridní funkcí (Goudriaan et Van Laar 1994, Gregory et al. 1994, Hoffmann 2002) a trigonometrické modely (Skidmore et Tatarko 1990, Ephrath et al. 1996, Guo et al. 2015).

Vývoj modelů větrné eroze byl motivován požadavkem na rozsáhlá posouzení eroze půdy s cílem poskytnout informace pro činnosti v oblasti hospodaření s půdou a zlepšit naše chápání procesů transportu prachu a jejich vlivů na biogeochemické cykly, kvalitu ovzduší a klima (Miller et Tegen, 1998, Bonasoni et al. 2004). Ústředním bodem vývoje systémů modelování větrné eroze je pochopení toho, jak mechanismy ovlivňující erozi větru, interagují a mění se v prostoru a čase (Shao et Lu 2000).

Při výběru simulačního modelu se musí přihlídnout na cíl výzkumu, data, které jsou k dispozici a na velikost zkoumaného regionu (Grešová et Středanský 2011).

Modely se neustále zdokonalují díky dalšímu poznávání různých faktorů, které ovlivňují větrnou erozi (Blanco-Canqui et Lal 2008).

V současnosti se jeví systém WEPS (Wind Erosion Prediction Systém), jako nejvíce propracovaná metoda modelování větrné eroze. Vytvořený byl v USA (Hagen et al. 1995).

Většina modelů větrné eroze, jako je systém predikce větrné eroze WEPS a revidovaná rovnice větrné eroze RWEQ vyžadují hodinové nebo podrobnější údaje o rychlosti větru (Zhang et al. 2022). Hodinové údaje o větru však nejsou vždy k dispozici, zatímco denní údaje o větru jako je denní průměrná a maximální rychlost větru, mohou být k dispozici na více regionech (Van Donk et al. 2008, Liu et al. 2013).

Několik nedostatků ohledně větrné eroze je spojeno se současným výzkumem v této oblasti. Patří sem například potřeba přesného monitorování povětrnostních

podmínek, vývoj lepších numerických modelů a rozsáhlejší terénní studie pro ověření použití modelů.

Databáze pro modely WEQ, RWEQ a WEPS jsou založeny na dlouhodobých klimatických údajích, ale každý model používá tyto údaje jiným způsobem. Například model WEQ vyžaduje průměrnou roční rychlost větru a převládající směr větru pro každý model měsíčně. Zatímco klimatická databáze modelů RWEQ obsahuje měsíční pravděpodobnosti rychlosti a směru větru, tak i sluneční záření, teploty a srážky (Buschiazzo et Zobeck 2008). Potřebné informace o půdě pro model RWEQ zahrnují texturu půdy, obsah organických látek a uhlíkatý vápenatý. Větrná databáze WEPS obsahuje rozdělení rychlosti a směru větru podle měsíců z nichž jsou generovány hodinové rychlosti a denní směry větru. Měsíční průměrné minimální a maximální teploty vzduchu, slunečního záření a množství srážek se získávají z databáze CLIGEN (Nicks et al. 1995). Pro modelování větrné eroze jsou potřeba různé typy vstupních dat, zahrnující geografické, klimatické, půdní a vegetační informace. V České republice jsou následující typy dat běžně dostupné. Jde o topografická data, které zahrnují digitální model reliéfu (DEM), který poskytuje informace o nadmořské výšce, sklonu a expozici terénu. V České republice jsou tato data dostupná prostřednictvím různých zdrojů, včetně státních agentur, jako je například: Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK), který je hlavním zdrojem geodetických dat. Tyto údaje můžeme získat buď prostřednictvím jejich online portálu nebo požádáním o konkrétní data. Některá topografická data je možné získat od výzkumných institucí a univerzit pro výzkumné účely. Existují také komerční poskytovatelé geodetických dat, kteří nabízejí širokou škálu mapových podkladů. Tyto služby obvykle vyžadují nákup dat. Klimatická data, jako je rychlost větru, srážky, teplota a relativní vlhkost vzduchu, jsou obvykle dostupné prostřednictvím meteorologických stanic a agentur, jako je Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Půdní data jako jsou informace o typu půdy, její struktuře, organickém obsahu, propustnosti a další jsou k dispozici z různých zdrojů, jako je například Státní pozemkový úřad (SPÚ) nebo Agentura ochrany přírody a krajiny ČR (AOPK ČR). Informace o vegetačním pokryvu, hustotě vegetace a typu porostů, jsou možné získat od zmíněných agentur a organizací, nebo také z různých průzkumů jako je například dálkový průzkum Země z družice, nebo z terénních průzkumů. Dodatečné informace například o vzdálenosti vodních toků, jsou také velmi důležité pro stanovení předpovědi erozně ohrožených oblastí.

3.6.1 WEQ (Wind Erosion Equation)

V 60. letech 20. století byla rovnice WEQ prvním empirickým modelem větrné eroze, který pocházel z pokusů Chepila (1959) a byl vyvinut na základě výsledků měření ve větrném tunelu a v terénu (Woodruff et Siddoway 1965). S příchodem počítačů se WEQ stal velmi sofistikovaným empirickým modelem (Blanco-Canqui et Lal 2008, Fisher et Skidmore 1970). V té době byl WEQ k dispozici jako model pro plánování ochrany proti větrné erozi. Systém procházel neustálým zdokonalováním a vedl k tomu, že (Fryrear et al. 1998) vytvořili revidovanou rovnici větrné eroze s názvem RWEQ. Pomocí rovnice WEQ se dají výrazně zpřesnit výpočty ztráty půdy díky erozi, nejen prostorovou lokalizací, ale i analýzou navrhovaných opatření. Kvalita modelu je ovšem závislá na kvalitě vstupních dat a musí zjednodušit realitu do pochopitelné formy. Woodruff et Siddoway v roce 1965 přišli s původní rovnicí (Rovnice 1) Wind Erosion Equation, která se dodnes používá pro výpočet větrné eroze. Výpočet pomocí této rovnice udává všeobecný údaj o množství erozního odnosu půdy větrem z daného území. WEQ se využívá v praxi pro monitorování a predikci větrné eroze v různých lokalitách. Pomáhá zemědělcům, inženýrům a vědcům lépe porozumět a kontrolovat riziko větrné eroze, což má značný vliv na zachování půdního potenciálu. Vývoj této metody je stále upravován a zlepšován s ohledem na získané data a poznatky. WEQ je důležitý nástroj pro udržitelný půdní management a ochranu půdy před vznikem větrné eroze.

(Rovnice 1)

WEQ má tvar: $E=(IKCLV)$

kde:

E – odhadovaná průměrná roční ztráta půdy (t/ha/rok)

I-Faktor erodovatelnosti půdy

K-faktor drsnosti půdy

C-klimatický faktor

L-nechráněná vzdálenost

V-vegetační faktor

Všechny tyto vstupní údaje jsou odvozeny z map, tabulek a grafů, aby se provedl odhad půdní eroze s grafickým řešením, které zjednoduší odhad půdní eroze.

Přestože se WEQ úspěšně používá již mnoho let, má několik omezení. WEQ předpovídá průměrnou roční erozi sčítáním eroze předpovězené pro konkrétní oblast. Stanovené období, ale nepředpovídá denní události. WEQ nezohledňuje změny mnoha časových charakteristik povrchu, které ovlivňují větrnou erozi, jako jsou změny drsnosti povrchu a nezohledňuje ani dvourozměrnou povahu polí. Mnoho detailů v plodinách a hospodaření s půdou nebyly při vývoji WEQ zohledněny. Ve snaze tyto problémy vyřešit, přišla USDA-ARS s vývojem nové technologie pro větrnou erozi.

WEQ je zvláště citlivý na texturu půdy, drsnost povrchu a rezidua. Citlivost na texturu je tak velká, že již dříve výzkumníci navrhovali používat faktory upravené podle textury, aby byla možná kalibrace modelu pro místní půdní podmínky (Van pelt et Zobeck 2004).

Počítačový program modelu WEQ zjednodušuje jeho použití (Fisher et Skidmore 1970).

Účinky všech interakcí mezi hospodářskými činnostmi a klimatickými podmínkami nejsou u WEQ zohledněny (Hagen 1991). Woodruff et Siddoway (1965) v modelu WEQ uvažovali o normálním rozdělení větru, takže síla větru, doba trvání a směr se neodráží ve vstupních údajích o větru, takže pozorovaná a předpovídaná eroze nejsou dobře korelovány (Van Pelt et Zobeck 2004). V podmínkách s vysokými srážkami WEQ odhaduje nižší než naměřené ztráty, zatímco v podmínkách s nízkými srážkami bylo pozorováno nadhodnocení.

WEQ není schopen přesně předpovědět větrnou erozi tam, kde se klima mění. Dále není schopen předpovědět přesnou míru ztráty půdy ve srovnání s měřením v terénu. Navíc pro extrémně velká pole WEQ větrnou erozi přeceňuje, zatímco extrémně úzká pole podceňuje (Fryer et al. 1999).

3.6.2 WEPS (Wind Erosion prediction System)

WEPS je průběžný denní systém založený na procesu počítačového modelu, který předpovídá větrnou erozi půdy pomocí simulace větrné eroze. Aktuální verze WEPS je navržena tak, aby uživateli poskytla pro zadávání početních podmínek terénu

a hospodaření, výpočet ztráty půdy a zobrazení jednoduchých nebo podrobných výstupů pro navrhování systémů protierozní ochrany.

U modelu WEPS bylo prokázáno, že tento model je citlivý na povrch půdy, vlhkost půdy, stabilitu suchých agregátů, orientovanou drsnost půdy a hospodaření s rezidui (Hagen et al. 1999).

Největší přínos systému WEPS je jeho schopnost poskytnout systém, který umožňuje aplikovat na půdu různé scénáře hospodaření typu "co kdyby" pro vývoj a vyhodnocování alternativních postupů ochrany proti větrné erozi.

Model WEPS byl vyvinut na žádost USDA-National Resources Conservation Service (NRCS), aby nahradil empirickou rovnicí větrné eroze (WEQ), kterou v roce 1965 publikoval Woodruff et Siddoway (1965).

Výstupem modelu jsou průměrné ztráty i depozice půdy v rámci zadaného období. WEPS zároveň umožňuje stanovit ztráty jednotlivých frakcí půdy (Tatarko et al. 2013).

Model WEPS v kombinaci s jednoduše použitelným rozhraním poskytuje prostředky pro zadání základního popisu pole, výpočet ztráty půdy a zobrazení údajů o půdě. Inovativní modulární konstrukce WEPS umožňuje průběžnou aktualizaci modelu podle toho, jak přibývají nové poznatky. Podrobný popis vývoje modelu WEPS uvádí Wagner (2013). Výsledný WEPS je fyzikálně založený model, který simuluje počasí, terén, povrchové podmínky a erozi v kratším než denním (např. hodinovém) časovém kroku (Hagen 2004, Wagner, 2013).

WEPS generátory počasí simulují potřebné údaje o počasí prostřednictvím dvou samostatných modelů počasí. Model CLIGEN je stochastický generátor klimatických (povětrnostních) dat, který simuluje denní odhady srážek (množství, trvání, maximální intenzita), teploty (maximum, minimum), větru (směr a rychlost) a sluneční záření. Generuje je pro jeden geografický bod s využitím měsíčních statistických parametrů (průměry, standardní odchylky, zkreslení atd.) odvozených z historických měření. Vítr v programu CLIGEN není pro WEPS dostatečně podrobný, a proto se používá program WINDGEN. Model poskytuje potřebné parametry větru. Podobně jako CLIGEN, je WINDGEN stochastický generátor větru, který využívá rozložení četností historických dílčích denních (tj. hodinových) rychlostí větru podle směru pro každý měsíc, aby se vygenerovaly parametry větru, přičemž poskytuje jedinečné požadavky na hodinové rychlosti větru a denní směr větru pro každý den simulace. CLIGEN a WINDGEN nebyly často shromažďovány ve

stejně lokalitě, takže soubory dat pro každý generátor jsou odlišné. WEPS umožňuje uživateli rychle porovnat účinky různých postupů na množství a směr ztráty půdy.

WEPS může pro správné použití vyžadovat pokročilé technické znalosti a výpočetní zdroje. Přesnost modelu může být ovlivněna nedostatkem dostupných dat, zejména v odlehlých oblastech nebo v regionech s omezenou infrastrukturou.

WEPS je komplexní model, který spojuje různé faktory jako jsou půda, vegetace a klima, převážně v zemědělských oblastech. Model zahrnuje širokou škálu parametrů, které ovlivňují erozní procesy a transport půdy.

Parametry WEPS jsou založeny na datech z oblasti pedologie, meteorologie a geografie, které jsou specifické pro danou lokalitu. Parametry zahrnují povrchové vlastnosti půdy (textura, sklon), vegetaci (typ, hustota pokryvu), klimatické podmínky (srážky, rychlost a směr větru) a zemědělské praktiky, jako je výběr pěstovaných plodin, nebo zemědělské operace.

3.6.3 WINDGEN

Skidmore et Tatarko (1990) poprvé navrhli trigonometrický model WINDGEN, který umožňuje simulaci hodinové rychlosti větru. Model byl dále zpracováván a zdokonalován na základě metody náhodného generování rychlosti větru s využitím metody histogramu (USA-ARS 2020). Různé verze modelu WINGEN byly použity v systémech RWEQ a WEPS (Wagner 2013, Tatarko et al. 2013). Ephrath et al. (1996) odhadoval hodinovou rychlost větru pomocí sinusoidy v níž byli denní minimální a maximální rychlosti větru a časy jejich výskytu vstupními daty. Debele et al. (2007) vyvinuli kosinusovou funkci pro reprodukci hodinové rychlosti větru s použitím denní průměrné rychlosti větru a dvou kalibrovaných parametrů získaných z historických údajů o větru. Pro snížení denního průměru a maxima rychlosti větru na hodinovou rychlost větru zavedli Guo et al. (2015) jednoduché modely s kosinusovou funkcí a ověřili je pomocí hodinové rychlosti větru pouze ze dvou typických větrných lokalit v USA. Nebyla však provedena žádná srovnání s jinými rychlostmi větru. Použitelnost těchto dvou jednoduchých modelů nebyla provedena.

3.6.4 SWEEP (Single-event Wind Erosion Evaluation)

Model SWEEP je submodel modelu WEPS (Single-event Wind Erosion Evaluation Program), který se nyní používá jako samostatný model k modelování jedné erozní události (Feng et Sharratt 2009, Funk et al. 2004, Pi et al. 2014). SWEEP má grafické uživatelské rozhraní (GUI), které poskytuje snazší přístup k vstupům a výstupům (Tatarko et al. 2019) a funguje nezávisle na modelu WEPS. Parametry vstupu jsou seskupeny na základě informací o půdě (délka, šířka, orientace), rostlinném materiálu (biomasa), vrstvách půdy (velikost částic, objem, hustota), povrchu půdy (jíl), parametrech větru (rychlost a směr) (Feng a Sharratt 2009, Tatarko et al. 2016). SWEEP simuluje všechny stejné eroze jako WEPS po dobu jednoho dne za podmínek specifikovaných uživatelem a v případě potřeby poskytuje výsledky za méně než hodinu (Tatarko et al. 2016). Častým problémem je obtížnost při vývoji velké topografické databáze potřebné pro pohodlné obecné aplikace, jelikož WEPS vyžaduje podrobné vstupní údaje o počasí ve studované oblasti, podmínkách půdního povrchu a vegetaci, které nemusí být lehké získat i pro malou oblast (Tatarko et al. 2019). Feng et Sharratt (2009) testoval SWEEP pro velmi malé území a zjistil, že model podcenil erozi nadhodnoceným prachové rychlosti. Jiní autoři také uvedli, že WEPS podceňuje výskyt malých prachových bouří (Funk et al. 2004). Hagen (2004) našel podobnou reakci pro malou bouři, ale spíš jí připisoval tomu, že povrch má prostorovou variabilitu, kdy části pole měly vyšší erodovatelnost než průměrný povrch.

Model je určen pro uživatele, kteří často provádějí výzkum simulující dopady 50 a více let.

3.6.5 RWEQ (Revised Wind Erosion Equation)

Model RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) vychází z modelu WEQ a obsahuje empirické a procesní složky se schopností popisovat fyzikální vlivy větru. Tento model zpřesňuje stávající faktory, které vstupují do rovnice a zavádí dva nové (Fryrear et al. 2000). Jde o kombinaci terénních datových souborů s počítačovým modelem. Tento model tedy není zcela fyzikálně založený (Blanco-Canqui et Lal 2008, Fryrear et al. 1999). RWEQ zahrnuje faktory počasí (rychlost větru, srážky), faktor půdní krusty, faktor erodovatelnosti, drsnost a vegetace. (C) je parametr pole

pro velikost, orientaci a rychlost větru, která závisí na sklonu a výšce kopců (Youssef et al. 2012). Vstupy tohoto modelu jsou založeny jak na polních, tak i na laboratorních studiích (Fryrear et al. 1999). Stejně jako u většiny modelů větrné eroze hraje vítr i v tomto modelu klíčovou roli jako základní hnací síla. Model odhaduje množství toku sedimentů pro určitá období na základě jednorázové události do výšky 2 m při vzdálenosti pro určitou délku pole na základě rovnováhy mezi erozivitou větru a erodovatelností půdy (Fryrear et al. 1998, Youssef et al. 2012). Metoda je založena na rychlosti a směru větru za hodinu. Spolu s dalšími klimatickými proměnnými, jako je sluneční záření, teplota a četnost srážek. Tyto hodnoty jsou zpracovány v klimatických podprogramech jako statistické proměnné měsíčních průměrů. Minimální potřebný soubor dat pro vývoj klimatických podprogramů RWEQ a WEPS je pět let.

Obecně lze RWEQ použít pro malé drsné povrchy s nízkou rychlostí větru, nefunguje však u vysoce a středně drsných povrchů s nízkou rychlostí větru (de Oro et al. 2016).

Každodenní změny počasí a hospodaření, jako je např. zamrzání/rozmrzáání půdy nejsou v modelu RWEQ podporovány (Blanco-Canqui et Lal 2008).

V dnešní době je model RWEQ často propojován s GIS (Borrelli et al. 2017).

Slabé stránky modelu jsou takové, že tento model může být náročný na použití a interpretaci výsledků pro uživatele bez předchozí zkušenosti s modelováním větrné eroze. Přesnost modelu může být omezena v oblastech s komplexní topografií nebo vegetačními vzory.

RWEQ je tedy empirický model, který předpovídá množství erodované půdy na základě faktorů jako jsou povrchové vlastnosti půdy, vegetace, expozice větru a srážky. Model využívá zjednodušené rovinné založené na statistických vztazích mezi vstupními proměnnými a erozí.

3.6.6 WECON (Wind Erosion from CONstruction activities)

Nejnovějším modelem větrné eroze je model WECON (Wind Erosion from CONstruction activities), který byl vyvinut pro stanovení maximální ztráty půdy způsobené větrnou erozí, a to na pozemcích narušených stavební nebo inženýrskou činností (Liu et al. 2019).

Model identifikuje různé faktory, které ovlivňují větrnou erozi během stavebních činností. Jedná se o typ terénu, povrchovou úpravu, rychlost větru a vlastnosti půdy. Na základě identifikovaných faktorů model hodnotí riziko vzniku eroze v daném prostředí.

Model využívá matematické a statistické metody k predikci větrné eroze, která může nastat v dané oblasti během stavebních činností.

WECON poskytuje uživatelům tohoto nástroje analýzu rizik spojených se stavebními pracemi a navrhování ochranných opatření, jako jsou stabilizace povrchů, úpravy vegetace a konstrukce ochranných bariér. Model je důležitým nástrojem pro inženýry, geology, urbanisty a stavební projektanty, a to z hlediska minimalizace negativních dopadů eroze spojených se stavebními činnostmi.

3.6.7 AERO (Aeolian Transport Model)

V současné době se vyvíjí model, který simuluje větrnou erozi a emise prachu prostřednictvím rozhraní, které poskytuje neodborným správcům půdy nástroj pro podporu rozhodování o větrné erozi (Edwards et al. 2018). AERO je fyzikální model, který se zaměřuje na transport písku v pouštích a polopouštních oblastech. Model poskytuje výstupy ve formě potencionální eroze na základě povrchových vlastností půdy, vegetace a povětrnostních podmínek.

Parametry AERO zahrnují vlastnosti písku, jako je velikost zrna, hustota, povětrnostní podmínky (rychlost větru a směr větru), topografické charakteristiky, mezi které patří sklon a expozice a další faktory ovlivňující transport písku (Farrell et Sherman 2016).

AERO zahrnuje procesy zemského povrchu a rovnice transportu sedimentů z existujících modelů větrné eroze a byl navržen pro aplikace s dostupným dlouhodobým monitorováním v USA. Model simuluje horizontální a vertikální tok hmoty pomocí třídy velikosti částic na stupnici grafu z uživatelských vstupů, jako jsou meteorologické data, údaje o půdě a vegetaci. AERO řeší potřebu zobecnění modelu větrné eroze, který lze aplikovat na různé krajinné struktury.

3.6.8 WELD (Wind Erosion and Landscape Dynamics)

WELD je regionální model, který je určený k predikci větrné eroze na větších územích. Model kombinuje geografické informační systémy (GIS) s empirickými modely pro predikci větrné eroze v závislosti na topografických a vegetačních faktorech.

Parametry WELD zahrnují jak geografické a topografické informace jako je sklon, expozice, výškový profil, tak i vegetační charakteristiky (typ, hustota pokryvu), klimatické podmínky (srážky, teplota) a další prostorové faktory.

Model simuluje různé aspekty větrné eroze, jako je transport částic a usazování. Model je validován a kalibrován na základě dostupných dat o větrné erozi a změnách krajiny, což umožňuje ověřit jeho spolehlivost a přesnost.

Model může být aplikován na různé typy krajiny oblasti s různými podmínkami, aby poskytl více informací o procesu větrné eroze a dynamiky krajiny.

3.6.9 LEP (Landscape Erosion and Prediction Model)

LEP je model zaměřený na předpověď větrné eroze v aridních oblastech s proměnlivým pokryvem půdy a vegetace. Model analyzuje interakce mezi povětrnostními podmínkami, vegetačním pokryvem a vlastnostmi půdy.

Parametry tohoto modelu zahrnují vegetační charakteristiky (hustota pokryvu, kořenový systém), topografické charakteristiky (sklon, expozice), povrchové vlastnosti půdy, meteorologické podmínky (rychlost větru, srážky) (Harmon et Doe 2001).

4 Výsledné zhodnocení

Tato bakalářská práce poskytuje přehled a srovnání klíčových modelů větrné eroze, včetně nejvíce používaných jako jsou WEQ (Wind Erosion Equation), WEPS (Wind Erosion Prediction System), SWEEP (Single-event Wind Evaluation program), RWEQ (Revised Wind Erosion Equation), WECON (Wind Erosion from CONstruction activities), AERO (Aeolian Transport Model), WELD (Wind Erosion and Landscape Dynamics), LEP (Landscape Erosion and Prediction Model). Cílem bylo poskytnout komplexní přehled o těchto modelech, jejich schopnostech, omezeních a vhodnosti pro různé aplikace v oblasti ochrany půdy a udržitelného hospodaření.

Porovnal jsem tyto modely z hlediska jejich přesnosti, složitosti, schopnosti zohlednit různé faktory a aplikace v praxi.

WEQ, jako jeden z prvních empirických modelů větrné eroze, se stal základem pro pochopení a kvantifikaci procesů větrné eroze. Poskytuje užitečný základ pro plánování ochrany půdy, ale má omezenou schopnost předpovídat erozní události na denní bázi. Tento model se zaměřuje na základní erozní faktory, jako jsou rychlost větru, expozice, vegetace a typ půdy. Poskytuje jednoduchý rámec pro odhad erozních ztrát. Přestože WEQ poskytuje užitečný nástroj pro plánování a řízení ochrany půdy, má svá omezení v přesnosti, zejména při předpovídání erozních událostí na krátkodobé a denní bázi.

WEPS na druhou stranu představuje pokročilý model založený na fyzikálních a empirických principech, který umožňuje simulaci větrné eroze s větší a lepší přesností. Tento model je detailnější než model WEQ. Zohledněna je široká škála vstupních parametrů, jako jsou povrchové vlastnosti půdy a vegetace, což umožňuje přesnější predikci erozních událostí na různých časových stupních. WEPS je vhodný pro udržitelný půdní management, pro komplexní analýzy a dlouhodobé plánování půdní ochrany a udržitelného zemědělství.

SWEEP je submodel modelu WEPS, který se zaměřuje na modelování jednotlivých erozních událostí. Jeho hlavní výhodou je, snazší manipulace s vstupními a výstupními daty pomocí grafického uživatelského rozhraní, což zjednodušuje proces analýzy a interpretace výsledků. Tento model je především vhodný pro výzkumné účely a experimentální studie.

RWEQ zase kombinuje empirické a procesní složky, což zvyšuje jeho schopnost předpovídat erozní události. Nicméně nedostatek podpory pro každodenní změny počasí a hospodaření může omezit jeho použitelnost v některých situacích.

WECON pak představuje specializovaný model zaměřený na specifické situace, jako je větrná eroze na stavebních pozemcích.

Na základě provedeného srovnání jsem dospěl k výsledku, že pro krajinu České republiky je nejvhodnějším modelem WEPS, a to z několika důvodů.

1. Komplexní pokrytí proměnných: WEPS je sofistikovaný model, který zahrnuje širokou škálu proměnných, jako jsou meteorologické podmínky, typy půdy, vegetace a topografie. Tato komplexní sada vstupních proměnných je důležitá pro přesnou predikci větrné eroze v různých typech krajin a prostředí.
2. Detailní fyzikální modelování: WEPS provádí detailní fyzikální simulace erozních procesů, což umožňuje přesnější predikce větrné eroze na základě chování půdy, vegetace a větrných podmínek. Tato úroveň detailů je důležitá pro pochopení erozních procesů v České republice, která má různorodé typy půd a vegetace.
3. Flexibilita a adaptabilita: WEPS je navržen tak, aby byl flexibilní a přizpůsobitelný různým geografickým oblastem a podmínkám. To znamená, že model lze efektivně upravit a použít pro specifické potřeby a charakteristiky České krajiny.
4. Validace a použití v podobných prostředích: WEPS byl použit a validován v podobných geografických a klimatických podmínkách jako Česká republika. Jeho schopnost přesně předpovídat větrnou erozi v těchto podmínkách poskytuje důvěryhodnost a jistotu v jeho použití.

Kombinace přesnosti, detailnosti, schopnosti zohlednit širokou škálu faktorů a jeho aplikovatelnost v praxi ho činí ideálním nástrojem pro potřeby v oblasti ochrany půdy a udržitelného hospodaření s půdou v České republice.

Klimatické podmínky mají zásadní vliv na intenzitu a rozšíření větrné eroze zvláště v suchých oblastech jižní Moravy. Negativní dopady klimatické změny se tak projeví nejdříve v této lokalitě. Proto jsou oblasti s vyšší nadmořskou výškou a větší vlhkostí z počátku ušetřeny nežádoucími účinkům oteplování. Do budoucna se ovšem musí počítat s tím, že dojde k ohrožení půd větrnou erozí i v územích, kde by se její výskyt původně nepředpokládal, nebo alespoň ne v takové míře. Jestliže již nelze ovlivnit vývoj klimatu, který zapříčinil sám člověk, pak by se měl pokusit o nápravu.

5 Diskuse

Vyhodnocení ohrožení daného území větrnou erozí je složitější než u jiné eroze. V literatuře najdeme řadu výpočtů a jejich stanovení. Nevýhodou však zůstává fakt, že pracují pouze s jednotlivými činiteli, které se na vzniku větrné eroze podílejí. I tak je ale možné řadu z těchto výpočtů využít v praxi (Kozlovský et Dufková 2019).

Existuje řada výpočtů, většina z nich je založena na znalosti rychlosti větru, vlhkosti půdy a obsahu jílnatých či neerodovatelných částí v půdě. Mezi nejčastější citované autory rovnic pro stanovení intenzity větrné eroze patří Woodruff et Siddoway (1965), Pasák (1966), Riedl (1973), Barajev (1974), Vrána (1978), Fryrear et al. (1994) a další. Nejznámější a ve světě nejvíce používanější rovnicí je ta od Woodruffa et Siddowaye (1965) nazvaná Wind Erosion Equation (WEQ), která komplexně posuzuje všechny vlivy na proces větrné eroze.

Většina současných modelů vychází z počátečního výzkumu mechaniky větru a větrné eroze, který provedl Chepil (1945). Dřívější výzkum zohledňoval klima a půdní vlastnosti jako dva hlavní faktory mechaniky větrné eroze. Chepil (1959) navrhl rovnici pro rozšíření teoretických poznatků o větrném počasí.

Modely mohou odhadnout míru eroze půdy od malých měřítek až po větší geografické oblasti na regionální a nadregionální úrovni a vyhodnotit příslušné protierozní strategie (Blanco-Canqui et Lal 2008).

Goves (2010) a Mahboube (2020) se shodují, že modely lze použít pro podmínky kde byly kalibrovány a ověřovány. Modely založené na fyzikálním principu by však měly vyžadovat pouze malou, nebo žádnou kalibraci.

Z uvedeného přehledu modelů větrné eroze vyplývá, že existuje potřeba dlouhodobých měření k vyhodnocení půdní eroze způsobené rychlostí větru. Díky přístupu ke spolehlivým naměřeným údajům lze vyhodnotit počítačové modely pro předpovídání větrné eroze za různých podmínek v různých časových intervalech, pokud byli modely dobře kalibrovány a ověřovány.

Pokud jde o modelování větrné eroze jen málo studií poskytuje úplné informace o různých aspektech výkonnosti modelů v reakci na hlavní otázky uživatelů, který model je, v jakém regionu a za jakých podmínek nejvhodnější.

Přestože je WEQ jedním z nejstarších modelů větrné eroze, bylo pro tento model provedeno překvapivě málo studií. Fryrear et al (1999) porovnávali naměřené události větrné eroze s předpověďmi WEQ pro 15 lokalit s různými typy půd a způsoby

hospodaření s nimi. Uvedli, že výsledky mají velmi nízkou hodnotu, ačkoliv je třeba poznamenat, že WEQ nebyl vyvinut jako model založený na událostech. Buschiazio et Zobeck (2008), ale uvádí že dlouhodobé předpovědi větrné eroze pomocí WEQ uvádí spolehlivé výsledky, a to i přes omezené klimatické údaje.

Van Pelt a Zobeck (2004) srovnávali součty terénních měření s předpověďmi větrné eroze v sedmi lokalitách v šesti státech USA pro celkem čtrnáct období. WEQ podhodnotil pozorované odhady pro jedenáct z nich. Mnoho studií se pokoušelo ověřit platnost měření nebo pozorování větrné eroze pomocí modelu RWEQ. Několik studií zjistilo smíšené výsledky (Youssef et al 2012), Pi et al 2017, Van Pelt et al. (2004). Tyto studie byly provedeny na proměnlivé půdě s předpokládanými různými složkami suspenze. Nejlepší validace byla získána ve dvou studiích (Fryrear et al. 1999,2008), vzhledem k tomu, že Fryrear byl hlavním autorem těchto studií a zároveň byl vývojářem modelu RWEQ jsou možné dobré výsledky dosaženy dobrou znalostí modelu.

Modely WEPS a SWEEP byly rovněž hodnoceny a ověřeny v celých spojených státech, Evropě, Africe a Číně. Často byly srovnávány s jinými modely. Van Donk a Skidmore (2003) porovnávali naměřené hodnoty terénních studií s hodnotami z modelu WEPS a nezjistili zde žádné významné rozdíly. Buschiazio et Zobeck (2008) zjistili, že SWEEP přesně předpovídal naměřenou větrnou erozi pro jednotlivé bouřky trvající přibližně 24 hodin na holé půdě.

Autoři Funk et al. 2004, Feng et Sharratt (2007), Pi et al. (2017) se shodují, že u modelů WEPS a SWEEP byla zjištěna nedostatečná předpověď některých relativně malých erozních událostí na půdách, které byly pokryté rostlinami, Feng et Sharratt (2009) dospěli k závěru, že model podhodnotil ztráty půdy tím, že nadhodnotil prahovou hodnotu rychlosti tření. Hagen (2004) rovněž upozornil na toto omezení u modelu WEPS při simulaci malých bouřek, které přičítal k prostorové variabilitě studovaných lokalit. Prostorovou variabilitu studovaných lokalit uvádí také Van Donk et Skidmore (2003). Okin (2005) uvádí, že rozdíly mohou ovlivnit větrnou erozi a WEPS s tímto nepočítal.

Steeffel et Van Cappellen (1998) uvedli, že hodnota modelu spolu s jeho jednoduchostí souvisí při implementaci výsledků. Letcher et al. (1999), že jednoduché modely jsou-li použity ve vyvinutém rámci mohou být přesnější než složité modely. V některých případech mají složitější modely vysoký stupeň nejasností způsobených

netestovanými rovnicemi interakce mezi faktory, mnoho vstupních dat, nedostupnost přesných dat snižují výhody těchto modelů.

Dle (Merrit et al.2003) vhodnost modelu závisí na cílech jeho uživatelů.

Autoři Guo et al. (2015), Yizhaq et al. (2020), Shen et al. (2021) a Zhang et al. (2022) se shodují že, v praxi se ukázalo, že denní větrné statistiky mohou výrazně podhodnocovat hodnoty větrné eroze, jako je průměrná hustota výkonu větru a celkové podcenění potencionální větrné eroze. Proto bylo vyvinuto mnoho schémat, která snižují denní statistiky větru na hodinové údaje o rychlosti větru. Nicméně se ukázalo, že denní průběh rychlosti větru, které se liší podle místa, ročního období atd. lze rozpoznat pouze na základě dílčích denních údajů. Snížení denních dat nemůže přímo poskytnout žádné informace o denních rychlostech větru a musí pocházet z jiných datových souborů, aby bylo možné získat dílčí denní údaje o rychlosti větru.

Goudriaan et Van Laar (1994) předpokládali, že hodinová rychlost větru bude sledovat výšku slunce a bude úměrná sinusovému průběhu větru. Na základě pozorovaných údajů o větru Gregory et al (1994) vytvořili hodinovou rychlost větru superpozicí konstantní a parabolické funkce. Hoffmann (2002) vytvořil vícerozměrnou lineární rovnici pro reprodukci hodinové rychlosti větru. Donatelli et al. (2009) uvádí že teoreticky mohou různé formy rovnic pro tvorbu rychlostí větru dávat při použití stejných vstupů různé hodinové rychlosti větru. Nebyl učiněn žádný pokus o vyhodnocení výkonnosti deterministických rovnic pro generování rychlosti větru.

6 Závěr

Tato práce byla zaměřená na představení větrné eroze a představení dostupných modelů větrné eroze. V oblasti studia větrné eroze byli popsáni modely, které slouží k predikci a simulaci tohoto důležitého erozního procesu. Každý z těchto modelů přináší specifický přístup k analýze eroze a má své vlastní výhody a omezení. Cílem práce bylo po představení modelů zhodnotit, který model pro predikci větrné eroze je nejvíce vhodný pro krajinu České republiky. Model WEPS má několik důvodů, proč by mohl být pro Českou republiku nejvhodnější. Kombinace přesnosti, detailnosti, schopnosti zohlednit širokou škálu faktorů a jeho aplikovatelnost v praxi ho činí ideálním nástrojem pro potřeby v oblasti ochrany půdy a udržitelného hospodaření s půdou v České republice.

Z hlediska modelování větrné eroze jen málo studií poskytuje úplné informace o různých aspektech výkonosti modelu, za jakých podmínek a v kterém regionu je každý z nich vhodný.

Během posledních desetiletí byli vyvinuty modely s různou mírou propracovanosti od jednoduchých po složité, od empirických po fyzikální, nebo jejich kombinace. Každý model má své vlastní požadavky a omezení, které jsou nutné vzít v úvahu pro konkrétní použití. Tato práce shrnula několik modelů z hlediska jejich historie, struktury, procesů a omezení. Kromě toho v této práci byli zmíněni databáze jakožto vstupy a výstupy, které poskytují informace o každém modelu. Byl shrnut výběr modelu na základě požadovaných aplikací a podmínek.

Pro minimalizaci ztrát půdy a optimalizaci produktivity půdy v regionech, které jsou ohroženy větrnou erozí je předpověď ztráty půdy důležitým krokem při plánování využití půdy a zemědělských postupů.

Modely větrné eroze mohou poskytnout užitečné nástroje pro výzkumníky, správce půdy, nebo tvůrce politik na ochranu půdy a životního prostředí při řešení klíčových otázek o udržitelnosti životního prostředí.

Základní modely jako WEQ a RWEQ jakožto empirické modely jsou poměrně jednoduché jak na použití, tak i na interpretaci, což je činí nejoblíbenějšími pro praktické využití ve venkovských oblastech. Pokud jsou použity v extrémních podmínkách mohou mít omezenou přesnost přípovědi pro větrnou erozi.

Pokročilejší modely jako WEPS a AERO se zabývají složitějšími fyzikálními procesy a umožňují detailnější simulace větrné eroze. AERO model se označuje jako

přesný v polopouštních a pouštních oblastech, což je klíčové pro ochranu půdy v těchto oblastech. Není tedy vhodný jako model pro jiné typy krajiny.

Další modely jako jsou WECON, WELD a LEP se zaměřují na specifické aspekty větrné eroze v různých kontextech, včetně stavebních činností. Modely jsou zaměřeny na regionální úroveň čímž jsou užitečné pro předpověď eroze v různých typech krajiny, ale jsou často náchylné k chybám vstupních dat a jejich přesnost může být ovlivněna rozdílnými metodami interpolace a předzpracováním geografických dat.

Autorů a výzkumníků, kteří stojí za vývojem těchto modelů, je mnoho. Jejich práce, které přispěly k pochopení větrné eroze jsou neocenitelné.

Pro zlepšení jmenovaných modelů lze navrhnout několik možných metod a to například: Integrace vlivu lidských aktivit, jako je zahrnutí proměnných souvisejících s lidskou činností, jako je intenzita zemědělství, rozvoj infrastruktury nebo změny využití půdy, může pomoci modelům lépe předpovídat větrnou erozi v antropogenně ovlivněných oblastech. Dále zohlednění mikro topografických faktorů, jako je vylepšení modelů prostřednictvím integrace mikro topografických proměnných, jako jsou drobné nerovnosti terénu, může zlepšit přesnost predikce erozních procesů, zejména v oblastech s různorodou topografií. Optimalizace parametrů modelu. Použití pokročilých metod optimalizace pro ladění parametrů modelů může pomoci zlepšit jejich schopnost předpovídat větrnou erozi. To zahrnuje techniky jako je kalibrace modelu pomocí reálných dat a citlivostí analýzy na různé vstupní proměnné. Vylepšení numerických algoritmů. Implementace pokročilých numerických algoritmů pro simulaci větrné eroze může vést k větší efektivitě a přesnosti modelů. To může zahrnovat využití výpočetních technik s vysokým výkonem nebo zdokonalení metod řešení fyzikálních procesů modelu. Integrace geografických informačních systémů (GIS). Propojení modelů s GIS umožní efektivnější manipulaci s prostorovými daty a lepší integraci geografických faktorů do analýzy větrné eroze, což povede k větší přesnosti predikce erozních procesů.

Integrace a další výzkum těchto modelů mohou přispět k lepšímu porozumění erozním procesům a k efektivnější ochraně půdních zdrojů před větrnou erozí.

Modely větrné eroze jsou neocenitelnými nástroji pro ochranu půdy a udržitelné hospodaření s půdou. Jejich aplikace ve spojení s terénními pozorováními a monitorováním může vést k lepšímu řízení a ochraně půdních zdrojů pro budoucí generace.

Závěrem lze konstatovat, že každý z vyjmenovaných modelů má své místo v analýze větrné eroze a ochraně půdy. Je důležité vybrat správný model pro konkrétní aplikaci s ohledem na specifické podmínky oblasti a požadavky uživatelů.

7 Přehled literatury a použitých zdrojů

7.1 Použité zdroje

AOPK ČR, ©2024: Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky (online) [cit.2024.02.12], dostupné z <[Agentura ochrany přírody a krajiny ČR – AOPK ČR \(nature.cz\)](https://www.nature.cz)>.

Barajev A. J., 1974: Zaščita počv ot vetrovoj i vodnoj erozii. In X. mezinárodní pedologický kongres. Moskva, 25–31.

Bhutto S. L. et Miri A. et Zhang Y. et al. 2022: Experimental study on the effect of four single shrubs on aeolian erosion in a wind tunnel, CATENA, 212.

Bhuyan S.J. et Kalita P.K. et Janssen K.A. et Barnes P.L., 2002. Soil loss predictions with three erosion simulation models. Environ. Modell. Software 17: 137–146.

Bičík I. et al., 2009: Půda v České republice, Praha, 255 s.

Blanco-Canqui H. et Lal R., 2008: Soil and water conservation: Principles of Soil Conservation and Management. Springer, Netherlands, Dordrecht, 1–19.

Bonasoni P. et Cristofanelli P. et Calzolari F. et Bonafe U. et Evangelisti F. et Stohl A. et Zauli Sajani S. et Dingenen R. et Colombo T. et Balkanski Y., 2004: Aerosol-ozone correlations during dust transport episodes. Atmospheric Chemistry and Physics 4: 1201-1215.

Borrelli P. et Lugato E. et Montanarella L. et Panagos P., 2017: A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. Land Degradation and Development 28: 335–344.

Buschiazzo D. E. et Zobeck T. M., 2008: Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. Earth Surface Processes and Landforms 33 (12): 1839–1850.

ČHMÚ, 2024: Český hydrometeorologický ústav (online) [cit.2024.02.12], dostupné z <[Portál ČHMÚ: Home \(chmi.cz\)](https://www.chmi.cz)>.

Debele, B. et Srinivasan, R. et Parlange, J.Y., 2007: Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales. *Adv. Water Resour.* 30 (5): 1286–1300 (online) [cit.2023.12.10], dostupné z <[Accuracy evaluation of weather data generation and disaggregation methods at finer timescales – ScienceDirect](#)>.

De Oro L.A. et Colazo J.C. et Buschiazzo D.E., 2016: RWEQ–Wind erosion predictions for variable soil roughness conditions. *Aeolian Res.* 20: 139–146.

Doležal P. et Kučera J. et Podhrázská J. et Středová H., 2017: Řízení rizika větrné eroze. Certifikovaná metodika. © Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Brno, 53 s.

Donatelli M. et Bellocchi G. et Habyarimana E. et Confalonieri R. et Micale F., 2009: An extensible model library for generating wind speed data. *Comput. Electron. Agric.* 69: 165–170.

Dumbrovský M. et Mezera J. et Střítecký L., 2004: Metodický návod pro vypracování návrhů pozemkových úprav. ČMPKÚ, 127 s.

Duniway M.C. et Pfennigwerth A.A. et Fick S.E. et Nauman T.W. et Belnap J. et Barger N.N., 2019: Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world. *Ecosphere* 10: (3).

Edwards, B.L., Webb, N.P., McCord, S.E., 2018: AERO: A wind erosion modeling framework with applications to monitoring data. In: 73rd Soil and Water Conservation Society Annual Conference, Albuquerque, USA.

Ephrath, J.E. et Goudriaan, J. et Marani, A., 1996: Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. *Agric. Syst.* 51 (4), 377–393 (online) [cit.2023.09.08], dostupné z: <[Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics – ScienceDirect](#)>.

Farrell E.J. et Sherman D.J., 2016: Process-scaling issues for aeolian transport modelling in field and wind tunnel experiments: roughness length and mass flux distributions. *Journal of Coastal Research* 19: 384–389.

Feng G. et Sharratt B., 2007: Validation of WEPS for soil and PM10 loss from agricultural fields within the Columbia Plateau of the United States. *Earth Surf. Proc. Land.* 32: 743–753.

Feng G. et Sharratt B., 2009: Evaluation of the SWEEP model during high winds on the Columbia Plateau. *Earth Surf. Proc. Land* 34: 1461–1468.

Fisher P. et Skidmore E., 1970: WEROS: a Fortran IV program to solve the wind-erosion equation. *USDA-ARS*,13: 41–174.

Fryrear D.W. et Krammes C.A. et Williamson D.L. et Zobeck T.M., 1994: Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(2): 183–188.

Fryrear D. et Wassif M. et Tadrus S. et Ali A., 2008. Dust measurements in the Egyptian northwest coastal zone. *Trans. ASABE* 51: 1255–1262.

Fryrear D. et Sutherland P. et Davis G. et Hardee G. et Dollar M., 1999: Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ, Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm. In: 10th International Soil Conservation Organization Meeting. Purdue University, 760–765.

Fryrear D. et Saleh A. et Bilbro J.D. et Schomberg H. et Stout J.E. et Zobeck T.M., 1998: Revised wind erosion equation (RWEQ). Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin 1.

Fryrear D.W. et Bilbro J.D. et Saleh A. et Schomberg H. et Stout J. et Zobeck T.M., 2000: RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation* 55(2): 183–189.

Funk R. et Skidmore E.L. et Hagen L.J., 2004: Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS. *Environ. Model. Software* 19: 177–183.

Goossens D. et Riksen M., 2004: Wind Erosion and Dust Dynamics: Observations, Simulations, Modelling, 200 s.

Goudriaan, J., Van Laar, H.H., 1994: Modelling potential crop growth processes. Textbook with exercises. In: *Current issues in Production Ecology*, 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, p. 238 (online) [cit.2023.10.03] dostupné z: <[Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook with Exercises | SpringerLink](#)>.

Govers G., 2010: Misapplications and Misconceptions of Erosion Models, *Handbook of Erosion Modelling*. John Wiley & Sons Ltd 117–134.

Gregory J.M. et Peterson R.E. et Lee J.A. et Wilson G.R., 1994: Modeling wind and relative humidity effects on air quality. In: Proceedings of the International Specialty Conference on Aerosols and Atmospheric Optics: Radiative Balance and Visual Air Quality. Snowbird, UT, USA, A, pp. 757–766.

Grešová L. et Streanský J., 2011: Veterná erózia v krajine – súčasné trendy, metódy a spôsoby.

Guo, Z. et Chang, C. et Wang, R., 2015: A Novel Method to Downscale Daily Wind Statistics to Hourly Wind Data for Wind Erosion modelling. Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 611–619 (online) [cit.2023.10.09], dostupné z: <[A Novel Method to Downscale Daily Wind Statistics to Hourly Wind Data for Wind Erosion Modelling | SpringerLink](#)>.

Hagen L.J., 1991: A wind erosion prediction system to meet user needs. J. Soil Water Conserv. 46: 106–111.

Hagen L.J., 2004: Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion submodel on cropland fields. Environ. Model. Softw. 19(2): 171–176.

Hagen L.J. et Wagner L.E. et Tatarko J., 1995: Wind Erosion Prediction System. Kansas Prediction System, 107 s.

Hagen L.J. et Wagner L.E. et Skidmore E.L., 1999: Analytical solutions and sensitivity analyses for sediment transport in WEPS. Trans. ASAE 42: 1715–1721.

Harmon R.S. et Doe W.W., 2001: Landscape Erosion and Evolution Modeling, 540 s.

He X. et Zhou J. et Zhang X. et Tang K., 2006: Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. Reg. Environ. Change 6: 62–70.

Hoffmann R., 2002: A Comparison of Control Concepts For Wind Turbines in Terms of Energy Capture. D17 Darmstadter "Dissertation. Department of Power Electronics and Control of Drives, Darmstadt, Germany, p. 134.

Holý M., 1994: Eroze a životní prostředí. ČVUT, Praha 1, 383 s.

Chen L. et Gao et J. et Ji Y. et Bai Z. et Shi S. et Liu H., 2014: Effects of particulate matter of various sizes derived from suburban farmland, woodland and grassland on air quality of the central district in Tianjin. China. Aerosol Air Quality Res. 14: 829–839.

Chepil W.S., 1945: Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind: Soil Science. 60(4): 305-320.

Chepil W.S., 1959: Wind erodibility of farm fields. J. Soil. Water Conserv. 14: 214–219.

Chepil W. S. et Siddoway F.H. et Armbrust D.V., 1962: Climatic Factor for Estimating Wind Erodibility of Farm Fields. Journal of Soil and Water Conservation, 1: 162-165.

Janeček M., et al., 2008: Základy erodologie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 172 s.

Kozlovsky Dufková J. et Mašiček T. et Lackóová L., 2019: Using of wind erosion equation in GIS. Infrastructure and Ecology of Rural Areas 2: 39-51.

Letcher R.A. et al., 1999: Review of Techniques to Estimate Catchment Exports. Environment Protection Agency, Sydney, pp. 110.

Liu B. et Qu J. et Wagner L.E., 2013: Building Chinese wind data for wind erosion prediction system using surrogate US data. J. Soil Water Conserv. 68 (4): 104–107.

Liu B. et Qu J. et Ning D. et Han Q. et Yin D. et Du, P., 2019: WECON: A model to estimate wind erosion from disturbed surfaces. Catena 172: 266–273.

Mahboube J. et Mayel S. et Tatarko J. et Funk R. et Kuka K., 2020: A review of wind erosion models. Data requirements, processes, and validity, CATENA, 187 s.

Merritt W. S. et Letcher R. A. et Jakeman A.J., 2003: A Review of Erosion and Sediment Transport Models. Environmental Modelling & Software, 18: 761-799.

Miller R. L. et Tegen I., 1998: Climate Response to Soil Dust Aerosols. American Meteorological Society 11 (12): 3247–3267.

MZE ©2008-2023: Situační a výhledová zpráva – Půda (online) [cit.2023.11.05] dostupné z: < [puda-11-2018 \(eagri.cz\)](https://puda-11-2018.eagri.cz)>

Nicks A.D. et Lane L.J. et Gander G.A., 1995: Chapter 2. Weather Generator. In: Flanagan, D.C., Nearing, M.A. (Eds.), USDA-Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, 10: 21–222.

Okin G.S., 2005: Dependence of wind erosion and dust emission on surface heterogeneity: stochastic modeling. *J. Geophys. Res.* 110.

Pasák V., 1966: Struktura půdy a větrná eroze. *Vědecké práce VÚMOP Praha*, 73–82.

Pi H. et Sharratt B. et Feng G. et Lei J., 2017: Evaluation of two empirical wind erosion models in arid and semi-arid regions of China and the USA. *Environ. Modell. Software* 91: 28–46.

Pi H. et Sharratt B. et Feng G. et Lei J. et Li X. et Zheng Z., 2014: Validation of SWEEP for creep, saltation, and suspension in a desert–oasis ecotone. *Aeolian Research* 20: 157–168.

Pivcová J., 1998: *Větrná eroze půdy*. VÚMOP, Praha.

Riedl O., 1973: *Lesotechnické meliorace*. 1. vyd. Praha: SZN Praha, 568 s.

Shao Y., 2008: *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Springer, Netherlands.

Shao Y. et Lu H., 2000: A simple expression for wind erosion threshold friction velocity, *J. Geophys. Res.*, 105(D17): 22437–22443.

Shen, Y. et Zhang, C. et Liu, X. et Zhang, H. et Zhang, Y., 2021: The effect of wind speed averaging time on the study of soil wind erosion on typical land surfaces. *Aeolian Res.* 54 (online) [cit.2023.10.01], dostupné z <[The effect of wind speed averaging time on the study of soil wind erosion on typical land surfaces – ScienceDirect](#)>.

Skidmore E.L. et Tatarko J., 1990: Stochastic wind simulation for erosion modeling. *Trans. ASAE* 33 (6): 1893–1899.

Sklenička P., 2003: *Základy krajinného plánování*. Praha: Nakladatelství Naděžda Skleničková. 321 s.

SPÚČR, ©2022: *Státní pozemkový úřad* (online) [cit.2024.03.04], dostupné z <[Státní pozemkový úřad \(spucr.cz\)](#)>.

ČÚZK ©2023: *Státní správa zeměměřictví a katastru* (online) [cit.2024.03.04], dostupné z <[ČÚZK – Úvod \(cuzk.cz\)](#)>.

Steeffel C.I. et Van Cappellen P., 1998: Reactive transport modeling of natural systems. *J. Hydrol.* 209: 1–7.

Šarapatka B., 2014: *Pedologie a ochrany půd*. Olomouc, 232 s.

Šarapatka B. et al., 2010: *Agroekologie: východiska pro udržitelné zemědělské hospodaření*. Olomouc, 440 s.

Tatarko J. et Sporcic M.A. et Skidmore E.L., 2013: A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture prior to the Wind Erosion Prediction System. *Aeolian Res.* 10: 3–8.

Tatarko, J. et Wagner, L.E. et Fox, F., 2019: The wind erosion prediction system and its use in conservation planning (online) [cit.2024.02.01], dostupné z < [\(PDF\) The Wind Erosion Prediction System and its Use in Conservation Planning \(researchgate.net\)](#)>

Tatarko J. et van Donk S. et Ascough J. et Walker D., 2016: Application of the WEPS and SWEEP models to non-agricultural disturbed lands. *Heliyon* 2 (12):215.

Toy T.J. et Foster G.R., 2002: *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. JohnWiley & Sons, New York, 352 s.

USDA-ARS, 2020: The Wind Erosion Prediction System (WEPS): technical documentation. In: Tatarko, J. (Ed.), *USDA Agriculture Handbook 727*. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Beltsville, MD, p. 533. Available in digital only.

Van Donk S.J. et Skidmore E.L., 2003: Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on an agricultural field. *Surf. Proc. Land.* 28: 1243–1258.

Van Donk S.J. et Liao C. et Skidmore E.L., 2008: Using temporally limited wind data in the wind erosion prediction system. *Trans. ASABE* 51 (5): 1585–1590.

Van Pelt R.S. et Zobeck T.M., 2004: Validation of the Wind Erosion Equation (WEQ) for discrete periods. *Environ. Model. Soft w.* 19: 199–203.

Van Pelt R.S. et Zobeck T.M. et Potter K.N. et Stout J.E. et Popham T.W., 2004: Validation of the wind erosion stochastic simulator (WESS) and the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events. *Environmental Modelling and Software*, 19: 191–198.

Vopravil J. et al. 2011: Seriál: Degradace půdy. Větrná eroze – další z významných degradačních faktorů. *Úroda*, 2011, roč. 59, č. 1: 56 s.

Vrána K., 1978: Stanovení intenzity větrné eroze v podmínkách ČSSR. Kandidátská dizertační práce. Praha: ČVU v Praze, 101 s.

Wegeová K., 2000: Počasí. NS Svoboda. Praha, 96 s.

Wagner I.E., 2013: A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Research* 10: 9–24.

Wang W. et Samat A. et Ge Y. et Ma L. et Tuheti A. et Zou S. et Abuduwaili J., 2020: Quantitative Soil Wind Erosion Potential Mapping for Central Asia Using the Google Earth Engine Platform *12(20):3430*.

Weinan C. et Fryrear D.W., 1996: Grain-size distributions of wind-eroded material above a flat bare soil. *Phys. Geography* 17: 554–584.

Woodruff N.P. et Siddoway F.H., 1965: A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29(5): 602–608.

Youssef F. et Visser S. et Karssenberg D. et Bruggeman A. et Erpul G., 2012: Calibration of RWEQ in a patchy landscape; a first step towards a regional scale wind erosion model. *Aeolian Res.* 3: 467–476.

Yizhaq, H., Xu, Z., Ashkenazy, Y., 2020: The effect of wind speed averaging time on the calculation of sand drift potential: new scaling laws. *Earth Planet. Sci. Lett.* 544, 116373 (online) [cit.2024.03.02], dostupné z: <[The effect of wind speed averaging time on the calculation of sand drift potential: New scaling laws – ScienceDirect](#)>.

Zhang, L. et Guo, Z. et Li, J. et Chang, C. et Wang, R. et Li, Q., 2022: Effect of the type of wind data on regional potential wind erosion estimation. *Front. Environ.* 10, 847128 (online) [cit.2024.03.03], dostupné z <[Frontiers | Effect of the Type of Wind Data on Regional Potential Wind Erosion Estimation \(frontiersin.org\)](#)>.

Zobeck T. M. et Van Pelt R. S. et Stout J. E. et Popham T. W., 2001: Validation of the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events and discrete periods. *Proceedings of the International Symposium on Soil Erosion Research for the 21st Century*, 3–5 January, Honolulu; 471–474.

7.2 Seznam použitých obrázků a rovnic

Obrázek 1: Pohyby půdních částic (online) [cit.2023.08.21],
dostupné z <[Schematic representation of the main phases involved in the... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)>.

Obrázek 2: Větrná eroze na písčitéch půdách nedaleko moravské obce Dobré pole.
(online) [cit.2024.02.11], (Kryštof Chytrý)
Dostupné z <[Větrná eroze je nenápadná, ale vážná hrozba pro všechna naše pole, říká Jan Vopravil - Ekolist.cz](#)>.

Obrázek 3: Potencionální ohroženost orné půdy větrnou erozí (online)
[cit.2024.01.02],
(eAGRI© 2009-2021)
Dostupné z <[Větrná eroze půdy | eAGRI](#)>.

Rovnice 1: Rovnice WEQ pro výpočet větrné eroze, $E=(IKCLV)$