

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra biotechnických úprav krajiny

**Analýza vzoru degradačně ohrožených území ČR a modelování
návrhu ochranných opatření s využitím nástrojů GIS a UI**

Disertační práce

Autor: Ing. Marek Bednář

Školitel: prof. Dr. Ing. Bořivoj Šarapatka, CSc., UP Olomouc

Konzultant: prof. Ing. Petr Sklenička, CSc., ČZU Praha

2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „Analýza vzoru degradačně ohrožených území ČR a modelování návrhu ochranných opatření s využitím nástrojů GIS a UI“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

V Olomouci dne 26. 3. 2018

Poděkování:

Děkuji panu prof. Bořivoji Šarapatkovi za odborné vedení, cenné konzultace a podnětné rady při zpracování disertační práce. Také děkuji panu prof. Petru Skleničkovi a prof. Vladimíru Bejčkovi za vstřícnost a možnost dokončení doktorské práce. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům, kteří mě v průběhu celého studia podporovali.

Souhrn

Degradace zemědělské půdy je v současné době velmi vážným problémem. Pro adresná opatření proti degradaci je důležitý monitoring degradace, kterým se zabývá celá řada vědeckých prací.

Cílem navrhované práce je vytvořit model degradace zemědělských půd pro Českou republiku, pokusit se analyzovat vzor jejího prostorového rozšíření a v neposlední řadě navrhnout metodu protierozních opatření, která by automaticky na základě vstupních údajů umožňovala sama generovat nejvhodnější liniová opatření. To vše za pomoci nástrojů GIS a programování.

Práce sestává ze čtyř hlavních částí. První dvě jsou zaměřeny na vytvoření modelu degradace zemědělských půd. Jedna metoda je založena na principu expertního odhadu váhových parametrů pro výsledný agregační index degradace, druhá váhové koeficienty vypočítává na základě multivariační datové analýzy hlavních komponent, která jednotlivým faktorům degradace přiděluje odlišnou významnost. Agregační index je v obou případech vytvořen lineární kombinací vážených degradačních faktorů. Degradační faktory byly použity z údajů institucí, které dlouhodobě degradaci sledují, byla použita zejména data z VÚMOP Praha a ÚKZUS Brno. Jednotlivé degradační faktory (vodní eroze, větrná eroze, acidifikace, ztráta organické hmoty, utužení, kontaminace půd, vysychavé oblasti, těžké půdy) byly rozděleny na dvě skupiny: degradaci chemickou a fyzikální.

S využitím nástrojů GIS a statistiky byly tyto faktory zkombinovány do podoby výsledných map fyzikální, chemické a celkové degradace. Navíc byly vytvořeny pro obě metody mapy převládajících degradačních faktorů. Výsledky potvrzují, že v současnosti je nejzávažnějším degradačním faktorem zemědělských půd vodní eroze, následovaná utužením a ztrátou organické hmoty. Z hlediska kombinované degradace je středně nebo více ohroženo kolem 51% zemědělských půd.

Cílem třetí části práce bylo odhalit možnou vazbu degradace půd na šest fyzicko-geografických proměnných – svažítost, úhrn srážek, úhrn teplot, nadmořskou výšku, členitost terénu a půdní zrnitost, pokud samozřejmě taková vazba existuje. Cílem bylo odhalit prahové hodnoty fyzicko-geografických proměnných, zjistit kde vybraný typ degradace začíná a končí. Analýza vycházela z výsledků degradačních modelů prvních dvou částí (konkrétně především části druhé) a zahrnovala podobně jako degradační modely celou ČR. Minimální zpracovatelnou jednotkou byl katastr, celkově bylo zpracováno 13027 katastrů. Každý z katastrů byl zařazen do jedné z pěti tříd (kvintilů) ohrožení. Každá třída ohrožení každého degradačního faktoru byla ve

vzájemné vazbě analyzována. Výsledky potvrdily existenci prahových hodnot a ukazují například, že místa nejvíce ohrožená vodní erozí jsou ta, kde je svažítost terénu větší než 6,21 stupně, srážkový úhrn větší než 741mm, průměrná roční úhrnná teplota nižší než 7st., nadmořská výška od 693 m n. m. a členitost terénu (variabilita) větší než 7,4^{*}. Poslední sledovaná proměnná – půdní zrnitost – podle výsledků není pro klasifikaci vodní eroze tak významná. Podobně byly zpracovány i ostatní degradační faktory a celková degradace půd. Největší celková degradace se objevuje v místech, kde je srážkový úhrn >736mm, svažítost>6,5st., úhrn teplot<7.2st., členitost terénu >7.6 a nadmořská výška ve dvou intervalech <358,414> a <704,860> m n. m. Výsledky nám ukazují vazby různých stupňů degradačního ohrožení na průběh vybrané fyzicko-geografické proměnné, což může být využito nejrůznějšími způsoby – pro klasifikaci ohrožených oblastí, pro efektivnější implementaci antierozních opatření nebo jen pro lepší porozumění roli fyzicko-geografického faktoru na degradaci půdy v ČR. Výsledné závěry snad napomohou boji proti vzrůstajícímu nebezpečí degradace zemědělských půd v ČR.

Poslední část práce pracuje s územím větších měřítek než měřítko ČR. Věnuje se návrhu metody automatického návrhu protierozních liniových opatření s využitím nástrojů GIS. Předkládaná metoda je založena na vlastní hydrologické analýze délky přispívajících a odtokových drah, na základě kterých navrhuje nejvhodnější linie protierozních záchytných opatření. Celý algoritmus je napsán v jazyku Python, který je navázán na nově vytvořený nástroj ArcToolBoxu v prostředí ArcGIS. Navržená metoda umožňuje zadat počet žádaných protierozních opatření (v nové plánované aktualizaci pak třeba i stanovení maximální dispoziční částky pro realizaci opatření), které jsou následně vygenerovány. Statistika průměru mediánů erozních smyvů za půdní bloky ukazuje téměř dokonalou nepřímou lineární závislost mezi automaticky generovanými opatřeními a průměrným erozním smyvem. Statistická analýza ve formě histogramů rovněž potvrzuje postupné snižování erozního smyvu od nejohroženějších po méně ohrožené bloky. Metoda vykazuje podobné výsledky jako metoda expertního stanovení po terénním šetření.

* Spojka *a* zde představuje logickou vazbu NEBO, uvedené rozsahy hodnot platí nezávisle na sobě. Věta tvořená spojkami *nebo* by v tomto kontextu vypadala dost neohrabaně.

Summary

Many attempts have been made worldwide to develop methods to identify the areas most threatened by soil degradation. Some soils in afflicted areas may be irreversibly degraded and thus have very little resilience (the ability to restore themselves).

The aim of the proposed thesis is to suggest, evaluate and analyze degradation of agricultural soils in the Czech Republic (CZ). On the top of that propose method for auto generating linear anti-erosion measures by using tools of GIS and AI.

Presented work consists of four main parts. The first two ones deal with creation of the degradation model for the CZ. The first one uses method of expert knowledge for evaluating weights of degradation factors which have been used, the second one computes these weights according to multivariate data analysis PCA method which tries to assess the importance of degradation factors across the CZ.

Both methods have used the available data on the individual factors that contribute to soil degradation and are monitored on a long-term basis in various research worksites in the CZ. Both methods create overall indicator of land vulnerability to the threat of soil degradation which was created.

The individual types of degradation (water erosion, wind erosion, soil compaction, extreme soils (clay soils), loss of organic matter, acidification, dryness impact, and intoxication) were classified in one of two groups: physical degradation and chemical degradation.

With the use of GIS and statistics, the input factors of degradation were combined to create maps of chemical and physical soil degradation, and consequently a map of overall degradation-threatened soils for the CZ, along with a map of areas differentiated according to the prevailing type of degradation. The results showed that, at present, the most important degradation factor in the CZ is water erosion, followed by loss of organic matter. Statistical analysis showed that approximately 51% of agricultural land is moderately threatened in the CZ.

The main objective of the third main part of presented work was to reveal the possible connection of soil degradation to six physical-geographical variables - slope steepness, altitude, elevation differences, rainfall, temperature and soil texture – in the form of some threshold values (if these exist), where soil degradation begins and ends. For the purposes of the study, use was made not only of total soil degradation, as derived from the previously presented Soil Degradation Model, but also six other degradation factors were used – water erosion, wind erosion, soil compaction, loss of organic matter,

acidification and heavy metal intoxication. The analysis involved the whole area of the Czech Republic which consists of 13,027 cadasters. These were divided into five quintile classes of threat for each degradation threat. Each class for each degradation factor was consequently processed by statistical and data analysis, which provided knowledge of the role of physical-geographical variables in relation to a given degradation factor. The results revealed that the areas most threatened by water erosion are those with slope steepness greater than 6.21 degrees, annual precipitation greater than 741 mm, average annual temperature lower than 7°C, altitude from 693 masl and elevation differences greater than 7.4. The last variable – soil texture does not play such an important role, at least in terms of water erosion. Similarly the results for wind erosion, soil compaction, loss of organic matter, acidification and heavy metal intoxication were processed. The greatest total degradation threat occurs in areas with average annual precipitation >736 mm, slope steepness >6.5 degrees, average annual temperature <7.2, elevation differences >7.6, and altitude in two intervals of values <358,414> and <704,860> masl. The results enable us to see the relationships of different levels of threats which could be consequently used in various ways – for classification of threatened areas, for implementation of anti-degradation measures more effectively, or just for a better understanding of the role of physical-geographical factors in soil degradation in the Czech Republic, and thus could increase the chances of reducing vulnerability to land degradation not only in the Czech Republic.

The last part of the work deals with proposing linear anti-erosion measures by using GIS tools and specific methods based on hydrologic analysis of flow paths. The algorithm was programmed in python language as a new ArcToolBox tool in ArcGIS environment. The method enables to specify number of asked measures to be computed (or in future e.g. maximum price of all anti-erosion measures) with matching number of the best lines with maximum anti-erosion effect created.

Obsah

1	Úvod a současný stav řešené problematiky	11
1.1	Pojem degradace, příčiny a její rozšíření ve světě	11
1.2	Monitoring degradace, projekty GLASOD, ASSOD, SOUVEUR	12
1.3	Monitoring degradace - metody	16
1.4	Přehled degradačních faktorů a jejich rozšíření ve světě a v ČR	17
1.4.1	Eroze půdy	17
1.4.2	Nízký obsah organické hmoty	17
1.4.3	Utžení půdy	18
1.4.4	Acidifikace (okyselení půd)	18
1.4.5	Kontaminace půd	19
1.4.6	Zastavování území (soil sealing)	19
1.4.7	Zasolování půd (salinizace)	19
1.5	Opatření proti degradaci zemědělských půd	20
1.6	Prahové hodnoty pro klasifikaci území	22
2	Cíle dizertační práce:	23
3	Zvolené metody zpracování	24
3.1	Vybrané území a výběr degradačních faktorů	24
3.2	Datové zdroje	24
3.3	Metody vytvoření degradačního modelu půd pro ČR	25
3.3.1	Metoda expertního odhadu	25
3.3.2	Metoda multivariační analýzy	28
3.4	Analýza degradačního vzoru na základě fyzicko-geografických proměnných	36
3.4.1	Základní statistická analýza	37
3.4.2	Analýza s využitím krabicových diagramů	39
3.4.3	Datová analýza	41
3.5	Porovnání modelu podle expertního odhadu a modelu multivariační analýzy	43
3.6	Návrh automatických protierozních opatření metodou středu drah soustředěného odtoku	44

4	Výsledky.....	47
4.1	Degradační model podle metody expertního odhadu	47
4.2	Degradační model podle metody multivariační analýzy	50
4.3	Porovnání expertního model a modelu podle PCA analýzy (multivariační analýzy)	56
4.4	Výsledky hledání prahových hodnot fyzicko-geografických proměnných.....	57
4.5	Výsledky návrhů automatických liniových protierozních opatření	62
5	Diskuse	68
5.1	Degradační model zemědělských půd pro ČR	68
5.2	Analýza degradačního vzoru.....	69
5.3	Návrhy automatických liniových opatření	71
6	Shrnutí a závěr.....	73
7	Seznam použité literatury	78
8	Seznam použitých zkratek a pojmů	89
9	Přílohy.....	94
9.1	Příloha I – výsledky box plot analýzy tříd ohroženosti v závislosti na fyzicko-geografické proměnné	94
9.2	Příloha II – Vývoj procentuálního zastoupení jednotlivých tříd ohroženosti v závislosti na zvolené fyzicko-geografické proměnné	102
9.3	Příloha III - Prahové hodnoty degradačního ohrožení (skript v jazyku R)	124
9.4	Příloha IV – Návrh automatických liniových protierozních opatření – skript v jazyce Python	128

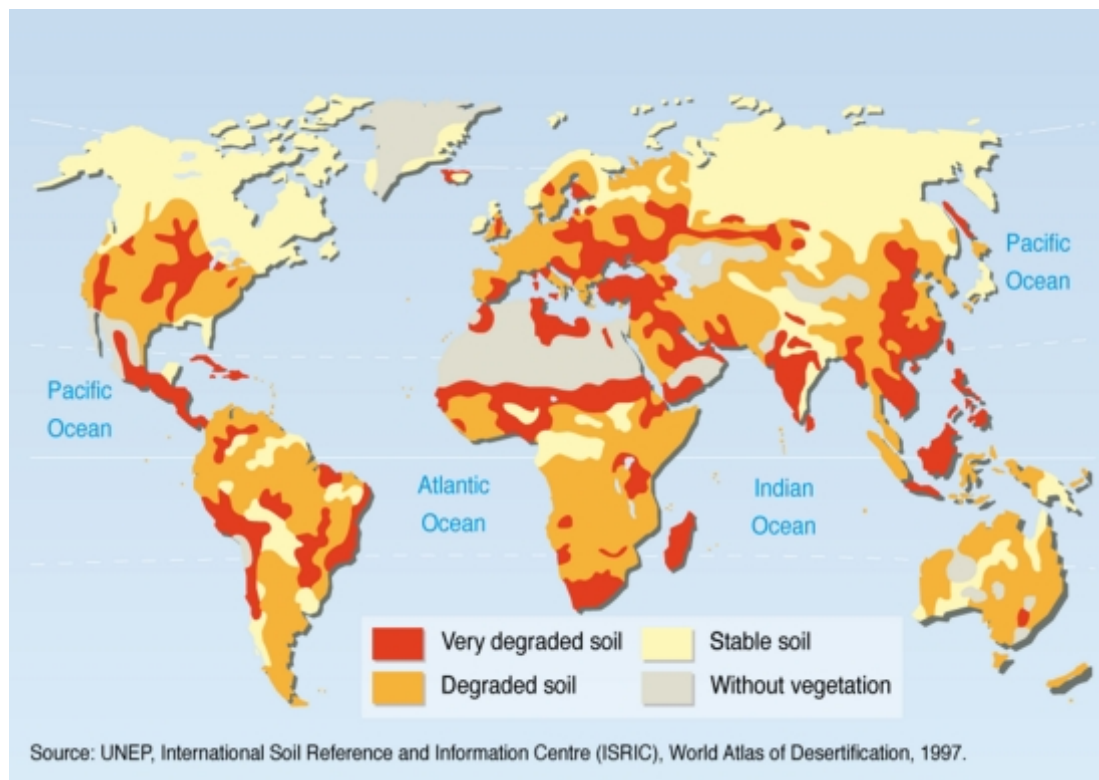
1 Úvod a současný stav řešení problematiky

Předkládaná práce se zabývá problematikou degradace zemědělských půd v ČR, analýzou území degradačně ohrožených a datovou analýzou získaných dat s využitím nástrojů statistiky, datové analýzy a GIS.

1.1 Pojem degradace, příčiny a její rozšíření ve světě

Degradace půd je jedním z nejzávažnějších problémů současnosti. Stále se zrychlující eroze ovlivnila již 33% zemského povrchu (Bini 2009) a vedla k značnému úbytku ekologických funkcí a služeb. Degradace se zrychluje především v důsledku antropogenního působení, a to zejména od 20. století (Doran a Parkin 1996, 1994; Šarapatka et al. 2002). Lal (Lal 2009, 1997) uvádí, že z celkového půdního fondu na Zemi je pouze 22% vhodných pro zemědělské účely, vysoce produktivních půd pak jsou pouhá 3%. Řada průzkumů a zpráv varuje před hrozbou degradace půdy (EEA Signals 2015). Degradací půdy je aktuálně postiženo kolem dvou miliard hektarů, z čehož patří 29,7% zemědělské půdě, 34,8% trvalým travním porostům a 35,5% lesní půdě (Oldeman 1994).

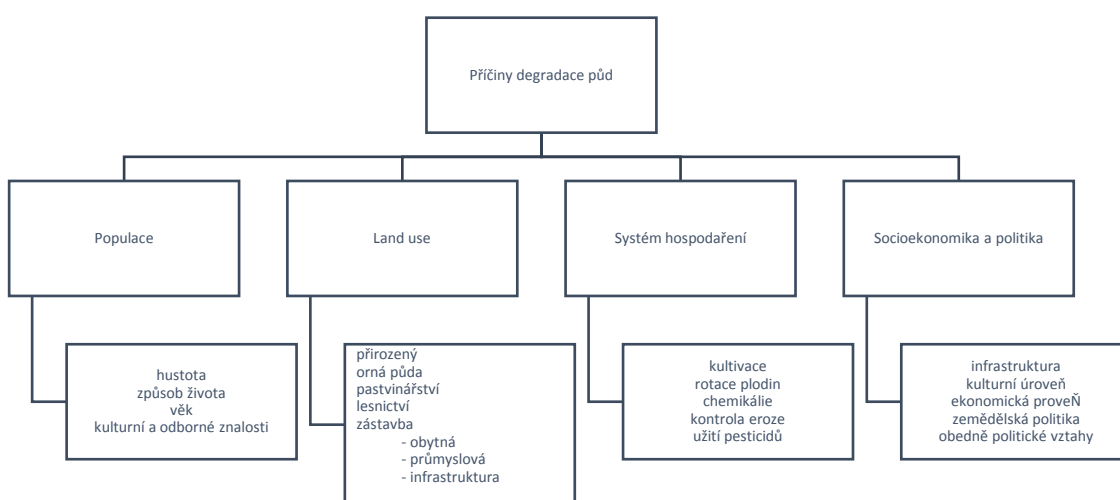
Celkovou mapu celosvětové degradace půd ukazuje Obr. 1.



Obr. 1 Globální rozšíření degradovaných půd (UNEP 1997)

Pojem degradace půdy původně označoval nežádoucí změny vlastností půdního profilu, jako důsledek změn v genetických půdotvorných pochodech vedoucí k debazifikaci, acidifikaci, iluviaci a případně hydromorfnímu vývoji (Novák 2005). V současné době označuje všechny procesy, které vedou k znehodnocování půdy, ke zhoršení všech jejích produkčních i mimoprodukčních funkcí (Jie et al. 2002; Novák 2005).

K degradaci zemědělských půd přispívají procesy fyzikální, chemické i biologické. FAO vypracovalo obecnou koncepci degradace půdy s výčtem všech faktorů, které k degradaci půdy vedou (Nabhan et al. 1997; FAO 1997; Novák 2005). Koncepci zachycuje Obr. 2.



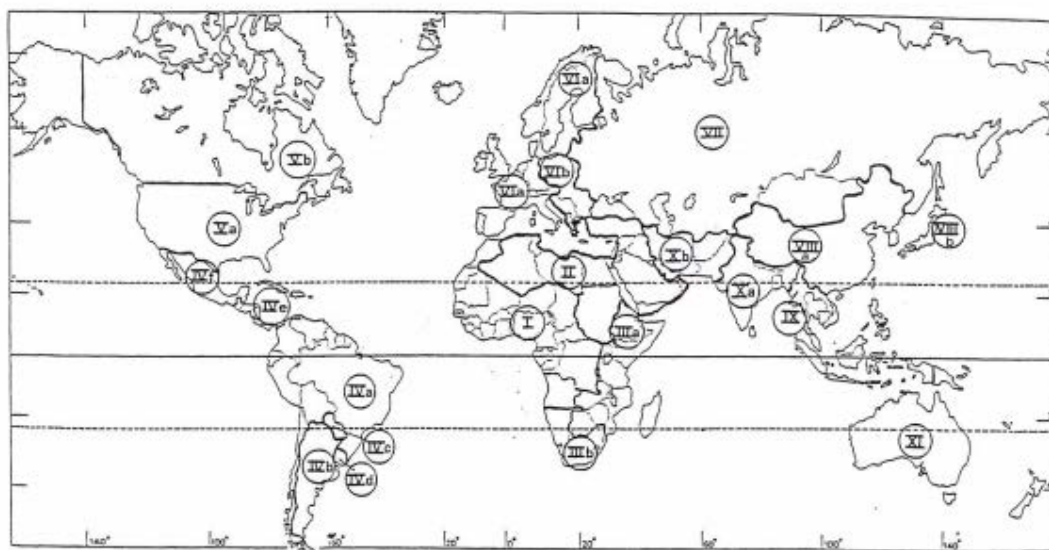
Obr. 2 Obecné příčiny degradace půd (Novák 2005)

Důsledkem snížení užitných vlastností půdy je snížená zemědělská produkce, snížená biodiverzita, znečištění vodních zdrojů nebo i ovlivnění klimatu. Snížená zemědělská produkce často vede k opatření v podobě zvýšených dávek hnojiv, což sebou přináší další problémy.

1.2 Monitoring degradace, projekty GLASOD, ASSOD, SOUVEUR

Pro zjištění míry degradace půdy a nastavení vhodných opatření proti degradaci je důležité znát aktuální stav ohroženosti půd. Mnoho mezinárodních organizací i individuálních vědecko-výzkumných subjektů proto monitoruje vybrané charakteristiky půd. Bohužel je tento přístup často nejednotný, do této chvíle nejsou k dispozici mapy, které by zachycovaly celkový rozsah ohrožení zejména v rámci národních měřítek (Prince et al. 2009).

Prvním větším nadnárodním projektem, který si vytýčil za cíl zmonitorovat celosvětově aktuální stav degradace a vlastně i definovat nejvýznamnější faktory degradace, a to během vymezených tří let projektu, byl projekt GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation) (Sonneveld a Dent 2009). Do projektu bylo zapojeno celosvětově mnoho vědců, kteří hodnotili aktuální degradaci v místě svého působení na základě svého expertního názoru. Samozřejmě systém expertního názoru vyžadoval přípravu jednotného rámce hodnocení a výběr těch nejdůležitějších degradačních procesů. Nakonec bylo do projektu zahrnuto 21 regionů či individuálních zemí (viz Obr. 3).



I : West + Central Africa	IV ^d : Uruguay	VII : USSR + Mongolia
II : North Africa + Arab countries + Turkey	IV ^e : Central America	VIII ^a : China, North Korea
III ^a : East and South East Africa	IV ^f : Mexico.	VIII ^b : Japan, South Korea
III ^b : Southern Africa	V ^a : USA	IX : Southeast Asia
IV ^a : South America	V ^b : Canada.	X ^a : Indian Subcontinent
IV ^b : Argentina	VI ^a : West + South + North Europe	X ^b : Iran + Afghanistan + Pakistan
IV ^c : Paraguay	VI ^b : East + Central Europe	XI : Australia + N. Zealand + P. New Guinea + S. Pacific

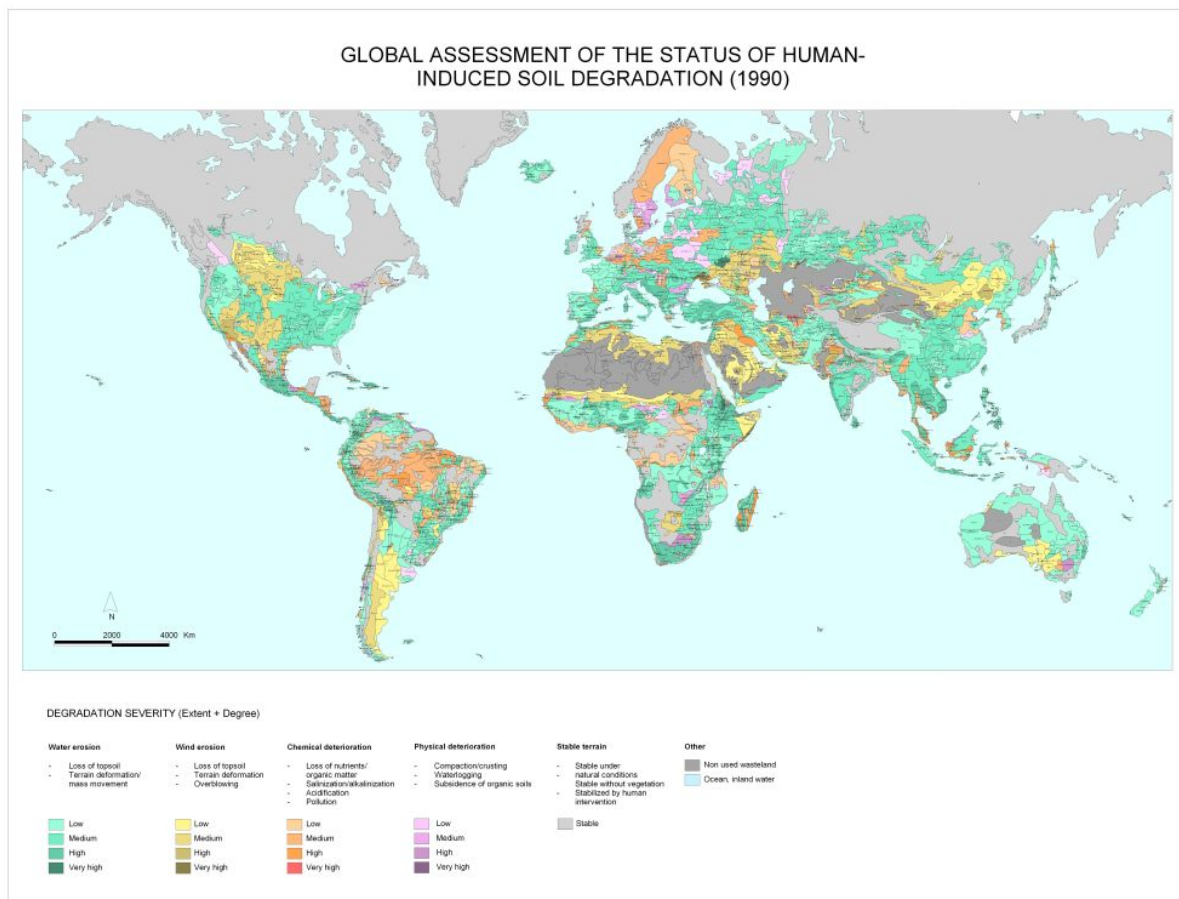
Obr. 3 Regiony GLASOD (Oldeman et al. 1992)

Výběr degradačních procesů nakonec stanovil dvě hlavní kategorie:

- Procesy, při nichž dochází k přenosu půdních částic vodní nebo větrnou erozí, což kromě ztráty půdní hmoty v místě působení rovněž souvisí s jevy mimo vlastní proces – jako je zanášení vodních toků a nádrží nebo třeba i hloubková říční eroze.

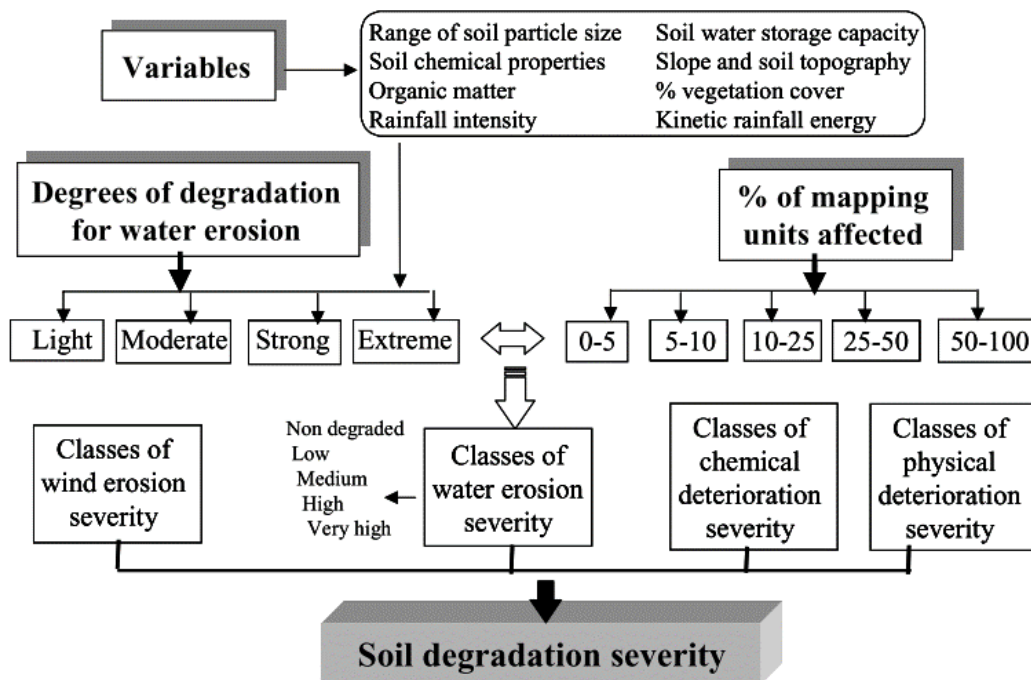
- Procesy fyzikální (zhuštění, zaplavování půd, aridifikace, sodifikace) a chemické degradace (salinizace, ztráta organické hmoty, acidifikace, intoxikace).

Výsledná data byla zpracovávána v Nizozemí a výsledkem byly mapy v měřítku 1:500000, které pro zpracovaná území poskytovaly informaci o míře ohrožení jednotlivými degradačními faktory. Ukázkou výstupů zachycuje Obr. 4 s vyznačením oblastí typických pro daný degradační faktor.



Obr. 4 Vyhodnocení ohroženosti zemědělských půd degradací půdy (GLASOD 1990)

Metodicky se postupovalo podle schématu naznačeného na Obr. 5 Diagram výpočtu tříd degradačního ohrožení dle GLASOD (Oldeman et al. 1992)



Obr. 5 Diagram výpočtu tříd degradačního ohrožení dle GLASOD (Oldeman et al. 1992)

Projekt GLASOD a jeho metodika zpracování způsobem expertního odhadu byl inspirací a předlohou pro další projekty monitoringu degradace v jiných částech světa. Projekt ASSOD byl zpracováván po vzoru projektu GLASOD zejména pro země jižní a východní Asie, dále projekt SOUVER, který byl zpracován pro středoevropský a východoevropský prostor. Součástí projektu SOUVER bylo 13 zemí ze střední a východní Evropy: Bělorusko, Bulharsko, Česká republika, Estonsko, Maďarsko, Litva, Lotyšsko, Moldávie, Polsko, Rumunsko, Rusko, Slovensko a Ukrajina.

Metodicky se postupovalo způsobem rozdělení zájmového území na tzv. jednotky SOTER, což jsou jasně definovaná území s danými litologickými, topografickými a pedologickými vlastnostmi (van Engelen a Ting-tiang 1997). Tato SOTER databáze byla poté spojena s odhadem degradačních charakteristik za vzniku map degradačního ohrožení pro jednotlivé zahrnuté země. Byl vytvořen exportní systém pro odhad rozsahu degradačního parametru intoxikace zemědělských půd (FAO 1998).

1.3 Monitoring degradace - metody

Kromě metody expertního odhadu se začala využívat i metoda dotazníkového šetření (WOCAT), kde jsou kromě degradace půd často hodnoceny i jiné, např. socioekonomické indikátory (Burning a Lane, 2003). V ČR se dotazníkovým šetřením například zjišťovaly názory zemědělců, místních samospráv a jiných dotčených organizací na proces realizace protierozních opatření (Podhrázská et al. 2015).

K nejmodernějším přístupům monitoringu degradace pak patří vytváření mnoha indexů udržitelného vývoje, mezi nimi i indexy degradace půd nebo krajiny obecně (Basso et al., 2000; D'Angelo et al., 2000; Feoli et al., 2003). Při odvozování těchto indexů se využívá ve velké míře monitoring prostřednictvím DPZ, který umožňuje diagnostikovat na velkých území parametry ohrožení (Jafari et al. 2008).

Problematikou vhodných indikátorů řeší i Land Degradation Assesment, který uvádí indikátory na různých úrovních zaměření od globálního území až po farmu (FAO 2013).

Indexy většinou nedokáží kvantifikovat důležitost konkrétního degradačního procesu. Indexy, které to umí, jsou výsledkem jiných, statistických či geostatistických postupů. Didiato a Ceccarelli (2004) navrhli postup analýzy degradačního ohrožení na základě kombinace tří faktorů: vodní eroze, aridity a hloubky půdy jako parametrů geomorfologie, klimatu a půdy s využitím neparametrické metody známé jako „indicator Kriging.“

Salvatti a Zitti (2011) zase využili pro degradaci půd statistickou metodu analýzy hlavních komponent, která umožňuje kvantifikovat význam proměnných pro vysvětlení určitého procesu (degradace krajiny). Vycházeli z velkého množství proměnných, které lineárně závisí na výsledné hodnotě degradace. Výsledky seskupili do kategorií podle zastavování území, salinizace, eroze, intoxikace, kompakce a klimatu.

Přestože oproti prvním pokusům o mapování degradace jsou novější postupy přínosem, na rozdíl od původního expertního hodnocení jsou zpracovávány spíše nejednotně, v rámci menších území, často s nedostatečnou přesností, která by umožňovala lépe adresovat protierozní opatření. Další skutečností, která poněkud ponižuje význam degradace půdy, je její vnímání jako výsledek působení jednoho faktoru, a to nejčastěji eroze, zejména eroze vodní, která je nejběžnějším degradačním faktorem zpracovávaným ve vědeckých publikacích. Je to zřejmě logické, neboť vodní eroze je nejrozšířenějším degradačním faktorem vůbec. Vyhodnocuje se často na

základě modelování, objevují se přístupy spojené s nástroji DPZ (Lantieri 2003; Jafari et al. 2008).

Níže uvádím přehled nejčastěji zpracovávaných degradačních faktorů a stav jejich rozšíření ve světě i v ČR.

1.4 Přehled degradačních faktorů a jejich rozšíření ve světě a v ČR

1.4.1 Eroze půdy

Eroze je výsledkem působení energie deště a větru. Dešťové kapky dopadají na exponovanou půdu a uvolňují půdní částice, které jsou dále odnášeny po svahu dolů. Na většině míst dominuje eroze plošná, intenzita je zvýrazněna zejména na svažitéjších terénech, kde je odnos půdy značný.

Eroze půdy je mezi dalšími faktory degradace zvýrazněna v Soil Thematic Strategy (CEC 2006) a v posledních dekáдах je rovněž částí environmentální agendy EU z důvodu vlivu na produkci, kvalitu vod, ekosystémové služby, biodiverzitu atd. (Boardman a Poesen 2006). Vliv na produkci může být značný, jak dokládají výsledky výzkumu (Papiernik et al. 2005).

Evropská agentura pro životní prostředí (EEA) odhaduje, že 115 milionů hektarů, neboli 12 % celkové rozlohy Evropy, je vystaveno erozi vodou a 42 milionů hektarů podléhá erozi větrem, z toho 2 % ve značné míře. Paganos et al. (2015) popisují, že průměrné roční ztráty na orné půdě dosahují 2,46 t/ha a celková roční ztráta v zemích EU je odhadována na 970 Mt. Speciální pozornost přitom musí být věnována 4 milionům hektarů orné půdy, na nichž přesahují roční ztráty 5 t z hektaru.

V České republice je podle nejnovějších údajů (Czech Ministry of Agriculture 2015) vodní erozí ohroženo více než 50 % zemědělské půdy, větrnou erozí v kategoriích mírně ohrožené až nejohroženější půdy 17,99 %

1.4.2 Nízký obsah organické hmoty

Dalším problémem zemědělských půd je poměrně **nízký obsah organické hmoty**, kdy současné zemědělství má mnohdy nedostatečné vstupy uhlíku do půdy, jeho odbourávání pak urychlují agrotechnické zásahy a v neposlední řadě dochází ke ztrátám v důsledku erozních procesů (Harden et al. 1999; Montgomery 2007). V zemědělské krajině tak eroze redistribuuje nejen značné množství minerální frakce, ale i organické hmoty (Oost et al. 2007; Quinton et al. 2010). Výsledkem je, že přibližně 45 % půdy v Evropě má nízký nebo značně nízký obsah organické hmoty (tzn. 0–2 % organického uhlíku), 45 % má střední obsah (tzn. 2–6 % organického uhlíku). To vede

nejen k řadě environmentálních problémů, ale nízký obsah půdní organické hmoty má negativní vliv i na produkci plodin. Pro podmínky Severní Ameriky a Evropy to popisují např. Lal (2004) nebo Thomsen and Sørensen (2006).

V České republice u ztráty organické hmoty nastávají problémy zejména na odvodněných lokalitách a u půd vzniklých na zrnitostně lehčích substrátech (Pírková et al. 2013).

1.4.3 Utužení půdy

Z dalších degradačních faktorů můžeme zmínit **utužení půdy**. Utužení půdy nebo také kompakce negativně ovlivňuje produkční i mimoprodukční funkce půdy. Utužení půdy omezuje infiltraci, zrychluje povrchový odtok a erozi, zmenšuje retenční vodní kapacitu a potlačuje biologickou aktivitu zhoršením vzdušného a vodního režimu půdy (Pírková et al. 2013).

Někteří autoři označují přibližně 36 % půdy v Evropě za vysoce nebo velmi vysoce náchylnou k utužování. Jiné zdroje uvádějí, že značně ohroženo je 32 % a mírně ovlivněno 18 % půdy (CEC 2006).

V České republice je podle nejnovějších údajů (Czech Ministry of Agriculture 2015) utužením ohroženo 49 % zemědělských půd.

1.4.4 Acidifikace (okyselení půd)

Při procesu acidifikace dochází k vymývání látek z půdního profilu, migraci živin a uvolňování prvků rizikových pro organismy. Základní kationty jsou nahrazovány kyselinovými elementy. Důsledkem acidifikace je vedle zhoršení kvality půdy také snížení její odolnosti vůči zhutnění a erozi. Acidifikace je typická v lesních půdách, do jisté míry ji můžeme omezit vápněním.

Rozlišujeme acidifikaci přirozenou a antropogenní. K přirozené acidifikace dochází přirozenými pochody, např. zvětráváním kyselých hornin nebo rozkladem opadaného jehličí a listí. Přirozená acidifikace je pozvolným procesem, který nevyžaduje nějaká zvláštní opatření.

Antropogenní acidifikace je způsobena člověkem. Vzniká zejména jako důsledek znečištění ovzduší, které je spojeno s kyselými dešti. Kyselá deště vznikají jako důsledek nadměrných emisí z průmyslové výroby v podobě uvolňování např. oxidu siřičitého (SO₂) nebo z oxidů dusíku (NO_x), jehož zdrojem je zejména automobilová doprava.

Celosvětově je acidifikací ohroženo minimálně 40%, podle některých odhadů až 70% orné půdy. Se vzrůstajícím tlakem na produkci potravin se zemědělství rozšiřuje i do méně příznivých oblastí zatíženými edafickými i jinými stresy včetně acidifikace (Rengel 2003).

V České republice je podle nejnovějších údajů (Czech Ministry of Agriculture 2015) acidifikací ohroženo 43 % půd.

1.4.5 Kontaminace půd

V důsledku zhruba dvoustleté industrializace se Evropa potýká s dalším typem degradace půd, kterým je kontaminace půdy. Ta je způsobena používáním a přítomností nebezpečných látek v mnoha výrobních procesech. Odhaduje se, že potenciálně může být kontaminováno 3,5 milionu lokalit, přičemž 0,5 milionu lokalit je skutečně kontaminováno a vyžaduje sanaci (CEC 2006).

V České republice bývá kontaminace půdy často problémem lokálním, souvisejícím s báňskou činností či průmyslovou výrobou, z půdních typů bývají více zatíženy fluvizemě, a to z důvodu povodňových událostí.

1.4.6 Zastavování území (soil sealing)

Úroveň zastavění v posledních desetiletích značně roste. Souvisí s demografickými vlivy, ekonomickou situací, sociálními změnami a s mnoha dalšími faktory. Od roku 1950 se populace Evropy zvýšila o 33%, zatímco plocha měst o 78% (Sáňka 2014).

V ČR od roku 1966 do roku 2007 ubylo 235000 ha zemědělské půdy, s denním úbytkem 15 ha v roce 2007. Důvodem jsou zejména nízké ceny pozemků a nedostatek stavebních pozemků ve velkých městech (Skrbek 2008).

1.4.7 Zasolování půd (salinizace)

Salinizace je spojena s vyšším obsahem solí v půdním roztoku nebo podzemních vodách. Soli se akumulují v půdě při zdvihu hladiny podzemních vod a následném intenzivním vypařování. Salinizace je typická zejména v aridním prostředí, ale i semiaridním prostředí. Bývá často spojována s nadměrným užíváním minerálních hnojiv nebo nadměrnou pastvou. Úzce souvisí s procesy eroze i desertifikace (Nováček a Huba 1994). Salinizace jedním z faktorů, který nejvíce sráží zemědělskou produkci. Průměrná výnosnost dosahuje 20% až 50% rekordních hodnot (Shrivastava

a Kumar 2015). Odhaduje se, že celosvětově je 20% kultivovaných půd a 33% zavlažovaných půd ovlivněnou vysokou mírou salinizace. Tato čísla se z nejrůznějších důvodů zahrnujících nižší množství srážek, větší povrchový výpar, zvětrávání, nebo špatné hospodářské praktiky, ročně o 10% zvyšují (Shrivastava a Kumar 2015). Odhaduje se, že do roku 2050 bude více než 50% zemědělské půdy zasaženo zasolováním půd (Jamil et al. 2011).

1.5 Opatření proti degradaci zemědělských půd

Opatření na zmírnění, případně zamezení degradace půdy vycházejí logicky vždy z daného degradačního procesu. Nejčastěji se setkáváme s opatřeními proti vodní erozi, která představuje v rámci ČR nejzávažnější problém. O použití způsoby ochrany rozhoduje požadované snížení smyvu půdy na přípustné hodnoty a dále také ochrana objektů (obcí, vodních toků a nádrží), samozřejmě při respektování zájmu vlastníků a uživatelů půdy, ochrany přírody a tvorby krajiny (Janeček et al. 2012).

Opatření proti erozi můžeme dělit na technická (protierozní průlehy, hrázky, meze), **organizační** (pásové střídání plodin, lokalizace plodin, ochranné zatravnění, travnaté pásy kolem vodních útvarů, biopásy), **biotechnická** (hrázky, příkopy a průlehy, poldry, terasy, větrolamy, zatravněné údolnice, zasakovací pásy a ochranné zatravnění nebo ochranná výsadba dřevin) a **agrotechnická** (setí širokořádkových plodin s ochranným podsevem, ochranné obilní pásy). Biotechnická opatření můžeme dále dělit na záchytná, svodná a koncová. Záchytná zařízení se navrhuje ve směru vrstevnic a slouží k zachycení povrchového odtoku a splavenin. Svodná zařízení odvádějí zachycený materiál do recipientu, většinou se jedná o zatravněné příkopy nebo průlehy orientované ve směru kolmém na vrstevnice. V dolních částech povodí se voda svádí do koncových zařízení v podobě vodních nádrží, vodotečí nebo suchých poldrů (Vlasák a Seidl 2010).

K hodnocení intenzity erozně-akumulačních procesů se využívá mnoho metod. Ať už přímé vyhodnocování půdních vzorků získaných terénním průzkumem, nebo matematické modelování zejména pro charakterizaci větších území. V praxi je výhodné využít modelování jako prvotní nástroj zacílení na problematiku území, který se dále vyhodnocuje terénním průzkumem (Šarapatka et al. 2018).

Výsledkem modelování je informace o intenzitě erozně-akumulačních procesů ve studovaném území. Využívané modely se v zásadě dělí na tři skupiny. Do první patří modely empirické, které vycházejí z analýzy a vyhodnocení jednotlivých faktorů působících na erozi, druhá skupina (modely simulační) vychází z fyzikálního popisu

erozního procesu, poslední jsou modely semiempirické, vycházejí z kombinací obou předchozích (De Vente et al. 2005; Kliment a Langhammer 2005; Kliment et al. 2008; Vysloužilová a Kliment 2012; Boardman a Poesen 2006).

V ČR se pro zjištění erozní ohroženosti používá řada metod. Je to zejména metoda určení erozního smyvu USLE podle Wischmeiera a Smithe (1978), dále pak metody erozně-akumulačních modelů – USPED (Pistocchi et al. 2002; Janeček et al. 2012; Janeček 2007), WATEM-SEDEM (Vysloužilová a Kliment 2012; Lieskovský a Kenderessy 2014) a řada dalších.

Pro efektivní ochranu zemědělského půdního fondu jakýmkoliv opatřeními je nezbytně nutná znalost místních podmínek (Volk et al. 2010) v měřítku okresu, katastru, povodí či konkrétní farmy (Boardman et al. 2009). Míra účinnosti v praxi navržených opatření u protierozní ochrany záleží na náročnosti nastavení pravidel a jejich důsledném dodržování zemědělci v praxi (Prazan a Dumbrovsky 2011).

Ochrana zemědělských půd v ČR vychází ze zákona o ochraně zemědělského půdního fondu. Jedním ze standardů do roku 2009 byl zákaz pěstování širokořádkových plodin na půdních blocích nebo jejich dílech s průměrnou sklonitostí přesahující 12°, při sklonitosti nad 7° pak bylo nutné uplatnit pro následnou plodinu protierozní opatření. Od roku 2009 se v rámci inovace programu přihlíží i k délce svahu po spádnici, faktoru přívalemého deště, erodovatelnosti půdy.

Dodržování standardů dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy – GAEC (Good Agricultural and Environmental Conditions) je jednou z podmínek poskytnutí plné výše přímých plateb, některých podpor z osy II Programu rozvoje venkova a některých podpor společné organizace trhu s vínem. Kontrolu dodržování standardů vykonává Státní zemědělský investiční fond (SZIF), který ověřuje aktuální stav na zemědělské půdě obhospodařované vybraným žadatelem o dotaci. Problematika ochrany půdy je v rámci GAEC řešena standardy GAEC 1 a GAEC 2, které vstoupily v platnost 1. ledna 2010. Cílem standardu GAEC 2 je především ochrana před erozí a omezení jejího působení. Na základě rovnice USLE a přípustných hodnot erozního smyvu byly vymezeny plochy silně (SEO) a mírně (MEO) erozně ohrožené a byly stanoveny požadavky na způsob pěstování na těchto plochách (Pírková et al. 2013).

Plochy MEO a SEO se vymezují na základě výpočtu maximální přípustné hodnoty ochranného vlivu vegetace (C_p) na základě metodiky VÚMOP (Pírková et al. 2013). Maximální přípustné hodnoty C_p jsou stanoveny na základě vzorce:

$$C_p = G_p / (R * LS * K * P) \quad (1)$$

kde:

G_p je přípustná ztráta půdy s ohledem na zachování funkcí půdy a její úrodnosti (t/ha/rok).

Hodnoty C_p se dělí do několika kategorií, pro které se doporučují příslušná organizační nebo agrotechnická opatření (viz Tab. 1).

Tab. 1 Kategorie erozní ohroženosti podle maximální přípustné hodnoty ochranného vlivu vegetace C_p (Pírková et al. 2013)

kategorie erozní ohroženosti	C_p	doporučená rámcová organizační nebo agrotechnická opatření
nejohroženější	do 0,005	převést příslušné půdní bloky nebo jejich části mezi trvalé travní porosty
silně ohrožená	0,005 – 0,02	pěstovat víceleté pícniny, např. jetel a vojtěšku
ohrožená	0,02 – 0,2	vyložit pěstování širokořádkových plodin, úzkořádkové plodiny lze pěstovat pouze s využitím půdoochranných technologií
mírně ohrožená	0,2 – 0,6	pěstovat širokořádkové plodiny s využitím půdoochranných technologií, úzkořádkové plodiny lze pěstovat bez omezení
bez ohrožení	0,6 a více	bez omezení

Pro výpočetní řešení erozního smyvu a návrhy protierozních opatření lze využít řadu více či méně automatizovaných nástrojů. Ve většině případů se používají nástroje GIS, které jsou doplňovány příslušnými moduly specifickými pro řešení problematiky eroze.

Na katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství byl v roce 2014 v rámci projektu Atlas Eroze vytvořen softwarový nástroj Atlas Eroze – model pro výpočet erozního smyvu a optimalizaci návrhu protierozních opatření. Model byl plně integrován do prostředí Atlas DMT a umožňuje v uživatelsky přívětivém prostředí počítat erozní smyv, zadávat a vyhodnocovat protierozní opatření, a to opakovaně s možností náhledu výsledků, a tím i jednoduššího získání efektivní varianty ochrany.

1.6 Prahové hodnoty pro klasifikaci území

Klíčové hodnoty fyzicko-geografických proměnných často slouží pro klasifikaci nejen erozně ohrožených oblastí. Příkladem může být metodika stanovení méně příznivých (LFA) oblastí pro zemědělství, která vychází z klíčových parametrů sociálně-geografických proměnných jako je např. nadmořská výška, hustota obyvatel, výnosnost zemědělské půdy apod. (Štolbová et al. 2008).

Předmětem vymezení prahových hodnot fyzicko-geografických proměnných v jejich vztahu k degradaci zabývá i část této práce, jejíž výsledky uveřejňujeme v odborném tisku (Bednář a Šarapatka 2018).

2 Cíle disertační práce:

Předkládaná dizertační práce má několik hlavních, na sebe navazujících cílů:

- vytvořit modely degradačního ohrožení zemědělských půd v ČR
- na základě těchto modelů identifikovat nejohroženější místa
- analyzovat vzor rozšíření degradačního ohrožení v souvislosti s vybranými fyzicko-geografickými proměnnými
- vytvořit nástroj optimalizace prostorového rozložení protierozních opatření

Vedlejšími cíli bylo zejména zjistit aktuální stav degradačního ohrožení zemědělských půd v ČR a navrhnout metodu analýzy degradace zemědělských půd, která by byla snadno použitelná i pro jiná území než je území České republiky.

Předpokládaným výsledkem práce byly:

- mapy fyzikální, chemické a celkové degradace
- zjištění potenciálních závislostí degradačních faktorů na fyzicko-geografických proměnných
- softwarový nástroj ve formě skriptu nebo extenze pro ArcGIS pro optimalizaci prostorového rozložení protierozních opatření

3 Zvolené metody zpracování

3.1 Vybrané území a výběr degradačních faktorů

Degradační modely se vytvářely pro celou ČR, liniová protierozní opatření se porovnávala s expertním řešením na povodí Jevíčky, dále se pak aplikovala i pro povodí Kyjovky a Hané, která patří k nejproduktivnějším zemědělským oblastem na Moravě.

Získané datové a mapové podklady byly zpracovány a generalizovány na jednotku katastru, která se stala minimální rozlišitelnou jednotkou (pro metodu multikriteriální statistiky a stanovení prahových hodnot). V rámci ČR takto bylo zpracováno 13027 katastrů.

3.2 Datové zdroje

V České republice jsou jednotlivé faktory degradace půd dlouhodobě sledovány v rámci mnoha výzkumných pracovišť – základem všech našich zpracování byly rastrové podklady degradačního ohrožení (využita při metodě expertního odhadu), bodová data intoxikace půd těžkými kovy z ÚKZÚS a statistická data pro katastry ČR a HPJ získaná z Výzkumného ústavu meliorací a půd v Praze Zbraslavi. Tab. 2 uvádí využitá data a jejich zdroj a použití. Pro následnou analýzu degradačního vzoru byl použit výškový model z ArcData a statistická data z ČHMÚ.

Tab. 2 Přehled zdrojových dat a jejich využití

Degradační faktory	Source	Použití - metodika
Vodní eroze – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
Větrná eroze – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
Ztráta organické hmoty – rastr.	VÚMOP Praha	expertní odhad
Kompakce půdy – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
Acidifikace – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
Intoxikace těžkými kovy - vektor	ÚKZUS Brno	expertní odhad, multi*
Těžké půdy – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
„suché“ oblasti – rastr	VÚMOP Praha	expertní odhad
Distribuce HPJ z BPEJ – stat.	VÚMOP Praha	multi, datan
Výškový model	ArcData	- expertní odhad, datan
Úhrn srážek	ČHMÚ	datan
Úhrn teplot	ČHMÚ	datan
Zrnitost půdy – stat.	VÚMOP Praha	datan

*stat. – tabelární statistické přehledy za jednotlivé katastry

multi – metoda multikriteriální statistického vyhodnocení

datan – datová analýza

3.3 Metody vytvoření degradačního modelu půd pro ČR

Pro vytvoření celkové degradace půd na základě získaných dat degradačních faktorů byly použity dvě metody:

- založená na expertním odhadu
- založená na multivariační analýze dat

3.3.1 Metoda expertního odhadu

Pro vybrané degradační faktory byla stanovena váha důležitosti faktoru na území ČR expertním odhadem.

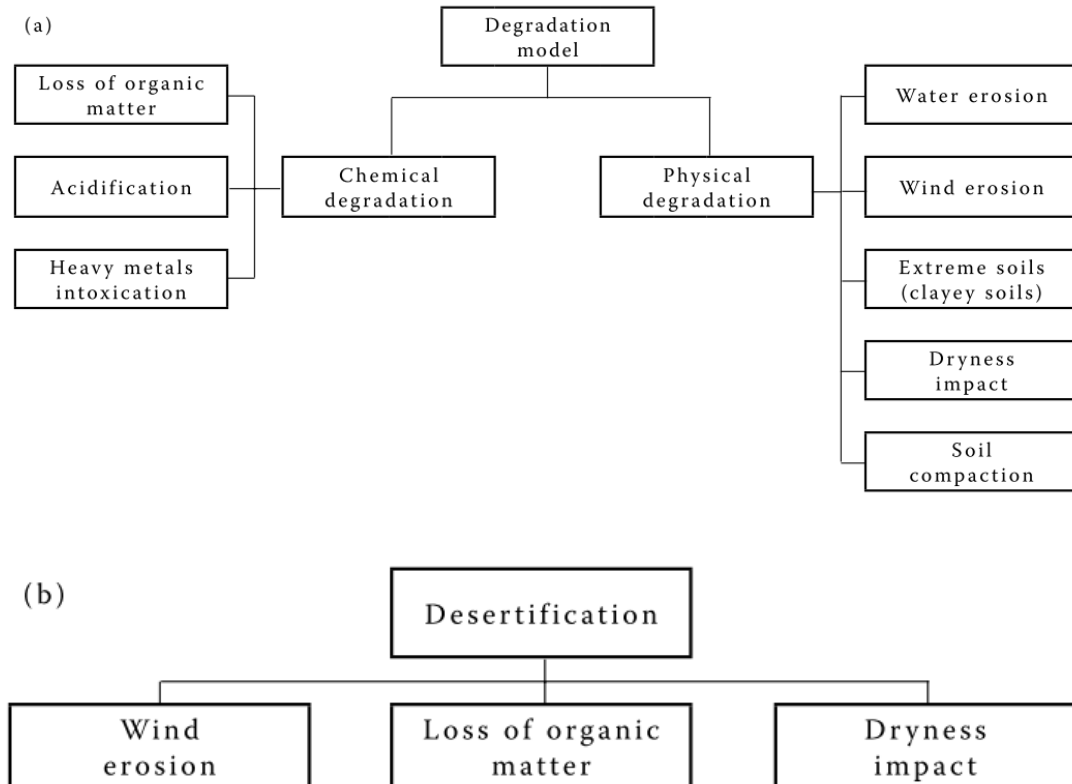
Základním zdrojem pro zpracování byla rastrová data rozšíření jednotlivých degradačních faktorů. Data nerastrové povahy (intoxikace půd) se nástroji GIS převedla do zvoleného jednotného rastrového formátu. Rastrová data byla sjednocena a reklasifikována do kategorií ohrožení: půdy bez ohrožení, málo ohrožené, málo až středně ohrožené, středně ohrožené, středně až silně ohrožené, silně ohrožené, velmi silně ohrožené.

Výběr degradačních faktorů byl dán dostupností datových a mapových zdrojů. Pro zpracování byly vybrány degradační faktory vodní a větrné eroze, acidifikace, zhutnění, ztráty organické hmoty, těžké půdy, vysychavé půdy a kontaminace půd.

Postup zpracování

Z jednotlivých datových podkladů jednotlivých degradačních faktorů byly vytvořeny tzv. reprezentační modely, gisové vrstvy, ukazující prostorovou distribuci jednotlivých degradačních faktorů v rámci ČR. Metodika postupu odpovídá běžným technikám vytváření reprezentačních modelů popsanych v publikaci od Skidmorea (2002) .

Tyto reprezentační modely byly rozděleny do skupin podle degradačního procesu, který zde působí. Z těchto pak byly vytvořeny tzv. procesní modely fyzikální, chemické degradace a desertifikace, které vznikly určitým způsobem kombinace původních reprezentačních modelů. Schéma rozdělení a návaznost modelů ukazuje Obr. 6.



Obr. 6 Postup zpracování degradačních modelů a) model celkové degradace, b) model desertifikace (Šarapatka a Bednář 2010)

Podobný postup s kombinací fyzikálních, chemických a biologických typů degradace popisuje Paz (2006).

Procesní modely mohou být popsány funkcemi:

$$CHM = a_1 * LOM + a_2 * ACI + a_3 * HMI \quad (2)$$

$$PHD = b_1 * WIE + b_2 * WAE + b_3 * ES + b_4 * SC + b_5 * DI \quad (3)$$

$$RDM = c_1 * CHD + c_2 * PHD \quad (4)$$

$$DSM = d_1 * WIE + d_2 * LOM + d_3 * DI \quad (5)$$

Kde

CHM – chemická degradace
 LOM – ztráta organické hmoty
 ACI – acidifikace
 HMI – intoxikace těžkými kovy
 WAE – vodní eroze
 WIE – větrná eroze
 ES – těžké půdy

SC – zhutnění půdy
 DI – vliv sucha
 CHD – chemická degradace
 PHD – fyzikální degradace
 RDM – výsledný degradační model
 DSM – model desertifikace

Jednotlivé váhy $a_1...a_3$, $b_1...b_5$, c_1 , c_2 a $d_1...d_3$ byly stanoveny expertním odhadem podle následující tabulky (

Tab. 3). Expertní hodnocení bylo stanoveno na základě názorů více odborníků na zemědělskou problematiku.

Tab. 3 Expertní váhy degradačních faktorů.

Degradační faktor	Bodové hodnocení
WAE (vodní eroze) – b_2	vysoké ohrožení – 7b, střední – 5b
WIE (větrná eroze) – b_1	Vysoké – 5b; střední – 2,5b
DI (vysychavé půdy) – b_5	Vysoké 5b; střední 2,5b
ES (těžké půdy) – b_3	2,5b
SC (zhutnění) – b_4	2,5b
HMI (intoxikace t. k.) – a_3	2,5b
ACI (acidifikace) – a_2	2,5b
LOM (ztráta organické hmoty) – a_1	2,5b

Expertní odhad je do značné míry subjektivním názorem experta na danou problematiku, proto byly testovány rovněž dvě alternativní skupiny vah, první se zdůrazněním acidifikace a zhutnění (5b), druhá pak se stejnými vahami (1b). Výsledné tři modely byly zkombinovány způsobem naznačeným vzorcem 6 se zachycením průměrného degradačního ohrožení.

$$PHD_{komb} = \left(\frac{PHD_{1i}}{PHD_{1max}} + \frac{PHD_{2i}}{PHD_{2max}} + \frac{PHD_{3i}}{PHD_{3max}} \right) / 3, \text{ kde} \quad (6)$$

PHD_x představuje model se skupinou vah x , PHD_{xmax} pak maximální možnou bodovou hodnotu při zvolené klasifikaci. PHD_{komb} nabývá hodnot 0-100%.

Naznačený proces výpočtů byl realizován v prostředí ArcGIS s využitím rozšíření Spatial Analyst a nástrojů mapové algebry (*Raster Calculator*).

3.3.2 Metoda multivariační analýzy

Na rozdíl od rastrové (expertní analýzy) je tato metoda založena na vektorových datech jednotlivých degradačních faktorů, které byly stanoveny na základě metodiky VÚMOP o zranitelnosti půd na základě HPJ bonitačního systému BPEJ (Novák 2005).

Byly sledovány degradační faktory eroze (vodní a větrná), kompakce půdy, ztráty organické hmoty a acidifikace. Vybrané degradační faktory vycházely z již zmíněné metodiky, která neobsahovala postup odvození ohroženosti pro faktor těžkých a vysychavých půd. Tyto degradační faktory tedy v modelu podle multikriteriální statistické analýzy chybí.

Výsledné hodnoty degradačních faktorů (DF) byly zpracovány za jednotku katastru, která byla stanovena základní zpracovatelnou jednotkou.

3.3.2.1 Příprava dat degradačních faktorů

Základem pro stanovení konkrétní hodnoty ohrožení byla tabulka náchylnosti HPJ k danému typu degradace. Modifikovanou tabulku založenou na metodice VÚMOP (Novák 2005) zachycuje Tab. 4.

Tab. 4 Zranitelnost HPJ vybranými degradačními faktory (zpracováno na základě metodiky VÚMOP 2005).

HPJ	Vodní eroze	Ohrožení acidifikací	Ohrožení zhutněním	Ohrožení dehumifikací	Větrná eroze
1	5	2	2	2	0
2	4	2	4	2	0
3	3	3	4	1	0
4	4	4	2	3	6
5	4	3	2	2	4
6	4	1	5	2	2
7	3	1	5	2	2
8	7	3	2	6	0
9	5	2	3	4	0
10	5	2	5	4	0
11	5	2	5	4	0
12	4	3	6	4	0
13	5	6	4	5	0

HPJ	Vodní eroze	Ohrožení acidifikací	Ohrožení zhutněním	Ohrožení dehumifikací	Větrná eroze
14	6	4	6	5	0
15	6	4	6	5	0
16	3	5	5	4	0
17	3	6	2	4	0
18	4	0	5	2	0
19	4	0	2	2	0
20	2	2	6	2	0
21	2	6	2	6	4
22	2	4	2	6	2
23	2	5	5	4	2
24	4	4	4	4	0
25	4	4	4	3	0
26	4	4	4	4	0
27	3	6	3	4	0
28	4	2	4	2	0
29	4	4	3	4	0
30	3	4	3	4	0
31	2	6	2	5	0
32	3	6	2	5	0
33	4	4	4	4	0
34	3	6	2	5	0
35	3	6	2	5	0
36	3	6	2	5	0
37	6	6	2	6	0
38	6	6	0	6	0
39	6	6	0	6	0
40	6	6	0	6	0
41	6	5	4	6	0
42	4	4	6	4	0

HPJ	Vodní eroze	Ohrožení acidifikací	Ohrožení zhutněním	Ohrožení dehumifikací	Větrná eroze
43	6	4	6	4	0
44	6	4	6	4	0
45	4	4	6	4	0
46	5	4	5	4	0
47	4	4	6	4	0
48	3	4	6	4	0
49	3	3	6	4	0
50	3	5	3	4	0
51	2	4	5	4	0
52	3	5	3	4	0
53	3	4	3	4	0
54	4	4	4	4	0
55	0	5	2	6	4
56	0	4	3	4	0
57	0	2	5	4	0
58	0	3	5	2	0
59	0	3	6	2	0
60	0	1	5	1	0
61	0	0	6	1	0
62	0	0	5	1	0
63	0	0	6	1	0
64	0	5	5	6	0
65	0	5	3	6	0
66	0	4	0	0	0
67	0	4	0	0	0
68	0	4	0	0	0
69	0	4	0	0	0
70	0	4	0	0	0
71	0	4	0	0	0

HPJ	Vodní eroze	Ohrožení acidifikací	Ohrožení zhutněním	Ohrožení dehumifikací	Větrná eroze
72	0	4	0	0	0
73	6	5	4	6	0
74	6	5	4	6	0
75	6	5	4	6	0
76	6	5	4	6	0
77	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0

Jednotlivé hodnoty ohroženosti odpovídají následující bodové škále:

- 0 – žádné
- 1 - slabé až žádné
- 2 – slabé
- 3 – slabé – střední
- 4 – střední
- 5 – střední – výrazné
- 6 – výrazné
- 7 – velmi výrazné

Z databáze BPEJ z VÚMOP jsme získaly statistická tabulková data o zastoupení jednotlivých HPJ v rámci jednotlivých katastrů – příklad viz Obr. 7.

KOD KU	HPJ						
	1	2	3	4	5	6	7
605841	12	19	0	0	20	146	0
605891	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 7 Ukázka statistického přehledu HPJ za katastry*. Hodnoty plošného rozšíření jsou uvedeny v ha.

Stupeň ohrožení (zranitelnosti) byl vypočítán podle postupu uvedeného dále na základě vážené lineární kombinace stupňů ohroženosti hlavních půdních jednotek v daném katastru (z hlediska vybraného degradačního faktoru). Váhou zde je procentuální rozsah zastoupení HPJ.

Označme $HPJA(kat, hpj)$ [ha] plochu vybrané hlavní půdní jednotky hpj v rámci katastru kat , Celková plocha půdních bloků v rámci katastru je pak $HPJT(kat) = \sum_i HPJA(kat, i)$. Dále označme $STOHR(hpj, df)$ jako stupeň ohrožení HPJ hpj z hlediska faktoru degradace df .

* Jedná se jen o výřez z větší databáze, čísla představují výměru v ha dané HPJ v daném katastru.

Výslednou hodnotu degračního ohrožení D pak určíme ze vztahu:

$$D(kat, df) = \sum_{hpj} \frac{HPJA(kat, hpj)}{HPJT(kat)} * STOHR(hpj, df) \quad (7)$$

Rozsah hodnot D odpovídá rozsahu ohrožení – tj. intervalu $\langle 0,7 \rangle$, kde 0 je nejmenší (žádné ohrožení) a 7 nejvyšší (velmi výrazné) ohrožení.

K takto získaným hodnotám degračních faktorů byla přidána data **intoxikace půd těžkými kovy**, která byla získána v podobě shapefilové bodové vrstvy GIS a vycházela z reálných měření. V některých katastrech data měřena nebyla, pro konzistenci byla tato data dopočítána na základě metod prostorové geostatistiky s využitím metody prostého krigingu. Vše se zpracovávalo pomocí ArcGIS, konkrétně rozšíření Geostatistical Analyst.

Byly sledovány hodnoty prvků As, Be, Cr, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, V a Zn. Nástroji zonální statistiky GIS byly tyto hodnoty zprůměrovány za zvolenou základní jednotku – katastr.

Za jednotlivé katastry a jednotlivé prvky byly stanoven podíl $PRELIM(kat, prvek)$, který určoval, kolikrát množství prvku přesahovalo maximální přípustnou hodnotu (viz

Tab. 5).

Tab. 5 Obsah rizikových prvků v půdách (mg.kg⁻¹). Výluh roztokem 2 M HNO₃ při poměru půdy k vyluhovačce 1 : 10. Obsah rizikových prvků v půdách je určen Vyhláškou 13/1994, kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu (MŽP 1994).

Prvky	lehké půdy	ostatní půdy
As	4,5	4,5
Be	2	2
Cd	0,4	1
Co	10	25
Cr	40	40
Cu	30	50
Hg	-	-
Mo	5	5
Ni	15	25
Pb	50	70
V	20	50
Zn	50	100

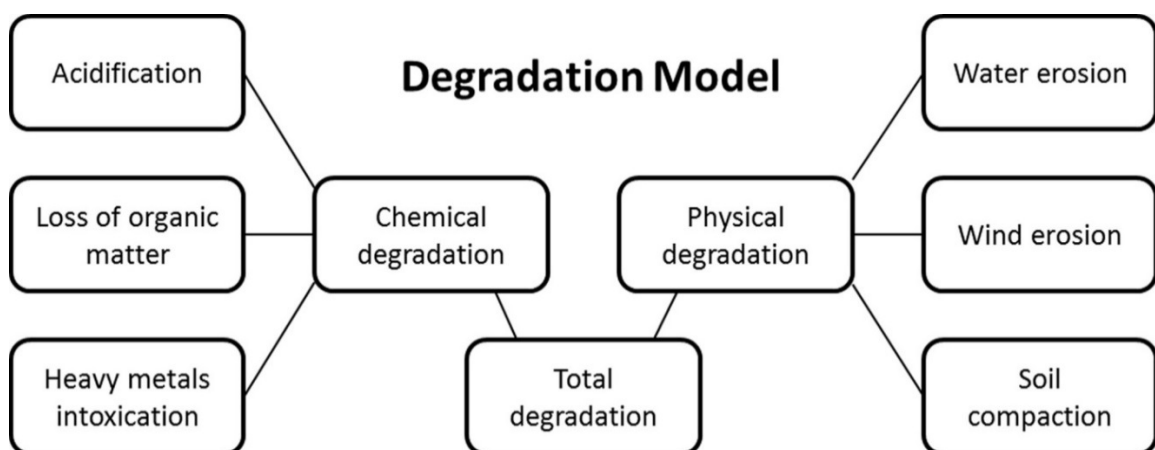
Byla stanovena maximální hodnota přesahu –

$$PRELIMMAX(kat) = \max_{prvek} PRELIM(kat, prvek) \quad (8)$$

Tam kde $PRELIMMAX(kat) \leq 1 \Rightarrow D(kat, HMI) = 0$, tzn. tam kde $PRELIM$ nepřesahovala hodnotu limitu v žádném ze sledovaných prvků, byl stanoven stupeň ohrožení (D) na 0. Zbývající prvky byly seřazeny podle maximálního $PRELIMMAX$ a rozděleny do 7 různých skupin podle pořadí v seřazené skupině (rovnoměrným rozdělením). Katastry s výskytem nejvyšší míry překročení limitu byly tedy ohodnoceny stupněm 7.

3.3.2.2 Zpracování dat a statistická analýza

V první fázi byly jednotlivé degradační faktory rozděleny do dvou skupin – fyzikálních (vodní eroze, větrná eroze, kompakce) a chemických faktorů degradace (těžké kovy, acidifikace, ztráta organické hmoty). Cílem bylo, podobně jako u metody expertního odhadu, vytvořit modely fyzikální, chemické a celkové degradace, tentokrát na základě schématu Obr. 8.



Obr. 8 Schéma vytváření modelů při metodě multikriteriální statistiky

Jednotlivé faktory degradace získané přepočtem podle rovnice 1 byly normalizovány na rozsah 0-1 prostřednictvím vzorce:

$$x'_i = \frac{x_{i,j} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (9)$$

Kde x_i představuje ohodnocení degradace faktoru i v katastru j . x_{\max} a x_{\min} reprezentují minimální a maximální hodnoty daného faktoru napříč všemi katastry. Výsledkem je hodnota mezi 0 (žádná degradace) až po 1 (nejvyšší míra degradace). Podobný

postup ve svém zpracování použili i Salvati a Zitti a je běžnou přípravou dat na statistické zpracování v podobě PCA analýzy (Salvati et al. 2016). Cílem této analýzy je určit příspěvek vybraného degradačního procesu k celkovému rozložení degradace.

Jednotlivé faktory na rozdíl od předchozího přístupu expertního ohodnocení a lineární kombinace vah jsou výsledkem PCA analýzy. Tato analýza se používá zejména v případech, kdy je většina proměnných (degradačních faktorů) vzájemně korelovatelná, což je v našem případě téměř bezvýtku splněno (této skutečnosti odporuje pouze intoxikace těžkými kovy, což je vzhledem k jejímu omezenému rozšíření logické), jak ukazuje

Tab. 6.

Tab. 6 Korelační závislost degradačních faktorů

Proměnná	Korelace (podsta) Označ. korelace jsou významné na hlad. $p < ,05000$ N=13017 (Celé případy vynechány u ChD)					
	WAE	WIE	ACI	COM	LOM	HMI
WAE	1,00	-0,43	0,17	-0,05	0,24	0,01
WIE	-0,43	1,00	-0,21	-0,02	0,07	-0,01
ACI	0,17	-0,21	1,00	-0,58	0,39	0,06
COM	-0,05	-0,02	-0,58	1,00	-0,16	-0,04
LOM	0,24	0,07	0,39	-0,16	1,00	0,05
HMI	0,01	-0,01	0,06	-0,04	0,05	1,00

Při výpočtu agregačních indexů se kromě lineární kombinace expertního odhadu používají i metody založené na geometrickém průměru jednotlivých proměnných bez určení vah (Jafari a Bakhshandehmehr 2013). V metodice podle PCA analýzy se postupuje jinak.

PCA analýza nebo také analýza hlavních komponent je multivariační analytická metoda, která umožňuje reorganizovat informace v souboru dat se snahou najít a popsat strukturu dat. Používá se k redukování počtu proměnných se zachováním zvolené míry informačního obsahu a variability dat. Restrukturuje informaci tak, že vytváří nové komponenty, které jsou lineární kombinací původních znaků. Výsledné komponenty jsou vzájemně nekorelační. Každá komponenta je ohodnocena mírou vysvětlené variance C , která říká, jak moc přispívá k popisu původní informace. Komponenty jsou řazeny podle důležitosti (procenta vysvětlené variance) a ty, které již k vysvětlení informace moc nepřinášejí, jsou vynechány. Tak dochází k redukcí vstupního počtu proměnných. Počet hlavních (redukováných) komponent pak záleží na stanovené míře přesnosti, v naší analýze jsme zvolili hodnotu 90%, hodnota m je pak minimální počet komponent, které vysvětlují více než 90% informace.

Váhu jednotlivých degradačních faktorů získáme vynásobením příspěvku každého faktoru V_i k m nejvýznamnějším komponentám proporcí celkové vysvětlené variance C_k komponenty. Suma těchto součinů pro všechny hlavní komponenty reprezentuje celkovou váhu atributu (Salvati et al. 2011; Salvati a Bajocco 2011).

$$w_i = \sum_{k=1}^m (V_i C_k) \quad (10)$$

Tuto váhu je ještě nutno přepočítat na relativní hodnotu podle vzorce 4, výsledek pak vyjadřuje hledanou váhu degradačního faktoru i .

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^6 w_i} \quad (11)$$

Každá váha vysvětluje, jak moc přispívá degradační faktor k celkovému distribučnímu vzoru degradace v rámci ČR, tedy nepřímo ukazuje jeho důležitost.

Na závěr byly vytvořeny tři agregační indexy v souladu s rozdělením na fyzikální, chemický a celkový model degradace půd.

$$CHD = \frac{W_{LOM} LOM + W_{ACI} ACI + W_{HMI} HMI}{W_{LOM} + W_{ACI} + W_{HMI}} \quad (12)$$

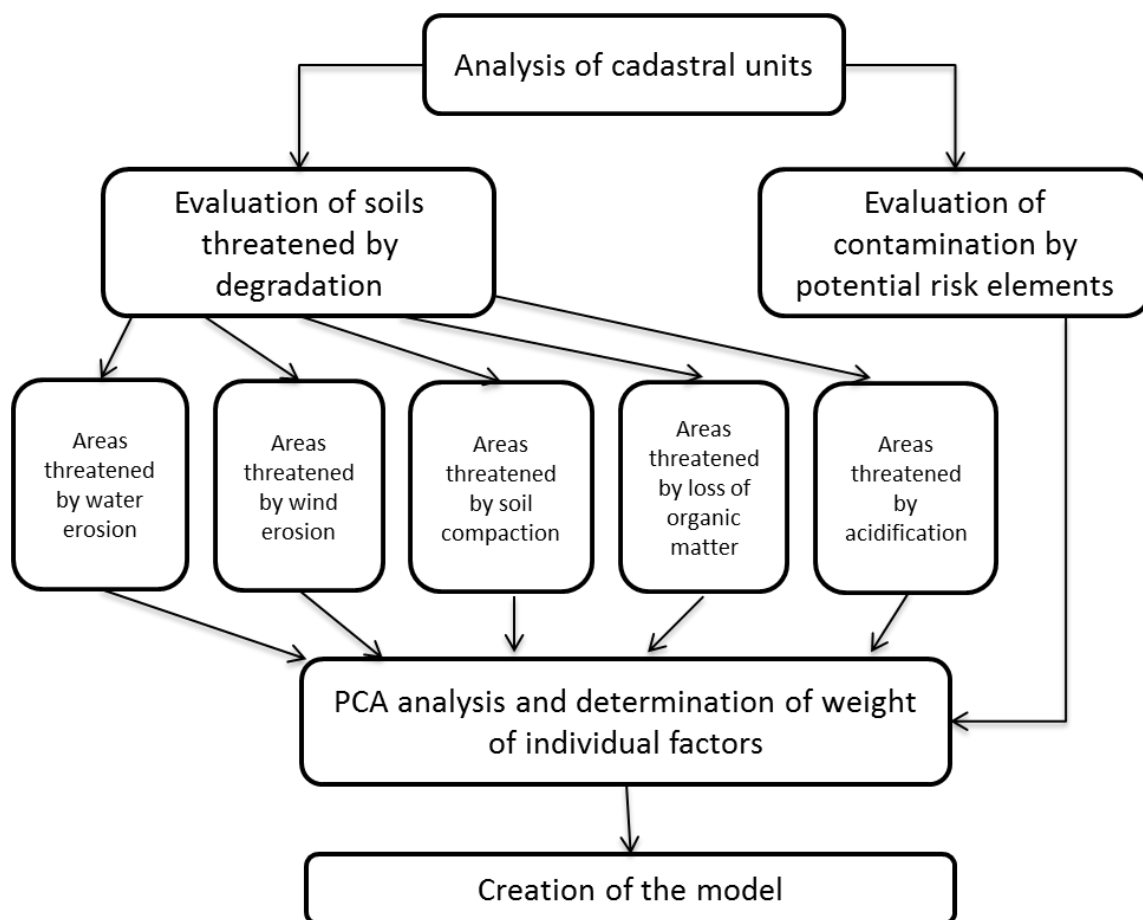
$$PHD = \frac{W_{WAE} WAE + W_{WIE} WIE + W_{COM} COM}{W_{WAE} + W_{WIE} + W_{COM}} \quad (13)$$

$$TD = W_{LOM} LOM + W_{ACI} ACI + W_{HMI} HMI + W_{WAE} WAE + W_{WIE} WIE + W_{COM} COM \quad (14)$$

Kde

CHD, PHD a TD jsou postupně chemická, fyzikální a celková degradace v rozsahu hodnot 0 až 1.

Celkové procedurální schéma postupu zachycuje Obr. 9.



Obr. 9 Schéma výpočtu vah degradačních faktorů (Šarapatka a Bednář 2015)

3.4 Analýza degradačního vzoru na základě fyzicko-geografických proměnných

Cílem této analýzy je zjistit, zda neexistuje nějaká vazba mezi fyzicko-geografickými parametry prostředí a jednotlivými degradačními faktory, a to ideálně odhalením konkrétních prahových hodnot fyzicko-geografických proměnných, kde degradace začíná nebo končí. Výběr fyzicko-geografických faktorů v rámci této analýzy byl založen na následujících předpokladech:

- Proměnné musí být pokud možno snadno dostupné, nebo dopočitatelné z dostupných, ideálně veřejných zdrojů.
- Proměnné by měly být kvantitativní spojité povahy, pokud to není možné, tak alespoň kvantitativní diskrétní (je možné i použití proměnných ordinální povahy, ale výsledky některých dalších analýz pak mohou být zkresleny).

Pro analýzu byly vybrány následující proměnné:

- Svažitost [st.] – odvozena z výškového modelu (dále DEM)
- Roční úhrn srážek [mm] – průměrné údaje z ČHMÚ za období 1961-1990
- Průměrná roční teplota [°C] – průměrné údaje z ČHMÚ za období 1961-1990
- Členitost (variabilita) terénu [-] – vytvořena na základě variačního koeficientu ze souboru nadmořských výšek v daném katastru.

$$V = \sqrt{D(Alt)/|E(Alt)|}, \quad (15)$$

kde Alt představuje výšku.

- Půdní zrnitost [%]- procentuální zastoupení částic <0,01mm
- Nadmořská výška – založena na výškovém modelu ČR, který poskytuje firma ArcData – jde o veřejná data pocházející z mapování družice Endeavour Space Shuttle. Rozlišení výškového modelu jsou 3 obloukové vteřiny, což pro Střední Evropu představuje pixel o rozměrech 90x60m. Z tohoto modelu se odvozuje rovněž svažitost.

Přehled fyzicko-geografických proměnných ukazuje Tab. 7.

Tab. 7 Přehled fyzicko-geografických proměnných a jejich zdroj.

Fyzicko-geografické proměnné	Zdroj
Roční úhrn srážek (mm)	ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav)
Svažitost (st.)	Odvozena z DEM (ArcData Praha)
Průměrná roční teplota (°C)	ČHMÚ
Půdní zrnitost	VÚMOP (Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd)
Členitost terénu (%)	Odvozena z DEM
Nadmořská výška (m n. m.)	SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission)

3.4.1 Základní statistická analýza

V programu Statistika byla provedena základní statistická analýza korelační závislosti fyzicko-geografických proměnných a jednotlivých degradačních faktorů. Výsledná

Tab. 8 ukazuje, že většina proměnných je vzájemně korelovaná při $p=0.95$.

Tab. 8 Korelační matice závislostí degradačních faktorů a fyzicko-geografických proměnných (Bednář a Šarapatka, 2018)

Variable	Correlations Marked (in bold) correlations are significant at *P < .05, N=13017												
	WAE	WIE	ACI	COM	LOM	HMI	TD	SLOPE	ALT	ELEDIF	PRE	SGR	TEMP
WAE	1,00	-0.43	0.17	-0.05	0.24	0.01	0.89	0.64	0.29	0.44	0.27	-0.02	-0.28
WIE	-0.43	1,00	-0.21	-0.02	0.07	-0.01	-0.39	-0.29	-0.42	-0.05	-0.29	0.05	0.39
ACI	0.17	-0.21	1,00	-0.58	0.39	0.06	0.35	0.44	0.71	-0.04	0.48	-0.7	-0.64
COM	-0.05	-0.02	-0.58	1,00	-0.16	-0.04	0.1	-0.37	-0.52	0,00	-0.23	0.56	0.45
LOM	0.24	0.07	0.39	-0.16	1,00	0.05	0.48	0.2	0.08	0.12	-0.06	-0.26	-0.05
HMI	0.01	-0.01	0.06	-0.04	0.05	1,00	0.2	0.05	0.07	0.03	0.04	-0.03	-0.08
TD	0.89	-0.39	0.35	0.1	0.48	0.2	1,00	0.57	0.31	0.37	0.28	-0.11	-0.29
SLOPE	0.64	-0.29	0.44	-0.37	0.2	0.05	0.57	1,00	0.49	0.61	0.49	-0.24	-0.5
ALT	0.29	-0.42	0.71	-0.52	0.08	0.07	0.31	0.49	1,00	-0.06	0.6	-0.5	-0.88
ELEDIF	0.44	-0.05	-0.04	0,00	0.12	0.03	0.37	0.61	-0.06	1,00	0.15	0.12	-0.03
PRE	0.27	-0.29	0.48	-0.23	-0.06	0.04	0.28	0.49	0.6	0.15	1,00	-0.28	-0.65
SGR	-0.02	0.05	-0.7	0.56	-0.26	-0.03	-0.11	-0.24	-0.5	0.12	-0.28	1,00	0.43
TEMP	-0.28	0.39	-0.64	0.45	-0.05	-0.08	-0.29	-0.5	-0.88	-0.03	-0.65	0.43	1,00

WAE – vodní eroze, WIE – větrná eroze, ACI – acidifikace, COM – zhutnění, LOM – ztráta organické hmoty, HMI – intoxikace těžkými kovy, TD – celková degradace, TEMP – průměrná roční teplota, SLOPE – svažitosť, ALT – nadmořská výška, ELEDIF – členitost terénu, PRE – roční úhrn srážek, SG – půdní zrnitost

Přesto pro odhalení konkrétních prahových hodnot je zapotřebí podrobnější typ analýzy, který je popsán dále v textu.

3.4.2 Analýza s využitím krabicových diagramů

Dalším krokem bylo rozdělení katastrů do 5 tříd ohroženosti podle daných degradačních faktorů. Jako kritérium rozdělení byla uvažovaná četnost – tedy jednotlivé kvintily rozdělení.

Před rozdělením byly hodnoty normalizovány na rozsah 0-1, kde 1 značí maximální degradační ohrožení.

Rozsah hodnot jednotlivých faktorů ukazuje Tab. 9.

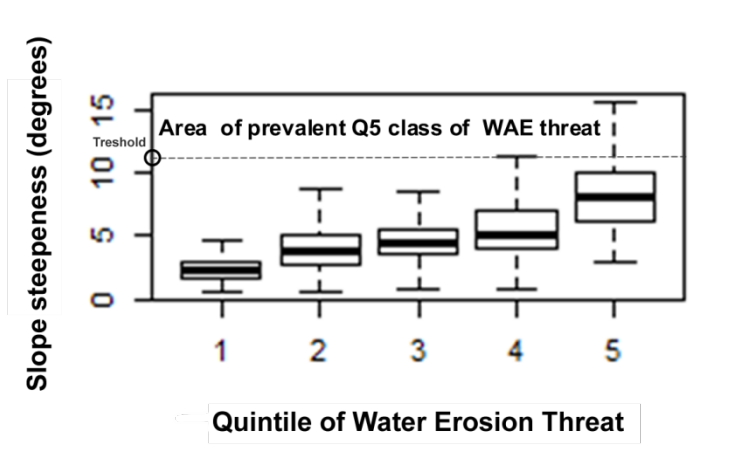
Tab. 9 Rozsah hodnot degradačního zatížení a nenulového ohrožení

	WAE	WIE	ACI	COM	LOM	HMI	TD
Rozsah hodnot	< 0-1 >	< 0-0.76 >	< 0-0.86 >	< 0-0.86 >	< 0-1 >	< 0-1 >	< 0-0.8 >
Počet katastrů s určitým stupněm ohrožení	12984	3359*	13013	13008	13012	575*	13013

*většina katastrů pro HMI a WIE nevykazuje degradační ohrožení, do zpracování jsme zařadili jen katastry degradací dotčené

Výskyt větrné eroze a intoxikace těžkými kovy vykazuje asymetrické rozdělení, většina katastrů je těmito faktory neohrožena, při rozdělování do skupin dle kvintilů z celého rozsahu hodnot by neodráželo intenzitu ohrožení těchto faktorů, proto byly skupiny u těchto dvou faktorů vybírány pouze z hodnot, kde se nějaká degradace projevuje.

Pro každou dvojici degradační faktor x fyzicko-geografická proměnná byla vypracovaná analýza v podobě krabicových diagramů (výsledné diagramy jsou k dispozici v části výsledků, tady demonstraci postupu ukazují na příkladu kombinace svažitost x vodní eroze.



Obr. 10 Box-plot analýza (Bednář a Šarapatka 2018)

Ze schématu (viz Obr. 10) je patrné, že existuje prahová hodnota Treshold, taková, že každý katastr s hodnotou svažitosti vyšší, než je tato hodnota, spadá do kategorie nejvyššího ohrožení.

Tento přístup je sice využitelný, ale výhodnější je podrobit vzájemné vazby detailnější datové analýze.

3.4.3 Datová analýza

Princip:

Princip spočívá v rozdělení intervalu sledovaných hodnot fyzicko-geografické proměnné na určitý počet kroků (zvolil jsem $n=100$) a pro každý z těchto kroků vyčíslit procentuální zastoupení jednotlivých kvintilů v daném kroku.

Pro počet katastrů f v rámci určitého kroku platí:

$$f(i, n, w, d) = \sum_c [(ph(i, n - 1) < ph(i, c) \leq ph(i, n) \cap T_d(c) = w) = 1] \quad (16)$$

kde

i – zvolená fyzicko – geografická proměnná, $i \in$

{ELEV, SLOPE, STX, PRE, TEMP, ELEDIF} (nadmořská výška, svažítost, textura půda, srážky, teplota, členitost terénu)

n – krok výpočtu, $n \in \{1, \dots, 100\}$,

$w \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ – kvintil ohrožení,

d – degradační faktor $d \in \{WAE, WIE, HMI, LOSS, COM, ACI\}$ (vodní eroze, větrná eroze, intoxikace těžkými kovy, ztráta organické hmoty, kompakce, acidifikace),

c – katastr,

$ph(i, n)$ – vypočítaná hodnota n

– tého kroku fyzickogeografické proměnné s indexem i

$ph(i, c)$ – hodnota fyzicko – geografické proměnné (FGP) pro katastr c

$T_d(c)$ – kvintil ohrožení katastru c

Celkový počet katastrů v kroku n je pak:

$$sf(i, n, d) = \sum_w f(i, n, w, d) \quad (17)$$

Podíl $D(i, n, w, d) = f(i, n, w, d)/sf(i, n, d)$ [%] pak představuje procentuální podíl kategorie kvintilu w v n -tém kroku výpočtu pro zvolenou FGP a DF.

K určení konkrétních prahových hodnot je zapotřebí zvolit konstantu (procento), při kterém lze skupinu kvintilu ohrožení označit za převládající. Byla zvolena varianta $D_{max}=50\%$, to znamená, že nás zajímají potenciální prahové hodnoty, kdy počet katastrů zastoupených v dané třídě ohrožení představuje více než polovinu celkového množství dotčených katastrů.

Všechny rozsahy hodnot FGP , kde $D(i, n, w, d) > D_{max}$ představují místa s dominancí ohrožení kvintilu w .

Pro praktické účely byly kvintily ohrožení rozděleny do 5 kategorií:

- Kvintil 5 – nejvíce ohrožené
- Kvintil 4+5 – ohrožené
- Kvintil 3 – neutrální
- Kvintil 2 a 1 – minimálně ohrožené
- Kvintil 1 – neohrožené

Výsledkem výpočtu naznačeného výše byla množina bodů $\{D(i, 1, w, d), D(i, 2, w, d), \dots, D(i, n, w, d)\}$, která byla následně interpolovaná neparametrickou regresní metodou LOESS s vytvořením funkce $fD(i, w, d, x), x \in \langle 1, n \rangle$.

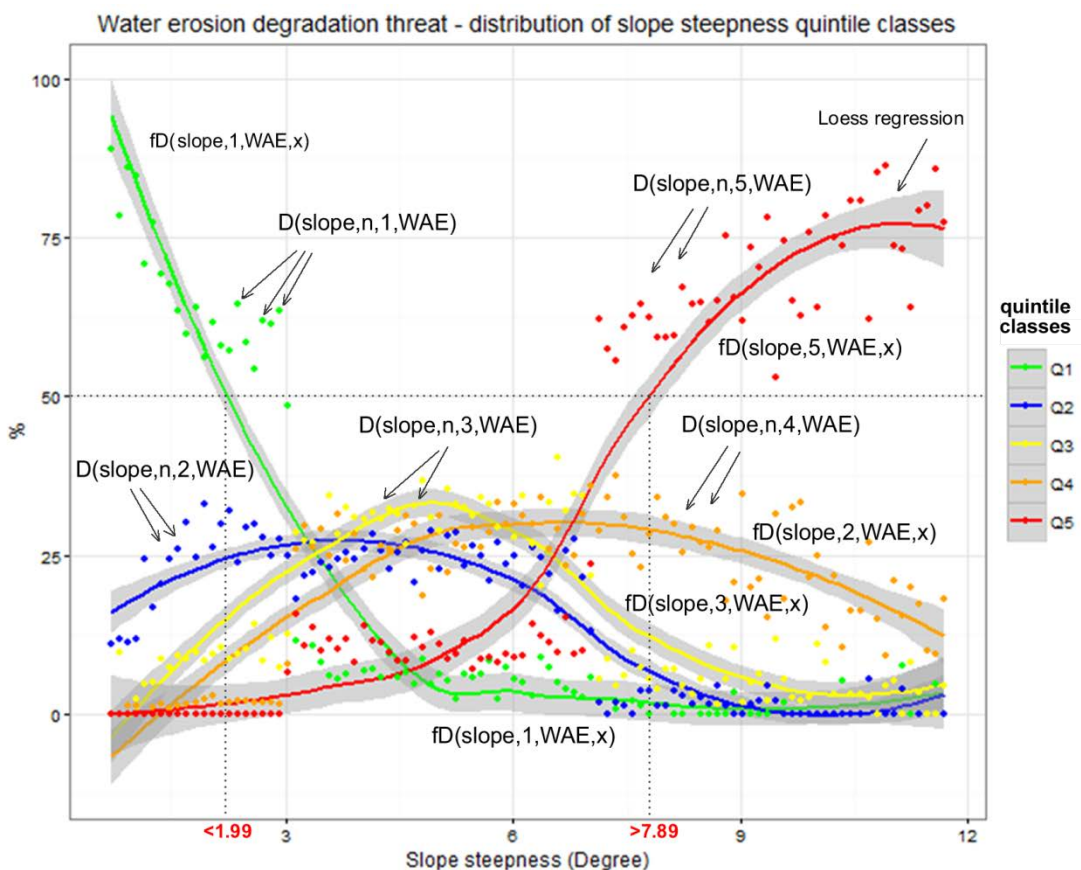
Výsledná množina prahových hodnot např. pro kategorii „ohrožené“ je pak dána vztahem:

$$x_{ohr.} \in PS = \{x \mid fD(i, 4, d, x) \geq 0.5 \cup fD(i, 5, d, x) \geq 0.5\} \quad (18)$$

Seřadíme-li prvky množiny PS od nejmenšího k největšímu, můžeme již určit hraniční konce intervalů, které určují naše hledané prahové hodnoty.

V ojedinělých případech se ve výsledné množině objeví více intervalů hodnot, jejich identifikace i celý proces výpočtu je řešen algoritmicky ve statistickém programu R.

Grafické naznačení výpočetního postupu zachycuje Obr. 11.



Obr. 11 Vodní eroze a svažítost - průběh rozdělení tříd ohrožení

V tomto případě se jedná o analýzu vztahu vodní eroze a svažítosti. Na schématu je vidět dominantní kategorie (přesahující v některých místech 50% zastoupení) Q1 (kvintil 1) a Q5 (kvintil 5), tedy třídy “nejvíce ohrožené” a “neohrožené”. Pro kategorii Q1 vychází prahová hodnota svažítosti kolem 2 stupňů, pro kategorii Q5 pak hodnota 7,89 stupně. Na základě analýzy lze tedy konstatovat, že zemědělské půdy se svažítostí menší než 2 stupně nejsou ve většině případů ohrožené vodní erozí, resp. při svažítosti větší než 7,89 jsou ve většině případů ohrožené vždy.

Celý výpočet je automatizován prostřednictvím skriptů v jazyce R. Skript výpočtu je uveden v příloze 9.3.

3.5 Porovnání modelu podle expertního odhadu a modelu multivariační analýzy

Pro porovnání výsledků rozšíření modelu podle expertního odhadu s modely zranitelnosti podle multivariační analýzy byla použita běžná korelace, kam vstupovaly generalizované hodnoty ohroženosti na katastr (model expertního odhadu) a celková

zranitelnost s acidifikací dle modelu multivariační analýzy. Jde o jistý způsob verifikace s předpokladem, že mezi vstupními hodnotami existuje korelační závislost.

3.6 Návrh automatických protierozních opatření metodou středu drah soustředěného odtoku

Předložená dále popsaná metoda umožňuje rekurzivně generovat liniová protierozní opatření, v pořadí podle důležitosti (efektivitě uplatnění) opatření.

Metoda vychází z několika předpokladů:

- Navrhuje záchytná biotechnická opatření, tj. nejvýhodnější liniová opatření kopírují vrstevnice.
- Vychází z předpokladu, že primárně bude stačit jedno předělení svahu (to však neznamená, že na jednom půdním bloku nebude navrženo více opatření).

Výsledkem postupu popsaného níže je ohodnocení vrstevnic číslem, jež určuje míru výhodnosti využití dané vrstevnice pro omezení vodní eroze, výběr nejvhodnější linie (s nejvyšším ohodnocením) a rekurzivní opakování postupu do stanoveného počtu opatření.

Celý postup je realizován prostřednictvím navrženého nástroje v prostředí ArcMap s využitím skriptu napsaného v jazyce Python (viz příloha 9.4)*.

Základem metody je myšlenka využití drah soustředěného odtoku, resp. stanovení délky odtoku z daného pixelu a délky přispívající soustředěné dráhy. Tam, kde se tato čísla rovnají (resp. rozdíl je v definovaném rozmezí), se nachází střed odtokové dráhy. Každý pixel ve studovaném území je ohodnocen 1 nebo 0, podle toho, jedná-li se o střed odtokové dráhy.

Matematicky definujeme množinu pixelů P , kde pro jednotlivý pixel $x \in P$ definujeme funkce $flowdirUP$ a $flowdirDOWN$ jako nástroje geoprocessingu rasterových operací, které nám vrátí délku nejdelší přispívající odtokové dráhy (resp. délku nejdelší dráhy odtokové).

Dále definujeme funkci

$$flowmid = \left[\left(\frac{|flowdirUP - flowdirDOWN|}{flowdirUP + flowdirDOWN} \leq \varepsilon \right) = 1 \right], \quad (19)$$

* Algoritmus se soustřeďuje na nalezení nejvhodnějšího místa k předělení svahu, aktuálně neřeší otázku typu záchytného opatření, generuje protierozní hrázky. Variantně lze samozřejmě (drobnou změnou kódu, resp. Identifikátoru z číselníku) generovat i jiná opatření. Automatický výběr opatření bude předmětem další aktualizace programu.

kde ε je povolený odstup drah, kdy ještě označujeme bod za střed dráhy soustředěného odtoku.

Po testování vhodných hodnot ε vzhledem k váhovým funkcím jsem stanovil $\varepsilon = 0,1$.

Funkce výpočtu *flowdirUP* resp. *flowdirDOWN* jsou dále modifikovány vahou, která je odrazem rychlosti a míry odnosu materiálu[†]. Tady lze uvažovat více variant – kombinaci svažitosti, náchylnosti půdy k erozi, vlivu vegetace, drsnosti apod. Pro další výpočty jsem stanovil tuto míru rovnou eroznímu smyvu dle rovnice USLE (Wischmeier a Smith 1978) a nazval ji faktorem rychlosti *fv*.

$$fv = G = R * LS * K * C * P, \quad (20)$$

kde K, C, R, LS a P jsou postupně faktory erodovatelnosti půdy, ochranného vlivu vegetace, srážkového součinitele, topografického faktoru a faktoru protierozních opatření. R bylo stanoveno podle Janečka (2012) na 40, faktor byl v první fázi nastaven na kukuřici, protierozní opatření se neuvažovala (P=1).

Označme dále $V, V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ množinou všech vrstevnic. Definujme funkci ohodnocení vrstevnice *ov* jako:

$$ov_i = \sum_m [m \cap v_i \neq \emptyset, flowdirUP(m)], \quad (21)$$

Kde *flowdirUP(m)* je nejdelší přispívající dráha soustředěného odtoku do pixelu *m* (polovina celkové soustředěné dráhy odtoku – v případě, že v pixelu se polovina soustředěné dráhy nenachází, vrátí hodnotu 0).

Popíšeme-li množinu vrstevnic *V* nově jako množinu elementů (v_i, ov_i) a seřadíme ji sestupně podle ohodnocení ov_i , získáme vlastně prioritní seznam liniových opatření, kde by měla být směřována liniová opatření jakéhokoliv typu. Často tento první náhled stačí, v praxi je třeba zohlednit i to, že po realizaci nejlepšího opatření může potenciálně dojít ke změně výškového modelu a tedy nutnosti nového přepočtu „nejlepších“ opatření. To řeší opakovaný (rekurzivní) průchod algoritmem. Celý algoritmus se dá popsat následujícími kroky:

- 1) Stanovení žádaného konečného počtu liniových opatření
- 2) Ohodnocení vrstevnic
- 3) Výběr „nejlepší“ linie a realizace opatření (změna DEM a případný přepočet erozního ohrožení).

[†] Funkce *flowdirUP* a *flowdirDOWN* jsou v rámci systému dostupné jako nástroje rozšíření Spatial Analyst systému ArcGIS pod názvem *FlowLength* s příslušnými parametry.

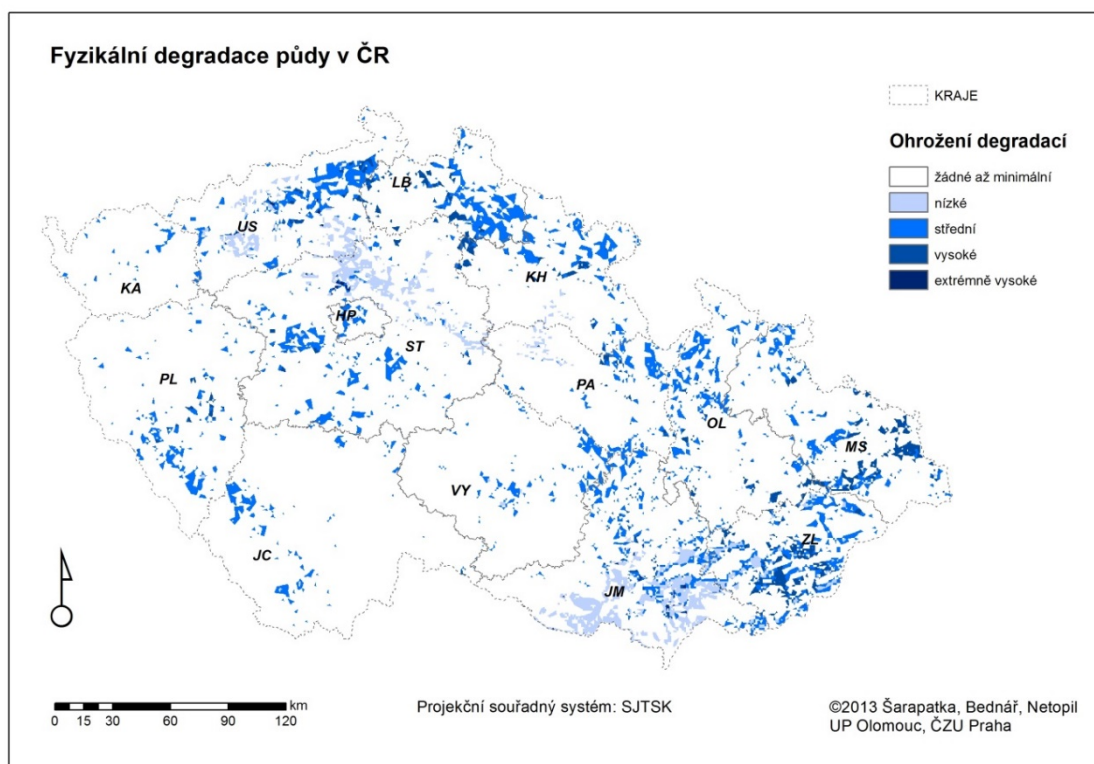
- 4) Pokud je dosaženo předem stanoveného počtu, končíme. V opačném případě postup opakujeme – skok na bod 2.

Aktuálně je ukončení procesu vázáno na navržený počet liniových opatření, to lze však snadno převést např. na stanovený stupeň ohrožení nebo např. ekonomickou nákladnost (při znalosti jednotkových nákladů).

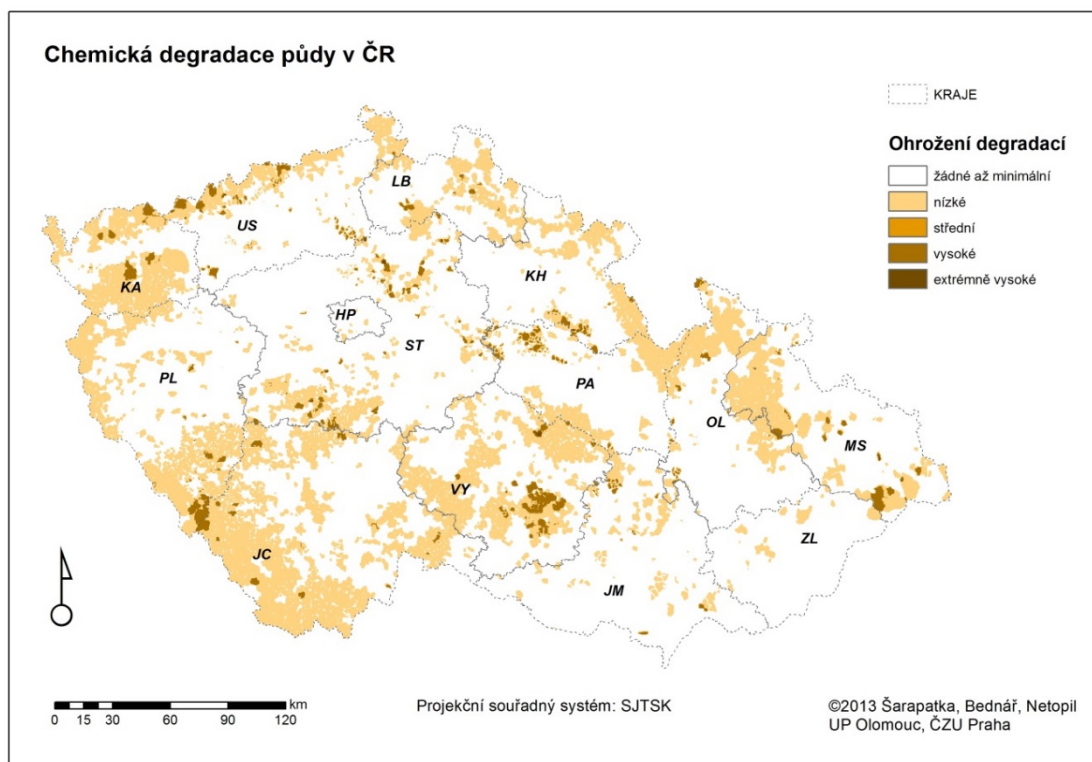
4 Výsledky

4.1 Degradanční model podle metody expertního odhadu

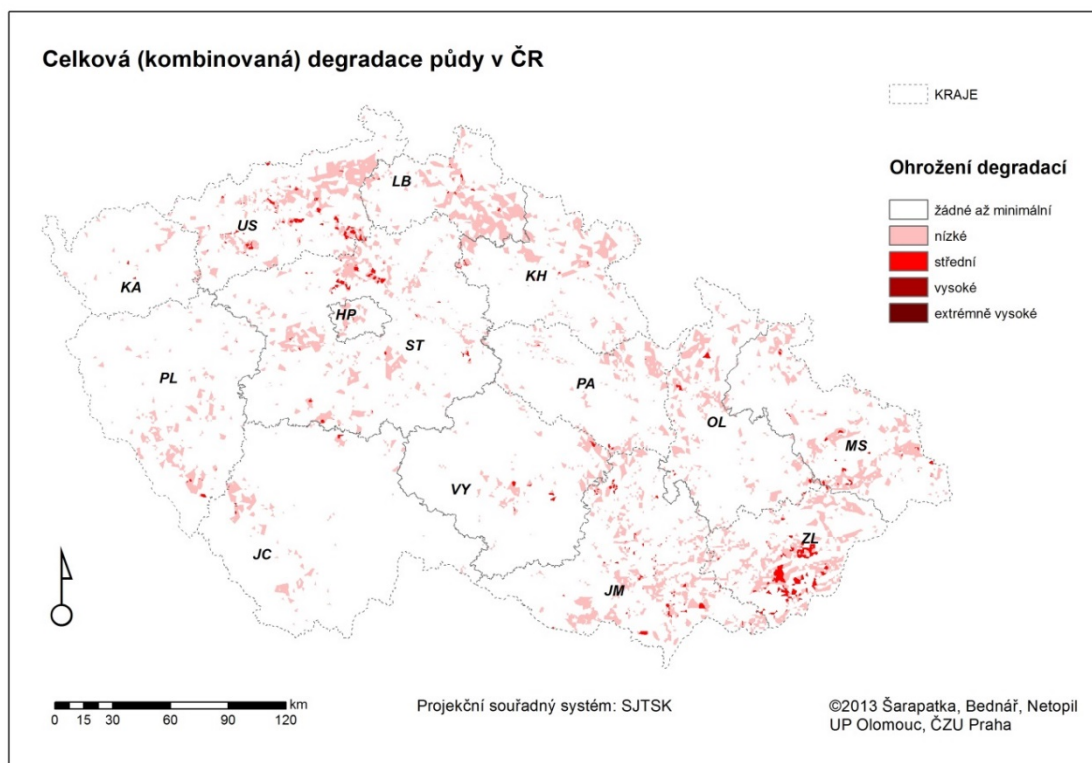
Výsledky přístupu ohodnocení podle expertního přístupu jsou ve formě jednotlivých map, které ukazují problémové oblasti, zasažené určitým stupněm degradačního procesu. Obrázky Obr. 12 a Obr. 13 ilustrují výsledky fyzikálního a chemického modelu, Obr. 14 celkovou kombinovanou degradaci (místa s nejvyšší degradací jsou ta, kde se významným způsobem objevuje vliv více degradačních faktorů). Obr. 15 je výsledek kombinace tří různých modelů ohodnocení faktorů, podle expertního odhadu, podle expertního odhadu se zdůrazněním acidifikace a zhutnění, poslední s rovnými vahami. Obr. 16 zachycuje mapu převládajících degradačních faktorů, resp. Obr. 17 mapu převládajících faktorů bez zohlednění acidifikace.



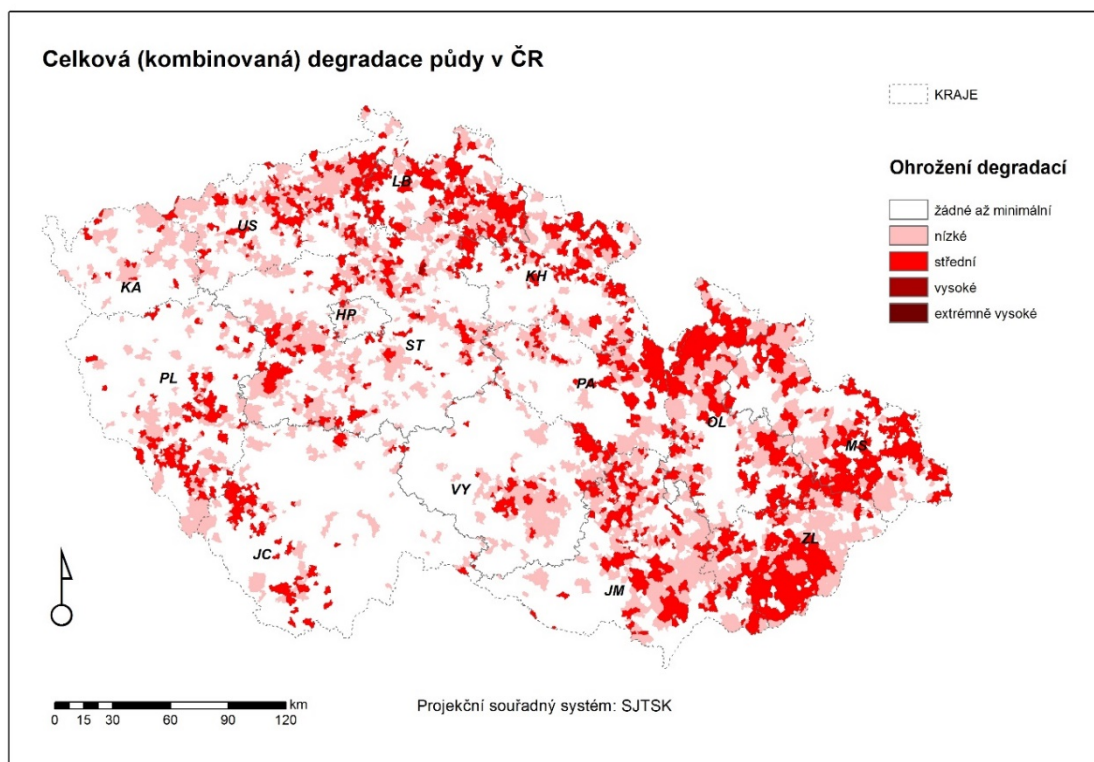
Obr. 12 Fyzikální degradace zemědělských půd (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy



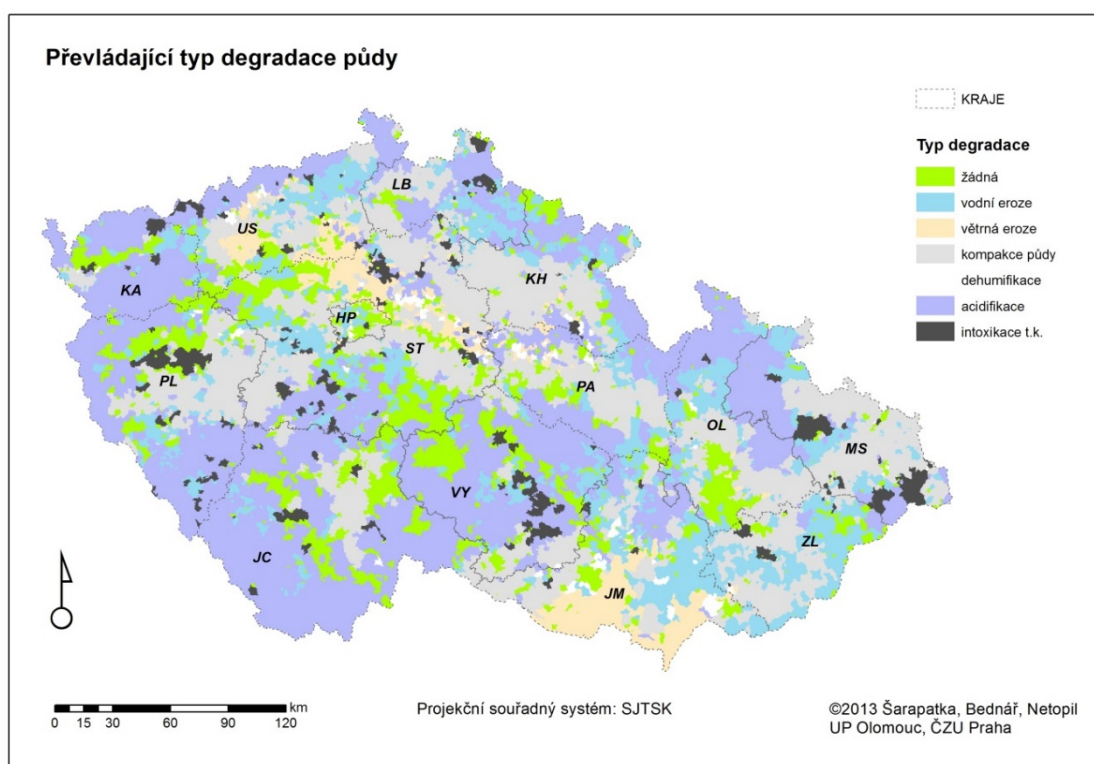
Obr. 13 Chemická degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy



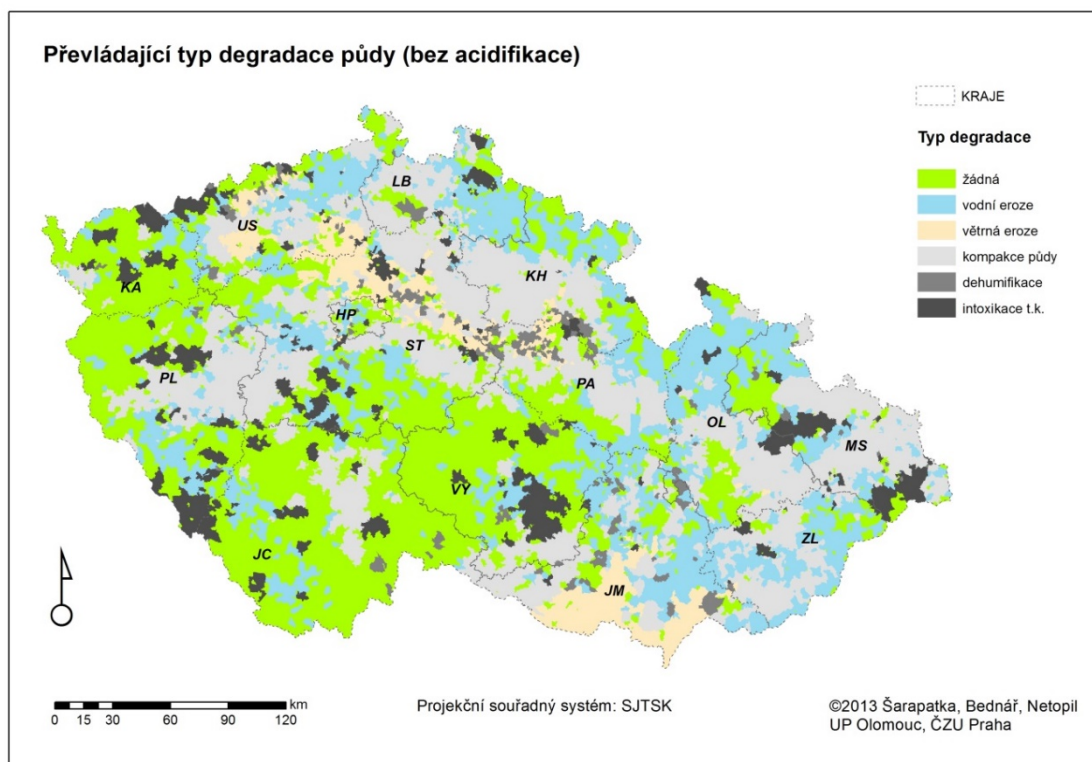
Obr. 14 Celková degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy



Obr. 15 Celková degradace zemědělských půd - kombinace více sad vstupních vah



Obr. 16 Převládající procesy degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy

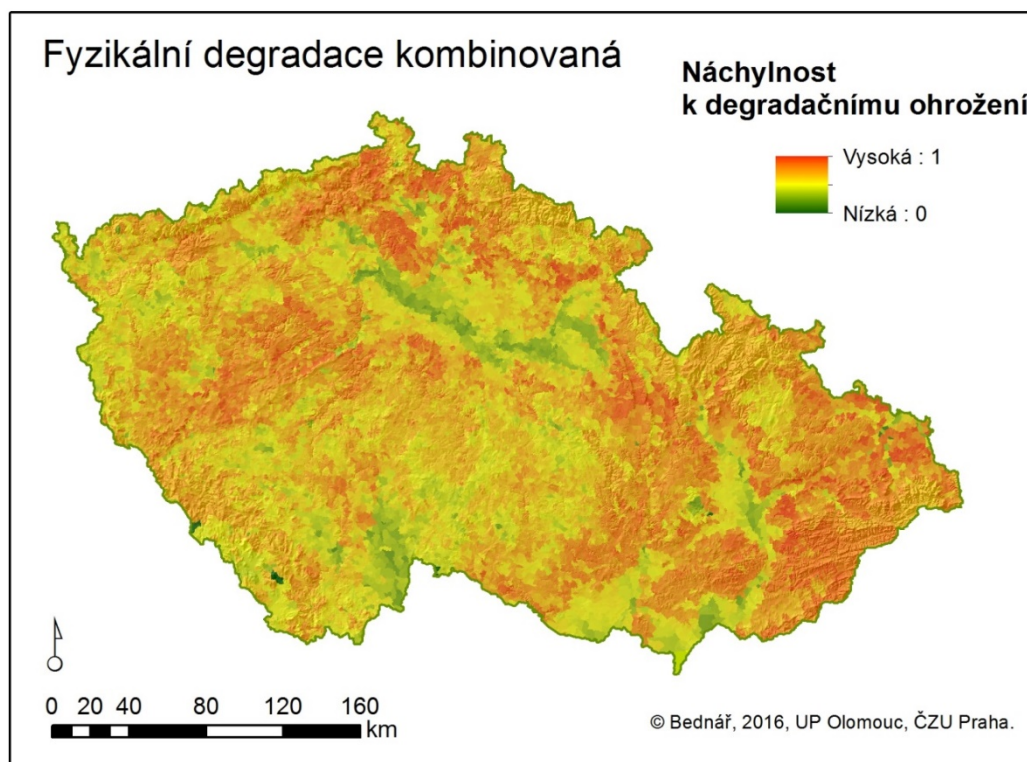


Obr. 17 Převládající procesy degradace zemědělských půd bez acidifikace podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy

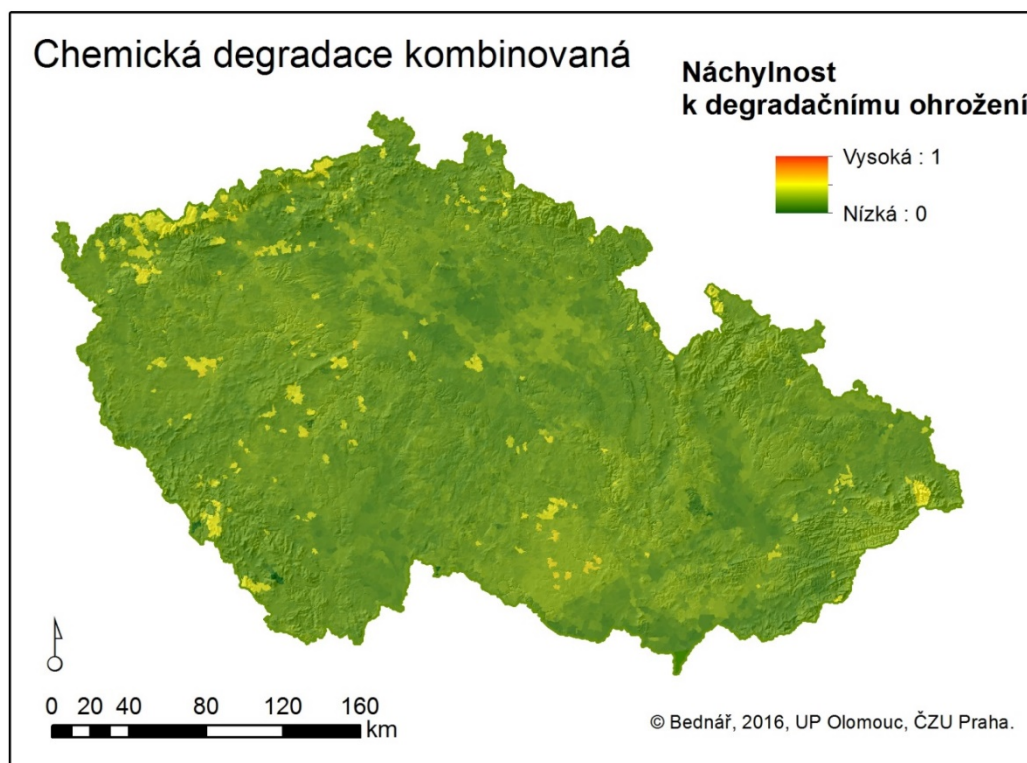
4.2 Degradční model podle metody multivariační analýzy

Výsledky této části jsou opět v podobě výsledných map jednotlivých faktorů, fyzikálního, chemického i celkového kombinovaného modelu degradace půd.

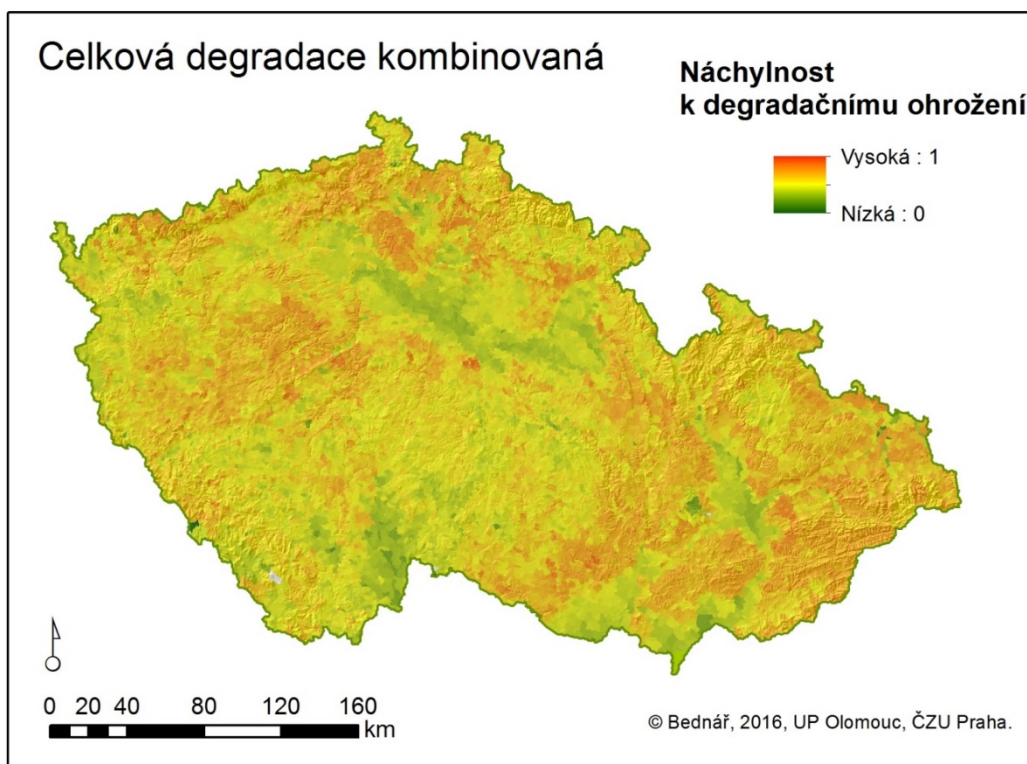
Mapy fyzikální, chemické a celkové degradace ukazují Obr. 18, Obr. 19, Obr. 20 a Obr. 21. Mapy zranitelnosti zemědělských půd podle jednotlivých degradačních faktorů pak Obr. 22. Náchylnost k půdní erozi je normalizována na hodnoty 0 (žádné ohrožení) až 1 (maximální ohrožení). Základní zpracovatelnou jednotkou je katastr, v rámci ČR bylo zpracováno 13027 katastrů.



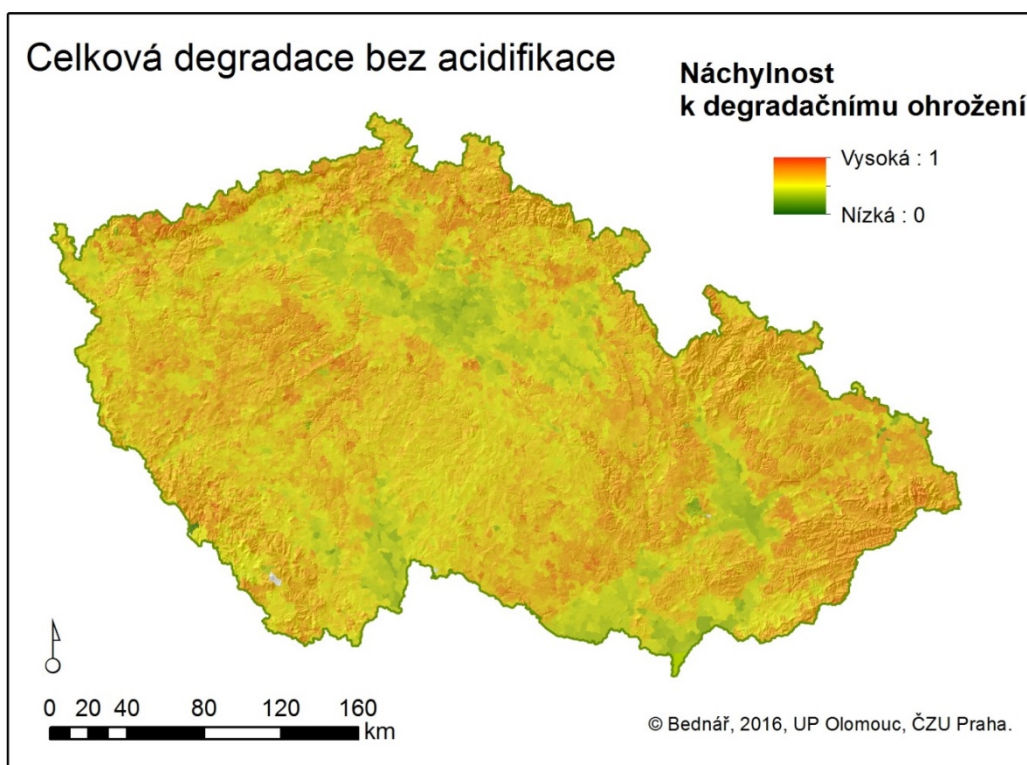
Obr. 18 Fyzikální degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Šarapatka a Bednář 2015) – česká verze mapy



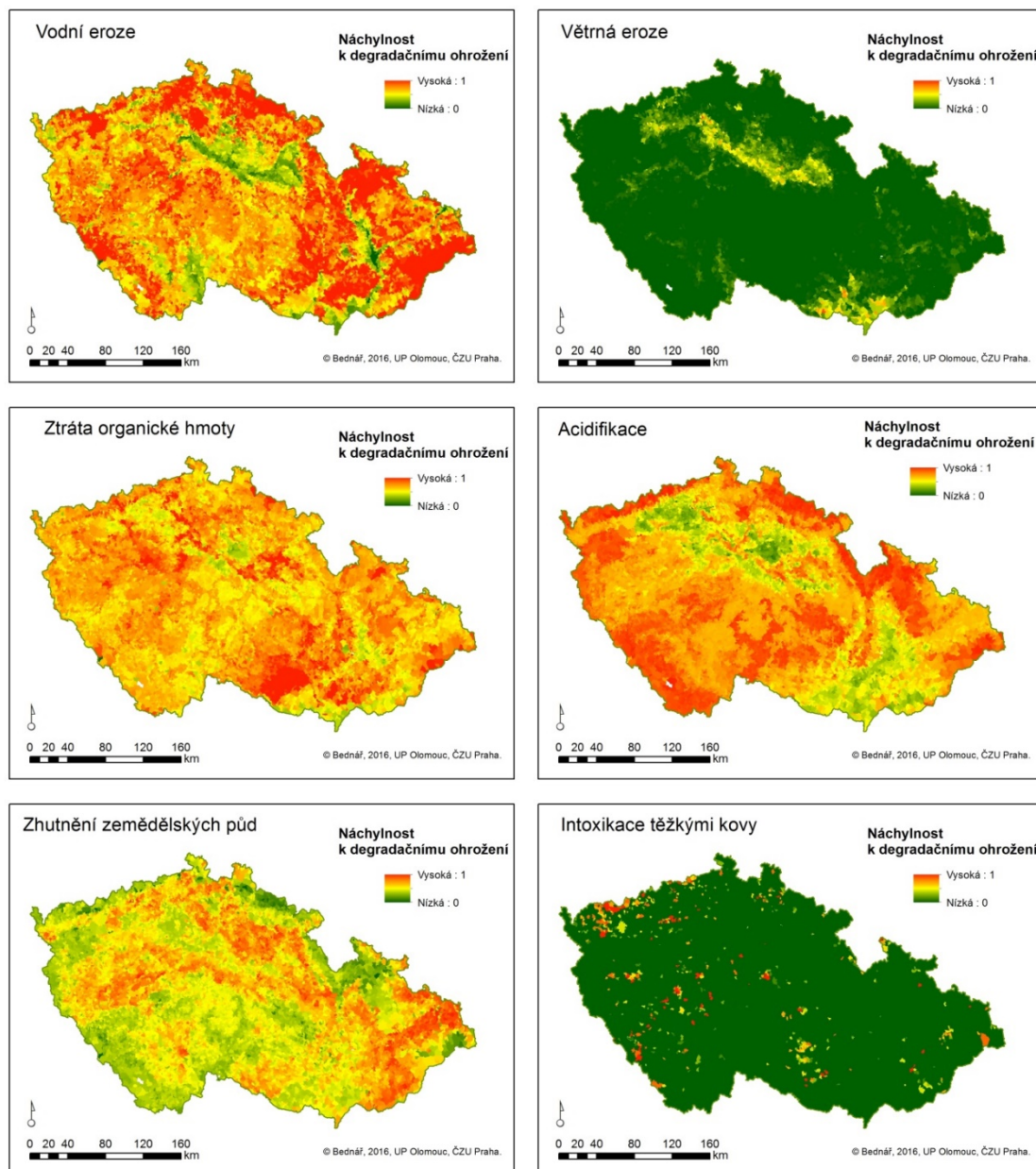
Obr. 19 Chemická degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Šarapatka a Bednář 2015) – česká verze mapy



Obr. 20 Celková degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Šarapatka a Bednář 2015) – česká verze mapy



Obr. 21 Celková degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy bez acidifikace



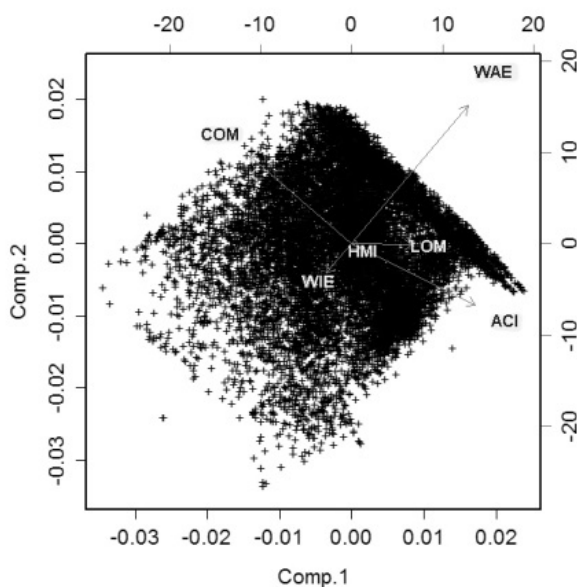
Obr. 22 Mapy ohroženosti zemědělských půd podle degradačních faktorů

Tab. 10 ukazuje váhy přiřazené jednotlivým degradačním faktorům, které vzešly z PCA analýzy. Váhy jsou v rozsahu od 0,33 (vodní eroze) až po 0,02 (větrná eroze), což potvrzuje předpoklad, že nejvýznamnějším faktorem v rámci ČR je vodní eroze. Statistické rozdělení celkové degradace je symetrické a odpovídá normálním rozdělení. Průměrná hodnota celkové degradace je 0,448 se směrodatnou odchylkou 0,086.

Tab. 10 Váhy jednotlivých degradačních faktorů podle PCA analýzy

Typ degradace (model)	Proměnná	Zkratka	Váha
Fyzikální	Vodní eroze	WAE	0,328
Fyzikální	Větrná eroze	WIE	0,018
Chemický	Intoxikace těžkými kovy	HMI	0,119
Chemický	Acidifikace	ACI	0,195
Fyzikální	Zhutnění	COM	0,213
Chemický	Ztráta organické hmoty	LOM	0,127

Obr. 23 ilustruje část výsledků PCA analýzy ve formě grafu komponentních vah dvou hlavních komponent. Z grafu lze vyčíst korelaci mezi jednotlivými znaky (degradačními faktory), faktory umístěné v grafu blízko sebe značí velkou vzájemnou závislost. Z výsledků analýzy 13027 katastrů vidíme zejména vzájemné protisměrné působení vodní eroze a větrné eroze, stejně jako zhutnění a acidifikace.

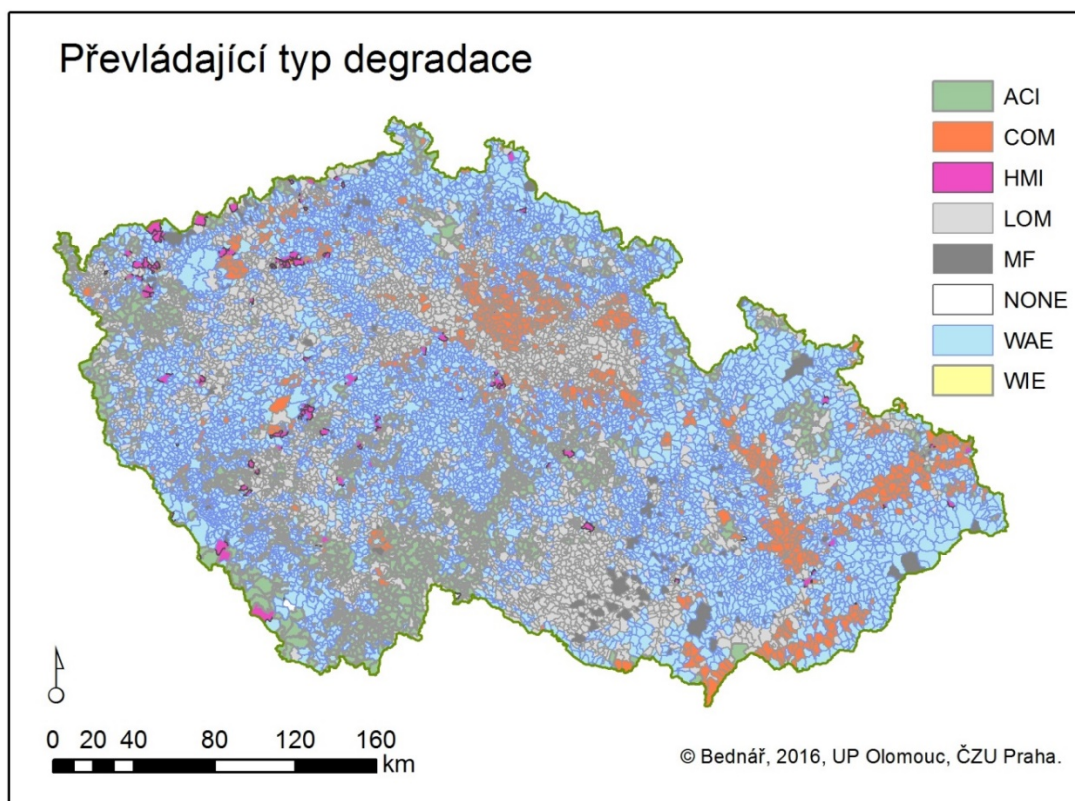


Obr. 23 Graf komponentních vah prvních dvou hlavních komponent (Šarapatka a Bednář 2015)
Součástí analýzy bylo i vyhodnocení převládajícího typu degradace v jednotlivých územích.

Výsledky zachycuje Obr. 24.

Tab. 11 zachycuje pro každý degradační faktor procentuální podíl z celkového počtu katastrů, kde měl rozhodující vliv.

Z tabulky je zřejmé, že zemědělská půda v ČR je vysoce ohrožena zejména třemi hlavními faktory: vodní erozí, ztrátou organické hmoty a acidifikací. Nedostatečné vápnění má napříč celou republikou za následek zvýšenou acidifikaci půdy ve shodě s tím, co popisují Klement a Sušil (2009).



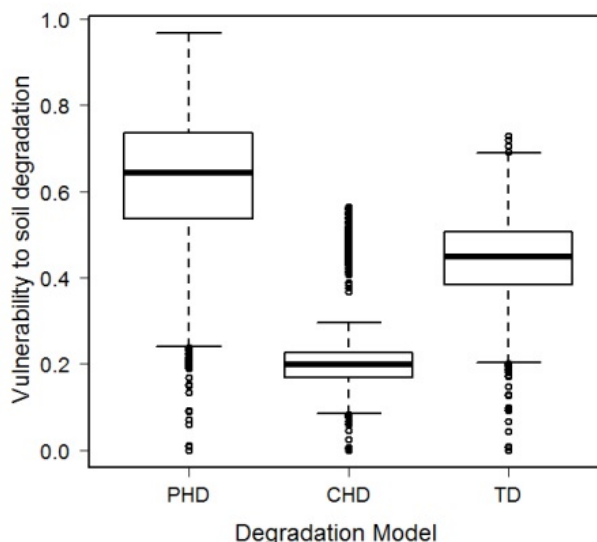
Obr. 24 Převládající typ degradace podle metody PCA analýzy

Tab. 11 Statistika převládajících faktorů v rámci ČR

Degradační faktor	<i>s acidifikací</i>	<i>bez acidifikace</i>
ACI	12.99%	-
COM	8.13%	8.46%
HMI	0.88%	0.90%
LOM	24.95%	33.06%
MF*	1.73%	1.69%
NONE	0.04%	0.05%
WAE	51.28%	55.84%
WIE	0.01%	0.01%

*MF znamená více faktorů, žádný faktor neměl jednoznačný převládající vliv. NONE označuje místa bez ohrožení degradací.

Statistické výsledky degradačních modelů jsou doplněny o analýzu krabicových (box-plot) diagramů, které ukazují na významnost fyzikální a chemické degradace půdy – viz Obr. 25.



Obr. 25 Rozložení zranitelnosti půd - box-plot analýza

4.3 Porovnání expertního model a modelu podle PCA analýzy (multivariační analýzy)

K porovnání byla použita základní korelace. Výsledky zachycuje Tab. 12.

Tab. 12 Korelační matice závislostí modelu podle expertního odhadu a podle PCA

Variable	Correlations (expcca in expcca) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=13017 (Casewise deletion of missing data)					
	TotalDwithAci	TotalDwithoutAci	M1	M2	M3	Komb
TotalDwithAci	1,000	0,932	0,285	0,282	0,212	0,272
TotalDwithoutAci	0,932	1,000	0,294	0,268	0,182	0,262
M1	0,285	0,294	1,000	0,946	0,837	0,966
M2	0,282	0,268	0,946	1,000	0,940	0,993
M3	0,212	0,182	0,837	0,940	1,000	0,945
Komb	0,272	0,262	0,966	0,993	0,945	1,000

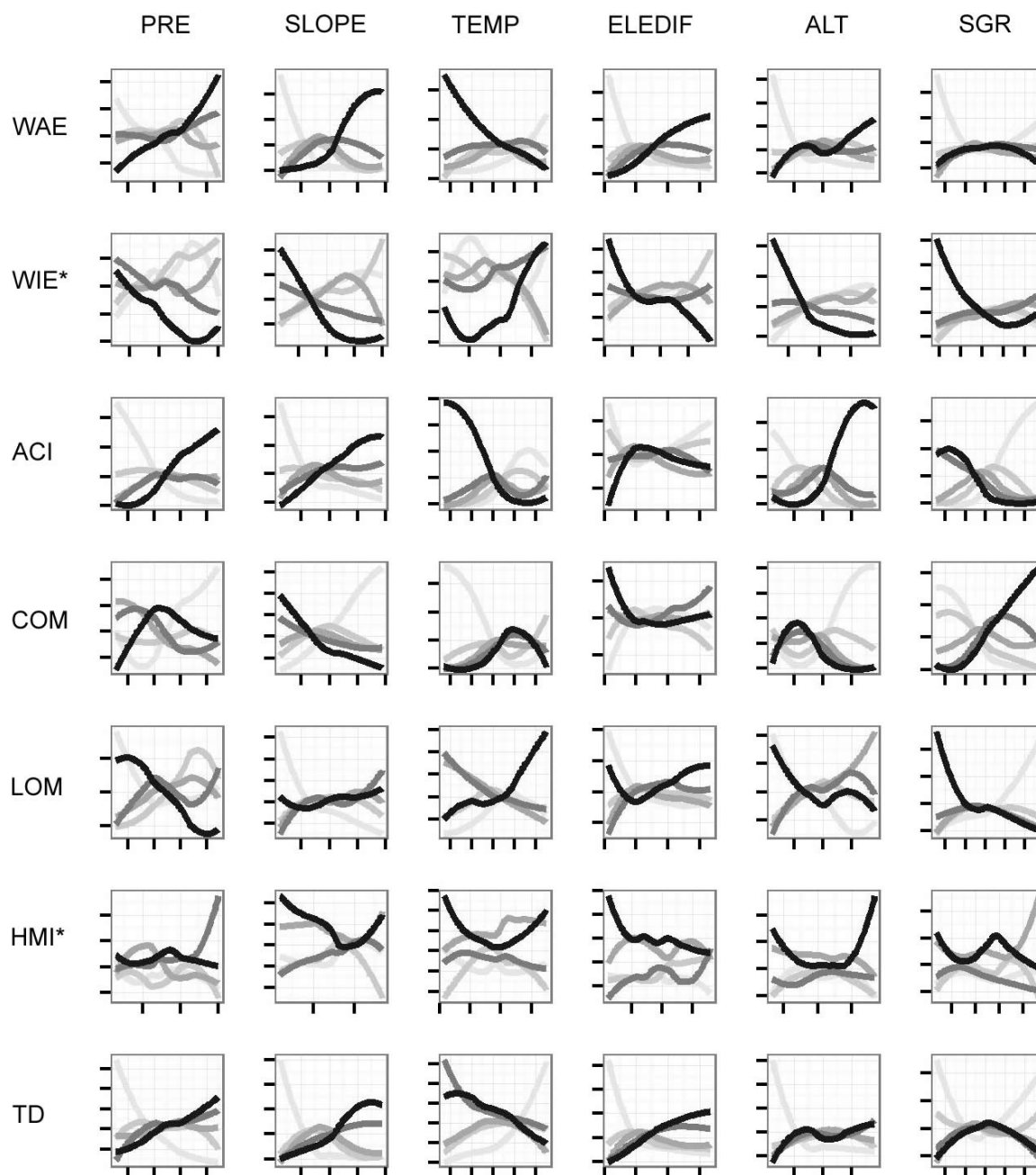
Z výsledků závislostí vidíme, že modely rozšíření erozního ohrožení podle metody expertního odhadu a podle metody multivariační analýzy vzájemně korelují. Testovány byly rovněž jednotlivé skupiny váhových ohodnocení, kde nejlépe s celkovým modelem variační analýzy koresponduje model 1 (M1) – původní analýza podle expertního odhadu. Nejhůře pak model 3 (M3) bez zohlednění váhového rozlišení.

4.4 Výsledky hledání prahových hodnot fyzicko-geografických proměnných

Jednotlivé degradační faktory, stejně jako celková degradace byly rozděleny do pěti tříd kvintilů podle ohroženosti. Každý katastr tedy získal množinu znaků vyjadřujících jeho příslušnost do skupiny ohrožení. V první fázi (po provedení všeobecné korelační statistiky, jejíž výsledky shrnuje

Tab. 6) se analyzovaly jednotlivé vazby skupin kvintilů jednotlivých degradačních faktorů na fyzicko-geografické proměnné. Extrémní hodnoty byly pro další datovou analýzu vyňaty. Výsledná box plot analýza jednotlivých vazeb je uvedena v příloze 9.1.

Nejzásadnější výsledky datové analýzy shrnuje souhrnný obrázek Obr. 26. Jde o vyjádření vývoje procentuálního zastoupení tříd ohrožení (kvintilů) pro vybraný degradační faktor v závislosti na měnící se hodnotě fyzicko-geografické proměnné. Celkem zachycuje $6 \times 7 = 42$ vztahů. Na ose y vyjadřuje procentuální zastoupení jednotlivých tříd ohrožení (kvintilů) pro danou hodnotu x. Osa x přináší vybrané fyzicko-geografické proměnné od jejího minima po maximum. Podrobnější grafy jednotlivých vazeb degradačních faktorů a fyzicko-geografických proměnných jsou uvedeny v příloze 9.2.



Obr. 26 Grafický vývoj závislosti tříd ohroženosti degradačních faktorů na fyzicko-geografických proměnných

Tab. 13 je tabulkovým vyjádřením závislostí naznačených na Obr. 26, jsou v nich shrnuty prahové hodnoty a z nich odvozené intervaly, kde určitá skupina degradačního ohrožení (kvintilů) dominuje. Výsledné hodnoty třetího kvintilu (průměrné ohrožení) nejsou natolik zajímavé jako kvintily menší (menší ohrožení) resp. větší (vysoké ohrožení), a proto dále v tabulce nejsou uváděny.

Pro větší názornost jsou definovány nové skupiny ohrožení, a to celkem čtyři:

- Žádné až minimální ohrožení je reprezentované prvním kvintilem.
- Žádné až nízké ohrožení pak kvintily 1 a 2.
- Vysoké ohrožení kvintily 4 a 5.
- Maximální ohrožení kvintilem 5.

Pro potřebu určení prahových hodnot je potřeba upřesnit pojem dominance – ohrožení je dominantní, pokud pro určitou hodnotu fyzicko-geografické proměnné vykazuje více než 50%, tedy převládající zastoupení. Např. pokud pro vodní erozi platí, že počet katastrů v kategorii nejnižšího ohrožení při svažitostech menší než 2° zabírá více než polovinu z celkového zastoupení, je tato kategorie prohlášena za dominantní (Pozn. Toto přestává platit pro svažitost větší než 2°, proto jsou 2° hledanou prahovou hodnotou).

Tab. 13 Prahové hodnoty fyzicko-geografických proměnných.

WATER EROSION				
DF	Q1	Q1+Q2	Q4+Q5	Q5
Average annual precipitation (mm)	-	<= 479.37	>= 740.91	-
Slope steepness (°)	<= 1.99	<= 3.4	<6.21,11.68>	<7.89,11.68>
Average annual temperature (°C)	-	>= 8.76	<= 6.98	<= 5.5
Elevation differences (%)	<= 2.28	<= 4.34	>= 7.44	>= 14.66
Altitude (masl)	<= 200.38	<= 256.16	>= 693.15	-
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	<= 7.93	<= 13.64 v <47.21,57.21>	-	-
WIND EROSION				
Average annual precipitation (mm)	-	>= 626.81	<= 471.39	-
Slope steepness (Degree)	-	>= 4.16	<= 2	-
Average annual temperature (°C)	-	<6.18,7.33>	>= 8.75	-
Elevation differences (%)	-	>= 16.37	<= 2.82	-
Altitude (masl)	-	>= 291.33	<= 215.37	<= 157.28
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	-	-	<= 22.87 v <55.01,56.86>	<= 15.46

ACIDIFICATION				
Average annual precepitation (mm)	<= 519.6	<= 590.02	>= 685.59	>= 831.45
Slope steepness (Degree)	<= 1.43	<= 2.98	<5.93,11.68>	-
Average annual temperature (°C)	<8.45,8.82>	>= 7.53	<= 6.98	<= 6.42
Elevation differences (%)	-	<= 1.66 v >= 14.25	-	-
Altitude (masl)	<= 218.97	<= 367.73	>= 488.6	>= 572.28
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	<37.93,57.21>	<29.36,57.21>	<= 22.21	-
SOIL COMPACTION				
Average annual precepitation (mm)	-	>= 705.71	<549.78,625.23>	-
Slope steepness (Degree)	<10.98,11.68>	<6.49,11.68>	<= 2.84	-
Average annual temperature (°C)	<= 6.3	<= 6.79 v >= 9.25	<7.41,8.76>	-
Elevation differences (%)	-	-	<= 1.25	-
Altitude (masl)	>= 600.17	<= 144.59 v >= 507.2	<209.68,414.22>	-
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	<= 5.79	<= 21.5	<28.64,57.21>	<47.21,57.21>
LOSS OF ORGANIC MATTER				
Average annual precepitation (mm)	-	<750.97,806.3>	-	-
Slope steepness (Degree)	<= 0.73	<= 1.99	<10.28,11.68>	-
Average annual temperature (°C)	-	-	>= 8.45	-
Elevation differences (%)	-	<= 1.66	-	-
Altitude (masl)	-	<= 126	-	-
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	<46.5,57.21>	<37.93,57.21>	<= 14.36	<= 8.64
HEAVY METAL INTOXICATION				
Average annual precepitation (mm)	-	-	>= 685.44	-
Slope steepness (Degree)	-	-	>= 12.6	-

Average annual temperature (°C)	-	-	<= 5.62 v >= 8.42	-
Elevation differences (%)	-	-	<= 1.64 v >= 18.19	-
Altitude (masl)	-	-	<= 197.67 v >= 791.46	>= 849.86
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	-	-	<= 2.93 v <32.23,34.42>	-
TOTAL SOIL DEGRADATION				
Average annual precepitation (mm)	<= 459.25	<= 544.75	>= 735.88	-
Slope steepness (Degree)	<= 2.13	<= 3.4	<6.49,11.68>	<8.73,11.68>
Average annual temperature (°C)	>= 9.5	>= 8.7	<= 7.22	-
Elevation differences (%)	<= 2.07	<= 4.14	>= 7.64	-
Altitude (masl)	<= 218.97	<= 256.16	<358.44,414.22> v >= 702.44	-
Soil texture (% of particles <0.01 mm)	<= 5.07 v <52.92,57.21>	<= 12.93 v <42.21,57.21>	-	-

Tab. 14 Grafické vyjádření možnosti klasifikace tříd závažnosti (O - Q1 ○ Q1aQ2 ● Q4aQ5 ● Q5) rozsahem hodnot FGV.

	PRE	SLOPE	TEMP	ELEDIF	ALT	SGR
WAE	○●	○●●●	○●●●	○●●●	○●●	○●
WIE	○●	○●	○●	○●	○●●●	●●
ACI	○●●●	○●●	○●●●	○	○●●●	○●●
COM	○●	○●●	○●●	●	○●●	○●●●
LOM	○	○●●	●	○	○	○●●●
HMI	●	●	●	●	●●	●
TD	○●●	○●●●	○●●	○●●	○●●	○●

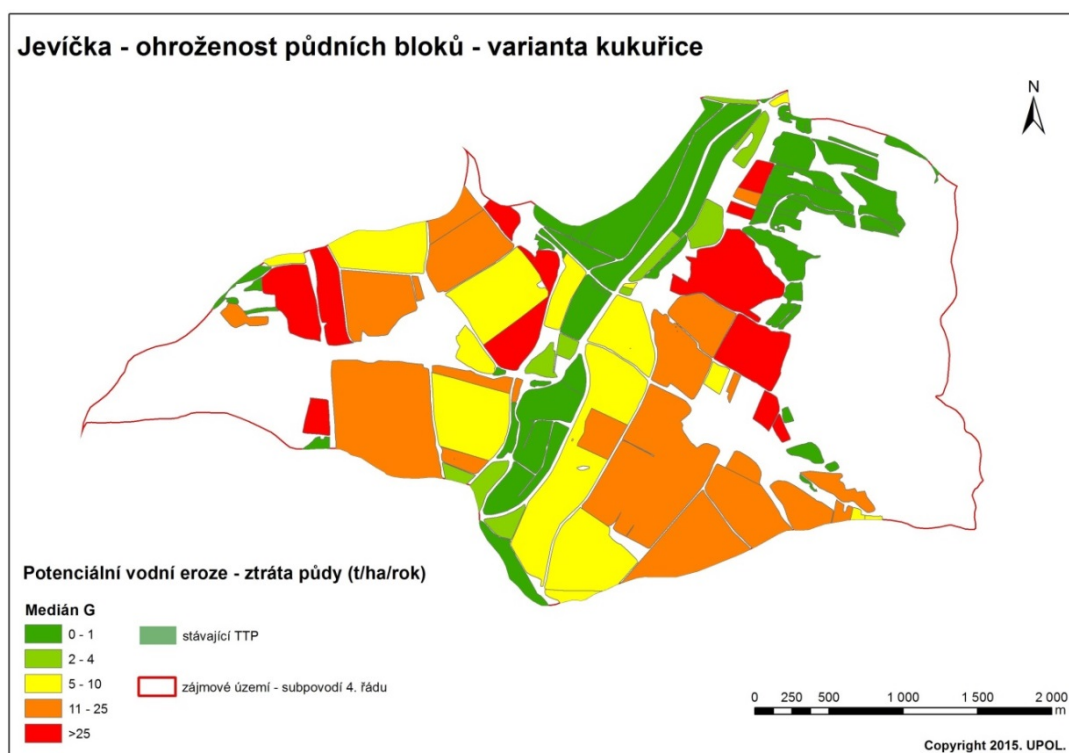
Tab. 14 vznikla přepisem Tab. 13 s vyznačením tříd závažnosti, které lze identifikovat nějakým rozsahem hodnot FGV. Třídy závažnosti jsou naznačeny piktogramy od prázdného kolečka pro kvintil ohrožení Q1, přes spojení kvintilů Q1 a Q2, Q4 a Q5 až k největšímu ohrožení Q5 reprezentovaného plným kolečkem. Takto zapsaná informace nám ukazuje, které FGV jsou pro klasifikaci DF nejvhodnější (ideálně pokrývají všechny kategorie závažnosti). V tabulce jsou naznačeny šedým pozadím.

4.5 Výsledky návrhů automatických liniových protierozních opatření

Metoda automatického návrhu liniových opatření byla testována na povodí Jevíčky, Hané a Kyjovky, které byly součástí řešení projektu Norských fondů o zavádění infiltračních a retenčních opatření na povodí řeky Moravy. Zde uvádím pouze výsledky z povodí Jevíčky, kde byl nejdříve na základě terénního průzkumu stanoven expertní návrh liniových a plošných opatření, ten se dále porovnával s automatickým návrhem liniových opatření.

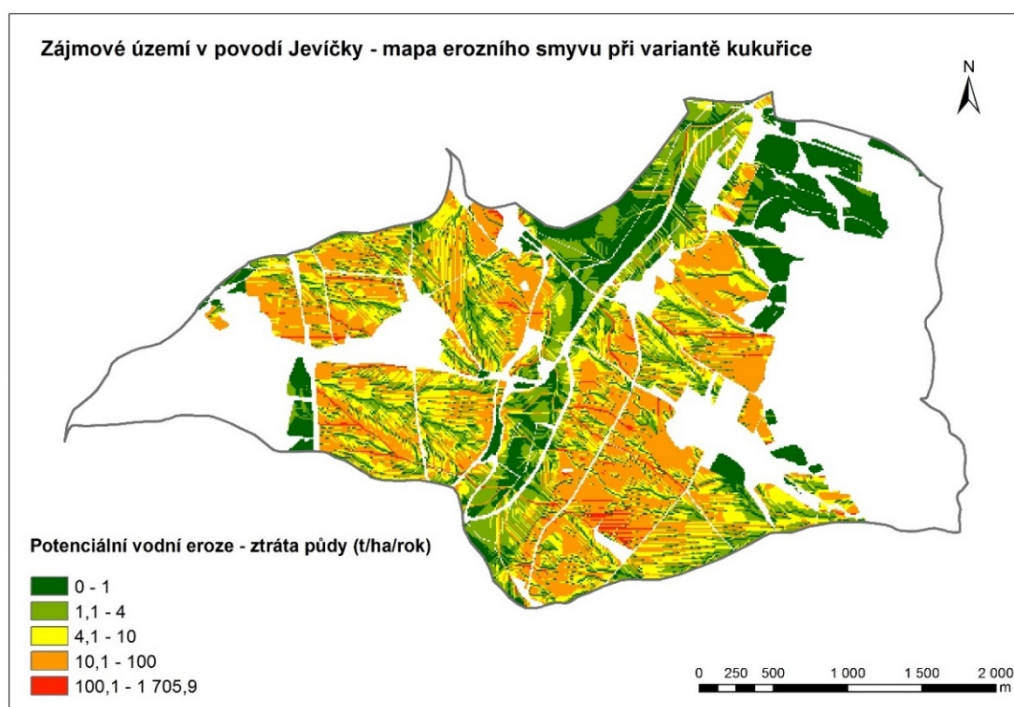
Povodí Jevíčky bylo vybráno na základě podobné analýzy jako u modelu degradace půd. Bylo jednou z prioritních společných oblastí pro řešení infiltrace a retence z hlediska vodohospodářského, zemědělského a z hlediska lesních opatření (odkaz na Zprávu). V práci se zaměřím jen na popis liniových opatření.

Aktuální erozní ohrožení vypočtené na základě rovnice USLE zachycuje Obr. 27. Prvotně se vycházelo se z nejhroženější varianty – pěstování širokořádkových plodin, konkrétně kukuřice.

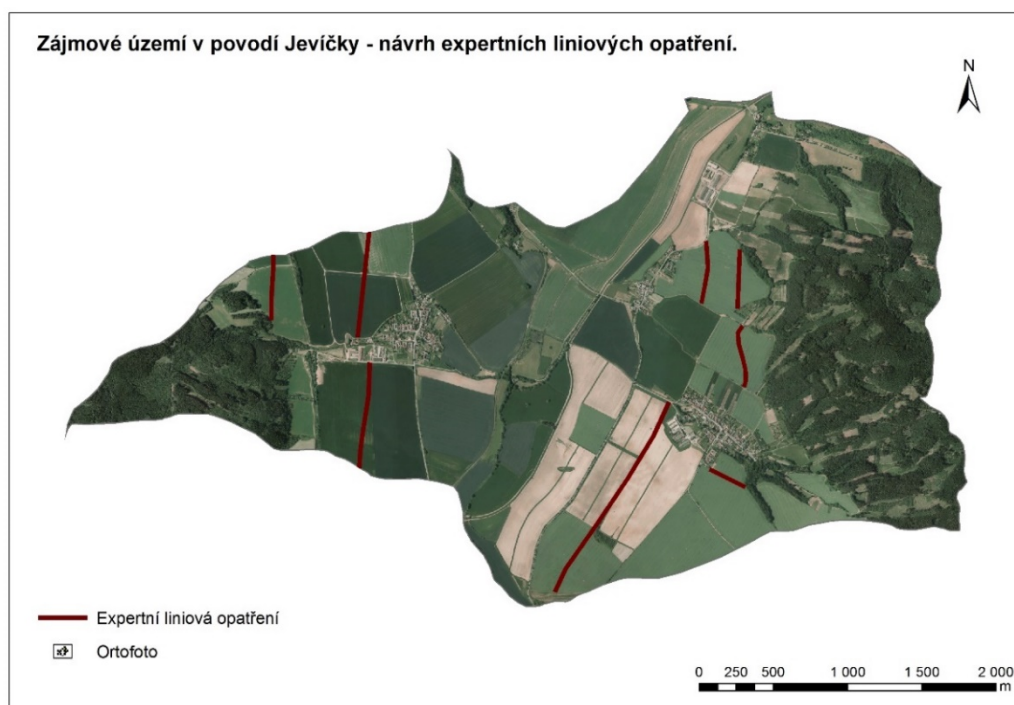


Obr. 27 Ohroženost půdních bloků v povodí Jevíčky

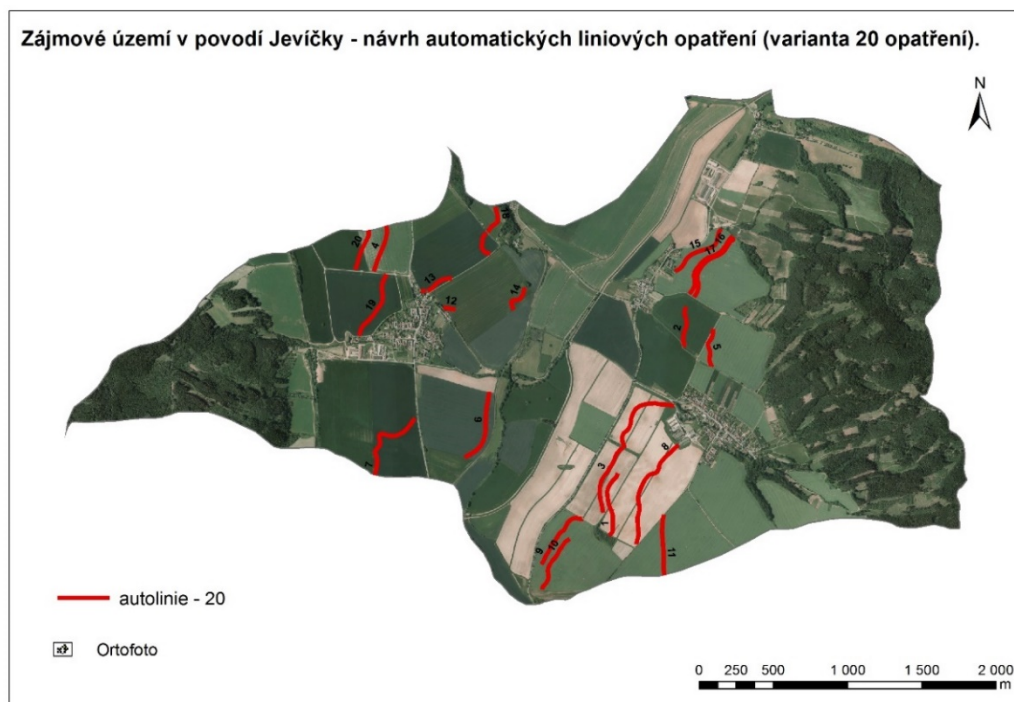
Návrhy expertních opatření na povodí Jevíčky ukazuje Obr. 29, automatická opatření pak Obr. 30.



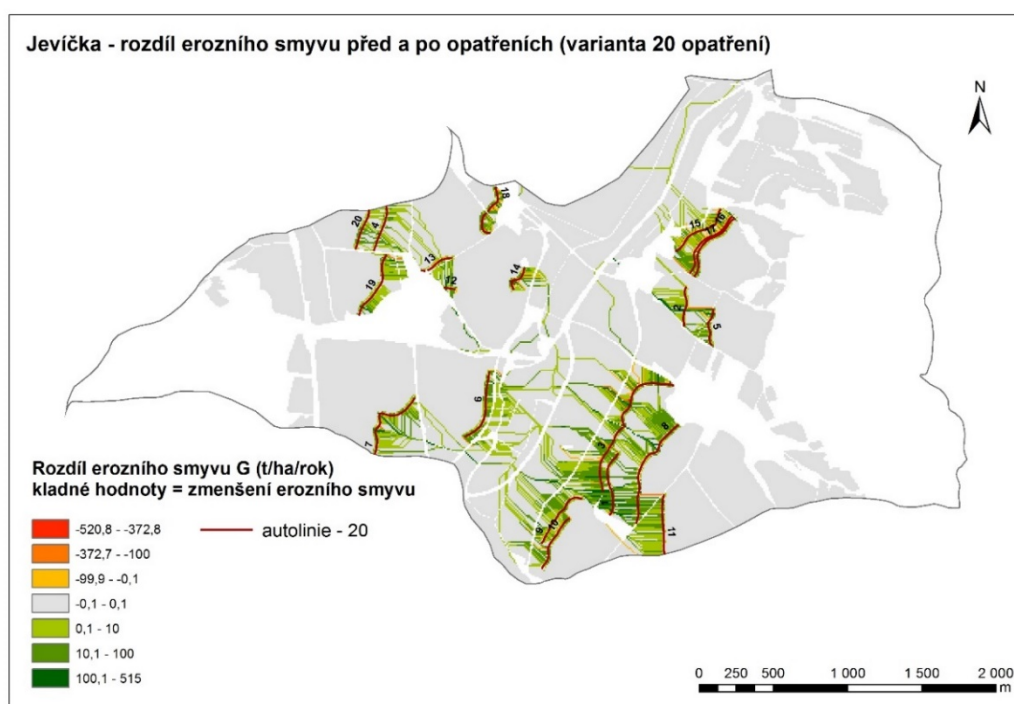
Obr. 28 Erozní smyv zájmového území v povodí Jevíčky



Obr. 29 Návrh expertních liniových opatření



Obr. 30 Návrh automatických liniových opatření ve variantě 20 opatření

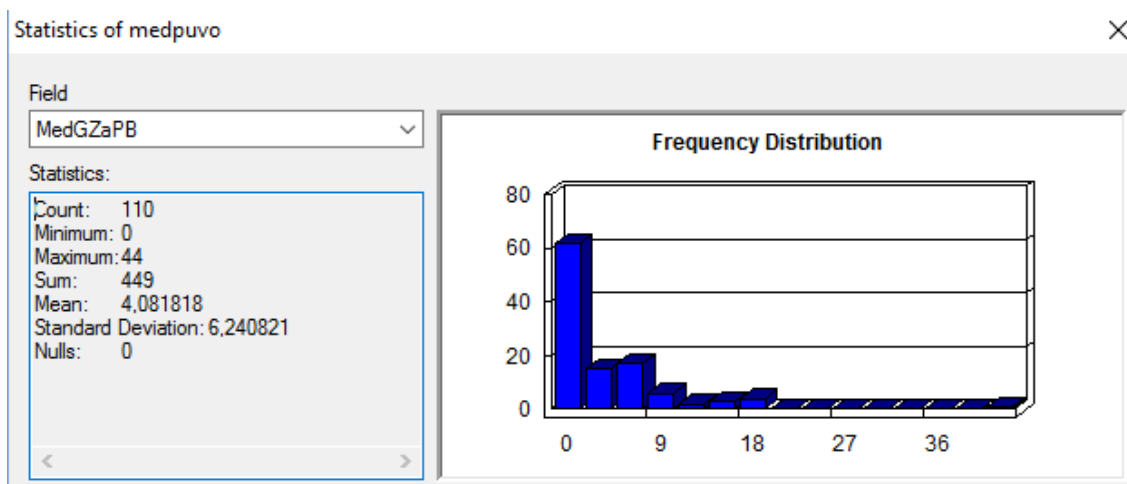


Obr. 31 Rozdíl erozního smyvu pro případ 20 opatření

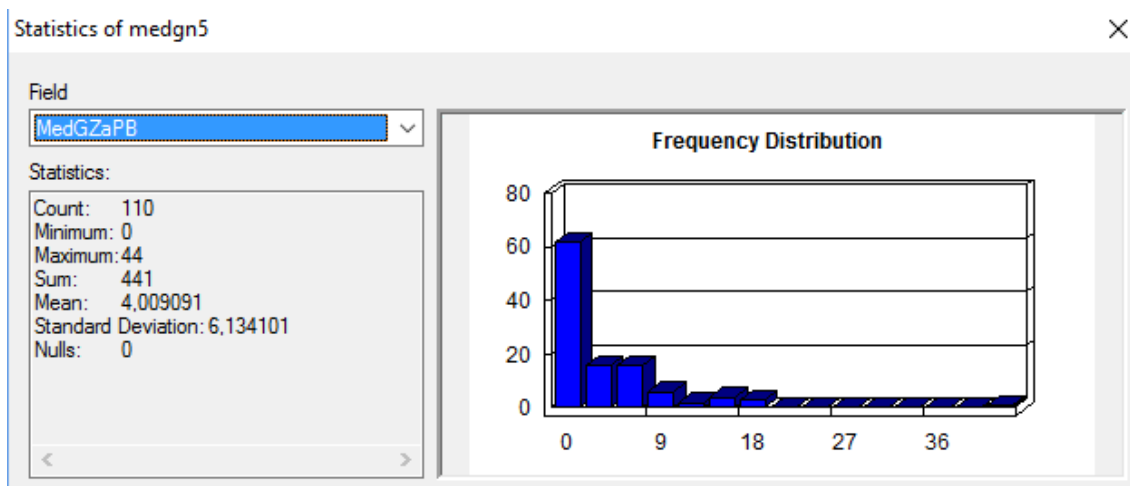
Na Obr. 31 je graficky naznačen rozdíl erozního smyvu variant před a po opatření (20 návrhových linií). Kladná čísla značí snížení erozního smyvu.

Obr. 32 - 36 shrnují změnu erozního smyvu, tedy přínos opatření ke snížení eroze při různém počtu zadaných liniových opatření. Zahrnut je rovněž expertní návrh, který vychází obdobně jako návrh 10 z liniových opatření. Nedá se tedy říci, že by byl automaticky generovaný návrh výrazně lepší než návrh experta, každopádně však může být zajímavým podkladem pro projektanta pozemkových úprav a protierozních opatření v terénu nebo jako podkladový materiál pro organizace státní správy. Kromě průměru mediánů erozního smyvu za půdní bloky jsou uvedeny i histogramy rozdělení erozních smyvů za bloky. Statistika potvrzuje skutečnost, že metoda při návrhu opatření „postupuje“ v histogramu zprava doleva, tedy nejdříve cílí na nejohroženější půdní bloky. S narůstajícím počtem opatření se křivky histogramu vyrovnávají, snižují dolů a doleva. Zatímco bloky s minimálním ohrožením nejsou při prvních variantách (5, 10 opatření) téměř ovlivněny, při variantě 20 opatření dochází ke snížení erozního smyvu i zde.

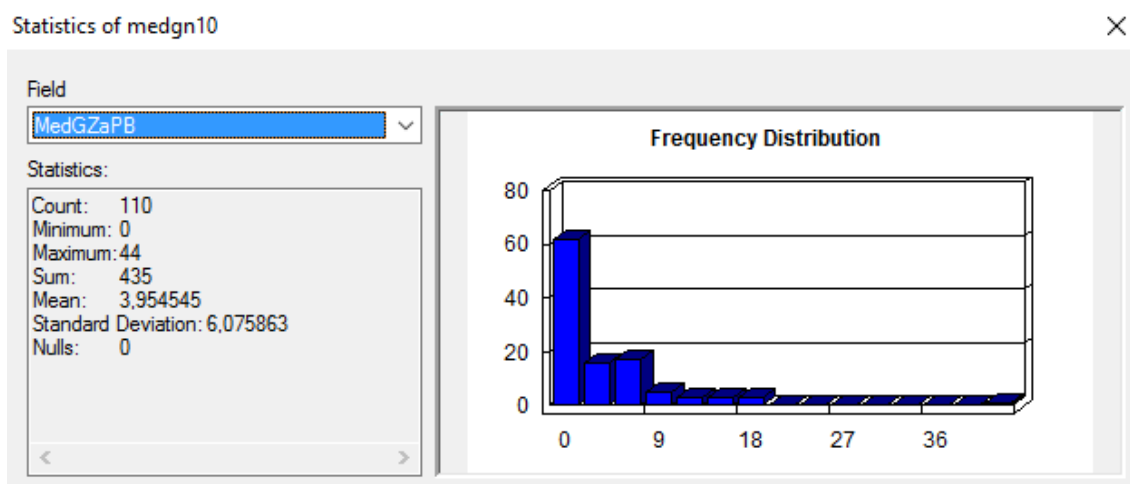
Na grafu závislosti průměru mediánů erozního smyvu (Obr. 37) dokonce vychází pro počet realizovaných opatření a průměrný medián téměř dokonalá lineární závislost (koeficient spolehlivosti $R=0,984$).



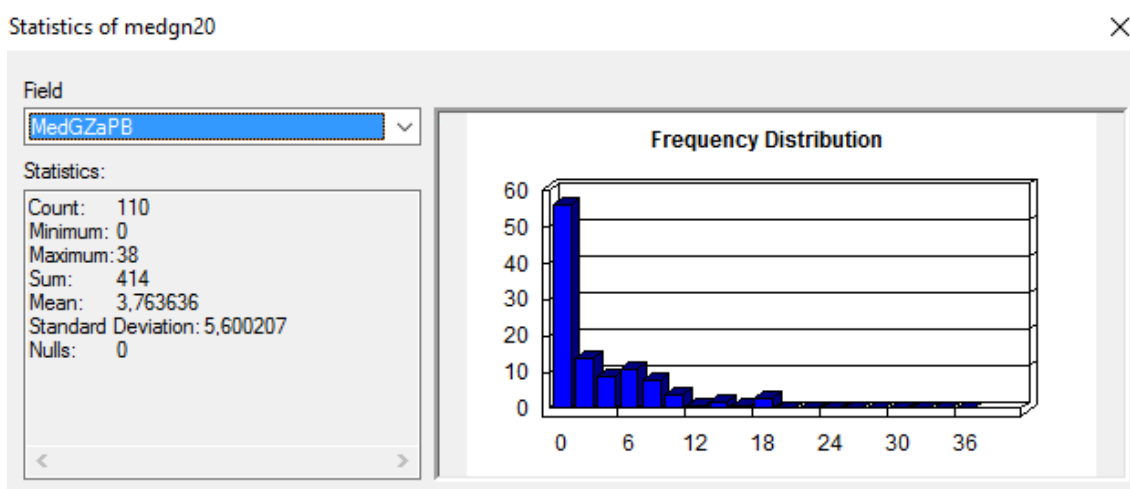
Obr. 32 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta bez opatření



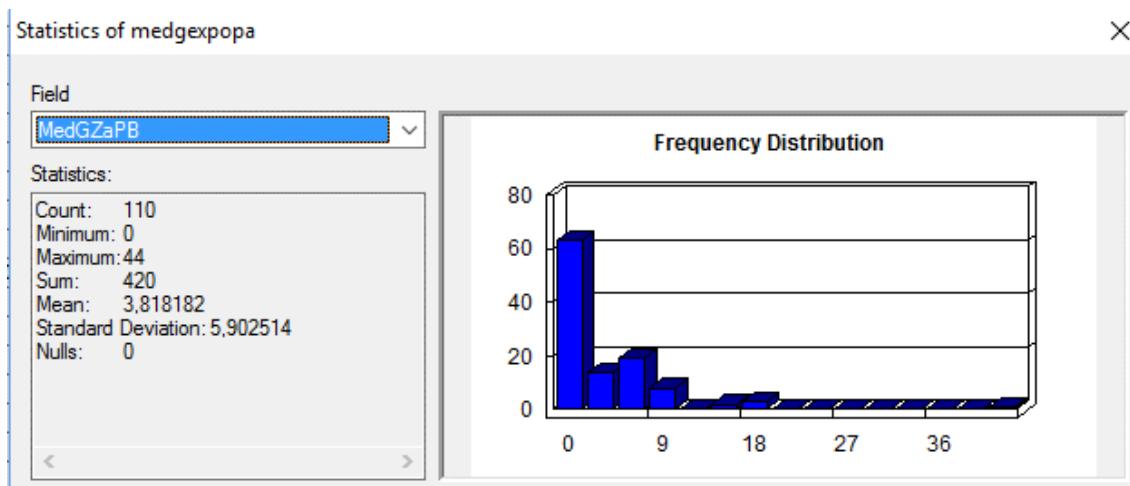
Obr. 33 Histogram mediánu eroziho smyvu za půdní blok - varianta 5 opatření (celková délka opatření 2391m)



Obr. 34 Histogram mediánu eroziho smyvu za půdní blok - varianta 10 opatření (celková délka opatření 4422m)

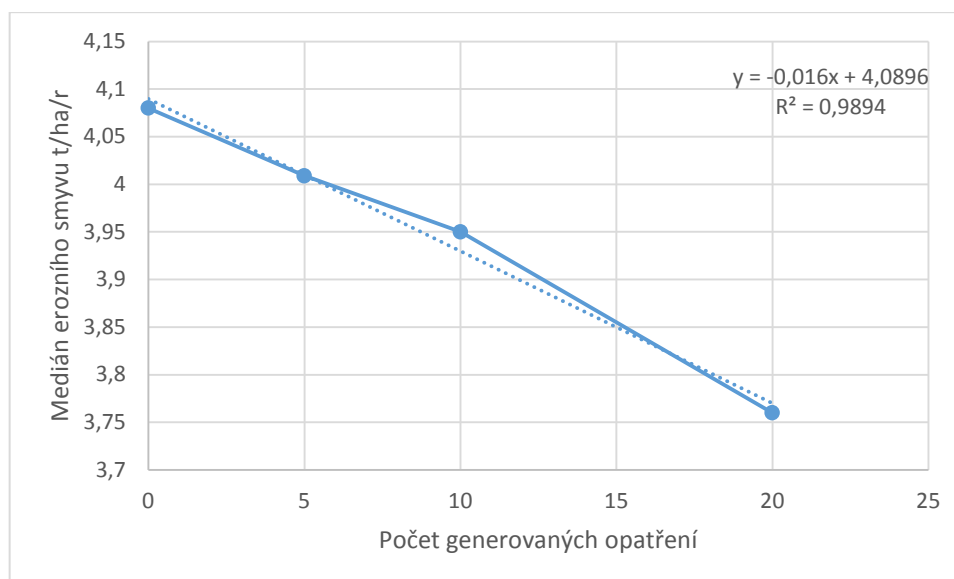


Obr. 35 Histogram mediánu eroziho smyvu za půdní blok - varianta 20 opatření (celková délka opatření 8642m)



Obr. 36 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta expertního návrhu (celková délka opatření 4905m)

Opatření stanovená expertem (Obr. 36) spadají někde do kategorie mezi 10 a 20 opatřeními, a to jak hodnotou průměrného mediánu erozního smyvu, tak délkou navrhovaných opatření.



Obr. 37 Závislost průměru mediánu smyvu na počtu generovaných opatření

5 Diskuse

5.1 Degradanční model zemědělských půd pro ČR

Nejvýznamnějším degradačním faktorem v ČR je podle výsledků modelu založeném na PCA analýze vodní eroze (váha WAE = 33 %). To koresponduje se zjištěními z vědeckých výzkumů v rámci evropského prostoru, kde je vodní eroze nejrozšířenější formou degradace (Gobin et al. 2004). Z výsledků rovněž vychází, že vodní eroze v ČR je rovněž nejvíce převládajícím faktorem degradace půd v ČR (51 % území), následuje ztráta organické hmoty (24,9 %) a acidifikace (13 %). Acidifikace je vážným problémem zejména v podhorských oblastech, v rámci ČR má přibližně 25 % zemědělských půd $\text{pH} < 5.5$. Jedním z důvodů je kromě jiných snížené vápnění v posledních dvaceti letech (Klement a Sušil 2009). Opatření proti acidifikaci mohou být oproti jiným degradačním faktorům jednodušší. Proto také byly výsledky zpracovávány variantně – s acidifikací a bez ní. Nejméně významným degradačním faktorem v rámci ČR se ukazuje kontaminace těžkými kovy a větrná eroze, které převládají pouze v méně než 2 % sledovaných území.

Zjištěné výsledky ohledně vodní eroze odpovídají studiím koordinovaným Ministerstvem zemědělství ČR (2012), navíc ale indikují skutečnost, že pokud je území ohroženo tímto faktorem (odhadem 51,57 % zemědělské půdy je ohroženo vodní erozí), je také převládajícím a tím nejvýznamnějším degradačním faktorem v daném území (51,28 %). Totéž platí i pro kontaminaci půd (0,8 % zemědělské půdy je ohroženo a převládá rovněž v 0,8 %).

Celkově je zemědělská půda ČR ohrožena zejména fyzikální degradací, medián zranitelnosti dosahuje 65 %, první kvartil 54 %, třetí kvartil 74 %, maximum pak dosahuje 97 % (Obr. 25).

Chemická degradace tak závažným problémem není (medián dosahuje 20 %, první kvartil 17 %, třetí kvartil 23 % s maximem 57 %). Celková degradace kombinující degradaci fyzikální a chemickou má medián ohroženosti 45 %, první kvartil 39 %, třetí kvartil 51 % a maximum 73 %.

V rámci ČR je zhruba 50 % zemědělských půd ohroženo středním stupněm degradace.

Z výsledků degradačních modelů zpracovaných prostřednictvím metod expertního odhadu i multivariačního vyhodnocení vycházejí jako nejproblematictější oblasti vysoce zemědělsky produkční, které nejsou zahrnuty ve zranitelných oblastech

podle vodního zákona (Mze 2001). Nejčastěji jsou tyto oblasti postihovány vodní erozí, ztrátou organické hmoty, zhutněním, ale v některých místech i desertifikací.

5.2 Analýza degradačního vzoru

Poznání závislostí typů degradace půdy na jednotlivých faktorech, což je předmětem části „hledání prahových hodnot“, je důležité z pohledu jejich popisu i návrhů opatření. V práci jsem se zaměřil na přírodní faktory, zejména fyzicko-geografické, jejichž vliv na výslednou degradaci může být ovlivňován v negativním i pozitivním smyslu managementovými opatřeními.

Z provedené analýzy vyplývá, že **celková degradace** zemědělských půd je v podmínkách CZ nejlépe klasifikovatelná prostřednictvím svažitosti a je problematická zejména v oblastech s vyšší nadmořskou výškou. Tam je celkově i vyšší úhrn srážek a nižší průměrné roční teploty. Celkovou degradaci přímo úměrně ovlivňuje také variabilita terénu. Výsledky celkové degradace jsou podobné jako u faktoru vodní eroze, což není překvapivé, neboť vodní eroze je nejen v ČR, ale i celosvětově nejzávažnějším degradačním činitelem. Zjištěné výsledky odpovídají závěrům literatury, kde jsou jako klíčové parametry degradace zemědělských půd zmiňovány zejména nadmořská výška, členitost území, svažitost, úhrn srážek a textura půdy (Gay et al. 2007). Textura půdy se z našich výsledků příliš pro klasifikaci degradací neohroženějších oblastí nehodí, umožňuje však klasifikaci oblastí degradací neohrožených nebo málo ohrožených.

Vodní eroze je v literatuře týkající se degradace půdy nejčastějším tématem. V našich výsledcích vykazuje podobné závislosti jako celková degradace, vliv srážek je zde však menší a naopak je zdůrazněna role variability terénu, kterou lze společně se svažitostí nejlépe klasifikovat vodní erozi. Výsledky vazby na svažitost jsou zřejmé, odpovídají závěrům literatury, kde vodní eroze narůstá úměrně svažitosti (Cogo et al. 2003). Vodní eroze je dále jednoznačně ovlivňována intenzitou srážek, kdy tyto jsou základním vstupem mnoha modelů vodní eroze (USLE, USPED, WEPP, EUROSEM) (Valette et al. 2006). Roli srážek potvrzují i naše analýzy. Kromě vlivu svažitosti se v literatuře objevují i studie vlivu délky svahu na vodní erozi, kde však výsledky už nejsou tak jednoznačné. Některé práce potvrzují přímou úměru mezi délkou svahu a velikostí erozního smyvu (Lal 1997), jiné jsou v jednoznačném stanovisku trochu opatrnější (Xu et al. 2009). Vliv variability terénu v duchu našeho zpracování, není v literatuře zmiňován.

Zpracování **větrné eroze** bylo ovlivněno faktem, že většina katastrů CZ není větrnou erozí výrazně ohrožena. Do zpracování byl tedy zařazen jen menší vzorek

katastrů, kde se určitá intenzita degradace objevuje. V evropských podmínkách je větrná eroze ovlivněna více proměnnými, aby se projevila, vyžaduje dostatečnou sílu větru, náchylný půdní povrch a minimální ochranu vegetací nebo i sněhem. Z hlediska složení půdy je závislá zejména na textuře a půdní vlhkosti (Borrelli et al. 2015). V naší studii vychází jako nejvhodnější parametr pro klasifikaci nadmořská výška (v nepřímé úměře na WIE) a dále také textura půdy opět s nepřímou úměrností k WIE. Na územích s vyšším ročním úhrnem srážek se tento typ degradace téměř nevyskytuje. To je v souladu s pozorováními Borelliho et. al. (2015, 2014).

Další typ fyzikální degradace, a to **kompakce půdy**, může být přirozená, na níž se podílejí mj. půdní a klimatické vlivy (vysychání, mráz) (Fabiola et al. 2003) nebo umělá antropogenní (pojezdová mechanizace) (Xia 2011). Významnější je ta druhá, která je v zásadě závislá na rozdílném tlaku pojezdového stroje v závislosti na textuře půdy. Z hlediska složení půdy má na kompakci vliv zejména obsah organických látek, vlhkost a textura půdy (Nawaz et al. 2013). Textura půdy nám vychází jako nejlepší parametr pro popis kompakce půdy, z hlediska degradace vycházejí jako problematické půdy s vyšším zastoupením menších zrnitostních frakcí (vyšší podíl jílu). Vyšší utužení půdy se objevuje také v oblastech s nižším úhrnem srážek, menší svažitostí, nižší průměrnou roční teplotou a spíše menší variabilitou terénu. To odpovídá vyšší kompakci v nížinných oblastech na zrnitostně jemnějších substrátech. V těchto územích je zároveň nižší úhrn srážek ve srovnání s vyššími nadmořskými výškami, kde dominují více skeletnaté půdy. V postižených nižších územích pak může být navíc negativně ovlivněno utužení půd ve vlhkých obdobích roku, kdy je půda náchylnější na utužení.

Z chemického ovlivnění půd byly sledovány parametry acidifikace, ztráty organické hmoty a intoxikace těžkými kovy. **Acidifikace** je podle našich výsledků nejlépe klasifikovatelná prostřednictvím srážek, nadmořské výšky a průměrné teploty. Zemědělské půdy ohrožené acidifikací se vyskytují v územích s vyššími srážkami, svažitostí a nadmořskou výškou, kde je také nižší průměrná roční teplota. Toto odpovídá závěrům Helyara a Portera (1989), kteří zmiňují zvyšující se acidifikaci se vzrůstajícím množstvím srážek, a Manandbhara a Odeha (2014), kteří uvádějí podobnou závislost i u nadmořské výšky. Tomu odpovídají i závěry (SommarugaWograth et al. 1997).

Pro půdy ještě závažnější typ degradace může být **ztráta organické hmoty**. Z našich výsledků vychází, že ztráta organické hmoty je nejlépe klasifikovatelná prostřednictvím textury půdy, méně ohrožené půdy také prostřednictvím svažitosti. Nejohroženější v tomto ohledu vychází písčité půdy, u jílovitých půd se degradace výrazně neprojevuje. Území ovlivněná ztrátou organické hmoty jsou v oblastech s

menšími srážkami, vyšší teplotou, nižší nadmořskou výškou a hlavně nízkým zastoupením jemné frakce. Teplotní závislost potvrzují i studie Kirschbauma (1995), který ale také zmiňuje, že teplotní závislost je složitější. Je výraznější zejména při nižších teplotách, při vyšších teplotách není efekt tak zřejmý (Kirschbaum 1995). Jemnozrnné půdy obsahují více organické hmoty než půdy písčité, lépe poutají živiny a zadržují vodu, poskytují lepší podmínky rostlinám (Power a Prasad 1997). Prostorové rozšíření ostrůvků organické hmoty je vázáno zejména na topografickou variabilitu, která se vyvíjela stovky a tisíce let (Burke et al. 1999). Naše studie vliv variability terénu v měřítku jednotlivých katastrů neprokázala. Pro podrobnější analýzy a potvrzení literárních údajů o vlivu eroze na úbytek organické hmoty by bylo nutné terénní šetření v detailu jednotlivých bloků orné půdy (Montgomery 2007; Kirkels et al. 2014).

Intoxikace **těžkými kovy** se projevuje zejména v územích s vyššími srážkami, ale menší variabilitou terénu, v nízkých i vyšších nadmořských výškách. Nejlepším klasifikátorem podle naší analýzy je nadmořská výška, umožňuje však jednoznačně klasifikovat jen ohrožené oblasti. Většina faktorů dokáže určit průměrně ohrožené oblasti, zajímavé však je, že žádný z FGV, nadmořskou výšku nevyjímá, nedokáže klasifikovat oblasti málo nebo vůbec ohrožené. To je v souladu s publikovanými výzkumy (Facchinelli et al. 2001; Dragovič et al. 2014) pravděpodobně dáno tím, že prostorová distribuce je ovlivněna geochemicky nebo/a antropogenními aktivitami (těžba, průmysl), kde je dobrým prediktorem koncentrace těžkých kovů v půdě zejména vzdálenost od místa zdroje znečištění. To v našem výzkumu může představovat spíše území ve vyšších nadmořských výškách, v nichž probíhala těžba různých nerostných surovin. Dalším případem kontaminace půd je zatížení fluvizemí v nivách řek, a to zejména v důsledku záplav (Vácha et al. 2003), což je v našem výzkumu případ nižších nadmořských výšek.

5.3 Návrhy automatických liniových opatření

Výzkum mnoha modelových lokalit ukazuje, že opatření Standardů dobré zemědělské praxe (GAEC) jsou schopna snížit erozi pod hranici povoleného smyvu pouze v územích středně erozně ohrožených (Šarapatka et al. 2013). To však není dostačující v územích silně erozně ohrožených, které zahrnují intenzivně zemědělsky využívané plochy. Komplexní návrhy protierozní ochrany signifikantně omezují erozi až na akceptovatelné hodnoty – limity, a to jak na středně, tak na silně erozně ohrožených pozemcích. Racionální využití krajiny a integrace liniových opatření v protierozní

ochraně vede k redukci eroze na úroveň povolených limit. Tato liniová opatření jsou doporučována řadou autorů, např. Morgan (2005), Janeček et al. (2012) nebo Fiener (2003).

V práci představuji metodu automatického rekurzivního generování protierozních opatření, která má ambice stát se pomocníkem při terénním průzkumu a návrhu liniových opatření. Umožňuje na základě vstupního požadavku generovat podle významnosti příslušný počet automatických opatření. Vlastní realizace je řešena algoritmem napsaný v jazyce Python s nasazením v podobě nástroje ArcToolBoxu. Vlastní skript je uveden v příloze 9.4.

V rámci GIS software existuje řada podpůrných nástrojů pro pomoc při řešení eroze. Na ČVUT byl např. v roce 2014 v rámci projektu Atlas Eroze vytvořen softwarový nástroj Atlas Eroze, který umožňuje automaticky bez podrobných znalostí GIS vypočítat erozní smyv, průběžně editovat liniová a plošná protierozní opatření se zpětným vyhodnocením erozního smyvu. Porovnáváním výsledků pak může dopomoci k nalezení nejefektivnější protierozní ochrany pro stanovené území (Krása 2014). Moje metoda nemá za cíl dublovat již hotovou práci, ale představit algoritmus, který by navrhoval opatření autonomně, bez zásahu člověka.

Metoda aktuálně pracuje se stanoveným konečným počtem hledaných opatření, ale s drobnými úpravami je schopna řešit i zadání v podobě generování takového počtu linií, které odpovídá částce, jež mám k dispozici. Případně takového počtu, který sníží erozi na stanovenou úroveň.

Automatická liniová opatření v porovnání s expertními návrhy vychází z hlediska délky opatření i průměrného snížení erozního smyvu podobně, i proto se mohou stát cenným nástrojem plánování protierozní ochrany.

Automatizovaná řešení návrhu krajinných opatření se ve světové literatuře objevují zřídka. Často se objevují algoritmy založené na metodách umělé inteligence, a to zejména tzv. genetické algoritmy, které umožňují nacházet z určitého pohledu nejlepší krajinnou nebo např. městskou strukturu (Brookes 2001; Balling et al. 1999). Častěji než automatické návrhy se objevují nástroje hodnocení krajinné struktury, které však někdy svým výsledkem nepřímo ukazují na žádaná místa doplnění sítě krajinné struktury pro celkové zlepšení situace (Pelletier et al. 2014).

6 Shrnutí a závĚr

V předkládané práci jsem se pokusil o analýzu degradace zemědělských půd, která je hrozbou pro zemědělství nejen v ČR, ale i na celém světě. V první části jsem navrhl dvě metody zpracování degradačního modelu zemědělských půd v ČR, v dalších jsem se snažil o odhalení vazeb degradace na fyzicko-geografické proměnné a navržením algoritmu, který by automatizovaným postupem přispěl k řešení nezávažnějšího degradačního ohrožení u nás - vodní eroze.

Z výsledků degradačních modelů je patrné, že degradace zemědělských půd je závažným problémem současnosti. V rámci ČR jsou navíc vysoce ohrožené nejvíce intenzivně využívané produkční oblasti, které nejsou zahrnuty v kategorii oblastí LFA. Většinou jsou to území ohrožená vodní erozí, suchem, ztrátou organické hmoty nebo kompakcí půdy.

V ČR se sice jednotlivé faktory degradace půdy dlouhodobě sledují v rámci několika výzkumných organizací, donedávna však nebyla v rámci ČR zpracovaná studie, která by kombinovala jednotlivé typy fyzikálního a chemického degradačního ohrožení. ČR byla sice součástí několika projektů (GLASOD, SOUVER, PESERA), které se týkaly degradace půdy, výsledky těchto projektů však nedosahovaly dostatečné přesnosti. To bylo také důvodem pro výzkum, jímž se dizertační práce zabývá.

Cílem první části bylo po vzoru nadnárodních projektů typu GLASOD určit na základě dostupných dat o degradaci půd kombinovanou degradaci, která by umožnila poukázat na nejohroženější místa ovlivněná půdní degradací, která se pak mohou stát prioritním cílem zaměření opatření proti degradaci. Výsledek se podařilo realizovat, přesto však je do jisté míry ovlivněn subjektivním expertním názorem.

Metoda vytvoření degradačního modelu podle expertního odhadu pro aplikaci mimo území ČR vyžaduje informaci o rozšíření jednotlivých degradačních faktorů v rámci sledovaného území, což je jediný limitující faktor jejího použití. Metoda multivariační statistické analýzy vychází ze zranitelnosti půdních jednotek, k jejímu využití je opět nutné mít minimálně tabulkové podklady hlavních půdních jednotek.

Cílem této části bylo vytvoření agregačního indexu, který by vyhodnocoval náchylnost určitého území (katastru) k degradaci zemědělských půd. Výběr zpracovaných degradačních faktorů byl dán dostupností dat sledovanosti těchto faktorů, resp. metodikou vyhodnocení náchylnosti k degradaci půd.

Existuje řada přístupů, jak vyhodnocovat degradaci půdy i krajiny, každý má svoje výhody i nevýhody. Věřím, že pro území národní úrovně jsou popsány metody velice rychlé a přesně identifikují problémová místa a že se dají snadno aplikovat i mimo území ČR (samozřejmým limitem je dostupnost dat). Využil jsem samozřejmě skutečnosti, že degradace půdy je v rámci jednotlivých faktorů v ČR dlouhodobě sledovaná, existují metodiky vyjádření náchylnosti půdy k půdní degradaci na základě základních informací o půdě.

Výsledky analýz ukazují, že nejvíce zasažené oblasti (resp. nejvíce náchylné k degradaci půd) jsou na jižní Moravě a ve středních a východních Čechách. Tyto informace mohou být využity pro další výzkum i jako podklad nejrůznějším plánovacím organizacím navrhuje protierozní a další nápravná opatření.

Další výzkum byl směřován do oblasti dolování dat (data mining) výsledků degradačních modelů. Cílem bylo odhalit souvislosti mezi fyzicko-geografickými podmínkami a faktory degradace, s případným využitím i v jiných podmínkách než v ČR. V průběhu výzkumu byla navržena metoda datové analýzy, která rozšiřuje běžné použití analýzy kvantitativních dat v podobě box-plot diagram a korelační statistiky. Ukazuje konkrétní prahy fyzicko-geografických proměnných, kde je degradační ohrožení zemědělské půdy minimální, resp. maximální. Toho může být využito zejména při klasifikaci ohrožených území a navrhování plošných opatření. Přesnost získaných výsledků záleží na podrobnosti dat, která jsou k dispozici, a otázkou je také volba fyzicko-geografických proměnných. V našem výzkumu jsme zvolili data poměrně snadno dostupná s prokazatelným vlivem na degradaci půd. Detailnější data mohou pak jen zpřesňovat získané výsledky. Nastíněné výsledky a metody mohou být uplatnitelné nejen pro středoevropský prostor, ale použitá metoda je snadno replikovatelná i v jiném prostředí. Vyžaduje však prvotní informaci o ohrožení jednotlivými degradačními faktory na konkrétních územích a fyzicko-geografická data, která jsou vzájemně hodnocena.

Výhoda metody rovněž spočívá ve snadné aplikovatelnosti libovolné další proměnné. Veškerý proces je automatizován prostřednictvím skriptů v jazyce R, výsledek těchto skriptů jsou grafy i strukturovaná excelovská tabulka prahových hodnot. Jediné, co skript vyžaduje, je tabulka hodnot vstupních parametrů (znaků) pro určitý počet příkladů. V rámci práce byla testována i metoda UI v podobě neuronových sítí s metodou back propagation, která by vstupní sadě parametrů přiřadila odpovídající degradační ohrožení ze stávajícího vzorku znaků. Tato část však zatím výsledky nepřinesla a bude součástí dalšího výzkumu.

Součástí práce byl i pokus o návrh automatických liniových protierozních opatření. Výsledky předchozích modelů sice ukazují na úrovni katastru, kde by mohly být problémy s degradací a jakého typu pravděpodobně budou, ale při praktickém návrhu a realizaci opatření proti degradaci, v tomto případě protierozních opatření, je třeba vycházet ze znalosti místních podmínek, často i na základě individuálního přístupu (Volk et al. 2010). Účinnost v praxi navržených opatření u protierozní ochrany však bude vždy záležet na náročnosti nastavení pravidel a jejich důsledném dodržování zemědělci v praxi (Prazan a Dumbrovsky 2011).

Diskuse mezi státní politikou a soukromou zemědělskou sférou vztahující se k efektivitě půdoochranných opatření, resp. k dotační politice v zemědělství je nezbytnou součástí účinných a v praxi fungujících protierozních opatření.

Navrhovaná metoda automatických protierozních opatření urychluje postup návrhu řešení v lokálních podmínkách, byla s úspěchem testovaná na třech povodích (Hané, Jevíčky a Kyjovky), kde v několika případech dokonce stanovila dělicí linii v místech, kde zjevně již v minulosti byly a dnes téměř zanikly, stále však mají v krajině zřetelnou stopu. Liniová opatření mohou být mimo svůj protierozní účinek důležitá i pro vytváření sítě nových biotopů v krajině a zlepšení její konektivity. Pro efektivnější snížení erozního smyvu je vhodné je kombinovat s opatřeními dalšími, např. organizačními.

Možnosti upřesnění výsledků

Výsledky degradačních modelů jsou limitovány dostupností vstupních dat. Většina údajů části multivariační analýzy byla dostupná za jednotku katastrálního území. Výsledky by samozřejmě upřesnil nejen tabulkový, ale prostorový podklad hlavních půdních jednotek, ze kterých metoda vycházela. Zpracovatelná jednotka by pak kopírovala polygony hlavních půdních jednotek. V případě metody dle expertního odhadu je kvalita výsledků rovněž ovlivněna přesností vstupních rastrových dat. Samozřejmě výsledky u této metody jsou značně ovlivněny hodnotami expertních vah, které jsou subjektivní, často však nejrychlejší metodou analýzy a pro všeobecný náhled na problematiku degradačního ohrožení postačují. Upřesnění výsledků u této metody by spočívalo v upřesnění těchto odhadů nebo rozšířené analýze rozdílných odhadů, metoda by však tímto ztratila na jednoduchosti.

V obou naznačených způsobech vytváření modelu degradačního ohrožení by bylo možné přidat další faktory ovlivňující degradaci půdy se zachováním postupu zpracování, např. faktory podmáčení nebo nedostatku vláhy, které zmiňuje Pírková et al. (2013). Vše samozřejmě souvisí s dostupností dat.

Výsledky „hledání prahových hodnot“ vycházejí z fyzicko-geografických proměnných, které byly v okamžiku vytváření práce k dispozici. Šlo většinou o veřejně dostupná data. Pro upřesnění by bylo potřeba zahrnout data placená. Např. klimatologická data.

Další směr rozšíření práce, kromě již naznačené klasifikace v podobě neuronových sítí, by mohl směřovat do odhalení souvislostí mezi degradací půdy a zemědělskou produkcí. Informace o konkrétním vlivu degradace na zemědělskou produkci jsou dosti hrubé. (Oldeman 1998) např. uvádí, že degradace půdy snižuje celkovou produkci o 12,7% oproti stavu bez degradačního zatížení (samozřejmě záleží na intenzitě degradačního zatížení). Pimentel et al. (1993) odhadoval, že produkce se vlivem eroze snižuje o 15 – 30%. Zajímavé by bylo jistě vytvořit i model vlivu degradace půdy na půdní organismy, jak zmiňuje (Jeffery et al. 2010).

Navržený algoritmus návrhu liniových opatření lze, jak již bylo naznačeno, rozšířit o úroveň ekonomických nákladů, kdy při stanovené míře nákladů algoritmus automaticky vygeneruje příslušný počet opatření. Stávající algoritmus zatím generuje pouze linie typu protierozní hrázky. V jeho nové verzi, kterou připravuji, ale stále není doladěná, sám dokáže rozhodnout, které liniové opatření je v daném místě nejpřínosnější, ať už je to protierozní hrázka, průleh, mez, nebo třeba zatravněný pás.

Věřím, že postupy, analýzy a metody, na nichž jsem se podílel a publikoval je ve vědeckých i odborných člancích a v této dizertační práci, přispějí jak k diskuzím vedoucím ke zbrzdění trendu degradace půdy, tak k vlastní ochraně půdy, aby tato mohla plnit i nadále produkční i mimoprodukční funkce.

Podpora projektů:

Metody a výsledky zde prezentované byly vytvořeny s podporem několika grantových úkolů (Degradace půdy a její vliv na komplex půdních vlastností včetně návrhu nápravných opatření k obnově agroekologických funkcí půdy – QJ1230066, Zavádění retenčních a infiltračních adaptačních opatření v Povodí Moravy – projekt Norských fondů), byly a budou prezentovány na vědeckých konferencích, stejně jako publikovány v odborném tisku. Seznam již vydaných prací nebo prací připravovaných k vydání uvádím níže.

Seznam publikovaných prací vztahujících se k dizertační práci:

BEDNÁŘ, Marek a Bořivoj ŠARAPATKA, 2018. Relationships between physical–geographical factors and soil degradation on agricultural land. *Environmental Research* [online]. roč. 164, č. July 2018, s. 660–668. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2018.03.042

BEDNÁŘ, Marek a Bořivoj ŠARAPATKA, 2018b. The use of multi-criteria analysis for identifying areas sensitive to land degradation and water retention. *Ekológia (Bratislava)* [online]. roč. 37, č. 1, s. 90–100. Dostupné z: doi:10.2478/eko-2018-0009

ŠARAPATKA, B., M. BEDNÁŘ a P. NETOPIL, 2018. Multilevel soil degradation analysis focusing on soil erosion as a basis for agrarian landscape optimization. *Soil and Water Research* [online]. roč. 2018, č. 1, s. 1–10. ISSN 18015395. Dostupné z: doi:10.17221/118/2017-SWR

ŠARAPATKA, Bořivoj a Marek BEDNÁŘ, 2015. Assessment of Potential Soil Degradation on Agricultural Land in the Czech Republic. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY* [online]. 677 S SEGOE RD, MADISON, WI 53711 USA: AMER SOC AGRONOMY, roč. 44, č. 1, s. 154–161. ISSN 0047-2425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2014.05.0233

ŠARAPATKA, Bořivoj, Marek BEDNÁŘ a Patrik NETOPIL, 2013. Hodnocení negativní antropizace půd v České republice s využitím GIS. *Phytopedon*. roč. 12, č. 1, s. 10–15.

ŠARAPATKA, Bořivoj, Marek BEDNÁŘ a Patrik NETOPIL, 2013. Arable Land Degradation with Special Focus to Water Erosion: A Serious Threat in the Czech Republic. In: *Soil Degradation. Advances in Geoecology* 42. 42. vyd. Reiskirchen, Germany: Catena Verlag, s. 214–225. ISBN 978-3-923381-59-3.

ŠARAPATKA, Bořivoj a Marek BEDNÁŘ, 2010. Analysis of Soil Degradation in the Czech Republic : GIS Approach. *Soil & Water Research*. roč. 2010, č. 2, s. 108–112.

7 Seznam použité literatury

BALLING, Richard J., John T. TABER, Michael R. BROWN a Kirsten DAY, 1999. Multiobjective Urban Planning Using Genetic Algorithm. *Journal of Urban Planning and Development* [online]. roč. 125, č. 2, s. 1–61. ISSN 0733-9488. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(1999)125:2(86)

BEDNÁŘ, Marek a Bořivoj ŠARAPATKA, 2018. Relationships between physical–geographical factors and soil degradation on agricultural land. *Environmental Research* [online]. roč. 164, č. July 2018, s. 660–668. ISSN 00139351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2018.03.042

BINI, C, 2009. Soil: a Precious Natural Resource. *Conservation of Natural Resources*. s. 1–48.

BOARDMAN, John a Jean POESEN, 2006. *Soil Erosion in Europe*. B.m.: John Wiley & Sons, Ltd.

BOARDMAN, John, Mark L. SHEPHEARD, Edward WALKER a Ian D L FOSTER, 2009. Soil erosion and risk-assessment for on- and off-farm impacts: A test case using the Midhurst area, West Sussex, UK. *Journal of Environmental Management* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 90, č. 8, s. 2578–2588. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2009.01.018

BORRELLI, Pasquale, Cristiano BALLABIO, Panos PANAGOS a Luca MONTANARELLA, 2014. Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 232–234, s. 471–478. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2014.06.008

BORRELLI, Pasquale, Panos PANAGOS a Luca MONTANARELLA, 2015. New insights into the geography and modelling of wind erosion in the European agricultural land. Application of a spatially explicit indicator of land susceptibility to wind erosion. *Sustainability (Switzerland)* [online]. roč. 7, č. 7, s. 8823–8836. ISSN 20711050. Dostupné z: doi:10.3390/su7078823

BROOKES, Christopher J., 2001. A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS. *International Journal of Geographical Information Science* [online]. roč. 15, č. 6, s. 539–559. ISSN 1365-8816. Dostupné z: doi:10.1080/136588101316907227

BURKE, Ingrid C., William K. LAUENROTH, Rebecca RIGGLE, Peter BRANNEN, Brian MADIGAN a Scott BEARD, 1999. Spatial variability of soil properties in the

shortgrass steppe: The relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems* [online]. roč. 2, č. 5, s. 422–438. ISSN 14329840. Dostupné z: doi:10.1007/s100219900091

CEC, 2006. Thematic strategy for soil protection. *Commision of the European Communities* [online]. s. 12. Dostupné z: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Thematic+Strategy+for+Soil+Protection#0>

COGO, N P, R LEVIEN a R A SCHWARZ, 2003. Soil and water losses by rainfall erosion influenced by tillage methods, slope-steepness classes, and soil fertility levels. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*. roč. 27, č. 4, s. 743–753.

CZECH MINISTRY OF AGRICULTURE, 2015. *Situační a výhledová zpráva půda [Report on current and anticipated state of soil]*. Prague: Czech Ministry of Agriculture. ISBN 9788074342523.

DE VENITE, Joris, Jean POESEN a Gert VERSTRAETEN, 2005. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain. *Journal of Hydrology* [online]. roč. 305, č. 1–4, s. 63–86. ISSN 00221694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.030

DIODATO, Nazzareno a Michele CECCARELLI, 2004. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands. *Ecological Indicators* [online]. 9., roč. 4, č. 3, s. 177–187 [vid. 5. únor 2016]. ISSN 1470160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2004.03.002

DORAN, John W a T B PARKIN, 1994. Defining and assessing soil quality. In: J W DORAN, D C COLEMAN, D F BEZDICEK a B A STEWART, ed. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* [online]. B.m.: Soil Science Society of America (SSSA), s. 3–21. Dostupné z: <http://soilquality.org/home.html#>

DORAN, John W a T B PARKIN, 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: *Soil Science Society of America Journal* [online]. s. 25–37. ISBN 0891188266. Dostupné z: doi:10.2136/sssaspepub49.c2

DRAGOVIČ, Ranko, Boško GAJIČ, Snežana DRAGOVIČ, Miodrag DORDEVIČ, Milan DORDEVIČ, Nevena MIHAILOVIČ a Antonije ONJIA, 2014. Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia). *Journal of Cleaner Production* [online]. roč. 84, č. 1, s. 550–562. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.060

- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2015. Living in a changing climate. *EEA Signals 2015* [online]. s. 37. Dostupné z: doi:10.2800/965033
- FABIOLA, Neyde, Balarezo GIAROLA, Alvaro Pires DA SILVA, Silvia IMHOFF a Anthony Roger DEXTER, 2003. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma* [online]. roč. 113, č. 1–2, s. 95–108. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-7061(02)00333-6
- FACCHINELLI, A., E. SACCHI a L. MALLEEN, 2001. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution* [online]. roč. 114, č. 3, s. 313–324. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/S0269-7491(00)00243-8
- FAO, 1997. *Land Degradation Assessment* [online]. Dostupné z: ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/landdegradationassessment.doc
- FAO, 1998. *Soil and Terrain Database, Land Degradation Status and Soil Vulnerability Assessment for Central and Eastern Europe (CD-ROM)*. ISBN 92-5-104491-0.
- FAO, 2013. FAO Statistical Yearbook 2013: World food and agriculture. *FAO Statistical Yearbook 2013: World food and agriculture* [online]. s. 1–307. ISSN 1098-6596. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- FIENER, P., 2003. Concept and effects of a multi-purpose grassed waterway. *Soil Use and Management* [online]. roč. 19, s. 65–72. ISSN 14752743. Dostupné z: doi:10.1079/SUM2002170
- GAY, Dominique, Isabelle ROUET, Morgan MANGEAS, Nazha SELMAOUI a Pascal DUMAS, 2007. Assessment of classification methods for soil erosion risks. *Modsim'07*. s. 2659–2665.
- GLASOD, 1990. *Global Assessment of Human-induced Soil Degradation (GLASOD)* [online]. Dostupné z: http://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod
- GOBIN, Anne, R. JONES, M. KIRKBY, P. CAMPLING, G. GOVERS, C. KOSMAS a A. R. GENTILE, 2004. Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science and Policy* [online]. roč. 7, č. 1, s. 25–38. ISSN 14629011. Dostupné z: doi:10.1016/j.envsci.2003.09.004
- HARDEN, J. W., J. M. SHARPE, W. J. PARTON, D. S. OJIMA, T. L. FRIES, T. G. HUNTINGTON a S. M. DABNEY, 1999. Dynamic replacement and loss of soil carbon on eroding cropland. *Global Biogeochemical Cycles* [online]. roč. 13, č. 4, s. 885–901. ISSN 08866236. Dostupné z: doi:10.1029/1999GB900061

- HELYAR, K R a W M PORTER, 1989. Soil Acidification, its Measurement, and the Processes Involved. In: A D ROBSON, ed. *Soil Acidity and Plant Growth*. B.m.: Academic Press Australia, s. 61–102.
- JAFARI, R., M. M. LEWIS a B. OSTENDORF, 2008. An image-based diversity index for assessing land degradation in an arid environment in South Australia. *Journal of Arid Environments* [online]. roč. 72, č. 7, s. 1282–1293. ISSN 01401963. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaridenv.2008.02.011
- JAFARI, Reza a Leila BAKHSHANDEHMEHR, 2013. Quantitative Mapping and Assessment of Environmentally Sensitive Areas To Desertification in Central Iran. *Land Degradation & Development* [online]. roč. 119, č. June 2013, s. n/a-n/a. ISSN 10853278. Dostupné z: doi:10.1002/ldr.2227
- JAMIL, a., S. RIAZ, M. ASHRAF a M. R. FOOLAD, 2011. Gene Expression Profiling of Plants under Salt Stress. *Critical Reviews in Plant Sciences* [online]. roč. 30, č. December, s. 435–458. ISSN 0735-2689. Dostupné z: doi:10.1080/07352689.2011.605739
- JANEČEK, M., 2007. Ochrana zemědělské půdy před erozí. *Metodika*.
- JANEČEK, Miloslav, Tomáš DOSTÁL, Jana KOZLOVSKY-DUFKOVÁ, Miroslav DUMBROVSKÝ, Josef HŮLA, Václav KADLEC, Jana KONEČNÁ, Pavel KOVÁŘ, Josef KRÁSA, Eliška KUBÁTOVÁ, Dominika KOBZOVÁ, Marie KUDRNÁČOVÁ, Ivan NOVOTNÝ, Jana PODHRÁZSKÁ, Jaroslav PRAŽAN, Eva PROCHÁZKOVÁ, Hana STŘEDO VÁ, František TOMAN, Jan VOPRAVIL a Josef VLASÁK, 2012. *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha: VÚMOP v.v.i. ISBN 978-80-87415-42-9.
- JEFFERY, S, Ciro GARDI, A JONES, L MONTANARELLA, L MARMO, L MIKO a ETC, 2010. *European atlas of soil biodiversity* [online]. ISBN 9789279158063. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-7061(99)00028-2
- JIE, Chen, Chen JING-ZHANG, Tan MAN-ZHI a Gong ZI-TONG, 2002. Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences* [online]. roč. 12, s. 243–252. ISSN 1009-637X. Dostupné z: doi:10.1007/BF02837480
- KIRKELS, F. M S A, L. H. CAMMERAAT a N. J. KUHN, 2014. The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes - A review of different concepts. *Geomorphology* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 226, s. 94–105. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.023
- KIRSCHBAUM, Miko U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter

decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* [online]. 6., roč. 27, č. 6, s. 753–760 [vid. 5. srpen 2015]. ISSN 00380717. Dostupné z: doi:10.1016/0038-0717(94)00242-S

KLEMENT, V a A SUŠIL, 2009. *Porovnání vývoje agrochemických vlastností půd za období 1999–2002 a 2005–2008*. 2009. B.m.: Brno, Czech Republic: Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture.

KLIMENT, Zdeněk, Jiří KADLEC a Jakub LANGHAMMER, 2008. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models. *Catena* [online]. roč. 73, č. 3, s. 286–299. ISSN 03418162. Dostupné z: doi:10.1016/j.catena.2007.11.005

KLIMENT, Zdeněk a J. LANGHAMMER, 2005. Modelování erozního ohrožení ve velkých územních celcích. In: J. RYPL, ed. *Geomorfologický sborník, 4. České Budějovice: PFJU, České Budějovice, s. 75–81.*

KRÁSA, Josef, 2014. *Atlas EROZE - Model pro výpočet erozního smyvu a optimalizaci návrhu protierozních opatření*. 2014. Praha: Katedra hydromeliací a krajinného inženýrství.

LAL, R., 1997. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in western Nigeria. III. Soil physical properties. *Land Degradation & Development* [online]. roč. 8, č. 4, s. 325–342. ISSN 1099-145X. Dostupné z: doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199712)8:4<325::AID-LDR265>3.0.CO;2-N

LAL, R., 2009. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security* [online]. roč. 1, s. 45–57. ISSN 1876-4517. Dostupné z: doi:10.1007/s12571-009-0009-z

LAL, R C1 - af C2 - duplicateInEN C N - P 812712, 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* [online]. roč. 304, č. 5677, s. 1623–1627 ST–Soil carbon sequestration impacts. Dostupné z: doi:10.1126/science.1097396 [doi]

LANTIERI, D, 2003. Potential use of satellite remote sensing for land degradation assessment in drylands. Application to the LADA project. *FAO*.

LIESKOVSKÝ, J. a P. KENDERESSY, 2014. Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: A case study in vrábľa (Slovakia) using WATEM/SEDEM. *Land Degradation and Development* [online]. roč. 25, č. 3, s. 288–296. ISSN 1099145X. Dostupné z: doi:10.1002/ldr.2162

MANANDHAR, Ramita a Inakwu ODEH, 2014. Interrelationships of Land Use/Cover

Change and Topography with Soil Acidity and Salinity as Indicators of Land Degradation. *Land* [online]. roč. 3, s. 282–299. ISSN 2073-445X. Dostupné z: doi:10.3390/land3010282

MONTGOMERY, David R, 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [online]. roč. 104, č. 33, s. 13268–72. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.0611508104

MORGAN, R.P.C., 2005. *Soil erosion & Conservation* [online]. ISBN 9788578110796. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107415324.004

MZE, 2001. Zranitelné oblasti. In: *Odstavec předpisu 254/2001 Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) § 33.*

MŽP, 1994. Obsah rizikových prvků v půdách. *Vyhláška 13/1994 Sb.* [online]. Dostupné z: <http://www.bionebe.cz/161,0,povolene-limity-rizikovych-prvku-a-jinych-skodlivin-v-potravinach,-v-ovzdusi-nebo-v-pude.html>

NABHAN, H, A.M. MASHALI a A.R. MERMUT, 1997. Integrated soil management for sustainable agriculture and food security in southern and east Africa. ... *Management for Sustainable Agriculture and Food ...* [online]. Dostupné z: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:INTEGRATED+SOIL+MANAGEMENT+FOR+SUSTAINABLE+AGRICULTURE+AND+FOOD+SECURITY+IN+SOUTHERN#2>

NAWAZ, Muhammad Farrakh, Guilhem BOURRIÉ a Fabienne TROLARD, 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development* [online]. roč. 33, č. 2, s. 291–309. ISSN 17740746. Dostupné z: doi:10.1007/s13593-011-0071-8

NOVÁČEK, Pavel a M. HUBA, 1994. *Ohrožená planeta*. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého.

NOVÁK, Pavel, 2005. *Zranitelnost půd (hlavních půdních jednotek - HPJ) bonitačního systému různými formami degradace*. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy.

OLDEMAN, L R, 1998. *Soil degradation: a threat to food security*. 1998.

OLDEMAN, Lr, 1994. *The global extent of soil degradation* [online]. 1994. Dostupné z: http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i26803_001.pdf

OLDEMAN, Lr, R.T.A HAKKELING a W.G. SOMBROEK, 1992. *World map of the*

status of human-induced soil degradation [online]. ISBN 9066720468. Dostupné z: doi:10.1016/0016-7061(92)90047-B

OOST, K Van, G GOVERS, S De GRYZE, J SIX, J W HARDEN, J C RITCHIE, G W MCCARTY, G HECKRATH, C KOSMAS, J V GIRALDEZ a R MERCKX, 2007. The Impact of Agricultural Soil Erosion on the Global Carbon Cycle. roč. 18147, č. October, s. 626–629.

PANAGOS, Panos, Pasquale BORRELLI, Jean POESEN, Cristiano BALLABIO, Emanuele LUGATO, Katrin MEUSBURGER, Luca MONTANARELLA a Christine ALEWELL, 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 54, s. 438–447. ISSN 14629011. Dostupné z: doi:10.1016/j.envsci.2015.08.012

PAPIERNIK, S. K., M. J. LINDSTROM, J. A. SCHUMACHER, A. FARENHORST, K. D. STEPHENS, T. E. SCHUMACHER a D. A. LOBB, 2005. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. *Journal of Soil and Water Conservation* [online]. roč. 60, č. 6, s. 388–395. Dostupné z: <http://www.jswconline.org/content/60/6/388>

PAZ, Jm De, Juan SÁNCHEZ a Fernando VISCONTI, 2006. Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in a Spanish Mediterranean region. *Journal of Environmental Management* [online]. roč. 79, č. 2, s. 150–162. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2005.06.002

PELLETIER, David, Melissa CLARK, Mark G. ANDERSON, Bronwyn RAYFIELD, Michael A. WULDER a Jeffrey A. CARDILLE, 2014. Applying circuit theory for corridor expansion and management at regional scales: Tiling, pinch points, and omnidirectional connectivity. *PLoS ONE* [online]. roč. 9, č. 1, s. 1–12. ISSN 19326203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0084135

PÍRKOVÁ, Ivana, Jan VOPRAVIL a Jana SMOLÍKOVÁ, 2013. Statistika půd ohrožených degradací v ČR za rok 2012 Vodní eroze půd ČR.

PISTOCCHI, a, G CASSANI a O ZANI, 2002. Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices. *Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society on Integrated Assessment and Decision Support* [online]. roč. 3, s. 163–168. Dostupné z: <http://www.iemss.org/iemss2002/>

PODHRÁZSKÁ, Jana, Antonín VAISHAR, František TOMAN, Jaroslav KNOTEK,

- Miloslava ŠEVELOVÁ, Kateřina STONAWSKÁ, Alona VASYLCHENKO a Petr KARÁSEK, 2015. Evaluation of Land Consolidation Process by Rural Stakeholders. *European Countryside* [online]. roč. 0, č. 0, s. 144–155. ISSN 1803-8417. Dostupné z: doi:10.1515/euco-2015-0010
- POWER, James a Rajendra PRASAD, 1997. *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture* [online]. B.m.: CRC Press. ISBN 9781566702546. Dostupné z: doi:10.1201/9781439821985
- PRAZAN, J. a M. DUMBROVSKY, 2011. Soil conservation policies: Conditions for their effectiveness in the Czech Republic. *Land Degradation and Development* [online]. roč. 22, č. 1, s. 124–133. ISSN 10853278. Dostupné z: doi:10.1002/ldr.1066
- PRINCE, S. D., I. BECKER-RESHEF a K. RISHMAWI, 2009. Detection and mapping of long-term land degradation using local net production scaling: Application to Zimbabwe. *Remote Sensing of Environment* [online]. B.m.: Elsevier Inc., roč. 113, č. 5, s. 1046–1057. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2009.01.016
- QUINTON, John N, Gerard GOVERS, Kristof VAN OOST a Richard D BARDGETT, 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience* [online]. roč. 3, č. 5, s. 311–314. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo838><http://www.nature.com/doifinder/10.1038/ngeo838>
- RENGEL, Zdenko, 2003. *Handbook of Soil Acidity*. New York: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-0890-3.
- SALVATI, Luca a Sofia BAJOCCO, 2011. Land sensitivity to desertification across Italy: Past, present, and future. *Applied Geography* [online]. roč. 31, č. 1, s. 223–231. ISSN 01436228. Dostupné z: doi:10.1016/j.apgeog.2010.04.006
- SALVATI, Luca, Sofia BAJOCCO, Tomaso CECCARELLI, Marco ZITTI a Luigi PERINI, 2011. Towards a process-based evaluation of land vulnerability to soil degradation in Italy. *Ecological Indicators* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 11, č. 5, s. 1216–1227. ISSN 1470160X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecolind.2010.12.024
- SALVATI, Luca, Marco ZITTI a Luigi PERINI, 2016. Fifty Years on: Long-Term Patterns of Land Sensitivity To Desertification in Italy. roč. 107, č. June 2013, s. 97–107.
- SÁŇKA, M., 2014. Is the soil sealing really a serious problem for the future? In: *CONFERENCE SONDAR – ELSA 2014*.
- SHRIVASTAVA, Pooja a Rajesh KUMAR, 2015. Soil salinity: A serious environmental

- issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences* [online]. B.m.: King Saud University, roč. 22, č. 2, s. 123–131. ISSN 1319-562X. Dostupné z: doi:10.1016/j.sjbs.2014.12.001
- SKIDMORE, a, 2002. Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing. *Chapter* [online]. roč. 30, č. 3, s. xviii, 268. ISSN 02658135. Dostupné z: doi:10.1201/9780203302217
- SKRBK, Jan, 2008. *Degradace půd v ČR a současné technologie základní agrotechniky, změny půdních vlastností na intenzivně zemědělsky využívaném území za posledních 20 let* [online]. Dostupné z: doi:http://www.zeraagency.eu/dokumenty/008009001/srbek_jan_vumop_praha.pdf
- SOMMARUGAWOGRATH, S., K. A. KOINIG, R. SCHMIDT, R. SOMMARUGA, R. TESSADRI a R. PSENNER, 1997. Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. *Nature* [online]. roč. 387, č. 6628, s. 64–67. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/387064a0
- SONNEVELD, B. G. J. S. a D. L. DENT, 2009. How good is GLASOD? *Journal of Environmental Management* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 90, č. 1, s. 274–283. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2007.09.008
- ŠARAPATKA, Bořivoj a Marek BEDNÁŘ, 2010. Analysis of Soil Degradation in the Czech Republic: GIS Approach. *Soil & Water Research*. roč. 2010, č. 2, s. 108–112.
- ŠARAPATKA, Bořivoj a Marek BEDNÁŘ, 2015. Assessment of Potential Soil Degradation on Agricultural Land in the Czech Republic. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY* [online]. 677 S SEGOE RD, MADISON, WI 53711 USA: AMER SOC AGRONOMY, roč. 44, č. 1, s. 154–161. ISSN 0047-2425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2014.05.0233
- ŠARAPATKA, B., M. BEDNÁŘ a P. NETOPIL, 2018. Multilevel soil degradation analysis focusing on soil erosion as a basis for agrarian landscape optimization. *Soil and Water Research* [online]. roč. 2018, č. 1, s. 1–10. ISSN 18015395. Dostupné z: doi:10.17221/118/2017-SWR
- ŠARAPATKA, Bořivoj, Marek BEDNÁŘ a Patrik NETOPIL, 2013. Hodnocení negativní antropizace půd v České republice s využitím GIS. *Phytopedon*. roč. 12, č. 1, s. 10–15.
- ŠARAPATKA, Bořivoj, Pavel DLAPA a Zoltán BEDRNA, 2002. *Soil Quality and Degradation*. Olomouc: VUP.
- ŠTOLBOVÁ, Marie, Jakub KUČERA a Tomáš HLAVSA, 2008. Metodika stanovení méně příznivých oblastí (LFA).

- THOMSEN, I. K. a P. SØRENSEN, 2006. Interactions between soil organic matter level and soil tillage in a growing crop: N mineralization and yield response. *Soil Use and Management* [online]. roč. 22, č. 2, s. 221–223. ISSN 02660032. Dostupné z: doi:10.1111/j.1475-2743.2006.00026.x
- UNEP, 1997. Degraded soils. *International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). World Atlas of Desertification*.
- VÁCHA, Radim, O. POLÁČEK a V. HORVÁTHOVÁ, 2003. State of contamination of agricultural soils after floods in August 2002. *Plant, Soil and Environment*. roč. 49, č. 7, s. 307–313. ISSN 12141178.
- VALETTE, Gilles, Stéphanie PRÉVOST, Laurent LUCAS a Joël LÉONARD, 2006. SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers & Graphics* [online]. 8., roč. 30, č. 4, s. 494–506 [vid. 29. únor 2016]. ISSN 00978493. Dostupné z: doi:10.1016/j.cag.2006.03.016
- VAN ENGELEN, V. a W. TING-TIANG, ed., 1997. Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER): Procedures Manual. B.m.: FAO, s. 127.
- VLASÁK, Josef a Michal SEIDL, 2010. *Katalog společných zařízení pozemkových úprav* [online]. Dostupné z: <http://geo102.fsv.cvut.cz/ksz/o-spolecnych-zarizenich/>
- VOLK, Martin, Markus MÖLLER a Daniel WURBS, 2010. A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies. *Land Use Policy* [online]. roč. 27, č. 4, s. 997–1009. ISSN 02648377. Dostupné z: doi:10.1016/j.landusepol.2009.12.011
- VYSLOUŽILOVÁ, Barbora a Zdeněk KLIMENT, 2012. Modelování erozních a sedimentačních procesu v malém povodí. *Geografie-Sborník CGS*. roč. 117, č. 2, s. 170–191. ISSN 12120014.
- WISCHMEIER, W.H. a D.D. SMITH, 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture handbook no. 537* [online]. č. 537, s. 285–291. ISSN 0002-8606. Dostupné z: doi:10.1029/TR039i002p00285
- XIA, Kaiming, 2011. Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility. *Journal of Terramechanics* [online]. B.m.: ISTVS, roč. 48, č. 2, s. 113–123. ISSN 00224898. Dostupné z: doi:10.1016/j.jterra.2010.05.001
- XU, Xian Li, Wen LIU, Ya Ping KONG, Ke Li ZHANG, Bofu YU a Ji Ding CHEN, 2009. Runoff and water erosion on road side-slopes: Effects of rainfall characteristics and slope length. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 14, č. 7, s. 497–501. ISSN 13619209. Dostupné z:

doi:10.1016/j.trd.2009.05.006

8 Seznam použitých zkratek a pojmů

- AI – umělá inteligence (artificial intelligence)
- ACI – acidifikace (acidification)
- ALT – nadmořská výška (altitude)
- ASSOD – Soil Degradation in South and Southeast Asia
- COM – zhutnění (compaction)
- DEM – výškový model (Digital Elevation Model)
- DF – degradační faktor(y)
- DI – vysychavé půdy (dry areas)
- DSM – model desertifikace (Desertification Model)
- EEA - Evropská agentura pro životní prostředí
- ELEDIF – členitost terénu (elevation differences)
- ES – těžké půdy (extreme soils)
- FAO – Organizace pro výživu a zemědělství (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
- FGP – fyzicko-geografické proměnné
- GAEC - Dodržování standardů dobrého zemědělského a environmentálního stavu půdy (Good Agricultural and Environmental Conditions)
- GLASOD - Global Assessment of Soil Degradation
- HMI – intoxikace těžkými kovy (heavy metal intoxication)
- CHD – chemická degradace půd (chemical degradation)
- LFA – mírně příznivé oblasti pro zemědělství (Less favoured areas)
- LOESS – neparametrická regresní metoda
- LOM – ztráta organické hmoty (loss of organic matter)
- MEO – mírně erozně ohrožené plochy
- PCA – analýza hlavní komponent
- PESERA – PAN European Soil Erosion Risk Assessment
- PHD – fyzikální degradace půd (physical degradation)
- PRE – roční úhrn srážek (precipitation)
- Q1-Q5 – kvintily ohrožení
- RDM – výsledný degradační model (Resulting Degradation Model)
- SC – utužení půdy (soil compaction)
- SEO – silně erozně ohrožené plochy
- SG – půdní zrnitost (soil texture)
- SLOPE – svažitost (slope steepness)
- SOTER – Global and National Soils and Terrain Digital Databases

SOUVER – projekt Mapping of Soil and Terrain Vulnerability in Central and Eastern Europe

TD – celková degradace (total degradation)

TEMP – roční úhrn teplot (temperature)

USLE – Univerzální rovnice ztráty půdy (Universal Soil Loss Equation)

USPED - Unit Stream Power - based Erosion Deposition

WAE – vodní eroze (water erosion)

WIE – větrná eroze (wind erosion)

WOCAT - World Overview of Conservation Approaches and Technologies

Seznam obrázků

Obr. 1 Globální rozšíření degradovaných půd (UNEP 1997)	11
Obr. 2 Obecné příčiny degradace půd (Novák 2005).....	12
Obr. 3 Regiony GLASOD (Oldeman et al. 1992)	13
Obr. 4 Vyhodnocení ohroženosti zemědělských půd degradací půdy (GLASOD 1990)	14
Obr. 5 Diagram výpočtu tříd degradačního ohrožení dle GLASOD (Oldeman et al. 1992).....	15
Obr. 6 Postup zpracování degradačních modelů a) model celkové degradace, b) model desertifikace (Šarapatka a Bednář 2010)	26
Obr. 7 Ukázka statistického přehledu HPJ za katastry. Hodnoty plošného rozšíření jsou uvedeny v ha.....	31
Obr. 8 Schéma vytváření modelů při metodě multikriteriální statistiky	33
Obr. 9 Schéma výpočtu vah degradačních faktorů (Sarapatka a Bednar 2015).....	36
Obr. 10 Box-plot analýza (Bednář a Šarapatka 2016)	40
Obr. 11 Vodní eroze a svažitost - průběh rozdělení tříd ohrožení (Bednář a Šarapatka 2016).....	43
Obr. 12 Fyzikální degradace zemědělských půd (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy	47
Obr. 13 Chemická degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy.....	48
Obr. 14 Celková degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy.....	48
Obr. 15 Celková degradace zemědělských půd - kombinace více sad vstupních vah .	49
Obr. 16 Převládající procesy degradace zemědělských půd podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy	49
Obr. 17 Převládající procesy degradace zemědělských půd bez acidifikace podle metody expertního odhadu (Šarapatka a Bednář 2010) – česká verze mapy.....	50
Obr. 18 Fyzikální degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Šarapatka a Bednář 2015) – česká verze mapy	51
Obr. 19 Chemická degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Sarapatka a Bednar 2015) – česká verze mapy.....	51
Obr. 20 Celková degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy (Sarapatka a Bednar 2015) – česká verze mapy	52

Obr. 21 Celková degradace zemědělských půd podle metody PCA analýzy bez acidifikace.	52
Obr. 22 Mapy ohroženosti zemědělských půd podle degradačních faktorů	53
Obr. 23 Graf komponentních vah prvních dvou hlavních komponent (Sarapatka a Bednar 2015)	54
Obr. 24 Převládající typ degradace podle metody PCA analýzy	55
Obr. 25 Rozložení zranitelnosti půd - box-plot analýza	56
Obr. 26 Grafický vývoj závislosti tříd ohroženosti degradačních faktorů na fyzicko-geografických proměnných (Bednář a Šarapatka 2016)	58
Obr. 27 Ohroženost půdních bloků v povodí Jevíčky.....	62
Obr. 28 Erozní smyv zájmového území v povodí Jevíčky	63
Obr. 29 Návrh expertních liniiových opatření.....	63
Obr. 30 Návrh automatických liniiových opatření ve variantě 20 opatření.....	64
Obr. 31 Rozdíl erozního smyvu pro případ 20 opatření	64
Obr. 32 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta bez opatření	65
Obr. 33 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta 5 opatření (celková délka opatření 2391m)	66
Obr. 34 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta 10 opatření (celková délka opatření 4422m)	66
Obr. 35 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta 20 opatření (celková délka opatření 8642m)	66
Obr. 36 Histogram mediánu erozního smyvu za půdní blok - varianta expertního návrhu (celková délka opatření 4905m)	67
Obr. 37 Závislost průměru mediánu smyvu na počtu generovaných opatření.....	67

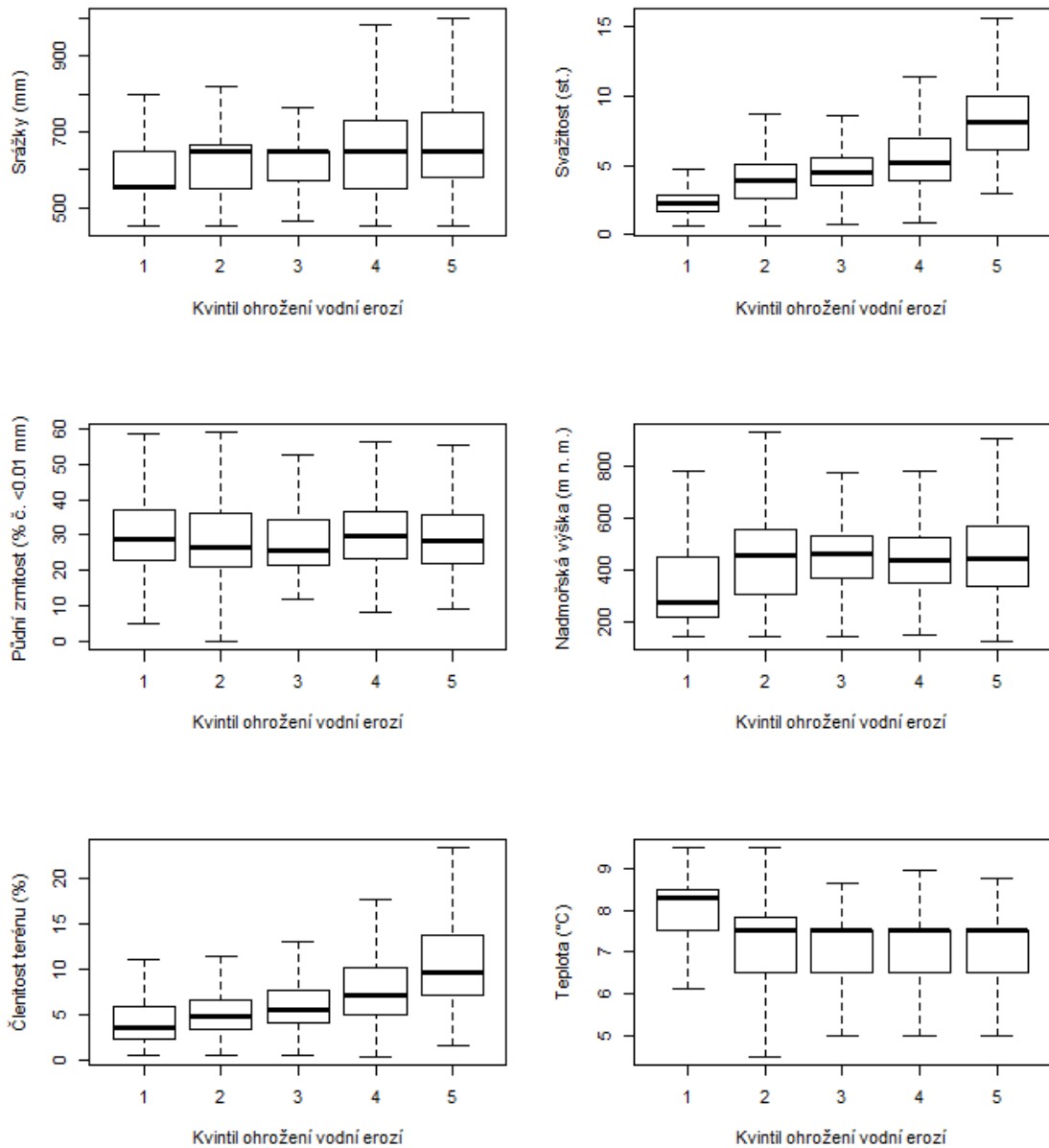
Seznam tabulek

Tab. 1 Kategorie erozní ohroženosti podle maximální přípustné hodnoty ochranného vlivu vegetace C_p (Pírková et al. 2013).	22
Tab. 2 Přehled zdrojových dat a jejich využití.	24
Tab. 3 Expertní váhy degradačních faktorů.	27
Tab. 4 Zranitelnost HPJ vybranými degradačními faktory.	28
Tab. 5 Obsah rizikových prvků v půdách (mg.kg ⁻¹). Výluh roztokem 2 M HNO ₃ při poměru půdy k vyluhovačce 1 : 10. Obsah rizikových prvků v půdách je určen Vyhláškou 13/1994, kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu (MŽP 1994).	32
Tab. 6 Korelační závislost degradačních faktorů.	34
Tab. 7 Přehled fyzicko-geografických proměnných a jejich zdroj.	37
Tab. 8 Korelační matice závislostí degradačních faktorů a fyzicko-geografických proměnných (Bednář a Šarapatka, 2016).	39
Tab. 9 Rozsah hodnot degradačního zatížení a nenulového ohrožení.	40
Tab. 10 Váhy jednotlivých degradačních faktorů podle PCA analýzy.	54
Tab. 11 Statistika převládajících faktorů v rámci ČR.	55
Tab. 12 Korelační matice závislostí modelu podle expertního odhadu a podle PCA.	56
Tab. 13 Prahové hodnoty fyzicko-geografických proměnných (Bednář a Šarapatka 2016).	59
Tab. 14 Grafické vyjádření možnosti klasifikace tříd závažnosti rozsahem hodnot FGV.	61

9 Přílohy

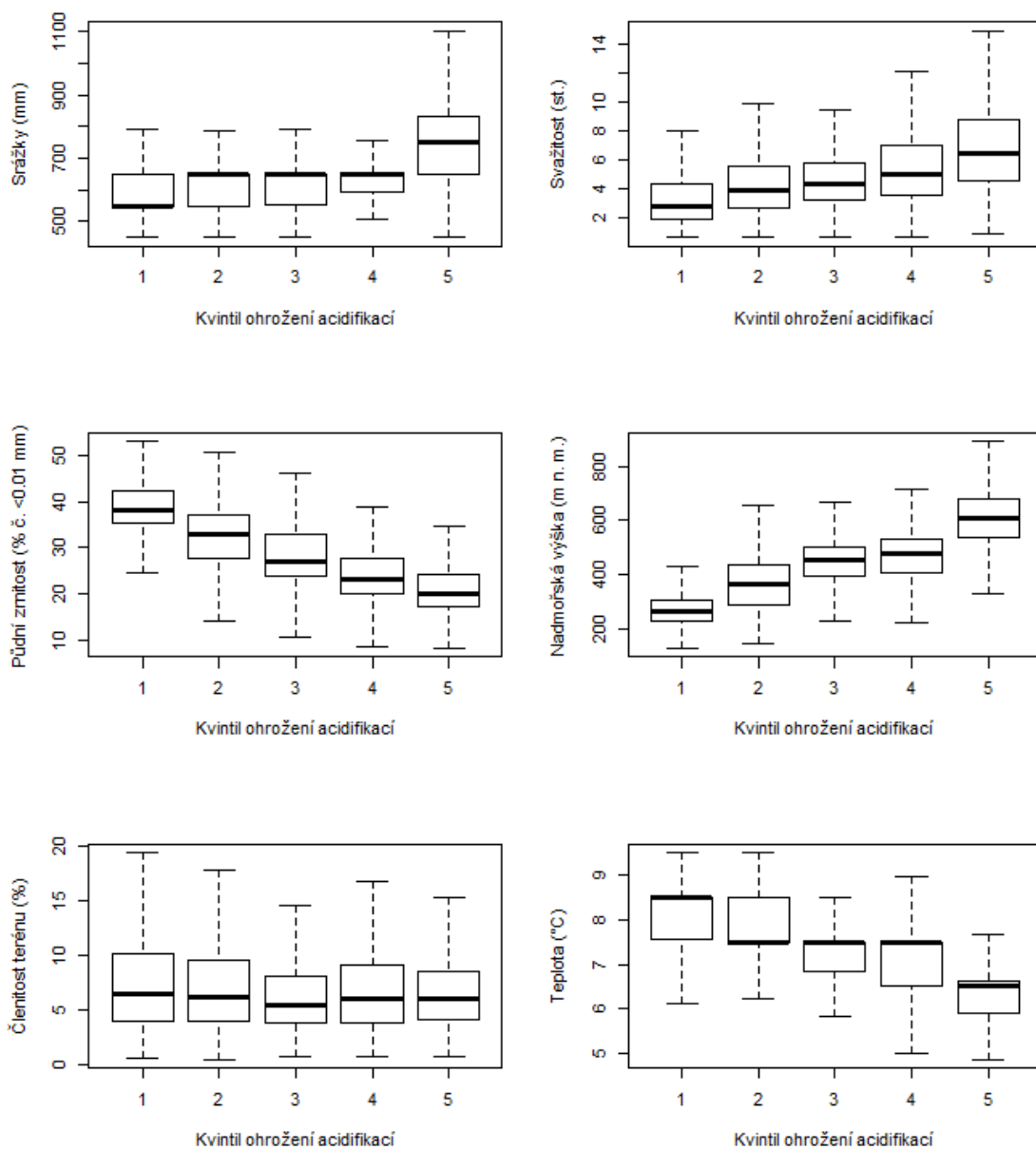
9.1 Příloha I – výsledky box plot analýzy tříd ohroženosti v závislosti na fyzicko-geografické proměnné

Vodní eroze



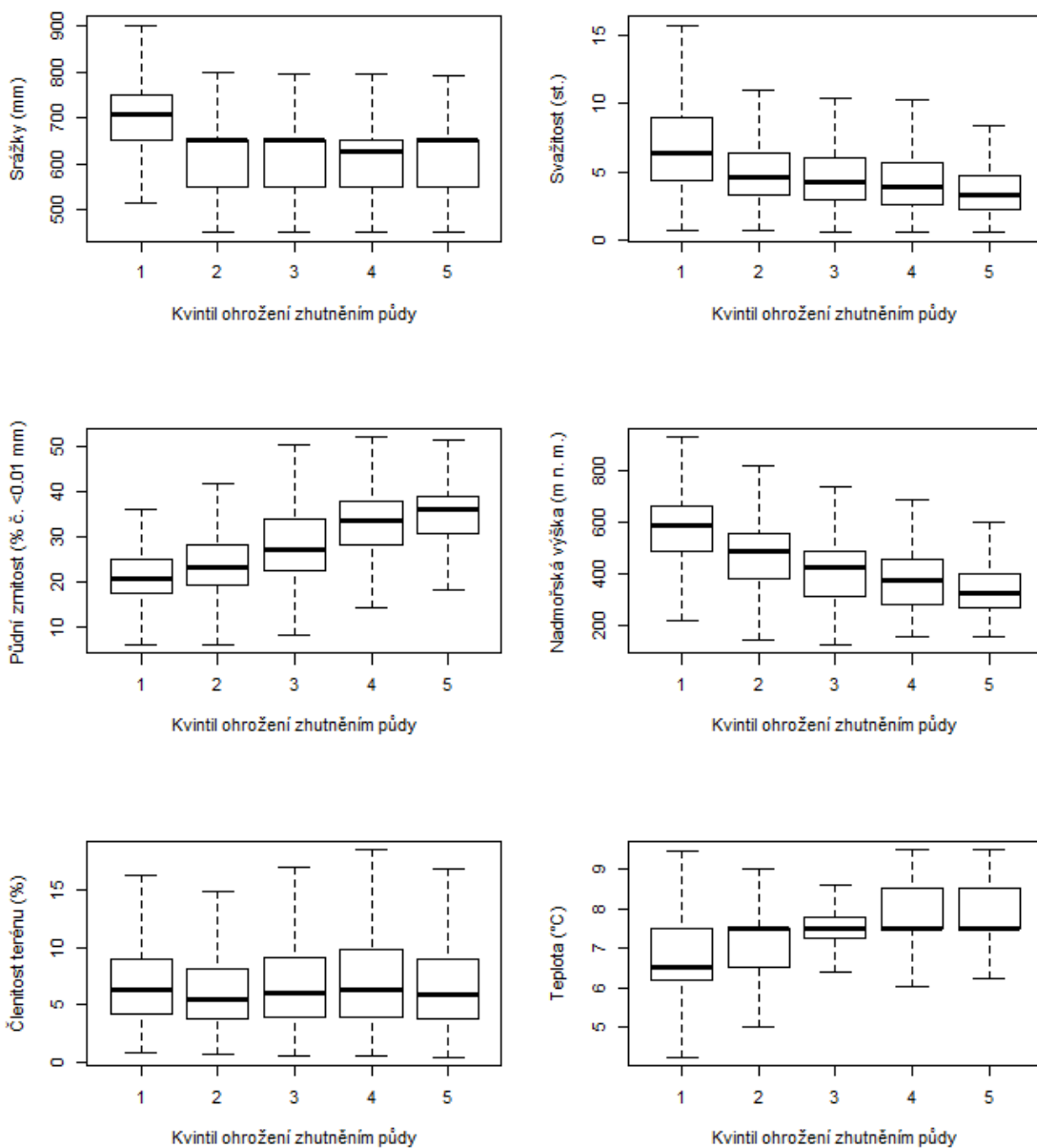
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svazitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,145	0,100	0,131	0,267	0,109	0,249
2	0,170	0,082	0,149	0,220	0,109	0,271
3	0,149	0,102	0,182	0,194	0,106	0,266
4	0,184	0,121	0,107	0,211	0,190	0,187
5	0,246	0,124	0,130	0,183	0,129	0,189

Acidifikace



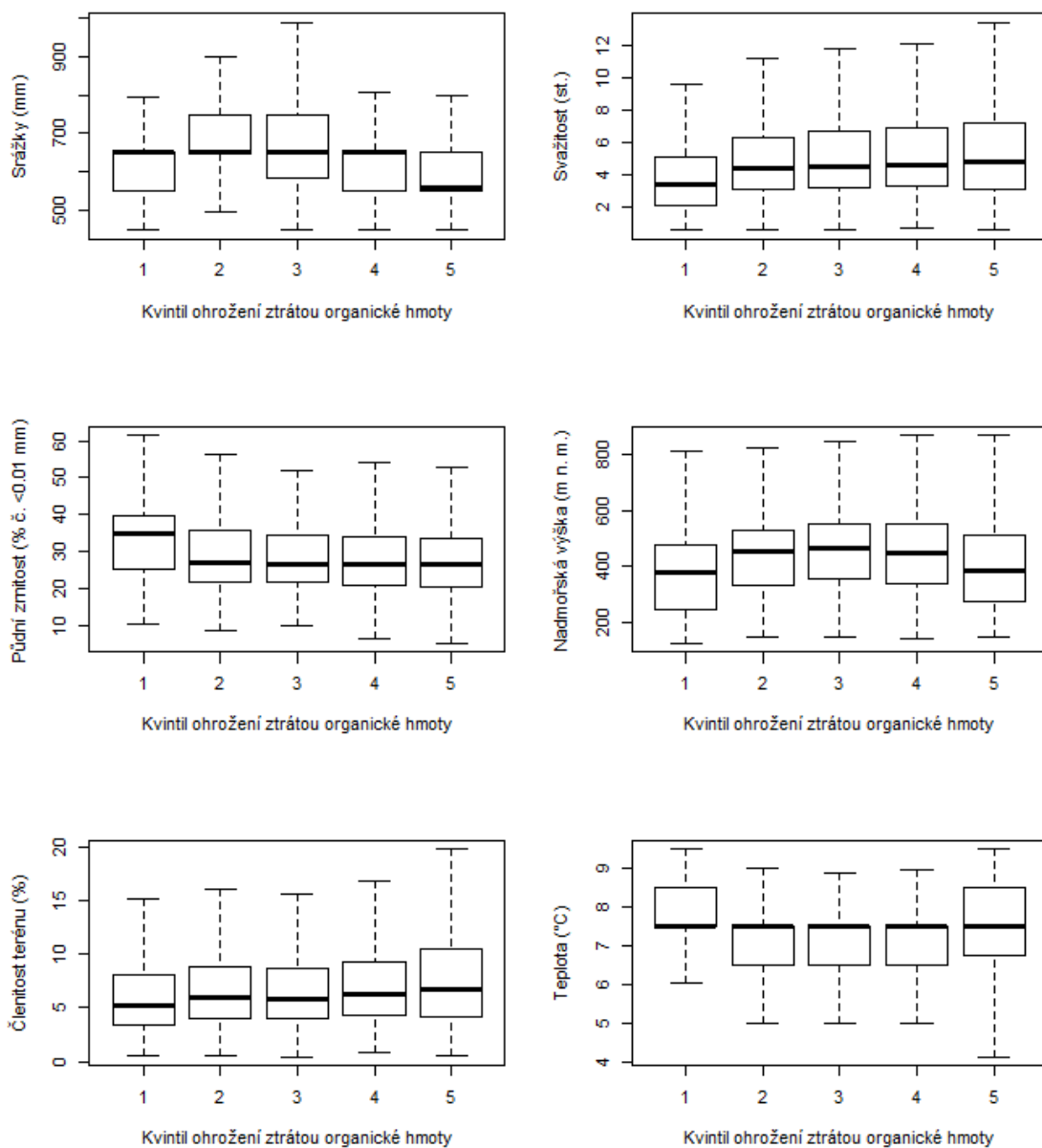
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,151	0,308	0,056	0,190	0,232	0,062
2	0,152	0,247	0,098	0,149	0,227	0,128
3	0,169	0,131	0,199	0,146	0,095	0,261
4	0,172	0,266	0,083	0,172	0,155	0,151
5	0,264	0,138	0,141	0,132	0,148	0,177

Zhutnění



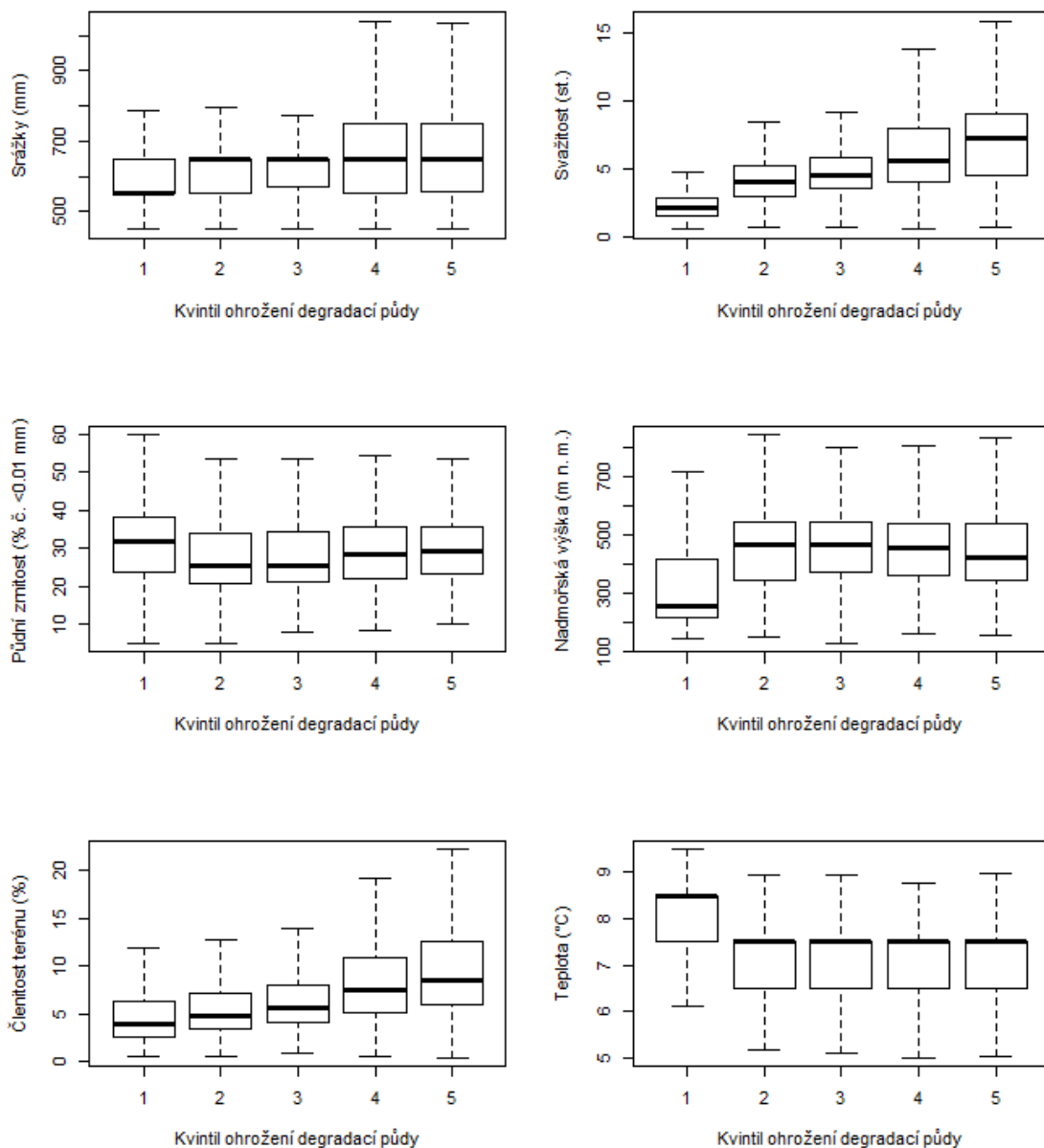
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,252	0,125	0,132	0,140	0,139	0,212
2	0,157	0,166	0,157	0,141	0,142	0,238
3	0,157	0,198	0,143	0,197	0,134	0,171
4	0,120	0,216	0,143	0,128	0,193	0,200
5	0,118	0,190	0,238	0,103	0,123	0,228

Ztráta organické hmoty



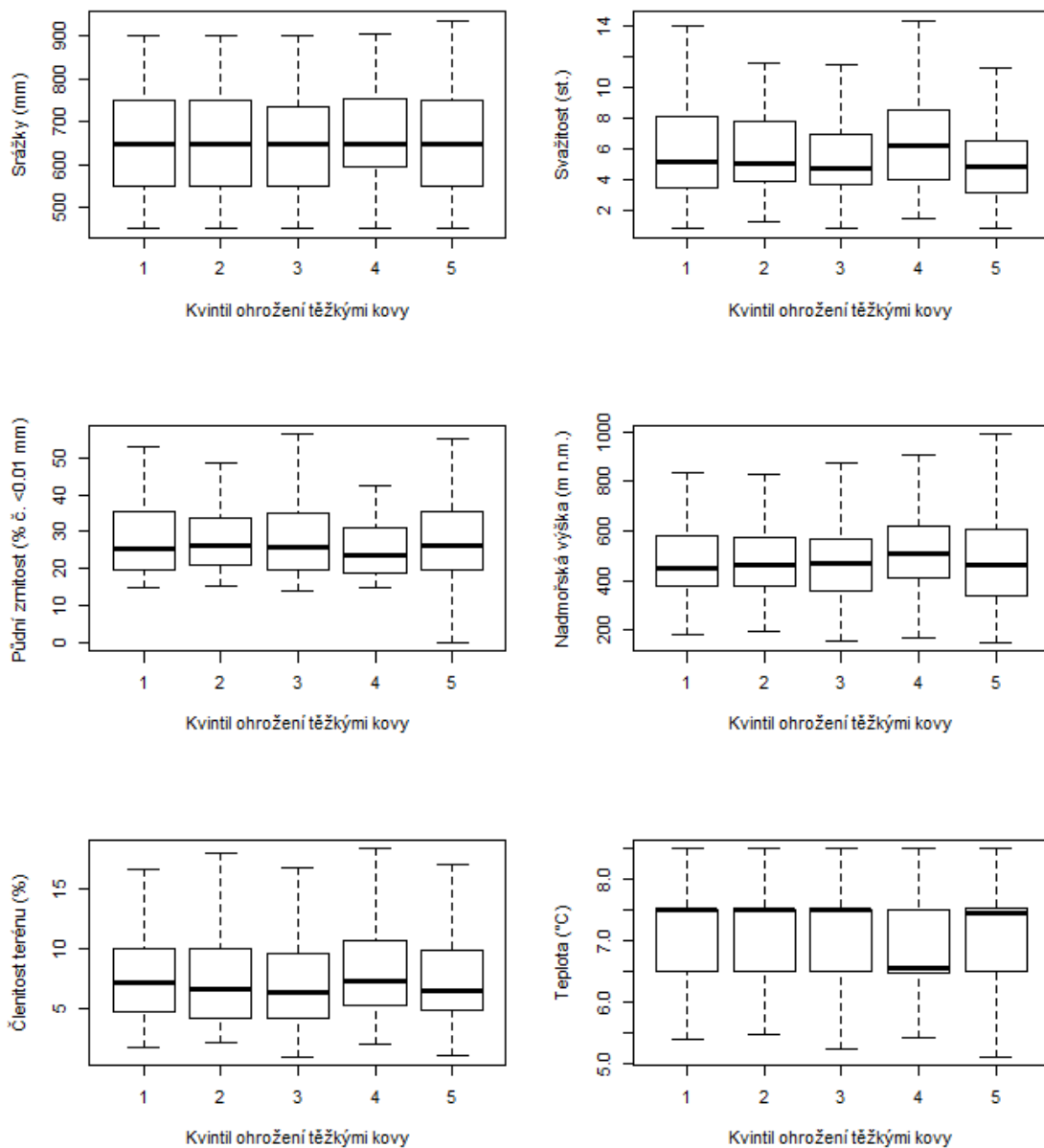
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,174	0,159	0,114	0,242	0,113	0,197
2	0,165	0,240	0,102	0,172	0,122	0,198
3	0,174	0,195	0,142	0,141	0,122	0,227
4	0,195	0,232	0,115	0,145	0,121	0,192
5	0,165	0,140	0,120	0,225	0,142	0,208

Celková degradace



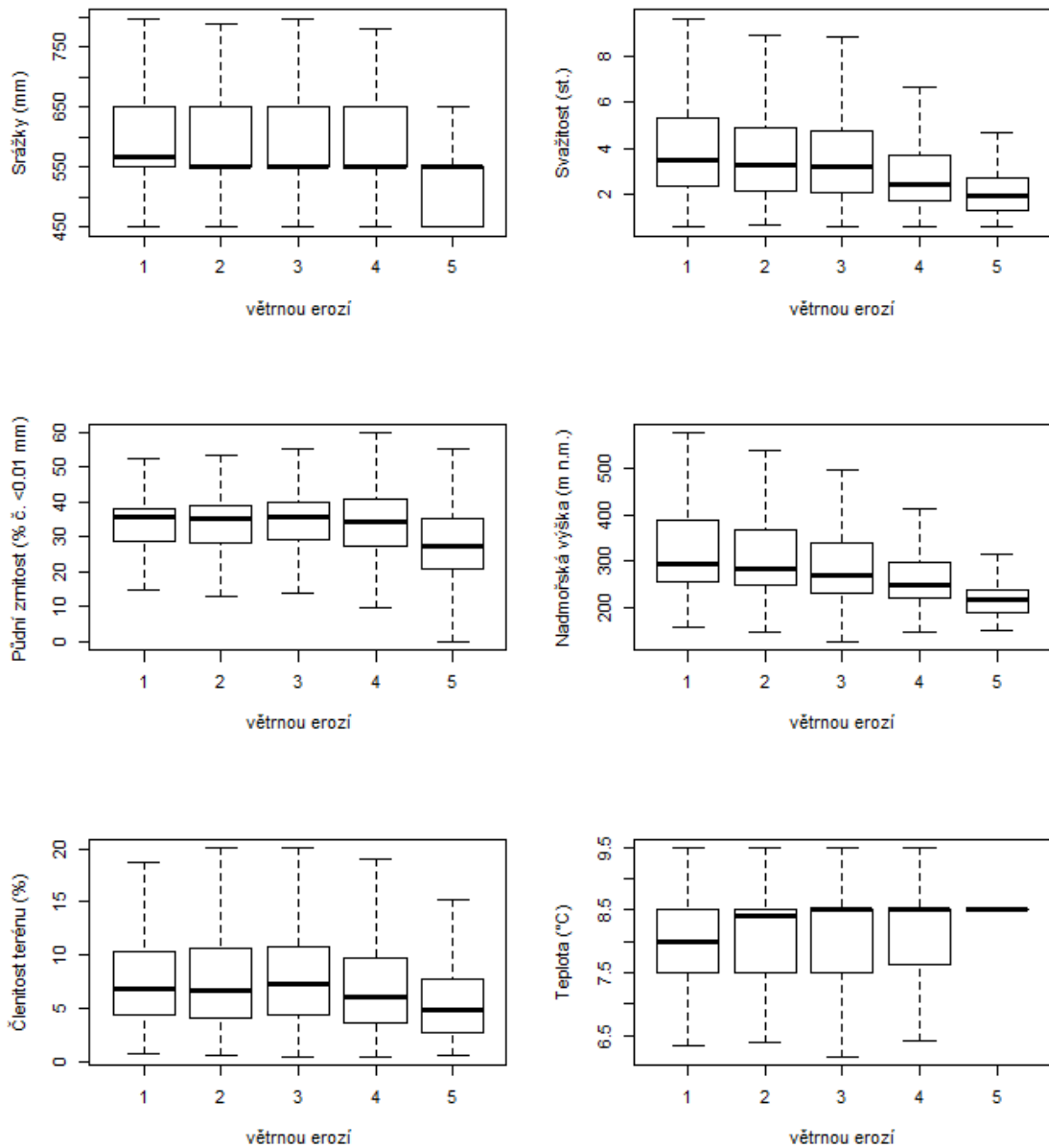
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,155	0,068	0,133	0,290	0,117	0,236
2	0,158	0,085	0,131	0,232	0,154	0,241
3	0,180	0,109	0,169	0,217	0,073	0,251
4	0,219	0,108	0,124	0,201	0,146	0,201
5	0,206	0,215	0,096	0,171	0,130	0,182

Těžké kovy



ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,101	0,161	0,149	0,246	0,204	0,138
2	0,075	0,162	0,124	0,223	0,235	0,180
3	0,137	0,135	0,173	0,238	0,111	0,205
4	0,188	0,195	0,171	0,095	0,156	0,196
5	0,151	0,167	0,196	0,119	0,121	0,245

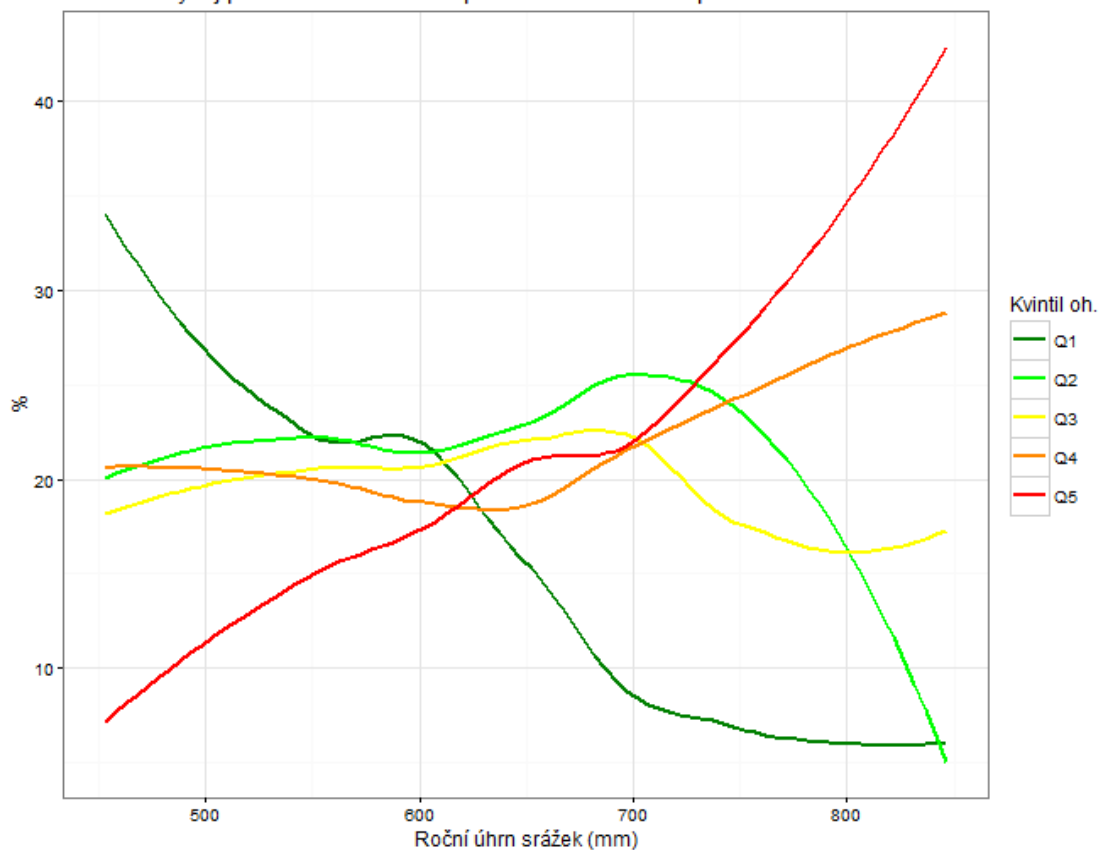
Větrná eroze



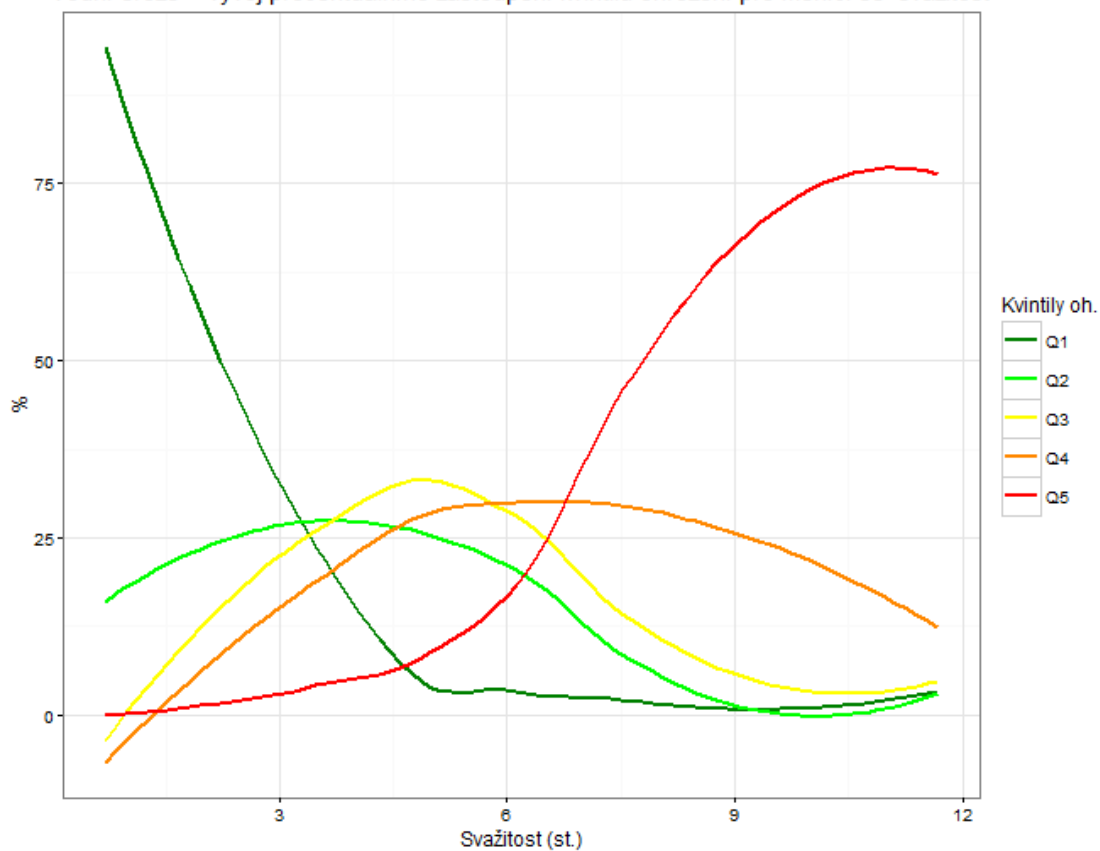
ST. OHROŽENÍ	Srážky	Svažitost	Teplota	Zrnitost	Variabilita terénu	Výškopis
1	0,155	0,177	0,184	0,120	0,241	0,122
2	0,141	0,151	0,224	0,122	0,188	0,174
3	0,180	0,217	0,226	0,136	0,106	0,135
4	0,189	0,152	0,143	0,174	0,189	0,152
5	0,258	0,105	0,146	0,287	0,163	0,041

9.2 Příloha II – Vývoj procentuálního zastoupení jednotlivých tříd ohroženosti v závislosti na zvolené fyzicko-geografické proměnné

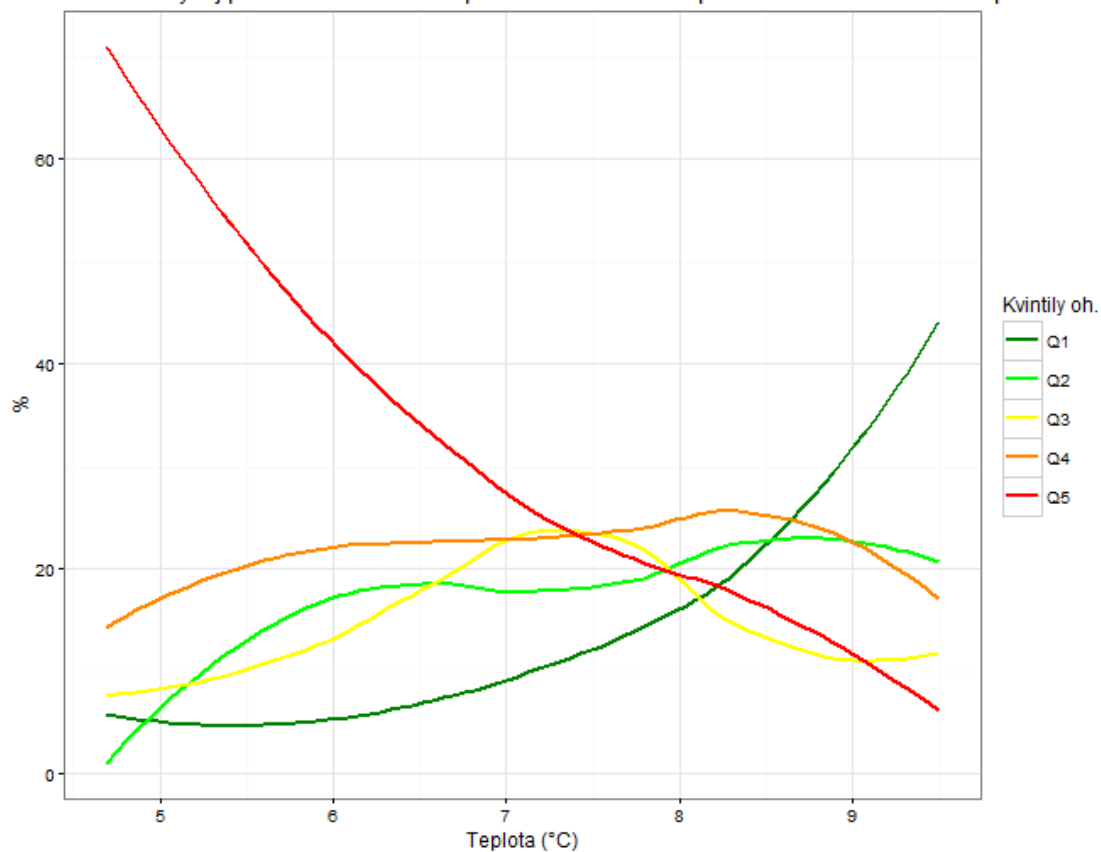
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhm srážek



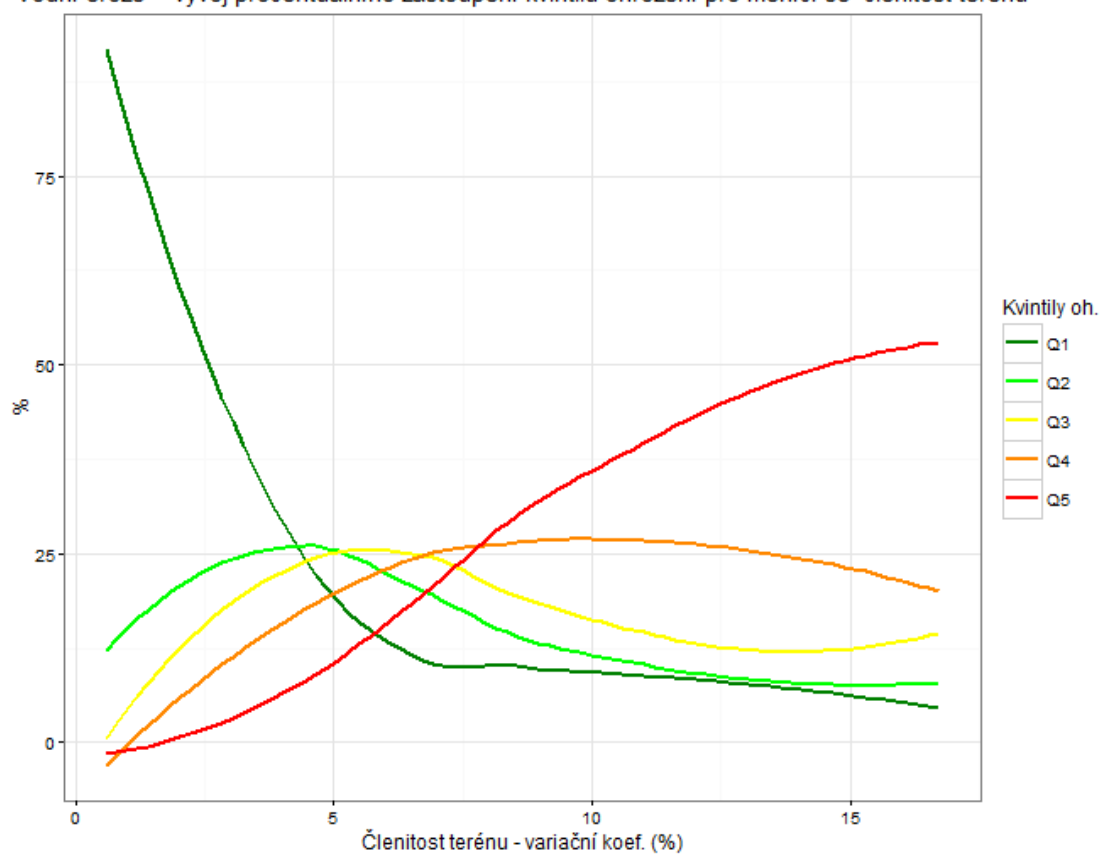
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



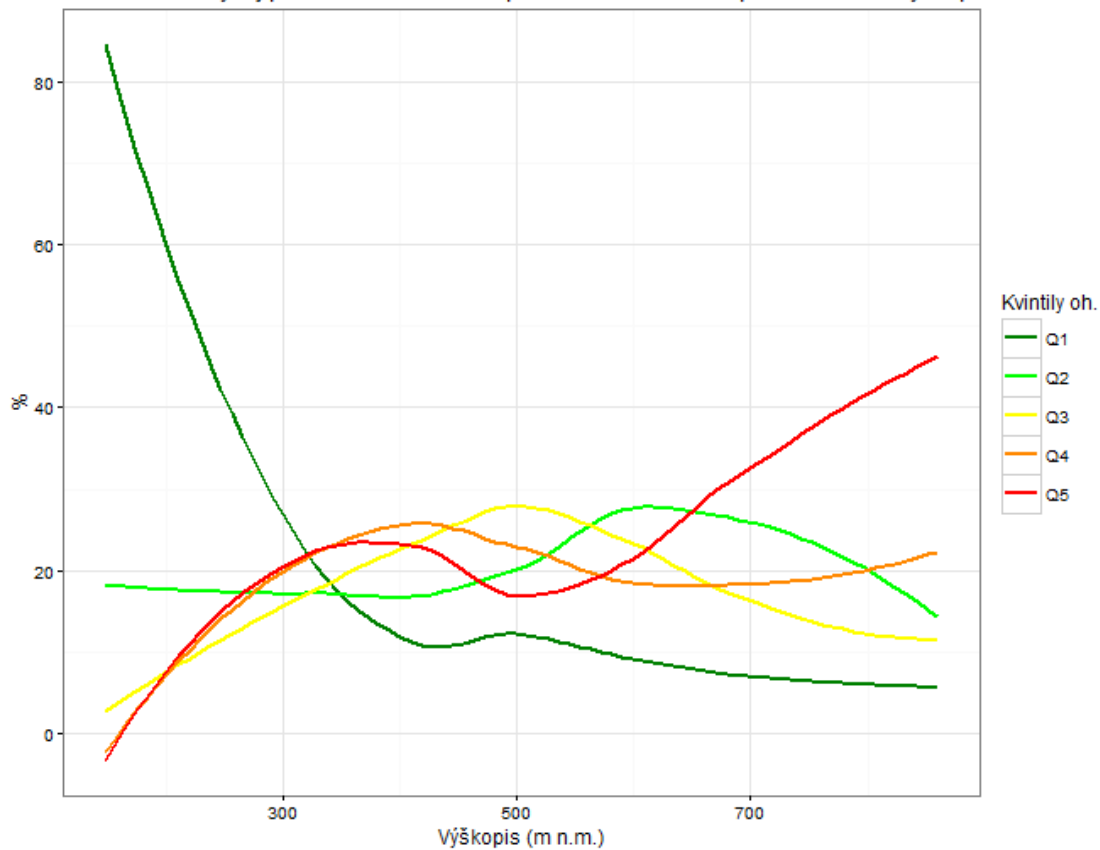
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



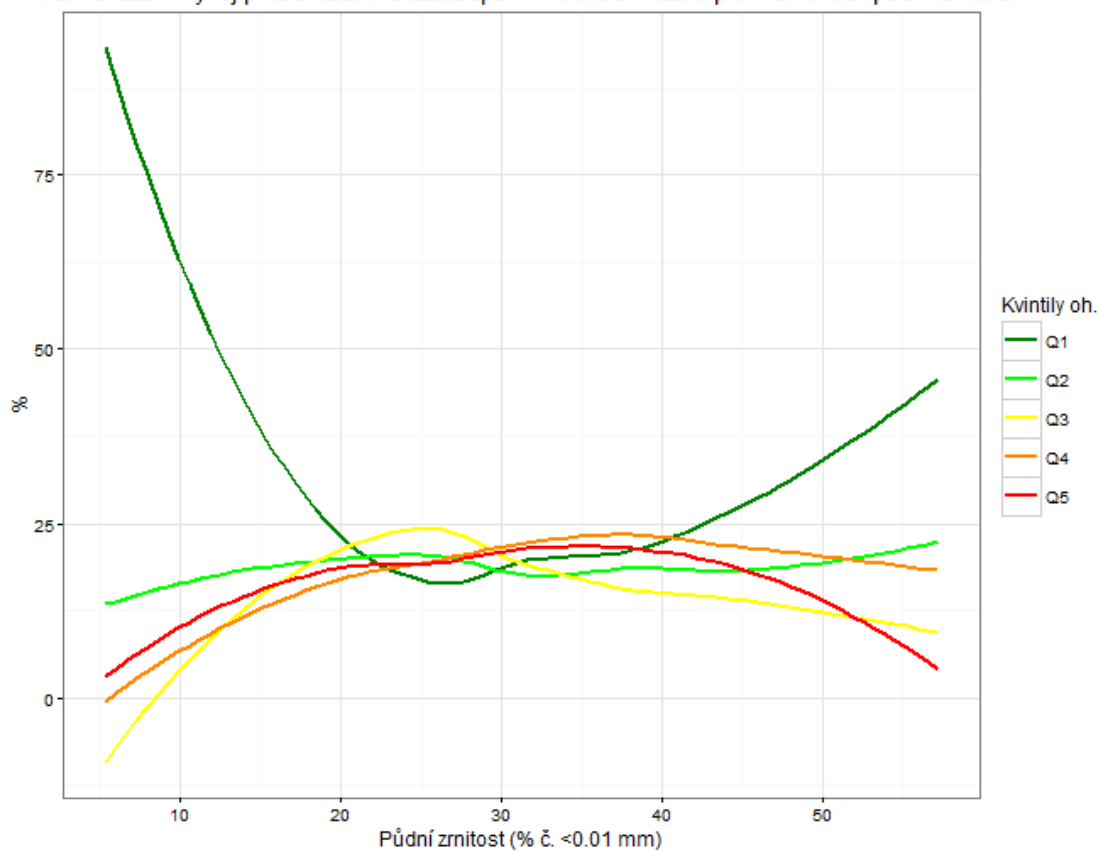
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



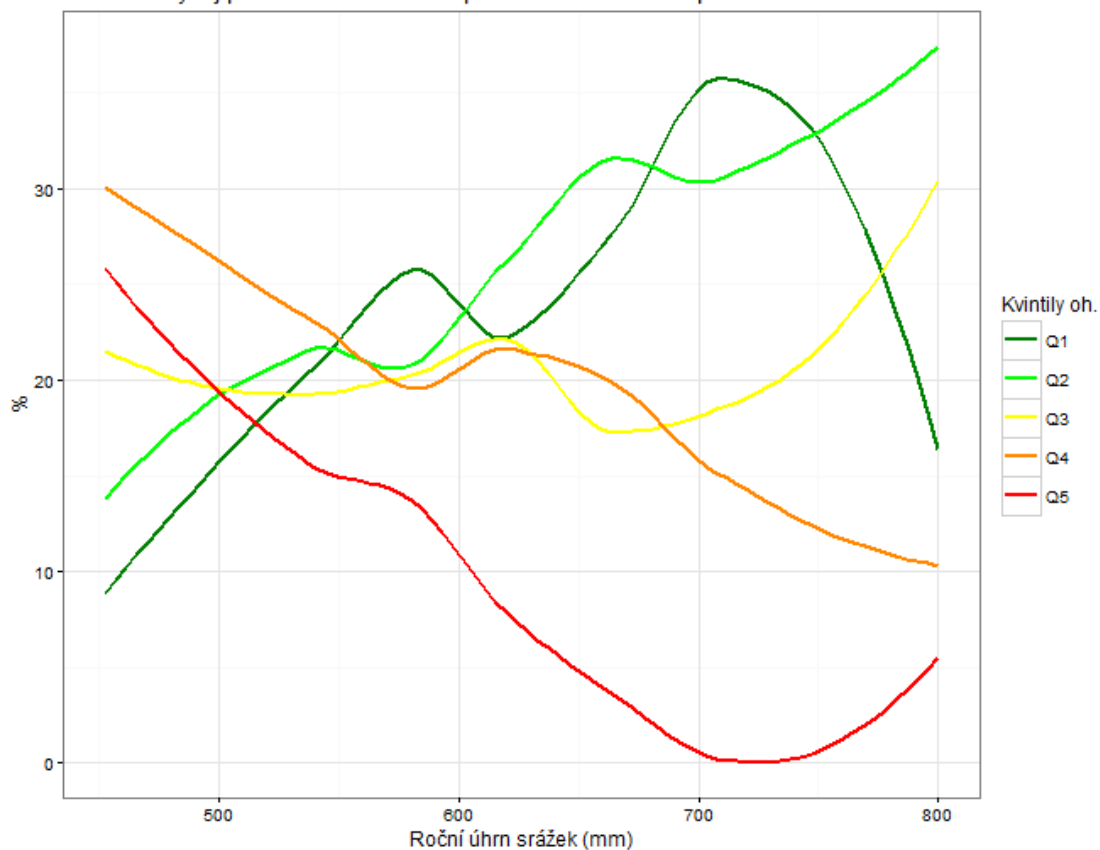
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



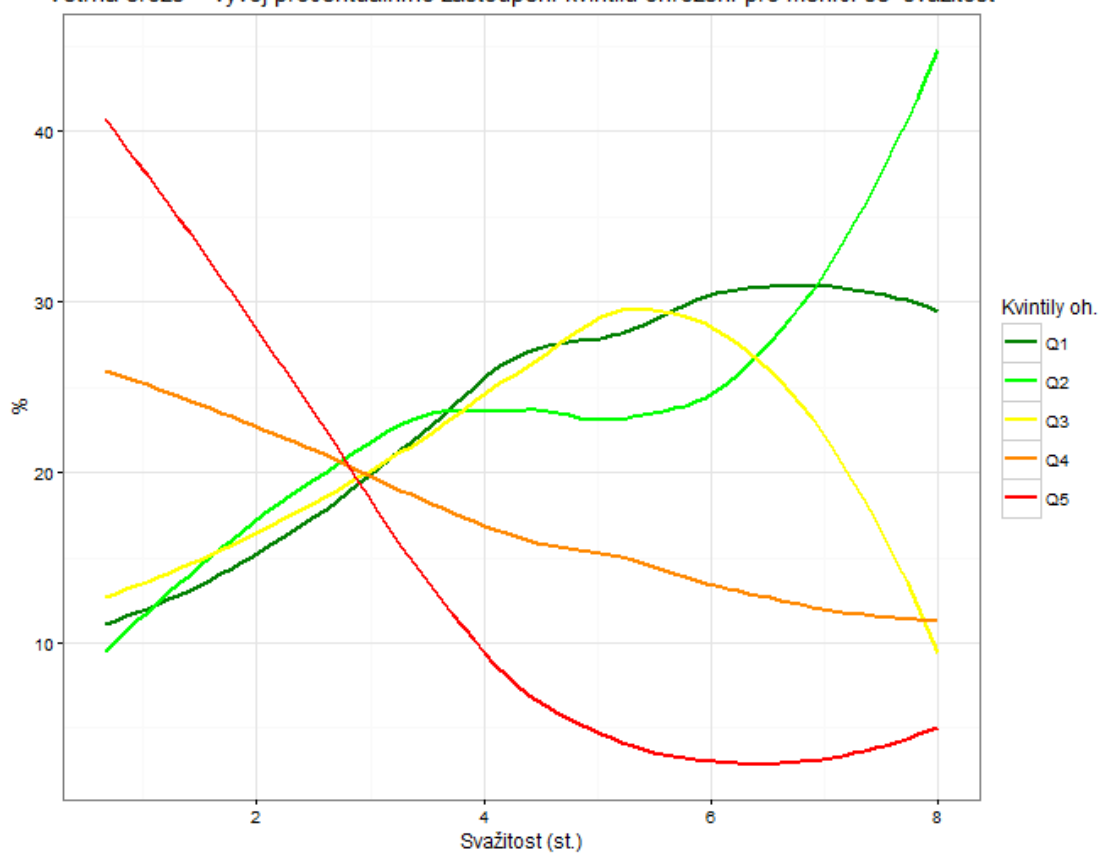
Vodní eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



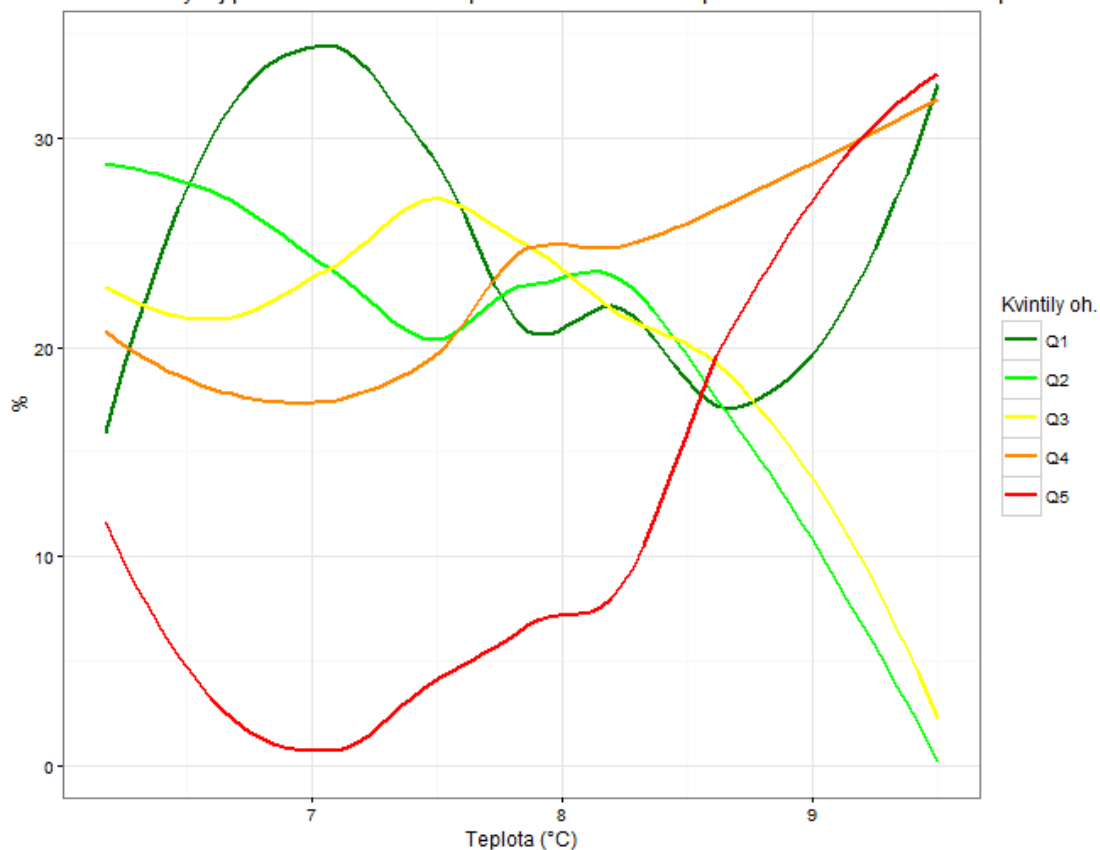
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn srážek



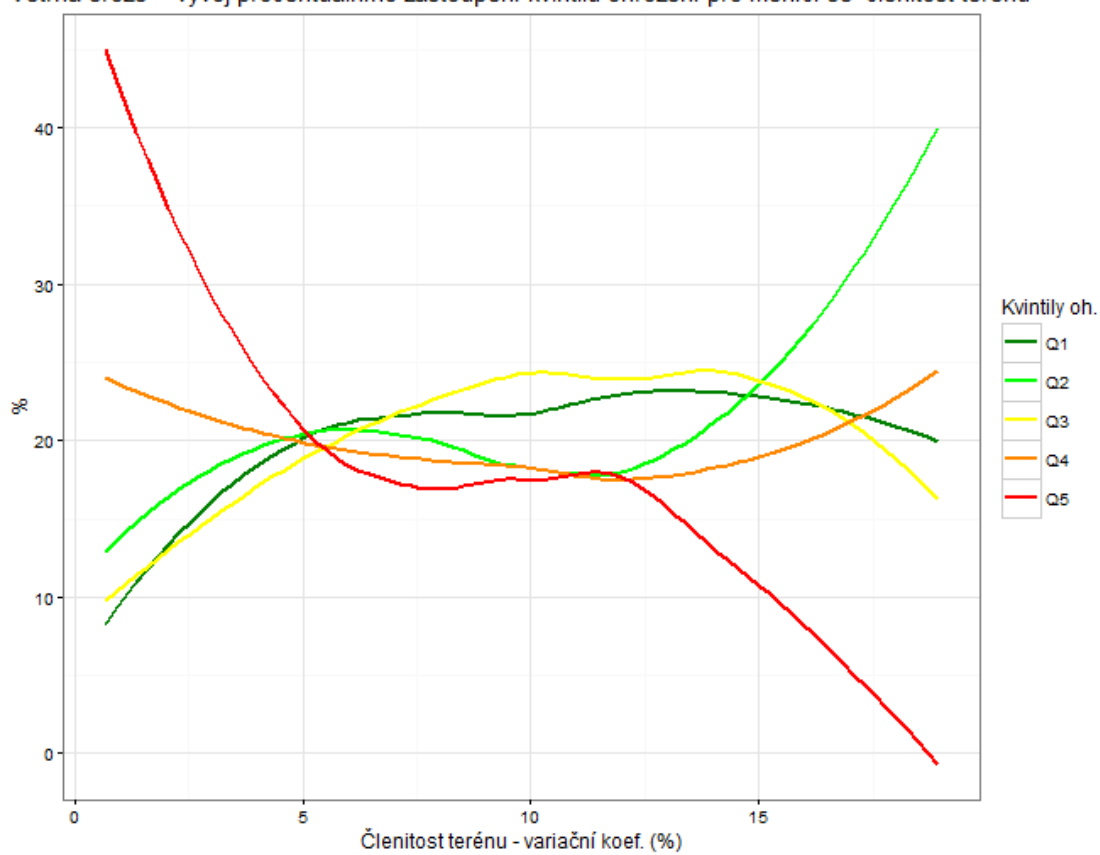
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažítost



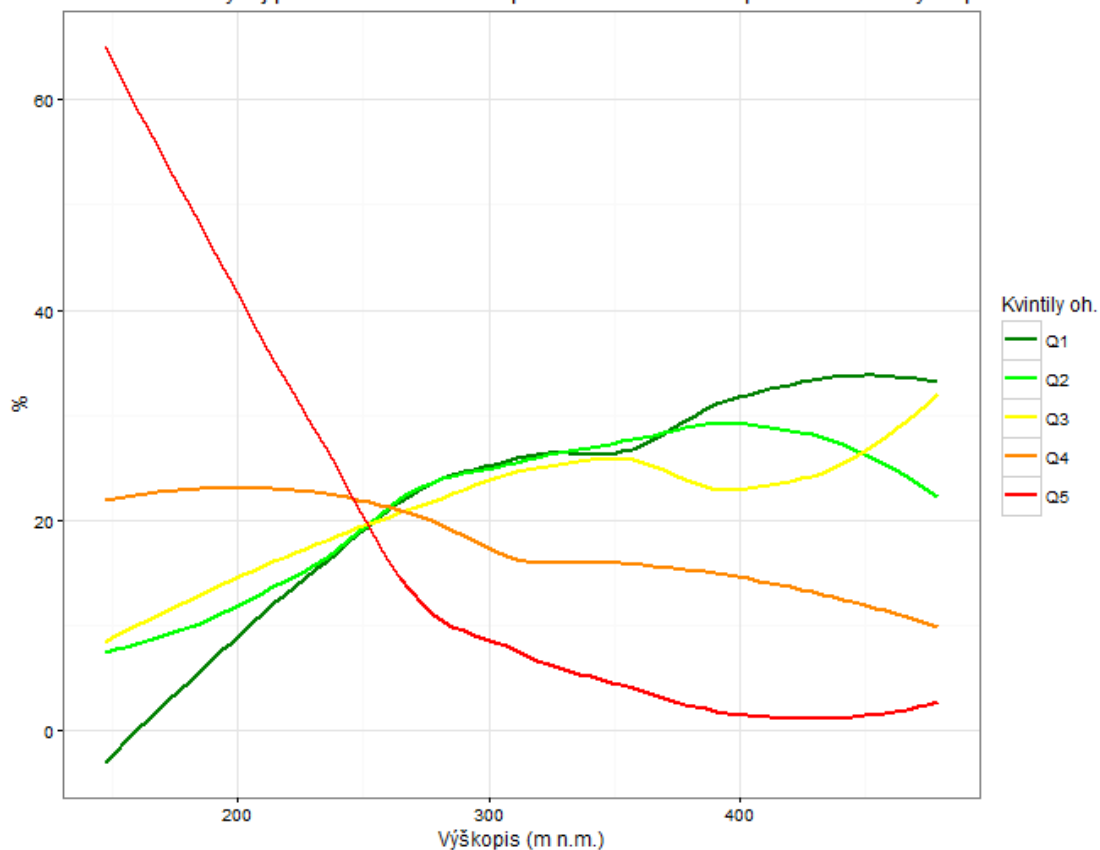
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



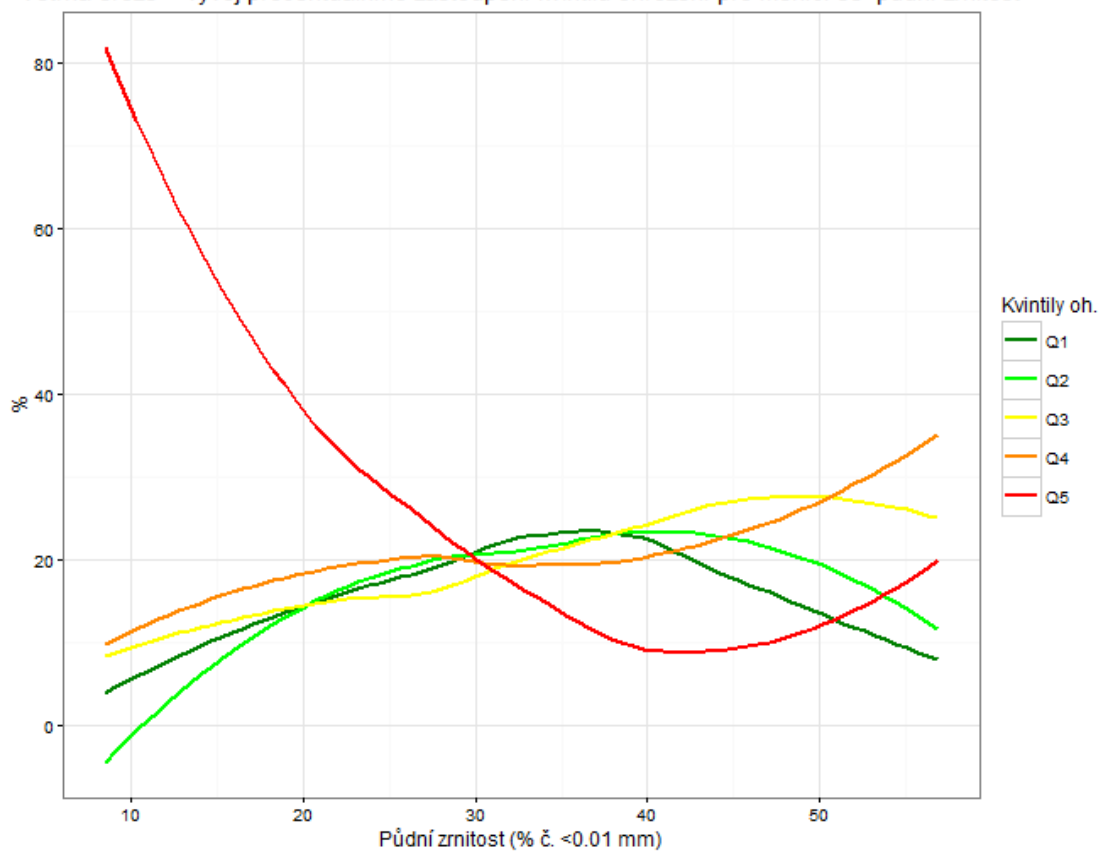
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



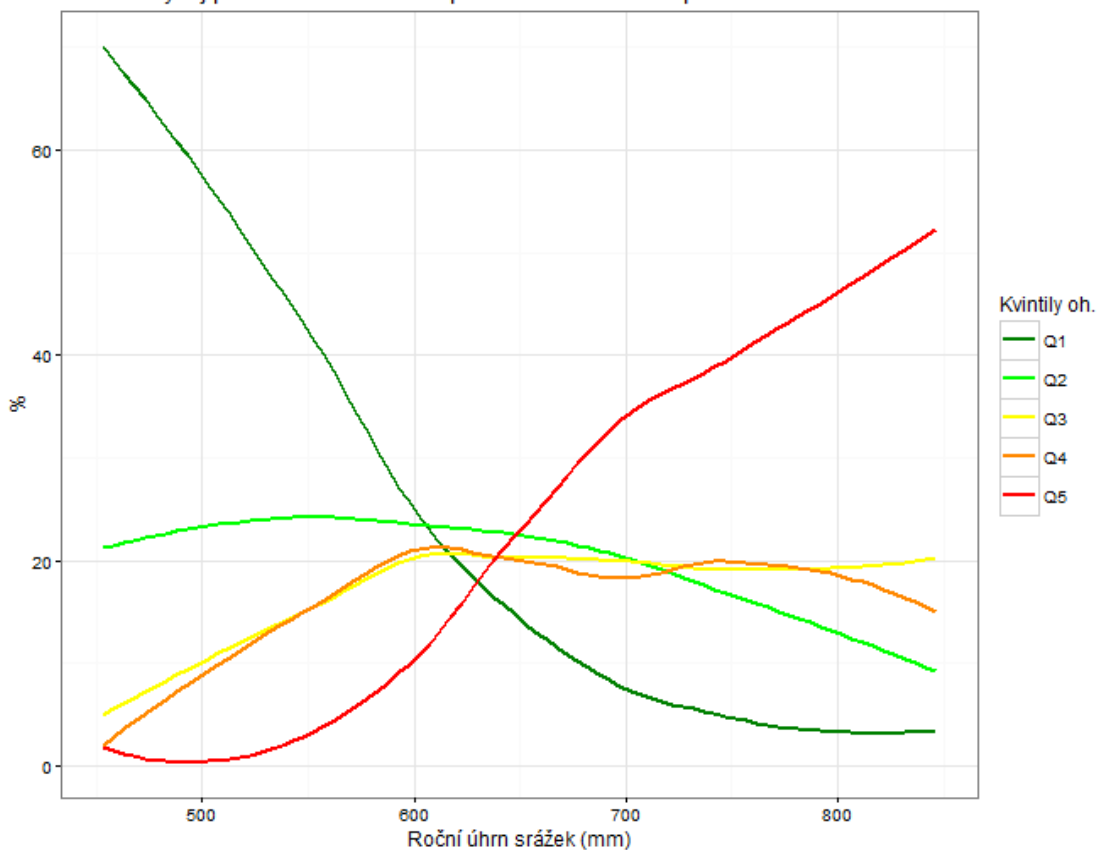
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



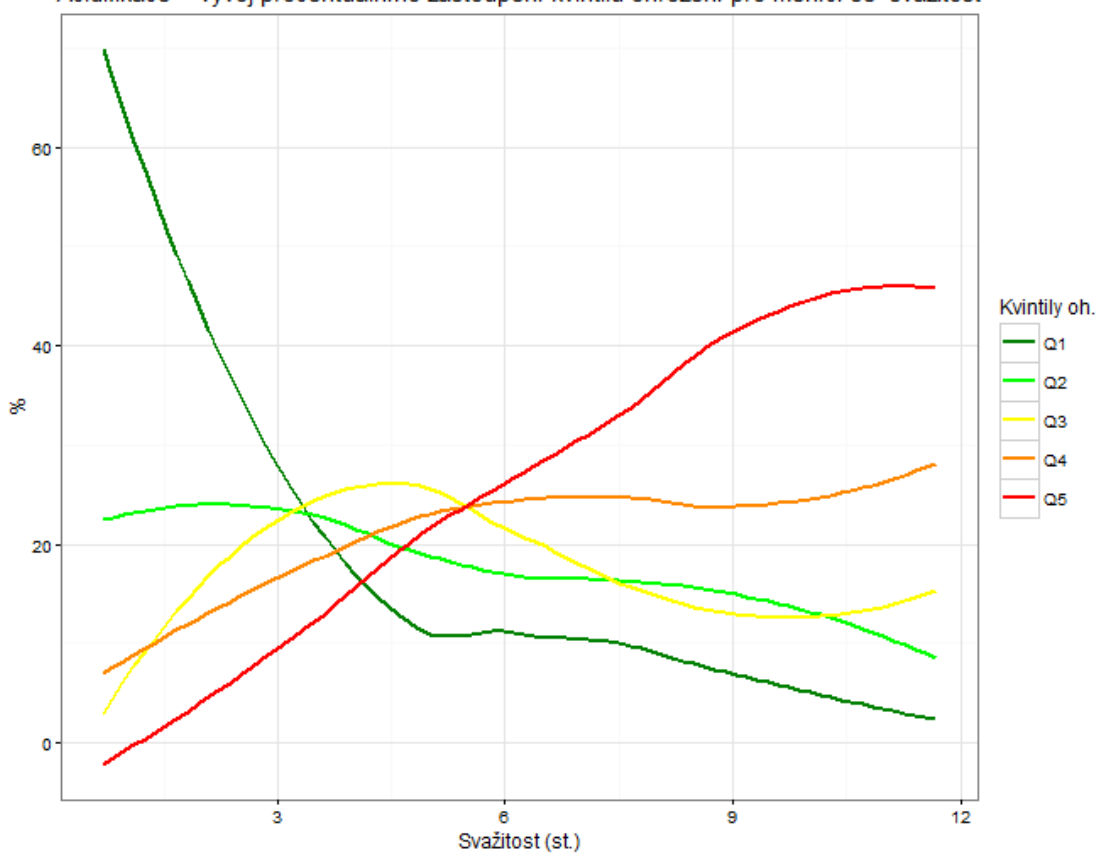
Větrná eroze - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



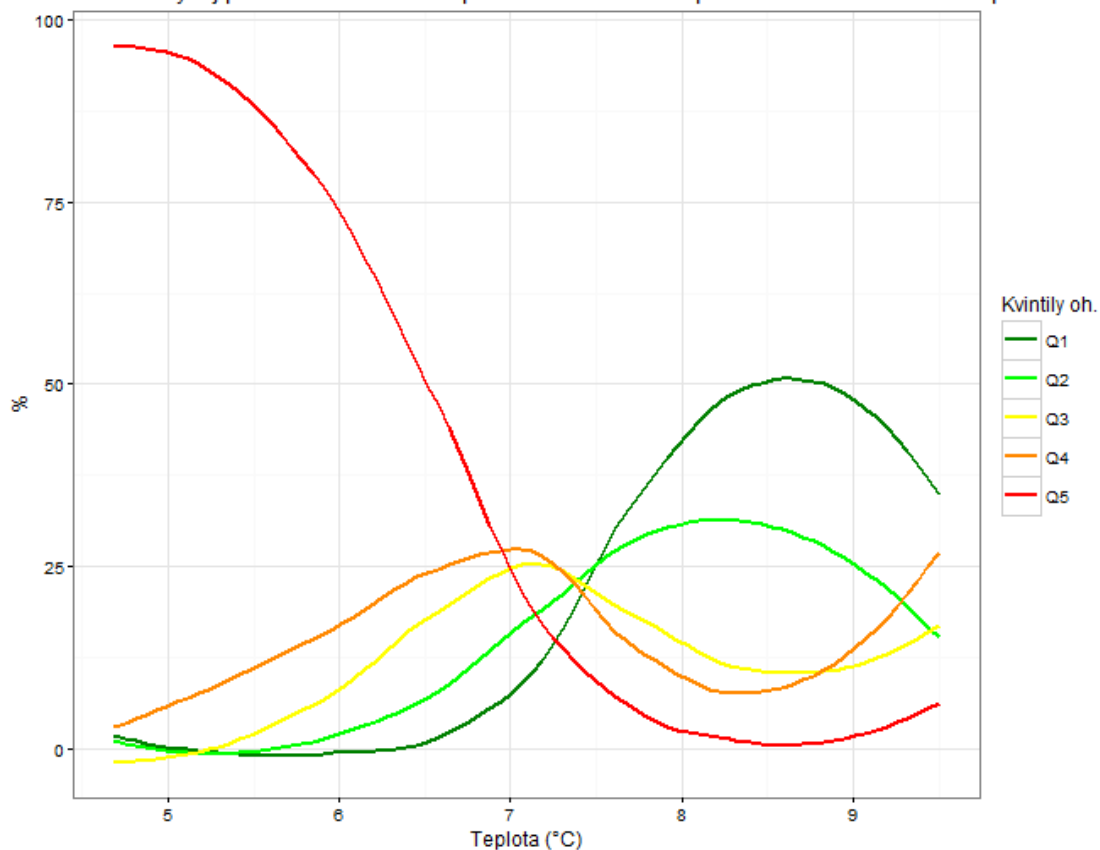
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn srážek



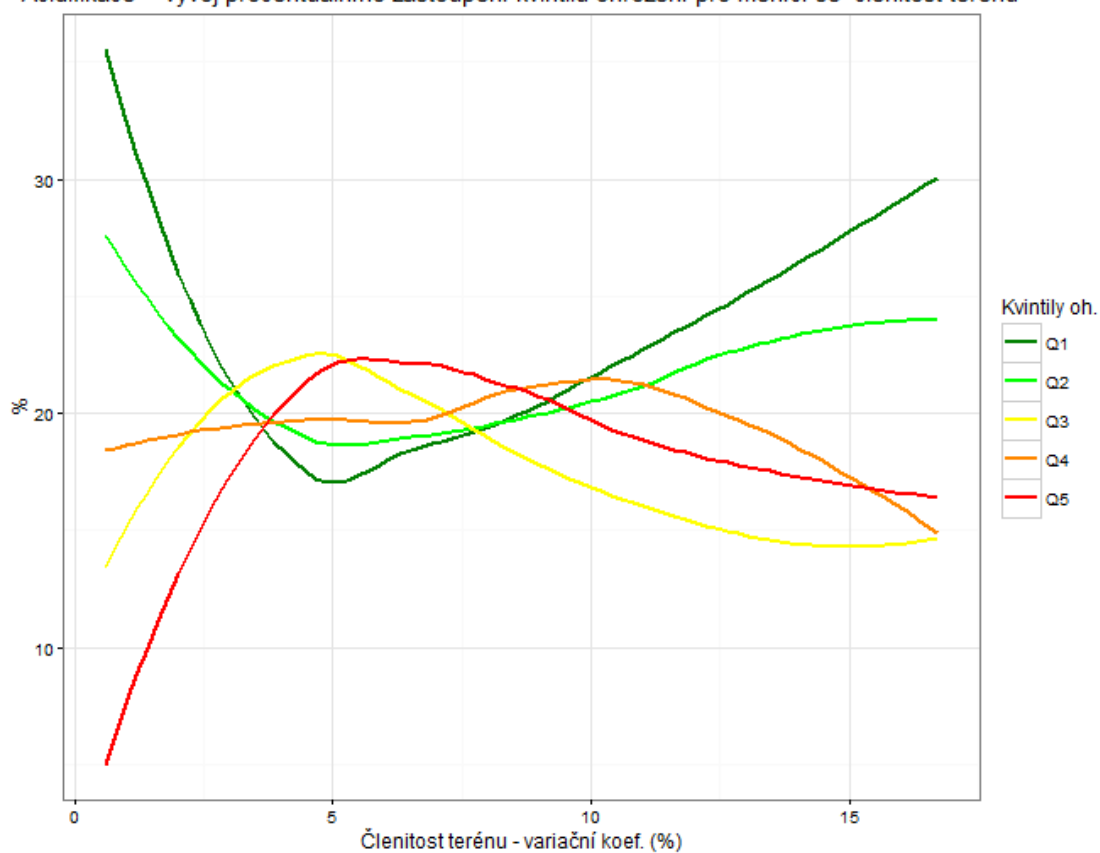
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



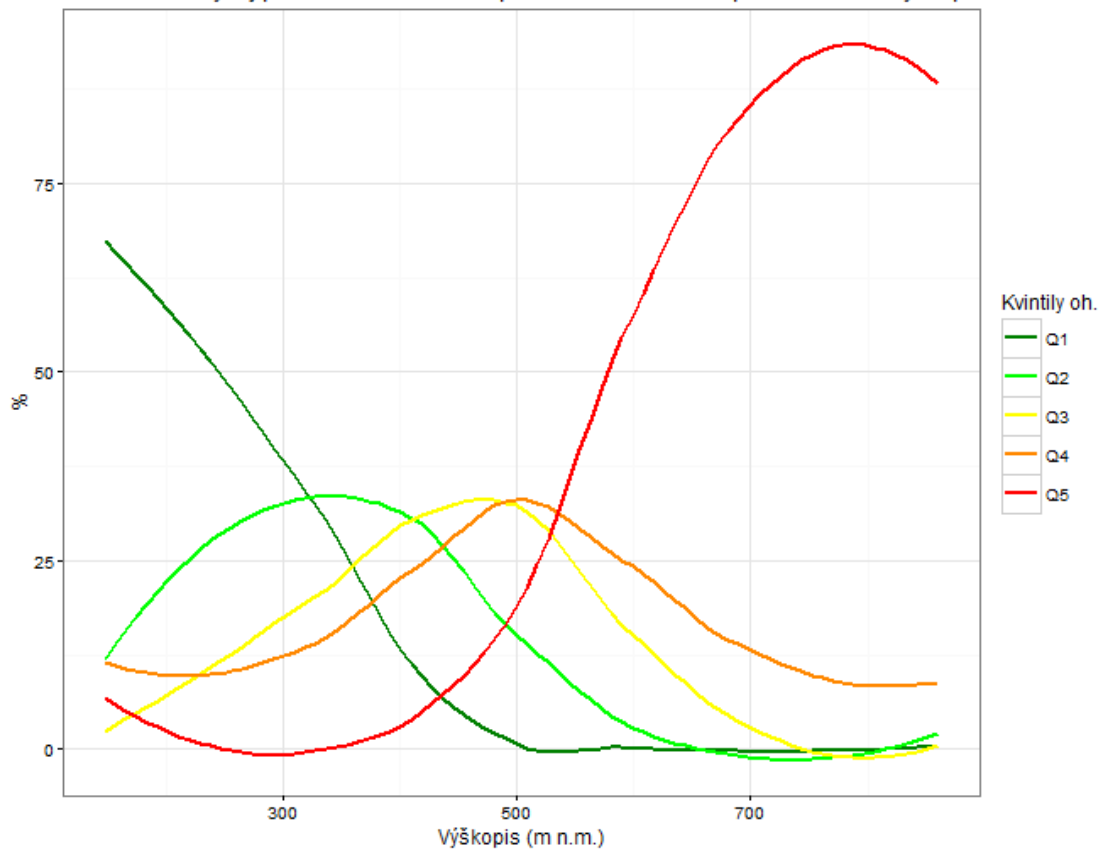
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



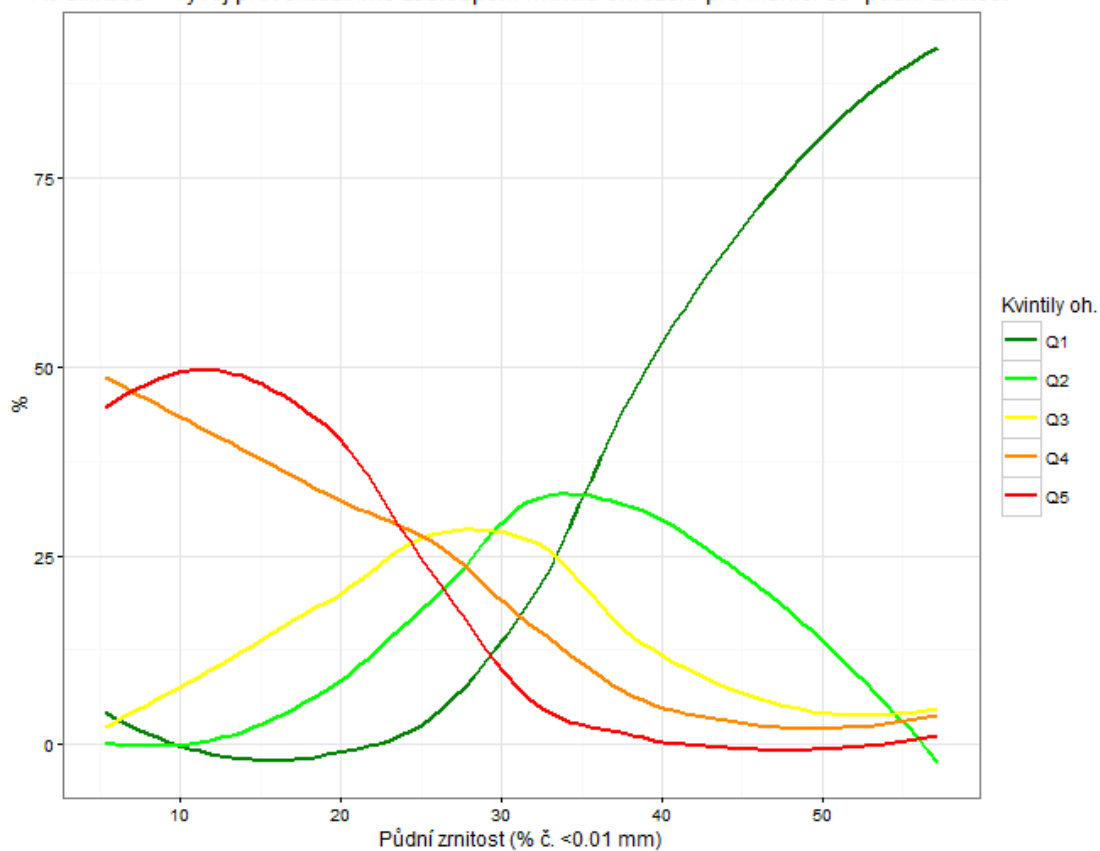
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



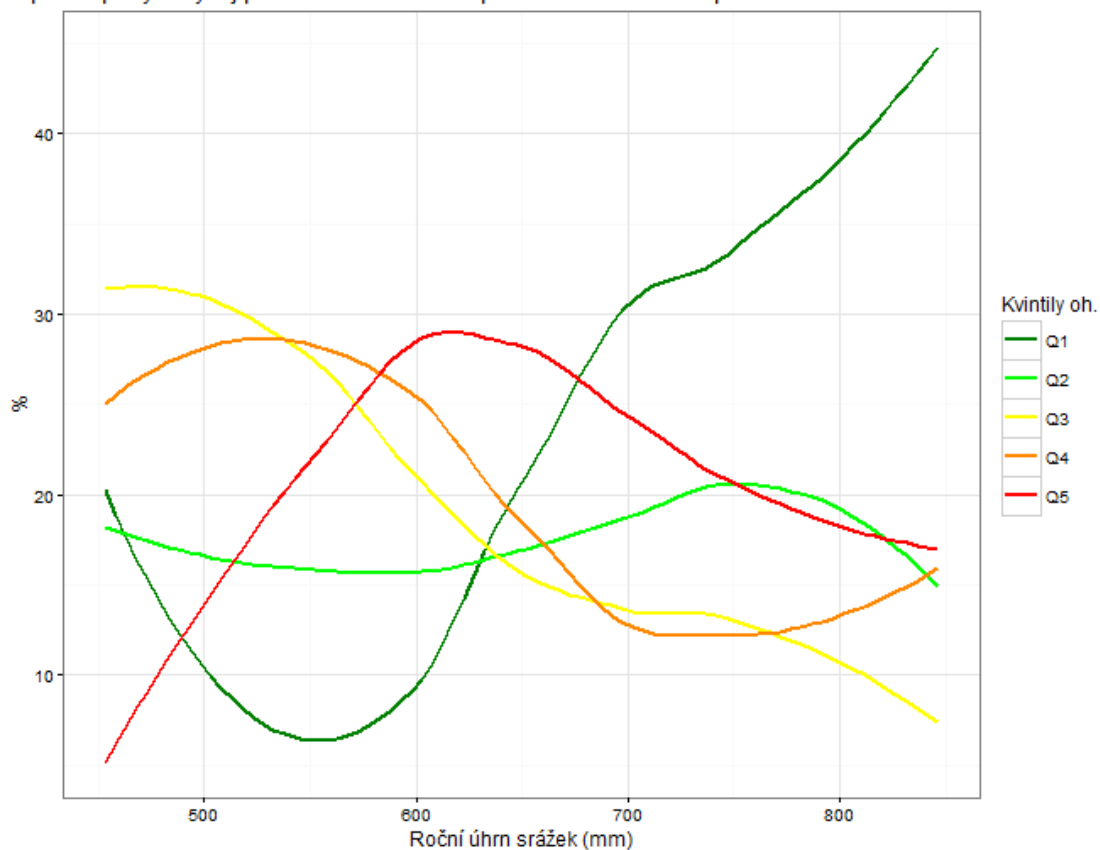
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



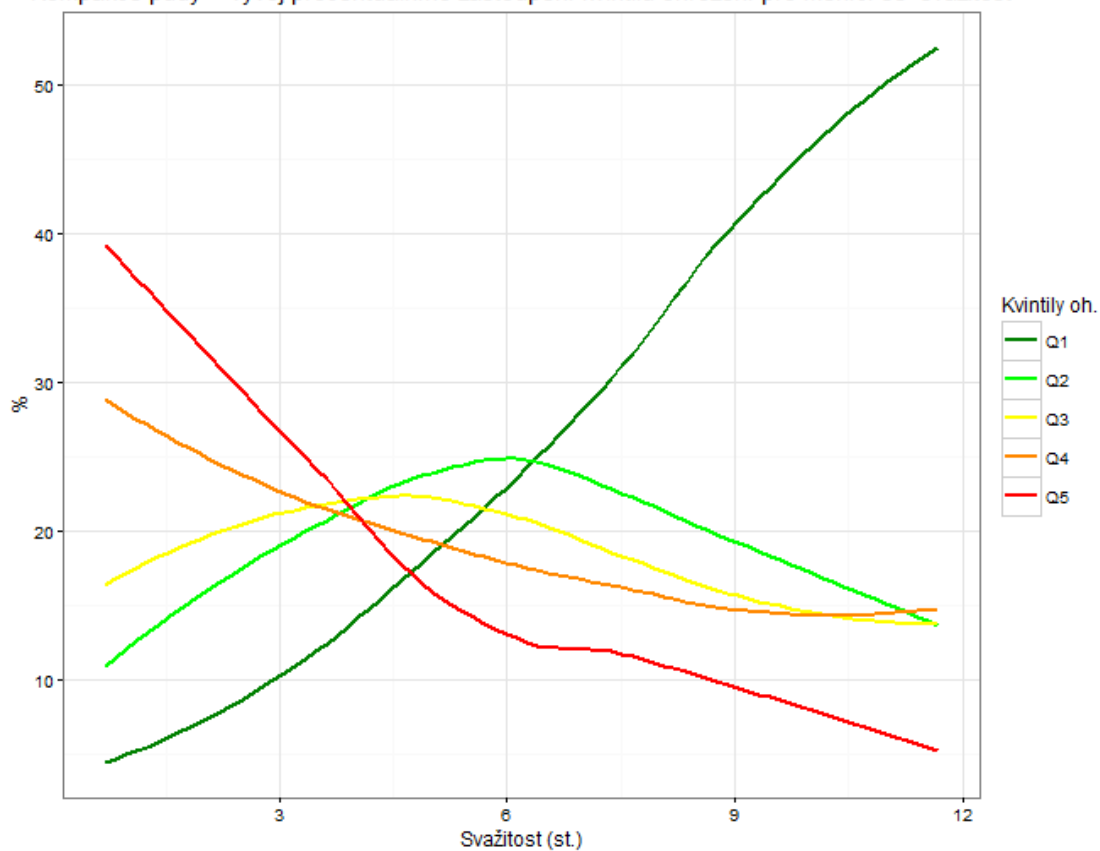
Acidifikace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



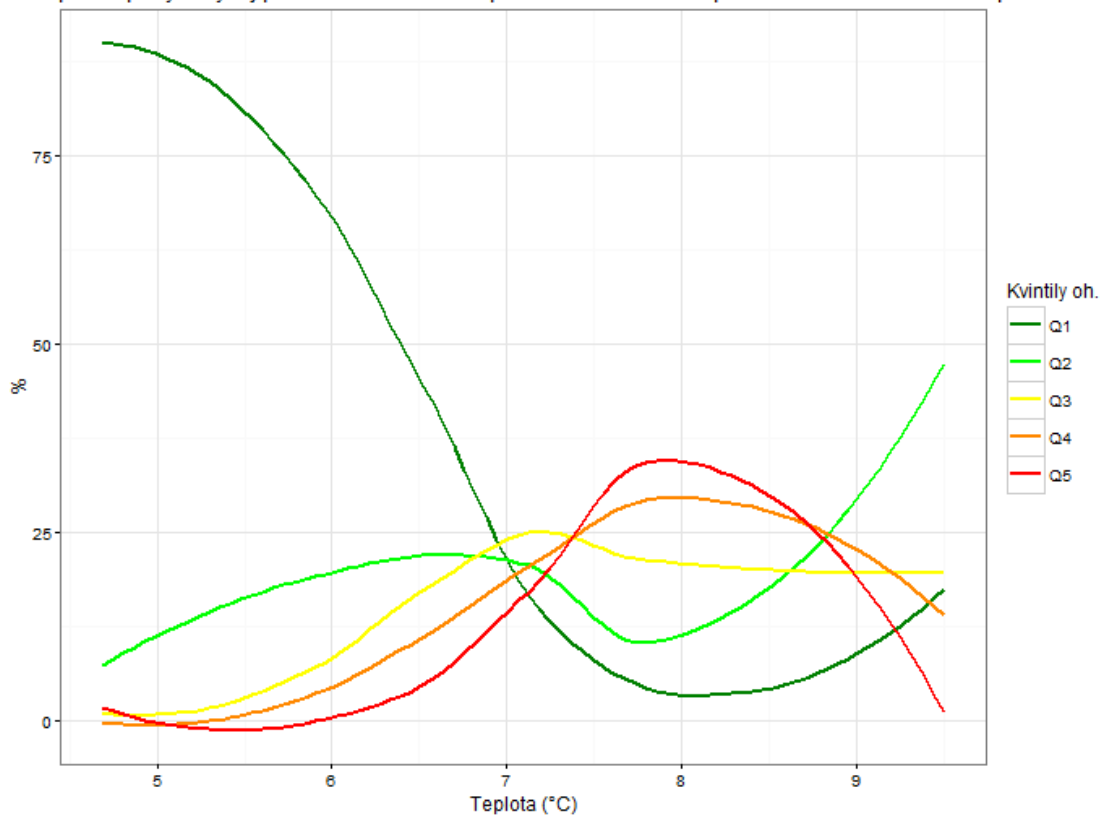
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn srážek



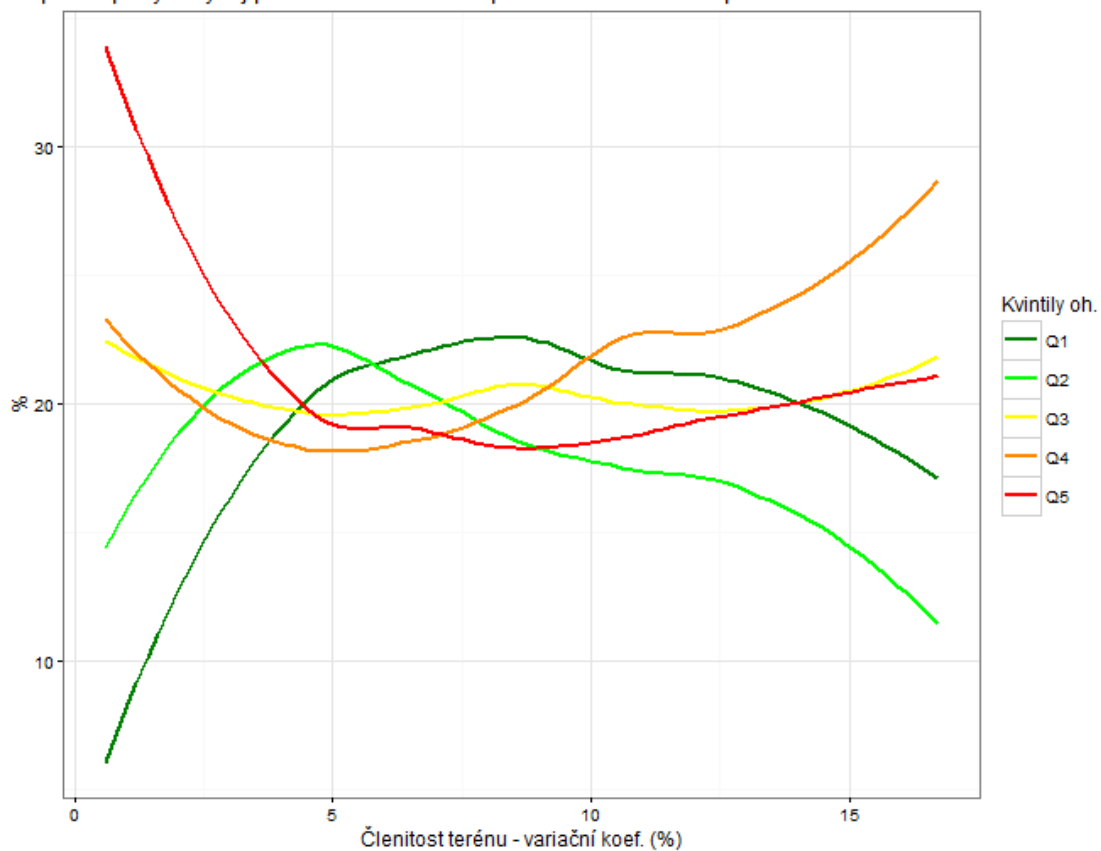
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



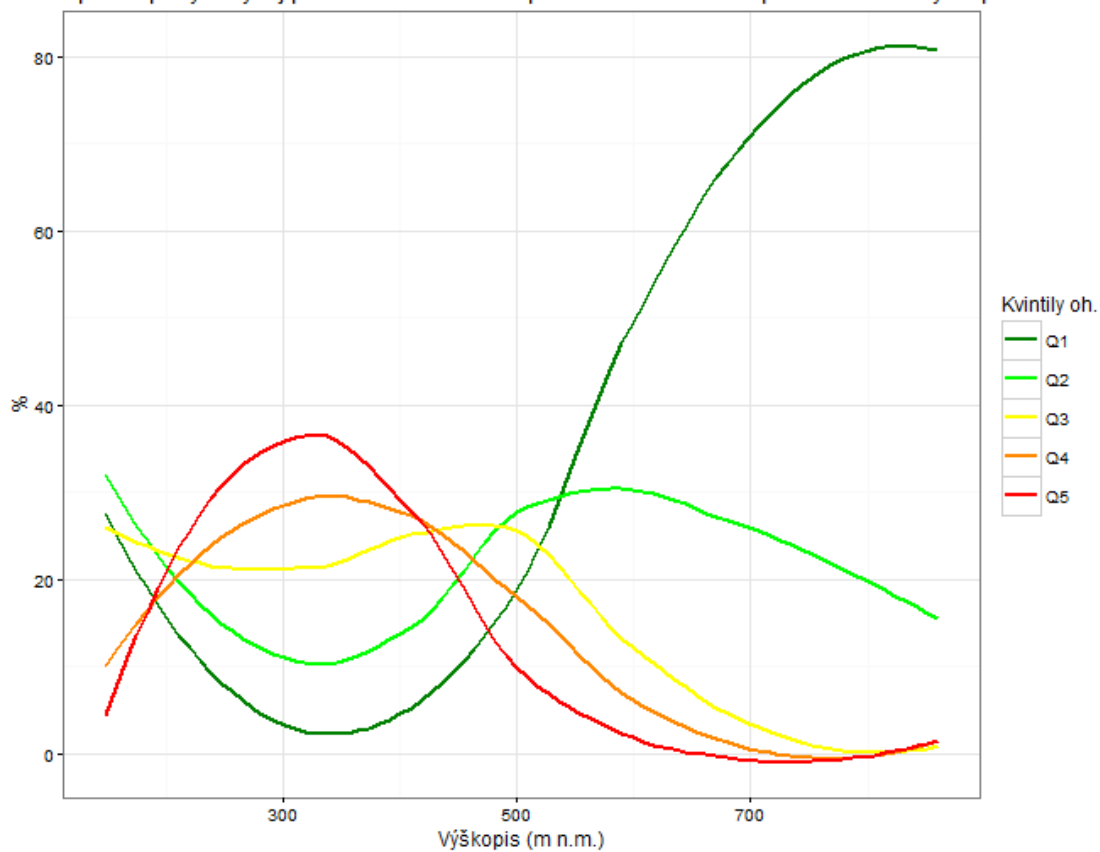
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



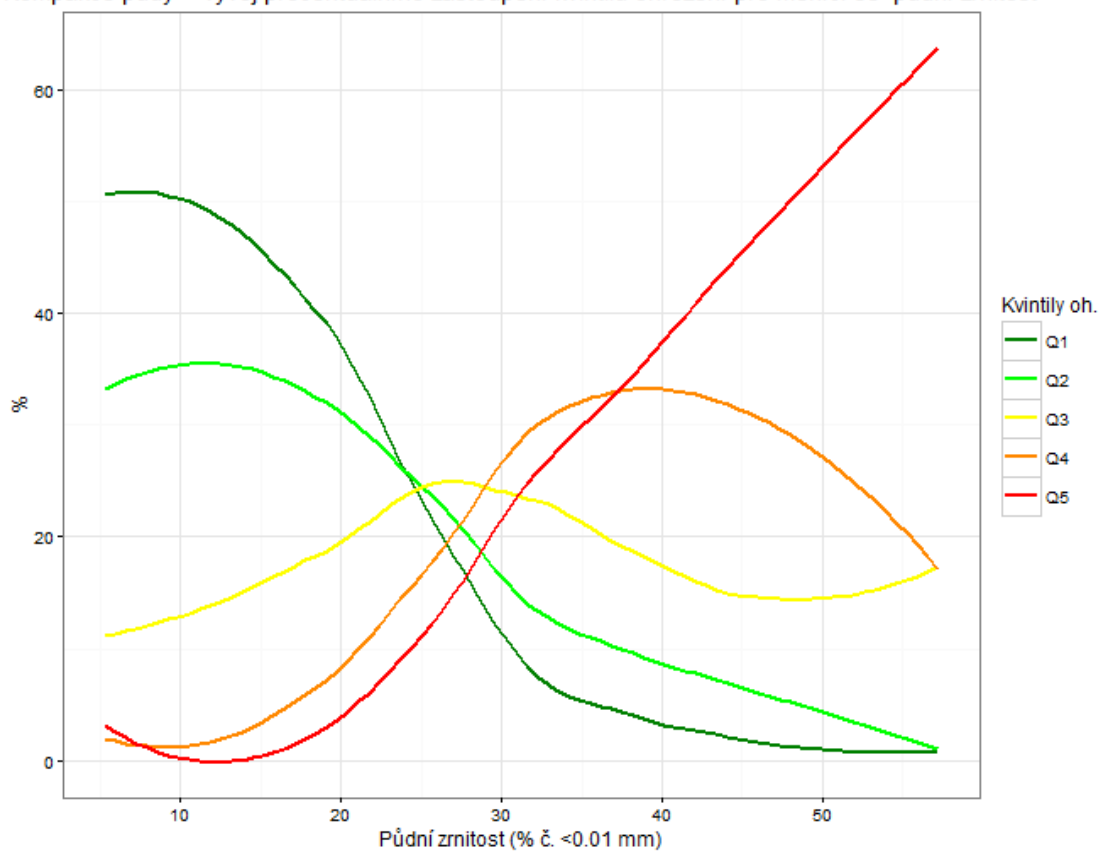
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



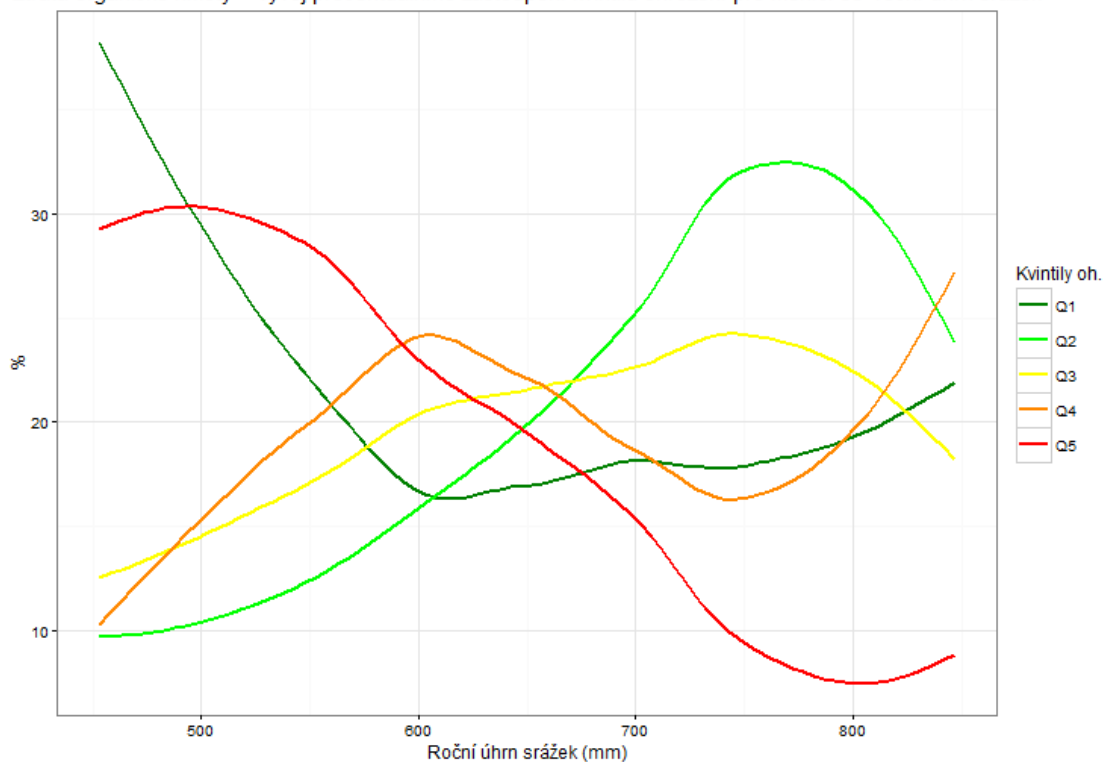
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



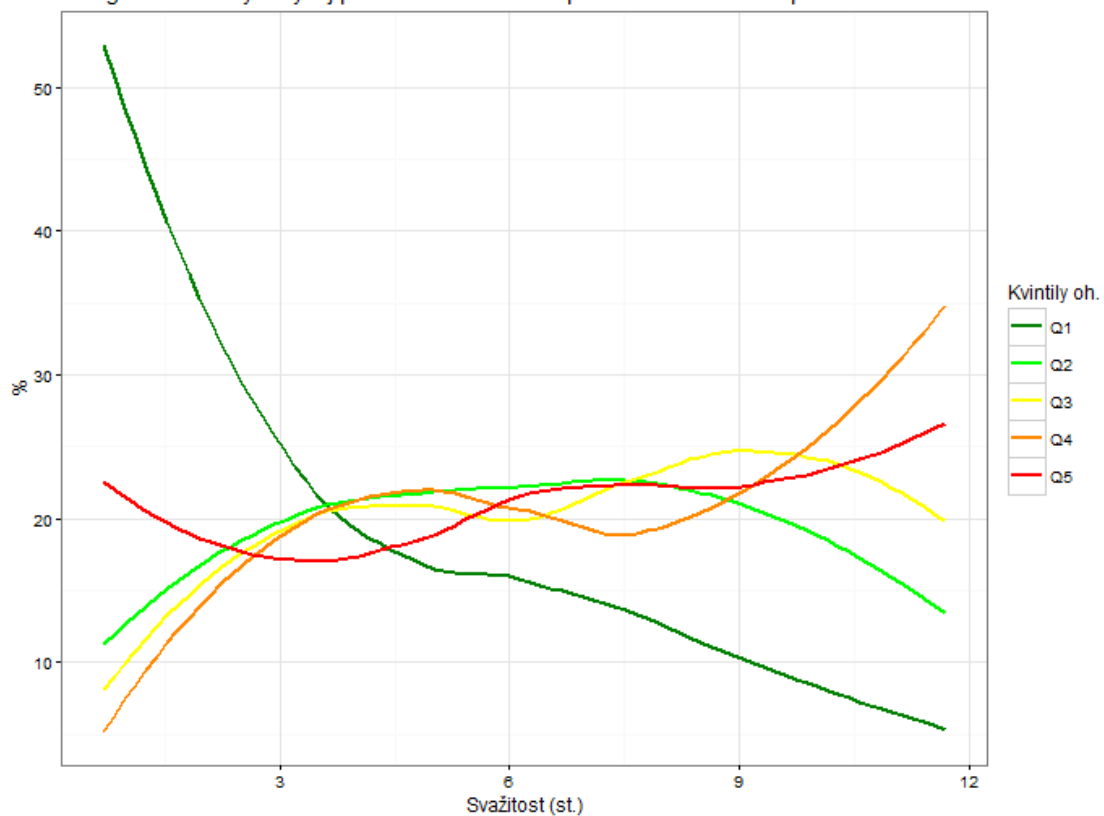
Kompakce půdy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



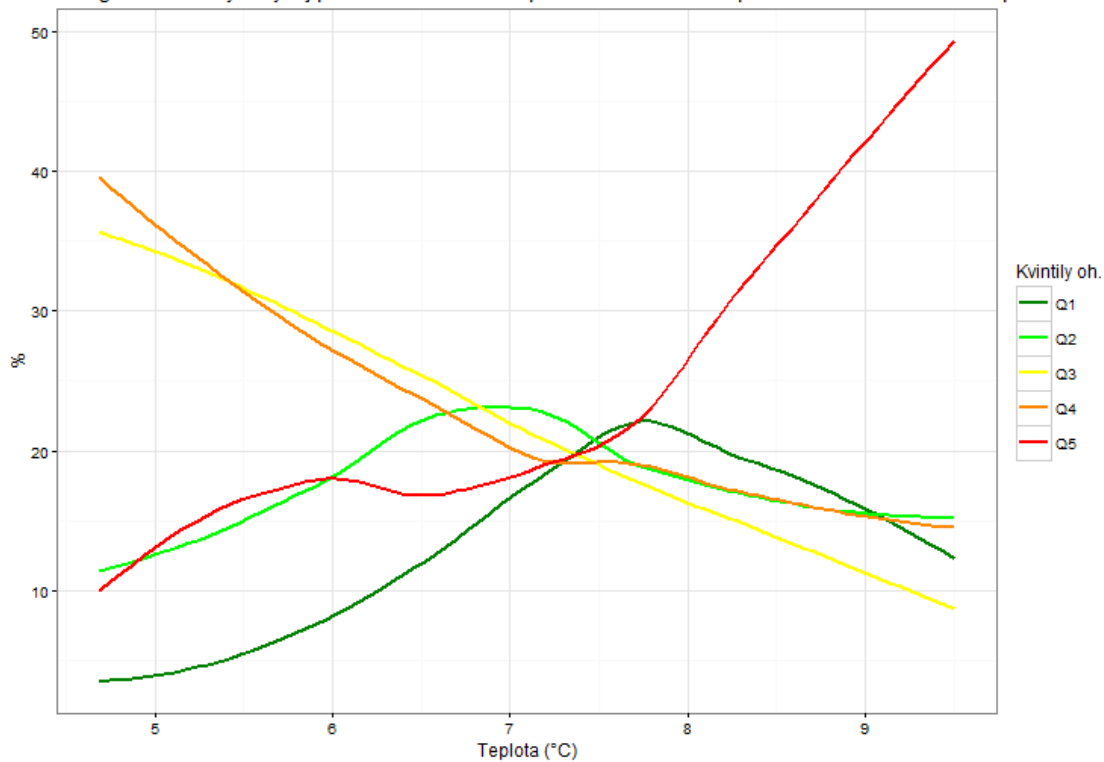
Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhm srážek



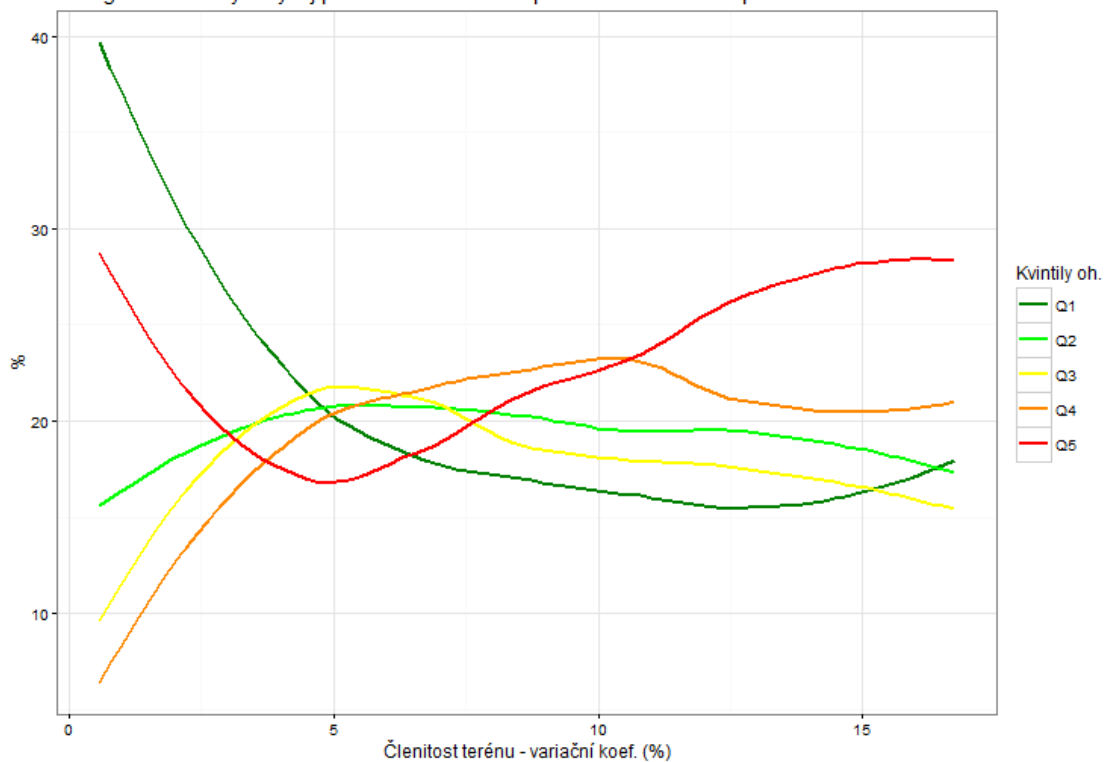
Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



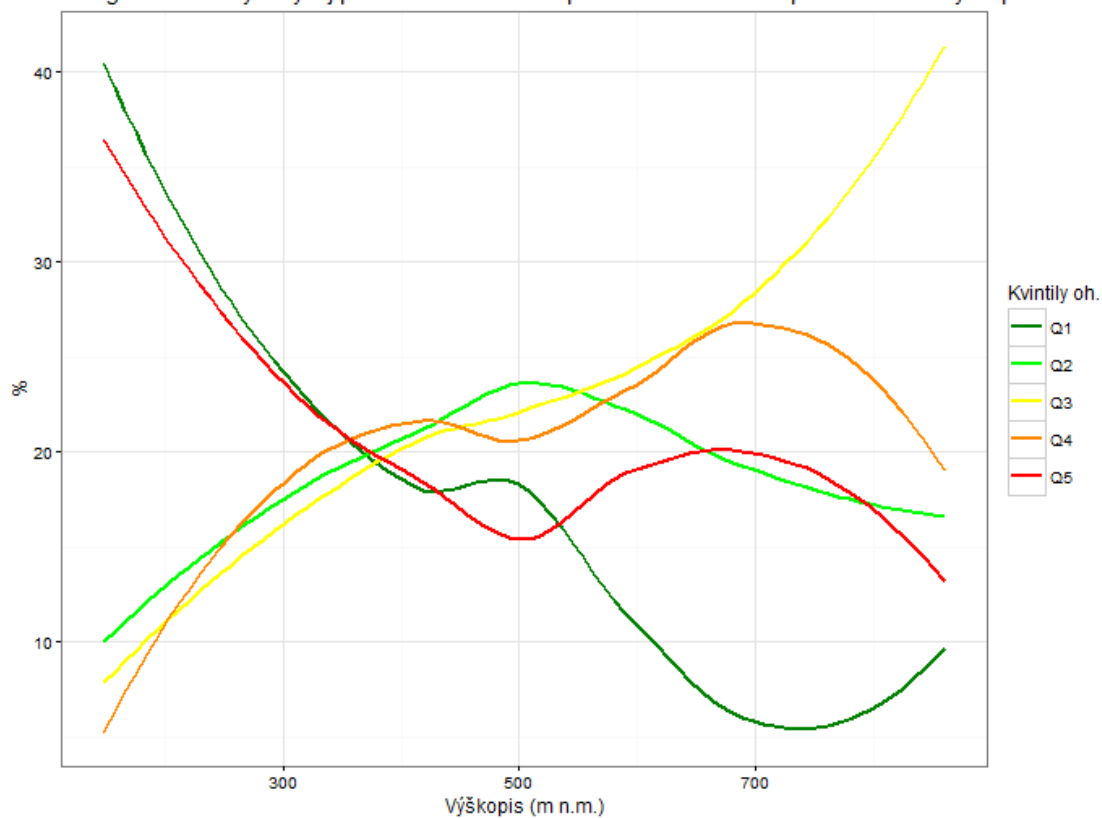
Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



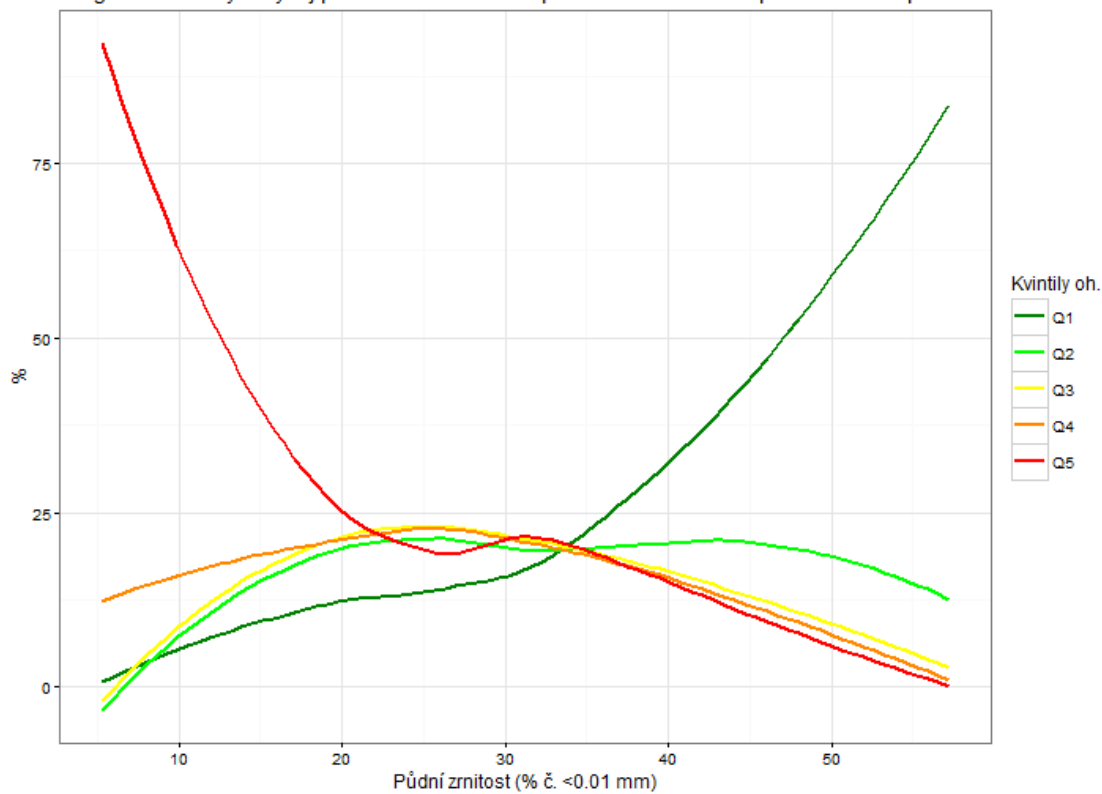
Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



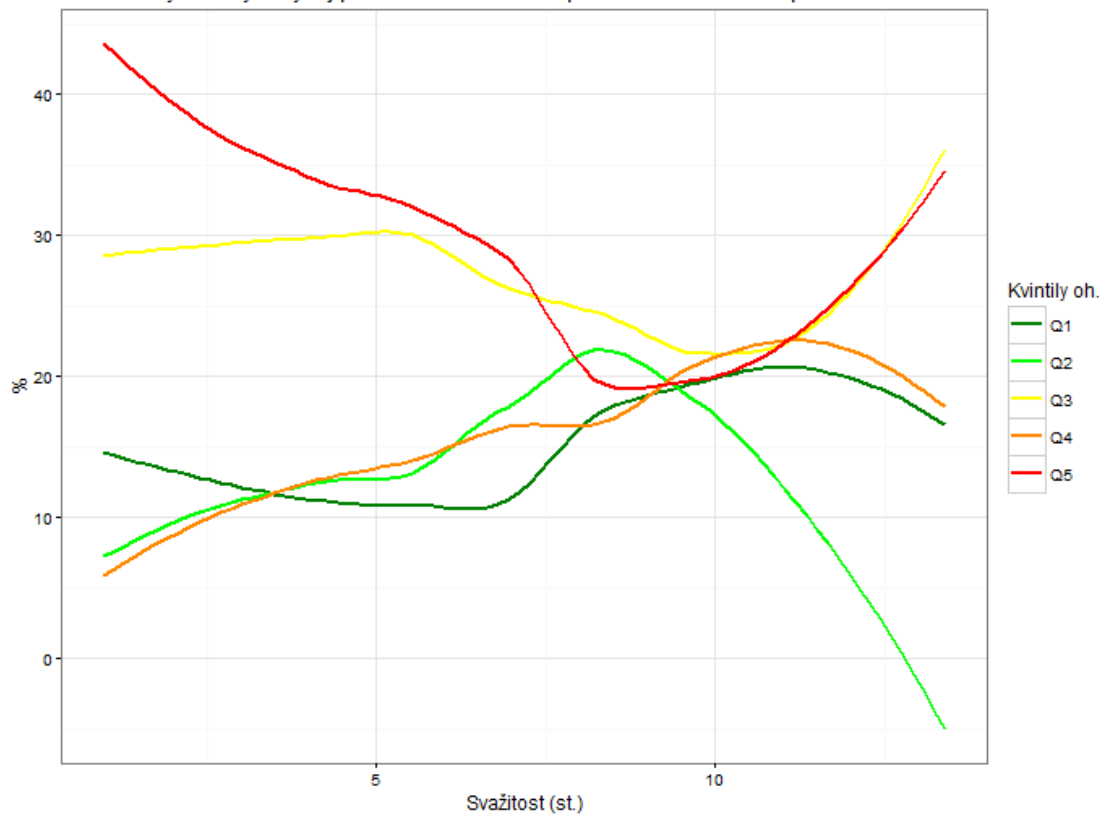
Ztráta organické hmoty - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



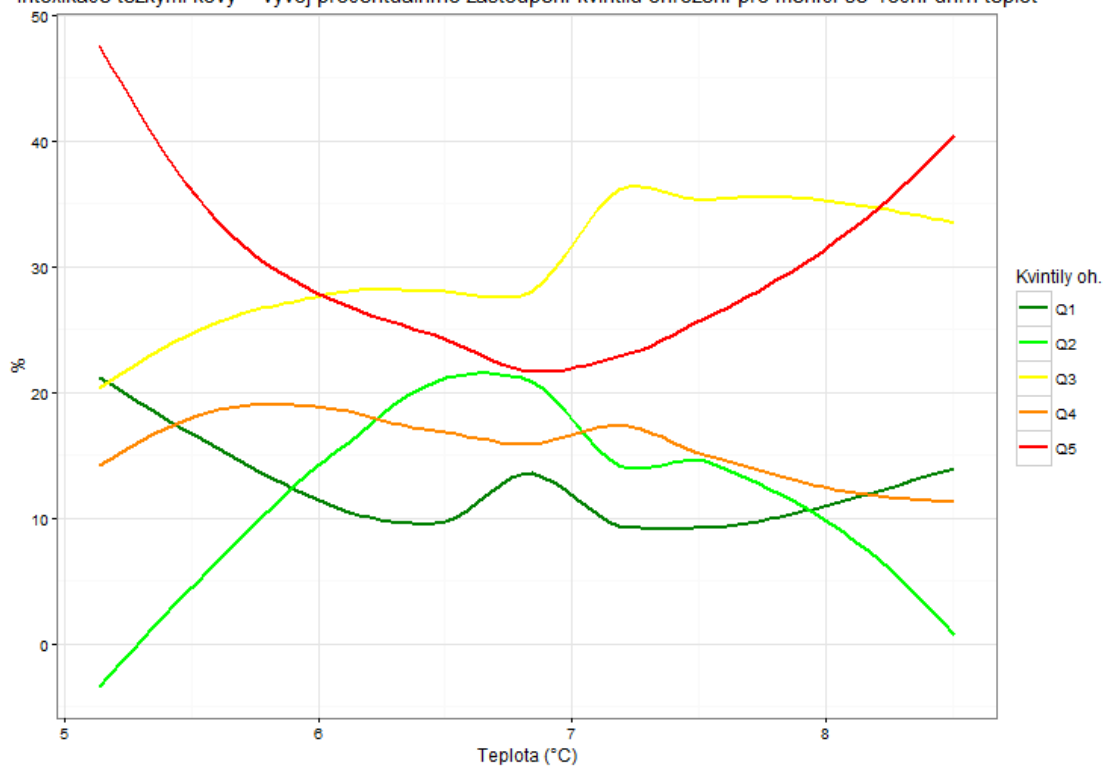
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhm srážek



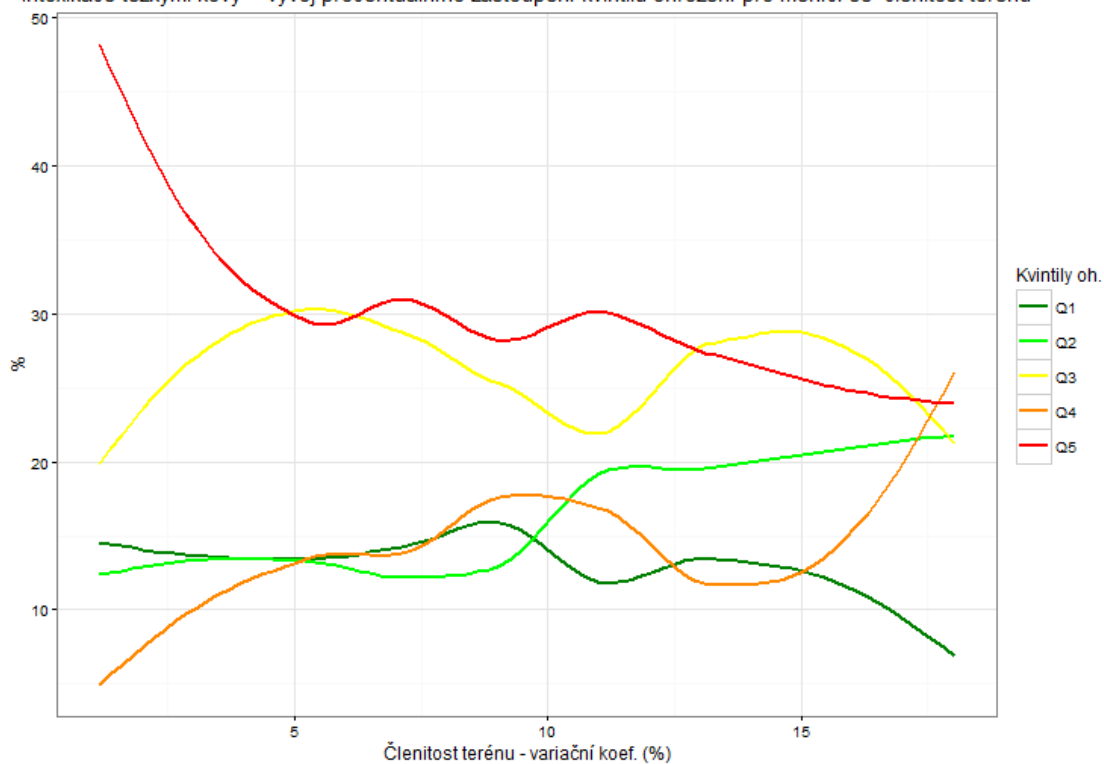
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



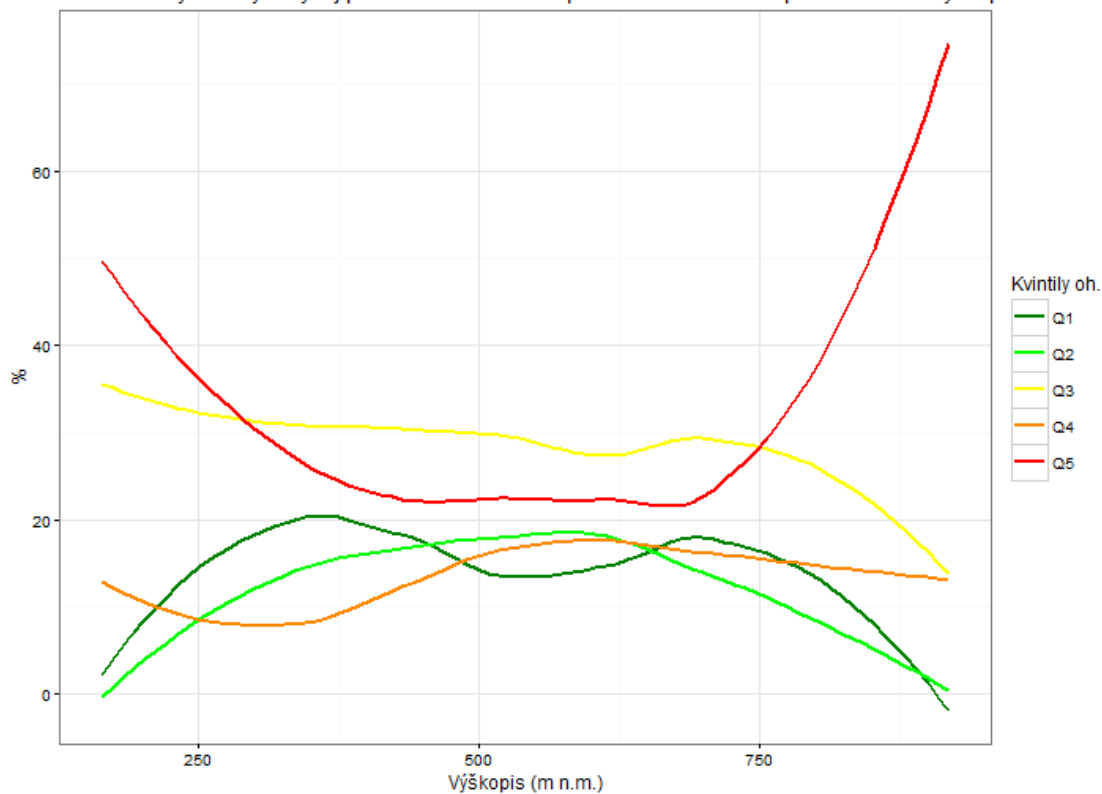
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



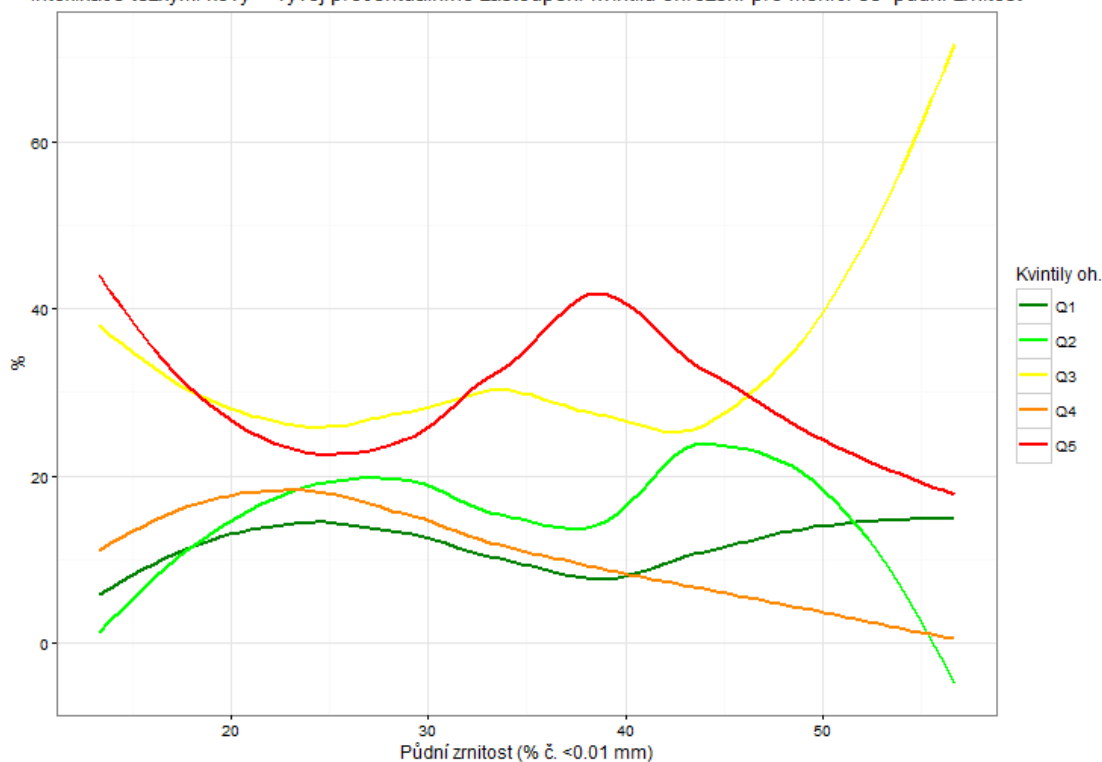
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



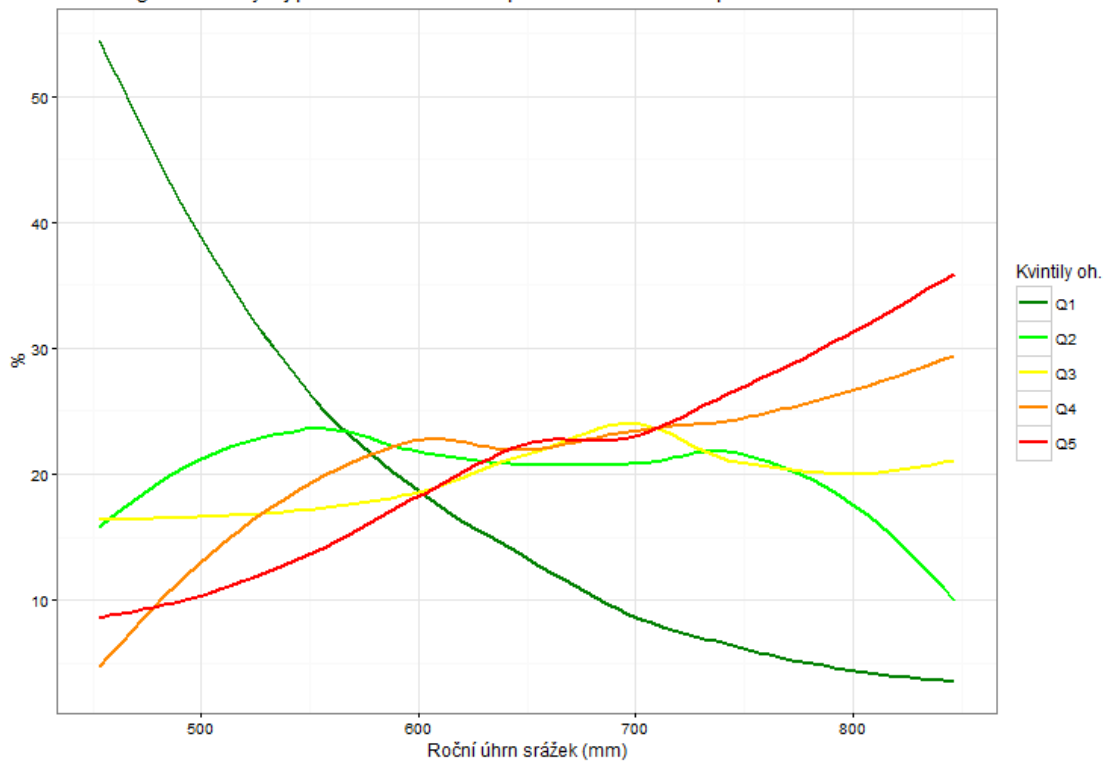
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



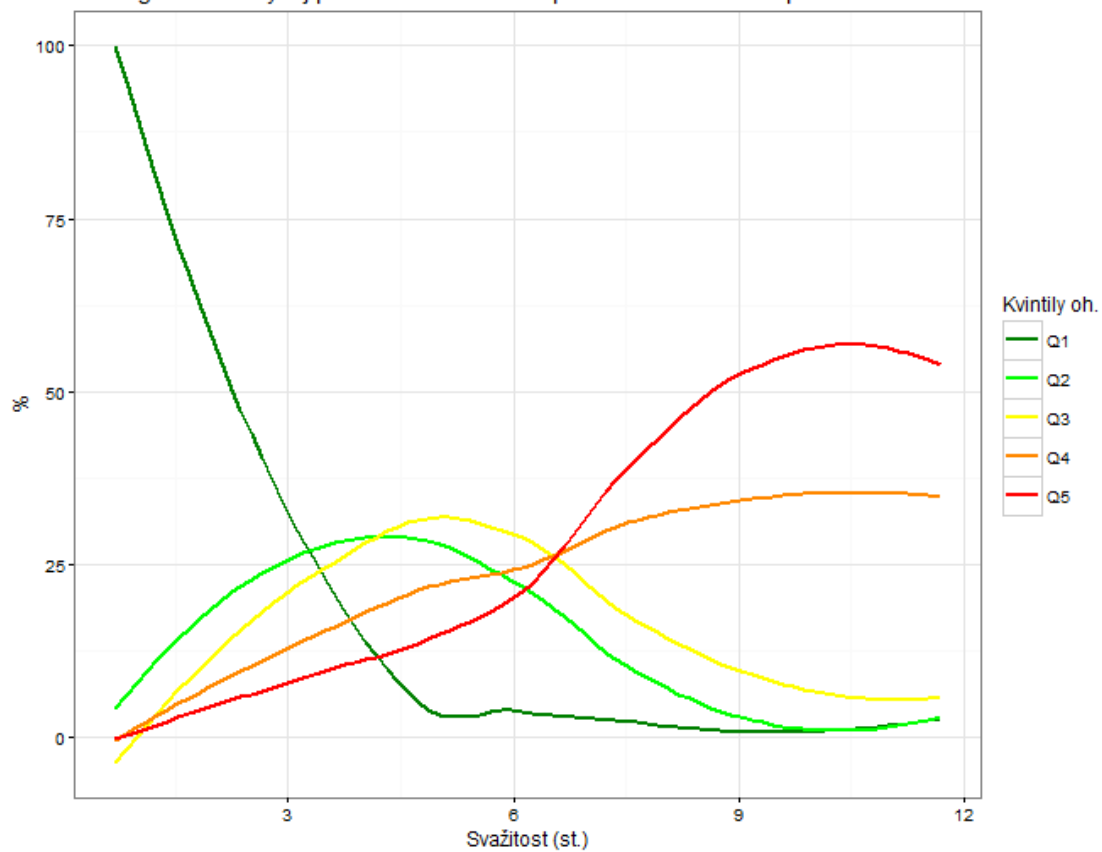
Intoxikace těžkými kovy - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



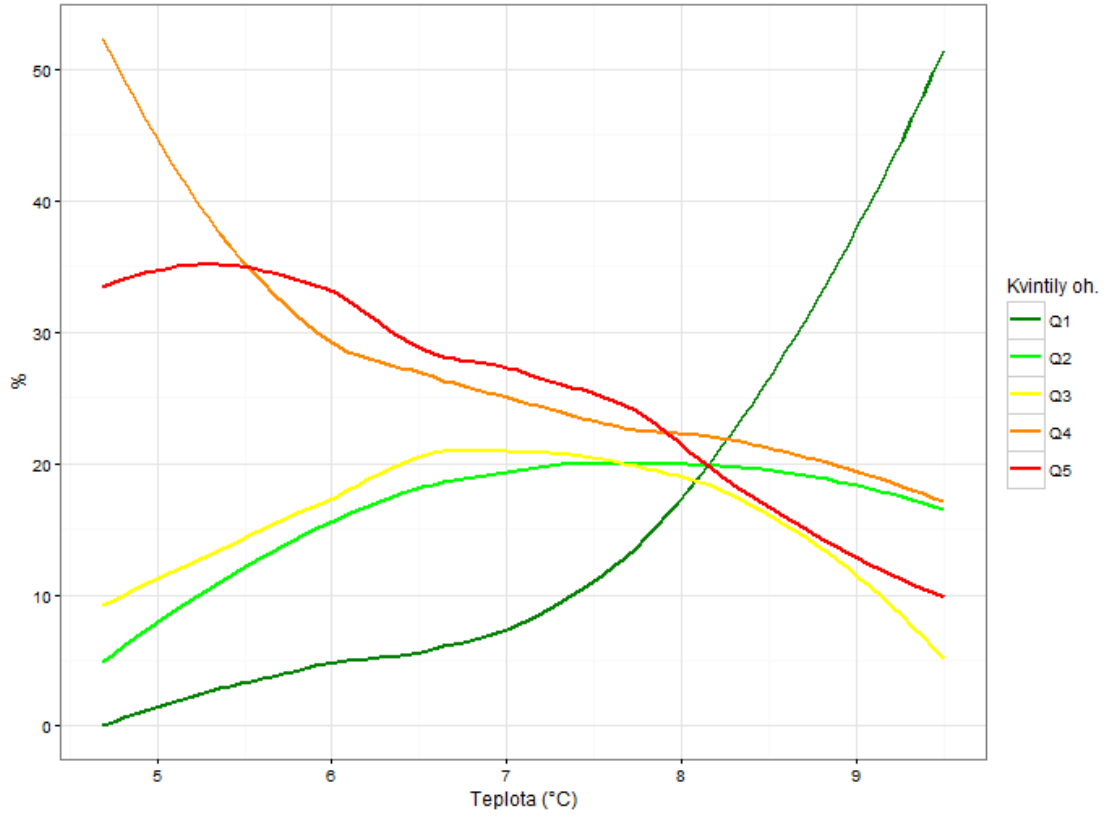
Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhm srážek



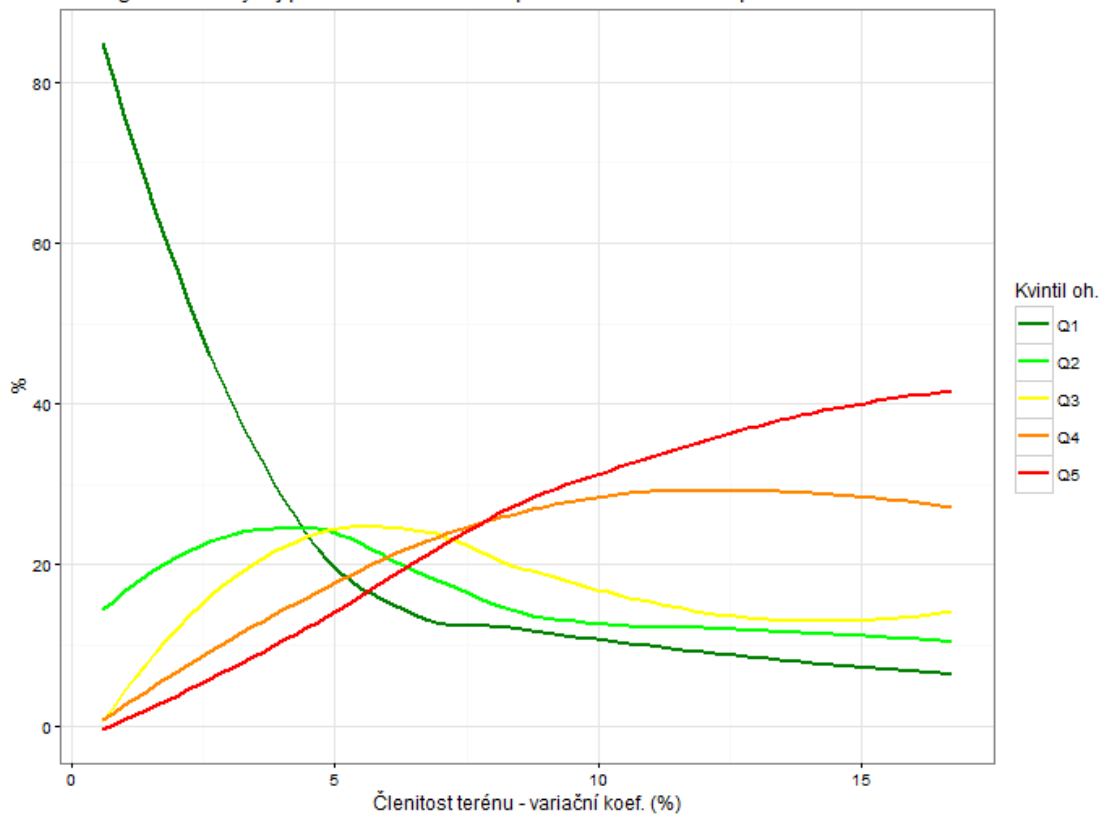
Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se svažitost



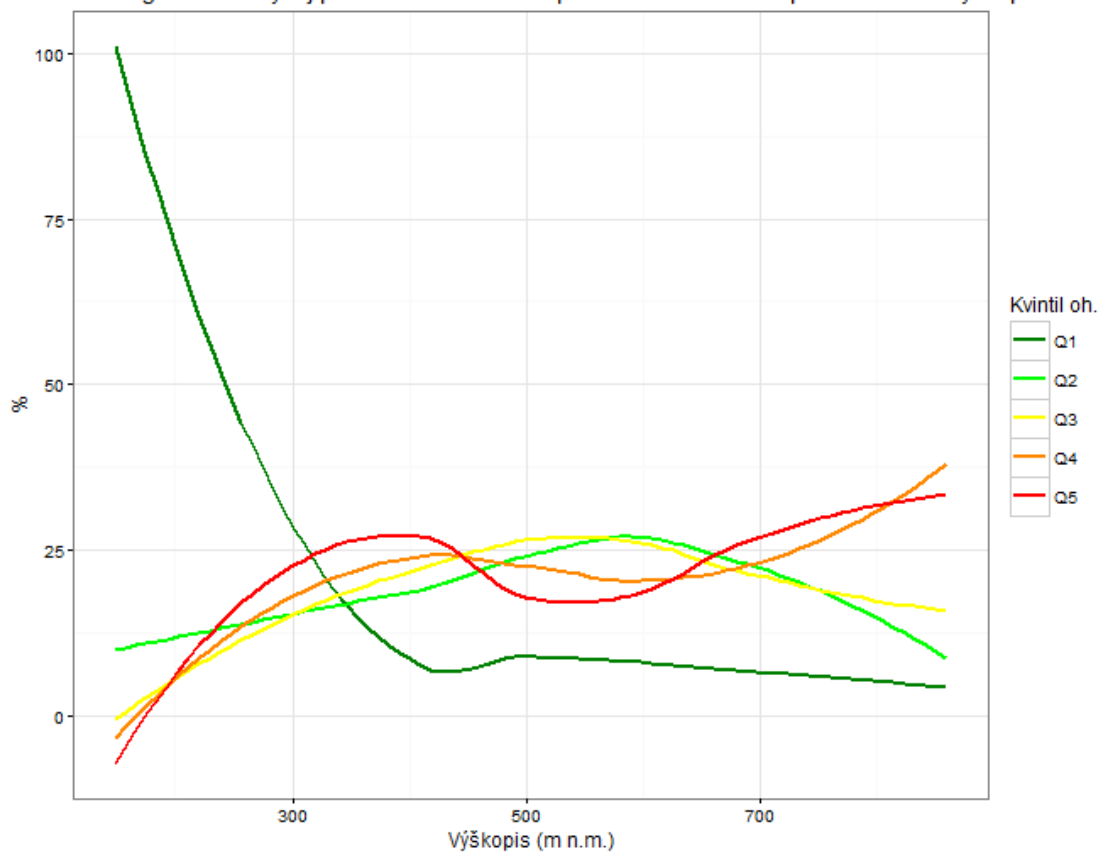
Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se roční úhrn teplot



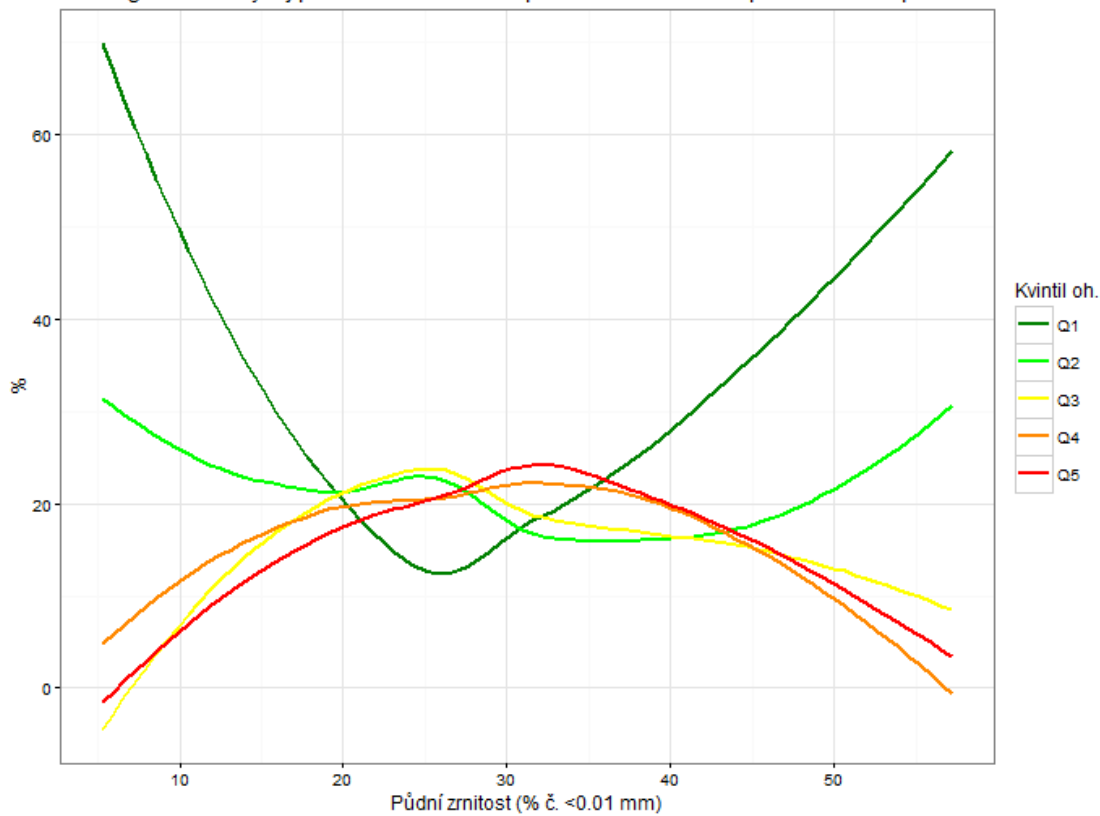
Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se členitost terénu



Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se výškopis



Celková degradace - vývoj procentuálního zastoupení kvintilů ohrožení pro měnící se půdní zrnitost



9.3 Příloha III - Prahové hodnoty degradačního ohrožení (skript v jazyku R)

Skript byl vytvořen v prostředí programu RStudio, vyžaduje vstupní tabulkový soubor ve formě CSV s údaji o hodnotě degradačních faktorů a fyzicko-geografických proměnných.

Výstupem je jednak tabulková podoba ve formě excelovského souboru s jednotlivými prahovými hodnotami pro degradační faktory a celkovou degradaci a dále pak grafický přehled vývoje procentuálního zastoupení tříd kvintilů v závislosti na fyzicko-geografické proměnné (viz Tab. 13 a Obr. 26). Detailní křivky přehledu vznikly drobnou modifikací níže uvedeného algoritmu, kterou zde neuvádím.

```
#Vypocet prahovych hodnot fyzicko-geografickych promennych pro skupiny
degradacniho ohrozeni
#autor: Marek Bednář, UP Olomouc, katedra ekologie a ŽP

#Pomocna funkce pro vykresleni vice grafu do obrazoveho souboru
multiplot <- function(..., plotlist=NULL, cols) {
  require(grid)

  # Make a list from the ... arguments and plotlist
  plots <- c(list(...), plotlist)

  numPlots = length(plots)

  # Make the panel
  plotCols = cols                # Number of columns of plots
  plotRows = ceiling(numPlots/plotCols) # Number of rows needed, calculated from # of
  cols

  # Set up the page
  grid.newpage()
  pushViewport(viewport(layout = grid.layout(plotRows, plotCols)))
  vplayout <- function(x, y)
    viewport(layout.pos.row = x, layout.pos.col = y)

  # Make each plot, in the correct location
  for (i in 1:numPlots) {
    curRow = ceiling(i/plotCols)
    curCol = (i-1) %% plotCols + 1
    print(plots[[i]], vp = vplayout(curRow, curCol))
  }
}

#Funkce rozsahy - pomocna funkce pro identifikaci intervalu v ramci mnoziny hodnot
#vstupem je matice hodnot x, index je poradí, hodnota - pak odpovídající h.
#vystupem jsou intervaly hodnot
Rozsahy <- function(x,index,hodnota,presnost){
  if (is.vector(x)) x <- t(x)
```

```

if (nrow(x)==0) return("-")
seznam <- list()

for (i in seq(1,nrow(x))){
  if (i==1){
    shod <- x[i,hodnota]
    khod <- x[i,hodnota]
    puv <- x[i,index]
  }
  else if (x[i,index]==(puv+1)){
    puv <- puv+1
    khod <- x[i,hodnota]
  }
  else {
    seznam[[length(seznam)+1]] <-
paste("<",round(shod,presnost),",",round(khod,presnost),">",sep="")
    shod <- x[i,hodnota]
    khod <- x[i,hodnota]
    puv <- x[i,index]
  }
}
seznam[[length(seznam)+1]] <-
paste("<",round(shod,presnost),";",round(khod,presnost),">",sep="")
str <- ""
for (i in seq(1,length(seznam))){
  if (i<length(seznam)) str <- paste(str,seznam[[i]],"v",sep="")
  else str <- paste(str,seznam[[i]],sep="")
}
return(str)
}

### PCA analyza
## Pracovni adresar
setwd("d:/výzkum/dize/článek/R/")
library(reshape2)
library(ggplot2)
library(xlsx)

#Konstanty
df <-
data.frame(Q1=numeric(100),Q2=numeric(100),Q3=numeric(100),Q4=numeric(100),Q
5=numeric(100), ID=integer(100))
dr1 <- data.frame()

legenda <- c("Average annual precepitation (mm)", "Slope steepness
(Degree)", "Temperature (°C)", "Elevation differences (%)", "Altitude (masl)", "Soil
granularity (% of particles with grain size <0.01 mm)")
legenda2 <- c("average annual precepitation", "slope
steepness", "temperature", "elevation differences", "altitude", "soil granularity")
legenda3 <- c("PRE", "Slope", "TEMP", "ELEDIF", "ALT", "SGR")
FGProm <- c("Water erosion", "Wind erosion", "Acidification", "Soil compaction", "Loss of
organic matter", "Heavy metal intoxication", "Total soil degradation")

```

```

## Read csv
alldata<-read.csv(file.choose(),header=TRUE,sep=";",quote="\"",dec=".",)
p <- list()

#sedm fyzickogeografických promenných
for (fgpar in seq(1,7,1)){
adata<-
subset(alldata,select=c(WAE,WIE,ACI,COM,LOM,HMI,TotalDwithAci,Srazky,Svazitost,
Teplota,VK,Vyskopis,Zrnitost))
#pro HMI a WIND se vybírají jen data bez 0
if (fgpar==2)
adata <-
subset(adata,subset=(WIE>0),select=c(WAE,WIE,ACI,COM,LOM,HMI,TotalDwithAci,S
razky,Svazitost,Teplota, VK, Vyskopis, Zrnitost))
else if (fgpar==6)
adata <-
subset(adata,subset=(HMI>0),select=c(WAE,WIE,ACI,COM,LOM,HMI,TotalDwithAci,S
razky,Svazitost,Teplota,VK,Vyskopis,Zrnitost))
#nastavení skupiny ID
for (ind in seq(1,5,1)){
maxPercentil<-quantile(adata[,fgpar], c(ind*0.2))
minPercentil<-quantile(adata[,fgpar], c((ind-1)*0.2))
adata$ID[adata[,fgpar]>=minPercentil] <- ind
}

data<-subset(adata,select=c(Srazky,Svazitost,Teplota, VK,Vyskopis,Zrnitost,ID))
for (i in seq(1,6,1)){
v <- quantile(data[,i],c(0.25,0.75))

iqr <- v[2]-v[1]
maxo <- v[2]+iqr*1.5
mino <- v[1]-iqr*1.5
#maximum=max(data[,i])
#minimum=min(data[,i])
minimum <- max(mino,min(data[,i]))
maximum <- min(maxo,max(data[,i]))
rozdil=maximum-minimum
krok=rozdil/100
puvPocet <- c(0,0,0,0,0)

for (j in seq(0,100,1)){
suma <- 0
for (ind in seq(1,5,1)){
#filtr kategorie
datan <- subset(data,subset=(data$ID==ind))
#filtr rozsahu
datan <- datan[datan[,i]<=(minimum+j*krok),]
rozdilv <- nrow(datan)-puvPocet[ind]
puvPocet[ind] <- nrow(datan)
df[j,ind] <- rozdilv
#aktualizace celkového počtu pro kategorizaci
suma <- suma+rozdilv
}
df[j,6] <- minimum+j*krok
for (ind in seq(1,5,1)){

```

```

    df[j,ind] <- df[j,ind]/suma*100
  }
}
par(mfrow=c(4,2))
#priprava grafiky
Molten <- melt(df,id.vars="ID")

p[[i]] <- ggplot(Molten, aes(x = ID, y = value, colour=variable)) +
  theme_bw() + stat_smooth(aes(outfit=fit<<..y..),se=FALSE)+
  scale_colour_grey(end= 0.1, start = 0.9)+
  scale_x_continuous("") + scale_y_continuous("") +theme(legend.position="none",
axis.text.x=element_blank(),
                                axis.text.y=element_blank(),
                                axis.title.x=element_blank(),
                                axis.title.y=element_blank())

#print(p)

nazevSouboru <- paste("FG",FGProm[fgpar],".xlsx",sep="")
if (i==1) write.xlsx(df,nazevSouboru,sheetName=legenda2[i])
else write.xlsx(df,nazevSouboru,sheetName=legenda2[i],append=TRUE)

mfit <- matrix(fit,nrow=80,ncol=5,byrow=FALSE)
mfit <- cbind(mfit,seq(1:80))
mfit <- cbind(mfit,seq(1:80))
nkrok=rozdil/79
for (s in seq(0,79,1)){
  mfit[s+1,7] <- minimum+s*nkrok
}
print(paste(nazevSouboru,legenda2[i]))
#print (mfit)
vq1 <- mfit[mfit[,1]>50,]
vq12 <- mfit[mfit[,1]+mfit[,2]>50,]
vq5 <- mfit[mfit[,5]>50,]
vq45 <- mfit[mfit[,4]+mfit[,5]>50,]

dr2 <-
data.frame(DF=FGProm[fgpar],FG=legenda[i],Q1=Rozsahy(vq1,6,7,2),Q12=Rozsahy(v
q12,6,7,2), Q45=Rozsahy(vq45,6,7,2), Q5=Rozsahy(vq5,6,7,2) )
dr1 <- rbind(dr1,dr2)

write.xlsx(mfit,paste("LOESS",nazevSouboru,sep=""),sheetName=legenda2[i],append=
TRUE)
  write.xlsx(dr1,"intervaly.xlsx")
}
}
#zapis hodnot do excelu a grafu do jpg
write.xlsx(dr1,"intervaly.xlsx")
jpeg(filename="v.jpg",width=1200,height=1400,units="px",res=300)
multiplot(plotlist=p,cols=6)
dev.off()

```

9.4 Příloha IV – Návrh automatických liniových protierozních opatření – skript v jazyce Python

Navržený algoritmus pro generování liniových protierozních opatření byl vytvořen v jazyce Python s využitím GUI PyCharm Community Edition. Na základě vstupních parametrů výškového modelu, půdních bloků z LPIS, vrstevnic, K, C faktoru a počtu žádaných opatření generuje návrhy ve formě linií protierozních opatření, výstupem je také nový výškový model a výsledný erozní smyv. Skript byl vytvořen s ohledem na vazbu k nástroji ArcToolBox v rámci systému ArcGIS – který poskytuje GUI pro zadání vstupních parametrů a zajistí spuštění programu. Vytvoření tohoto nástroje je jednoduché přesahuje však téma této práce. Jádro algoritmu je uvedeno zde. Algoritmus je nastaven na rozlišení pixelu 10x10m, stejné rozlišení je předpokládáno i pro výškový model. V případě potřeby většího rozlišení, je třeba nastavit proměnnou rozlišení na stanovenou hodnotu místo původních 10m.

```
# NavrhVrstevnicReku.py
# Created on: 2015-11-11 22:41:02.00000
# Marek Bednář, UP Olomouc, katedra ekologie a ŽP
# Automatický návrh liniových protierozních opatření
# Usage: NavrhLinOpa <DEM> <LPIS> <VRSTEVNICE> <KF> <CF> <Pocet
opatreni> <AUTOLINES:out> <G:out> <NEWDEM:out>
# Description:
# Zjistí vrstevnice, které by nejvíce přispěly ke omezení rizika
ztráty půdy
# -----
-----

# Import arcpy module
import arcpy
import sys
from arcpy.sa import *
import eroze
from eroze import *

# Kontrola nutných licencí
arcpy.CheckOutExtension("spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
#výškový model
dem = arcpy.GetParameterAsText(0) #raster layer
#bloky dle LPIS
pudnbloky=arcpy.GetParameterAsText(1)#feature layer
#vrstevnice
vrstevnice=arcpy.GetParameterAsText(2)#feature layer
#Kfaktor
Kfaktor=arcpy.GetParameterAsText(3)#feature layer
#Cfaktor
Cfaktor=arcpy.GetParameterAsText(4)#feature layer

#kritické body, kterými se hledá proložení vrstevnicí
autolines=arcpy.GetParameterAsText(5)#feature class output
pocetStr=arcpy.GetParameterAsText(6)#string output
noveG=arcpy.GetParameterAsText(7)#feature class output
```



```

#vybranaLinie=arcpy.GetParameterAsText(6)#feature class output
novyDEM=arcpy.GetParameterAsText(8)
#vstupni prom
zadanyPocet=int(pocetStr)
vrstevniceNaPB="VRSPB"

# Test pritomnosti identifikatoru vrstevnic, pokud neni, vytvori se
if len(arcpy.ListFields(vrstevnice, "IdVrs"))<=0:

arcpy.AddField_management(vrstevnice, "IdVrs", "SHORT", "", "", "", "", "NULL
ABLE")
# Kontrola pritomnosti identifikatoru pomocneho pole PP
if len(arcpy.ListFields(pudnibloky, "PP"))<=0:

arcpy.AddField_management(pudnibloky, "PP", "SHORT", "", "", "", "", "NULLABL
E")
    rows = arcpy.UpdateCursor(pudnibloky)
    #Pokud v atributove tabulce nabylo pole PP, pak se prida a nastavi
se na 1. Jde o pomocne pole pro orez
    for row in rows:
        row.PP=1
        rows.updateRow(row)

#omezeni vrstevnic jen na pudni bloky
vrstPB="VRSPB"

#feature classes or layers, out classes
arcpy.Intersect_analysis([vrstevnice,pudnibloky],vrstPB)

#automaticka identifikace vrstevnic v pudnich blocich
with arcpy.da.UpdateCursor(vrstPB, 'IdVrs') as rows:
    counter = 1
    for row in rows:
        row[0]=counter
        rows.updateRow(row)
        counter += 1

#buffer kolem vrstevnice - sirka bufferu je 10m
arcpy.Buffer_analysis(vrstPB, "buffer", 5)
pudniBlokyRaster="PBR"
#prevod pudnich bloku na raster
arcpy.PolygonToRaster_conversion(pudnibloky, "PP",
pudniBlokyRaster, "CELL_CENTER", "NONE")
#iterace 1
pocvrs=1
vybranaLinie="VL"
demnew="DEMN"
arcpy.CopyRaster_management(dem, demnew)
#buffer = "C:\\Users\\Marek\\Documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\buffer"
#seznam vybranych vrstevnic
seznam=[ ]
demnew=Raster(dem)*pudniBlokyRaster
#doplni pudni bloky o median G za pudni blok
G=usle(demnew, Raster(Cfaktor), Raster(Kfaktor))
#medianPB(G, pudnibloky)

while (pocvrs <(zadanyPocet+1)):
    arcpy.AddMessage("Hledamstredy")
    try:
        flowdir=FlowDirection(demnew)
        #flowacc=FlowAccumulation(flowdir)

```

```

#slope=Slope(demnew,"DEGREE")
#rychlost odtoku je zavisla na kombinaci K a svažitosti,
vysledek je modifikovany timto soucinem
#weights=Raster(Kfaktor)*Raster(Cfaktor)*slope
weights=G
down=FlowLength(flowdir, "DOWNSTREAM",weights)
up=FlowLength(flowdir, "UPSTREAM",weights)
#tam, kde je rozdíl malý je střed odtokových čar
conr=Abs(down-up)
souc=down+up

#downW.save(fw)
#odpovídající pixely - s rozdílem přítokové a odkotové dráhy
menším než 5m se označí 1
vys=Con((conr/souc)<0.1,1,0)

#maxR=Con(down>up,down,up)
#modifikace skutečnou hodnotou odtokové dráhy
vysH=vys*down
table="ta"
#vysH.save(stredy)

#součet středu odtokových drah přes vrstevnice, nejvyšší jsou
ideální pro návrhy
ZonalStatisticsAsTable("buffer", "IdVrs", vysH, table, "DATA",
"SUM")
arcpy.MakeTableView_management(table,"NejVrst")

#propojení vrstevnic a tabulky ohodnocení
arcpy.MakeFeatureLayer_management(vrstPB,vrstevniceNaPB)

arcpy.AddJoin_management(vrstevniceNaPB,"IdVrs",table,"IdVrs","KEEP_CO
MMON")
arcpy.CopyFeatures_management(vrstevniceNaPB,autolines)
arcpy.RemoveJoin_management(vrstevniceNaPB)

if len(arcpy.ListFields(autolines,"Id"))<=0:

arcpy.AddField_management(autolines,"Id","SHORT","","","","","NULLABLE
")
if len(arcpy.ListFields(autolines,"Poradi"))<=0:

arcpy.AddField_management(autolines,"Poradi","SHORT","","","","","NULL
ABLE")
if len(arcpy.ListFields(autolines,"VysZme"))<=0:

arcpy.AddField_management(autolines,"VysZme","FLOAT","","","","","NULL
ABLE")
if len(arcpy.ListFields(autolines,"Sirka"))<=0:

arcpy.AddField_management(autolines,"Sirka","FLOAT","","","","","NULLA
BLE")
if len(arcpy.ListFields(autolines,"Navrh"))<=0:

arcpy.AddField_management(autolines,"Navrh","FLOAT","","","","","NULLA
BLE")

rows = arcpy.UpdateCursor(autolines)
#Přida typy opatření - standardně protierozní hrazka vysky 1,1
m
for row in rows:

```

```

        row.Id=2
        row.VysZme=1.1
        row.Sirka=0
        row.Navrh=0
        row.Poradi=0
        #row.ta_SUM=row.ta_SUM/row.Shape_Length
        rows.updateRow(row)
    arcpy.AddMessage("KonecHledani")

    #Hledam nejlepsi vrstevnici
    # razeni do pomocne vrstvy
    out_dataset = "auto_Sort"
    sort_fields = [{"ta_SUM", "DESCENDING"}]
    # Use Peano algorithm
    sort_method = "PEANO"
    # execute the function
    arcpy.Sort_management(autolines, out_dataset, sort_fields,
sort_method)
    idvrs=-1
    #najde identifikator nejlepsi vrstevnice
    with
arcpy.da.SearchCursor(out_dataset, ["OID@", "VRSPB_IdVrs", "VRSPB_ZKODFB"
]) as cursor:
        for key,value,pb in cursor:
            idvrs=value
            pudniBlok=pb
            break
        arcpy.AddMessage("%d. vybrana vrstevnice ID: %s / pudni blok
%s" % (pocvrs,idvrs,pudniBlok))
        seznam.append([pocvrs,idvrs,pudniBlok])
        #Nastavuje atribut poradi vyhodnosti
        sql_query="VRSPB_IdVrs" = %d" % (idvrs)
        arcpy.AddMessage(sql_query)
        arcpy.MakeFeatureLayer_management(autolines,"AL")
        arcpy.SelectLayerByAttribute_management("AL", "NEW_SELECTION",
' %s ' % (sql_query))

    #vybira linii
    arcpy.CopyFeatures_management("AL",vybranaLinie)
    #arcpy.SelectLayerByAttribute_management("al",
"CLEAR_SELECTION")
    arcpy.AddMessage(arcpy.GetMessages())
    pocvrs=pocvrs+1
    #Pro dalsi navrh menime DEM
    if (pocvrs<=(zadanyPocet+1)):
        #if (pocvrs<(zadanyPocet+1)):
            #arcpy.MakeFeatureLayer_management(vybranaLinie,"VL")
            arcpy.AddMessage("Upravuji DEM")
            #aby se projevilo rozliseni musime nastavit alespon dva
pixely aplikace 2x5m
            rozliseni=10.0
            rasterLinie="RL"
            #mez ID=3
            arcpy.MakeFeatureLayer_management(vybranaLinie,"VLf1")

arcpy.SelectLayerByAttribute_management("VLf1","NEW_SELECTION",' "Id"
= 3 ')
        pocetVybranych =
int(arcpy.GetCount_management("VLf1").getOutput(0))
        #jde o mez

```

```

if (pocetVybranych > 0):
    arcpy.Buffer_analysis(vybranaLinie,"buffer","Sirka")
    arcpy.MakeFeatureLayer_management ("buffer", "meze")
    demMask = ExtractByMask(demnew, "buffer")
    #10 m okoli bodu
    neighborhood = NbrCircle(10, "MAP")

    # Execute FocalStatistics
    outFocalStatistics = FocalStatistics(demMask,
neighborhood, "MAXIMUM", "DATA")
    #oznaci 1 mimo masku bufferu
    rasterNoMez=IsNull(demMask)
    #mimo bude 1, buffer je 0
    rasterMezDira=Con(rasterNoMez,1,0,"Value = 1")
    rasterMez=Con(rasterNoMez,0,outFocalStatistics,"Value
= 1")

    #vymaz oblasti, kde je mez
    demUpra=demnew*rasterMezDira
    demUpra2=demUpra+rasterMez
else:
    demUpra2=demnew

    #vytvoreni rastru vysek v liniiovych navrzich dle prevodni
tabulky

arcpy.SelectLayerByAttribute_management("VLf1","NEW_SELECTION", '
"VysZme" <> 0 ')
    arcpy.FeatureToRaster_conversion("VLf1",
"VysZme",rasterLinie, rozliseni)

    #rozsireni na celou oblast pro pozdejsi scitani
    #nova vrstva, kde jsou no data, tam bude 1, jinde 0
    rasterNull=IsNull(rasterLinie)
    #pokud je tam no data - 1, vrati nulu, jinak vysku
    rasterRoz=Con(rasterNull,0,rasterLinie,"Value = 1")
    #tvorba noveho DEM
    demnew=demUpra2+rasterRoz
    arcpy.AddMessage("Konec uprav DEM")
    G=usle(demnew,Raster(Kfaktor),Raster(Cfaktor))
except arcpy.ExecuteError:
    # Print error messages
    arcpy.AddMessage(arcpy.GetMessages(2))
    break

except Exception as ex:
    arcpy.AddMessage(ex.args[0])
    break

for poradi,id,pb in seznam:
    sql_query="VRSPB_IdVrs" = %d' % (id)
    arcpy.SelectLayerByAttribute_management("AL", "NEW_SELECTION", '
%s ' % (sql_query))
    arcpy.CalculateField_management("AL","Poradi",poradi)
    demres=Con( IsNull(demnew),dem,demnew)
    G=usle(demres,Raster(Cfaktor),Raster(Kfaktor))
    G.save(noveG)
    demres.save(novyDEM)

```

Ukázka uživatelské rozhraní v ArcGIS

Automatické rekulinie

DEM
dem2

Bloky
Ipisjev

Vrstevnice
vrstevnice

Kfaktor
kf

Cfaktor
cf

Automatické linie
F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\autolines1

Počet linií
5

Výsledné G
F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\G1

Nový DEM
F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\DEM1

OK Cancel Environments... << Hide Help

Ukázka vlastního běhu programu:

Automatické rekulinie

Completed

Close this dialog when completed successfully

Close << Details

```

Executing: IntelligentniNavrhDeleni22 dem2 Ipisjev vrstevnice kf cf F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\autolines1 5 5 F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\G5 F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\DEM5
Start Time: Sun Jun 19 12:55:11 2016
Running script IntelligentniNavrhDeleni22...
Hledamstredy
KonecHledani
1. vybrana vrstevnice ID: 590 / pudni blok 1701
"VR5FB_IdVrs" = 590
Executing: CopyFeatures AL F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\VL # 0 0 0
Start Time: Sun Jun 19 12:55:32 2016
Succeeded at Sun Jun 19 12:55:33 2016 (Elapsed Time: 0,46 seconds)
Upravuji DEM
Konec uprav DEM
Hledamstredy
KonecHledani
2. vybrana vrstevnice ID: 1006 / pudni blok 1603
"VR5FB_IdVrs" = 1006
Executing: CopyFeatures AL F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\VL # 0 0 0
Start Time: Sun Jun 19 12:55:55 2016
Succeeded at Sun Jun 19 12:55:55 2016 (Elapsed Time: 0,43 seconds)
Upravuji DEM
Konec uprav DEM
Hledamstredy
KonecHledani
3. vybrana vrstevnice ID: 847 / pudni blok 1701
"VR5FB_IdVrs" = 847
Executing: CopyFeatures AL F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\VL # 0 0 0
Start Time: Sun Jun 19 12:56:18 2016
Succeeded at Sun Jun 19 12:56:18 2016 (Elapsed Time: 0,63 seconds)
Upravuji DEM
Konec uprav DEM
Hledamstredy
KonecHledani
4. vybrana vrstevnice ID: 104 / pudni blok 3501/1
"VR5FB_IdVrs" = 104
Executing: CopyFeatures AL F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\VL # 0 0 0
Start Time: Sun Jun 19 12:56:40 2016
Succeeded at Sun Jun 19 12:56:41 2016 (Elapsed Time: 0,44 seconds)
Upravuji DEM
Konec uprav DEM
Hledamstredy
KonecHledani
5. vybrana vrstevnice ID: 837 / pudni blok 1604
"VR5FB_IdVrs" = 837
Executing: CopyFeatures AL F:\výzkum\jevička\testlinie.gdb\VL # 0 0 0
Start Time: Sun Jun 19 12:57:04 2016
Succeeded at Sun Jun 19 12:57:04 2016 (Elapsed Time: 0,49 seconds)
Upravuji DEM
Konec uprav DEM
Completed script IntelligentniNavrhDeleni22...
Succeeded at Sun Jun 19 12:57:26 2016 (Elapsed Time: 2 minutes 14 seconds)
    
```