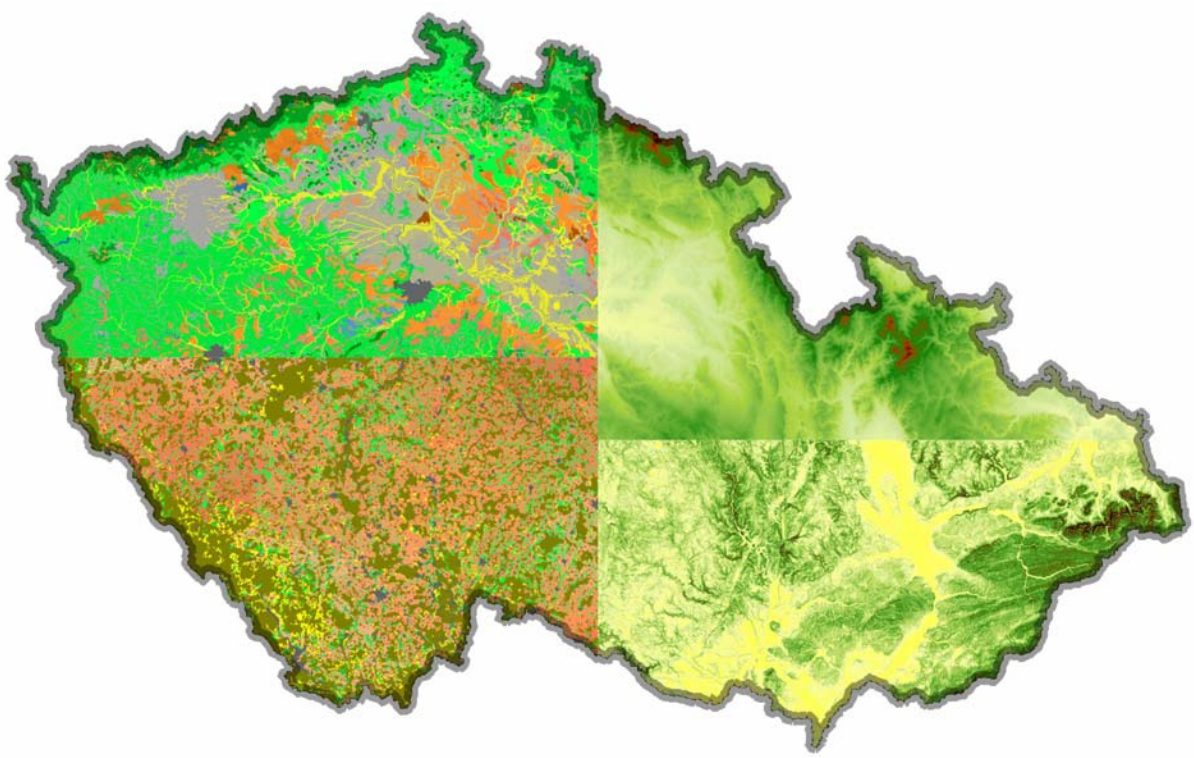
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

dizertační práce na téma

HODNOCENÍ EROZNÍCH PROCESŮ VE VELKÝCH POVODÍCH ZA PODPORY GIS



Doktorand: Ing. Josef Krása
Školitel: Doc. Ing. Jan Pretl, CSc.
Obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Praha, 2004

Děkuji svému školiteli, Doc. Janu Pretlovi. Děkuji Dr.Ing. Tomáši Dostálovi za jeho spolupráci, vedení a motivaci. Děkuji vedoucímu katedry Doc. Karlu Vránovi a svým kolegům, členům katedry, kteří tvoří prostředí, ve kterém je tak motivující pracovat, podílet se na výzkumu a být.

Neméně děkuji všem svým nejbližším, bez kterých bych nemohl nejen napsat tuto práci. Všichni jste mi moc pomohli, pomáháte, a já jsem Vám za to vděčný.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji na svou čest, že tuto práci jsem napsal sám, s využitím citované literatury a zdrojů. V práci vycházím z řady výzkumných projektů, na kterých jsem se podílel v rámci svého doktorského studia a využívám data, která byla za účelem výzkumu získána na katedru hydromeliorací a krajinného inženýrství. Veškeré zmíněné projekty jsou rovněž řádně citovány.

Práce je napsána a editována na počítači PC v prostředí MS Windows s využitím legálně získaných software. GIS software využité k výpočtům a analýzám patří stavební fakultě ČVUT v Praze, katedře hydromeliorací.

Úvod

Vodní eroze je v podmínkách České republiky stále vážným problémem, výrazně eskalovaným od doby kolektivizace a scelování pozemků v padesátých a šedesátých letech minulého století. Klíčové přitom dnes není ohrožení a degradace zemědělské půdy, ale zejména zanášení infrastruktury, obcí, vodních toků a nádrží a transport znečišťujících látek (biologických i chemických) způsobující degradaci vodních zdrojů a výraznou eutrofizaci toků i nádrží.

Mé doktorandské studium je zaměřeno na možnosti zlepšení predikce erozních procesů, odhadu ztráty půdy z povodí a rychlosti zanášení nádrží s využitím Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE, Wischmeier et al., 1978) a software Watem/SEDEM (VanRompaey et al., 2000) Program Watem/SEDEM umožňuje zrychlení a zpřesnění výpočtu v prostředí rastrově orientovaného GIS software IDRISI (Eastman et al., 1987-2002). Při využití digitálních podkladů tak lze celý proces výpočtu ztráty půdy automatizovat a zpřesnit, a tím umožnit odhad transportu sedimentu z velkých povodí.

Program se dále vyvíjí a při své studijní stáži na jeho vývojovém pracovišti (Laboratory for Experimental Geomorphology, KU Leuven, Belgie) jsem měl možnost se přímo podílet na implementaci vylepšené topologie vodních toků (resp. jejich úseků). Kalibrace programu s touto komponentou probíhá v současné době, a v případě úspěchu znamená možnost získat přibližné odhady množství splavenin transportovaných uzávěrovým profilem mnohem větších povodí než dosud. Dílčí výsledky budou publikovány již v této práci.

Dále se ve své dizertační práci zaměřuji na ověření resp. nalezení efektivních způsobů výpočtu, přípravy vstupních dat, i testování metod měření skutečného objemu sedimentu. Výsledkem jeho práce by měla být doporučení směrem k metodologii výpočtů ztráty půdy ve velkých povodích a zpřístupnění modelu Watem/SEDEM pro použití v podmínkách ČR.

Dnes je výpočet erozních procesů prováděn takřka výhradně s pomocí výpočetní techniky. Simulační modely se stále rozvíjejí a umožňují dříve nedosažitelně podrobné zkoumání přírodních jevů. Protože však množství ploch, které je u nás nutno takto zkoumat dosahuje mnoha tisíc kilometrů čtverečních, je i při využití moderní výpočetní techniky řešení limitováno objemem dat a náročností výpočtu. Proto stále nacházejí uplatnění robustní a jednoduché empirické modely modifikované pro výpočet pomocí GIS. Rastrový GIS umožňuje krom rychlého výpočtu i vhodnou prezentaci výsledků.

Použití USLE (a na bázi USLE odvozených modelů) pro výpočet erozní ohroženosti má i řadu nevýhod, které jsou dále diskutovány, pro svou jednoduchost a přístupnost vstupních dat je však tento postup v našich podmínkách stále nejrozšířenější. Při výpočtu je ovšem třeba dbát všech jeho omezení.

Struktura dizertační práce

ÚVOD 4

1 ČÁST PRVNÍ – ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝZKUMU EROZE 6

1.1 VODNÍ EROZE A JEJÍ DŮSLEDKY PRO KRAJINU 6
1.2 VÝZKUM VODNÍ EROZE 10
1.3 METODY VÝPOČTU EROZNÍ OHROŽENOSTI A OBJEMU SPLAVENIN 13

2 ČÁST DRUHÁ – POUŽITÉ EMPIRICKÉ MODELY 16

2.1 UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY (USLE) 16
2.2 MODEL WATEM/SEDEM 32

3 ČÁST TŘETÍ – VSTUPNÍ DATA PRO VÝPOČET V GIS 52

3.1 POUŽÍVANÝ SOFTWARE 52
3.2 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU 53
3.3 LAND COVER - KATEGORIE POVRCHU, VYUŽITÍ PŮDY, VEGETACE 69
3.4 PŮDNÍ DATA 77
3.5 SRÁŽKY, KLIMATICKÉ VLIVY 81

4 ČÁST ČTVRTÁ – PŘÍKLADY APLIKACE VÝPOČTU EROZE A TRANSPORTU SEDIMENTU 84

4.1 UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY PRO CELÉ ÚZEMÍ ČR 84
4.2 USLE + SDR – PŘÍPADOVÁ STUDIE VN VRCHLICE 117
4.3 WATEM/SEDEM 2.1.0 – APLIKACE V POVODÍ VN VRCHLICE 128

5 ČÁST PÁTÁ - VERIFIKACE EMPIRICKÝCH METOD 143

5.1 MOŽNOSTI VERIFIKACE 143
5.2 STANOVENÍ SKUTEČNÉHO OBJEMU SEDIMENTU V NÁDRŽÍCH 143

6 ZÁVĚR 157

7 REFERENCE 160

8 REJSTŘÍKY A SEZNAMY 167

9 PODROBNÝ OBSAH 173

1 Část první – úvod do problematiky výzkumu eroze

1.1 Vodní eroze a její důsledky pro krajinu

Eroze (obecně) je přirozený proces rozrušování a přeměny zemského povrchu v důsledku působení sil větru, vody, ledovců aj. Dnešní vzhled povrchu Země je po geologických změnách (vrásnění, …) výsledkem dlouhodobého působení erozních procesů, které stále pokračují. Není smyslem naší činnosti jakýkoli z těchto procesů zcela zastavit.

1.1.1 Průběh erozního procesu

Půdní eroze se dělí do tří za sebou následujících (nebo lépe vzájemně se prolínajících) procesů:

- Uvolňování částic z půdní hmoty
- Transport částic erozními činiteli (vodou, větrem, atp.)
- Ukládání částic při poklesu transportní energie

Veškerá tato činnost probíhá obvykle zvolna, v rovnovážném stavu s ostatními přírodními (např. půdotvornými) procesy. Je to tzv. **eroze normální**, při které odnesený půdní profil je v dostatečné míře nahrazován z podloží. Naproti tomu v intenzivně využívané krajině dochází často k **erozi abnormální,** která se projevuje výrazným zrychlením erozních procesů při narušení přírodní rovnováhy, výrazným transportem půdních částic i chemických látek a znečišťováním cílového prostředí sedimenty. Při tom dochází k ohrožení a ztrátám půdního profilu, který nedokáže být dostatečně rychle nahrazován půdotvorným procesem (Holý, 1994). Ve své práci se dále budu zabývat pouze **erozí vodní**, která je v podmínkách České republiky převažující a přináší řadu problémů v zemědělské i vodohospodářské oblasti.

1.1.2 Mechanizmus vodní eroze

Vodní eroze je způsobena buď dešťovými srážkami nebo vodou z rychle tajícího sněhu v horských oblastech. Na většině území nás potom zajímá eroze působená deštěm. Podle stejných hledisek zde probíhají procesy **rozrušení**, **transportu** a **ukládání** erodovaných částic.

K uvolňování půdních částic dochází zejména přímým působením dopadajících dešťových kapek. Jejich účinek (není-li tlumen již vzniklou vrstvou povrchového odtoku) je přibližně 10 × vyšší než destrukční schopnost soustředěného a 100 × vyšší než účinek plošného povrchového odtoku. Ovšem se zvyšující se vrstvičkou plošného povrchového odtoku je tento účinek výrazně redukován (již při výšce trojnásobku průměru vodních kapek je zcela eliminován). Naopak erozivní schopnost soustředěného povrchového odtoku prudce narůstá se zvyšujícím se sklonem, se zvětšujícím se množstvím soustředěné vody (s prohlubováním erozních rýh) a s narůstajícími odtokovými rychlostmi (Dostál, 1998).

K následnému transportu částic potom dochází téměř výhradně vlivem plošného a soustředěného povrchového odtoku, na jehož kapacitě závisí odnášené množství uvolněných částic. **Plošný povrchový odtok** (mezirýhová eroze) vzniká při překročení okamžité vsakovací schopnosti půdy a podílí se na prvotním odnosu uvolněných látek. Po dosažení určité vzdálenosti (obvykle tzv. kritická délka svahu) dochází k jeho spojování do **soustředěného povrchového odtoku**, jehož erozní i transportní kapacita je obvykle řádově vyšší.

Poznámka: Cílem řady protierozních opatření je právě zabránit soustředění povrchového odtoku.

K ukládání transportovaných látek dochází při snížení kinetické energie povrchového odtoku, tj. při snížení odtokové rychlosti na úpatích svahů nebo na terénních překážkách. Při dopravení částic až do vodních toků a jejich následném transportu ve formě splavenin dochází k sedimentaci jemných částic až při výrazném zpomalení proudění, tedy často až ve vodních nádržích.

Na množství transportovaných látek se tedy podílí kinetická energie deště zároveň s transportní kapacitou povrchového odtoku a k zamezení přílišné erozi je třeba se zabývat oběma těmito kombinovanými vlivy (Holý, 1994).

1.1.3 Formy vodní eroze

Vodní eroze se ve svých projevech liší zejména v závislosti na soustředěnosti a množství povrchového odtoku. Rozlišují se tři hlavní formy povrchové vodní eroze (které se dále dělí na sub-kategorie):

- Eroze plošná
- Eroze výmolová
- Eroze proudová

Plošná eroze je charakterizována rozrušováním a smyvem půdní hmoty na celém území. Jejím prvním stupněm je eroze selektivní, při níž povrchový odtok odnáší jemné půdní částice a na ně vázané chemické látky. Dochází ke změně půdní textury a obsahu živin v půdě. Půdy podléhající selektivní erozi (horní svahové partie) se stávají hrubozrnnějšími a mají snížený obsah živin, půdy obohacené smyvem (úpatí svahů) jsou jemnozrnnější a bohaté na živiny. Selektivní eroze probíhá zvolna, často nepozorovaně, a nezanechává viditelné stopy. Při větší kinetické energii povrchově stékající vody a nepříznivém utváření půdního profilu (střídání málo odolných a odolných vrstev) dochází ke smyvu půdní hmoty ve vrstvách. Tato eroze se nazývá eroze vrstevná. Projevuje se na celé ploše svahu nebo probíhá v širokých pruzích v závislosti na reliéfu povrchu. Dochází při ní obvykle ke ztrátě celé orniční vrstvy.

Výmolová eroze vzniká postupným soustřeďováním povrchově stékající vody, která vyrývá v půdním povrchu mělké zářezy, postupně se prohlubující. Prvním stadiem výmolové vodní eroze je eroze **rýžková** a **brázdová**. Při rýžkové erozi vznikají v půdním povrchu drobné úzké zářezy, které vytvářejí na postiženém svahu hustou síť. Brázdová eroze se vyznačuje mělkými širšími zářezy, jejichž hustota na svahu je menší než u eroze rýžkové. Vzhledem k tomu, že rýžková a brázdová eroze postihují obvykle velkou část povrchu svahu, označuje se tato eroze často jako nejvyšší stadium plošné eroze. Z rýžek a brázd vznikají pokračujícím soustředěným odtokem hlubší rýhy, které se směrem po svahu

postupně prohlubují. Jsou výsledkem rýhové eroze. Ta pak přechází ve vyšší stupeň - erozi **výmolovou** a ta v nebezpečnou, území devastující erozi **stržovou**. Výsledkem výmolové a stržové eroze jsou hluboké výmoly a strže.

Proudová eroze probíhá ve vodních tocích působením vodního proudu. Je-li rozrušováno pouze dno, mluvíme o erozi dnové, jsou-li rozrušovány břehy, o erozi břehové. **Dnová** eroze je formou podélné eroze, prohlubující podélné osy toku, **břehová** eroze je formou eroze, probíhající směrem kolmo na osu toku. Nejvýrazněji se projevuje proudová eroze v bystřinách, jež nesou obvykle velké množství splavenin.

1.1.4 Faktory podmiňující vodní erozi

Celkově je vznik a rozvoj (a případná kulminace) erozních procesů ovlivněn řadou společně působících faktorů, ať už ryze přírodních, nebo ovlivnitelných (případně přímo způsobených) člověkem. Základními faktory vodní eroze jsou :

- Klimatické a hydrologické poměry
- Morfologické (topografické) poměry
- Půdní a geologické poměry
- Vegetační kryt půdy
- Hospodářsko-technické poměry

Klimatické a hydrologické poměry jsou kromě množství srážek a povrchového odtoku dány teplotou, vlhkostí ovzduší a povrchu půdy, směrem a rychlostí větrů a slunečním zářením. Vznik výrazného erozního procesu je v našich podmínkách vyvolán především srážkami přívalového charakteru, které jsou charakterizovány vysokou intenzitou, krátkou dobou trvání a relativně malou zasaženou plochou. Z nich vznikající povrchový odtok rychle kulminuje (má krátkou dobu koncentrace) a má tak výrazné erozní a transportní charakteristiky (zvláště v podmínkách intenzivně zemědělsky využívaných a odkrytých pozemků se sníženou hydraulickou drsností půdního povrchu).

Morfologické poměry jsou dány sklonem, délkou, členitostí a tvarem (částečně též expozicí) svahu. Sklon svahu je z hlediska eroze nejdůležitějším (a také nejobtížněji ovlivnitelným) morfologickým faktorem. Se zvyšujícím se sklonem výrazně roste erozivní schopnost povrchového odtoku a jeho schopnost soustředit se v rýhách. Pro vyšší sklony je třeba pečlivě zvážit vhodnost protierozních opatření, aby nedocházelo k výrazným ztrátám půdy (obvykle je třeba zachovat trvalý protierozní vegetační pokryv). Vliv délky svahu není jednoznačný a lze jej omezit rozčleněním na kratší úseky a tak zabránit vzniku soustředěného povrchového odtoku. Tvar svahu je třeba vždy posoudit v kombinaci s ostatními faktory. Zejména v dolních partiích svahu se může projevit konvergentní tvar (prostorové uspořádání) svahu, který svádí odtok a podporuje tak vznik soustředěného povrchového odtoku. Opačně působí svahy divergentní.

Půdní a geologické poměry jsou charakterizovány fyzikálními vlastnostmi půdy, případně matečné horniny. Zejména texturou, strukturou, obsahem organických látek, vlhkostí, apod. Tyto vlastnosti ovlivňují jednak infiltrační schopnost půdy (velikost a časový průběh infiltrace), jednak odolnost vůči destrukčním účinkům vodních kapek a povrchového odtoku. Nejnáchylnější k erozi jsou půdy hlinité s velkým obsahem prachových částic,

které jsou ovšem zároveň nejvhodnější pro zemědělské využití (velký obsah humusu atd.). Intenzivním zemědělským využíváním, pojezdem těžkými mechanizmy a další činností člověka se ovšem náchylnost těchto půd k erozi často ještě výrazně zvyšuje (zhutnění a snížení propustnosti, rozbíjení půdních agregátů, ponechání bez vegetačního pokryvu, atd.)

Vegetační poměry se protierozně projevují jednak ochranou půdního povrchu před přímým dopadem vodních kapek, jednak zpomalením povrchového odtoku (zvýšením hydraulické drsnosti povrchu), a dále podporou vsakovací schopnosti půdy (rozrušením, zvýšením pórovitosti, podporou růstu mikroorganismů, …). Zlepšením celkových fyzikálních, chemických i biologických vlastností půdy (údržbou vlhkého mikroklimatu aj.) přispívá vegetace ke zvýšení soudržnosti (zpevnění půdních agregátů), k propojení kořenovým systémem a k obohacení o organické látky. Protierozní účinnost jednotlivých vegetačních pokryvů se výrazně liší, a proto je třeba vhodně navrhovat umístění plodin podle svahových (a dalších) poměrů. Podle ochranné účinnosti lze plodiny seřadit přibližně takto : lesní porost, trvalý travní porost, dočasné travní porosty, úzkořádkové plodiny (obilniny, …), okopaniny a širokořádkové plodiny (kukuřice).

Hospodářsko-technické poměry ovlivňuje činnost člověka. To se týká způsobu využití pozemků, hospodaření, umístění plodin (viz. výše), volby vhodných protierozních opatření atp.

1.1.5 Negativní důsledky vodní eroze

Negativní důsledky vodní eroze lze rozdělit např. podle postižené oblasti na :

- Materiální škody
- Vliv na půdu
- Vliv na vodní toky a vodní nádrže

Materiální škody způsobené erozí jsou dány zejména zanášením pozemků, intravilánu, komunikací a jiných ploch jemným (a často částečně toxickým) sedimentem. Dále dochází k poškozování a znečišťování budov a inženýrských staveb zvýšeným povrchovým odtokem. Dochází i k odnášení materiálu a k dalším hmotným škodám.

Vliv na půdu je dán především poškozením (změnou) půdního profilu a ztrátou nejúrodnější svrchní orniční vrstvy. Tato ztráta je trvalá, protože odnesená půda se ani po případném vytěžení obvykle nevrací zpět na pozemek. Při odnosu půdy dochází především ke ztrátě nejjemnější a nejlehčí frakce. To znamená ztrátu organických látek a živin (vázaných na jemných částicích s nejvyšší sorpční kapacitou). S plošnou erozí dochází také ke změně zrnitostního složení směrem po svahu. Nejjemnější částice jsou nahromaděny na úpatí (v dolních partiích) svahu, v horní části je ponechán materiál hrubozrnnější. S tím je spojená ztráta úrodnosti a také mnohem rychlejší vysychání horních částí svahu.

Vliv na vodní toky a nádrže je dán jejich znečišťováním a zanášením unášenými a sedimentujícími částicemi. Podíl částic, které jsou z erodovaného místa doneseny až do recipientu (oproti částicím sedimentovaným již na pozemcích), je vyjádřen **poměrem odnosu SDR** (Williams, 1977). Ten závisí na morfologickém a povrchovém charakteru povodí. V případě vysoké hydraulické drsnosti povrchu (dostatečného množství záchytných prvků podporujících infiltraci) pouze malé množství částic dosáhne vodoteč (malý koeficient SDR). A naopak při „hladkém“ povrchu povodí (velké, scelené a

sklonově jednotvárné pozemky) je vodní tok zanášen podstatně větším množstvím sedimentů unášených povrchovým odtokem.

Vodní toky a nádrže jsou sedimentem **zaplňovány**, zmenšuje se průtočný profil, zásobní objem nádrží, dochází ke zvyšování hladiny vodních toků a postupnému podmáčení i zatápění okolních pozemků. Snižují se hloubky a sedimenty zanášejí a poškozují technické objekty toků i nádrží. Výsledkem může být nutnost náročného vytěžení sedimentů.

Spolu s jemnými částicemi jsou do vody přinášeny organické (živiny) i chemické, často toxické látky (pesticidy, těžké kovy, aj.) negativně ovlivňující **kvalitu vody**. Ta je zhoršována i zvýšeným zákalem. Živiny podporují zrychlený růst vodních organismů, dochází tak ke změnám v oživení toku i břehového porostu.

Zanedbání vlivu eroze má i další důsledky. Snížení hloubek spolu se zvýšením obsahu živin vede k růstu bujné vegetace podél břehů i v místech nejvyššího ukládání sedimentů na vtoku do nádrží. Tím je zvýšena hydraulická drsnost a opět urychlováno zanášení. Uvolnění akumulovaných živin způsobuje eutrofizaci nádrží. Zvýšené množství povrchového odtoku a následných průtoků vede k narušení nebo ohrožení stability koryta toku. **Pro zmírnění všech těchto negativních dopadů je třeba pečlivě posuzovat erozní rizika a provádět potřebná protierozní opatření.**

(celá kapitola viz. Dostál a kol., 1996; Dostál,1998)

1.2 Výzkum vodní eroze

1.2.1 Vodní eroze v České republice

Jenom dle odhadu je v České republice zhruba 50 % zemědělsky využívané půdy ohroženo vodní erozí (Holý, 1994). Hodnoty takzvané přípustné ztráty půdy pro ČR odpovídají podmínkám zachování požadované úrodnosti půdy. Z hlediska transportu uvolněných půdních částic ze zdrojových ploch jsou však tyto limity nedostačující, neboť i při hospodaření na pomezí dodržení těchto hodnot dochází často k výraznému odnosu půdy, ke smyvu organických látek do vodních toků, k zanášení nádrží atd. Proto je třeba opětovně určovat erozní ohroženost pozemků, celkovou ztrátu půdy z jednotlivých povodí a další charakteristiky (Dostál, 1998).

Hlavním pracovištěm věnujícím se výzkumu erozních procesů v podmínkách ČR je Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd (VÚMOP) se sídlem v Praze Zbraslavi. Spolupracuje s výzkumnými ústavy okolních zemí, zejména slovenským a již desítky let je ministerstvem zemědělství* pověřen monitorováním kvality půdy, ohodnocováním (bonitací) našich půd a doporučováním výpočetních metod ztráty půdy i metod ochrany půdního fondu. Kromě výzkumné činnosti v oblasti pedologie a příbuzných oborů je pověřen správou a aktualizací celorepublikové půdní mapové databáze bonitovaných půdně ekologických jednotek BPEJ (viz. kapitola 3.4.1.1).

VÚMOP je rovněž iniciátorem využití USLE v podmínkách ČR a převedením hodnot základních parametrů rovnice pro podmínky ČR (resp. někdejší ČSSR) stanovil postupně aktualizovanou oficiální metodiku výpočtu ztráty půdy pomocí Univerzální rovnice (např.

---

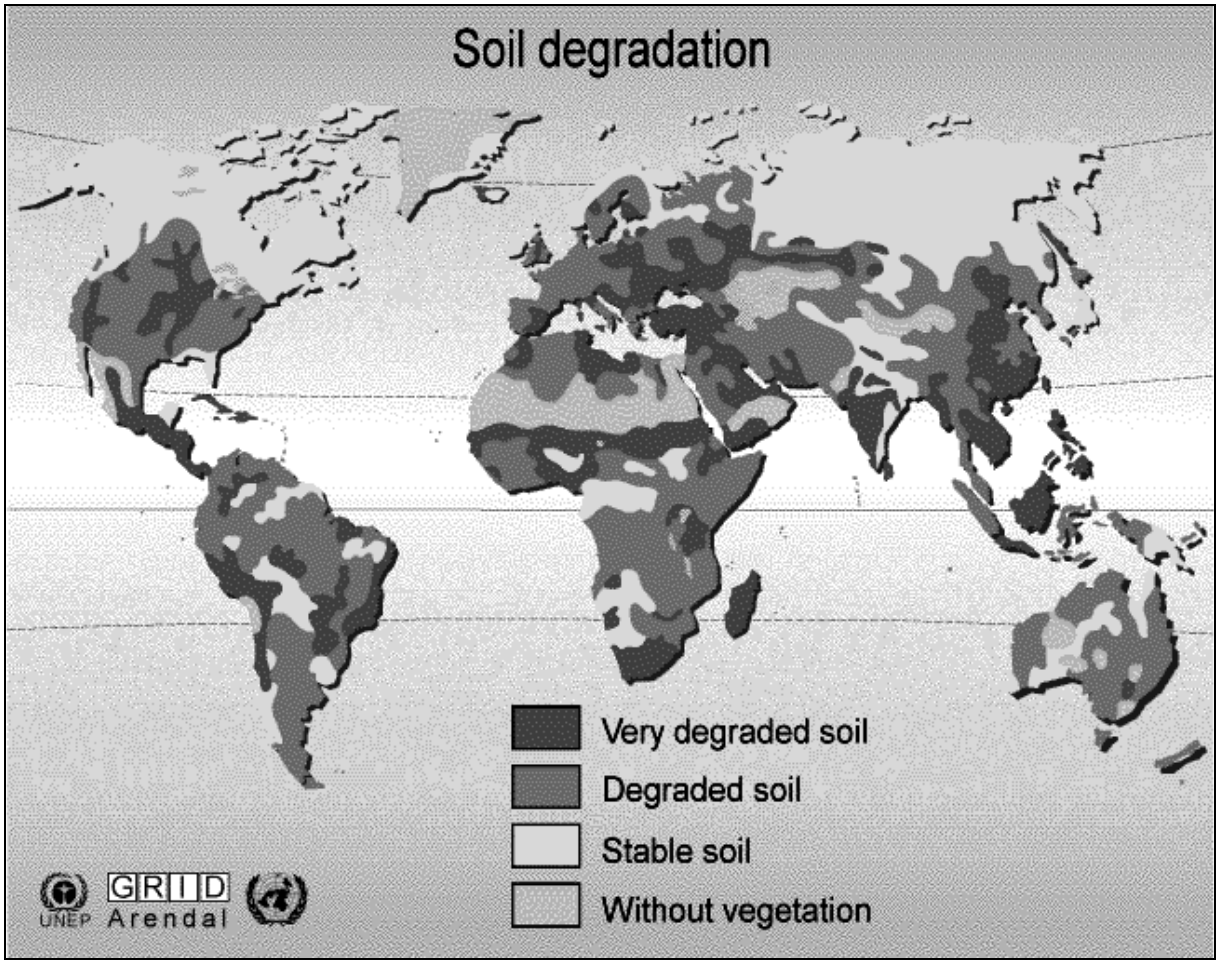
* Předepsáno dle zákona č. 284/1991 Sb., o pozemkových úpravách a pozemkových úřadech, ve znění zákona č. 38/1993 Sb. a zákona č. 217/1997 Sb.

Janeček a kol., 1992). Podle této metodiky byla počítána ztráta půdy řadu let v zemědělských organizacích a na mnohých dalších pracovištích. V posledních letech se ukazuje, že některé parametry uvedené v metodice zřejmě zcela neodpovídají skutečným hodnotám v našich podmínkách (týká se zejména erozní účinnosti srážek, viz kapitola 2.1.2.2) a proto je třeba provést řadu dalších verifikací.

Dále se výzkumem vodní eroze zabývá řada specializovaných pracovišť a především vysokých škol. Jsou to jednak zemědělské univerzity v mnoha městech ČR (např. ČZU v Praze), dále technické univerzity (např. VUT v Brně) a přírodovědecké fakulty ostatních vysokých škol. Významné místo mezi těmito pracovišti získala v minulých 30 letech i Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství na stavební fakultě ČVUT v Praze pod vedením Prof. Miloše Holého. To lze doložit např. zřejmě nejrozšířenější českou publikací o erozi „Eroze a životní prostředí“ (Holý, 1994) řadou dalších publikací a mezinárodních projektů i účastí na mezinárodních konferencích. Katedra navazující na tuto tradici se nadále zabývá výzkumem i modelováním erozních procesů v měnících se podmínkách hospodaření a ochrany krajiny a životního prostředí ČR.

1.2.2 Vodní eroze ve světě

Obr. 1.2.2–1 Celosvětový rozsah degradace půdy (Rekacewicz, 2004).



V celosvětovém měřítku je vodní eroze vážným problémem, ke druhům vyskytujícím u nás se přičleňuje zejména eroze na mořských březích působící spolu se zátopou ztráty celých

oblastí mnoha zemí. Rovněž výrazně eskalované erozní jevy, vyskytující se u nás pouze omezeně (např. strže) degradují v některých územích téměř veškerou dostupnou půdu a jsou zdrojem vážných ekonomických problémů.

V odhadu celosvětově zasažené plochy a objemu odnášené půdy se zdroje různí. Podle (Holý, 1994) je každoročně postihováno erozí asi 24 miliard tun ornice, což odpovídá rozloze veškeré ornice na pozemcích v Austrálii, kde se pěstuje pšenice, a představuje to ztrátu 9 miliónů tun potenciální sklizně obilí. Podle výsledků programu GLASOD (http://www.soilerosion.net/ a http://lime.isric.nl/) je přibližně 15% zemského povrchu (oceány a ledovce nepočítaje) ohroženo degradací půdy, z toho 56% vinou vodní eroze a zhruba 28% vinou eroze větrné. To znamená, že vodní eroze ohrožuje asi 11 milionů km^2 – viz. Obr. 1.2.2–1.

Zahraniční dostupné zdroje se shodují, že potřeba zkoumání a modelování erozních jevů je trvalá, a na mnoha místech Země zcela akutní. Výzkum probíhá na řadě specializovaných pracovištích, z nichž nejvýznamnějším zřejmě zůstává americký United States Departement of Agriculture – Agricultural Research Service, USDA-ARS, kde byla odvozena USLE. Krom výzkumných ústavů (působících v oblasti zemědělství, nebo ochrany životního prostředí) jsou půdní a geomorfologické procesy zkoumány na mnoha univerzitách.

O erozi jsou stále publikovány články v mezinárodních publikacích, jako jsou CATENA, Landscape Erosion and Evolution Modeling, aj. (viz. http://authors.elsevier.com/). Jedna možnost je tyto publikace odebírat, další moderní způsob je předplatit si jejich elektronická vydání na internetu. Sledovat alespoň obsahy jednotlivých vydání a vyhledávat články (případně jejich abstrakty) podle autorů či klíčových slov je možné např.na adrese http://www.sciencedirect.com/.

Mezi jinými se v posledních letech snaží celosvětový výzkum eroze koordinovat World Association of Soil and Water Conservation (WASWC). Tato nevládní organizace sdružuje asi 500 členů z celého světa, podporuje výzkum a vývoj a pořádá mezinárodní konference o erozi. Existuje samozřejmě celá řada dalších organizací, jejich seznam je možné nalézt například na adrese http://www.soilerosion.net/.

V neposlední řadě je dnes problémům vodní eroze je věnována celá řada internetových portálů a adres, které mohou být zdrojem aktuálních informací i údajů o vznikajících publikacích a projektech. Z těch nejdůležitějších je možno jmenovat alespoň následující:

http://www.soilerosion.net/ - Portál obsahující vysvětlení základních pojmů a odkazy na organizace, erozní modely, projekty, konference, ...

http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/ - The National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-ARS.

http://www.nrcs.usda.gov/technical/agronomy.html - Domácí stránky amerického USDA, oddělení Natural Resources Conservation Service

http://www.epa.gov/ - U.S. Environmental Protection Agency.

http://www.seafriends.org.nz/enviro/soil/erosion.htm - Podrobný popis erozního procesu, souvisejících jevů a jejich následků v obsáhlé publikaci.

http://www.netc.net.au/enviro/fguide/contents.html - vysvětlující portál, věnovaný půdě a její degradaci.

Nalézt lze samozřejmě řadu knih a dalších užitečných zdrojů z celého světa.

1.3 Metody výpočtu erozní ohroženosti a objemu splavenin

Výpočet ztráty půdy, posouzení erozní ohroženosti pozemků, celkové posouzení erozních a transportních procesů v půdě – to vše slouží účelné ochraně našeho půdního fondu a návrhům případných opatření. Výpočty pomáhají určit vhodnou delimitaci půdního fondu, uspořádání i způsob hospodaření na pozemcích. Dalším přínosem je usnadnění odhadu množství sedimentu zachyceného v nádržích jednotlivých povodí. Výpočetní metody lze rozdělit na empirické a simulační.

Empirické metody jsou oblíbeny pro svoji jednoduchost a (relativní) dostupnost vstupních dat. Byly odvozeny na základě dlouhodobého pozorování skutečných erozních procesů, ovšem jsou omezeny právě podmínkami, za kterých byly získány. Jednotlivé vstupní parametry je třeba korigovat a určovat s ohledem na skutečné podmínky v terénu, které se mohou značně lišit od podmínek sloužících k odvození daných vzorců.

Simulační modely řeší problematiku na základě matematického popisu skutečných fyzikálních procesů. Rozšířily se především v první polovině devadesátých let s rozvojem výpočetní techniky a jejich kvalita je podřízena právě nárokům na počítačové vybavení. Rovněž vstupní data jsou obvykle méně dostupná, ovšem to vše je vynahrazeno značnou efektivností výpočtu. Je možné zkoumat procesy v dlouhodobém měřítku a pro různé varianty hospodaření a to vše poměrně levně a rychle. Tyto modely přispívají k lepšímu poznání a prozkoumání erozních jevů.

Vývoj jednoznačně směřuje k nahrazování původně manuálních výpočetních metod počítači (obvykle na bázi Geografických informačních systémů). Tento postup umožňuje hodnotit velká území sice s omezenou přesností, ale s mnohem menšími nároky na dobu zpracování, nebo hodnotit menší území mnohem kvalitněji (fyzikálně založenými matematickými modely) než bylo možné dřív pomocí manuálních výpočtů.

Pro výpočet erozní ohroženosti ve velkých územích lze ovšem dosud zpravidla využít pouze jednoduché empirické modely s různou úrovní podrobnosti řešení. Důvodem je nižší náročnost na kvalitu a podrobnost vstupních dat (v případě empirických modelů) a nižší náročnost na výpočetní čas. Vysoká komplexnost fyzikálně založených modelů dosud neumožňuje řešení rozsáhlých území, neboť požadovaná podrobnost vstupních vrstev znamená příliš velký objem dat a přílišnou náročnost výpočetního procesu. Modely bývají obvykle omezeny a kalibrovány pouze pro malá území. Dalším omezením je dostupnost vstupních dat, neboť získat podrobná (například půdní) vstupní data pro velká území je velmi obtížné a ekonomicky i metodicky náročné.

V posledních letech se objevují i názory, že snaha o použití fyzikálních a komplexních modelů pro velká území (velký optimismus v tomto směru, podmíněný rychlým rozvojem výpočetní techniky, byl patrný především v první polovině devadesátých let) je krok špatným směrem. Každý takový model v sobě totiž i přes popis skutečných procesů musí nést řadu kalibračních parametrů. Přitom v rozsahu celých povodí, jsou srážko-odtokové vztahy, uvolňování, transport a zachytávání půdních částic jevem natolik komplexním, že jej pomocí fyzikálních rovnic nelze plošně postihnout, respektive přesně modelovat. Do výpočtu pomocí fyzikálních modelů jsou tak vnášeny chyby, přičemž problém je, že rozsah takových chyb nelze (nebo je velmi nesnadné) odhadnout. Při fyzikálním popisu transportu v prostředí komplexnějším, než jaké odpovídá použitým rovnicím, pak neznáme meze nejistoty našeho výpočtu a je lépe se spolehnout na empirickou kalibraci jednoduššího přístupu. Vhodnou alternativou by tak mohly být modely zohledňující prostorovou variabilitu přispívajících faktorů a topografii, ale postavené stále na empirické a kalibrovatelné bázi (Nachtergaele et. Al, 2001). Jedním z takových modelů, který v sobě

kombinuje prvky empirické i simulační (odtokové) je v této práci používaný Watem/SEDEM (Van Rompaey et. al, 2001).

1.3.1 Empirické metody

Jedná se o metody statisticky odvozené na základě mnoha měření.

Hlavními výhodami empirických modelů jsou :

- jednoduchost a přehlednost užitých rovnic a algoritmů
- matematická stabilita
- rozsáhlá validace v různých podmínkách
- velká rozšířenost a snadná použitelnost
- nutnost relativně malého počtu vstupních dat, která navíc jsou z větší části parametrizována nebo jsou poměrně snadno dostupná

Hlavními nevýhodami naproti tomu jsou :

- Jedná se klasicky o dlouhodobé průměrné odhady
- Obvykle nejsou postaveny pro řešení jednotlivé přívalové srážky (i tyto varianty se ale objevily, viz. MUSLE)
- Velké zobecnění neumožňuje obvykle zadání nehomogenit zkoumaných jevů (tato nevýhoda je řešením na bázi GIS značně eliminována)
- Hlavní metody byly odvozeny v podmínkách USA, jež se od naší morfologie většinou značně liší (nicméně byly s úspěchem používány po celém světě, a kalibrovány pro řadu evropských zemí)

Typickým představitelem empirických metod je **Univerzální rovnice ztráty půdy** (USLE), rovněž použitá pro výpočet ztráty půdy v této práci (Wischmeier et al., 1978). Jedná se o jednoduchý vztah se šesti parametry, jejichž přesnost se ovšem výrazně podílí na získaných výsledcích. Rovnice využívá principu tzv. přípustné ztráty půdy. Byla sestavena na základě mnoha měření provedených na jednotkových pozemcích (jednotný sklon 9 % a délka 22,13 m) a její parametry jsou určovány jako dlouhodobé roční průměry měřených hodnot. Proto také výsledkem je průměrná roční ztráta půdy na dané ploše. V kombinaci s hodnotou přípustné ztráty půdy je rovnici možno použít též k dalším účelům, jako je určení přípustné délky svahu pro návrh protierozních opatření, pro určení vhodného typu zejména vegetačních opatření nebo pro odhad ztráty půdy z povodí. Protože její parametry jsou ročními průměry, rovnici není možné použít k výpočtu ztráty půdy z jednotlivé přívalové srážky. Na základě USLE byly odvozeny její další modifikace: modifikovaná USLE (MUSLE) pro odhad množství splavenin z jednotlivého deště a revidovaná, zpřesněná rovnice RUSLE, uvedená na počátku 90. let (Renard et al. 1993).

1.3.2 Matematické simulační modely

Fyzikálně založené modely se rozdělují podle časového nebo prostorového hlediska.

Časově :

- epizodní modely – simulace pro jednotlivou srážku
- kontinuální modely – delší simulované období (měsíce, roky, …)

Prostorově :

- pro jednotlivý svah (vhodné především pro návrhy jednotlivých technických opatření)
- pro celá povodí (vhodné především pro rozhodovací územní proces v malých, středních a velkých povodích)

Modely zohledňují skutečný průběh erozních procesů a proto popisují jejich jednotlivé fáze :

- uvolnění půdních částic - deštěm
  - povrchovým odtokem
- transport (přemístění) částic - deštěm
  - povrchovým odtokem

Při tom je třeba ještě zhodnotit jednotlivé formy eroze, které se svými účinky výrazně liší. V závislosti na typu povrchového odtoku je to :

- eroze mezirýhová – pro počáteční plošný povrchový odtok
- eroze rýhová – pro soustředěný povrchový odtok

(Dostál et al. 1996)

Typickým představitelem simulačního modelu je model WEPP (Water Erosion Prediction Project - http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html). Jedná se o komplexní model určený pro modelování odtokového a erozního procesu v rámci jednotlivého pozemku (případně malého povodí). Model byl vyvíjen od počátku 80. let rovněž pod patronací USDA-ARS. Po přípravě a zadání mnoha vstupních údajů o půdě, morfologii vegetaci a srážkách WEPP modeluje procesy vedoucí k vodní erozi, kterými jsou – infiltrace a odtok, rozrušení půdních agregátů, transport a ukládání půdních částic, fáze růstu plodin a rozklad rostlinných zbytků. Po jednotlivých dnech je modelován obsah vlhkosti v jednotlivých vrstvách půdního podkladu. Zahrnuty jsou vlivy orby a konsolidace půdy (Laflen et. al, 1997). Jak vidíme pro takto komplexní modelování je příprava vstupních dat vysoce náročná a pro větší území téměř nemožná.

Podobné nároky (byť ne vždy v takovém rozsahu) na vstupní data mají i ostatní simulační modely, jako jsou ANSWERS, CREAMS, EROSION-3D, EUROSEM a řada dalších. Erozních modelů jsou dnes již stovky a vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena na využití modelů postavených na empirické bázi, není smysluplné popisovat podrobně jednotlivé modely simulační. Další informace je možno nalézt například na http://www.soilerosion.net/.

2 Část druhá – použité empirické modely

2.1 Univerzální rovnice ztráty půdy (USLE)

2.1.1 Základní popis

Rovnice byla postupně odvozena v USA a jejím výstupem je průměrná roční hodnota ztráty půdy v tunách na hektar (t/ha.rok^{-1}) (Wischmeier et al., 1978). Metoda je u nás všeobecně rozšířena. Dnes je k dispozici též její revidovaná podoba – RUSLE (Renard et al. 1993).

Základní tvar univerzální rovnice ztráty půdy **(2.1.1–1)** je tvořen součinem šesti faktorů:

$$\boldsymbol{G = R \times K \times L \times S \times C \times P} \qquad (2.1.1–1)$$

G *Průměrná roční ztráta půdy (t / ha × rok)*

R *Faktor erozní účinnosti srážek, definovaný jako součin kinetické energie deště a jeho největší 30 minutové intenzity R=E.i, pro danou úlohu (sečtený pro dobu celého roku) je tedy závislý též na četnosti výskytu srážek. (MJ/ha.cm/h)*

K *Faktor erodovatelnosti půdy, vyjadřující náchylnost půdy k erozi v závislosti na struktuře půdy, její propustnosti a dalších vlastnostech (určen např. z nomogramu)(t.h.MJ-1.cm-1).*

L *Faktor délky svahu zohledňuje vliv nepřerušené délky svahu na velikost ztráty půdy. Vyjadřuje poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a ztráty půdy z jednotkového pozemku délky 22,13 m.*

S *Faktor sklonu svahu. Velikost sklonu svahu (zohledněná tímto faktorem) erozi velmi výrazně ovlivňuje. Faktor vyjadřuje opět poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jednotkového pozemku se sklonem 9%. Existují též zpřesnění tohoto faktoru pro tvar svahu (např. rozdělením svahu na dílčí elementy).*

(LS *Součin faktorů LS bývá často určován pomocí kombinovaného vzorce nebo společného postupu. Dohromady je potom nazýván „topografický faktor“.)*

C *Faktor vyjadřující vliv osevního postupu a agrotechniky, udává poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jednotkového pozemku s trvalým úhorem při zachování zbylých parametrů, zohledňuje tedy ochranný vliv vegetace. Je třeba brát ohled na změny vegetačního pokryvu během roku a z nich případně utvořit žádaný roční průměr ve shodě s ostatními parametry USLE.*

P *Faktor vyjadřující vliv protierozních opatření. Opět poměr ztráty půdy z vyšetřovaného pozemku a z jednotkového pozemku obdělávaného ve směru sklonu svahu. Hodnoty součinitele jsou dány tabulkově.*

Universální rovnice ztráty půdy je určena především pro :

- stanovení průměrného ročního množství půdních částic na pozemcích v daných klimatických, půdních, morfologických a hospodářsko-technických podmínkách,
- výběr vhodných půdoochranných opatření na vyšetřovaném pozemku. Pro tento účel je USLE používána ve spojitosti s hodnotou tzv. přípustné ztráty půdy, na základě které lze stanovit potřebné hodnoty faktorů C, P a L, s jejichž použitím se provádí výběr a návrh systému protierozní ochrany a jeho prvků.,
- určení maximální délky svahu (tzv.přípustné délky) pro daný systém hospodaření na pozemku. Tyto hodnoty jsou porovnávány s limitními délkami pro účinnost jednotlivých prvků systému hospodaření,
- USLE je možno také použít pro odhad ztráty půdy v povodí. Pro tento účel musí však být stanoveny charakteristické hodnoty faktorů rovnice, a to jako vážené průměry pro povodí nebo jako hodnoty pro jednotlivé homogenní části povodí,
- pro odhad ztráty půdy z lesních ploch, z nevyužívaných zemědělských půd, stavenišť a rekreačních lokalit; přesnost odhadu ztráty půdy pro tyto případy je podstatně menší než pro zemědělské půdy vzhledem k nižší přesnosti stanovení vstupních údajů (především faktoru C).

Univerzální rovnice ztráty půdy je využitelná i při globálním přístupu, tj. při předběžných studiích erozní ohroženosti. Cílem řešení protierozní ochrany v globálních měřítcích by mělo být poskytnutí celkového přehledu o erozní ohroženosti území a určení nejrizikovějších míst. Tyto podklady je vzhledem k velikosti řešených území nejvhodnější zpracovávat v měřítcích cca 1:50 000 (Dostál, 1998).

Dva zásadně odlišné přístupy k řešení pomocí USLE jsou:

- manuální metody výpočtu (pomocí charakteristických profilů)
- propojení USLE a GIS (řešení pomocí rastrových informačních vrstev)

2.1.2 Manuální výpočet

USLE (a tedy veškeré její parametry) byla původně odvozena a validována pro manuální výpočet a charakteristické profily pozemků. Její další využití v prostorově orientovaných databázích bylo podmíněno dlouhým vývojem, novými kalibracemi jednotlivých parametrů a modifikacemi původních vztahů. Zde je tedy prezentován původní způsob výpočtu, který byl podkladem pro nová odvození hodnot parametrů používaných dnes v prostředí GIS.

2.1.2.1 Princip výpočtu – charakteristický profil

Manuální výpočet je založen na samostatném určení průměrné ztráty půdy pro jednotlivé pozemky. Každý pozemek (případně dílčí úsek) je brán jako unitární jednotka se společnými charakteristikami pro celý tento půdní blok. Pozemky jsou vyznačeny v mapách a je proveden jejich tabelární výpis spolu s rozlohou.

Dále jsou z mapy (obvyklé měřítko např. 1:10 000) určeny na všech pozemcích charakteristické profily povrchového odtoku (takové, které reprezentují průměrný odtok z pozemku). V případě větší členitosti pozemku může být těchto profilů více, každému musí poté být přiřazen procentuelní podíl plochy celého pozemku. Pro jednotlivé profily jsou určeny všechny faktory USLE a pro každý profil je vypočtena průměrná roční ztráta půdy G (t/ha*rok).

Výsledky výpočtu jsou takto ovlivněny značnou generalizací, neboť faktory S, L, K, (případně C) jsou určovány vždy pro celý charakteristický profil. Při výpočtu lze zpřesnit například určení faktoru sklonu svahu S rozdělením na dílčí elementy (Janeček 1992), ovšem přesto je obtížné do výpočtu zahrnout zejména skutečné morfologické nehomogenity terénu.

Poznámka: Příkladem může být problém při určení skutečné délky svahu pro výpočet L faktoru na konkávních, resp. konvexních svazích. Zde není možno postihnout konvergenci nebo divergenci povrchového odtoku a v místech „střídavého“ zakřivení vrstevnic je manuální odečtení skutečné délky svahu z mapy do značné míry subjektivní (Desmet&Govers, 1996).

Dalším manuálním řešením je tzv. bodová metoda výpočtu, navržená Williams&Berndt 1972, 1978 (cit. Desmet&Govers 1996), kdy je povodí reprezentováno omezeným množstvím bodů, pro které jsou určeny faktory USLE. Hodnoty ztráty půdy jsou potom brány jako průměrné hodnoty pro každou reprezentovanou plochu. Výsledky jsou ovšem značně citlivé na hustotu bodové sítě a hodnoty jsou srovnatelné s výpočtem pomocí charakteristických profilů (Griffin et al. 1988, cit. Desmet&Govers, 1996).

Zde je způsob určení jednotlivých faktorů podle původní metodiky, používaný v ČR, vztahy jsou modifikovány pro výpočet v jednotkách SI (Janeček a kol., 1992):

2.1.2.2 Faktor erozní účinnosti deště R

Faktor Erozní účinnosti deště R je definován vztahem (2.1.2–1) (Wischmeier&Smith, 1978):

$$R = E*i30 \qquad (2.1.2–1)$$

R *je faktor erozní účinnosti deště (MJ/ha.cm/h)*

E *celková kinetická energie deště (J/m^2)*

I30 *maximální třicetiminutová intenzita tohoto deště*

Celková kinetická energie se pak určuje ze vztahu (2.1.2–2):

$$E = (206+87 \log is)*Hs \qquad (2.1.2–2)$$

is *je intenzita deště (cm/h)*

Hs *úhrn přívalového deště (cm)*

Metodikou (Janeček a kol., 1992) je pro celé území ČR doporučovaná průměrná hodnota faktoru 20 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$. Tato hodnota je používána na mnoha pracovištích řadu let, nicméně dle nových verifikací je tato hodnota faktoru R zjevně podhodnocena, skutečné hodnoty pro území ČR je zřejmě pohybují přibližně v rozmezí 35-55 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$ (Van der Knijff et al., 2000) (Dostál a kol., 2003c). Podrobná mapa skutečných hodnot však není dosud bohužel sestavena.

Vyšší než doposud používané hodnoty potvrzují nejen hodnoty používané ve všech okolních státech, ale i revize R faktoru výpočtem podle původní metodiky pro 4 stanice ČR, kde byla potřebná data dostupná (Dostál a kol., 2003c). Více v kapitole 3.5.

Pro celkovou revizi hodnot faktoru R by bylo ideální získat datové řady 30-minutových intenzit erozně účinných srážek z většího množství stanic ČR. To je bohužel velmi problematické, a proto je třeba hledat i jiné způsoby odvození faktoru R. V evropském kontextu bylo provedeno několik pokusů propojit hodnoty faktoru R s obecnými charakteristikami srážek (celkovými úhrny za určitá období), které jsou obvykle k dispozici v mnohaletých datových řadách. Z postupů popisovaných v literatuře by u nás mohly být uplatnitelné následující dva způsoby, v případě úspěšné verifikace.

Prvním je postup odvozený pro sousední Bavorsko (Rogler, Schwertmann, 1981) a využitý též pro výpočet přehledové mapy erozní ohroženosti střední a severní Evropy podle USLE (Van der Knijff et al., 2000), jíž je pokryto i území ČR. Vztah je dán následující regresní rovnicí (2.1.2–3) :

$$R = 10 * (-1{,}48 + 1{,}48 * N_S) \qquad (2.1.2–3)$$

R *faktor erozní účinnosti deště v jednotkách SI* ($MJ . mm . ha^{-1} . h^{-1} . rok^{-1}$)

N_S *Průměrný srážkový úhrn za letní období (květen až říjen) (mm)*

Poznámka: POZOR, výsledek v jednotkách SI (mm) vychází ve stovkách, tedy 10x větší vzhledem k hodnotám běžně používaným v ČR (cm).

Druhý postup je odvozen na univerzitě v belgickém Ghentu, několikrát publikován v minulých letech a definitivně představen jako metodika pro státy západní Evropy na sympoziu „25 let hodnocení eroze“ v září 2003 (Gabriels et al., 2003). Postup využívá tzv. **Modifikovaný Fournierův index** (MFI). Původní Fournierův index (FI) byl odvozen v 60. letech pro odhad zanášení vodních toků. Pro použití v USLE byl upraven jako MFI v roce 1980 (Arnoldus, 1980) do vztahu (2.1.2–4) :

$$MFI = \frac{\sum p^2}{P} \qquad (2.1.2–4)$$

p *měsíční srážkový úhrn*

P *roční srážkový úhrn*

MFI určuje erozní účinnost deště, k porovnání účinnosti v jednotlivých státech Evropy byl využit i v projektu CORINE, nicméně hodnoty MFI neodpovídají hodnotám faktoru R a v případě využití dlouhodobých průměrů MFI je jejich hodnota závislá na přístupu řešitele, jiný výsledek dává celkový průměr MFI spočtený z hodnot MFI v jednotlivých letech a

jiný výsledek, pokud za všechny roky určíme jednu hodnotu MFI z měsíčních úhrnů podle původního vzorce.

V evropském projektu CORINE (CORINE, 1992) byla erozní účinnost srážek posuzována indexy podle MFI rozděleného do 5 tříd (**Tabulka 2.1.2–1**):

Tabulka 2.1.2–1: Klasifikace MFI podle projektu CORINE:

Rozsah MFI	erozní účinek	Třída
< 60	velmi nízký	1
60 – 90	nízký	2
90 – 120	střední	3
120 – 160	vysoký	4
> 160	velmi vysoký	5

Dále pro stanovení nerovnoměrnosti srážek během roku a jejího vlivu na erozní procesy je toutéž metodikou dále využíván **index rozdělení srážek** (PCI) v podobě (2.1.2–5) (Gabriels et al., 2003):

$$PCI = 100 \frac{\sum p^2}{P^2} \qquad (2.1.2–5)$$

p *měsíční srážkový úhrn*

P *roční srážkový úhrn*

PCI určuje rovnoměrnost rozdělení srážek během roku. Pokud je srážkový úhrn v každém měsíci roku stejný, PCI = 8,3. Pokud je celkový roční úhrn způsoben srážkami v jediném měsíci, PCI = 100. Hodnota průměrného PCI pro řadu let se opět liší, zda nejprve spočítáme hodnoty PCI v jednotlivých letech (a poté průměr za celé období), nebo zda nejprve tvoříme průměrné měsíční srážkové úhrny a z nich teprve výslednou hodnotu PCI (jakási hodnota PCI „průměrného roku“).

V navržené metodice (**Tabulka 2.1.2–2**) je klasifikace PCI provedena podle (Olivier, 1980), přičemž velké koncentrace srážek způsobené nerovnoměrným rozdělením předpokládají větší erozní účinnost:

Tabulka 2.1.2–2: Klasifikace PCI:

Rozsah PCI	popis rozdělení
8,3 – 10	rovnoměrné
10 – 15	středně sezónní
15 – 20	sezónní
20 – 50	výrazně sezónní
50 – 100	ojedinělé srážky

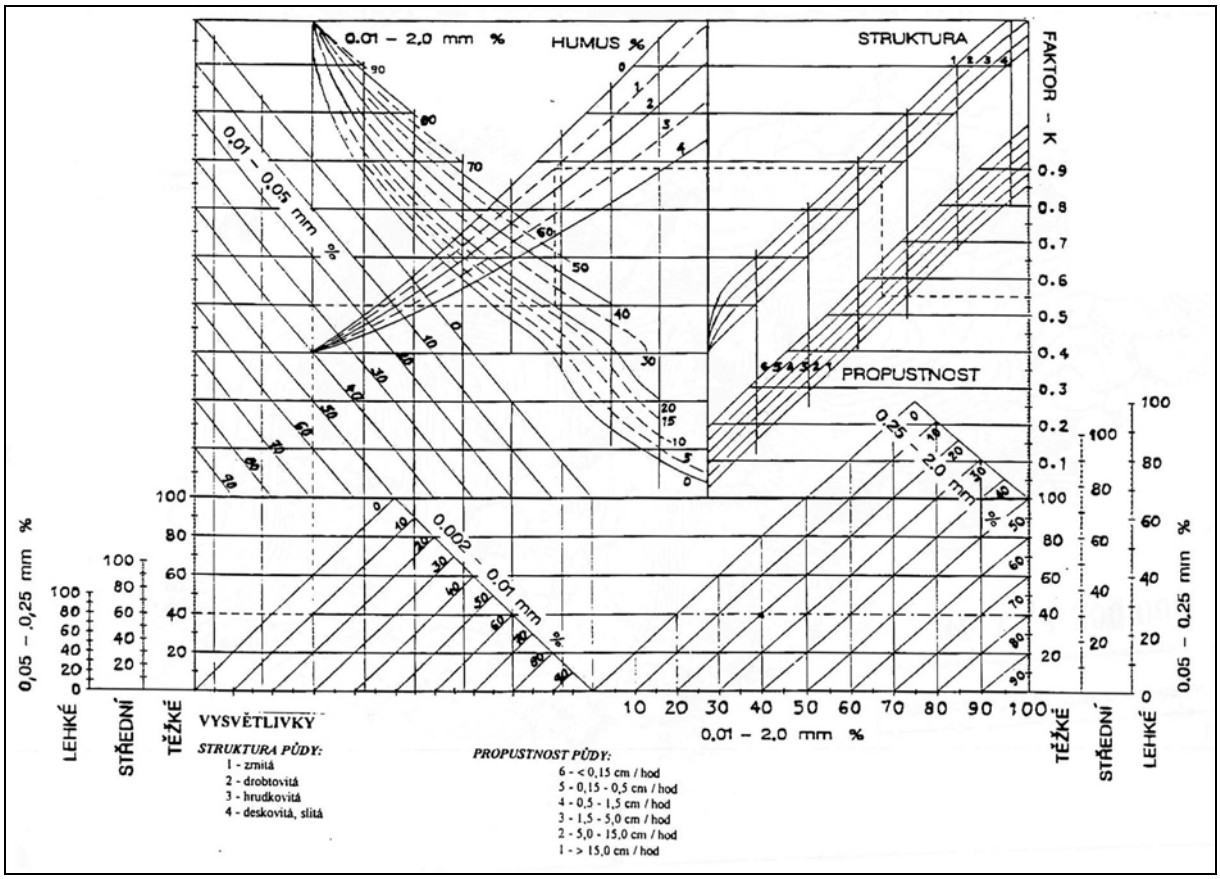
Navržená metodika slouží nyní k porovnání erozních účinností srážek v jednotlivých evropských zemích. Zřejmě na jejím základě nelze nyní stanovit přesné hodnoty R faktoru

na našem území, nicméně při známých hodnotách R faktoru používaných v okolních zemích může napomoci stanovení úrovně erozní účinnosti srážek v ČR v evropském kontextu.

2.1.2.3 Faktor erodovatelnosti půdy K

Faktor erodovatelnosti půdy K je definován jako odnos půdy v tunách z 1 ha, na jednotku dešťového faktoru R ze standardního pozemku (kypřený černý úhor se sklonem 9 % a délkou 22,13 m). Hodnoty K faktoru v závislosti na základních parametrech půdy jsou stanoveny v **nomogramu – Obr. 2.1.2–1** (Janeček a kol., 1992).

Obr. 2.1.2–1 Hodnoty faktoru K ($t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}$) v závislosti na zrnitostním složení půdy, její struktuře a propustnosti a procentu organické hmoty.



Dalším zdrojem hodnot faktoru K může být přímá **převodní tabulka z hodnot „hlavní půdní jednotky“ kódu BPEJ** (více v kapitole 3.4.1), zpracovaná Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd (Janeček a kol. 1992).

V souvislosti s hledáním vhodné alternativy k mapám BPEJ, jež jsou pro řešení velkých území v regionálním měřítku často nedostupné, a vzhledem k problémům s odvozením faktoru K na základě charakteristiky půd uváděné v digitálních mapách KPP (více kapitola 3.4.1) byl při přípravě této práce proveden rozsáhlý průzkum literatury a odborných publikací souvisejících s tématem odvození K faktoru. V uplynulých letech byla publikována řada prací odvozujících K faktor (pomocí kalibrace na měřených hodnotách) na základě jednodušších půdních charakteristik, než jsou všechny potřebné vlastnosti v původním nomogramu Wischmeiera a Smithe. Obvykle se jedná o závislost na texturních poměrech půd. Většina těchto odvození není zjevně použitelná v našich

podmínkách, z důvodu lokálních charakteristik zkoumaných půd, nicméně byl nalezen vztah, který by mohl být u nás použitelný, v případě potřeby odvození faktoru K na základě zrnitosti a mapových podkladů. Předpokladem je ovšem jeho alespoň základní kalibrace pro podmínky ČR.

Jedná se o vztah odvozený v (Römkens et al., 1986) a upravený pro využití v RUSLE (Renard et al., 1993). Zde je dokonce zmíněno, že hodnoty na základě původního nomogramu jsou (podle provedených testů) méně vhodné pro půdy s kvalitními agregáty a s odlišnou texturou než původní půdy americké. V evropských podmínkách by tedy mohl **Römkensův vztah** (2.1.2–6) odvozený na základě měřených hodnot K velkého vzorku půd z celého světa vyhovovat.

$$K = 0{,}0034 + 0{,}0405 \cdot \exp\left[-0{,}5\left(\frac{\log D_g + 1{,}659}{0{,}7101}\right)^2\right] \qquad (2.1.2–6)$$

K *faktor erodovatelnosti půdy (t.h.MJ^{-1}.mm^{-1})*

D_g *vážený geometrický průměr velikosti (průměru) půdních částic (mm)*

Poznámka:POZOR – všimněte si že výsledek empirického vztahu je uveden v jednotkách SI, tedy v t.h.MJ^{-1}. mm^{-1}, a oproti běžně používaným hodnotám v ČR (t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}) je tedy desetkrát menší.

D_g je funkcí půdní zrnitosti může být vypočten jako (2.1.2–7):

$$K = \exp\left[\sum f_i \cdot \ln\left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2}\right)^2\right] \qquad (2.1.2–7)$$

Pro každou frakci (jíl, prach, písek) je

d_i *maximální velikost částic(mm)*

d_{i-1} *minimální velikost částic (mm)*

f_i *procentní podíl dané frakce*

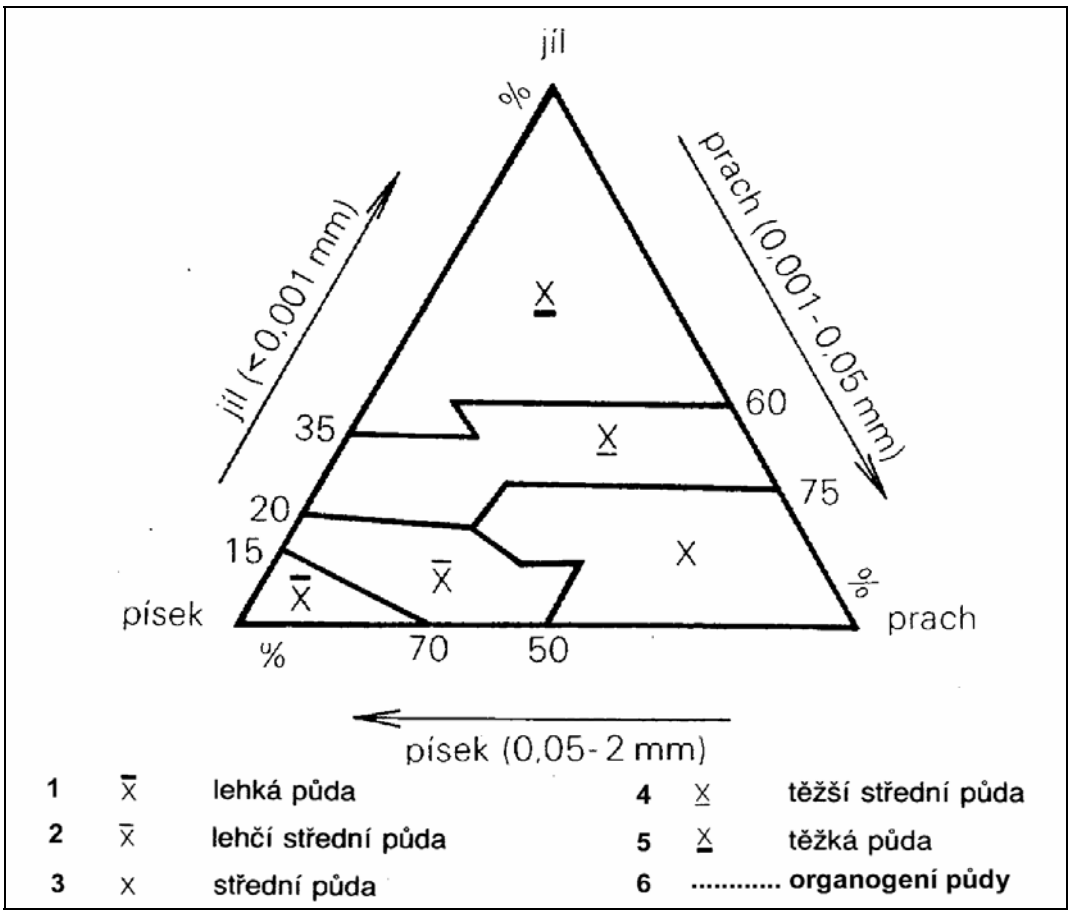
Procentní podíly daných frakcí f_i jsou stanoveny čárou zrnitosti při odběru vzorků, případně při využití mapových podkladů mohou být odvozeny z diagramu zrnitosti (např. charakteristika DOM 3) – **Obr. 2.1.2–2**.

Autoři varují, že tento vztah (2.1.2–6) není doporučen pro půdy, jejichž erodovatelnost je podmíněna více jinými vlastnostmi než texturou. To platí zejména pro usazeniny vulkanického původu, jejichž erodovatelnost je značně vyšší, než predikuje Römkensova závislost. V literatuře (Van der Knijff et al. 2000) je pro vulkanické půdy doporučena přibližná hodnota K faktoru = 0,80 t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}.

Uvedený vztah (2.1.2–6) je využit rovněž při výpočtu přehledové mapy erozní ohroženosti celé Evropy podle USLE (Van der Knijff et al., 2000). Je ovšem poznamenat, že nejistota podobných zjednodušujících přístupů je značně vysoká, a je třeba tedy počítat spíše s určitým rozmezím hodnot faktoru K, nebo K zpřesnit na základě dalších charakteristik.

V některých publikacích (např. Van Rompaey et al., 2000) je uvedený vztah používán v modifikované podobě s mírně odlišnými číselnými parametry, odvozenými na základě místních měřených hodnot faktoru K. Tato cesta by v podmínkách ČR také mohla vést k úspěšnější verifikaci faktoru K a kvalitnějším predikcím pomocí USLE.

Obr. 2.1.2–2 Diagram zrnitosti pro půdní charakteristiky podle DOM 3.



Míru nejistoty vztahů tohoto typu se ve své práci pokusili určit např. (Torri et al., 1997), kteří odvodili několik nových vztahů na základě více než 200 ve světě publikovaných měřených hodnot K faktoru. Autoři ve své práci poukazují, že závislost skutečného faktoru K na uvedených parametrech je velmi volná a pomocí numerické matematiky a fuzzi množin stanovují tedy nikoli pevné hodnoty, ale pravděpodobnosti daných hodnot K i s mírou nejistoty odhadu a závislosti na dalších faktorech. Jedná se o komplikovaný přístup ukazující, že K faktor není jednoduše stanovitelný a v nových konkrétních podmínkách je třeba se jeho kvantifikací vždy opětovně zabývat.

2.1.2.4 Faktor délky a sklonu svahu LS

Bezrozměrný faktor LS – nazývaný též topografický faktor – zahrnuje vliv délky a sklonu svahu na ztrátu půdy. Představuje poměr ztráty půdy na jednotku plochy řešeného svahu ke ztrátě půdy na standardní srovnávací ploše délky 22,13 m a se sklonem 9 %.

Odděleně jsou hodnoty L a S vyjádřeny jako (2.1.2–8), (2.1.2–9):

Faktor délky svahu L (2.1.2–8):

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{m} \qquad (2.1.2–8)$$

λ *horizontální délka svahu měřená od rozvodnice (případně přípustná délka svahu)*

m *exponent (v rozmezí 0,2 ~ 0,6) zohledňující sklon svahu*

sklon do 1 % …… $m = 0,2$

sklon do 3 % …… $m = 0,3$

sklon do 5 % …… $m = 0,4$

sklon větší 5 % … $m = 0,5$

Faktor sklonu svahu S (2.1.2–9):

$$S = \frac{0,43 + 0,30\theta + 0,043\theta^2}{6,613} \qquad (2.1.2–9)$$

θ *velikost sklonu svahu v %*

Takto stanovené hodnoty faktorů L a S nejsou schopny popsat vlivy heterogenity sklonu po délce svahu ani změn délek a sklonů na pozemku nepravidelného tvaru. Existuje zpřesnění výpočtu hodnoty faktoru S, kdy svah je rozdělen na 10 stejných úseků a hodnota faktoru S je pak počítána pro každý úsek zvlášť při přiřazování různých vah. Tak je počítán společný vztah pro LS faktor (2.1.2–10) podle (Foster&Wischmeier, 1974):

$$LS = \sum_{j=1}^{N} \frac{S_j \cdot \lambda_j^{m+1} - S_j \cdot \lambda_{j-1}^{m+1}}{(\lambda_j - \lambda_{j-1}) \cdot (22,13)^m} \qquad (2.1.2–10)$$

Sj *faktor sklonu svahu pro j-tý úsek (element) (m/m),*

λj *vzdálenost od dolní hranice j-tého úseku k horní hranici pozemku (m).*

m *exponent pro výpočet L faktoru zohledňující sklon svahu*

2.1.2.5 Faktor ochranného vlivu vegetace C

Hodnoty faktoru ochranného vlivu vegetace C (bezrozm.) představují poměr smyvu na skutečném pozemku s pěstovanými plodinami ke ztrátě půdy na pozemku s kypřeným černým úhorem při zachování stejných ostatních podmínek.

Kalibrované hodnoty jsou dány tabulkově pro jednotlivá pěstební období, nebo jako průměrné hodnoty roční (Janeček a kol. 1992).

Příklad průměrných ročních hodnot pro některé plodiny v ČR je uveden v (Tabulka 2.1.2–3).

Tabulka 2.1.2–3: Výběr z průměrných ročních hodnot C faktoru (Janeček a kol., 1992)

Plodina	C	Plodina	C
Pšenice ozimá	0,12	Ostatní okopaniny	0,48
Žito	0,17	Řepka	0,22
Ječmen jarní	0,15	Slunečnice	0,60
Ječmen ozimý	0,17	Mák	0,50
Oves	0,10	Ostatní olejniny	0,22
Kukuřice na zrno	0,61	Len	0,25
Luštěniny	0,05	Kukuřice na siláž	0,72
Brambory rané	0,60	Ostatní pícniny jednoleté	0,02
Brambory pozdní	0,44	Ostatní pícniny víceleté	0,01
Cukrovka	0,44	Zelenina	0,45

2.1.2.6 Faktor ochranného vlivu technických opatření P

Faktor ochranného vlivu technických opatření P (bezrozm.) vyjadřuje poměr odnosu ze skutečného pozemku s aplikací určitého způsobu ochranných opatření technického nebo agrotechnického rázu proti stejnému pozemku, udržovaném běžnou agrotechnikou bez využití jakýchkoliv ochranných opatření.

Vzhledem k tomu, že využívání speciálních ochranných agrotechnických postupů a speciální mechanizace je dosud u nás poměrně málo rozšířeno a plošně je silně nahodilé, je běžnou praxí tento faktor opomíjet – uvažovat ho hodnotou P = 1.

2.1.3 Výpočet pomocí GIS

2.1.3.1 Princip výpočtu – distributivní přístup

Výpočet pomocí GIS není založen na určování jednotlivých průměrných hodnot G pro pozemek (resp. charakteristický profil), ale na určení velikosti ztráty půdy pro jednotlivé malé elementy povodí a následnou analýzu (součet na ploše pozemků, určení průměrných hodnot pro pozemky apod.).

Při tomto postupu je na bázi GIS celé povodí (jeho mapové podklady) rozděleno pravidelnou sítí na stejné (obvykle čtvercové) elementy (buňky, resp. pixely).

Každé buňce je potom přiřazena informační hodnota dané veličiny (např. hodnota nadmořské výšky odpovídající zeměpisné poloze buňky). Velikost elementů je dána rozlišením mapových podkladů a kapacitou počítače a pohybuje se řádově v rozmezí 10^0 až 10^2 metrů.

Poznámka: Existují řešení velkých evropských území v hrubším rozlišení rastru – až 1 km - (Van der Knijff, 1999), (Van Dijk, 2001), ale to není podrobnost vhodná pro podmínky ČR.

Tak jsou vytvořeny informační vrstvy, složené z jednotlivých elementů, pro každý z faktorů USLE. Protože elementy všech vrstev si odpovídají svou polohou, je možné

průměrnou ztrátu půdy pro každý element určit jednoduchým vynásobením vrstev v prostředí GIS. Celý postup je velmi jednoduchý, a je-li G určována pro každý element velikosti např. 25×25 metrů, snadno lze do výpočtu zahrnout nehomogenity terénu a prostorového vyčíslení faktorů USLE.

Hlavní výhody propojení USLE a GIS jsou:

- zpřesnění výpočtu (snadnější zahrnutí nehomogenit do výpočtu)
- výrazné zrychlení výpočtu pro velká území (pouze v případě dostatku kvalitních digitálních mapových podkladů, informačních vrstev)
- snadná a efektní prezentace dosažených výsledků pomocí GIS (vytvoření map erozní ohroženosti apod.)

Výsledek výpočtu je ovšem do značné míry úměrný kvalitě daných vstupních dat.

Rozdíl v přístupu k tvorbě datových vrstev při „manuálním výpočtu a „výpočtu pomocí GIS“ se projevuje dvojím způsobem, podle charakteru zadávaných parametrů:

2.1.3.2 Faktory R,K,C,P

Faktory R, K, C, P (a částečně S) jsou „lokální“, distributivní přístup k jejich určení je velmi výhodný, hodnota faktoru je dána kvalitou prostředí přímo v místě jeho určení (příklad: konkrétní pěstovaná plodina v místě analyzovaného elementu přímo určuje jeho hodnotu parametru C).

Nejprve jsou tedy připraveny digitální vrstvy GIS, jež jsou přímým podkladem pro převod na každý z faktorů. Mapa účinnosti srážek, půdní mapa, mapa využití území a stavu vegetace. Tyto informační vrstvy mohou být získány třemi způsoby (příprava vstupních vrstev je náplní kapitoly 3):

- přímo v rastrové podobě (využití území na základě dat DPZ),
- převedením na rastr z vektorových digitálních mapových podkladů (komerční vektorové databáze) a případnou aktualizací, nebo zpřesněním,
- přímou digitalizací (dnes již výjimečně).

Na základě těchto vrstev je pak pro každý pixel určena hodnota daného faktoru stejným způsobem, jako v případě manuálního postupu (kapitola 2.1.2) – výpočtem, převodem z nomogramu nebo reklasifikací dle tabulky.

2.1.3.3 Morfologické faktory LS

Morfologické faktory L (a částečně S) jsou determinovány svým okolím. Faktor délky svahu je určen nepřerušeným úsekem svahu předcházejícím danému elementu, sklon svahu se odvozuje v závislosti na nadmořské výšce okolních elementů. Přístup k určení těchto dvou elementů tady závisí na posouzení (a možnostech vyjádření) prostorových vztahů v prostředí GIS. Oba faktory jsou dnes obvykle modifikovány pro 3D topografii.

Základním předpokladem pro získání morfologického faktoru je tedy příprava kvalitního digitálního modelu terénu (DMT). To je vrstva, jejíž pixely jsou charakterizovány svou nadmořskou výškou (více kapitola 3).

Určení skutečného sklonu svahu je pak jednoduchá operace v prostředí GIS (v podstatě se jedná o porovnání nadmořských výšek sousedních pixelů vzhledem ke vzdálenosti jejich

těžiště) a na základě sklonu v procentech může být faktor S určen pro každý pixel pomocí původního vzorce (Wischmeier&Smith, 1978). Faktor délky svahu L byl dříve aproximován např. na základě velikosti pozemků orné půdy (Dostál, 1998).

Častější je dnes k výpočtu kombinovaného LS faktoru využít morfologicky orientované programy, ve kterých je délka svahu obvykle nahrazena „zdrojovou plochou“ povrchového odtoku. Zdrojová plocha je závislá na modelovaných odtokových drahách a zohledňuje morfologickou variabilitu svahů. Příkladem takového programu je USLE2D, používaný i v této práci. Program byl vyvinut na KU Leuven v Belgii (Desmet&Govers, 1996; Krása, 1999).

Úprava pro plošnou aplikaci vychází z původní rovnice (2.1.2–10) pro výpočet LS faktoru na proměnlivém svahu podle (Foster&Wischmeier, 1974). Pro dvourozměrnou aplikaci byla skutečná délka svahu λj nahrazena zdrojovou plochou.

Poznámka: Je využita tzv. jednotková zdrojová plocha, která může být definována jako plocha (od počátku povrchového odtoku), ze které je povrchový odtok do dané buňky směřován, vztažená na jednotku šířky buňky (velikost plochy na jeden metr běžný). Pro její určení je třeba dělit celou zdrojovou plochu tzv. účinnou délkou vrstevnice (effective contour length). Ta je dána délkou vrstevnicové linie, kterou povrchový odtok překročí při průtoku jednou buňkou čtvercové sítě a závisí na šířce buňky (rozlišení rastru) a na směru odtoku. Je vyjádřena jako délka úsečky procházející středem buňky a je určována pomocí směrového úhlu.

Po separaci faktoru sklonu S (Krása, 1999) je výsledný tvar používané rovnice (2.1.3–1) pro L faktor následující:

$$L(i,j) = \frac{(A_{(i,j),in} + D^2)^{m+1} - A_{(i,j),in}^{m+1}}{x_{(i,j)}^{m} \cdot D^{m+2} \cdot (22.13)^m} \qquad (2.1.3–1)$$

L(i,j)	*faktor L pro daný pixel o souřadnicích i,j*
D	*rozlišení rastru (šířka buňky)*
$A_{(i,j)in}$	*celková zdrojová plocha na vstupu do buňky,*
m	*exponent pro výpočet L faktoru zohledňující sklon svahu*

Tento vztah je v použit pro výpočet faktoru délky svahu v programu USLE2D. Dále je možno si zvolit mezi třemi způsoby určení zdrojové plochy a pěti rovnicemi pro výpočet faktoru S. Na základě testování (Krása, 1999) jsou v podmínkách ČR obvykle doporučeny následující parametry:

- Postup odvození zdrojové plochy: **Multiple flow**
- Rovnice (2.1.3–2) pro výpočet S faktoru: **McCool 1989** (McCool, 1989)

Poznámka: rovnice (2.1.3–2) *je rovněž využívána v RUSLE (Renard et. al 1992).*

Doporučenou rovnici (2.1.3–2) program využívá v následujících tvarech:

$S_{(i,j)} = 10.8 * \sin \theta_{i,j} + 0.03$ *pro sklon* $\theta_{i,j} \leq 9\%$

$S_{(i,j)} = 16.8*\sin \theta_{i,j} - 0.5$ *pro sklon* $\theta_{i,j} > 9\%$

$S_{(i,j)} = 3.0*(\sin \theta_{i,j})0.8 + 0.56$ pro svahy kratší než 4 metry (2.1.3–2)

Parametr *m* v rovnici (2.1.3–1) je určen podle nového vztahu (2.1.3–3):

$$m = (\beta/\beta+1) \qquad (2.1.3–3)$$

přičemž proměnná β v tomto vztahu (2.1.3–3) se vypočte jako (2.1.3–4):

$$\beta = \frac{\sin\theta}{0{,}0896 \cdot (3{,}0 \sin^{0{,}8}\theta + 0{,}56)} \qquad (2.1.3–4)$$

DMT musí při výpočtu LS pokrývat, resp. přesahovat, celé řešené území (povodí) jako kompaktní a celistvá vrstva. Nepostačuje vrstva DMT oříznutá přímo hranicí řešeného území (povodí) – jinak jsou hodnoty blízké hranici řešeného území zatíženy chybou.

Kromě DMT vstupuje do výpočtu LS faktoru ještě rastrová **vrstva pozemků** („Parcel map“), odvozená z mapy využití území (Land Cover). Vrstva musí mít shodnou velikost a rozlišení jako DMT a je tvořena rastrovými polygony jednotlivých půdních celků. Ty jsou charakterizovány celočíselnými identifikátory a různé identifikátory sousedních pozemků vymezují pozici hranic pozemků. Vrstva pozemků především stanoví území určené pro výpočet LS faktoru (buňky mimo řešené povodí a neřešené plochy, např. intravilán, musí mít hodnotu 0). Program dále ve výpočtu zohledňuje poměr zachycení (redukci L faktoru) na hranicích jednotlivých pozemků. Tato hodnota je zadávána (paušálně) jako procento prostupnosti na hranicích pozemků v rozmezí 0 – 100% (0% znamená, že výpočet L faktoru na hranici pozemku končí a od hranice je nově počítán směrem po spádnici, je to případ, kdy hranice zcela zamezuje povrchovému odtoku). Na základě testování (Krása, 1999) jsou podle charakteru hranic pozemků řešených povodí pro výpočet pomocí USLE2D doporučeny hodnoty prostupnosti pozemků v rozmezí 0 – 50%.

2.1.4 Transport splavenin, zanášení nádrží

2.1.4.1 Poměr odnosu sedimentu SDR

Pro určení množství sedimentu transportovaného do vodních toků a nádrží je třeba na rovnici USLE navázat a v dalším kroku správně redukovat množství erodované půdy zvoleným **„poměrem odnosu sedimentu“ SDR** (Williams, 1977). Tj. určit procento erodované půdy, jež není zachyceno retenčními prvky v povodí (případně toku) a je odtokem doneseno až do nádrže, kde se usadí. Tento poměr (závislý na velikosti povodí, jeho pokryvu, retenční schopnosti půdy aj.) je možno určit pomocí následujícího vzorce (2.1.4–1):

$$SDR = 1{,}366 \cdot 10^{-11} \cdot F^{-0{,}0998} \cdot RP^{0{,}3629} \cdot CN^{5{,}444} \qquad (2.1.4–1)$$

F *plocha povodí (km^2)*

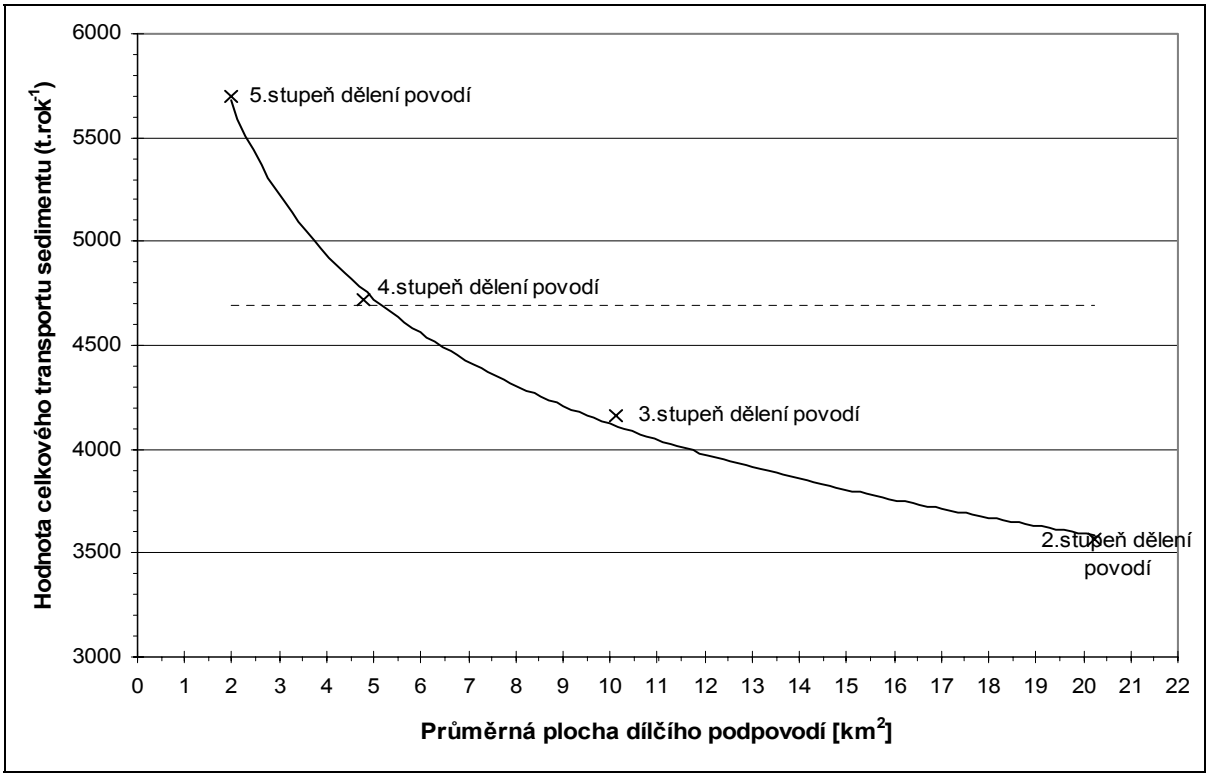
RP *reliéfový poměr (m/km) – (poměr výškového rozdílu mezi nejnižší a průměrnou výškou rozvodnice a největší délky odtokové dráhy v povodí)*

CN *číslo odtokové křivky (průměrná hodnota pro povodí)*

Vztah (2.1.4–1) byl odvozen v USA na přelomu 70. a 80. let. Jeho výhodou je relativní jednoduchost a dostupnost vstupních dat. Nevýhodou pak to, že do výpočtu není zahrnut vliv prostorového rozmístění retenčních prvků v povodí. Stejné hodnoty SDR tak dosáhnou povodí, která mají louky a les na rozvodnici a orná půda zasahuje až k vodoteči jako povodí, kde je orná půda na rozvodnici a podél vodoteče je široký pás trvalého travního porostu a lesa.

Williamsův vztah pro SDR samozřejmě není univerzální. Byl původně odvozen na souboru 15 povodí (Williams, 1977) a při využití v odlišných morfologických podmínkách má svou omezenou platnost. Navíc velikost celkového poměru odnosu z větších povodí je závislá i na počtu a velikosti dílčích povodí a jejich návaznosti. Obecně lze říci že se zmenšováním plochy povodí dochází k nárůstu hodnoty SDR i celkového transportu sedimentu do toku (Krejza, 1999). To je dáno nárůstem reliéfového poměru se zmenšující se plochou povodí. Při výpočtu je třeba proto vhodně zvolit rozdělení výpočtu na jednotlivá dílčí povodí (**Obr. 2.1.4–1**).

Obr. 2.1.4–1 Závislost celkového transportu sedimentu z povodí při použití SDR na průměrné ploše dílčího podpovodí, aplikace v povodí Sedlického potoka (Krejza, 1999).



2.1.4.2 Poměr zachycení v nádržích A

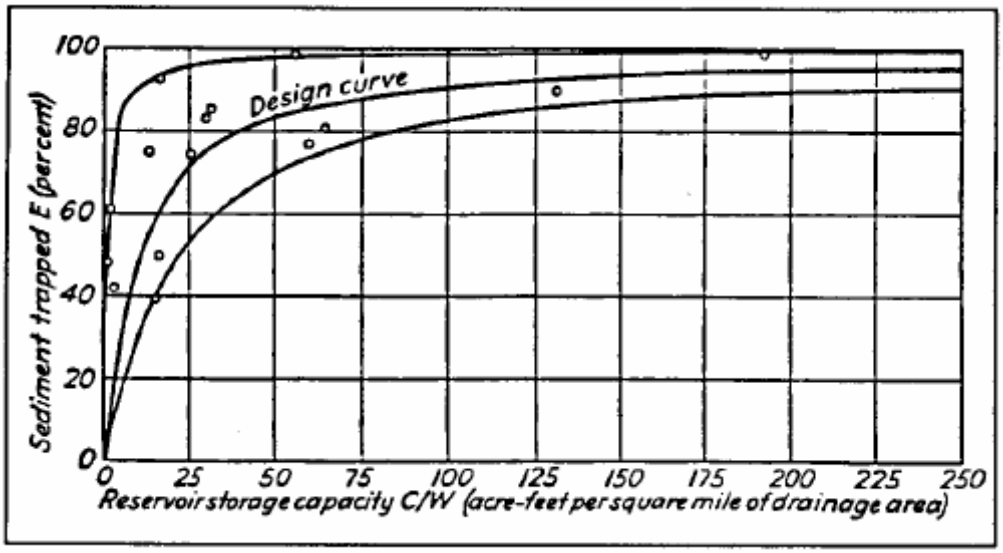
Pro určení množství sedimentu transportovaného až do uzávěrového profilu řešeného povodí (např. do nádrže kde je sediment zjišťován) je třeba ještě určit **poměr zachycení A (%)** sedimentu v dílčích povodích, resp. jejich průtočných nádržích a sestavit schéma návaznosti dílčích povodí.

Úloha zadržení sedimentu ve vodních nádržích je v simulačních modelech řešena různými způsoby individuálně, často jsou využity empirické přístupy sledující závislost poměru zachycení na průtokových charakteristikách a morfologii nádrže. Hlavními citovanými

metodami v této souvislosti bývají (Brown, 1944) (Brune, 1953) a (Churchill, 1948), přičemž metoda Bruneho křivek je obvykle považována za nejvýhodnější (např. . Halcrow, 2001; Šálek a kol., 1989).

Brownova metoda (Brown, 1944) je užitečná v případě, že nejsme schopni určit průměrný roční přítok do posuzované nádrže. Vyjadřuje totiž závislost poměru zachycení A (%) na objemu nádrže C (akrové stopy; acre-ft) a na velikosti povodí F (čtvereční míle, square miles) – **Obr. 2.1.4–2**. Tato závislost může být rovněž vyjádřena analyticky následující rovnicí (2.1.4–2), ovšem při zavedení kalibračního parametru K. Ten se pohybuje v rozmezí 0,046 – 1 s nejčastější hodnotou 0,1 (pro původní US jednotkový systém) a je závislý na době zdržení, zrnitosti sedimentu a regulačních opatřeních na nádrži. Uvedený převzatý tvar rovnice (2.1.4–2) není v metrických jednotkách:

Obr. 2.1.4–2 Poměr zachycení v nádržích podle Browna – závislost vyjádřena v US jednotkách. (Brown, 1944). Na vodorovné ose podíl objemu nádrže a plochy povodí, na svislé poměr zachycení.



$$A = 100 \cdot (1 - \frac{1}{1 + K \cdot C/F}) \qquad (2.1.4–2)$$

A	*poměr zachycení (%)*
C	*Zásobní objem nádrže (acre-ft)*
F	*Plocha povodí (Square miles)*
K	*kalibrační parametr (0,046~1), obvykle 0,1 pro uvedené jednotky.*

Uvedený vztah (2.1.4–2) lze převézt do metrických jednotek (SI), a mít tak k dispozici závislost použitelnou v našich podmínkách. Znamená to také změnu rozmezí hodnot kalibračního parametru K. Výsledná rovnice (2.1.4–3) má tvar:

$$A = 100 \cdot (1 - \frac{10000}{10000 + K \cdot C/F}) \qquad (2.1.4–3)$$

A *poměr zachycení (%)*

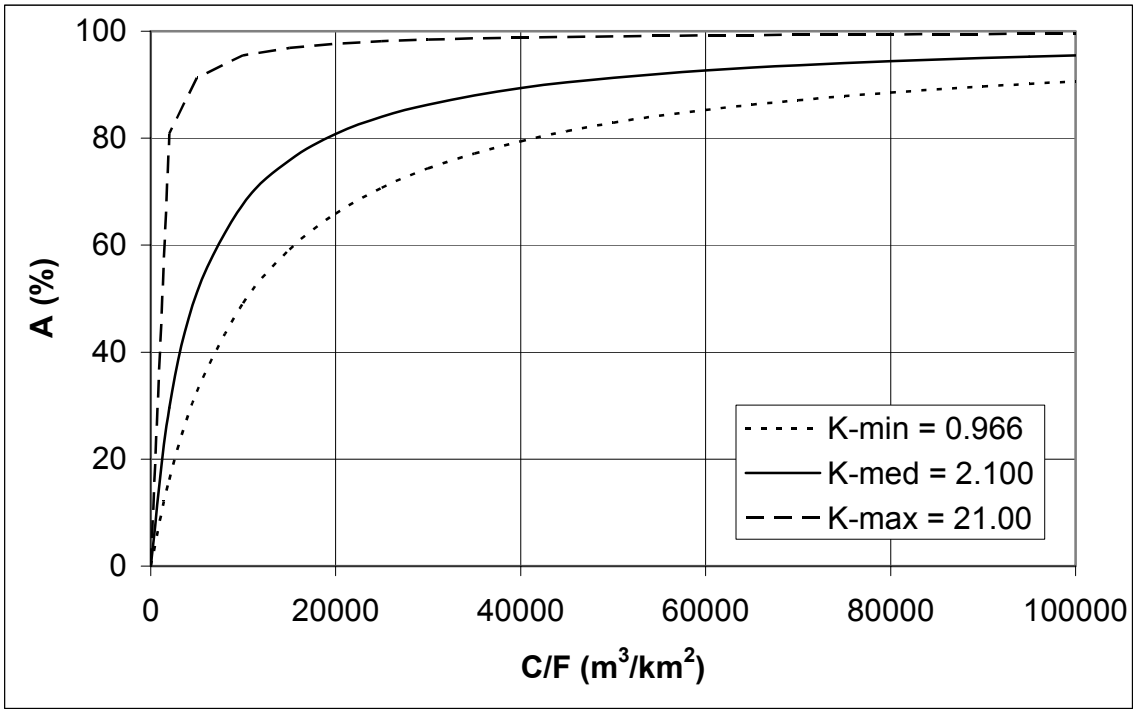
C *Zásobní objem nádrže (m^3)*

F *Plocha povodí (km^2)*

K *nový kalibrační parametr (0,966~21.0), obvykle 2,10 pro jednotky SI.*

Výsledná Brownova závislost pro metrickou soustavu je graficky vyjádřena na **Obr. 2.1.4–3**. Tento vztah (Brown, 1944) není v podmínkách ČR dosud kalibrován. Obvykle je v zahraniční literatuře používána Bruneho závislost. Nicméně podle zkušeností z Velké Británie (Halcrow, 2001) je Brownova metoda vhodnější v případě velké nevyrovnanosti srážkových a odtokových poměrů v povodí, kdy je obtížné přesvědčivě stanovit průměrný roční přítok do nádrže.

Obr. 2.1.4–3 Poměr zachycení sedimentu v nádržích podle Browna (Brown, 1944) vyjádřený v metrických jednotkách.



Podle **Bruneho křivky** (Brune, 1953) je poměr zachycení sedimentu v nádrži A (%) závislý na poměru velikosti zásobního prostoru nádrže k ročnímu průměrnému průtoku vody nádrží (v podstatě teoretická doba zdržení). Uvedený poměr (Capacity inflow ratio) je označován C/I. V tomto případě není třeba závislost při přechodu na metrickou soustavu modifikovat, neboť hodnota C/I je dána podílem stejných objemových jednotek a je vyjádřena v letech. Brune vyjádřil empirickou závislost graficky – Obr. 2.1.4–4.

V obrázku je uvedena střední křivka poměru zachycení a obalové křivky pro zvýšenou nebo sníženou předpokládanou sedimentaci. Rozmezí hodnot je podobně jako Brownův kalibrační parametr K závislé na morfologických charakteristikách nádrže, zrnitosti sedimentu a regulačních opatřeních na nádrži (cílené vyplavování sedimentu apod.).

Dendy (Dendy, 1978) z amerického USDA-ARS doplnil Bruneho databázi o další nádrže a na základě rozšířeného souboru dat sestavil analytické vyjádření **střední Bruneho křivky**, které je uvedeno v rovnici (2.1.4–4).

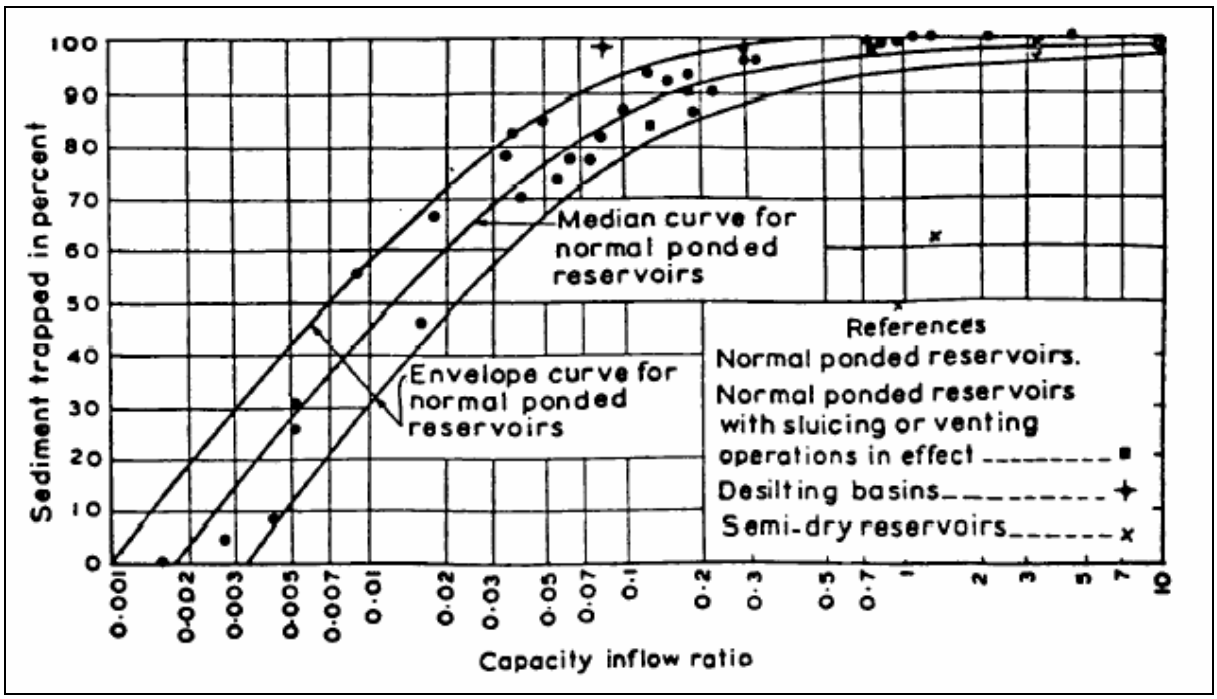
$$A = 100 \cdot 0{,}97^{0{,}19^{\log(C/I)}} \qquad (2.1.4–4)$$

A *poměr zachycení (%)*

C *Zásobní objem nádrže (m^3)*

I *Roční průměrný průtok nádrží (m^3/rok)*

Obr. 2.1.4–4 Poměr zachycení v nádržích na základě Bruneho křivky (Brune, 1953).



Brune upozorňuje, že uvedená závislost platí pouze pro běžné nádrže, tedy ne nádrže částečně vypuštěné, nádrže s extrémním přísunem sedimentu a podobně. Vypočteným (nebo odečteným z křivky) poměrem zachycení je pak redukováno množství sedimentu vstupující do nádrže, stanovené předchozími kroky (ztráta půdy a SDR).

U menších nádrží a rybníků se v praxi většinou postupuje tak, že, pokud jsou nádrže rozmístěny v povodí přibližně rovnoměrně, je pro ně vypočteno procento zachycení sumárně za celé dílčí povodí.

Takto je po provedení všech dílčích kroků výpočtu určena průměrná roční hodnota objemu splavenin, zachycených v uzávěrovém profilu povodí.

2.2 Model Watem/SEDEM

2.2.1 Základní popis

Watem/SEDEM je **distributivní model** erozních a transportních procesů vyvinutý jedním z předních evropských výzkumných týmů v oblasti erozní problematiky - KU Leuven v Belgii. Jedná se stále ještě o **model empirický**, který na rozdíl od fyzikálně založených

modelů nemá přílišné nároky na vstupní data a je tedy předpoklad jeho široké využitelnosti (VanRompaey et al. 2000).

V současné době je k dispozici revidovaná verze programu **Watem/SEDEM 2.1.0**. Většina popisu se bude věnovat této nové verzi programu, rovněž veškeré výpočty budou provedeny aktuální dostupnou verzí. Tato se proti předchozí verzi (Watem/SEDEM 2.0) liší především odlišným přístupem k transportu sedimentu v tocích. Rozdíly obou verzí jsou náplní dalších kapitol.

Model počítá ztrátu půdy na bázi **RUSLE** (Renard et. al., 1993), probíhající na pravidelné čtvercové síti, jeho výstupem jsou tedy průměrné roční hodnoty. Model je nadstavbou GIS software IDRISI a využívá jeho formátu souborů.

Dále jsou stanoveny **odtokové dráhy** vycházející z každého elementu povodí. Ty jsou dány morfologií terénu (je využíván algoritmus Steepest descent – Desmet&Govers, 1996), přičemž jsou uvažovány hranice pozemků, změny kultur a rozdílné odtokové poměry území, směr orby a cestní síť. Těmito odtokovými drahami je pak erodovaná půda distribuována dokud nedosáhne nejbližšího vodního toku. Zároveň její odpovídající část sedimentuje již v rámci povodí, což je zajištěno pomocí stanovení tzv. **transportní kapacity** jednotlivých pixelů.

Část modelu počítající erozní účinnost orby a vliv orby na parametry povrchového odtoku využívá rovnici difúzního typu, kde intenzita orby je popisována jedním parametrem – transportním koeficientem orby*.

Celkové množství sedimentu, které dosáhne vodního toku, je porovnáno z celkovým množstvím ztráty půdy v rámci povodí, čímž je stanovena hodnota **poměru odnosu SDR** pro dané povodí. Tím jsou také určeny hlavní produkované výstupy původního modelu:

- Celková ztráta půdy v povodí
- Celkový transport sedimentu do vodních toků
- Celková depozice sedimentu v rámci povodí

Díky svému distributivnímu charakteru výpočtu se zahrnutím prostorových nehomogenit území je model Watem/SEDEM využitelný pro řadu úkolů, například následujících:

- Výpočet ztráty půdy a opětovné sedimentace a jejich prostorové variability v rámci povodí – vlivem vodní eroze.
- Nalezení rizikových oblastí v rámci povodí ohrožených vodí erozí.
- Simulování scénářů hospodaření v povodí a dopadu variant na odnos půdy a zanášení toků.
- Odhad zanášení nádrží v povodí.
- Odhad průměrného transportovaného množství sedimentu uzávěrovým profilem povodí.

Model neuvažuje proudovou erozi ani sedimentaci ve vodních tocích. Nicméně rozdílně v původní a nové verzi modelu je řešena **návaznost vodních toků** a výsledné množství

* Erozní účinnost orby je zahrnuta pouze v pracovní verzi modelu Watem/SEDEM, z definitivní verze modelu Watem/SEDEM 2.1.0 je tato komponenta vypuštěna, zřejmě není dosud dopracována a spolehlivá. Proto není zahrnuta v popisu modelu dále a není dosud k výpočtům v ČR vůbec využívána. Další popis modelu Watem/SEDEM se věnuje verzi 2.1.0 a vodní erozi.

sedimentu v uzávěrovém profilu povodí (při zanedbání uvedených procesů). Přitom je uvažováno zachycení sedimentu vodními nádržemi v povodí na základě **poměru zachycení**.

V původní verzi programu **Watem/SEDEM 2.0** byl transport vodními toky řešen na bázi morfologických algoritmů, podobně jako transportní procesy na svazích. Tato cesta ovšem nebyla příliš úspěšná, stejně jako správná interakce vodních toků a nádrží. Nová verze **Watem/SEDEM 2.1.0** nahradila tento postup zahrnutím vektorové topologie vodních toků. Tím jsou vyloučeny jakékoli procesy přímo v tocích a zároveň zaručena správná návaznost toků i určení poměru zachycení v nádržích. Na testování a vývoji této komponenty jsem se mohl podílet přímo v laboratoři pro experimentální geomorfologii KU Leuven.

Po správné kalibraci a při využití všech výpočetních kroků je tak možno získat průměrné **roční množství sedimentu transportované uzávěrovým profilem povodí**.

2.2.2 Transportní kapacita

Transportní kapacita jednotlivých elementů DMT je vztažena k potenciálu rýhové eroze v daném bodě podle následujícího vztahu (2.2.2–1) (Van Rompaey, 2001).

$$T_C = K_{TC} \,.\, E_{PR} \qquad (2.2.2–1)$$

T_C *transportní kapacita* ($kg.m^{-1}.rok^{-1}$)

K_{TC} *kalibrační koeficient transportní kapacity (m)*

E_{PR} *potenciál náchylnosti k rýhové erozi* ($kg.m^{-2}.rok^{-1}$)

Celková potenciální eroze je teoretická hodnota ztráty půdy z holé půdy bez ochranných opatření a je dána součtem eroze rýhové a mezirýhové (plošné). Z toho je potenciál rýhové eroze určen jako (2.2.2–2)

$$E_{PR} = E_{PT} \,.\, - E_{PIR} \qquad (2.2.2–2)$$

E_{PT} *potenciální celková eroze* ($kg.m^{-2}.rok^{-1}$)

E_{PIR} *potenciální mezirýhová eroze* ($kg.m^{-2}.rok^{-1}$)

Přitom hodnoty potenciální celkové a mezirýhové eroze jsou určeny následujícími vztahy (2.2.2–3), (2.2.2–4), (2.2.2–5):

$$E_{PT} = R \,.\, K \,.\, L \,.\, S \qquad (2.2.2–3)$$

$$E_{PIR} = a \,.\, R \,.\, K_{IR} \,.S_{IR} \qquad \textit{(McCool et.al, 1989)} \qquad (2.2.2–4)$$

kde $S_{IR} = 6{,}86 \,.\, S_g^{0,8}$ *(Govers&Poesen, 1988)* (2.2.2–5)

R	*R faktor USLE (MJ. mm. m^{-2}. h^{-1}. rok^{-1})*
K	*K faktor USLE (kg. h. MJ^{-1}. mm^{-1})*
L	*faktor délky svahu USLE (-)*
S	*faktor sklonu svahu USLE (-)*
a	*koeficient (-), dosazena hodnota 0,6 odpovídající měřením (Govers&Poesen, 1988), kdy mezirýhová eroze se vyrovná rýhové po 65 metrech od rozvodnice při sklonu 6%.*
K_{IR}	*K faktor pro mezirýhovou erozi (kg. h. MJ^{-1}. mm^{-1}), je uvažován shodný s faktorem K pro celkovou erozi.*
S_{IR}	*faktor sklonu svahu pro mezirýhovou erozi (-)*
S_g	*gradient sklonu svahu (m/m)*

Kombinací rovnic (2.2.2–2), (2.2.2–3), (2.2.2–4), (2.2.2–5) a dosazením do rovnice (2.2.2–1) byl obdržen **výsledný** použitý **vztah pro transportní kapacitu** (2.2.2–6):

$$T_C = K_{TC} \,.\, (R \,.\, K \,.\, L \,.\, S - a \,.\, R \,.\, K_{IR} \,.\, S_{IR}) = K_{TC} \,.\, R \,.\, K\, (L \,.\, S - a \,.\, S_{IR}) \qquad (2.2.2–6)$$

Hodnota kalibračního koeficientu K_{TC} musí být pro jednotlivé typy povrchu stanovena experimentálně, na základě dosavadních kalibrací (VanRompaey et. al, 2001) jsou v nové verzi programu Watem/SEDEM 2.1.0 dosazovány parametry:

K_{TC} – neerodivní povrchy (pastviny, les) = 100

K_{TC} – orná půda = 200,

při hodnotách propustnosti hranic pozemků 10 (orná půdy), 75 (les a pastviny).

2.2.3 Návaznost vodních toků, poměr zachycení v nádržích

2.2.3.1 Watem/SEDEM 2.0

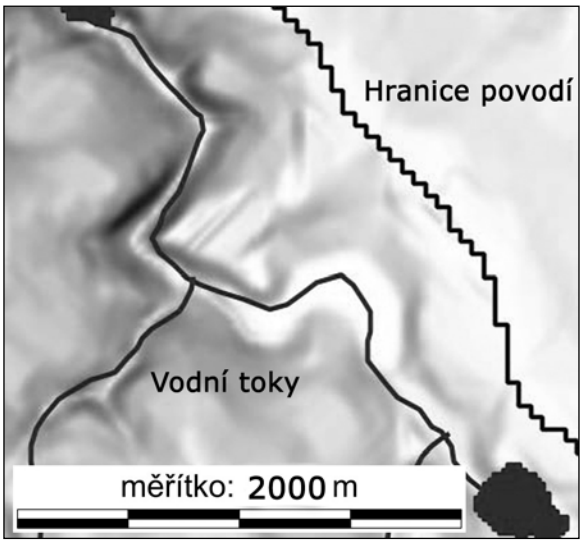
V původní verzi programu Watem/SEDEM 2.0 (VanRompaey, 2001) jsou vodní toky řešeny obdobným způsobem jako transport sedimentu povodím. Ve vstupních vrstvách jsou zastoupeny pouze jako speciální kategorie v mapě využití území, na základě čehož je jim přiřazena řádově vyšší transportní kapacita.

Je **podmínkou**, aby rastrované toky byly **kontinuální** (nepřerušeny žádnou jinou kategorií land-use), a **spádové**, tak aby použitý algoritmus odtoku (Steepest descent) zajistil doručení sedimentu do uzávěrového profilu.

Veškerý sediment, který dosáhne vodního toku, je tedy algoritmem **posouván ve směru spádu**, dokud nedorazí do nádrže nebo uzávěrového profilu,. **Nádrže** vstupují do výpočtu jako samostatná rastrová vstupní vrstva, přičemž jejich identifikátory odpovídají příslušnému poměru zachycení (stanovenému empiricky). Pokud vodní tok (a tedy

transportovaný sediment) protéká vodní nádrží (tedy si jejich poloha odpovídá), je objem transportovaného sedimentu redukován příslušným poměrem zachycení.

Obr. 2.2.3–1 Ukázka vodních toků z databáze VÚV, výřez z povodí Vrchlice. Podkladem je vrstva sklonu (%) odvozená z DMT. Jedná se o příklad poměrně věrně digitalizovaných toků, přesto evidentně zcela přesně neprochází spádnicí, navíc sklon terénu je v údolnici DMT při dané přesnosti mnohdy příliš malý.



Ve chvíli, kdy sediment dorazí do **uzávěrového profilu** – opustí povodí, je výpočet ukončen a hodnota je zobrazena jako poslední výstup: „**river export**“.

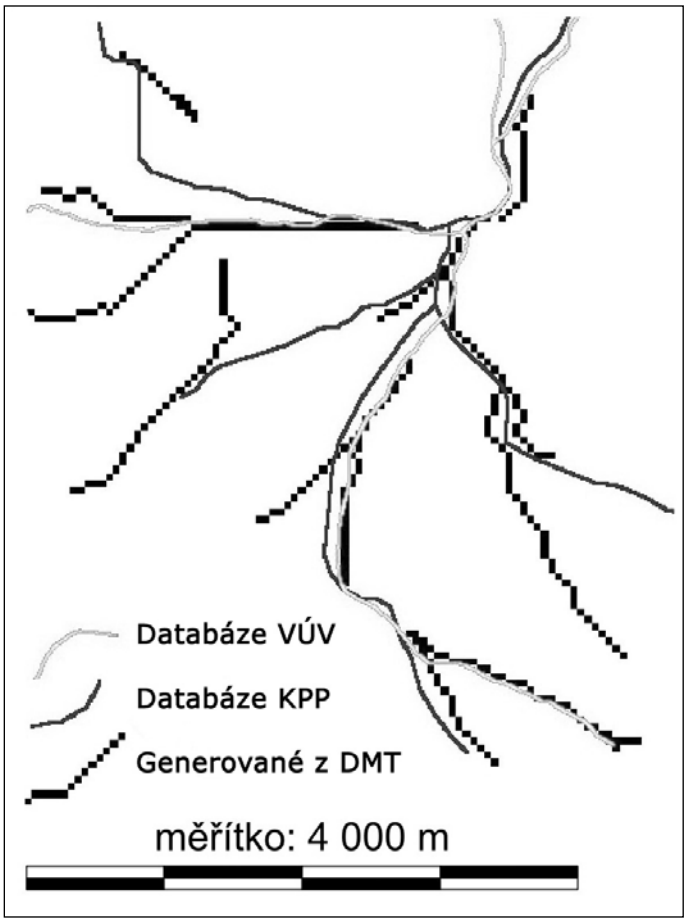
Problém je podmínka kontinuality a stálé spádovosti toku. Ve chvíli kdy algoritmus nemůže najít následovníka (buňku s identifikátorem vodního toku) směrem po svahu, zvětšuje se okruh pátrání až do řešitelem zadané meze. *(Poznámka: jedna z možných chyb: sousední tok je blíž a níž než následovník po svahu a odtok je směrován nesprávně).* Pokud není v daném okruhu následovník nalezen, postup sedimentu tokem je zastaven. V reálných podmínkách je podmínka stálé spádovosti toku prakticky nedosažitelná, a celý tento algoritmus je tedy velmi „poruchový“ (nebo nespolehlivý). Hlavní příčiny tohoto stavu jsou následující **Obr. 2.2.3–1**:

1. Následovníci jsou hledáni jen jako elementy vodního toku a možnost algoritmu Steepest descent pokračovat je tedy velmi omezena.
2. Skutečné údolnice vodních toků jsou obvykle ve svých dlouhých úsecích spádové zcela minimálně a výškový rozdíl okolí údolnice vůči korytu je obvykle mnohem zřetelnější než samotný sklon toku.
3. Vzhledem k omezenému rozlišení DMT (vždy je vůči skutečnosti omezené, záleží samozřejmě na měřítku) a bodu 2, často není skutečný sklon údolnice na DMT zachycen, samotná údolnice nabývá v dlouhých úsecích (DMT) nulového sklonu, nebo dokonce (v určitých místech zakřivení koryta) nepatrně stoupá. Proto je třeba procedurou „pit removal“ (odstranění bezodtokých míst) upravit DMT. Tím je DMT částečně deformován (dolíky jsou vyrovnány), nicméně jen do vodorovné úrovně a údolnice proto i nadále nemusí být trvale spádová. Navíc pit removal probíhá pouze (jako filtrační procedura) na určité matici elementů a nemusí tedy zajistit skutečnou vzájemnou spádovost vzdálených odpovídajících si úseků toku (tzn. je zajištěna spádovost, ale nesprávná, nikoli ve správné původní návaznosti vodních toků v realitě), neboť „pit removal“ probíhá pouze na bázi nadmořských výšek elementů DMT a neuvažuje nijak vodní toky. Spádovost v některých částech území je v DMT pak zajištěna mimo koryto vodního toku (který dosud není do databáze zanesen).
4. Pokud je skutečné koryto vodního toku v morfologicky členitém území a úzkém údolí náhle zakřivené, je problém při digitalizaci toků přesně sledovat skutečnou údolnici a dráhu koryta při zpracování větších území. Tak jsou digitalizované toky nepřesné, v místech velké křivosti vybočují (byť minimálně) z údolnice DMT (**Obr.**

2.2.3–1) a koryto digitalizovaných toků v těchto místech vede v krátkých úsecích velké křivosti „do kopce“. Navíc toky jsou digitalizovány např. nad leteckým či družicovým snímkem a ten se nemusí přesně polohově shodovat se zdrojem DMT.

5. Pokud jsou vodní toky převzaty z dostupných vektorových databází v ČR, jejich přesnost je často z hlediska spádovosti toku (případně dalších hledisek) nedostačující. Příkladem může být zkušenost s databázemi VÚV a KPP z přípravy mapy ztráty půdy a transportu sedimentu v ČR (Dostál a kol., 2001c). – **Obr. 2.2.3–2**.

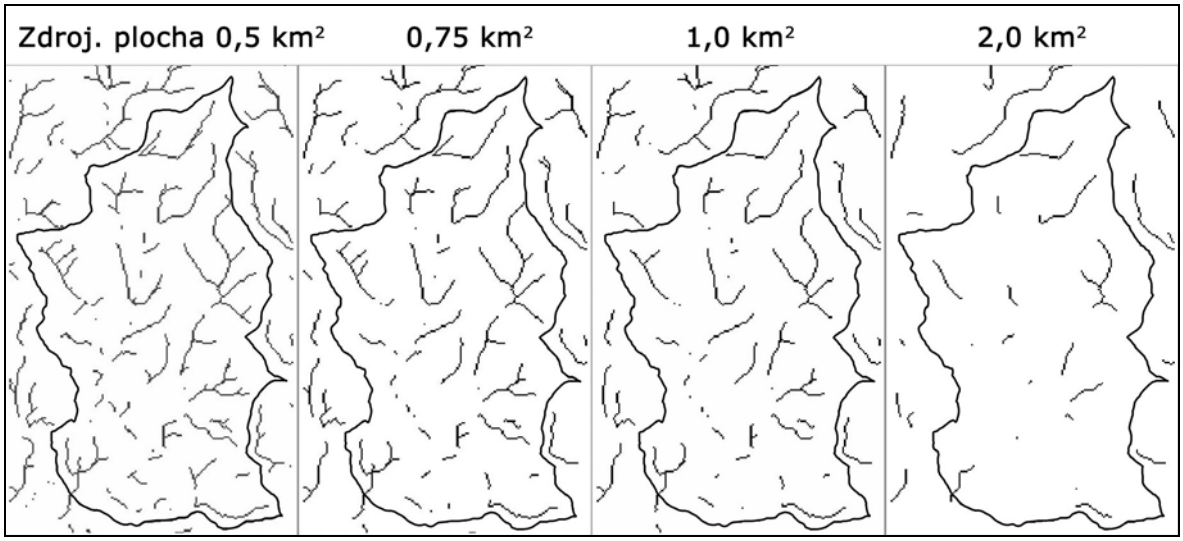
Obr. 2.2.3–2 Ukázka vodních toků z databáze KPP a VÚV. Kromě evidentního nesouladu jednotlivých databází, je na podložené rastrové vrstvě generovaných odtokových drah vidět, že vektorové toky se mnohdy rozcházejí s údolnicemi DMT.



Zde se nabízí cesta řešit problematiku spádovosti vodních toků generováním vlastních toků ve spádnicích DMT stejným algoritmem, který je pak použit pro transport sedimentu. Tato cesta nicméně vede jednak k vygenerování toků mimo skutečná koryta, dále k vytvoření řady nepravých toků v údolnicích a spádnicích svahů, k problému omezení (stanovení počátků takových toků (**Obr. 2.2.3–3**). Editace generovaných toků v rastru s cílem vytvoření použitelné mapy skutečných toků je pro území přesahující několik km^2 neúměrně náročným a mnohdy nemožným úkolem.

Z uvedených příkladů je zřejmé, že využití transportu vodními toky jako součásti modelu Watem/SEDEM 2.0 bylo značně omezené. Tato součást nebyla úspěšně využívána, model byl obvykle využíván pouze pro určení množství sedimentu vstupujícího do vodních toků a poměru odnosu SDR. Zcela odlišně je tento krok řešen v další verzi modelu Watem/SEDEM 2.1.0

Obr. 2.2.3–3 Ukázka vodních toků generovaných algoritmem Steepest descent. Problém stanovení vhodné meze – velikosti zdrojové plochy odpovídající vytvoření trvalého toku.



2.2.3.2 Watem/SEDEM 2.1.0

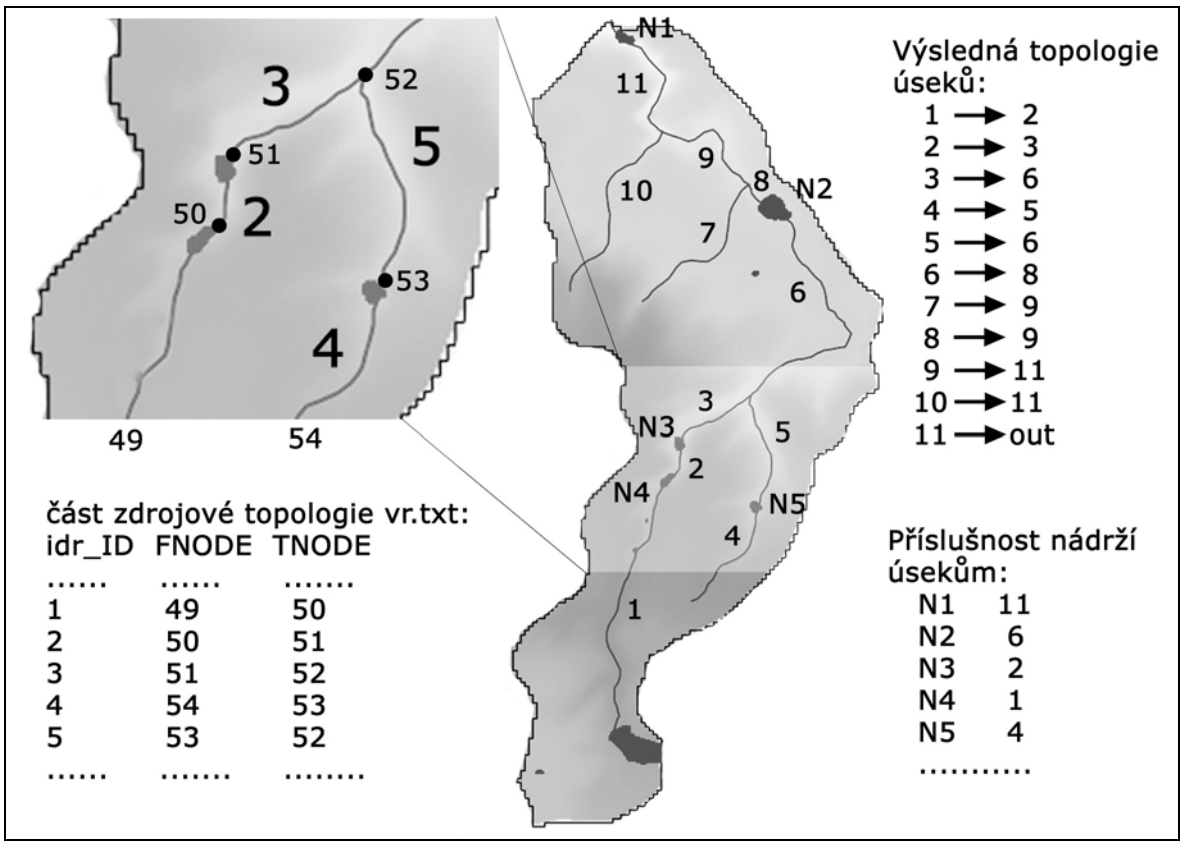
Základním rozdílem je, že v modelu Watem/SEDEM 2.1.0 je transport vodními toky řešen databázově, částečně mimo prostředí rastrového GIS. Je sestavena vektorová topologie toků a kromě interakce vodních toků a nádrží (a zachycení v nádržích) je zbytek procesu počítán na tabulkové bázi. Tak je (pokud uspokojivě řešíme ostatní problémy) zajištěna správná návaznost toků až k uzávěrovému profilu.

Tento způsob výpočtu vychází z následujících předpokladů:

1. Do výpočtu jsou toky vloženy jako samostatná další vstupní vrstva, ve formě, kdy buňky každého úseku toku nesou jako identifikátor unikátní číslo daného úseku.
2. Dále je zadána tabulka všech úseků toku. V tabulce je též vyjádřena topologie roků prostřednictvím zadání čísla počátečního a koncového bodu každého úseku. Čísla mohou být stanovena libovolně, jedinou logickou podmínkou je odpovídající si číslo navazujících uzlů (respektive unikátnost číslování). Návaznost a pořadí toků si program již na základě tabulky určí při výpočtu.
3. Dále na každém jednotlivém úseku toku může ležet nejvýše 1 nádrž a zároveň každá nádrž smí ležet maximálně na jednom úseku toku (protínat jej). Tedy je-li na jednom úseku více nádrží, musí být tento rozdělen na příslušný počet úseků podle počtu nádrží.
4. Každá nádrž by měla ležet na konci svého příslušného úseku (blízko jeho uzávěrovému profilu) – neboť sediment příslušného úseku je redukován jejím poměrem zachycení. Tuto podmínku lze zajistit přerušením úseku za nádrží, resp. rozdělením úseku s nádrží na dva (kdy druhý úsek začíná pod profilem nádrže).
5. Samozřejmě je řada navazujících úseků bez nádrže, stejně jako nádrž může ležet zcela mimo tok (poldr).

Podle uvedených předpokladů jsou tedy nejprve řešitelem vytvořeny vektorové očíslované toky s příslušnou tabulkou jejich počátečních a koncových bodů. Ty jsou potom zrastrovány a zadány jako jedna ze vstupních vrstev (**Obr. 2.2.3–4**). Zároveň je využita rastrová vrstva nádrží s hodnotami příslušných poměrů zachycení.

Obr. 2.2.3–4 Výsledná topologie vodních toků - ukázka z části povodí Vrchlice.



Číslování nádrží a jejich interakci s příslušnými toky provede program sám v průběhu výpočtu. Zároveň určí návaznost jednotlivých úseků toku, tabulka předchůdců a následovníků je součástí výstupu.

Princip databázového výpočtu je potom následovný:

1. Veškeré množství sedimentu, které na základě předchozích kroků výpočtu (eroze, transport odtokovou drahou svahu, sedimentace v příslušných elementech svahu) dorazí z plochy povodí do jednotlivých buněk daného segmentu toku je sečteno a tvoří dohromady hodnotu tzv. „hillslope sediment input“ (vstup sedimentu ze svahů).
2. K tomuto množství je přičten sediment exportovaný po proudu předcházejícím segmentem – „sediment input upstream“
3. Pokud není na daném úseku toku identifikována nádrž, toto společné celkové množství sedimentu je exportováno do následujícího úseku jako hodnota „sediment output river“.
4. V případě, že na daném úseku je nádrž, vstupuje sediment nejprve do ní. K množství vstupujícímu do nádrže z toku je přičteno množství vstupující přímo ze svahů a celkový objem je redukován poměrem zachycení v nádrži. (ten je stanoven řešitelem v identifikátoru nádrže). Redukované množství je poté definitivně exportováno do následujícího úseku toku jako hodnota „sediment output river“.
5. Zároveň jsou v jiné tabulce ukládány hodnoty sedimentu v nádržích – vstupující, zachycené i exportované množství.

6. Pro každý tok je programem před začátkem výpočtu stanoven jeho řád, tedy zda se jedná o tok počáteční, případně kolikátý v pořadí následovníků. Výpočet probíhá postupně od toků prvního řádu až k uzávěrovému toku vystupujícímu z povodí. Jím exportovaná hodnota „sediment output river“ je tedy celkové množství sedimentu transportované uzávěrovým profilem povodí.

Při tomto postupu je tedy zaručena návaznost jednotlivých toků a veškerý sediment, který do nich ze svahů vstupuje, je (redukovaný pouze o množství zachycené v nádržích s předem definovaným poměrem zachycení) doručen do uzávěrového profilu povodí. V tocích samotných model nesimuluje žádné erozní ani sedimentační procesy.

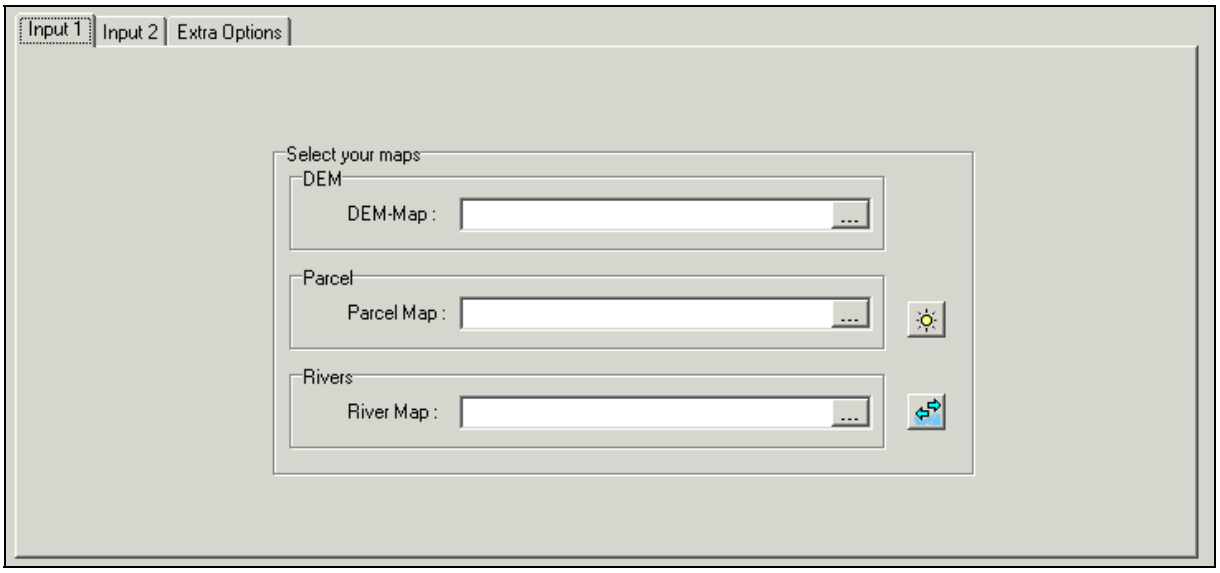
2.2.4 Vstupní data modelu Watem/SEDEM 2.1.0

Watem/SEDEM vyžaduje jako vstupní data stanovení několika konstant a dále řadu vstupních rastrových vrstev GIS. Program využívá formátu rastrových souborů GIS Idrisi32 (Eastman, 1987-2003). Je podmínkou, aby vstupní vrstvy pokrývaly přesně totéž území a byly shodné velikosti i shodného rozlišení. Tyto vstupní vrstvy musí svou velikostí přesahovat hranice řešeného území (povodí). Kvalita výpočtu je závislá na (reálné) kvalitě vstupních dat. Doporučené optimální testované rozlišení je 20 m.

2.2.4.1 Digitální model terénu

V prvním dialogovém okně program vyžaduje tři základní vstupní vrstvy: DMT, pozemky a vodní toky (**Obr. 2.2.4–1**).

Obr. 2.2.4–1 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 1 pro zadávání vstupních dat.



DMT : rastrový digitální model terénu je nejdůležitější vstupní vrstvou a jeho kvalita zásadním způsobem ovlivňuje výsledek výpočtu. Je využíván k stanovení sklonů svahu a zdrojových ploch odtoku i odtokových drah.

Důležité je, aby DMT neobsahoval žádná bezodtoká místa. Proto je třeba jej před zadáním do programu ošetřit procedurou „pitremoval“. Program dále sám zajišťuje průchodnost potenciálně bezodtokých míst vlastním algoritmem.

DMT může být převzat z dostupných komerčních databází, nebo digitalizován na základě vrstevnicové mapy. Interpolace vektorového DMT do rastru vyžaduje zvláštní pozornost, je možné využít jednoduchých interpolačních postupů, nebo kvalitnějšího převodu pomocí TIN sítě. Více v kapitole o přípravě vstupních dat do výpočtů na bázi GIS.

2.2.4.2 Mapa pozemků

PARCEL : vrstva pozemků získaná z rastrové mapy využití území. Pozemky rozlišují kategorie orné půdy, lesa, luk a pastvin, intravilánu a infrastruktury a vodních toků jako cílových oblastí sedimentu. Kategorie jsou charakterizovány následujícími identifikátory:

-2: cestní síť a intravilán

-1: vodní toky

0: oblast mimo řešenou plochu (povodí)

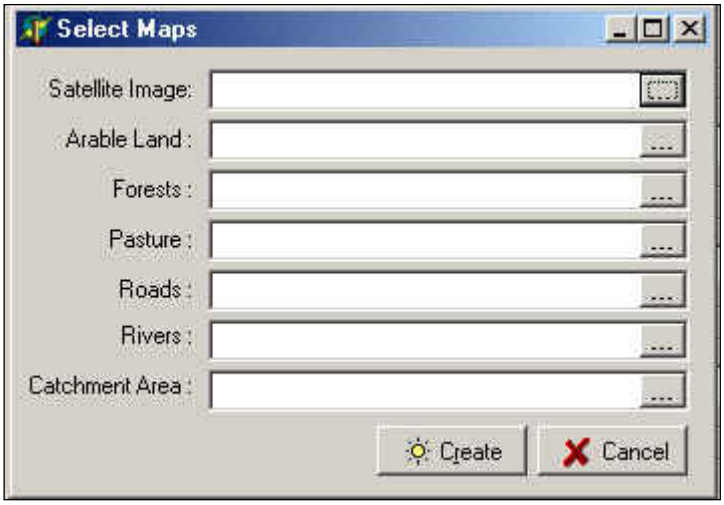
1-n: zemědělské pozemky orné půdy s maximální možnou hodnotou 9999.

10 000: les

20 000: louky a pastviny.

Jednotlivé zemědělské pozemky nesou vlastní identifikátory proto, aby byly stanoveny jejich hranice jako překážky povrchového odtoku, odtokové linie, nebo místa sedimentace. Odlišení pozemků je důležité taky při výpočtu redistribuce půdy vlivem orby.

Obr. 2.2.4–2 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Modul pro přípravu vrstvy pozemků.



Mapa pozemků je omezena pouze na řešené území (povodí). Buňky mimo musí mít hodnoty 0, Watem/SEDEM tak počítá pouze v řešeném území. Řešené území by přitom mělo být konzistentní povodí s jedním uzávěrovým profilem (a nikoli mezipovodí s přitékajícím vodním tokem), pokud chceme modelovat transport sedimentu do uzávěrového profilu. Topologie toků počítá s uzavřeností povodí, tedy s tím, že všechny toky začínají jako úseky prvního řádu. S tím ohledem by mělo být v mapě pozemků stanoveno řešené území.

Vrstva PARCEL může být vytvořena OVERLAY procedurou v Idrisi, přičemž je třeba dodržet správné pořadí dílčích vrstev: infrastruktura má přednost před ostatními kategoriemi, a vodní toky před vším (tedy i cestami a infrastrukturou). Vodní toky musí být nepřerušené a konzistentní. Proto je do programu zabudován **modul „Create parcelmap“** (**Obr. 2.2.4–2**), který při zadání dílčích vrstev vytvoří vrstvu PARCEL s odpovídajícími hodnotami.

Pokud chceme tento modul využít, musíme programu zadat následující vstupní vrstvy:

1. Mapa povodí – kde buňky uvnitř povodí (řešené oblasti) mají hodnotu 1, buňky vně hodnotu 0. Řešená plocha by měla tvořit skutečný hydrologicky uzavřený celek – povodí. I pokud chceme počítat oblast pouze několika pozemků, je lépe zadat celé okolní povodí, aby byl správné zahrnut sediment vstupující ze zdrojových oblastí výše po svahu.
2. Mapa lesů – buňky lesa mají libovolnou hodnotu větší než 0, vše ostatní je = 0.
3. Mapa luk pastvin – stanovené kategorie mají hodnoty > 0, ostatní území = 0.
4. Mapa vodních toků – pro tento účel mohou mít toky libovolné hodnoty > 0. zbytek území = 0. POZOR: toky jako samostatná vstupní vrstva musí zachovávat topologii a korespondovat se zadanou tabulkou. Více o přípravě toků dále.
5. Mapa cest a intravilánu – veškerá infrastruktura má hodnoty > 0, zbytek území = 0.
6. Mapa zemědělských pozemků – zemědělské pozemky orné půdy jako samostatné celky s identifikátory v rozmezí 1 – 9999. Pozemky mohou být získány klasifikací dat DPZ, nebo roční digitalizací a konverzí do rastru.
7. Podkladová mapa land-use – Mapa využití území získaná např. klasifikací dat DPZ (Landsat TM apod.). Mapa obsahuje například všechny předchozí kategorie, s tím, že zemědělské pozemky jsou charakterizovány pouze jediným kladným identifikátorem. Jedinou podmínkou je, aby tato mapa vyplňovala kladnými hodnotami celé řešené území. Slouží k vyplnění zbývajících elementů, které zůstaly prázdné po zakomponování ostatních vrstev, zejména volných míst mezi zemědělskými pozemky, pokud tyto byly vytvářeny ruční digitalizací. Vyplnění je nezbytné, aby byla zajištěna kontinuita povrchového odtoku. Jako tato vrstva může být například vrstva se všemi elementy = 1. Pokud víme, že ostatní vrstvy území zcela vyplňují, může být tato vrstva libovolná, neboť v takovém případě se ve výsledku neprojeví.

Aby tvorba mapy pozemků modulem „Create parcelmap“, musí být vrstvy zadány do modulu všechny!

2.2.4.3 Vodní toky

RIVER MAP určuje pozici vodních toků v území a jejich návaznost. Buňky s vodními toky mají hodnotu >0, buňky mimo vodní toky = 0.

Vodní toky musí být připraveny tak, aby bylo možno určit jejich topologii a návaznost a spočítat objem sedimentu v uzávěrovém profilu povodí – viz. kapitola 2.2.3.2.

Obvyklá příprava vodních toků je záležitostí editace toků jako vektorových objektů a následná rasterizace definitivní podoby vodní sítě (jednotlivých úseků). Podmínky přípravy jsou následující (**Obr. 2.2.3–4**):

1. Buňky každého úseku toku musí mít unikátní identifikátor příslušný danému úseku (jeden z výstupů je pak množství sedimentu doručené do jednotlivých úseků – užitečný nástroj pro analýzu ohroženosti).
2. Leží-li na daném úseku toku vodní nádrž, úsek by měl být ukončen pod jejím uzávěrovým profilem a tok dále pokračuje novým úsekem.
3. Každému úseku tak přísluší nejvýše jedna nádrž a naopak, každá nádrž leží pouze na jediném úseku toku (to souvisí i s případnou editací nádrží).

4. Celá síť vodních toků řešeného území je konzistentní (navazující) a uzavřená – tedy počíná se pouze toky prvního řádu (bez předchůdců).

Identifikátory vodních toků musí souhlasit se souborem určujícím topologii sítě, což je tzv. „**river routing file**“ – tedy soubor s příponou *.rou, který je připraven pomocí specielního příkazu programu. Pro vytvoření souboru *.rou je třeba do programu zadat textovou tabulku (soubor *.txt), korespondující s mapou vodních toků. Tato tabulka musí obsahovat přinejmenším 4 sloupce s následujícími údaji (**Tabulka 2.2.4–1**):

Idrid: V prvním řádku je uveden celkový počet úseků (n) odpovídající počtu řádku následující databáze. Dále jsou identifikátory úseků toku počínaje 1 ... n. Identifikátory musí počínat 1, musí být v rostoucím pořadí a žádný nesmí být vynechán. (úseků musí být n a řádků též). Přitom v mapě nemusí být tyto úseky všechny, databáze může být vytvořena pro větší (ale vždy úplnou) vodní síť než je řešené území.

FNODE_: počáteční uzly jednotlivých úseků (tedy body kde sediment do úseků vstupuje).

TNODE_: koncové uzly jednotlivých úseků (tedy body kde sediment z přechází do následujícího úseku).

LENGHT ARC_: délka jednotlivých úseků. Tato hodnota v současné verzi nemusí odpovídat realitě, program s touto hodnotou dosud nepočítá.

Případné další sloupce (nepovinné, nezahrnuté do výpočtu, obvykle součástí databáze příslušející vektorovému souboru tvarů (linií) při uložení ve vektorovém GIS, nebo při výpočtu topologie toků pomocí vektorových GIS) – mohou v tabulce při zadání do Watem/SEDEM zůstat.

Tabulka 2.2.4–1: Příklad souboru *.txt.

idrid	**FNODE_**	**TNODE_**	**lenght_arc_**	**atd.**
8				
1	1	2	100	....
2	3	2	100	....
3	4	3	100	....
4	8	4	100	....
5	9	8	100	....
6	5	3	100	....
7	6	5	100	....
8	7	5	100	....

Tabulka *.txt může být sestavena manuálně – očíslováním uzlů všech úseků toku daného povodí a vypsáním seznamu všech uzlů. V případě rozsáhlejší databáze vodních toků lze tuto tabulku vytvořit automaticky ve většině vektorových GIS software, tzv. vytvořením topologie souboru tvarů.

Po zadání tabulky do modulu „routing file“ (**Obr. 2.2.4–3**) program vytvoří soubor *.rou (jedná se rovněž o textový soubor) v následujícím tvaru (**Obr. 2.2.4–3**) (**Tabulka 2.2.4–2**):

Obr. 2.2.4–3 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Tvorba topologie vodních toků.

Tabulka 2.2.4–2: Příklad souboru *.rou.

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
47							
1	31	3	100	1	19	0	0
2	4	3	100	23	19	1	9
3	32	6	100	1	5	0	0
4	33	6	100	1	5	0	0
5	6	4	100	4	2	1	0
6	22	23	100	13	17	1	5
7	21	22	100	5	6	1	2
8	35	21	100	1	7	0	0
9	25	22	100	10	6	1	4
....	....	....	....	....	....	....	....

Význam sloupců v souboru *.rou (**Obr. 2.2.4–3**) (**Tabulka 2.2.4–2**) je následující:

[1] Číslo daného segmentu toku (idrid)

[2] Číslo vstupního uzlu daného segmentu (fnode)

[3] Číslo výstupního uzlu daného segmentu (tnode)

[4] Délka daného úseku (nevyužívaná hodnota)

[5] Řád toku v dané síti (1 = počáteční tok, max = uzávěrový tok)

[6] Číslo následujícího úseku toku po proudu (je-li = -2, pak tok nemá následovníka – uzávěrový tok)

[7] Označení toků prvního řádu (0 = ano, 1 = ne)

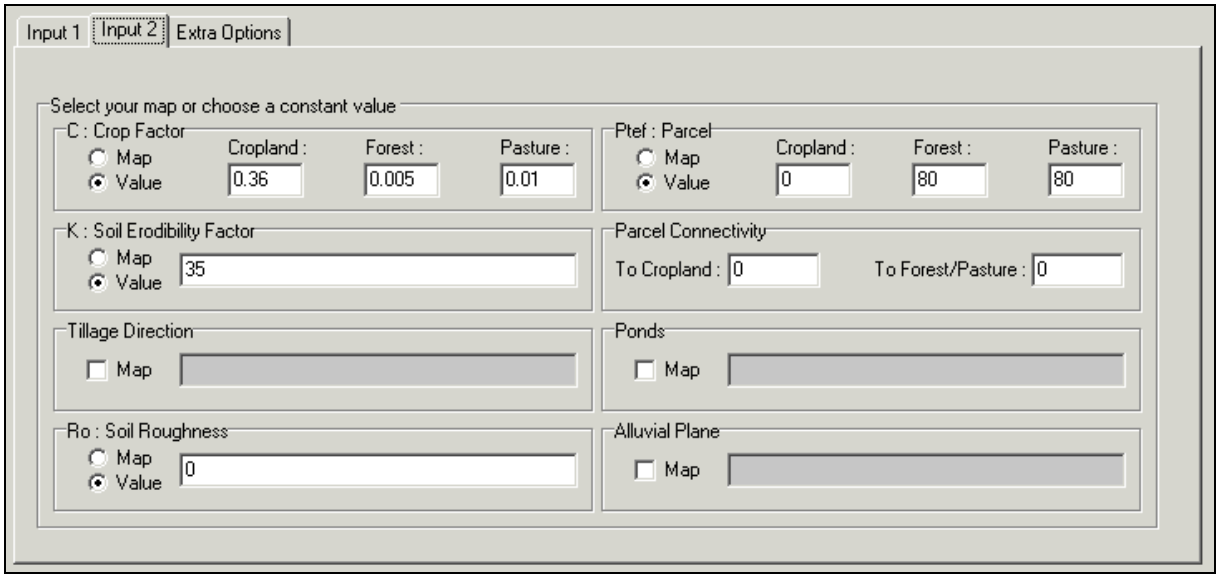
[8] Počet předchůdců od nejvzdálenějšího toku prvního řádu.

Na základě tohoto souboru provádí program veškeré operace s množstvím sedimentu transportovaným vodními toky.

2.2.4.4 Druhý vstupní dialog – K faktor, C faktor, nádrže, hranice pozemků

V dialogovém okně Input2 je možno zadávat další vstupní vrstvy. Oba faktory USLE je možno zadávat jako paušální hodnoty, nebo rastrové mapy (**Obr. 2.2.4–4**).

Obr. 2.2.4–4 : Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 2 pro zadávání vstupních dat.



C faktor – v dialogovém okně je možno vyplnit různé hodnoty pro ornou půdu, pastviny a les, nebo vložit rastrový soubor Idrisi32 s odpovídajícími hodnotami C faktoru. Hodnoty jsou bezrozměrné v rozmezí 0 – 1.

K faktor – je možno zadat buď jednu hodnotu K faktoru pro celé řešené území, nebo rastrový soubor s konkrétními hodnotami K faktoru (t.h/MJ.mm). Je třeba zadat hodnoty v uvedených jednotkách, což odpovídá 100násobku hodnot používaných běžně v ČR (tedy hodnoty v rozmezí 0 – 100).

Ponds – pokud zaškrtneme v řešení tuto volbu, musíme zadat do programu rastrovou mapu nádrží. Hodnoty buněk v této mapě odpovídají hodnotám poměru zachycení uvedených nádrží. Ostatní elementy = 0. Watem/SEDEM v průběhu výpočtu nádrže očísluje a vyexportuje soubor s pondnr.rst jejich identifikátory. Dále uvede množství sedimentu zachycené každou nádrží. Aby byly tyto hodnoty určeny reálně, je třeba vzájemně upravit vrstvu nádrží a vodních toků podle podmínek uvedených v předchozí kapitole 2.2.4.3. Zejména to znamená velké nádrže, do nichž vstupuje několik vodních toků, editací zmenšit a umístit tak, aby ležely pouze na jediném závěrečném úseku toku (jehož sediment sdružuje objemy dílčích předchozích úseků).

Ptef (parcel trap efficiency) – Jedná se o poměr zachycení sedimentu (odtoku) jednotlivými typy pozemku. Opět může být vložen v podobě rastrové mapy, nebo samostatných hodnot pro ornou, les a TTP. Jedná se o procentní hodnoty (0 – 100%). Zadaná hodnota ovlivňuje generování velikosti zdrojové plochy v ovlivněném území, a tedy LS faktoru směrem po svahu.

Příklad: Pokud zadáme pro les PTEF = 75%, znamená to, že při rozlišení 20 m přispívá každá buňka lesa k celkové zdrojové ploše hodnotou 100 m^2 (místo 400 m^2 – jak by odpovídalo celé ploše buňky).

Hodnoty předcházející území se změnou PTEF zůstanou nedotčeny. Tzn., že celková zdrojová plocha území nad lesem zůstane nezměněna a při vhodných morfologických

podmínkách bude převedena lesem beze změny (pouze s redukovaným příspěvkem plochy v oblasti lesa) do území pod lesem.

Doposud doporučované hodnoty PTEF jsou (**Obr. 2.2.4–4**):

Orná půda: PTEF = 0

Les a TTP: PTEF = 75

Parcel connectivity: tato volba odpovídá poměru zachycení **na hranicích** pozemků. Tedy se jedná zahrnutí vlivu hranic pozemků na modelování množství odtoku a sedimentu. Jedná se opět o hodnoty v procentech, odlišné pro ornou půdu a les/TTP. Zadanou hodnotou je redukována celková zdrojová plocha daného elementu při vstupu na pozemek (překročení hranice pozemku).

Příklad: Pokud zadáme pro les/TTP hodnotu 75% a celková zdrojová plocha pixelu nad hranicí lesa je 300 ha, první pixel uvnitř lesa bude mít zdrojovou plochu pouze 75 ha. Ta dále narůstá po svahu podle stanovených pravidel.

Základní doporučované hodnoty poměru zachycení jsou:

Vstup na pozemek orné půdy: Parcel connectivity = 10

Vstup na pozemek lesa/TTP: Parcel connectivity = 75

Doporučované hodnoty jsou dosazovány na základě testování tvůrci modelu na belgických povodích (VanRompaey et. al, 2001) a měly by být pro české podmínky nově kalibrovány.

2.2.4.5 Třetí vstupní dialog – LS faktor, R faktor, transportní kapacita

V posledním vstupním dialogu programu jsou doplněny zbývající potřebné vstupy (**Obr. 2.2.4–5**) .

Pro výpočet **topografického faktoru** je možno si vybrat z čtyř rovnic pro faktor sklonu svahu:

- Wischmeier Smith 1978
- McCool 1987, 1989
- Govers 1991
- Nearing 1997

a ze dvou charakteristik exponenty délky svahu m:

- Wischmeier Smith 1978
- McCool 1987, 1989.

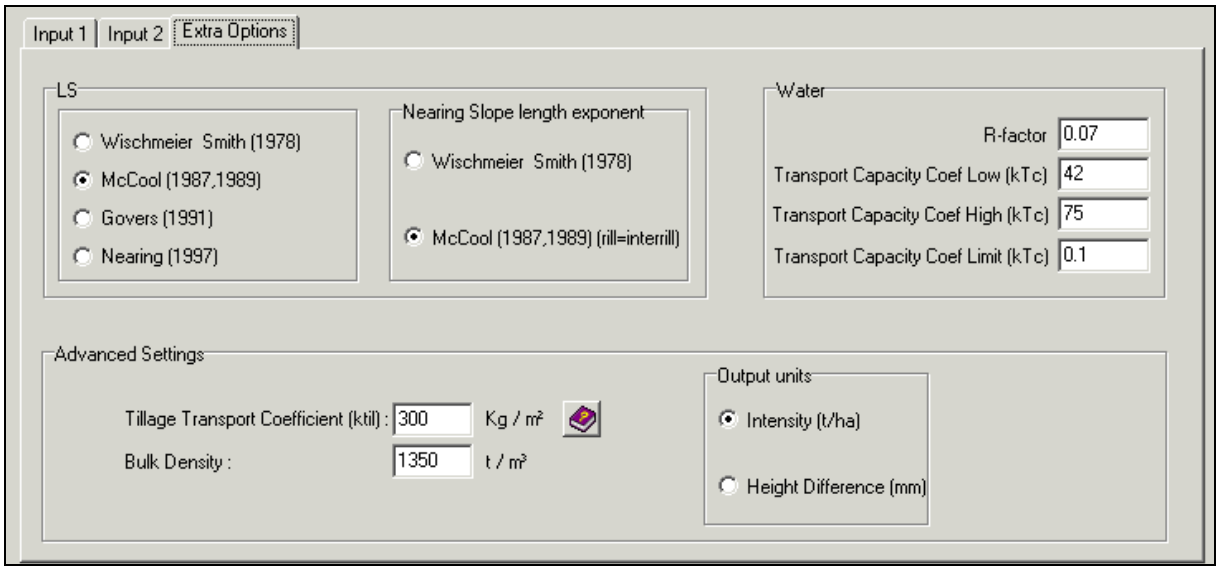
Uvedené možnosti využívají pro výpočet faktoru LS na základě zdrojových ploch shodných algoritmů jako program USLE2D, doporučená kombinace je výpočet dle (McCool, 1989). Použité rovnice při tomto výpočtu jsou uvedeny v kapitole 2.1.3.

Déle je třeba zadat hodnotu **faktoru R**. Ta není zadávána jako vstupní vrstva, ale pouze jednou hodnotou pro celé řešené území. Jednotky – MJ mm m^{-2} h^{-1} – odpovídají 1/1000 hodnot používaných pro ČR, tedy jsou přibližně v řádu několika setin.

Pro velká řešená území, kdy je třeba zahrnout prostorovou variabilitu R faktoru je toho možno snadno dosáhnout vynásobením vrstev K faktoru a R faktoru před zadáním výpočtu

a tento násobek zadat do výpočtu jako K faktor. V tom případě je nutno v závěrečném dialogu vyplnit hodnotu R faktoru = 1 (MJ mm m^{-2} h^{-1}).

Obr. 2.2.4–5 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 3 pro zadávání vstupních dat.



Jedním z posledních vstupů jsou hodnoty **koeficientu transportní kapacity kTc.** Princip výpočtu pomocí transportních kapacit je uveden v kapitole 2.2.2. Jsou zadávány dvě hodnoty kalibračního koeficientu, zde jsou jejich doporučené hodnoty, kalibrované v belgických podmínkách (VanRompaey et. al. 2001):

- kTc low (neerodivní povrchy): 100
- kTc high (erodivní povrchy): 200

Ještě je třeba zadat kTc limit, který odpovídá hodnotě C faktoru odlišující erodivní a neerodivní povrchy. Pro hodnoty C faktoru < kTc limit je poté ve výpočtu použita hodnota kTc low a naopak. Obvyklá hodnota je například:

- kTc limit = 0,1

Posledními vstupy jsou hodnota **objemové hmotnosti sedimentu** (t/m^3) pokud chceme hodnoty eroze určovat ne jako hmotnost odneseného materiálu, ale jako výškový úbytek půdního profilu a možnost výběru mezi uvedenými dvěma **výstupy** v mapě **ztráty půdy:**

- Intenzita eroze, ztráta půdy – t/ha/rok
- Výškový rozdíl půdního profilu způsobený erozí – mm/rok

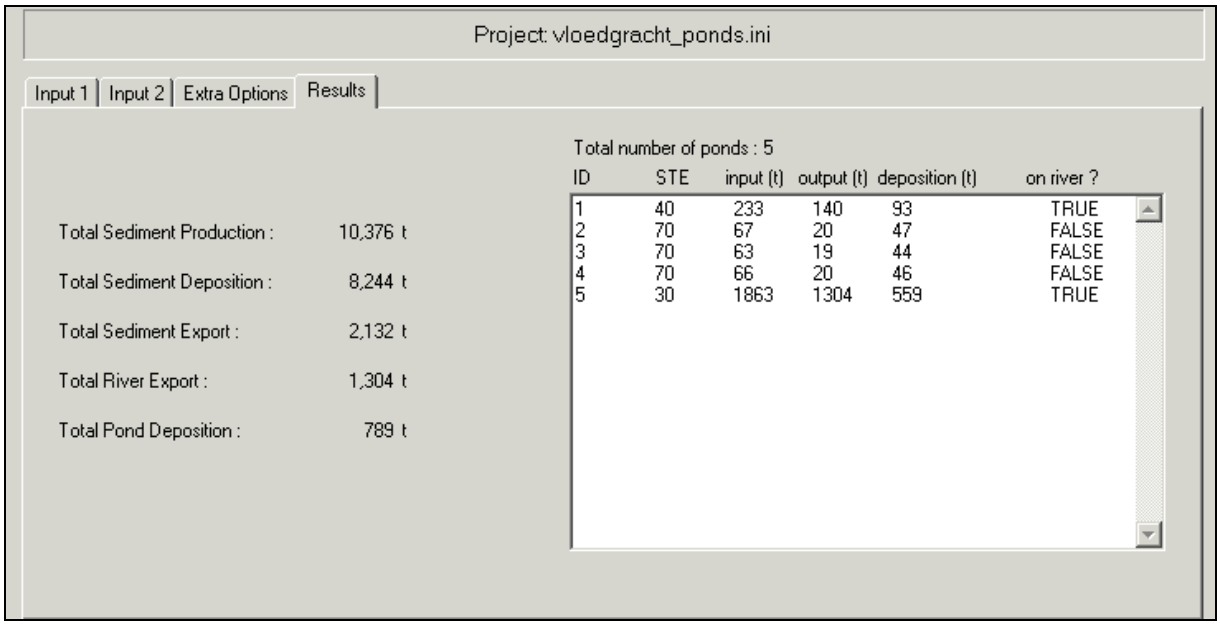
2.2.5 Výstupy modelu Watem/SEDEM 2.1.0

2.2.5.1 Celkové hodnoty – výstupní dialog

Hlavní vypočtené výsledky jsou zobrazeny v dialogovém okně „**Results**“ (**Obr. 2.2.5–1**), které se objeví jako nová záložka v dialozích programu. Pokud před zavřením programu projekt uložíme, tato výsledková tabulka bude zachována a při dalším otevření se opět zobrazí.

Poznámka: Výsledky zde zobrazené jsou uloženy v iniciačním souboru projektu, při novém výpočtu a uložení dojde k jejich přepsání. Je vhodné tedy každý výpočet ukládat jako nový projekt.

Obr. 2.2.5–1 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Hlavní výstupy modelu.



Všechny prezentované hodnoty jsou celková množství v t.rok^{-1}:

- **Total sediment production**: Suma celkového množství ztráty půdy v zájmové oblasti (povodí).
- **Total sediment deposition**: Suma celkového množství sedimentujícího v zájmové oblasti (povodí) před vstupem do vodních toků.
- **Total sediment export**: Veškeré množství sedimentu vstupující do vodních toků po odečtení depozice v nádržích. Spolu s hodnotou „Total pond deposition“ se jedná o tzv. „total sediment yield“, tedy celkové množství transportovaného sedimentu po redukci ztráty půdy hodnotou SDR.
- **Total river export**: Celkové množství sedimentu transportované vodním tokem uzávěrovým profilem povodí (po zachycení v nádržích).
- **Total pond deposition**: Celkové množství sedimentu zachycené ve všech nádržích povodí.

V dialogu vpravo od těchto hodnot je uvedena jednoduchá tabulka ukazující přehled jednotlivých nádrží, jejich poměru zachycení, vstupního množství sedimentu, výstupního množství sedimentu, zachyceného sedimentu a obsahující poznámku zda nádrž leží na vodním toku, nebo mimo.

Poznámka: Všechny uvedené hodnoty lze zjistit i následovně analýzou výstupních rastrových vrstev.

2.2.5.2 Výstupní tabulky

Program při výpočtu své výsledky zapíše do několika textových souborů, ze kterých je možno získat informaci o jednotlivých nádržích, segmentech vodních toků a nalezených bezodtokých místech.

Jedná se o soubory:

Pitdata.txt – seznam a pozice nalezených bezodtokých míst

Pond Sediment Deposition.txt – množství sedimentu v nádržích

Ponddata.txt – Seznam (číslování) a pozice nalezených nádrží

projectriversediment.txt – seznam jednotlivých úseků toků a množství sedimentu v nich

Nejdůležitější jsou tabulky „**pond sediment deposition**“ a „**projectriversediment**“. Jejich struktura je uvedena v následujících tabulkách – **Tabulka 2.2.5–1** a **Tabulka 2.2.5–2**.

Tabulka 2.2.5–1: Struktura souboru Pond Sediment Deposition.txt

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
ID	Pond PTEF	input ton	output ton	deposition ton	on river
26					
1	70	0	0	0	FALSE
2	70	1449	435	1015	TRUE
3	70	3968	1134	2834	TRUE
4	70	919	271	649	TRUE
5	70	1905	571	1334	TRUE
6	70	919	81	838	TRUE
.....	.....	.....	.....	.....	.....

Význam sloupců v souboru (**Tabulka 2.2.5–1**) je následující:

[1] Počet nalezených nádrží , identifikační čísla nádrží (odpovídají výstupnímu souboru pondnr.rst).

[2] Poměr zachycení sedimentu v nádrži (stanoven uživatelem v souboru „pond map“).

[3] Celkové množství sedimentu vstupující do nádrže (součet sedimentu ze svahů a protékajícího segmentu).

[4] Množství sedimentu pokračující dále po toku.

[5] Množství sedimentu zachycené v nádrži.

[6] Umístění nádrže – FALSE = nádrž je mimo síť toků, TRUE = nádrž je na toku. *Poznámka: číslo toku odpovídající dané nádrži je uvedeno v souboru ponddata.txt*

Tabulka 2.2.5–2: Struktura souboru projectriversediment.txt.

[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Riverid	NextRiverid	Hillslope sediment input	Sediment input upstream river	Sediment output river
1	-2	144	2116	2260
2	1	548	0	548
3	1	0	1568	1568
4	6	522	0	522
5	6	222	0	222
6	3	705	744	435
7	3	289	3679	1134
.....	.....	.....	.....	.....

Význam sloupců v souboru (**Tabulka 2.2.5–2**) je následující:

[1] Identifikační čísla úseků toku.

[2] Úsek navazující po proudu (-2 = uzávěrový profil povodí).

[3] Celkové množství sedimentu vstupující do daného úseku ze svahů (plochy povodí).

[4] Množství sedimentu vstupující z předchozího úseku.

[5] Množství sedimentu pokračující dále po toku (případně po částečném zachycení v nádrži).

2.2.5.3 Výstupní rastrové vrstvy

Výstupní generované soubory jsou ve formátu Idrisi32 rastr a svou velikostí a rozlišením odpovídají vstupním vrstvám. Jedná se o následující soubory.

V případě, že jako výstupní jednotky jsou zvoleny tuny:

- Pit.rst – umístění nalezených bezodtokých míst
- Pondnr.rst – seznam nádrží s programem přiřazenými čísly
- Uparea.rst – velikosti zdrojových ploch jednotlivých elementů DMT
- LS.rst – hodnoty topografického faktoru vypočtené podle zvolených parametrů a rovnic
- Inflowton.rst – množství sedimentu vstupující do jednotlivých elementů řešených ploch (t/rok)
- Outflowton.rst - množství sedimentu vystupující (pokračující) z jednotlivých elementů řešených ploch (t/rok)
- Netto water erosion in ton per ha.rst – hodnoty ztráty půdy (záporné hodnoty) nebo depozice (kladné hodnoty) v jednotlivých elementech DMT (t/ha/rok).

V případě, že jako vstupní jednotky jsou zvoleny mm:

- Pit.rst – umístění nalezených bezodtokých míst
- Pondnr.rst – seznam nádrží s programem přiřazenými čísly
- Uparea.rst – velikosti zdrojových ploch jednotlivých elementů DMT
- LS.rst – hodnoty topografického faktoru vypočtené podle zvolených parametrů a rovnic
- Inflowton.rst – množství sedimentu vstupující do jednotlivých elementů řešených ploch (t/rok)
- Outflowton.rst - množství sedimentu vystupující (pokračující) z jednotlivých elementů řešených ploch (t/rok)
- Netto water erosion in mm.rst – hodnoty ztráty půdy (záporné hodnoty) nebo depozice (kladné hodnoty) v jednotlivých elementech DMT (mm/rok).

3 Část třetí – vstupní data pro výpočet v GIS

Pro řešení v prostředí rastrového GIS je třeba v prvním kroku zajistit informační vrstvy zvlášť pro každý z parametrů použitých rovnic. Výsledná vrstva průměrné roční ztráty půdy G podle USLE je pak získána prostým vynásobením vrstev jednotlivých faktorů. Ze stejných zdrojových dat jsou připravovány vrstvy pro výpočet transportu sedimentu (CN, RP, …). Jednotlivé vrstvy (rastrové tématické mapy) jsou vytvářeny z digitálních mapových podkladů a jiných zdrojů. Výsledek výpočtu je do značné míry úměrný kvalitě daných vstupních dat.

Zjednodušeně řečeno se příprava vrstev GIS v dnešní době může ubírat dvěma směry:

- Nákup a konverze hotových komerčních mapových vrstev GIS
- Vlastní tvorba potřebných vrstev na základě dostupných digitálních (případně analogových) dat.

V případě modelování erozních procesů do výpočtu vstupují v různých podobách a variantách zejména následující vrstvy:

- Výškopis – digitální model terénu (DMT)
- Mapa využití území (land-use) a mapa vegetačního krytu (Land Cover)
- Půdní mapy a charakteristiky
- Srážková data a mapy.

Následující kapitoly jsou věnovány shromážděným zkušenostem se získáváním a přípravou uvedených vstupních dat. Přípravou dat pro GIS jsem se zabýval již ve své diplomové práci (Krása, 1999). Jako doktorand jsem se jednotlivými daty a jejich hodnocením zabýval během několika projektů v průběhu studia. Při studiu jsem se specializoval zejména na vyhodnocování dat DPZ. V této souvislosti jsem absolvoval předmět Dálkový průzkum Země na Katedře mapování a kartografie a věnoval se i publikační činnosti (Krása, 2002).

3.1 Používaný software

Na katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství je k dispozici několik GIS software používaných k modelování erozní problematiky i přípravě vstupních dat.

Zejména je to studentský rastrový software IDRISI 32 (Eastman, 1987-2001), který je využíván v rámci výuky a diplomových prací, i k dalším výzkumným účelům. Software ve své poslední podobě umožňuje řadu sofistikovaných analytických operací, a rastrově uložená data jsou pro výpočet pomocí tématických vrstev i pro definování odtokových poměrů velmi vhodná. Další výhoda je rozšířenost tohoto software v akademickém světě – využívané belgické programy pro výpočet parametru LS (program USLE2D) nebo transportu sedimentu (Watem/SEDEM) pracují s rastrovými daty formátu IDRISI a komunikují s tímto GIS. Více o programu naleznete na http://www.clarklabs.org/.

Pro tvorbu prezentačních map, úpravu vektorových databází (modifikace polygonů apod.), a pro ruční digitalizaci nad rastrovými mapami a snímky je využíván software ArcView 3.2 firmy ESRI, spolu se svými rastrovými nadstavbami. Tento software umožňuje pohodlné provádění jednoduchých operací s vektory, ale neumožňuje provádět žádné

složitější analytické úlohy s vektory ani rastry. Více o programu naleznete na http://www.esri.com/software/arcview/.

Nejvýkonnějším používaným výpočetním nástrojem je GIS soubor produktů Easy/Pace 6.3 kanadské firmy PCI Geomatics. Jedná se o převážně rastrově orientovaný GIS software určený k práci s daty DPZ a umožňující provádět i složitější operace s vektorovými vrstvami. Modulově orientovaný program nabízí kvalitní výpočetní algoritmy, provádění georeferencí i klasifikací a podporuje řadu rastrových i vektorových formátů ostatních firem. Hlavní využití programu je především v oblasti přípravy vstupních dat. V současné době je distribuována nová verze programu, spojená do souboru softwarových nástrojů nazvaného Geomatica. Více o programu naleznete na http://www.pcigeomatics.com/.

3.2 Digitální model terénu

Digitální model terénu je klíčovou informační vrstvou, pokud se týká přesnosti dalšího výpočtu, protože z něj jsou odvozovány jak sklony tak i délky odtokových drah, které pak mají zásadní vliv na výsledné hodnoty ztráty půdy i na hodnocení transportního procesu.

Příprava rastrového DMT pro výpočty erozní ohroženosti je dnes možná (obdobně jako u ostatních vrstev) v podstatě čtyřmi způsoby:

- Nákupem komerčních vektorových DMT a jejich převodem na rastr
- Digitalizací mapových podkladů, jež vede ke získání vektorové vrstevnicové mapy – další postup je obdobný jako v prvním případě
- Přímou tvorbou rastrového DMT na základě stereoskopické fotogrammetrie – párových leteckých (a dnes již i družicových) snímků.
- Generováním DMT na základě bodového skutečného zaměření povrchu (v podobě triangulační bodové sítě, nebo záměrných profilů).

Každá ze zmíněných metod má dnes své opodstatnění a své výhody i nevýhody vzhledem k požadovanému účelu DMT. Mnohdy není vyloučeno ani použití kombinace uvedených metod pro tvorbu výsledného modelu. Záleží na následujících požadavcích

- Přesnosti
- nákladech
- velikosti řešeného území
- aktuálnosti

Příklad: Při modelování 3D proudění ve vodních tocích, nebo při stanovování zátopových ploch při povodni je třeba DMT co nejpřesnější, doplněný zlomovými čarami terénu, pevnými překážkami atd. V takových příkladech je třeba vytvářet DMT na základě leteckých snímků a konkrétních zaměření. Byť může být k takovému účelu využita i nejpřesnější komerční republiková databáze ZABAGED, je třeba ji doplnit přesnějšími zaměřenými daty a verifikovat její kvalitu (Šeblová a kol., 2003). Přesnost v řádu metrů již zde není dostatečná.

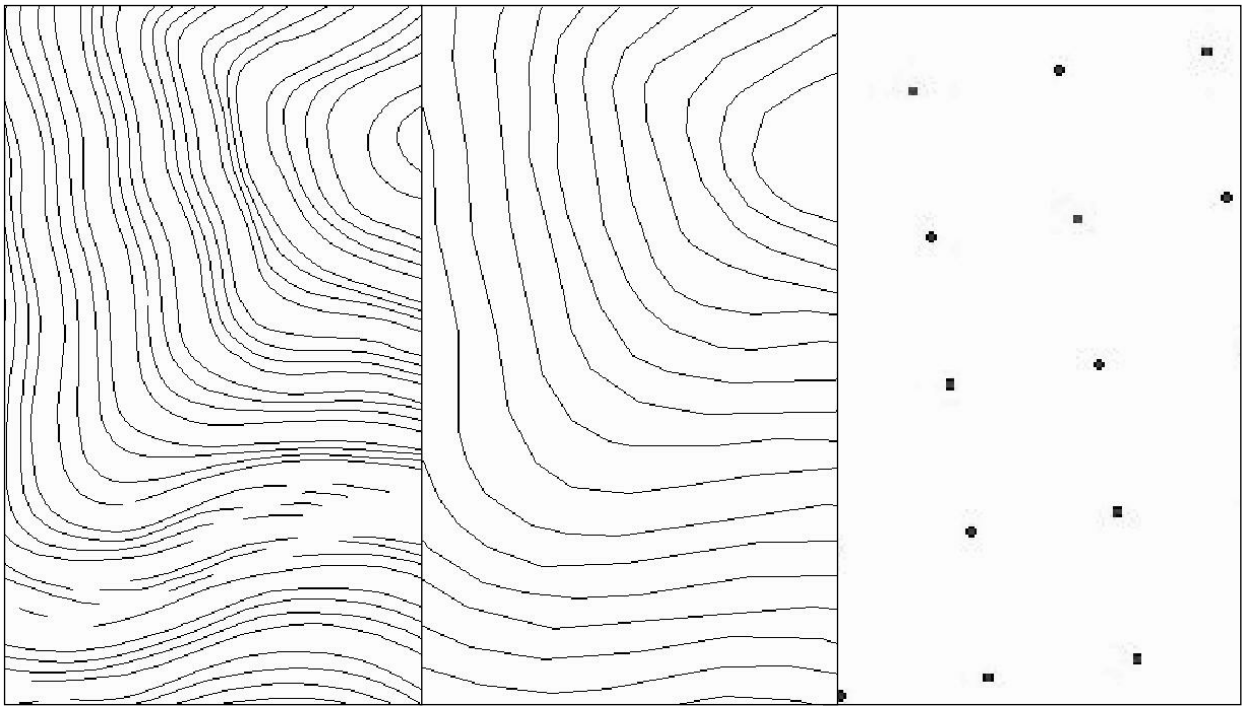
Naopak při tvorbě přehledové mapy erozní ohroženosti pro celou Evropu může být dostačující DMT odvozený z družicových dat ve výsledném rozlišení 1 km (Van der Knijff et. al., 2000).

Tato práce je věnována výpočtu ztráty půdy pomocí empirických modelů v regionálním měřítku. K tomu účelu se obvykle dnes nejlépe hodí DMT vytvořený na základě komerčně dostupných vektorových databází. Dnes dostupné modely již nabízejí dostatečnou polohopisnou i výškopisnou přesnost a jejich cena je obvykle dostupná. Samostatná příprava DMT v regionálním měřítku je již neefektivní. Proto další kapitoly jsou věnovány výběru a dostupnosti daných databází a postupu přípravy DMT na základě uvedených zdrojů dat.

3.2.1 Komerční databáze jako zdroje DMT v ČR

V současné době je k dispozici několik komerčních databází (vektorových topografických map) pokrývajících celé území České republiky, jež mohou sloužit jako zdroj pro vytvoření rastrového DMT (Dostál a kol., 2000b). Tyto zdroje se výrazně liší svou podrobností, kvalitou i cenou. Záleží na řešiteli každého konkrétního projektu, jaký zdroj s ohledem na požadovanou přesnost a finanční dostupnost zvolí. Následující zdroje dat byly v rámci výzkumu, kterého se doktorand na katedře zúčastnil, testovány (**Obr. 3.2.1–1**). Některé z databází (ZABAGED, DMÚ25, apod.) jsou vhodné nejen pro tvorbu DMT, ale též pro doplnění informací při tvorbě mapy využití území, proto bude zmíněn též počet jejich polohopisných atributů.

Obr. 3.2.1–1: Přehled základní podrobnosti DMT komerčních databází.



3.2.1.1 Databáze ZABAGED – Základní báze geografických dat

ZABAGED (http://www.cuzk.cz/) je digitální topografický model území ČR odvozený z mapového obrazu Základní mapy České republiky 1:10 000 v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému baltském - po vyrovnání. Správcem a poskytovatelem dat ZABAGED je ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD. ZABAGED má charakter GIS integrujícího prostorovou složku vektorové grafiky s topografickými relacemi objektů a složku atributovou obsahující popisy a další informace o objektech.

Obsah ZABAGED tvoří 106 typů objektů strukturovaných v databázi do 60 grafických vrstev vektorových (DGN) souborů. Doplňkové informace resp. identifikátory některých typů objektů (vodstvo, komunikace) jsou přebírány z databází jejich odborných správců. Výškopisná složka vybavená vektorovým souborem vrstevnic umožňuje vytvářet účelově digitální model terénu.

ZABAGED je tvořen a provozován v grafickém prostředí MicroStation a GIS prostředí MGE (Intergraph) využívající relační databázi ORACLE.

Prostorově organizačními jednotkami ZABAGED jsou mapové listy 1:10 000 v kladu listů Základních map středních měřítek České republiky. Data ZABAGED se v současné době dodávají po celých mapových listech jako vektorové soubory polohopisu (2D) a výškopisu (3D nebo 2D) ve formátu DGN (příp. DXF) bez popisné složky atributů. Polohopisná a výškopisná složka mohou být poskytnuty společně nebo odděleně.

Horizontální polohová přesnost databáze je proměnná v závislosti na třídách objektů (1 -10 m), výšková přesnost proměnná v závislosti na sklonu reliéfu, přehlednosti území a použité technologii mapování (1,5 - 6 m), zatím bez aktualizace. Pro uvedený výškopis odvozený z map 1:10 000 platí, že digitalizované vrstevnice mají výškový rozestup 2 m, v rovinatých územích doplněný na rozestup 1 m. Polohopisná a výškopisná chyba je zde shodná s původním mapovým podkladem.

ZABAGED je nejpodrobnější z dostupných komerčních databází, nicméně také nejdražší. Jeho vyšší cena a přesnost je odůvodněná v případě řešení malých území.

3.2.1.2 Databáze DMÚ25 – Digitální model území

Tvůrcem a distributorem DMÚ je Geografická služba AČR, Vojenský topografický ústav Dobruška (VTOPÚ).

Pojem digitální modely území (DMÚ) vyjadřuje soubor geografických informací, uchovávaných, organizovaných a poskytovaných ve vektorové formě. Informace jsou v DMÚ hierarchicky a topologicky uspořádány a organizovány. Základní informační jednotkou je geografický objekt, který je polohově definován svou definiční bodovou množinou a sémanticky vymezen pojmovými, kvalitativními, kvantitativními a popisnými atributy (http://www.army.cz/acr/geos/weby/vtopu/dmu.htm).

Obsah **DMÚ25** tvoří vodstvo, komunikace, potrubní a energetické trasy, rostlinný kryt, zástavba, hranice, výškopis.

Podkladem digitalizace jsou kartolitografické originály, vojenské topografické mapy 1 : 25 000, podkladem aktualizace potom ortogonalizované mozaiky leteckých měřických snímků, sběr dat, místní šetření, fotogrammetrické doměření. Přesnost dat je charakterizována střední polohovou chybou 18 m.

Souřadnicové systémy DMÚ25 jsou:

- základní: S-1942/83
- alternativní: WGS 84, S-JTSK.

Formáty dat používané při distribuci:

- základní: ArcInfo verze 7.x Coverage
- alternativní: ArcInfo Export File, ArcView Shape File, ArcInfo Ungenerate File.

Aktuálnost dat – 1987-1996 (v závislosti na aktuálnosti topografických map 1 : 25 000). Přičemž data jsou distribuována od 2. poloviny roku 1998 a aktualizována periodicky 1 × za 5 let plošně, vybrané prvky průběžně.

Databáze DMÚ25 zachovává ve své organizační struktuře původní klad mapových listů 1:25 000. Jednotlivé mapové listy jsou pro distribuci řazeny v samostatných adresářích spolu s připojenými tabulkami. Celá databáze je rozdělena do dvaceti samostatných vrstev, přičemž každý vektorový objekt je charakterizován svým unikátním identifikátorem. Veškeré další informace o objektech jsou obsaženy v připojených tabulkách.

Pro uvedený výškopis odvozený z map 1:25 000 platí, původní výškový rozestup vrstevnic 5 m.

V případě vrstvy digitálního modelu terénu je pro velká území poměrně náročným úkolem jeho sestavení na základě velkého množství mapových listů. Hierarchicky uspořádané adresáře jednotlivých mapových listů obsahují totiž stejně pojmenované soubory, jež vyžadují samostatné načítání a následné zpracování. V rámci předchozích projektů řešitelského pracoviště byly nalezeny některé chyby v atributech DMT, tyto problémy jsou zřejmě již v databázi vyřešeny (Dostál a kol., 2001c).

Databáze DMÚ 25 představuje rozumný kompromis kvality a pořizovací ceny. Její podrobnost je postačující k řešení území v řádu 10^2 km^2, případně i menších, je-li databáze při přípravě správně ošetřena.

3.2.1.3 Ostatní komerční databáze výškopisu v ČR – DMR2, DMR1, DMÚ200, DVD

Další dostupné databáze byly vesměs vytvořeny rovněž ve VTOPÚ Dobruška (http://www.army.cz/acr/geos/weby/vtopu/), přičemž některé z nich jsou již distribuovány dalšími společnostmi.

- **DMR2** – pravidelná čtvercová bodová síť s body ve vzdálenosti 100m odvozená z mapy 1:25 000 (**Obr. 3.2.1–1**), nezachycuje přesně terénní tvary (dnes již poskytuje pouze Geofyzika, a.s. Brno)
- **DVD2** – Výškopis DVD nahrazuje databázi DMR2 (po několika aktualizacích).

Obsah dat – Pravidelně rozložené body v síti 100 x 100 m, výška reprezentuje skutečnou výšku terénu v příslušném uzlovém bodě.

Základní ukládací jednotka – Čtverec 10x10 km.

Přesnost dat – Chyba v určení výšky bodu je 3 - 15 m (podle členitosti terénu).

Zabezpečovaný prostor – Území České republiky s přesahem za hranice státu do 50 km.

Souřadnicový systém a výškový systém:

- základní: S-1942/83

- alternativní: WGS 84, S-JTSK.

Výškový systém – MEAN Sea Level - Balt po vyrovnání (Bpv).

Formát dat

- základní: binární

- alternativní: soubor výšek bodů v ASCII souboru.

Termín distribuce - Od roku 2001.

Datový podklad - Vrstevnice topografických map 1:25 000 po 4. obnově.

- **DVT-1** – Digitální výškopis terénu 1

Obsah dat – Pravidelně rozložené body v síti 3_ x 3_, výška reprezentuje skutečnou výšku základního terénu v příslušném uzlovém bodě, součástí dat je i digitální gazzeteer - zeměpisný slovník.

Základní ukládací jednotka – Čtverec 1°x 1° .

Přesnost dat – Chyba v určení výšky bodu je 5 - 30 m (podle členitosti terénu).

Zabezpečovaný prostor – Území České republiky s přesahem za hranice státu do 50 km.

Souřadnicový systém a výškový systém – WGS 84.

Výškový systém – MEAN Sea Level - Balt po vyrovnání (BpV).

Formát dat – Soubor výšek bodů v ASCII souboru (dle STANAG 3809).

Termín distribuce – Od roku 2000.

Datový podklad – DVD.

Poznámka: DVT-1 je obdobou DTED-1 dle normy STANAG 3809 (vycházející z MIL-D-89020 - NIMA).

Pro generelní náhledy a méně náročné aplikace mohou být k dispozici ještě např.:

- **DMR1** – pravidelná rastrová síť s rozlišením 1000m, dnes již svou podrobností zastarává
- **DMÚ200** – vrstevnice, digitalizované z topografických map měřítka 1:100 000 (poskytuje VTOPÚ Dobruška)

Obsah dat – Vodstvo, sídla, komunikace, potrubní a energetické trasy, hranice, rostlinný kryt, výškové překážky, geodetické body.

Základní ukládací jednotka – Mapový list topografické mapy 1 : 100 000.

Přesnost dat – Střední polohová chyba 60 m.

Aktuálnost dat – 1987-1996 (v závislosti na aktuálnosti topografických map měřítka 1 : 100 000).

Prostor zabezpečení – Území České republiky a prostor do hloubky asi 50 km za hranice.

Souřadnicový systém

-základní: S-1942/83;

- alternativní: WGS 84, S-JTSK.

Formát dat

- základní: ArcInfo verze 7.x Coverage;

- alternativní: ArcInfo Export File, ArcView Shape File, ArcInfo Ungenerate File, ASCll soubor podle dokumentace DMÚ 200 (VVR).

Termín distribuce – Od roku 1993.

Podklad digitalizace – Topografická mapa 1 : 100 000.

Podklad aktualizace – Topografická mapa 1 : 50 000, 1 : 100 000, DMÚ 25

3.2.2 Příprava DMT z vektorové vrstevnicové mapy

Pro velká povodí (řádově 10^2 – 10^3 km^2) se ukazuje jako vhodný kompromis mezi kvalitou a cenou DMT z DMÚ25 – uvedený zdroj se při tvorbě rastru s rozlišením 20m již příliš neliší od podrobnějšího ZABAGEDu a po kvalitní přípravě poskytuje dostatečně věrohodný zdroj morfologie pro stanovení sklonitosti, odtokových drah i zdrojových ploch povrchového odtoku. V rámci předchozího výzkumu a studia byl vytvořen standardní postup vytvoření výsledného rastrového digitálního modelu terénu z tohoto zdroje pomocí nástrojů GIS IDRISI32. Postup je následující (Krása, 1999):

3.2.2.1 Základní postupy tvorby rastrového DMT

Prvním krokem je samozřejmě **konverze formátů souborů**. K tvorbě rastrového DMT může být využito několika softwarových prostředků, nejen cílového GIS Idrisi32. Proto je základním požadavkem vzájemná převoditelnost souborů mezi všemi používanými formáty. Zde je třeba dbát i na zachování všech databázových prvků (např. atributů vrstevnic). Základní používané formáty v našem případě jsou:

- Idrisi32 rastr, Idrisi32 vektor
- ArcView Shapefile (vektor) – obvykle komerčně distribuovaná data
- PCI Geomatics PIX – rastr i vektor (používaný pro úpravy DMT, i vzájemný převod vektorových formátů)

Po převedení do využívaného formátu vektoru následuje **přiřazení nadmořských výšek** podle databáze atributů. Každá vrstevnice poté jako svůj jediný atribut obsahuje skutečnou nadmořskou výšku.

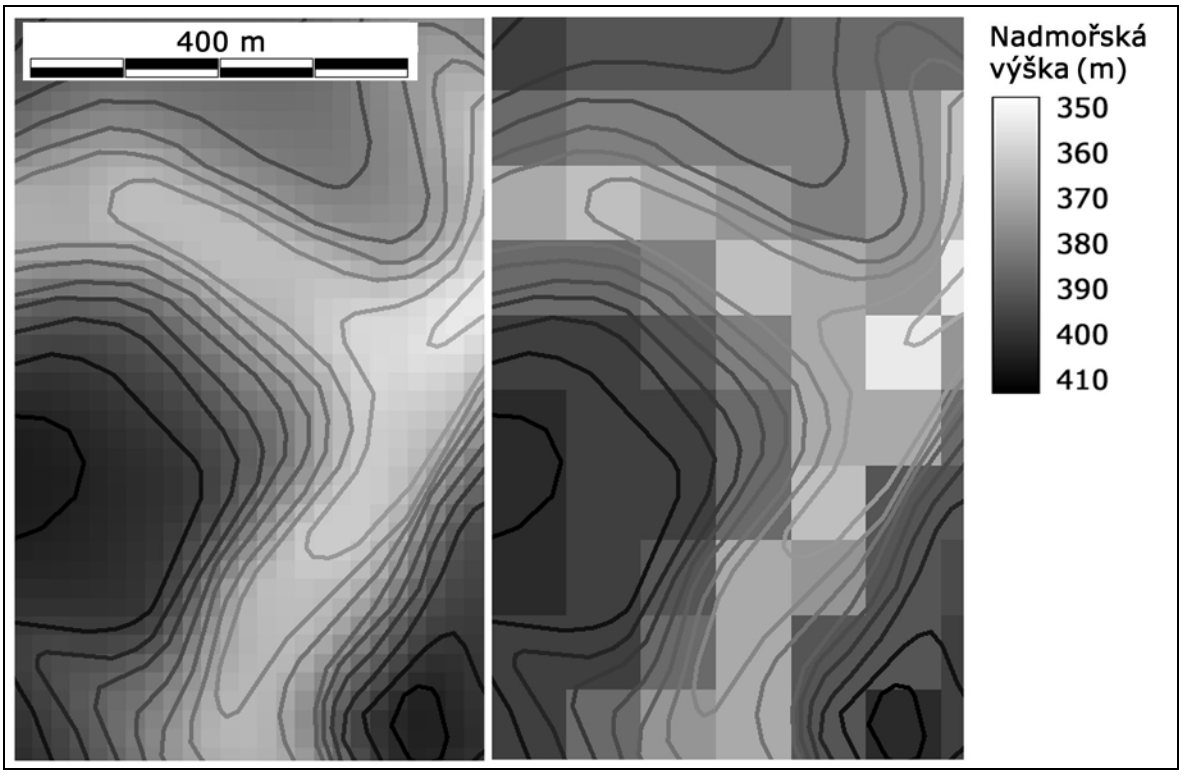
Následuje **výběr rozlišení** všech výpočetních vrstev. V současné době se používané rozlišení vzhledem ke kvalitě vstupů, zejména využití území Land Cover, pohybuje v rozmezí cca 5 až 50 metrů, podle velikosti řešeného území. Požadované rozlišení je důležitým kritériem pro výběr vhodné vektorové databáze i pro výběr metody tvorby rastrového DMT. V případě, že výstupní rozlišení (např. 50 m) svou podrobností nedosahuje původní podrobnosti vrstevnicové mapy, je vhodné uvážit alternativu **přípravy rastrového DMT ve vyšším rozlišení a jeho následující agregace** do rozlišení nižšího. Touto cestou se lze vyhnout problémům s nevhodným převodem strmých území a terénních singularit (Obr. 3.2.2–2).

Poznámka: Existují i jiné způsoby jak obejít uvedený problém, například předchozím generováním dostatečně husté TIN sítě (která je na rozdíl od vrstevnic vícesměrná a s volitelnou hustotou) a jejím převodem na rastr.

Problém je následující (**Obr. 3.2.2–1**):

- V případě nižšího výstupního rozlišení může ve strmých územích četnost vrstevnic přesáhnout podrobnost rastru. Nad jednou buňkou DMT pak leží ve skutečnosti několik původních vrstevnic. Jejich vzdálenost je se změnou sklonu svahu proměnná, ale automatická procedura generování DMT si vždy musí vybrat vhodnou vrstevnici pro reprezentaci daného elementu. Výběr je obvykle uskutečňován podle vzdálenosti vrstevnice od těžiště (středu) elementu. Při velké hustotě vrstevnic je tak sousedním elementům přiřazována nahodile nadmořská výška v rozdílu několika vrstevnic a jsou generovány nahodilé sklony.

Obr. 3.2.2–1 Problém generování rastrového DMT s příliš nízkým rozlišením Při přímém generování DMT v rozlišení 80 m z DMÚ25 (pravý obrázek) vzniká vrstva s chybnou odtokovou sítí – lze si povšimnout několika elementů ve dvou údolnicích zvoleného území, které přerušují údolnicovou linii a zamezují odtokovosti území, těmto buňkám byly vlivem nízkého zdrojového rozlišení přiřazeny chybné hodnoty nadmořských výšek.



Řešení:

- Pokud DMT nejprve generujeme v dostatečně vysokém rozlišení, ve kterém hustota vrstevnic nepřesahuje podrobnost rastru, tento problém nahodilých sklonů je eliminován, neboť nadmořské výšky jsou elementům přiřazovány jednoznačně. Je tedy vytvořen plynulý a reálný DMT (po správném ošetření filtrací). Pokud do následujícího řešení potřebujeme DMT s nižším rozlišením, agregace již připraveného DMT nevede k výše uvedených chybám. Tato agregace na základě průměrné nadmořské výšky středu agregované matice prvků sice sníží rozlišení, ale zachová plynulý sklon a jeho přechody. Nevzniknou tak žádné nereálné sklonové poměry jako při přímém generování DMT s nízkým rozlišením (**Obr. 3.2.2–1**).

Dalším krokem je tedy samotná **konverze vektor → rastr a interpolace.** Ta může probíhat několika způsoby a postupy v závislosti na využití daného software.

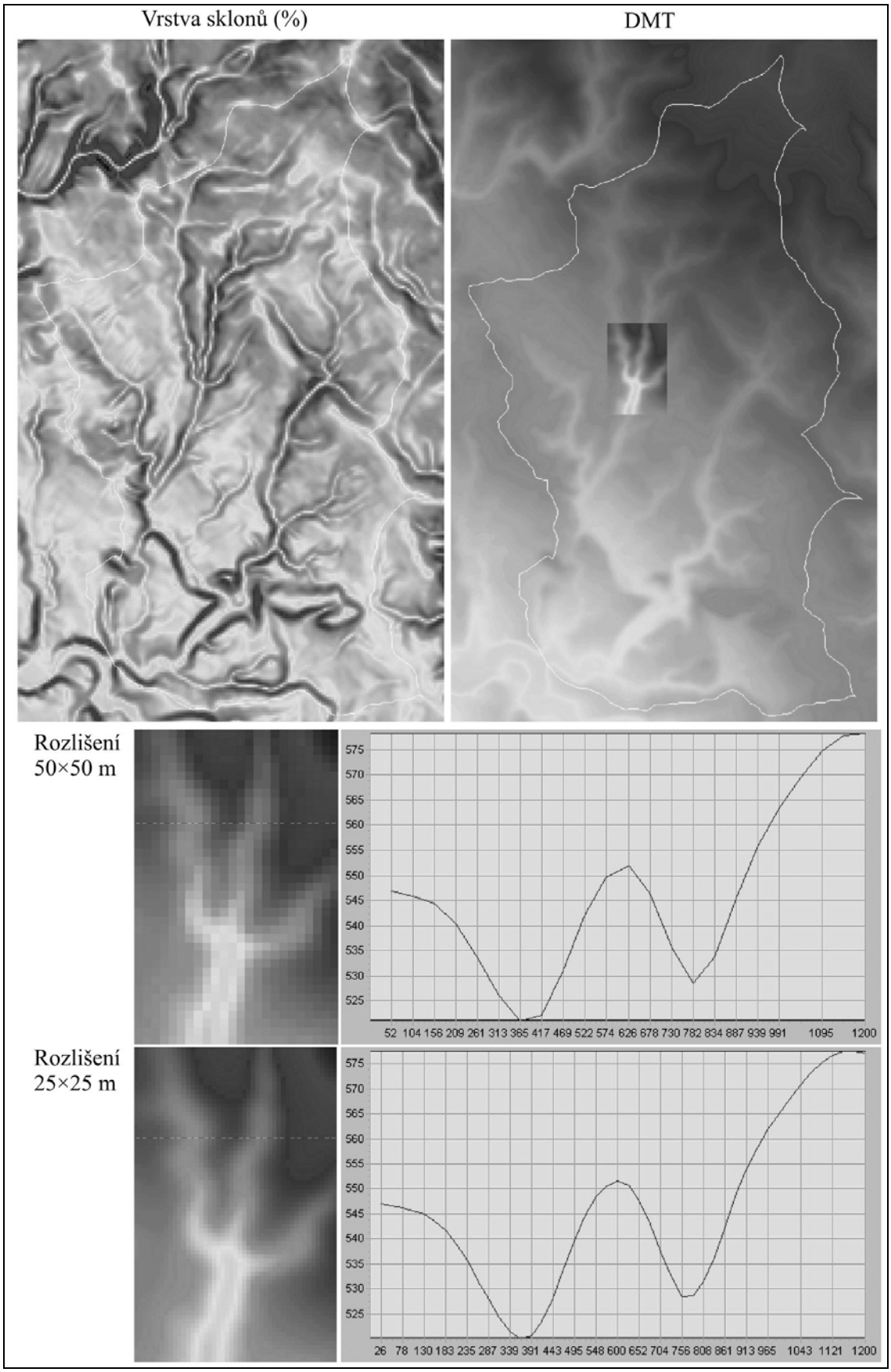
Idrisi32, základní postup:

Prvním krokem je zrastrování každého mapového listu do připraveného zdrojového rastru povodí v daném rozlišení (lépe vyšším).

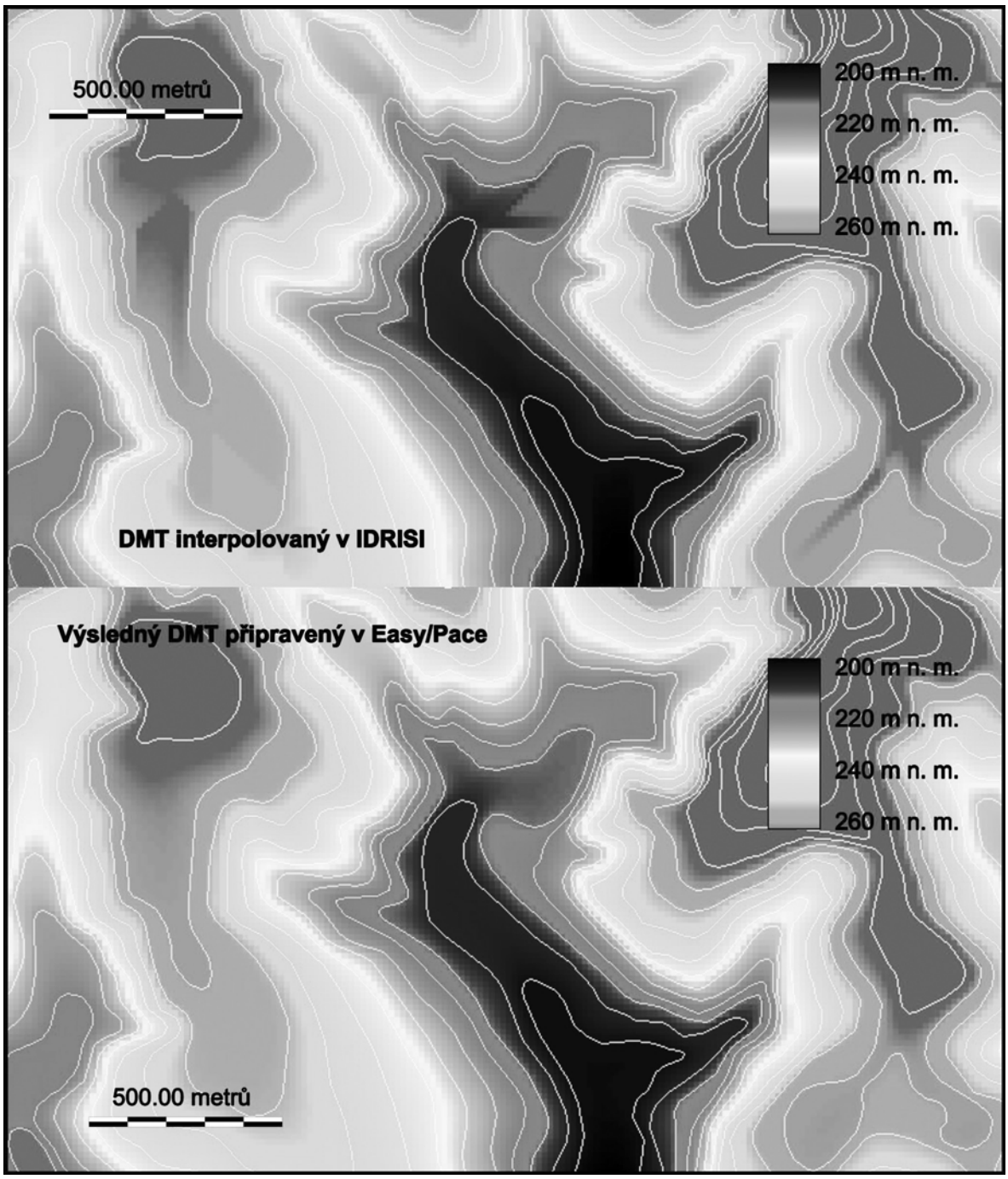
Následuje interpolace rastrového DMT mezi získanými buňkami skutečných nadmořských výšek (elementy odpovídající svou polohou vrstevnicím). Tím je vyplněna celá plocha DMT příslušnými mezilehlými hodnotami.

Pokud je třeba, je možno nyní provést agregaci DMT do nižšího rozlišení pro další výpočet.

Obr. 3.2.2–2: Rastrový DMT a mapa sklonů povodí Rokytenky v Orlických horách, zdroj – DMÚ25, cílové rozlišení 50 m, výchozí rozlišení 25 m, vliv agregace na změnu profilu.



Obr. 3.2.2–3 Chyby DMT vznikající v místech nízké hustoty vrstevnic při využití přímé interpolace z vrstevnic v Idrisi 32. Ukázka z povodí Prušánky na jižní Moravě, zdroj – DMÚ25.



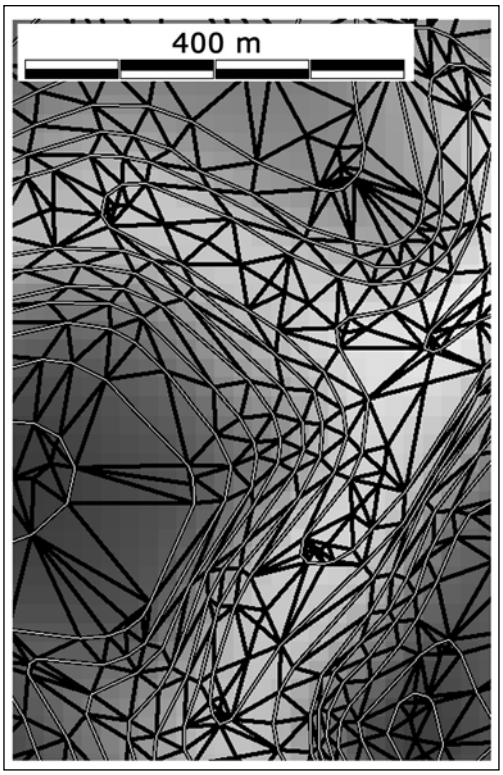
Posledními kroky jsou filtrace a úprava povrchu vhodným algoritmem pro odstranění nereálných singularit po interpolaci (viz. kapitola 3.2.2.2) a výpočet vrstvy sklonů pro DMT a kontrola plochých údolnic a oblastí s náhlou změnu sklonitosti.

Tento postup byl využíván k tvorbě DMT několik let, nicméně jeho výstupem není dostatečně kvalitní DMT místech změny tvaru svahu a ve vrcholových sedlech terénu (**Obr. 3.2.2–3**). Problémy působí také interpolace v plochých oblastech s velkým rozestupem vrstevnic. Kvalitnější výstupy poskytuje tvorba DMT pomocí TIN sítě, nebo algoritmu nabízeného PCI Easy/pace.

Idrisi32, TIN:

Při tomto postupu nejprve na základě vrstevnic (případně bodů) vybudujeme nepravidelnou trojúhelníkovou síť charakterizující povrch terénu. Modelování terénu pomocí TIN je vůbec nejvěrnější způsob kopírování skutečného tvaru reliéfu, ke kterému se jednotlivé trojúhelníkové plošky přimykají (**Obr. 3.2.2–4**).

Obr. 3.2.2–4 TIN síť na základě vrstevnic – shodné území z obrázku (Obr. 3.2.2–1).



Při tvorbě TIN z vrstevnic tak dosáhneme mnohem hustšího pokrytí plochy skutečnými hodnotami nadmořských výšek při zachování reality, a bez velkých deformací, které provázejí přímé rastrování. TIN (někdy též nazývaný nepravidelný rastr) je tak obvykle mnohem kvalitnějším podkladem pro rastrovou interpolaci než původní vrstevnice.

Následuje tedy interpolace hodnot (v Idrisi 32 modulem TINSURF) do rastru v požadovaném rozlišení. I zde je nicméně vhodné výsledný povrch pečlivě zkontrolovat a filtrací eliminovat problémové elementy.

Postup tvorby DMT pomocí TIN sítě obvykle vede ke kvalitnímu DMT vhodně reprezentujícímu skutečné sklonitostní poměry.

PCI Easy/Pace – VDEMINT:

Software PCI Easy/Pace (nově Geomatica) nabízí algoritmus pro tvorbu DMT přímou interpolací z vrstevnic a bodové sítě. Tento postup není dosud plně verifikován, ale přináší oproti ostatním několik výhod:

- Jako podklad pro interpolaci mohou vstupovat zároveň vrstevnice i záměrné body (Program zřejmě na základě všech dat generuje nejprve vlastní TIN a poté rastrový DMT). Zde je zjevná výhoda pokud dané území potřebujeme doplnit záměrnými profily pro zvýšení přesnosti, nebo v místech nedostatečného pokryvu vrstevnicemi.
- Dále je možné zadat liniové i polygonové útvary s proměnnou nadmořskou výškou (nikoli vrstevnice), jakési vlastní TIN útvary jež zpřesní terénní modulaci.
- Tyto útvary je možné zadat i jako zlomové čáry terénu – do DMT je tak možno zanést konkrétní meze, koryta, příkopy a podobně, což vede k velkému zpřesněním, pracujeme-li v lokálním měřítku.
- Všechny tyto vrstvy zadáváme ve společném dialogu což urychluje výpočet
- PCI engine je schopen zpracovávat objemnější soubory než Idrisi32 při lepším využití výpočetní kapacity počítače, je tak možno i na běžných PC stanicích generovat soubory DMT pro rozsáhlá území a v lepším rozlišení.

- Do vstupu zadáváme též úroveň vyhlazení DMT, jako počet filtračních iterací (0-100), čímž značně ovlivňujeme výslednou sklonitost, variabilitu a plynulost přechodů DMT. Po této operaci již DMT nevyžaduje další samostatnou filtraci.

Závěrem lze říci, že máme-li k dispozici dostatečně kvalitní vrstevnicovou mapu, jednoduchá TIN procedura Idrisi32 poskytne dostatečně kvalitní výsledek – úsporně a efektivně. V případě potřeby zadání dalších vstupních parametrů (např. modelování DMT dna nádrží na základě zaměření) je vhodné využít sofistikovanějších software, které umožní přesnější modulaci. V našem případě je to program Easy/Pace od PCI Geomatics.

Vytvořený DMT je kromě ošetření filtrací často nutné dále upravovat před vložením do dalších aplikací, nejčastější požadovanou úpravou je **PITREMOVAL,** tedy **odstranění bezodtokých míst** terénu, jejich vyzvednutím na okolní úroveň. To je možné provést automatickým modulem v prostředí Idrisi32.

Takto získaná vrstva DMT je v dalších krocích podkladem pro stanovení vrstvy faktoru sklonu a délky svahu LS, dále pak pro analýzu odtokových drah v rámci povodí, hledání nejnižších a nejvyšších bodů na rozvodnicích i pro grafickou prezentaci. Je zřejmé, že se jedná o velmi důležitý podklad, kterému je třeba věnovat mimořádnou pozornost.

3.2.2.2 Úprava DMT filtrací – vliv jednotlivých algoritmů nabízených IRDISI32

Filtrace – tedy plošná úprava vedoucí k odstranění nežádoucích elementů povrchu je jednou ze základních požadovaných úprav při tvorbě DMT – vede k zvýšení kvality následných výpočtů.

Jak bylo několikrát zdůrazněno, DMT je podkladem pro výpočet faktoru sklonu a délky svahu (a ten svou hodnotou do značné míry determinuje výslednou hodnotu ztráty půdy), a pro výpočet zdrojových ploch odtoku.

Obě tyto procedury jsou ovlivnitelné náhlými lomy povrchu, které neodpovídají skutečnému terénu a jsou způsobeny chybami při tvorbě DMT (digitalizaci mapy, rastrování i interpolaci z vrstevnic aj.). Prohlubně a terénní skoky jsou potom zdrojem neúměrně vysokých hodnot LS, což bylo potvrzeno při porovnávání takovýchto míst s DMT.

Sami autoři morfologických software USLE2D a Watem/SEDEM doporučují upravit DMT vyhlazením (Desmet&Govers 1996a). Sami používají jednou aplikované vyhlazení filtrem MEAN na matici 3×3.

Software IDRISI32 nabízí řadu filtrů, ze kterých dva typy jsou použitelné pro úpravy povrchu. Jsou to:

- MEAN filtr - na matici 3×3, 5×5, 7×7 (nebo větší volitelné matici elementů)
- Gaussian filtr na matici 5×5 nebo 7×7 elementů. (případně uživatelem definovaný)

MEAN filtry provádějí prosté vyhlazení převáděním všech hodnot dané matice na jejich aritmetický průměr. Pro MEAN filtr 3×3 je to např.

1/9 1/9 1/9

1/9 1/9 1/9

1/9 1/9 1/9

z celkové sumy hodnot ve všech buňkách matice.

Gaussian filtry provádějí vyhlazení, při kterém hodnoty uvnitř matice jsou distribuovány podle normálního rozdělení (Gaussovy křivky). Tím jsou teoreticky méně potlačována lokální minima (maxima) a je zachováno vyšší zakřivení. Pro Gaussian filtr 5×5 je to např.

1/121	2/121	3/121	2/121	1/121
2/121	7/121	11/121	7/121	2/121
3/121	11/121	17/121	11/121	3/121
2/121	7/121	11/121	7/121	2/121
1/121	2/121	3/121	2/121	1/121

z celkové sumy hodnot ve všech buňkách matice.

Zde je dále zkoumán **vliv jednotlivých filtrů na odstranění nerovnoměrností DMT** a na podíl extrémně vysokých hodnot LS počítaných pomocí USLE2D.

V rámci případové studie (Krása, 1999) byl nejprve vliv na odstranění nerovnoměrností DMT v rozlišení 25 metrů zkoumán vizuálně. Zde je zřetelně patrné, že upravené DMT jsou méně kontrastní s jemnými přechody mezi výškovými rozdíly. Po podrobném rozboru několika míst byla pro grafické srovnání vybrána malá oblast s výraznými terénními schody a prohlubněmi v původním DMT. Stejná oblast bude použita i pro porovnání vlivu na množství extrémně vysokých hodnot LS. Barevná paleta byla přizpůsobena tak, aby místa nerovností byla co nejlépe lokalizována. Výsledek grafického srovnání je na (**Obr. 3.2.2–5**). Je také vidět, že při použití filtrů s většími maticemi je vyhlazení důkladnější, při použití MEAN filtru 7×7 je zcela odstraněna i poměrně rozlehlá sníženina na jihozápadě snímku. To už je zřejmě příliš důkladné odstranění lokálních extrémů reálné krajiny. Gaussian filtry víc podporují místní zakřivení a ponechání strmějších svahů, což je vidět na užších „přechodových pásech“. Hlavní problém – odstranění jednotlivých buněk nepřirozeně vyvýšených nebo propadlých – se podařilo odstranit při použití každého z filtrů. Celkově se výškové parametry území (dno údolí, svahy i hřeben) po použití filtrů téměř nezměnily.

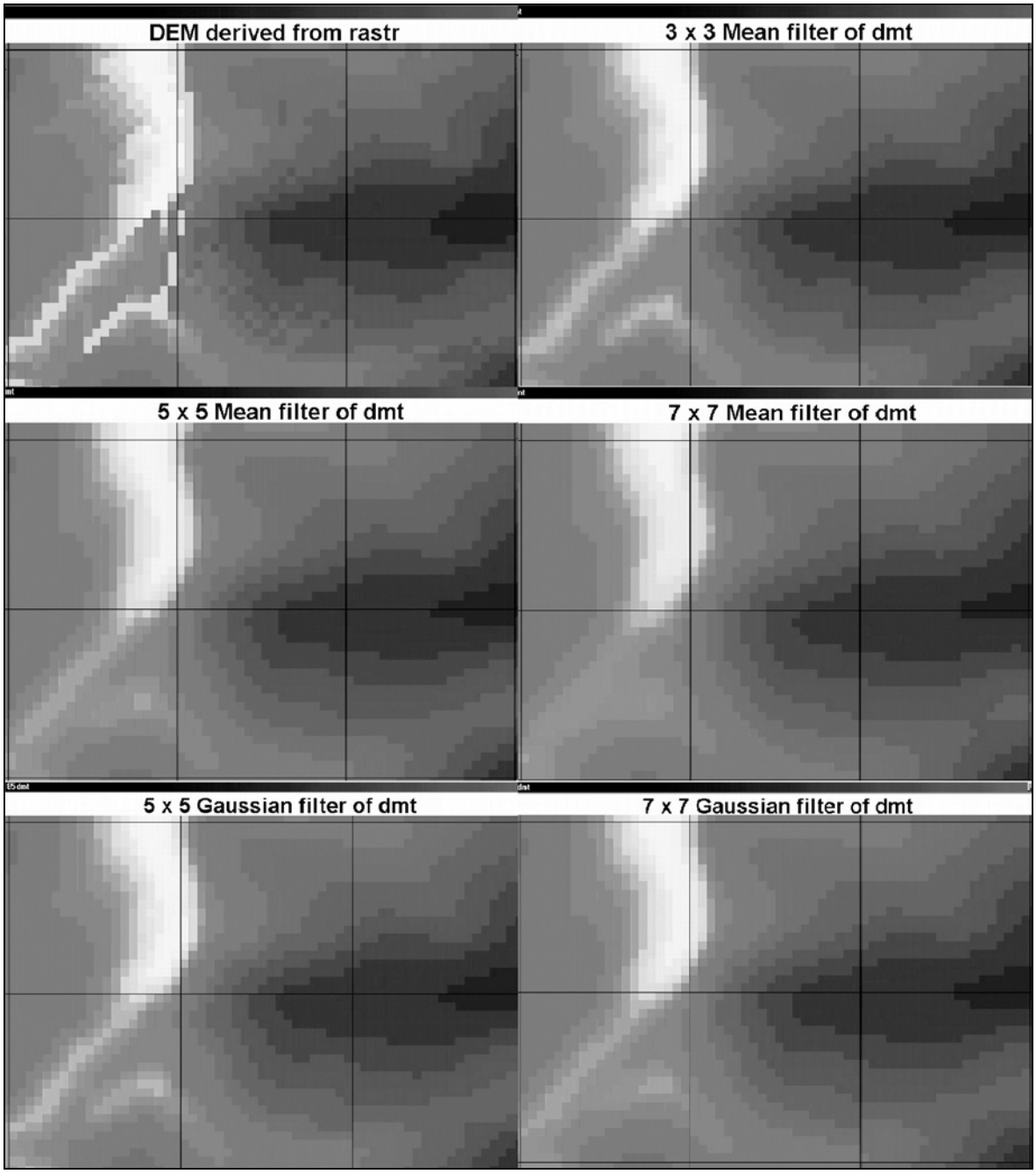
Dále je třeba zhodnotit **vliv jednotlivých filtrů na dosahované hodnoty LS faktoru**. Pro analýzy prováděné za účelem výběru vhodného filtru byly všechny upravené soubory DMT (5 typů filtrů) postupně dosazeny jako vstupní vrstvy DMT do programu USLE2D. Přitom byly zkoumány dva důsledky použití filtrů na úpravu DMT:

- Vliv na celkové hodnoty ztráty půdy z povodí (tedy na celkovou změnu všech LS hodnot)
- Vliv na extrémní hodnoty LS (obvykle nereálné a chybné)

Pro porovnání **vlivu na celkové hodnoty ztráty půdy z povodí** byly na základě předchozích analýz (Krása, 1999) vybrány dvě rovnice výpočtu LS z nabídky programu:

- Wischmeier&Smith 1978 – reprezentant vyváženého přístupu s průměrným množstvím vysokých hodnot LS
- Govers 1991 – reprezentant způsobu výpočtu podporujícího velké množství vysokých hodnot (předpoklad zvýšené rýhové eroze)

Obr. 3.2.2–5: Porovnání vlivu filtrů na odstranění nerovností z DMT. Na prvním obrázku jsou zřetelně vidět světlejší terénní prohlubně o velikosti 1 nebo několika pixelů. Vzdálenost linií souřadnicové sítě je 500 m. Výškový rozsah území je od 410 do 479 m.n.m. – ukázka z povodí Sedlice.



Pro všechny upravené DMT, pro obě rovnice a pro všechny tři způsoby hledání směru povrchového odtoku byly vypočteny hodnoty LS faktoru na modelovém povodí Sedlického potoka.

Poznámka: Povodí Sedlického potoka leží v oblasti Českomoravské vrchoviny ve vzdálenosti cca 60 km jihovýchodně od Prahy a má plochu 85 km^2 (skládá se z č.h.p. 1-09-02-104, 1-09-02-105, 1-09-02-108). Sedlický potok je levostranným přítokem Želivky. Charakter krajiny je vrchovinný, nadmořská výška se pohybuje od 385 do 630 m.n.m. Jako podklad k vytvoření DMT a dalších vrstev GIS byla využita vodohospodářská mapa 1 : 50

000 (ML 23-11, 23-12). DMT je testován ve výsledném rozlišení 25 m. Zdrojové vrstvy a původní hodnota ztráty půdy jsou pro dále uvedená srovnání převzaty z (Krása, 1999).

Na základě takto vytvořených souborů byly dále vypočteny hodnoty celkové průměrné ztráty půdy z povodí Gpp. Tyto hodnoty byly potom porovnány s hodnotami Gpp získanými stejnými způsoby výpočtu pro původní neupravený DMT. Výsledek tohoto srovnání je uveden v (**Tabulka 3.2.2–1**) a v (**Obr. 3.2.2–5**).

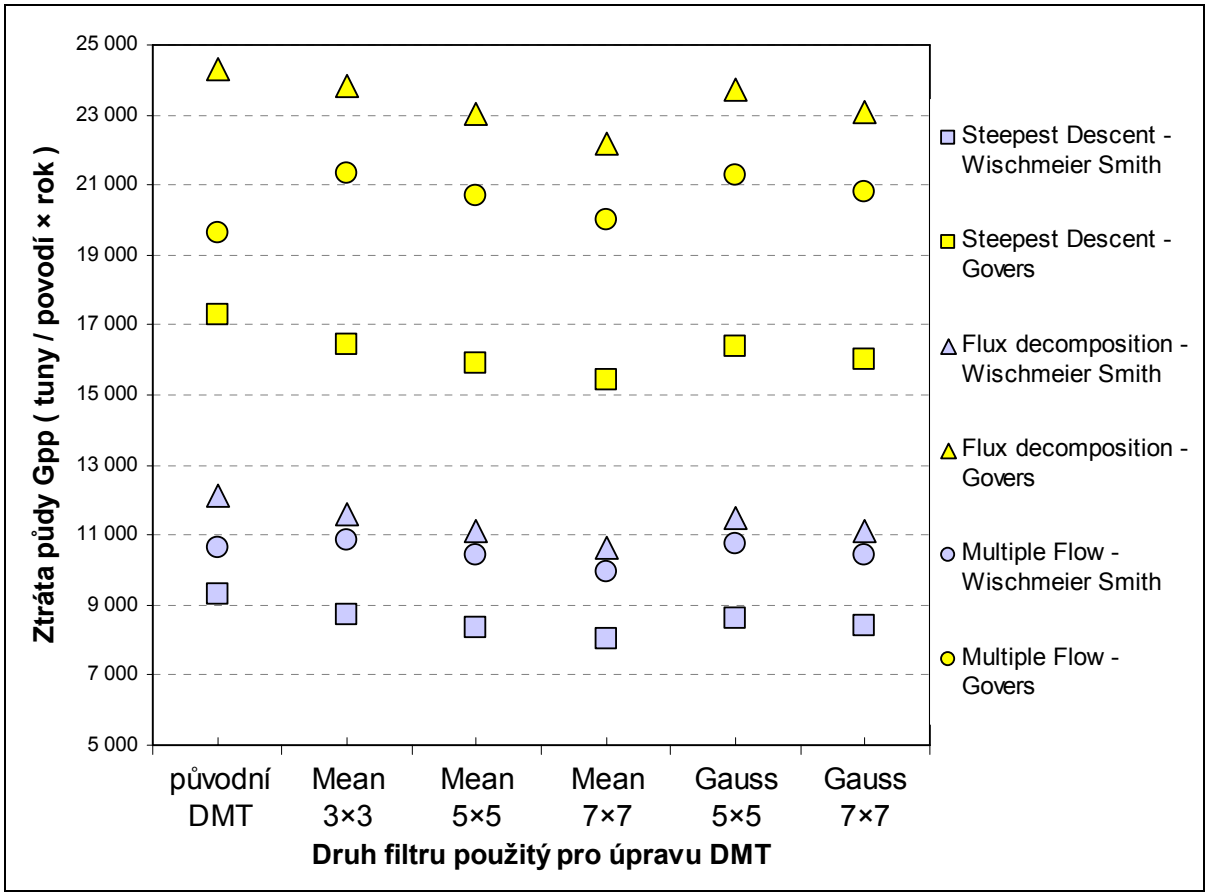
Tabulka 3.2.2–1: Srovnání celkových hodnot ztráty půdy Gpp pro informační vrstvy LS faktoru vytvořené pomocí USLE2D s dosazením DMT upravených v IDRISI pomocí filtrů.

Způsob hledání směru povrchového odtoku	Steepest Descent		Flux Decomposition		Multiple Flow	
Rovnice pro výpočet LS	Wischmeier Smith	Govers	Wischmeier Smith	Govers	Wischmeier Smith	Govers
Použitý filtr pro úpravu DMT	Hodnoty ztráty půdy Gpp (t / povodí × rok)					
Původní DMT	9 332	17 306	12 130	24 331	10 623	19 642
MEAN filtr 3×3	8 703	16 433	11 589	23 814	10 839	21 328
MEAN filtr 5×5	8 350	15 882	11 100	23 017	10 400	20 684
MEAN filtr 7×7	8 044	15 442	10 620	22 160	9 969	19 976
Gaussian filtr 5×5	8 625	16 362	11 483	23 701	10 754	21 280
Gaussian filtr 7×7	8 378	16 010	11 117	23 103	10 425	20 788

Z uvedených srovnání (**Tabulka 3.2.2–1**, **Obr. 3.2.2–6**) vyplývá několik poznatků.

- Při použití všech filtrů nedochází k razantním změnám oproti neupravenému DMT, ale jisté změny výsledků jsou patrné.
- Pro „Steepest Descent“ a „Flux Decomposition“ dochází při použití všech filtrů k mírnému snížení celkových hodnot Gpp. Vztahy mezi velikostmi Gpp při použití jednotlivých filtrů jsou pro oba způsoby stejné.
- Pro „Multiple Flow“ dochází naopak k mírnému nárůstu hodnot Gpp po použití filtru, vztahy mezi velikostmi Gpp při použití jednotlivých filtrů jsou potom naprosto stejné jako pro oba předchozí způsoby hledání směru odtoku.
- Téměř pro všechny způsoby výpočtu je původním hodnotám Gpp pro neupravený DMT nejblíže MEAN filtr 3×3. To je zřejmě dáno tím, že tento filtr nejméně mění parametry DMT, neboť přepočítává hodnoty v nejmenší matici. Pouze při použití „Multiple Flow“ a 4.rovnice (Govers 1991) dochází při použití tohoto filtru k výraznému zvýšení Gpp.
- Srovnatelné výsledky dává ještě Gaussian filtr 5×5 (zřejmě proto, že mění hodnoty sice na větší matici, ale podporuje zachování zakřivení povrchu), ovšem jeho hodnoty se s výjimkou „Multiple Flow“ blíží původnímu DMT o něco méně.

Obr. 3.2.2–6 Vliv úpravy DMT filtry na celkovou ztrátu půdy G z povodí v závislosti na použitém způsobu hledání směru odtoku a rovnici pro výpočet LS.



Na základě hodnocení vlivu na celkové hodnoty ztráty půdy a transportu sedimentu lze tedy doporučit filtr MEAN 3x3 jako nejméně modifikující. Nicméně i ostatní filtry jsou v případě potřeby použitelné.

Vliv filtrů na množství extrémních hodnot LS a závěrečné hodnocení:

Nejvhodnější pro úpravu DMT se zdá být MEAN filtr 3×3, ovšem je třeba provést ještě další srovnání. Především je třeba posoudit, zda filtry skutečně napomáhají odstranění extrémních hodnot LS. Protože MEAN filtr 3×3 vypadá nejpřijatelněji, byly pro další srovnávání doplněny ostatní soubory (LS faktory) pro tento filtr podle všech ostatních způsobů výpočtu. LS faktor byl tedy počítán podle:

- Wischmeier Smith (1978)
- McCool (1987, 1989)
- Govers (1991)
- Nearing (1997)

a všemi třemi způsoby hledání zdrojové plochy.

Pro srovnání počtu extrémních hodnot byly vytvořeny histogramy všech vytvořených souborů LS. Z histogramů pak byly sečteny všechny hodnoty větší než 30 (mez převzata – Dostál, 1998) a porovnán jejich počet. Výsledek srovnání je uveden v (**Tabulka 3.2.2–2**).

Poznámka: Při všech srovnáních a posuzování vlivu způsobů výpočtu na celkové hodnoty G_{pp} bylo vycházeno z předpokladu, že právě hodnoty LS faktoru mají zásadní vliv na absolutní hodnotu ztráty půdy. Zejména vysoké hodnoty G (větší než 30) jsou především působeny vysokými hodnotami LS (často se sobě téměř rovnají). Tato skutečnost vedla k úvaze, že převzatá mez G (> 30) jako nejvyšší reálná hodnota ztráty půdy (Dostál, 1998) byla aplikována i pro porovnávání hodnot LS. Zjednodušeně řečeno hodnoty LS faktoru větší než 30 způsobují většinu hodnot G > 30, a proto je třeba se jimi zabývat. ***Podle (Dostál a kol., 2001c) může LS faktor nabývat reálně maximálních hodnot cca65, přičemž to je již velmi neobvyklé, nicméně při nahromadění všech extrémních faktorů a vlivu chyb v DMT je při výpočtu pomocí USLE2D vždy u několika elementů dosahováno ještě vyšších hodnot. Je účelné tyto hodnoty nalézt a redukovat např. na maximální hodnotu LS = 65.***

Tabulka 3.2.2–2: Porovnání počtu hodnot LS faktoru vyšších než 30 pro výpočet na neupraveném DMT a na DMT upraveném pomocí filtrů.

Způsob výpočtu LS		Použitý filtr pro úpravu DMT					
		Původní DMT	MEAN 3×3	MEAN 5×5	MEAN 7×7	Gaussian 5×5	Gaussian 7×7
		Počet hodnot LS faktoru větších než 30 (pro povodí Sedlice)					
Steepest descent	Wischmeier Smith	59	12	9	6	13	8
	McCool	116	21				
	Govers	869	589	501	455	574	521
	Nearing	111	17				
Flux Decomp.	Wischmeier Smith	75	1	1	0	1	0
	McCool	130	9				
	Govers	1120	505	306	170	461	314
	Nearing	129	6				
Multiple Flow	Wischmeier Smith	65	2	0	0	1	0
	McCool	94	4				
	Govers	619	292	161	81	255	169
	Nearing	94	3				

Z tabulky (**Tabulka 3.2.2–2**) je zřetelně patrné, že počet extrémně vysokých hodnot LS je po úpravě DMT filtry výrazně redukován. To je dáno tím, že jsou odstraněny nepřirozené terénní lomy a prohlubně, které vyvolávaly vznik extrémních hodnot. Na základě tabulky lze konstatovat:

- Pro všechny způsoby výpočtu s výjimkou (Govers, 1991) je počet hodnot LS větších než 30 výrazně redukován, takže dále nejsou již hodnoty ztráty půdy ani v jednotlivých buňkách nadhodnocovány.
- Výpočet podle rovnice (Govers, 1991) přímo podporuje vznik extrémně vysokých hodnot LS, rovněž celkový výsledek (velmi vysoká hodnota) je na těchto

hodnotách založen, a proto ani filtry nelze tato čísla zcela eliminovat. Přesto je počet hodnot LS > 30 snížen i zde méně než na polovinu.

- Doposud nejvhodnější filtr MEAN 3×3 obstojí i v této charakteristice, neboť dostatečně eliminuje počet extrémně vysokých hodnot LS. Tento počet je redukován na minimum a maximální hodnota LS se po použití filtru rovněž výrazně snížila. **Proto lze MEAN filtr 3×3 k úpravě povrchu doporučit**. Ostatní intenzivnější filtry přinášejí další snížení počtu extrémních hodnot, ale ve srovnání se zásadním poklesem při použití nejméně násilného filtru MEAN 3x3 již není tento pokles příliš markantní. Obvykle proto není důvod k výraznější modifikaci terénu a aplikaci filtrů na větších maticích.
- Zvláště výrazně je redukován doposud velký počet vysokých hodnot LS, získaný při použití rovnice dle (McCool 1989) a (Nearing, 1997). Pro „Flux Decomposition“ a „Multiple Flow“ je snížen o více než 95%. Rovnice (McCool, 1989) je doporučována jako nejvhodnější při použití modelu Watem/SEDEM (VanRompaey et. al, 2001).
- Obecně platí nejméně jsou redukovány extrémy pro „Steepest Descent“. Přestože ostatní dva způsoby hledání směru odtoku původně produkovaly více extrémních hodnot, nyní je více extrémů při použití „Steepest Descent“. To lépe odpovídá faktu, že Steepest Descent neumožňuje rozdělení (divergenci) odtoku a podporuje tak vznik maximálních hodnot LS i na DMT bez chybových míst.
- Co se týká umístění extrémních hodnot, to se po aplikaci filtrů nemění, pouze je odstraněno náhodné roztroušení extrémů (chyby v DMT), a zůstávají jen skutečné vysoké hodnoty LS.

3.3 Land Cover - kategorie povrchu, využití půdy, vegetace

Tématická mapa Land Cover (využití území a stav vegetace) je jedním z hlavních podkladů pro stanovení erozní ohroženosti a popis transportních procesů. Při současných výpočtech pomocí USLE nebo Watem/SEDEM je zadáván dlouhodobý stav – např. osevní postup v daném roce. Doposud nejsou zohledňovány proměny rostlinného krytu (vegetační stav) v kratších obdobích (tento vliv, metodicky zahrnutý již v rovnici RUSLE, je jeden z možných námětů pro podrobnější další výzkum).

Mapa Land Cover je podkladem např. pro následující vrstvy:

- Mapa faktoru ochranného stavu vegetace C (viz. Kapitola 2.1.3.2)
- Mapa pozemků pro stanovení faktoru délky a sklonu svahu LS (viz. Kapitola 2.1.3.3)
- Podklad pro stanovení mapy odtokových charakteristik CN (viz. Kapitola 2.1.4)
- Mapa pozemků pro nalezení zdrojových ploch v modelu Watem/SEDEM (viz. Kapitola 2.2.4)
- Podklad pro mapy vodních toků a vodních nádrží v modelu Watem/SEDEM (viz. Kapitola 2.2.4)

Tuto tématickou vrstvu je možno získat v zásadě trojím způsobem:

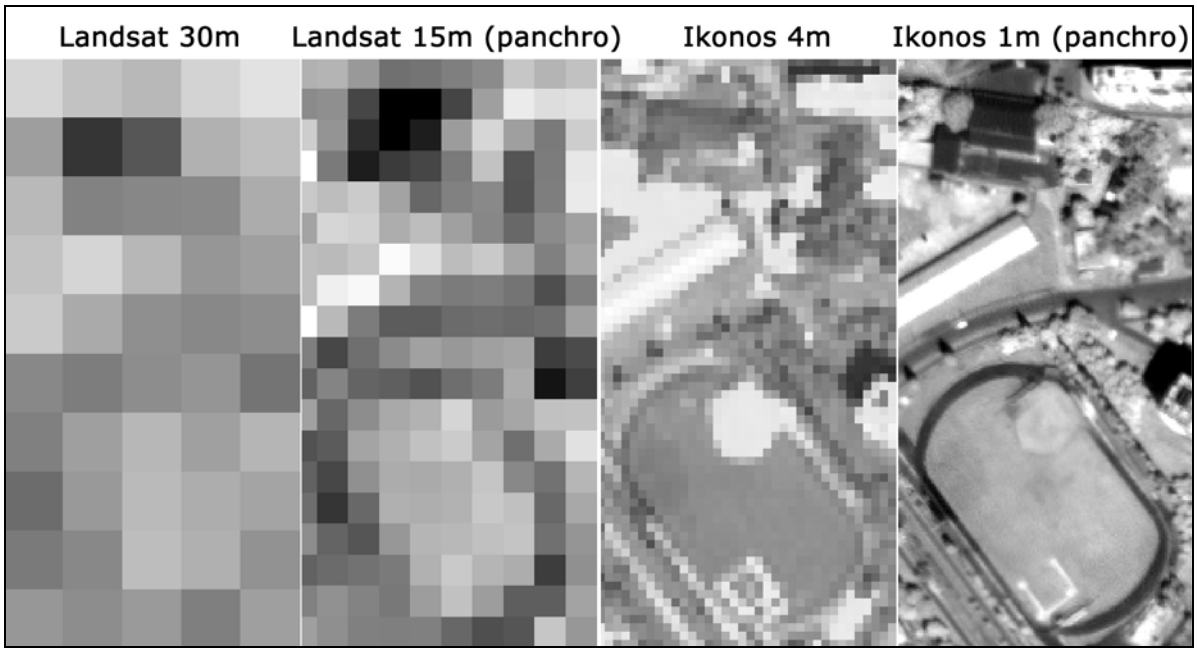
- Digitalizací pozemků nad vhodnou mapou nebo převzetím z digitální mapové databáze (např. CORINE Land Cover, nebo DMÚ25) a přiřazením plodin pozemkům na základě konkrétních osevních postupů získaných průzkumem, nebo od hospodařících subjektů.
- Ruční digitalizací pozemků nad leteckým snímkem (např. ortofotomapa poskytovaná ZABAGED apod.) – rozpoznání plodin je velmi obtížné, obvykle je třeba rovněž zjistit přesný osevní postup.
- Automatickou klasifikací dat DPZ (např. rektifikovaných snímků Landsat TM) ve spolupráci s terénním průzkumem, případně získáním konkrétního osevního postupu ze snímaného období.

Zde je třeba poznamenat, že postupy vyžadující ruční digitalizaci všech pozemků s přiřazením vegetačního pokryvu jsou zpravidla pro rozsáhlá území příliš pracné a časově náročné. Pouhé převzetí mapové databáze obvykle není možné, neboť tyto databáze nezahrnují definici povrchového pokryvu v dostatečné podrobnosti (alespoň rozlišení TTP, orná-obilniny, orná širokořádkové plodiny, pícniny, apod.) Jedním z nejvhodnějších postupů se proto jeví využití družicových snímků, které díky zachycení širokého spektra (tedy i oblast infračerveného záření dobře indikující vegetační pokryv) umožňují lépe rozlišit potřebné kategorie povrchu.

3.3.1 Snímky DPZ jako zdroj pro vytvoření mapy Land Cover

3.3.1.1 Obecné pojednání o datech DPZ

Obr. 3.3.1–1 Porovnání podrobnosti družicových snímků skeneru Landsat ETM+ a snímků družice Ikonos s vysokým rozlišením (panchromatické pásmo s rozlišením 1m odpovídá již podrobností leteckým snímkům) – shodný výřez, Chomutov.



Dálkový průzkum Země je disciplina používaná již 40 let, ale v civilní a vědecké oblasti zaznamenala tato metoda sběru dat bouřlivý rozvoj zejména v posledních 12 letech. Od počátku devadesátých let umožnil konec bipolárního vojenského vidění světa uvolnění satelitů a kvalitních dat civilním potřebám.

Při mapování zemského povrchu a získávání map využití území a vegetačního pokryvu hrála vždy nezastupitelnou úlohu letecká fotografie a fotogrammetrie. V prostředí GIS jsou pak zejména využívány již připravené a kvalitní ortofotomapy (ať již barevné nebo panchromatické), které jsou ze starší doby i z posledních let komerčně k dispozici pro celé území ČR v rozlišení cca 0,5 až 1 m. Tato data budou i nadále důležitá pro hodnocení erozních procesů na menších územích zejména díky tomuto vysokému rozlišení. Byť již existují družicová data s rozlišením podobným (americká QuickBird – 0,6 m), svou pořizovací cenou leteckým snímkům zdaleka nemohou konkurovat (jejich výhodou je naopak neustálá aktuálnost). Letecké snímky jsou vhodné také pro porovnání kvality vyhodnocených pozemků z družicových snímků horšího rozlišení (**Obr. 3.3.1–1**).

Jak již bylo zmíněno prostorové rozlišení skenerů DPZ se neustále zvyšuje a činí tak data stále atraktivnějšími, ale hlavní výhodou pro vyhodnocování (při potřebě odlišení vegetačních kategorií) je vysoké rozlišení spektrální. Zejména znalost odrazivosti v infračervené (neviditelné – a na leteckých snímcích zpravidla nezachycené) oblasti spektra dovoluje s úspěchem využít metod automatické klasifikace. Vysoké prostorové rozlišení přitom nemusí být pro hodnocení rozlehlých území vždy výhodou. Jednak jsou data s vysokým rozlišením objemná a proto náročná na zpracování (zejména pro složitější operace) a jednak vysoké rozlišení způsobuje větší rozdrobenost (spektrální roztříštěnost na ploše jež má zastupovat jedinou kategorii, např. les) a proto je automatická klasifikace obtížně realizovatelná. Zde se jako velmi vhodné pro klasifikaci ukázaly snímky z družice Landsat resp. jejího skeneru Landsat TM.

3.3.1.2 Snímky z Landsat TM a Landsat ETM+

Americké civilní družice typu Landsat (generace 1 – 5) mapují zemský povrch již od roku 1972. Do roku 1983 byl používán skener Landsat MSS s rozlišením 79 metrů na zemském povrchu ve 4 spektrálních pásmech (+tepelné záření). Od roku 1983 (Landsat 4 – 5) je používán skener Thematic Mapper (TM) s rozlišením 30m v 6 spektrálních pásmech (navíc tepelné) a nejnověji (Landsat 7 – 1998) skener ETM+ (Enhanced TM), který zachovává tuto podrobnost a navíc mapuje scénu panchromaticky v rozlišení 15 metrů a umožňuje tak zpřesnění záznamu.

Spektrální rozsah záznamu v jednotlivých kanálech (**Obr. 3.3.1–2**) skeneru Landsat TM je následující (**Tabulka 3.3.1–1**)

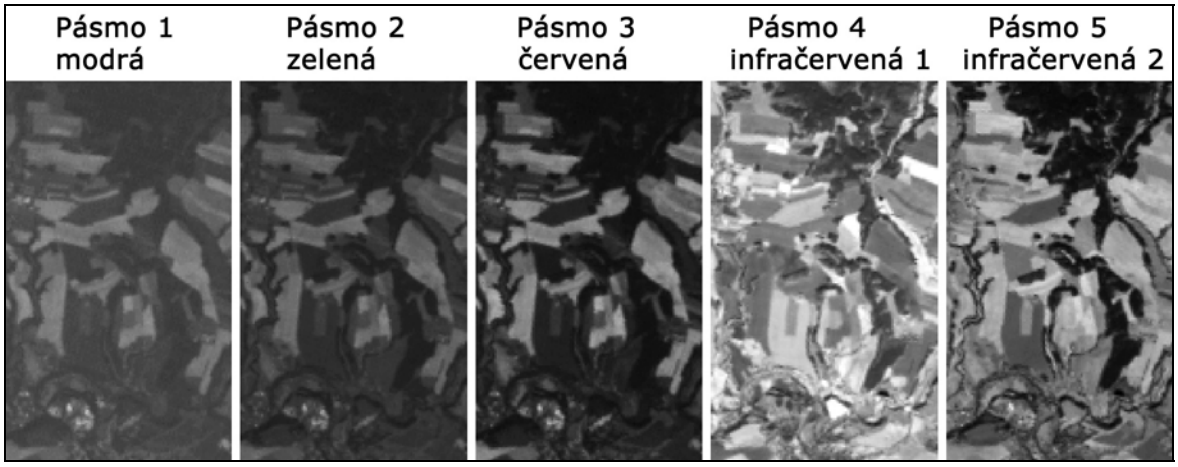
Díky tomuto vysokému spektrálnímu rozsahu i citlivosti jednotlivých čidel na poměrné úzké a neprotínající se spektrální oblasti jsou scénu ze skeneru Landsat TM pro klasifikaci zemského povrchu velmi vhodné. Zejména kombinace pásem 3, 4 a 5 (resp. 453) umožňuje díky pásmu (5) z blízké infračervené oblasti dobře zachytit změny vegetačního pokryvu, jeho odrazivost je v tomto pásmu mnohem vyšší, než je tomu u ostatních typů povrchu. Této změny odrazivosti se využívá při vytvoření samostatné vrstvy tzv. vegetačního indexu i při výběru trénovacích ploch a automatické klasifikaci.

Rozlišení 30 m je postačující ke spolehlivému zachycení ploch o velikosti cca 1 ha, ale neumožňuje automaticky rozlišit úzké liniové prvky (silnice a cesty) a stavební objekty. Ty svou homogenně odrazivou plochou odpovídají maximálně velikosti několika pixelů a odrazivost takové oblasti (obecně intravilánu) je proto velmi roztříštěná a nehomogenní. Tyto plochy (i ostatní detaily) je tedy třeba získávat z jiných podrobnějších zdrojů.

Tabulka 3.3.1–1: Spektrální rozsah skeneru Landsat TM a ETM+ (Pásmo 8 pouze skener ETM+) (Pavelka, 1998):

Pásmo	Spektrální rozsah (µm)	Rozlišovací schopnost (m)	Oblast spektra	Typ záření
1	0,45 – 0,52	30	modrá (B)	viditelné
2	0,52 – 0,60	30	zelená (G)	
3	0,63 – 0,69	30	červená (R)	
4	0,76 – 0,90	30	IR1	Infračervené (neviditelné)
5	1,55 – 1,75	30	IR2	
7	2,08 – 2,35	30	IR3	
6	10,4 – 12,5	120	tepelné	
8	0,45 – 0,90	15	panchromatický snímek	viditelné

Obr. 3.3.1–2 Ukázka různé odrazivosti dané scény v jednotlivých spektrálních pásmech skeneru Landsat ETM+. Za povšimnutí stojí odlišná odrazivost a lepší spektrálně rozlišovací schopnost infračervených pásem (výřez z povodí Rokytenky v Orlických horách).



3.3.2 Klasifikace

Na katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství je k dispozici několik GIS software používaných k modelování erozní problematiky i přípravě vstupních dat. Idrisi32 obsahují již nástroje využitelné a vhodné pro automatickou klasifikaci dat DPZ v plném rozsahu. Nicméně mnohem vhodnějším nástrojem pro klasifikaci je GIS soubor produktů PCI Easy/Pace. V tomto programu je kvalitněji a uživatelsky lépe ošetřena příprava trénovacích množin, veškeré operace se soubory, a kontrolní mechanizmy. Rovněž okamžité průběžné náhledy výsledku klasifikace usnadňují celý proces. Pro klasifikaci rozsáhlých území je tedy využití tohoto nástroje vhodnější.

3.3.2.1 Získávané kategorie využití území

Účelem je získání co největšího spolehlivého rozlišení jednotlivých osevních postupů na zemědělské půdě a pro doplnění mapy základních ostatních kategorií povrchu.

Jedná se zejména o následující kategorie:

- Zastavěné plochy
  - Intravilán
  - Průmyslové plochy
  - Doly
- Vodní plochy a vodní toky
- Silniční síť
- Lesy
  - Vzrostlé lesní porosty
  - Nízké a nevyvinuté porosty
- Zemědělská půda
  - TTP – trvalé louky
    - Nesečené
    - Upravené a obhospodařované
  - Orná půda
    - Pícniny a jiné úzkořádkové plodiny (netrvalé louky)
    - Obilniny
      - Ozimé
      - Jarní
    - Kukuřice
    - Brambory
    - Ostatní širokořádkové plodiny (cukrovka, ..)

Cílem je získat co největší množství daných kategorií v maximální možné podrobnosti. V některých případech není možné této podrobnosti dosáhnout (neznáme osevní postup, nelze provést terénní průzkum ve vhodném období ...). Pro řešení protierozní problematiky je klíčové rozlišení TTP, lesa, orné půdy s obilninami a orné půdy s širokořádkovými plodinami. To jsou základní kategorie, které je třeba získat alespoň v omezené kvalitě.

3.3.2.2 Postup vyhodnocení snímku Landsat TM (ETM+)

Celý proces vytvoření mapy využití území lze rozdělit na fázi rektifikace snímku a jeho klasifikaci (spolu s následnými úpravami – dokončení mapy C faktoru pro výpočet tvorby eroze).

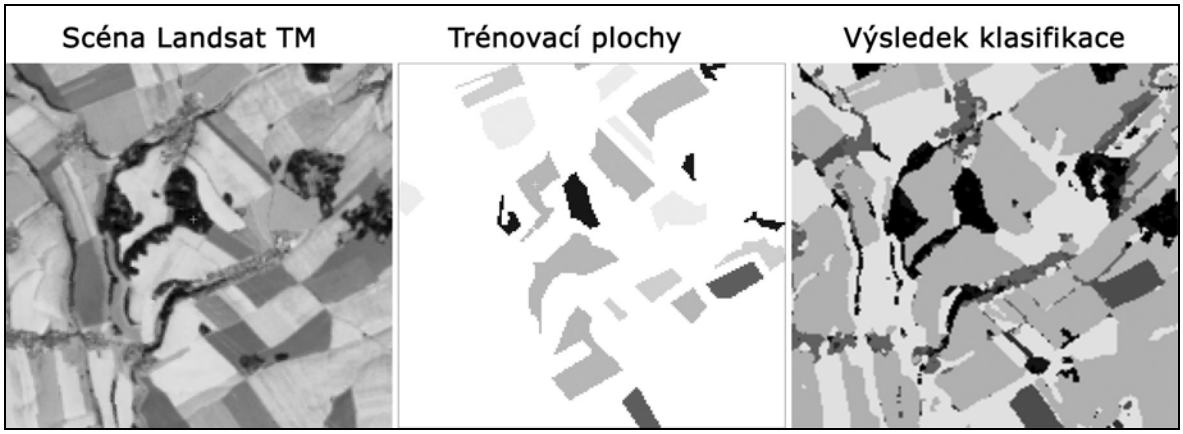
Jako vhodnější alternativa se často ukazuje opačný postup – rektifikovat až závěrečný vyhodnocený rastr se získanými kategoriemi land-use a neznehodnocovat tak před procesem automatické klasifikace kvalitu a prostorovou návaznost jednotlivých spektrálních pásem. I tak ovšem zůstává problémem převzorkování snímku a zborcení vyhodnocených linií. Nejsnazší se zde ukazují dvě pomocná řešení:

- Převzorkování vyhodnocené mapy na podrobnější rastr před rektifikací (dochází k menšímu posunu pixelů při transformaci).
- Převod jednotlivých kategorií do vektoru před rektifikací. Zde může být problematická vektorizace příliš mnoha detailních tříd a vznik neúměrně objemných vektorových dat v případě řešení rozsáhlých území.

Samotné vyhodnocení scény probíhá v několika krocích (Krása, 2002) – **Obr. 3.3.2–1**:

1. Rektifikace pomocných vektorových vrstev – komunikací a hranic mapových listů z vektorové databáze (např. DMÚ 25) do snímku.
2. Tisk scény v nepravých barvách pro pomocné přibližné rozlišení hlavních tříd (hranice vegetace, intravilán, vodní plochy, …)
3. Terénní průzkum a záznam skutečných typů povrchu, aktuálního stavu zemědělských prací, vzrůstu vegetace a rozdílů vůči topografické mapě 1:25000. Veškeré informace získané terénním průzkumem v povodí je třeba popsat a vyznačit v mapě (případně ve vytištěné scéně družicového snímku).
4. Následuje pečlivé vyznačení trénovacích ploch (rozlišení cca 20 – 30 typů povrchu) při vhodném zobrazení spektrálních pásem (RGB=453).
5. Kontrola trénovacích ploch pomocí grafického zobrazení spektrálních elips v příznakovém prostoru a dalších metod. Postupné zkvalitňování trénovacích ploch na základě jejich analýzy (omezení prolínání jejich spektrálního rozsahu).
6. Definitivní automatická klasifikace s využitím algoritmu „maximum likelihood“.

Obr. 3.3.2–1 Scéna Landsat TM, trénovací množiny a výsledná mapa kategorií území.



Konečně je třeba ručně klasifikovat (digitalizovat) plochy nerozlišitelné automatickou klasifikací - zejména plochy intravilánu a průmyslové zóny. Zde je možno si vypomoci vektorovou mapovou databází intravilánu (např. ZABAGED nebo DMÚ25) nebo leteckou ortofotomapou.

Aby výsledná vrstva byla dobře využitelná v analytických úlohách, zde konkrétně při řešení erozní problematiky, je zpravidla třeba ji vhodným způsobem zjednodušit. Je výhodné provést sloučení některých tříd (různé kategorie lesa, orné půdy apod.) tak, aby u jednotlivých kategorií byly získány souvislé plochy potřebné velikosti. Dále může být provedeno odstranění (vyhlazení) izolovaných pixelů pomocí vhodných filtrů (filtrace typu MODE apod.)

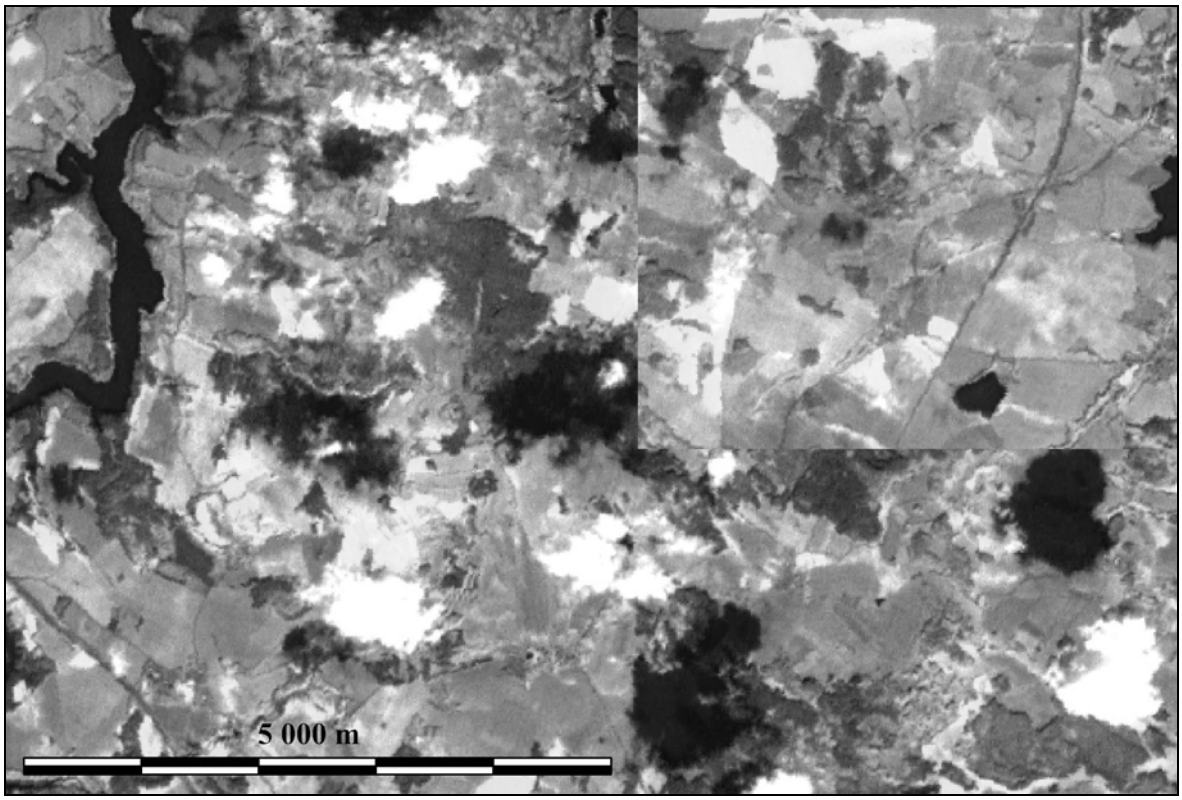
Na závěr je třeba vyhodnocenou mapu (jak bylo uvedeno výše) správně georeferencovat, případně převzorkovat tak, aby byla využitelná v návaznosti na ostatní používané rastrové vrstvy GIS (**Obr. 3.3.2–3**).

3.3.2.3 Poznámky a praktická doporučení

Postup popisoval vyhodnocení území ze snímku v letním období. Nejvhodnější pro vyhodnocení je zřejmě scéna z počátku léta (červen-červenec), kdy je zeleň vzrostlá a jednotlivé kategorie zemědělských pozemků jsou snadno rozlišitelné. Vhodné může být

také období po sklizni (září). V každém případě by klasifikace měla být provázena terénním průzkumem – nejlépe ve stejném období, kdy je scéna pořizována.

Obr. 3.3.2–2 Znehodnocení družicové scény vysokou a rozptýlenou oblačností a jejími stíny.



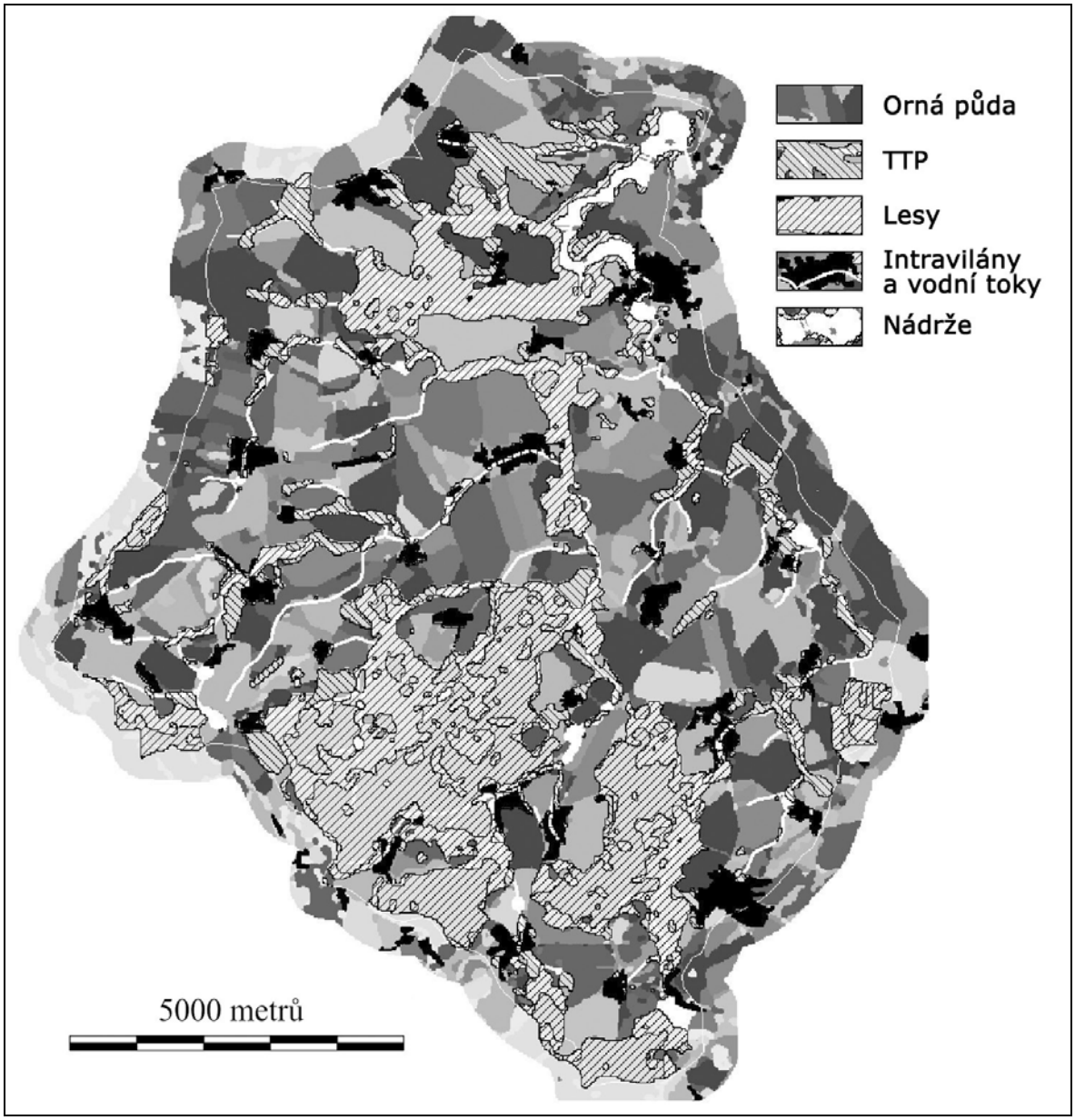
Nejsnadnější úlohou je odlišení kategorií lesa, vodních ploch, a kulturních plodin s vysokým a homogenním podílem zeleně (cukrovka, kukuřice, …), tyto třídy je možno vhodným výběrem trénovacích ploch získat v celé šíři a spolehlivě izolované (díky jejich homogenní odrazivosti). Největší problémy nastávají při rozlišení řídce porostlých luk od strnišť, a také zachování konzistence půdních celků orné půdy. Zejména holá ornice se velmi liší svou odrazivostí v závislosti na půdní vlhkosti. Zde je nutno klasifikovat pole do několika tříd (i v rámci např. jednoho nevelkého pozemku) a získané třídy potom sloučit pro získání odpovídajících půdních celků. I přes to nebývá automatická klasifikace pro tyto třídy stoprocentně úspěšná.

Vážným problémem družic využívajících viditelného spektra záření je oblačnost. Při výběru požadovaných scén před nákupem je třeba pečlivě kontrolovat případnou oblačnost snímků, která může zamezit jejich vyhodnocení v určitých oblastech, a při nedostatečné kontrole znehodnotit výsledek klasifikace (**Obr. 3.3.2–2**). Oblasti zakryté oblačností a ovlivněné jejími stíny nejsou klasifikovatelné automatickou procedurou.

Některé početní operace pro které je výsledná vrstva určena, vyžadují ještě větší sdružování tříd i za cenu ztráty řady skutečných hraničních linií. Samostatnou kapitolou je potom získání hranic intravilánu, zanesení vodních toků, liniových staveb (silnic) apod. Tyto třídy je problém ze snímku získat běžnou klasifikací. Všechny tyto třídy jsou tedy tvořeny manuálně na základě vektorových digitálních map, leteckých snímků nebo jiných zdrojů. Zde je důležité dbát zejména na správnou georeferenci a pečlivě kontrolovat umístění těchto „dodatečných“ tříd.

Při kontrole konkrétní klasifikace v povodí Orlice (cca 2000 km^2) byla prokázána dostatečná shoda získaných tříd s topografickou mapou 1:25 000, která byla používána při terénním průzkumu a jako pomocný podklad pro vyhodnocování.

Obr. 3.3.2–3 Výsledná mapa využití území na základě Landsat TM a letecké ortofotomapy v povodí Vrchlice.



Na závěr je možno konstatovat, že při testování na katedře hydromeliorací a krajinného inženýrství se prokázalo, že při analýze větších územních celků (v řádu 10^2 – 10^3 km^2) jsou družicové snímky Landsat TM vhodným podkladem pro získání mapy využití území za účelem hodnocení krajiny, zde konkrétně určení erozní ohroženosti,. Ocenit lze zejména úroveň dosažené podrobnosti (spolehlivé zachycení ploch velikosti cca do 1 ha, při rozlišení 30 m), územní přesnosti (maximální posun v rámci 1 pixelu) a zejména aktuálnost podkladu. Výhodou tvůrce finální vrstvy je možnost kontrolovat proces vyhodnocení a volit jednotlivé kategorie na základě vlastních potřeb a poznatků z terénního průzkumu.

V budoucnu je předpoklad snazšího využití dalších družic vysokého rozlišení a zlepšení kvality dosahovaných výsledků.

3.4 Půdní data

Půdní mapy jsou rovněž důležitým podkladem při řešení erozní problematiky. Při použití empirických modelů jsou podkladem pro dvě základní používané vrstvy:

- Mapa hodnot faktoru erodovatelnosti půdy K (kapitola 2.1.3.2)
- Mapa hodnot součinitele odtoku CN (kapitola 2.1.4)

Při vytvoření mapy K faktoru je možno postupovat třemi způsoby:

- Na základě dostupných půdních map provést odběr vzorků jednotlivých půd řešeného povodí. Ze vzorků je třeba získat o půdách v hodnoceném území řadu informací a konkrétní hodnoty K faktoru stanovit na základě nomogramu
- Spolehnout se na již odvozené hodnoty K faktoru pro u nás se vyskytující půdy. Převodní tabulka ve formě „hlavní půdní jednotka BPEJ → K“ je zpracována ve VÚMOP Praha (Janeček a kol., 1992). Předpokladem tohoto postupu je ovšem získání mapy hlavních půdních jednotek BPEJ.
- Využít vztahu (2.1.2–6) podle (Römkens et al. 1986) pro stanovení K faktoru na základě zrnitostního složení – viz. kapitola 2.1.2.3). Tento vztah však dosud nebyl v podmínkách ČR využit ani verifikován.

Pro stanovení součinitele odtoku CN je třeba znát tzv. hydrologickou skupinu půd v hodnoceném území. Ta je charakterizována zrnitostním složením půd, tedy půdní texturou, případně půdními druhy.

3.4.1 Mapové databáze o půdě v ČR

V průběhu studia jsem měl možnost se seznámit pouze se dvěma dostupnými databázemi, v nichž jsou zpracovány půdní mapy v digitální podobě. Obě tyto databáze by měly být k dispozici pro celé území ČR.

1. mapa BPEJ – dle SMO 1:5000
2. mapa KPP – 1:200 000

Podle dostupných informací je nyní připravována nová mapová databáze jež by stávající mohla kvalitně doplnit (www.nature.cz/pudmap.htm – AOPK ČR):

3. Půdní mapy 1:50 000 – připravuje AOPK ČR, úsek Brno.

3.4.1.1 Vektorová mapová databáze BPEJ

Jedná se o mapovou databázi zpracovanou pro celé území ČR ve Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půd (VÚMOP Praha) (www.vumop.cz).

Bonitační půdně ekologické jednotky (BPEJ) byly vytvořeny pro hodnocení kvality zemědělského půdního fondu a ekonomické oceňování půd. Jsou stanoveny vyhláškou Ministerstva zemědělství čísla 327/1998 Sb. podle zákona o pozemkových úpravách a

pozemkových úřadech (ve znění zákona č. 38/1993 Sb. a zákona č. 217/1997 Sb.). Tyto jednotky jsou převzaty z předchozích zákonných úprav a k hodnocení půdy v ČR se používají již desítky let.

Pětimístný kód BPEJ charakterizuje především produkční vlastnosti půd - pro hodnocení z hlediska zemědělské výroby. Jeho schéma je následující:

12345, kde

1 *klimatický region (0 – 9); klimatický region zahrnuje území s přibližně shodnými klimatickými podmínkami pro růst a vývoj zemědělských plodin*

23 *hlavní půdní jednotka (0 – 78); hlavní půdní jednotka (HPJ) je účelovým seskupením půdních forem příbuzných vlastností, jež jsou určovány genetickým půdním typem,subtypem, půdotvorným substrátem, zrnitostí, hloubkou půdy, stupněm hydromorfismu, popřípadě výraznou sklonitostí nebo morfologií terénu a zúrodňovacím opatřením*

4 *kombinace sklonitosti pozemku a expozice ke světovým stranám (0 – 9)*

5 *kombinace hloubky půdy a skeletovitosti (0 – 9+); skeletovitostí se rozumí podíl obsahu štěrku a kamene v ornici k obsahu štěrku a kamene v spodině do 60 cm.*

Digitalizace map BPEJ probíhá průběžně, nicméně podle tvrzení VÚMOP Praha je mapa k dispozici pro celé území ČR, přičemž je stále průběžně aktualizována a opravována.

Mapa je uložena v souřadném systému S-JTSK, a distribuována v běžných formátech, např. ArcView Shapefile.

Databáze neobsahuje žádné související nebo doplňující atributy, poskytována je obvykle pouze informace o vyžádaných částech kódu BPEJ. Pro potřeby empirických modelů se jedná zejména o hlavní půdní jednotku – 23 číslice kódu.

Výhodou je standardizovaný formát a všechny související informace v připojených databázích. Dále pak především to, že je zpracován přímý převodník mezi hlavní půdní jednotkou a hodnotou faktoru erodovatelnosti půdy K (Janeček a kol., 1992). Nevýhodou je obtížnější dostupnost těchto dat a chyby (chybějící polygony) vyskytující se v digitálních datech BPEJ.

Na základě hlavní půdní jednotky lze půdy z databáze členit (a ne zcela jednoznačně) pouze do 4 hydrologických skupin půd, a na základě nich odvozovat odtokové součinitele CN dle metodiky (Janeček a kol., 1992). V případě potřeby větší přesnosti je třeba provést terénní průzkum.

3.4.1.2 Vektorová mapová databáze KPP 1:200 000

Na České zemědělské univerzitě (ČZU) v Praze proběhla digitalizace mapy KPP, tedy jejího generelu v měřítku 1:200 000. Mapa je k dispozici ve formátu ArcView Shapefile a souřadném systému S-JTSK.

V databázi jsou zahrnuty vrstvy:

- Pudy (typy) – polygony s volitelnou tabulkou atributů půdních typů nebo zrnitosti
- Pudy (zrnitost) – polygony s tabulkou atributů zrnitosti
- Sidla – bodová vrstva sídel s atributy názvů a kategorizace dle velikosti

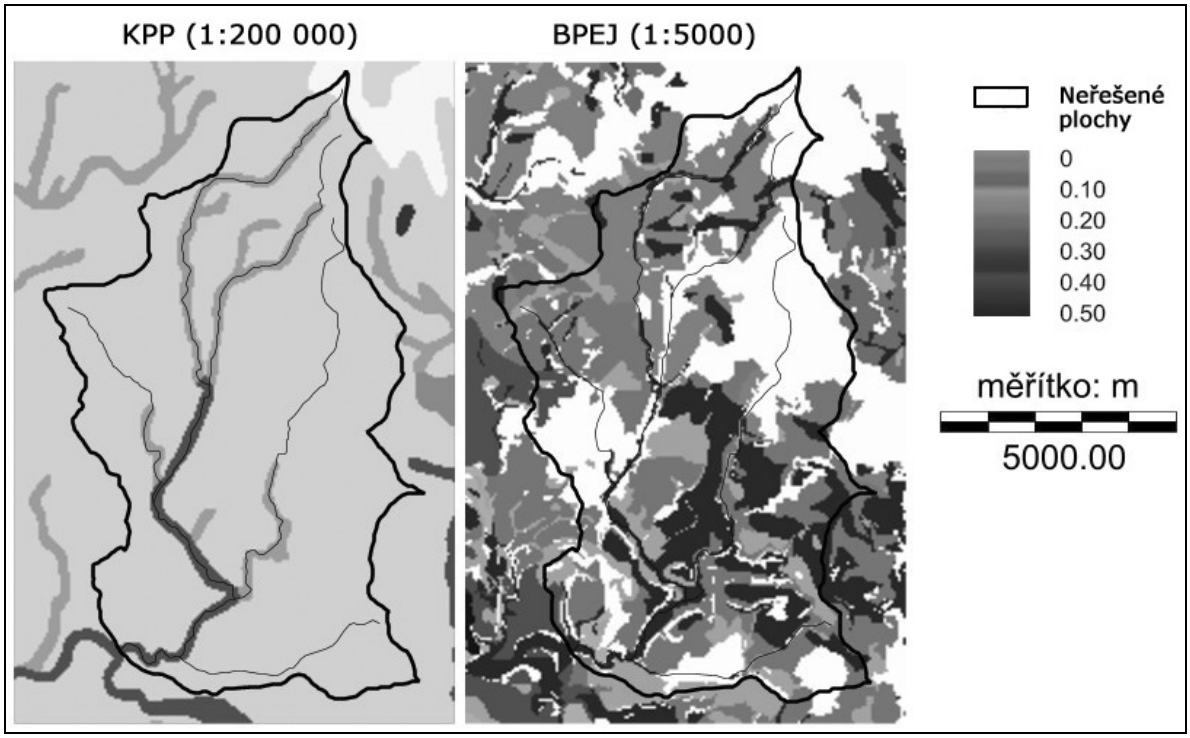
- Reky – liniová vrstva vodních toků a názvů

Databáze půd obsahuje 18 100 polygonů a shrnuje základní charakteristiky v tabulce následujících atributů:

- Půdní typy dle Morfogenetického klasifikačního systému půd ČSSR (MKSP)
- Půdní typy dle geneticko-agronomické klasifikace (KPP)
- Půdní typy dle klasifikace lesních půd ÚHUL (Uhul)
- Půdní typy dle mezinárodní klasifikace FAO-UNESCO (FAO)
- Zrnitostní kategorie podle diagramu DOM 3 (**Obr. 2.1.2–2**).

Nevýhodou je, že mezi výsledky mapování KPP (půdní typy a zrnitost) a hodnotami faktoru erodovatelnosti půdy K neexistuje ověřený přímý převodní klíč. Tabulka, uvedená v metodice (Janeček a kol., 1992) je pro třídy KPP velmi nejednoznačná. Stanovení převodního klíče je problematickou záležitostí (Dostál a kol., 2001c) a vhodnější je odběr vzorků a stanovení K na základě skutečných půdních charakteristik.

Obr. 3.4.1–1 Porovnání rastrových map K faktoru (USLE) vytvořených na základě dostupných digitálních podkladů o půdě v povodí Rokytenky.



Poznámka: Alternativou by zde mohlo být využití vztahu (2.1.2–6) *podle (Römkens et al. 1986) pro stanovení K faktoru na základě zrnitostního složení – viz. kapitola 2.1.2.3.). Tento vztah však dosud nebyl v podmínkách ČR využit ani verifikován*

Další nevýhodou mapy je její značná generalizace odpovídající měřítku 1:200 000 (**Obr. 3.4.1–1**). Pro použití při řešení v regionálním měřítku může být podklad dostatečný (Dostál a kol., 2001c), nicméně pro řešení menších území je vhodnější získat podrobnější zdroj půdních dat.

Digitalizace tohoto mapového díla byla dokončena až na jaře 2001 na ČZU Praha. Výstupem jsou mapy zrnitosti půd v měřítku 1:200 000, zahrnující v sobě informační vrstvy popisující zrnitostní třídu (celkem 5 tříd) a půdní typ.

Původní mapy Komplexního průzkumu půd (KPP) byly vytvořeny pro celé území ČSSR v průběhu 60. a 70. let. Započatý rokem 1961, program zahrnoval následující principy a jejich provádění:

- Jednorázový pedologický průzkumu v měřítku 1 : 10 000 s generalizováním do měřítka 1 : 50 000 a 1 : 200 000. V období od roku 1961 do roku 1970 byly stanoveny hlavní geneticko - agronomické vlastnosti zemědělských půd.
- Zavedení programu periodického sledování obsahu přístupných živin, půdní reakce a potřeby vápnění v orničním horizontu zemědělských půd. Program byl nazván "Agrochemické zkoušení půd" (AZP) a s aktualizovanou metodikou je prováděn dodnes.

3.4.1.3 Vektorové půdní mapy 1:50 000

„Dokončení edice půdních map v ČR v měřítku 1:50 000“ je cílem projektu jmenovaného VaV/640/5/01 v souvislosti s kompletací nedokončeného “Souboru map geofaktorů životního prostředí vydávaných ČGÚ. Nositelem projektu je AOPK ČR - úsek detašovaného pracoviště Brno a spoluřešitelem ÚHÚL Brandýs nad Labem, Česká geologická služba Praha. Celková doba řešení projektu je dána rozmezím let 2001 – 2004.

Podle dostupné dílčí zprávy projektu z roku 2002 (AOPK – www.nature.cz) bylo v té době z celkového počtu 211 mapových listů pokrývajících celé území ČR sestaveno a tiskem reprodukováno 107 listů a do konce roku 2004 by mělo být celé dílo dokončeno.

Metodický postup zpracování půdních map využívá technických možností tvorby GISových databází. Výstupem projektu bude vektorová vrstva mapovacích jednotek půdního krytu zasazená do topografického podkladu SMO 1: 50 000 (kompatibilní s u nás používanými GISovými produkty), distribuovaná zájemcům na paměťových médiích při respektování autorských práv MŽP a AOPK ČR.

Půdní mapovací jednotky jsou klasifikovány podle aktuálního Taxonomického klasifikačního systému půd (Němeček, 2001).

Sestavovány jsou pouze půdní mapy, půdně interpretační mapy, které již vydaný mapový soubor obsahuje, by bylo možno doplnit dodatečně na základě klíče, použitelného při běžném softwarovém vybavení zájemce. Zmiňované doplňky by byly součástí samostatné brožury.

Při zpracování půdních map jsou využívány již existující základní mapové podklady 1 : 50 000 (KPP, geologické mapy, vrstevnice, hydrologická síť). Mapové výstupy jsou vytvářeny jednak přímo v prostředí GIS nebo kombinací ručního a digitálního zpracování. K dořešení sporných případu zařazení půd a jejich návazností je využíváno terénního ověření, včetně příp. použití analytických laboratorních metod.

V případě dodržení termínů projektu a dokončení mapového díla by se toto mohlo stát vhodnou alternativou použití stávajících dostupných databází pro hodnocení erozních a transportních procesů v regionálním měřítku.

3.4.2 Příprava rastrových vrstev z půdních databází

Postup přípravy rastrových vrstev faktoru K a hydrologických skupin půd jako podkladu pro mapu odtokových součinitelů CN je v případě dostupnosti vhodné vektorové databáze jednoduchou záležitostí prosté reklasifikace.

Polygony jednotlivých půdních charakteristik jsou importovány do formátu Idrisi32 a převedeny na rastr o požadovaném cílovém rozlišení. Poté jsou na základě tabulky atributů reklasifikací jednotlivým identifikátorům původních polygonů přiřazeny hodnoty potřebné charakteristiky (HPJ BPEJ, apod.). Další reklasifikací na základě převodní tabulky potom již přímo hodnoty např. faktoru K.

Problémem může být např. neexistence map BPEJ pro území lesů nebo špatná návaznost na ostatní hranice z vrstvy Land Cover. Tyto záležitosti je třeba řešit operativně – doplnit potřebná území z jiných databází, nebo na základě odběru půdních vzorků.

3.5 Srážky, klimatické vlivy

Při určování erozní ohroženosti oběma používanými metodami jsou srážky do výpočtu zahrnuty v podobě faktoru erozní účinnosti srážek R (Wischmeier et al., 1978). Ten je odvozen na základě kinetické energie a max. 30-minutových intenzit přívalových srážek.

Bohužel nelze říci, že by pro jednotlivé oblasti ČR byla zpracovaná jednoznačně použitelná metodika nebo mapa faktoru R, která by zaručovala správný výpočet. Existuje několik možných zdrojů, popsaných v následujících dílčích kapitolách. Situace určení faktoru R v ČR je navíc komplikovaná tím, že dle posledních zkušeností našeho výzkumu (Dostál a kol., 2003c) se potvrzuje již několik let pozorovaný rozpor mezi hodnotami R faktoru používanými metodikami všech okolních států a mezi hodnotou běžně používanou u nás (Janeček a kol., 1992). Proto je třeba srážkám a jejich charakterizování věnovat zvýšenou pozornost v následujících letech výzkumu.

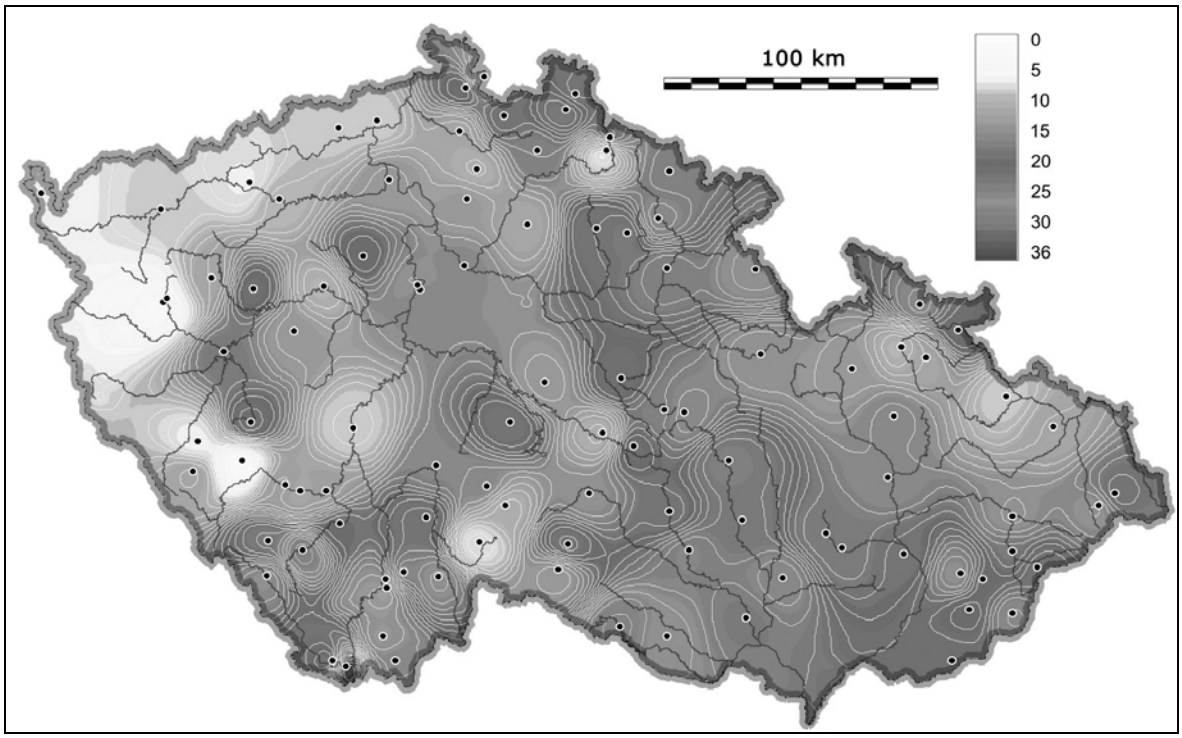
K tomu je třeba dodat, že prakticky neexistuje dostatečný počet dostupných dat o 30-minutových intenzitách přívalových srážek u nás. Dostupné vyhodnocené datové řady se podařilo zajistit pouze pro 4 měřené stanice a zatím není předpoklad souvislého pokrytí republiky stanicemi s touto získanou charakteristikou. Proto bude zřejmě nutné sáhnout i k alternativním metodám odvození faktoru R na základě srážkových úhrnů a jiných charakteristik (viz. kapitola 2.1.2.2). Neboť informace o intenzitách obecně nejsou běžně dostupné, tyto metody jsou dnes předmětem výzkumu na několika pracovištích v Evropě (Gabriels et al., 2003)

3.5.1 Původní (dosavadní) doporučované hodnoty R

Pro celé území ČR je v metodice (Janeček a kol., 1992) doporučena průměrná hodnota R = 20 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$. Tento přístup je silně zjednodušující, protože předpokládá, že erozní charakteristiky deště (intenzita, kinetická energie kapek,…) jsou na celém území konstantní, což evidentně není pravdou. Tento přístup byl však po řadu let doporučován a rovněž byl využíván pro předchozí testování výpočetní metody odhadu transportu sedimentu z povodí.

Pro vybrané stanice na území ČR byl proveden přepočet intenzit přívalových dešťů a stanoveny regionální hodnoty faktoru erozní účinnosti deště (Kubátová a kol., 2000). Data však dosud nejsou kompletní a dle posledních informací není k dispozici významnější datový soubor pro celou ČR. V současné době jsou k dispozici přepočtené hodnoty pouze pro několik stanic na území ČR.

Obr. 3.5.1–1 Mapa izolinií R faktoru dle původní doporučované metodiky (Janeček a kol., 1992).



Metodika (Janeček a kol., 1992) uvádí zpracování hodnot R-faktoru pro řadu stanic z celého území ČR. Tyto hodnoty byly zpracovány geodetickými metodami a byla tak vytvořena mapa izolinií (**Obr. 3.5.1–1**) (Švehla, FSv ČVUT Praha, 1998 - bez citace). Nevýhodou tohoto materiálu je, že vyhodnocované časové řady, z nichž byly určeny hodnoty R-faktoru na jednotlivých meteorologických stanicích, nebyly stejně dlouhé - mají proto různou vypovídací schopnost a hodnoty pro jednotlivé stanice jsou jen omezeně srovnatelné.

Hodnoty ze všech tří uvedených zdrojů se pohybují v mírném rozmezí kolem průměrné stanovené hodnoty 20 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$. Při nedostatku jiných zdrojů byly tato hodnoty využívány řadu let, nicméně je předpoklad trvalým jejich nahrazením revidovanými hodnotami v dalších výpočtech. V tomto ohledu je třeba provést ještě řadu verifikací.

3.5.2 Revidované hodnoty R vyplývající z dostupných dat v ČR a okolí

Na základě dostupných dlouhodobých řad intenzit přívalových srážek pro 4 stanice ČR byla provedena revize výpočtu R faktoru podle původní metodiky (Wischmeier, Smith, 1978) – viz. kapitola 2.1.2.2. Byly zjištěny následující hodnoty (Dostál a kol., 2003c) pro jmenované stanice:

- Cheb: $R = 34,07\ MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$

- Karlov (Praha): R = 45,55 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$
- Vír: R = 56,41 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$
- Olomouc: R = 53,82 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$

Tyto hodnoty odpovídají téměř trojnásobku původních doporučovaných hodnot (Janeček a kol., 1992), nicméně byly zjištěny na základě přesného výpočtu dle původní metodiky USLE a svou velikostí jsou odpovídající i hodnotám R faktoru dlouhodobě používaným v sousedním Německu a Polsku (cca 50 – 70 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$). Poměr vypočtených hodnot vzhledem k pozici stanic na území ČR zhruba odpovídá původním rozložení poměrných erozních účinností (**Obr. 3.5.1–1**).

Pro vytvoření podrobnější mapy hodnot R faktoru by bylo třeba znát datové řady z mnoha dalších stanic na území ČR, nebo je možné poměrné rozložení hodnot stanovit na základě ostatních srážkových charakteristik alternativními metodami (kapitola 2.1.2.2).

V prostředí GIS je potom možné stanovit plošné rozložení hodnot pomocí nástrojů prostorové interpolace mezi jednotlivými stanicemi a jejich hodnotami R faktoru.

Z ostatních aplikací na globální úrovni je možno jmenovat výpočet mapy erozní ohroženosti Evropy podle USLE (Van der Knijff et al., 2000). V dané publikaci byly pro území ČR na základě metodiky (Rogler, Schwertmann, 1981 – viz. kapitola 2.1.2.2) stanoveny hodnoty R faktoru v rozmezí 45 – 60 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$.

4 Část čtvrtá – příklady aplikace výpočtu eroze a transportu sedimentu

4.1 Univerzální rovnice ztráty půdy pro celé území ČR

V této kapitole bude představena konkrétní aplikace výpočtu ztráty půdy a transportu sedimentu do vodních toků pomocí USLE a poměru odnosu SDR v regionálním měřítku. V rámci svého doktorského studia jsem se podílel na projektu „Výpočet transportu sedimentu do vodních toků“ (Dostál a kol., 2001c), který byl řešen v rámci úkolu Projekt Rady vlády České republiky pro výzkum a vývoj, VaV/510/4/98, „Omezování plošného znečištění povrchových a podzemních vod v ČR“, jehož koordinátorem byl VÚV TGM Praha. Cílem celého úkolu bylo vytvoření orientační mapy hlavních plošných zdrojů znečištění vodních toků a nádrží. Úkol byl rozdělen do tří hlavních kapitol podle nejvýznamnějších polutantů: dusičnany, acidita a fosfor.

Řešená úloha (transport sedimentu do vodních toků a nádrží) byla výchozím podkladem pro odhad zatížení vodních zdrojů fosforem, protože právě erozní a transportní procesy jsou nejvýznamnějším plošným zdrojem fosforu pro vodní toky a nádrže v krajině.

Požadavkem zadavatele bylo vytvoření mapy erozního ohrožení a transportu sedimentu na území České republiky v měřítku 1:200 000, pro další výpočty generalizovanou do úrovně povodí IV.řádu.

Svým rozsahem se jednalo o výjimečnou úlohu, jaká dosud v České republice nebyla řešena. V ČR existuje zpracovaná mapa potenciální ohroženosti zemědělské půdy erozí pouze na základě map BPEJ (hodnoty faktorů L, C, P univerzální rovnice ztráty půdy nebyly do výpočtu vůbec zahrnuty) a výstupem je generalizovaná mapa potenciálního rizika ztráty půdy v šesti kategoriích pro jednotlivá katastrální území. Autorem této mapy je VÚMOP Praha.

V evropském kontextu existuje několik podobných generelních řešení nad-regionálního významu (např. Van der Knijff, 1999; Van Dijk, 2001; Van der Knijff et al., 2000), přičemž tato ovšem obvykle nedosahují uvedené podrobnosti a nezahrnují hodnocení transportu sedimentu povodím.

4.1.1 Měřítko

Zadavatelem bylo požadováno zpracování výstupních map v měřítku 1:200 000. Podstatná je volba výpočtového rastru. Jako dostačující (a v zahraničních studiích i použité) se pro takovou podrobnost jeví velikosti elementu 100 až 500 m.

Vzhledem k tomu, že pro uvedené řešení byl k dispozici dostatečně kvalitní DMT z databáze DMÚ25, bylo rozhodnuto využít podrobnosti tohoto podkladu a řešit úlohu ve vyšším rozlišení. Při řešení úloh pro takto rozsáhlá území jde při volbě rozlišení vždy o kompromis mezi podrobností řešení a množstvím zpracovávaných dat.

Výpočet byl nakonec prováděn v rozlišení 50 m, přičemž DMT byl vygenerován a zpracován v rozlišení 25 m a teprve následně agregován na 50 m. Některé pomocné operace příliš náročné na strojový výpočetní čas byly prováděny na zjednodušených vrstvách v rastru 100 m.

Veškeré vstupy, vlastní výpočet i výstupy jsou referencovány v souřadném systému S-JTSK.

Rámec řešené plochy pro rastrové výpočty byl nastaven následovně (**Tabulka 4.1.1–1**):

Tabulka 4.1.1–1: Souřadnice rohových bodů řešeného území (zdrojových rastrových vrstev GIS v rozlišení 50 m):

S-JTSK	Min.	Max.
X (m)	- 912 400	- 428 400
Y (m)	- 1 231 200	- 931 200
sloupce	0	9680
řádky	0	6000

4.1.2 Vstupní data

4.1.2.1 Land Cover, mapa využití území

Mapa využití území jako podklad pro určení hodnot faktoru C a čísel odtokových křivek CN byla vytvořena na základě vektorové databáze CORINE, poskytnuté koordinátorem úkolu VÚV TGM ve formátu ArcView Shapefile.

Tato databáze vznikla jako výstup z projektu **CORINE Land Cover**, který byl v České republice řešen v rámci regionálního programu PHARE pro životní prostředí. Podkladem pro její tvorbu byly družicové scény Landsat TM z let 1990-1992. Databáze byla zpracována ruční digitalizací pod koordinací firmy GISAT Praha (v souladu s evropskou metodikou). Nejmenší plošnou mapovanou jednotkou jsou útvary přesahující 25ha a liniové útvary šířky min 100 m.

Celá nomenklatura databáze CORINE Land Cover je pojata hierarchickým způsobem s třemi podrobnostními úrovněmi povinnými ve všech zemích (dohromady 44 kategorií). Na území České republiky je v rámci CORINE identifikováno 29 tříd povrchu. Pro řešení problematiky odtoku jsou využitelné pouze některé z nich.

Tato databáze je snadno aplikovatelná, problémem je její značná generalizace a nedostatečně specifická definice některých tříd (např. 2.4.2. Směsice polí luk a trvalých plodin, 2.4.3. Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací apod.). Žádné podrobnosti povrchu nejsou v souladu s metodikou v databázi zahrnuty.

Rastrová mapa využití území (Obr. 4.1.2–1) byla vytvořena prostým přiřazením číselných identifikátorů jednotlivým třídám (29 kategorií) vektorové databáze CORINE, dále importem z formátu ArcView Shapefile do formátu Idrisi vektor a převodem na rastr o požadovaném rozlišení (**Tabulka 4.1.1–1**). Při tom byly zjištěny některé problémy a chyby v databázi (chybné polygony v kategorii orné půdy), které byly následně řešeny v koordinaci s poskytovatelem dat (Dostál a kol., 2001c). Většina kategorií získané mapy byla využita k dalším výpočetním procedurám, nicméně některé kategorie byly přímo ve shodě s cílem projektu klasifikovány jako neřešené plochy (**Tabulka 4.1.2–1**) viz. níže.

Pro mapu land-use jako **podklad pro získání hodnot CN**, vytvořenou na podkladě databáze CORINE byla vytvořena rozsáhlá tabulka, rozeznávající všech 29 typů povrchů a dále jako zvláštní kategorie ornou půdu a kombinaci sady-chmelnice. Tabulka zahrnuje hodnoty CN přiřazené každému z uvedených typů povrchů pro všech 9 možných hydrologických skupin půd (více v kapitole 4.1.4).

Při výpočtu se dále ukázalo, že v některých dílčích povodích tvoří významnou část povrchu zpevněné plochy typu „hustá městská zástavba, obchodní zóny“ apod. Tato území

pak budou produkovat vysoké hodnoty odtoků. Nicméně tyto odtoky bývají svedeny neškodně do vodotečí, aniž by měly možnost se podílet na transportu sedimentu ze zemědělské půdy. Byla proto snaha tyto plochy eliminovat. Na základě provedené citlivostní analýzy bylo rozhodnuto z řešení vypustit plochy s vysokými hodnotami odtokových součinitelů (CN), ale současně o tyto plochy zmenšit velikosti příslušných povodí. Z řešení proto byly vypuštěny následující kategorie CORINE (**Tabulka 4.1.2–1**):

Tabulka 4.1.2–1: Kategorie CORINE znázorněné jako neřešené plochy při tvorbě mapy využití území.

Kód CORINE	Popis
Cor 111	Souvislá městská zástavba
Cor 121	Průmyslové a obchodní areály
Cor 123	Přístavy
Cor 124	Letiště
Cor 511	Vodní toky
Cor 512	Vodní plochy

Pro vytvoření rastrové vrstvy využití půdy jako **podkladu pro faktor ochranného vlivu vegetace C** byly brány v úvahu následující kategorie povrchů (povrchy, na kterých je uvažován vznik erozních procesů) (**Tabulka 4.1.2–2**):

Tabulka 4.1.2–2: Kategorie CORINE vybrané jako podklad pro C faktor.

Kód CORINE	Popis
cor321	Přírodní louky
cor243	Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací
cor242	Směs polí luk a trvalých plodin
cor241	Jednoleté a trvalé kultury
cor231	Louky a pastviny
cor222	Sady, chmelnice
cor221	Vinice
cor211	Orná půda

Konkrétní příprava vrstvy odtokových křivek CN a vrstvy C faktoru je popsána v následujících kapitolách.

4.1.2.2 Digitální model terénu

Digitální model terénu je klíčovou informační vrstvou, pokud se týká přesnosti dalšího výpočtu, protože z něj jsou odvozovány jak sklony tak i délky odtokových drah (L a S faktory), které pak mají zásadní vliv na výsledné hodnoty ztráty půdy.

Digitální model terénu byl odvozen na základě databáze DMÚ 25, získané od Vojenského topografického ústavu (VTOPÚ) Dobruška koordinátorem úkolu VÚV TGM. Popis databáze DMÚ 25 je uveden v kapitole 3.2.1.2. Mapy byly poskytnuty ve formátu ArcView Shapefile *.SHP, rozdělené do adresářů po jednotlivých mapových listech. Jednalo se cca o 1043 mapových listů. Z toho cca u 50 listů bylo třeba ve spolupráci s VTOPÚ Dobruška opravit databázi atributů, resp. jiné chyby.

Volba velikosti rastru je kompromisem mezi přesností a objemem dat. (čím menší velikost elementu, tím větší přesnost, ale větší množství dat. Se zmenšením délky hrany elementu na polovinu vzroste velikost výsledného souboru čtyřnásobně). Jako optimální velikost elementu byla zvolena 25 m. Rastrová mapa ČR ve formátu REAL pak však měla velikost cca 1 GB a dostupné software a konfigurace PC nebyly schopny se souborem tohoto objemu pracovat. Rozlišení 50 m bylo shledáno jako ještě přijatelné z hlediska přesnosti, přičemž velikost souboru DMT celé ČR ve formátu čísel REAL byla cca 250 MB – to je objem dat, se kterým je možno pracovat i ho relativně rozumně zálohovat a přenášet. Na zdrojové mapě 1:25 000 tato velikost elementu reprezentuje čtverec 2 x 2 mm – to je přesnost dostatečná i vzhledem k možnostem výchozího podkladu.

Aby však byl DMT zatížen co nejmenší chybou z generování, bylo rozhodnuto jej vytvořit nejdříve v rozlišení 25 m, zde jej zpracovat (filtrovat), analyzovat a teprve následně převést na výsledný rastr rozlišení 50 m (viz. kapitola 3.2.2). Obě vrstvy pak byly porovnány, aby bylo možno prokázat, že přechodem na hrubší rastr nedošlo k výraznému zanesení chyb a snížení přesnosti.

Parametry iniciálního rastrového souboru v rozlišení 50 m jsou uvedeny v (**Tabulka 4.1.1–1**), iniciální soubor v rozlišení 25 m měl shodné souřadnice rohových bodů, ale dvojnásobný počet sloupců a řádků. Protože (jak bylo konstatováno) žádný z dostupných software nebyl schopen efektivně provádět potřebné operace se souborem velikosti cca 1 GB, bylo nutno (i pro vlastní generování DMT) celou plochu ČR rozdělit. Rozdělení bylo provedeno na 32 shodných čtverců s dostatečným překryvem, aby po následném složení a oříznutí se již nemohl projevit vliv hranice řešené oblasti. Celý postup byl napřed otestován na řadě příkladů.

Postup získání výsledného rastrového digitálního modelu terénu (**Obr. 4.1.2–2**) v rozlišení 50 m byl potom následující (viz. též kapitola 3.2.2):

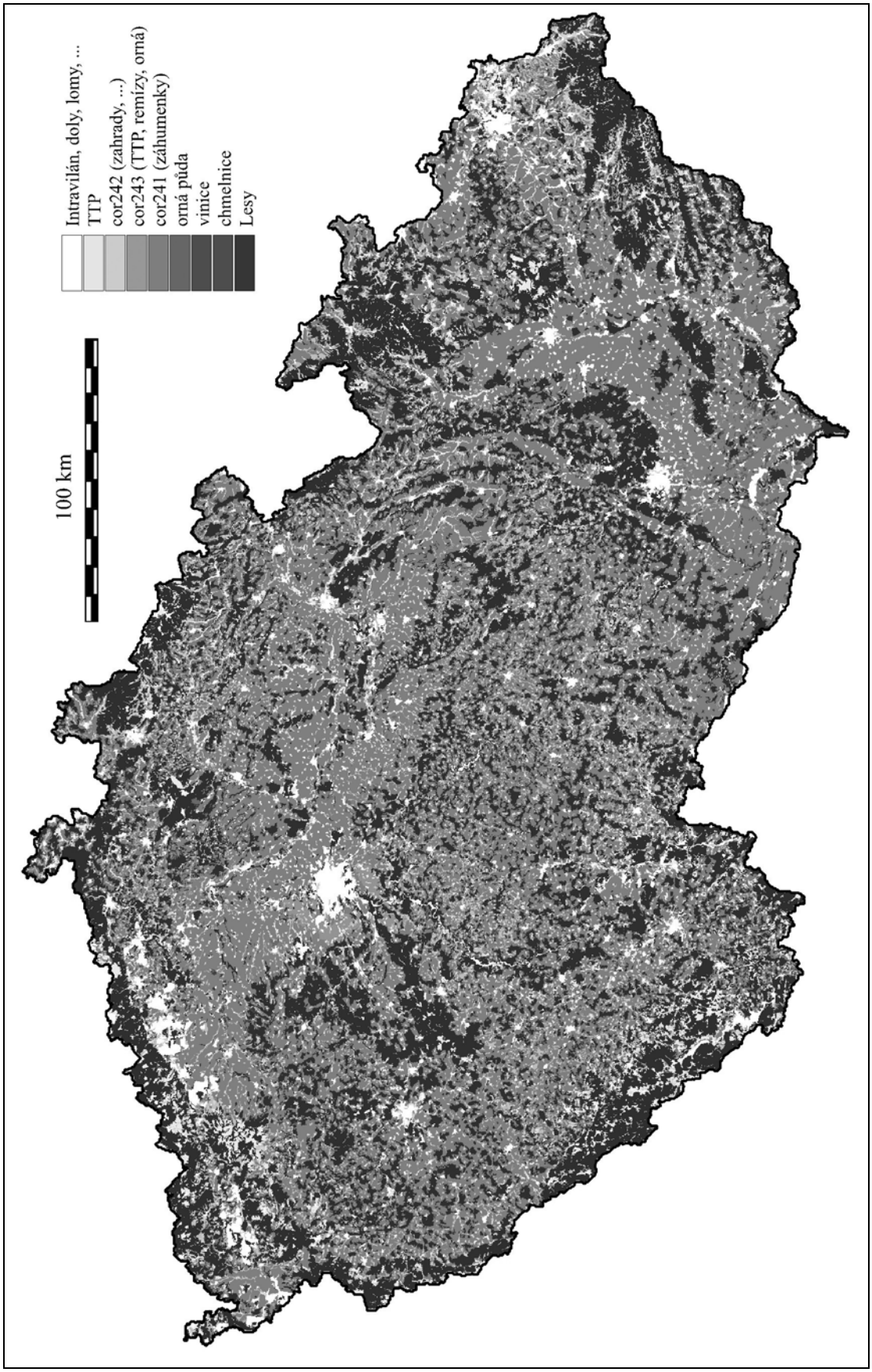
1. Převedení vektorů vrstevnic každého jednotlivého mapového listu z formátu ArcView Shapefile do IDRISI vektor.
2. Přiřazení nadmořských výšek podle databáze atributů.
3. Zrastrování mapového listu do připraveného zdrojového rastru pro území celé ČR v rozlišení 25 m.
4. Tento postup byl opakován pro všech 1043 mapových listů.
5. Rozdělení rastru vrstevnic na 32 dílčích souborů o velikosti 2500 × 3100 elementů s překryvem 200 elementů.
6. Interpolace rastrového DMT z vrstevnic v rozlišení 25 m.
7. Oříznutí a spojení dílčích souborů.
8. Aplikace filtru MEAN na matici 3 × 3 buňky pro odstranění nereálných singularit po interpolaci.
9. Zálohování vytvořeného DMT

10. Kontrakce velikosti elementu – převedení na rozlišení 50 m pro zachování kompatibility s ostatními výpočetními vrstvami.
11. Srovnání DMT 50 m a DMT 25 m a určení chyby po kontrakci (**Obr. 3.3.2–2**).
12. Výpočet vrstvy sklonů pro DMT 50 (**Obr. 4.1.2–3**) m a DMT 25 m a určení rozdílu sklonů po kontrakci.

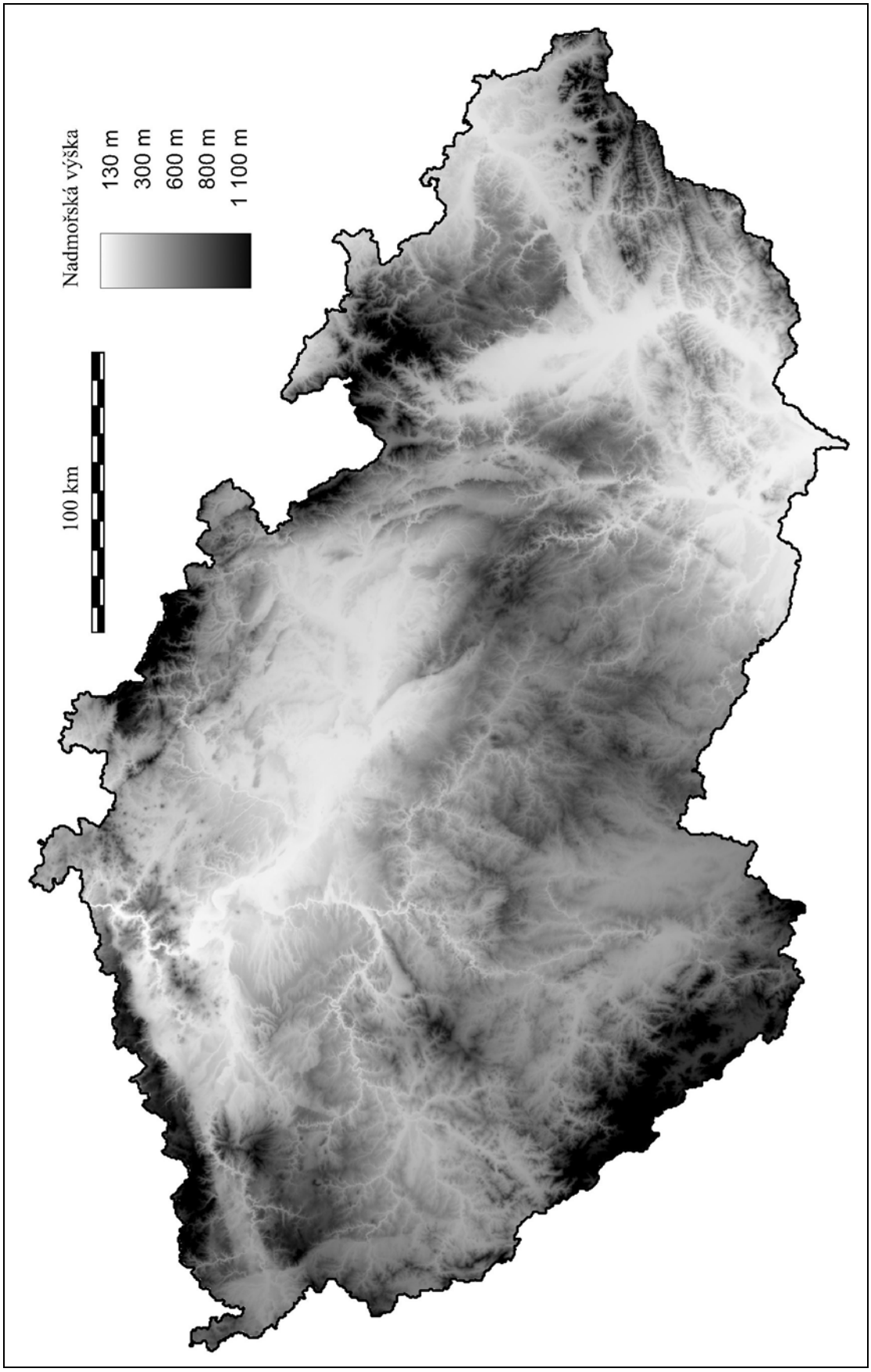
Všechny tyto kroky byly prováděny v prostředí GIS Idrisi32, operace se zdrojovými vektorovými soubory též v prostředí Easy/Pace a ArcView.

Poznámka: Aby bylo možno potvrdit, že kontrakcí DMT 25 m na rozlišení 50 m nebylo do řešení zavlečeno množství chyb a zjistilo se, zda je nutno použít další vyhlazení povrchu filtrací, byla provedena řada srovnávacích testů. Nejprve byla vrstva DMT 50 m opět rozdělena na velikost buňky 25 m při zachování nadmořských výšek elementů. Byla vytvořena hodnotící rastrová vrstva DMT_rozdíl jako rozdíl původního DMT 25 a nového DMT ovlivněného kontrakcí. Tato vrstva byla v prostředí IDRISI statisticky analyzována z hlediska plošného rozdělení chyb vzniklých kontrakcí, zde nebyl shledán žádný trend ani celkový (plošný) výškový posun buněk. Stejné operace byly provedeny i s vrstvou sklonů jež může dobře ukázat případné změny výsledného DMT po kontrakci. Ani zde nebyly shledány výrazné rozdíly (celkem logicky došlo průměrnému snížení sklonu při kontrakci, ovšem pouze o 0,18% vůči původní sklonitosti podrobnějšího DMT).

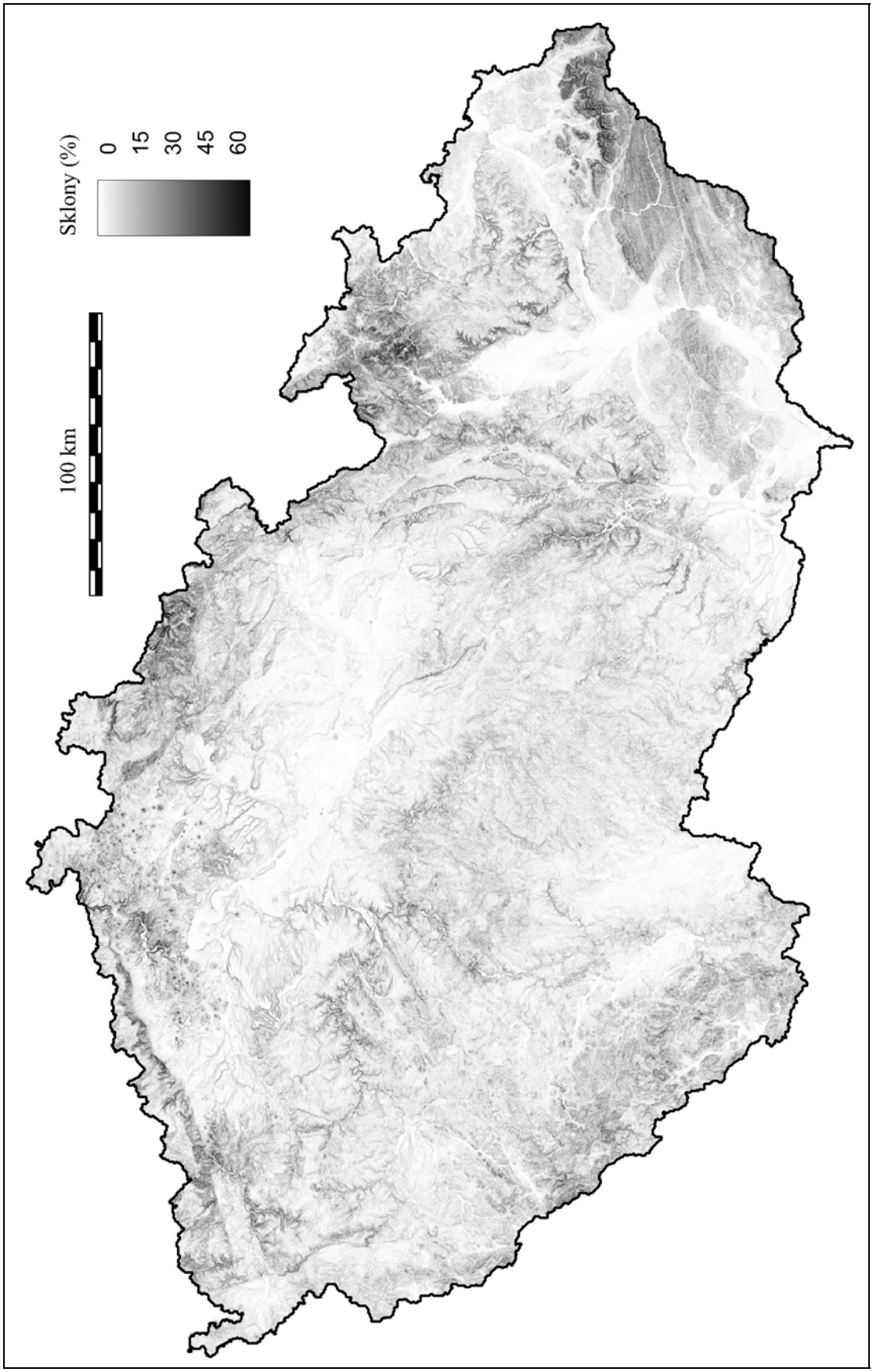
Obr. 4.1.2–1 Mapa využití území ČR na základě CORINE Land Cover.



Obr. 4.1.2–2 Výsledný rastrový DMT ČR na základě DMÚ25



Obr. 4.1.2–3 Rastrová mapa sklonů (%) ČR odvozená na podkladě DMT



4.1.2.3 Půdy

Jako zdroj pro popis půdních charakteristik byly využity mapy komplexního průzkumu půd KPP 1:200 000 ve formátu ArcView Shapefile, zahrnující zrnitostní charakteristiky a půdní typ (viz. kapitola 3.4.1.2).

Vhodnějším podkladem by byly podrobnější mapy (**Obr. 3.4.1–1**), např. vektorová databáze BPEJ, pro kterou je navíc zpracován přímý převodník BPEJ – K faktor. Tuto mapu se však pro řešení nepodařilo získat.

Podle údajů dostupných pro jednotlivé půdy byly všem půdám přiřazovány hodnoty K faktoru a dalších potřebných charakteristik tabulkově – přímo do vektorové databáze atributů (více v kapitole 4.1.3) a poté byly z vektorů vytvářeny přímo rastrové vrstvy v rozlišení 50 m (**Tabulka 4.1.1–1**) příslušných charakteristik potřebných ve výpočtu.

4.1.2.4 Srážky

Charakteristiky srážek byly v původním řešení uvažovány jednotnou hodnotou faktoru erozní účinnosti deště R = 20 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$ pro celé území ČR bez zahrnutí prostorové variability. Tato hodnota podle posledních revizí zjevně neodpovídá skutečné průměrné erozní účinnosti srážek na našem území (viz. kapitola 3.5), v této práci je proto revidována na základě dosud dostupných dat.

V případě dostupnosti správných hodnot pro celé území ČR je další revize ve výpočtu záležitostí výměny jedné vstupní vrstvy při určení ztráty půdy a opravy následujících kroků výpočtu. Takovou opravu je možno provést bez velkých zásahů do řešení.

Vzhledem k problémům se stanovením skutečných hodnot a podrobné mapy erozní účinnosti srážek v ČR je třeba dosavadní výsledek výpočtu ztráty půdy a transportu sedimentu jako potenciální hodnoty. To však nesnižuje podrobnost výpočtu ani jeho vypovídací schopnost, pokud se zaměříme na nalezení problémových oblastí a nalezení povodí se zvýšeným transportem sedimentu do vodních toků, což je hlavním cílem generelního výpočtu.

4.1.2.5 Územní a hydrologické členění

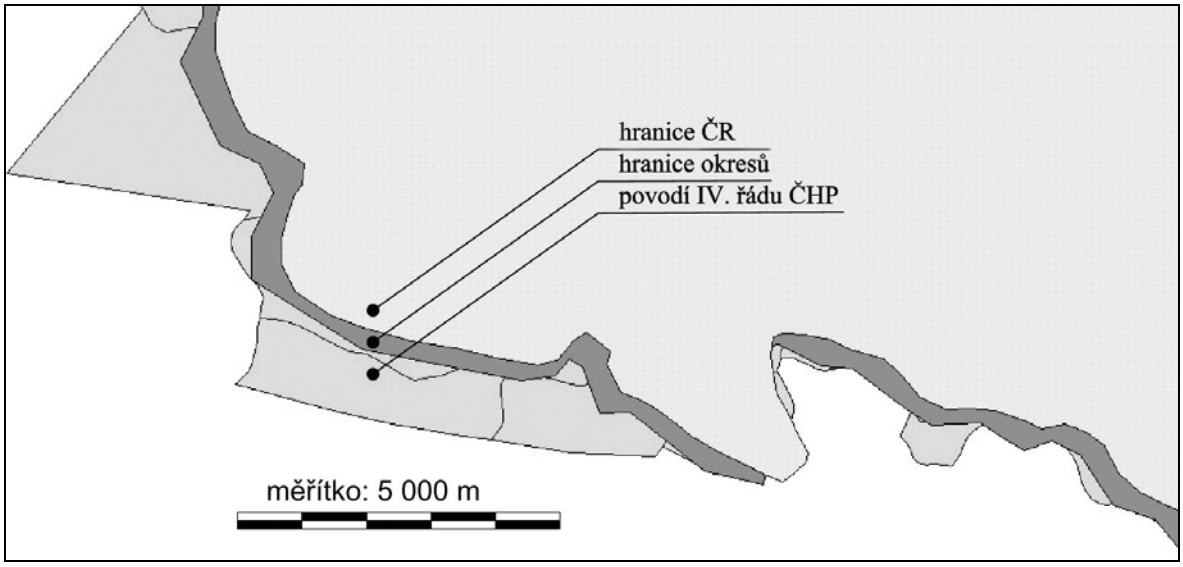
Hranice České republiky, stejně jako správní členění na okresy byly převzaty z mapy 1:200 000, poskytnuté VÚV TGM.

Hydrologické členění na povodí IV. řádu bylo převzato z databáze VÚV TGM. Vektorová informační vrstva povodí byla pořízena digitalizací hranic povodí z mapy 1:50 000. Jednotlivá povodí byla označena identifikátorem, odpovídajícím číslu hydrologického pořadí, vyznačenému na ZVM 1:50 000, na konci kódu však byla přidána poslední číslice (pro případné odlišení rozdělených povodí). Výsledný kód tak má 9 míst. Pro práci s jednotlivými povodími v prostředí GIS byly jednotlivým povodím 4. řádu přiřazeny pořadové identifikátory. Získaná databáze obsahovala 8 302 povodí.

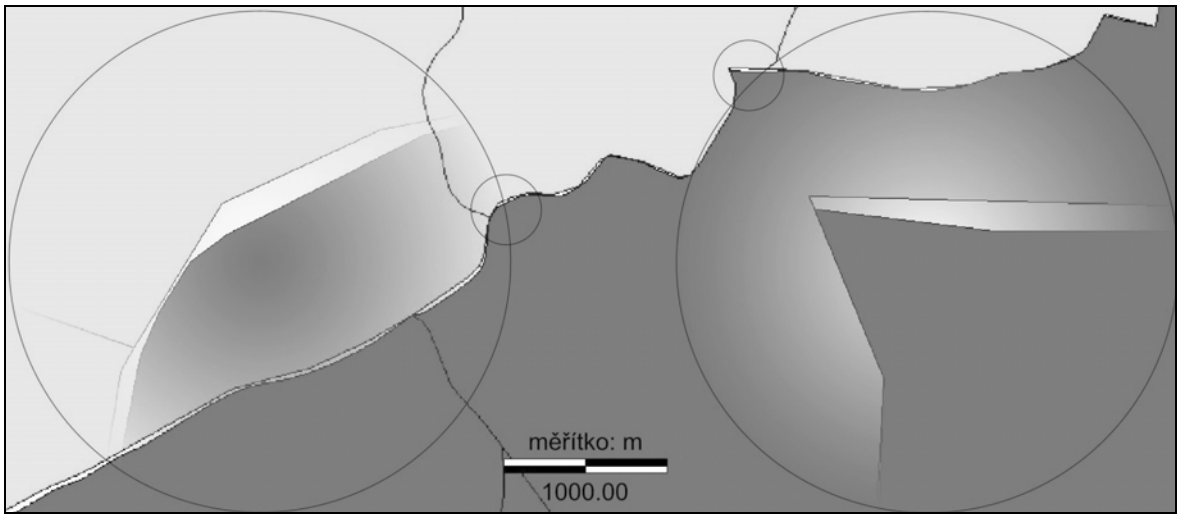
Vektorové podklady poskytnuté pro řešení obsahovaly řadu nepřesností a problémových míst. Především si jednotlivé databáze polohově neodpovídaly a tudíž hranice republiky závazná pro řešení se lišila od hranice republiky z mapy okresů (**Obr. 4.1.2–4**), dále poskytnutá povodí někde nedosahovala k hranici republiky - některá hraniční povodí zřejmě chyběla. (hraniční povodí samozřejmě naopak přesahovala, což je v pořádku).

Samotná vrstva povodí 4. řádu byla zjevně sestavena několika databází vytvořených pro povodí Berounky, Labe, Vltavy, Ohře, Moravy a Odry. Na hranicích těchto povodí nebyly polygony jednotlivých povodí k sobě slícovány, a tedy se jejich hranice lišily – překrývaly, nebo mezi nimi vznikala prázdná místa (**Obr. 4.1.2–4**).

Obr. 4.1.2–4 Detail hranice ČR – nepřesnost vektorových databází.



Obr. 4.1.2–5 Chyby v hranicích povodí 4. řádu.



Zdrojové vrstvy byly převedeny do formátu Idrisi32 rastr (**Tabulka 4.1.1–1**), nicméně z důvodu uvedených nepřesností na nich musela být provedena ještě celá řada úprav, než byly použitelné pro další řešení. V rámci daného řešení nebylo myslitelné, aby veškeré hranice řešených povodí byly editovány ve vektorové podobě, tak aby se bylo možno zmíněným problémům vyhnout. Vzhledem k tomu, že se jedná o standardně poskytovaná data, měly by tyto nepřesnosti již být ve zdrojových vrstvách odstraněny.

Úpravy spočívaly v aplikaci filtru MODE pro odstranění nedokrytu hranic povodí (elementů nepříslušejících žádnému povodí). Poté v doplnění chybějících povodí na hranici ČR podle vodohospodářské mapy. Dále naopak v odstranění těch povodí, která ležela celá mimo řešené území stanovené poskytnutou hranicí ČR. Ve výsledku bylo řešení transportu sedimentu prováděno pro 8263 povodí 4. řádu, přičemž každé z daných povodí zůstalo identifikovatelné podle příslušného hydrologického pořadí toku.

Výsledné upravené hranice povodí byly rovněž převedeny zpět na vektorovou vrstvu polygonů a využity pro stanovení ploch a délek odtokových drah při výpočtu poměru odnosu SDR a dále též při přípravě vrstvy pozemků pro výpočet topografického faktoru LS.

4.1.3 Výpočet ztráty půdy (USLE)

4.1.3.1 R faktor

V původním řešení (Dostál a kol., 2001c) bylo z nedostatku jednoznačných revidovaných hodnot počítáno stále ještě s konstantní hodnotou R = 20 $MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$. Budoucím cílem je nahradit toto nevyhovující zjednodušení a podhodnocení vhodnou mapou erozní účinnosti pro ČR.

V této práci se snažím již využít dostupných verifikovaných hodnot pro alespoň hrubou revizi faktoru erozní účinnosti srážek s ohledem na předpokládané další zpřesňování jeho odhadu. Pro využití navrhovaných vztahů (kapitola 2.1.2.2) vyjadřujících závislost R faktoru na měsíčních úhrnech a rozložení srážek v průběhu roku dosud není zajištěn dostatek podkladů, v současné době spolupracujeme na zajištění dat s ČHMÚ. Proto vycházím z dostupné původní regionalizace (Janeček a kol., 1992) a nově vypočtených hodnot podle původní metodiky pro stanice Cheb, Praha, Vír a Olomouc (kapitola 3.5.2).

Při tvorbě zjednodušené mapy R faktoru (**Obr. 4.1.3–2**) byly nejprve vykresleny přibližné izočáry odpovídající hodnotám pro uvedené 4 stanice. Přitom bylo zohledněno rozložení hodnot odpovídající původní regionalizaci, ovšem s vyloučením extrémních hodnot – žádné stanici nebyla přiřazena hodnota menší než 35 (Cheb) nebo větší než 56 (Vír). Na základě přiřazených hodnot byla poté interpolována nová mapa R faktoru, která byla několikanásobně vyhlazena filtrací pro odstranění neodůvodněných lokálních výrazných změn R.

Následně byla interpolovaná mapa zaokrouhlena a převedena do pásem odpovídajících celočíselným hodnotám R faktoru ($MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$), neboť při uvedené nejistotě je vyšší přesnost zcela neopodstatněná. Toto rozloženi hodnot faktoru erozní účinnosti srážek (**Obr. 4.1.3–2**) bylo využito k výpočtu ztráty půdy i transportu sedimentu z povodí pro celou ČR. V nejbližší době je předpoklad opakované revize uvedených hodnot a zpřesnění regionalizace faktoru R.

4.1.3.2 K faktor

Pro řešení byly využity informační vrstvy, zahrnující půdní typ a dále třídu zrnitosti (kapitola 3.4.1.2). Třída zrnitosti je však charakterizována pouze příslušností daného polygonu na mapě do určité oblasti zrnitostního trojúhelníkového diagramu (**Obr. 2.1.2–2**), který udává poměr písku, prachu a jílu. Celkově bylo na území ČR definováno 48 půdních typů, dalších 5 tříd pak definovalo antropogenní půdu, lomy, doly a výsypky, velká města a velké vodní plochy – tedy území, kde půda nemůže být klasifikována. Z hlediska zrnitostního složení byl každý půdní polygon zařazen do jedné z pěti tříd.

Na základě převodní tabulky mezi kategorizací KPP a hodnotou faktoru erodovatelnosti půdy K (Janeček a kol., 1992) s přihlédnutím k zatřídění do zrnitostní třídy byla stanovena pro každý půdní typ hodnota faktoru erodovatelnosti půdy K (**Tabulka 4.1.3–1**). Je třeba konstatovat, že převodní tabulka je v tomto případě velmi nejednoznačná a připouští

variaci hodnot faktoru K v rámci jednoho půdního typu až čtyřnásobně, a proto výsledné doporučené hodnoty faktoru K byly stanoveny na základě konzultací s řadou pedologů (především Doc.Ing.V.Kuráž, CSc. a Ing. J.Veselá) systémem expertního odhadu.. Původní Wischmeierův vztah pro stanovení hodnoty faktoru K (Kapitola 2.1.2.3) vyžaduje kromě znalosti poměru jednotlivých zrnitostních frakcí (písek, jíl prach) též strukturu půdy, hydraulickou vodivost a obsah humusu – tedy hodnoty, které z podkladů KPP nelze odvodit.

Hodnoty erodovatelnosti půdy pro neklasifikované kategorie (města, vodní plochy, doly, apod.) byly určeny tak, aby byly v tabulce unikátní (aby bylo případně možno tyto neklasifikované povrchy odlišit, ale současně aby se příliš nelišily od svého okolí – pro případ, že nedojde k plné shodě hranic takových neřešených oblastí mezi půdní mapou (zdroj – mapa 1:200 000) a mapou land-use (databáze CORINE). V takovém případě (neshoda v přesném tvaru hranic je velmi pravděpodobná) by pak mohly určité plochy zůstat nepokryté.

Tabulka 4.1.3–1: Tabulka hodnot K faktoru ($t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}$) a hydrologických skupin půd podle mapy KPP 1:200 000.

MKSP	Hydrologic. skupina	K_faktor	Zrnitostní třída DOM 3					Zastoup.
			1	2	3	4	5	
Černice typická	C	0.09	x					xx
Černice arenická	B	0.09			x	x	x	o
Černice glejová	CD	0.08	x	x			x	o
Černice pelická	D	0.08	x	x				o
Černozem (typická)	B	0.14	x					xx
Černozem arenická	A	0.13			x	x	x	o
Černozem hnědozemní	B	0.16	x	x			x	x
Černozem pelická	D	0.16	x	x				o
Černozem černicová	C	0.14	x	x				x
Fluvizem (typická)	B	0.09	x			x	x	xx
Fluvizem arenická	B	0.08	x	x		x	x	o
Fluvizem glejová	C	0.08	x				x	xx
Glej (typický)	C	0.14	x	x		x	x	xx
Glej organozemní	CD	0.39	x	x		x	x	x
Hnědozem (typická)	B	0.4						xx
Hnědozem luvizemní	B	0.4	x			x	x	x
Hnědozem pseudoglejová	B	0.39	x	x			x	o
Kambizem (typická)	B	0.17						xx
Kambizem (typická) varieta kyselá	BC	0.17						xx
Kambizem arenická	A	0.13			x	x	x	x
Kambizem arenická varieta kyselá	A(B)	0.13				x	x	o
Kambizem arenická varieta silně kys	A(B)	0.13		x	x	x	x	o
Kambizem dystrická	B	0.17	x				x	xx
Kambizem eutrofní	BC	0.15	x			x	x	x
Kambizem luvizemní	(B)C	0.19	x	x		x	x	o
Kambizem pelická	DC	0.16	x	x	x			o

Kambizem pseudoglejová	BC	0.16	x					x
Kambizem pseudoglejová varieta kyselá	B	0.15	x					xx
Kultizem (bez rozlišení typu)	---	0.43	x	x		x	x	o
Litozem (typická)	D	0.4				x	x	o
Lom, povrchový důl	---	0.44	x	x		x	x	o
Luvizem (typická)	BC	0.35						x
Luvizem arenická	A(B)	0.43	x		x	x	x	o
Luvizem pseudoglejová	BC	0.19	x	x			x	x
Šedozem (typická)	B	0.36	x	x		x	x	x
Šedozem hnědozemní	B	0.5	x	x		x	x	o
Organozem (bez rozlišení subtypu)	C	0.4						x
Pararendzina (typická)	BC	0.15						x
Pararendzina kambizemní	BC	0.15						x
Pararendzina pseudoglejová	D	0.14	x	x				o
Pozdol (typický)	B	0.18	x			x	x	o
Pozdol arenický	A(B)	0.16			x	x	x	o
Pozdol kambizemní	B	0.2	x			x	x	xx
Pseudoglej luvizemní	C	0.2	x	x		x		o
Pseudoglej organozemní	C	0.18	x	x			x	o
Pseudoglej primární	C	0.17						xx
Ranker (bez rozlišení subtypu)	D	0.21	x	x		x	x	x
Rendzina (typická)	BC	0.26	x	x		x	x	x
Rendzina kambizemní	BC	0.26	x	x		x	x	o
Smonica (typická)	D	0.2	x	x	x			o
Velká města	---	0.38	x	x	x	x	x	o
Velké vodní plochy	---	0.29	x	x	x	x	x	xx
Výsypka	---	0.42	x	x		x	x	o

Polygony půd ve formátu ArcView Shapefile byly importovány do prostředí IDRISI, kde pak na základě příslušnosti k určitému půdnímu typu resp. zrnitostní třídě byla jednotlivým polygonům přiřazena hodnota K faktoru na základě převodní tabulky (Dostál a kol., 2001c). Vrstva pak byla převedena do rastru v rozlišení 50 m (**Obr. 4.1.3–3**) o stejných parametrech, jako ostatní informační vrstvy pro řešení (**Tabulka 4.1.1–1**).

4.1.3.3 LS faktor

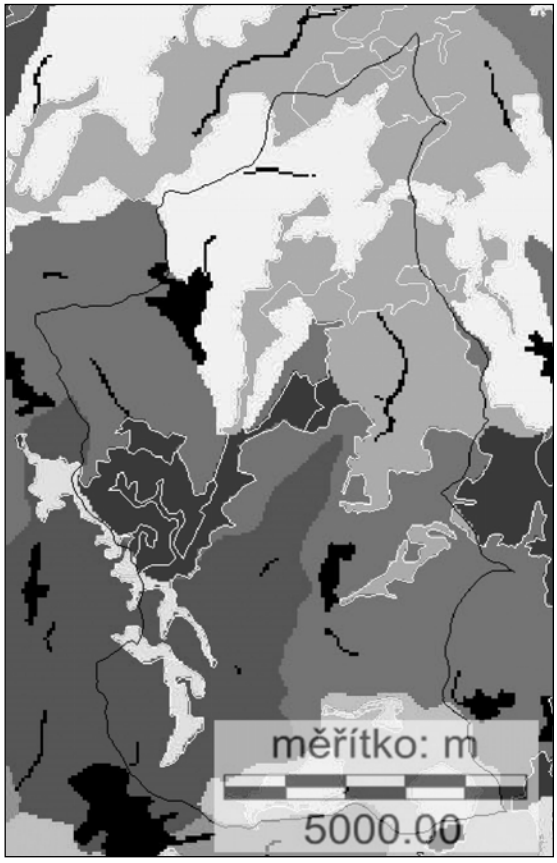
Faktor LS byl určován jako společná kombinace faktorů délky a sklonu svahu. K určení tohoto faktoru byl využit **software USLE2D**, vyvinutý na univerzitě v belgickém Leuvenu (Desmet&Govers, 1996). Software je v několika verzích využíván na katedře

hydromeliorací a krajinného inženýrství již od roku 1998, testováním programu jsem se zabýval ve své diplomové práci (Krása, 1999). Program USLE2D i způsob výpočtu LS faktoru v prostředí GIS je popsán v kapitole 2.1.3.3.

Postup vytvořeni rastrové mapy faktoru délky a sklonu svahu LS (**Obr. 4.1.3–4**) byl následovný:

1. Příprava rastrového digitálního modelu terénu v rozlišení 50 m s patřičným přesahem za hranice ČR.
2. Příprava rastrové vrstvy pozemků, jako další vstupní vrstvy pro výpočet LS (viz. níže), tvořící neprostupné hranice povrchového odtoku.
3. Rozřezání zdrojových vrstev (původně 9680 × 6000 elementů, což pro software USLE2D bylo příliš výpočtově náročné) na 8 dílčích souborů s překryvem 200 buněk. Přitom nedošlo ke ztrátě informace protože hraniční pozemky byly vždy celé obsaženy v obou sousedních souborech.
4. Výpočet LS faktoru pomocí USLE2D na základě obou vstupních vrstev.
5. Následné oříznutí a navázání dílčích výstupních souborů.
6. Omezení maximální hodnoty LS faktoru (pomocí reklasifikace) na hodnotu 65 (LS ≤ 65).

Obr. 4.1.3–1 Výřez z pomocné vrstvy pozemků pro výpočet LS faktoru na území ČR – povodí Rokytenky.



Poznámka: Při výpočtu, který probíhá automaticky na velkém počtu elementů (v tomto případě jde o téměř 60 000 000 elementů) nelze vyloučit výskyt lokálních chyb. V tomto případě může dojít v místech s extrémním sklonem (skalní výchozy, ostré lomy apod.) náhodně ke kombinaci s extrémní délkou odtokové dráhy (viz. níže). V takovém případě je výsledkem nereálně vysoká hodnota faktoru LS. Pokud by informační vrstva byla zatížena větším počtem takto chybných elementů, byly by pro další výpočet jen obtížně využitelná. Pokud se však vyskytne jen malý počet podobných chyb, je lepší tyto odstranit a nahradit je paušální hodnotou, aby nezanášely nahodilou chybu do dalšího výpočtu. Po provedení výpočtu se ve výsledné vrstvě na území ČR vyskytlo několik (cca 0,01%) extrémních hodnot LS v rozmezí (150 – 1770). Na základě analýzy vstupních vztahů bylo zjištěno, že hodnota faktoru L pro délku odtokové dráhy 1500 m je 8,26 a hodnota faktoru S pro sklon svahu 30 % je 7,28. Extrémní hodnota kombinovaného faktoru LS se proto pohybuje kolem hodnoty 60 – 65. Vynesením histogramu četností jednotlivých vypočtených hodnot faktoru LS ve výsledné vrstvě bylo zjištěno, že nad hodnotou LS = 65 je jen cca 0,5 % z celkového počtu elementů, tyto navíc leží většinou

v hornatých zalesněných oblastech, kde výpočet ztráty půdy nebude prováděn. Proto bylo rozhodnuto reklasifikací souboru nahradit všechny hodnoty LS vyšší než 65 hodnotou 65.

Kromě DMT bylo třeba do výpočtu v USLE2D zadat **vstupní vrstvu pozemků**, která pomocí hranic půdních celků zabezpečuje proporcionální přerušení povrchového odtoku (Krása, 1999). Je sice možné se při výpočtu bez hranic pozemků obejít, ale přináší to riziko generování nesmyslně velkých zdrojových ploch a zcela nesprávných hodnot LS faktoru – viz. též kapitola 2.2.4.2 (Watem/SEDEM využívá pozemky stejným způsobem jako USLE2D). Přitom cílem bylo určovat hodnoty topografických faktorů (vrstvy užitečné i pro další analýzy krom výpočtu ztráty půdy) i na územích lesů, která mohou též generovat povrchový odtok (lesy byly jinak z výpočtu ztráty půdy vyloučeny).

Databáze CORINE, použitá k tvorbě mapy využití území (kapitola 4.1.2.1), nezachovává dělení klasifikovaných ploch podle skutečné krajinné mozaiky a reálných pozemků. Ve skutečnosti je každá kategorie povrchu reprezentována jediným nebo jen několika málo velkými polygony na celém území ČR. Proto nebylo možno při tvorbě vrstvy pozemků vycházet pouze z tohoto podkladu.

Po prozkoumání možností ostatních vstupních podkladů bylo stanoveno, že nepropustná hranice povrchového odtoku bude tvořena:

- hranicemi povodí 4.řádu ČHP,
- hranicí les × ostatní zemědělské pozemky,
- vstupem do potencionálních (generovaných) vodotečí (drah soustředěného odtoku) se zdrojovou plochou povrchového odtoku ≥ 1 km^2. Tyto předpokládané linie vodotečí byly z výpočtu LS vyloučeny (porovnání rozsahu generovaných vodotečí viz. **Obr. 2.2.3–3**).

Poznámka: Bylo nutno nalézt způsob, jak uměle přerušit odtokové dráhy tak, aby vznikly co nejlogičtější celky. Jako takové dělení se nabízí hranice mezi jednotlivými kulturami – jednak jich však je poměrně málo a jednak ne vždy mají logické odůvodnění (např. hranice mezi loukou a polem je pro povrchový odtok většinou prostupná). Další možností jsou hranice povodí IV. řádu, které by odtok s výjimkou uzávěrového bodu neměl nikdy překračovat. A další možností jsou vlastní vodoteče, protože používaná metoda výpočtu ztráty půdy je platná pouze pro plošný povrchový odtok a jím způsobenou erozi a nikoliv pro soustředěný odtok v korytech a erozi břehovou případně dnovou. Při definování sítě vodotečí nastal další problém. K dispozici byla síť vodotečí z databáze VÚV (vznikla digitalizací vodstva ze ZVM 1:50 000), v níž ovšem toky na sebe často nenavazují, některé chybí, jiné jsou přerušeny. Navíc toky neprocházejí vždy údolnicí použitého DMT, což je logický důsledek nepřesností při digitalizaci a toho, že pro řešení jsou používány různé mapové podklady. Vzhledem k tomu, že program USLE2D je založen morfologicky – počítá si sám trajektorii povrchového odtoku, vrstva toků, které nesledují údolnici problém omezení délky povrchového toku vůbec neřeší. Bylo proto přistoupeno k vygenerování vlastní hydrografické sítě pomocí procedury UPDRAIN software USLE2D, která je schopna určit ke každému elementu DMT počet jeho předchůdců (velikost jeho povodí). Výběrem elementů s vyšším než zvoleným počtem předchůdců je poté možno generovat různě hustou hydrografickou síť. Takto vygenerovaná zobrazená vrstva bohužel neposkytuje souvislou říční síť ČR (neboť je nemožné z DMT beze zbytku odstranit bezodtoká místa a zajistit trvalou kontinuitu odtoku – viz kapitola 2.2.3). Procedura, použitá pro generování říční sítě je však shodná s tou, kterou využívá USLE2D při výpočtu

LS, proto je jistota, že toky budou umístěny „správně“ tak, aby přerušily odtok a omezily generování neúměrně velkých zdrojových ploch odtoku.

Vznikla však vrstva, která zabezpečuje, že plošný povrchový odtok, působící erozi nepřekročí hranici mezi lesem a zemědělskou půdou, nepřekročí hranice povodí IV. řádu a končí v korytech trvalých nebo občasných vodotečí (**Obr. 4.1.3–1**).

4.1.3.4 C faktor

Nejprve byly zkontrolovány jednotlivé vrstvy po obsahové stránce, zejména z důvodu velmi široké (volné) specifikace tříd **cor242** a **cor243**. Bylo třeba stanovit převládající vegetační pokryv pro „zemědělské oblasti s přirozenou vegetací“ a „směs polí, luk a trvalých plodin“ neboť tyto kategorie nejsou v CORINE již podrobněji definovány. Po prozkoumání řady lokalit známých z vlastních zkušeností s daným terénem a konfrontaci s topografickou mapou 1:50 000, byly všechny třídy ohodnoceny a byla jim přiřazena hodnota C faktoru. Byla rovněž posouzena celková **rozloha všech tříd** a jejich podíl na celkové řešené ploše (**Tabulka 4.1.3–2**).

Tabulka 4.1.3–2: Plochy řešených území a přehled hodnot C faktoru.

Kód CORINE	Plocha (km^2)	Podíl na celkové řešené ploše	Podíl kategorie území k celkové ploše ČR	C faktor	Poznámka
cor243	6010.78	12.861%	7.629%	0.05	louky, remízky, orná dohromady
cor242	2394.22	5.123%	3.039%	0.03	záhumenky, rozvolněná zástavba, zahrady, i plochy malých obcí, neudržované zarostlé plochy, remízky, políčka, louky
cor241	339.36	0.726%	0.431%	0.2	záhumenky
cor231	2254.29	4.823%	2.861%	0.005	TTP
cor222	342.67	0.733%	0.435%	0.300 ~ 0.570	vážený průměr po okresech
cor221	155.27	0.332%	0.197%	0.55	
cor211	35240.75	75.402%	44.726%	0.117 ~ 0.274	vážený průměr po okresech

Jak je patrno z uvedené tabulky, **orná půda** zaujímá více než 75 % z celé řešené plochy, navíc se jedná jednoznačně o dominantní třídu z hlediska erozního ohrožení. Současně je zřejmé, že hodnota faktoru ochranného vlivu vegetace se zde velmi silně mění v závislosti na osevním postupu. Dle metodiky by bylo vhodné zahrnout též proměnlivost hodnot faktoru C pro každou plodinu během roku, ale vzhledem k dosahované přesnosti řešení není tento postup nezbytný. Aby bylo možno alespoň částečně zahrnout prostorové nehomogenity hodnot faktoru ochranného vlivu vegetace C v rámci ČR, bylo nejprve navrženo faktor regionalizovat podle vegetačních (produkčních) oblastí se zvolením typického průměrného osevního postupu pro každou oblast. Nakonec však byla získána tabulka průměrných osevních postupů v ČR za rok 1995 po okresech ze statistické ročenky ČR. Tím je území ČR rozděleno na 76 oblastí, což je podstatně přesnější, než původně uvažované produkční oblasti. Z této tabulky pak byl odvozen průměrný osevní postup pro každý okres, každé plodině přiřazena průměrná roční hodnota faktoru C a dle poměrného zastoupení plodiny byla stanovena průměrná hodnota faktoru C pro každý okres.

Poznámka: Problematická byla rovněž kategorie cor222 (sady a chmelnice). Každá z uvedených kultur má odlišnou hodnotu ochranného faktoru a přitom je dle databáze CORINE nelze od sebe oddělit. Byl proto zvolen obdobný postup jako pro ornou půdu – z tabulky ze Statistické ročenky ČR pro rok 1995 byly pro každý okres stanoveny plochy sadů a chmelnic zvlášť (plocha sadů byla určena nepřímo odhadem plochy 15 m^2 na 1 ovocný strom a 4 m^2 na jeden ovocný keř). Sadům pak byla přiřazena průměrná hodnota C = 0,3, chmelnicím C = 0,6. Průměrná hodnota C faktoru pro kategorii cor222 byla pak vypočtena jako vážený průměr pro každý okres.

Samotné **vytvoření rastrové mapy C faktoru** (**Obr. 4.1.3–5**) probíhalo v následujících krocích:

1. Převedení vektorové vrstvy CORINE do formátu IDRISI vektor.
2. Přiřazení společného atributu s hodnotou C faktoru všem polygonům dané třídy (s výjimkou cor221 a cor222).
3. Formální sjednocení polygonů orné půdy (cor211) v jeden objekt (v prostředí ArcView GIS).
4. Rozdělení na 76 polygonů podle hranic okresů z databáze VÚV TGM.
5. Převedení vektorové vrstvy CORINE do formátu Idrisi vektor.
6. Přiřazení atributu s hodnotou C faktoru jednotlivým polygonům (okresům) podle převodní tabulky.
7. Stejný postup pro třídu cor221.
8. Zrastrování vektoru do připravené rastrové vrstvy C faktoru s rozlišením 50 m.

Ostatní třídy CORINE byly z řešení vyloučeny (to se týká zejména lesů a urbanizovaných ploch) a do vrstvy C faktoru nejsou tedy zahrnuty. V místě neřešených ploch (tedy i mimo hranice republiky) je ponechána hodnota 0.

4.1.3.5 Mapa ztráty půdy

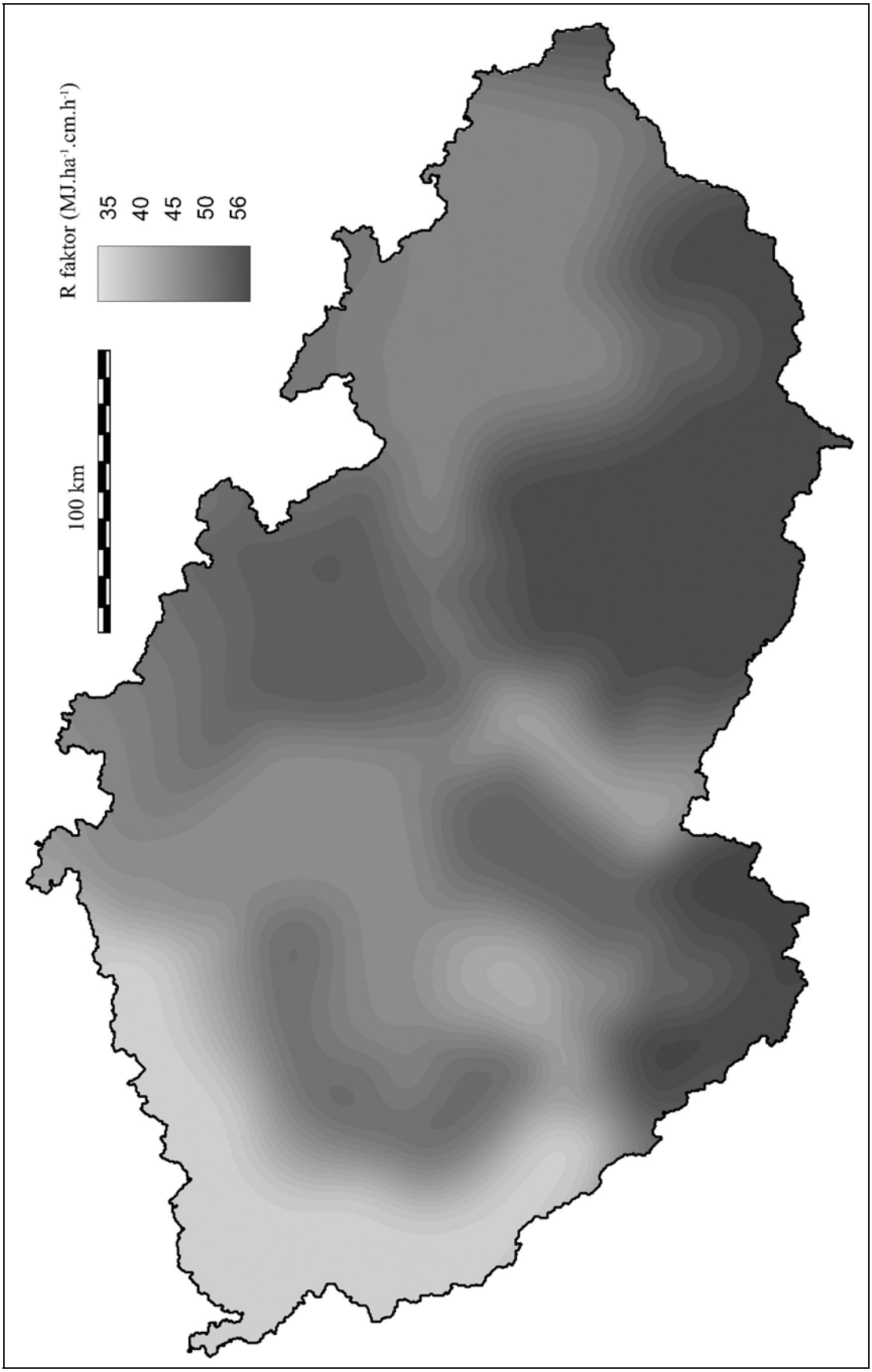
Po získání všech potřebných rastrových map faktorů Univerzální rovnice ztráty půdy způsobem popsaným v předchozích kapitolách byly tyto vrstvy v prostředí GIS Idrisi32 zkombinovány podle vztahu **(2.1.1–1)**. Tak byla získána rastrová mapa průměrné roční ztráty půdy v rozlišení 50 m s parametry uvedenými v (**Tabulka 4.1.1–1**).

Každá buňka řešeného území o velikosti 50*50 m získané mapy nese (podle definice USLE – Wischmeier, Smith, 1978) informaci o průměrné roční ztrátě půdy z plochy 1ha (**Obr. 4.1.3–6**). Přitom je ovšem třeba si uvědomit veškerá omezení plynoucí z nízké podrobnosti některých vstupních podkladů, a omezené vypovídací schopnosti využitých databází. Většina generelních podkladů () byla získána v rozlišení 1:200 000, čemuž odpovídá i přesnost výstupu. Navíc jednotlivé zdrojové databáze nebyly přesně vzájemně prostorově koordinovány a proto v místech hranic a změn hodnocených tříd mohlo dojít k řadě nepřesností a chyb. Proto je vhodné bát tuto mapy jako zdroj informace o více nebo méně erozně ohrožených územích ČR a jako podklad pro další podrobnější výpočty pomocí kvalitnějších erozních modelů, předcházející konkrétním protierozním opatřením. Pro jednotlivá vytipovaná území je třeba zajistit mnohem podrobnější datové podklady, tak aby spolehlivě bylo možno určit erozní ohroženost konkrétních pozemků zemědělské půdy. Přesto se v daném měřítku jedná o dostatečně podrobný podklad pro uvedené expertízy (Dostál a kol., 2001c).

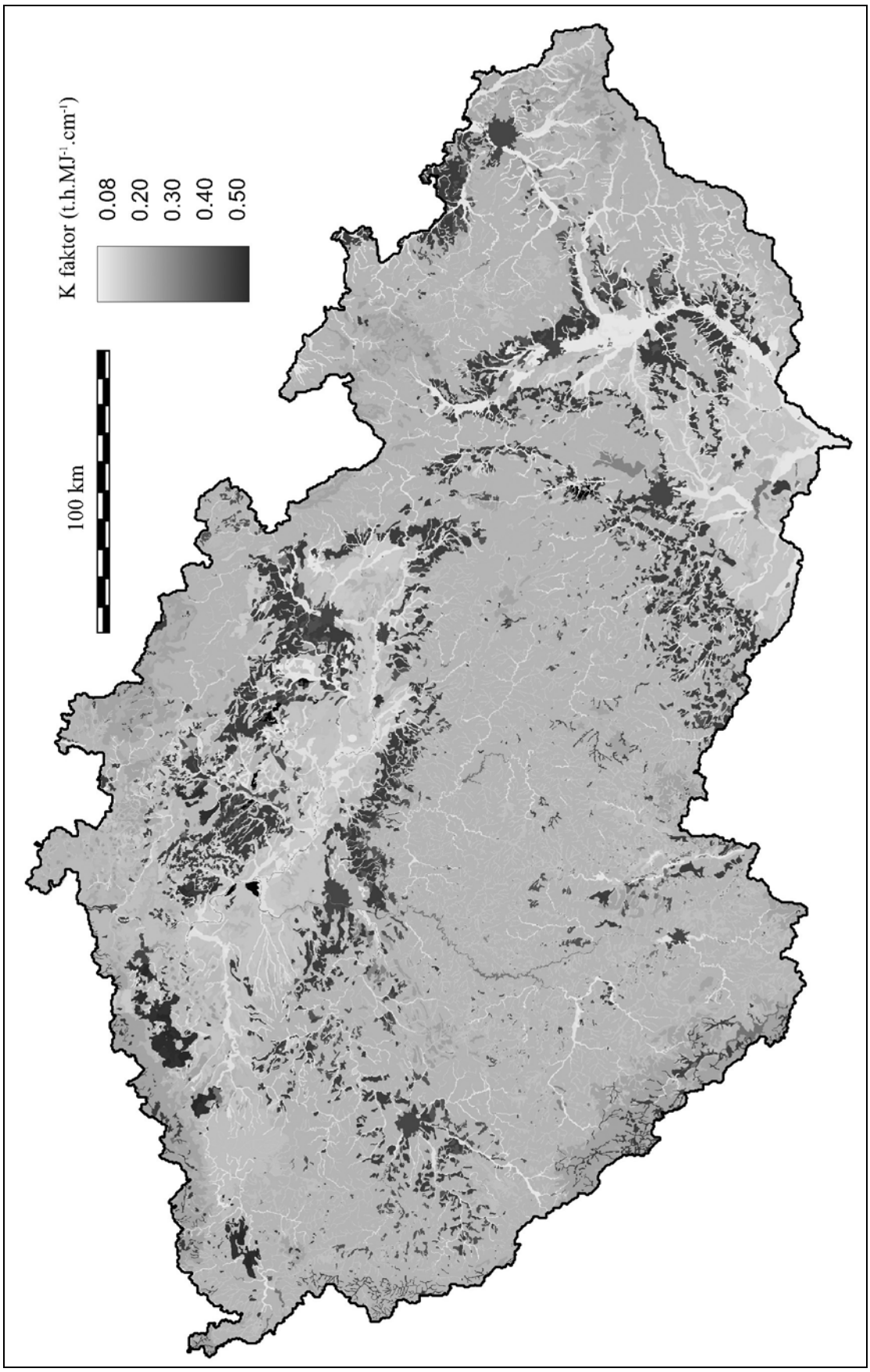
Jednotlivé vrstvy výpočtu přitom zůstávají snadno zaměnitelné při případné další revizi tohoto výpočtu za předpokladu získání kvalitnějších vstupních podkladů, než byly v daném řešení k dispozici.

V souladu s uvedenými charakteristikami je velmi užitečným podkladem tato mapa agregovaná na povodí 4. řádu (**Obr. 4.1.3–7**). Hodnoty průměrné ztráty půdy z jednotlivých povodí 4. řádu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) lépe ukazují vzájemný poměr mezi erozní ohrožeností jednotlivých území ČR a zároveň na rozdíl od lokálních hodnot jednotlivých elementů indikují celkovou průměrnou erozní ohroženost našeho území. Obdobně byla určena celková ztráta půdy z jednotlivých povodí, která byla podkladem k dalšímu výpočtu a odhadu transportu sedimentu do vodních toků.

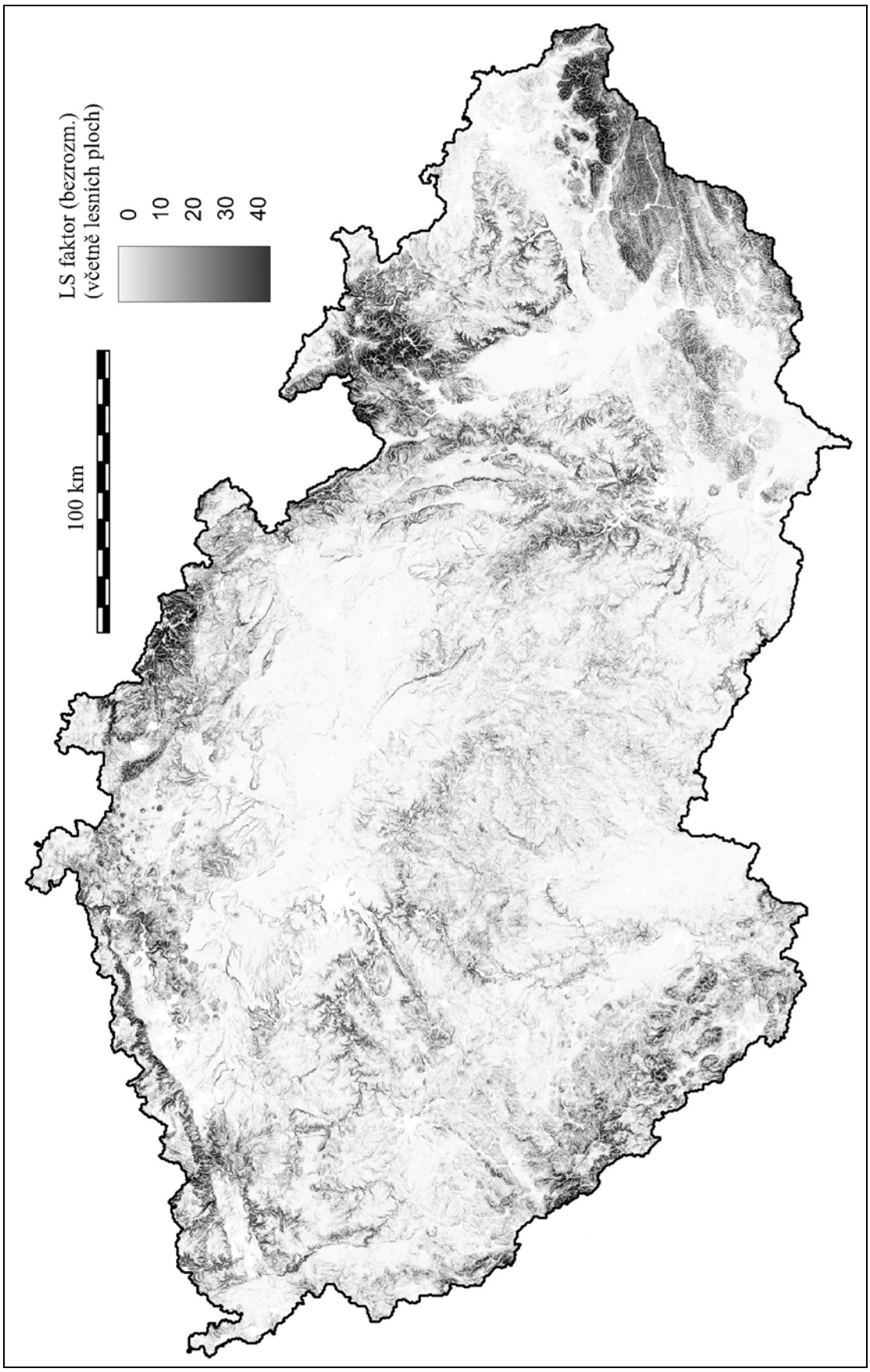
Obr. 4.1.3–2 Výsledná mapa R faktoru pro ČR



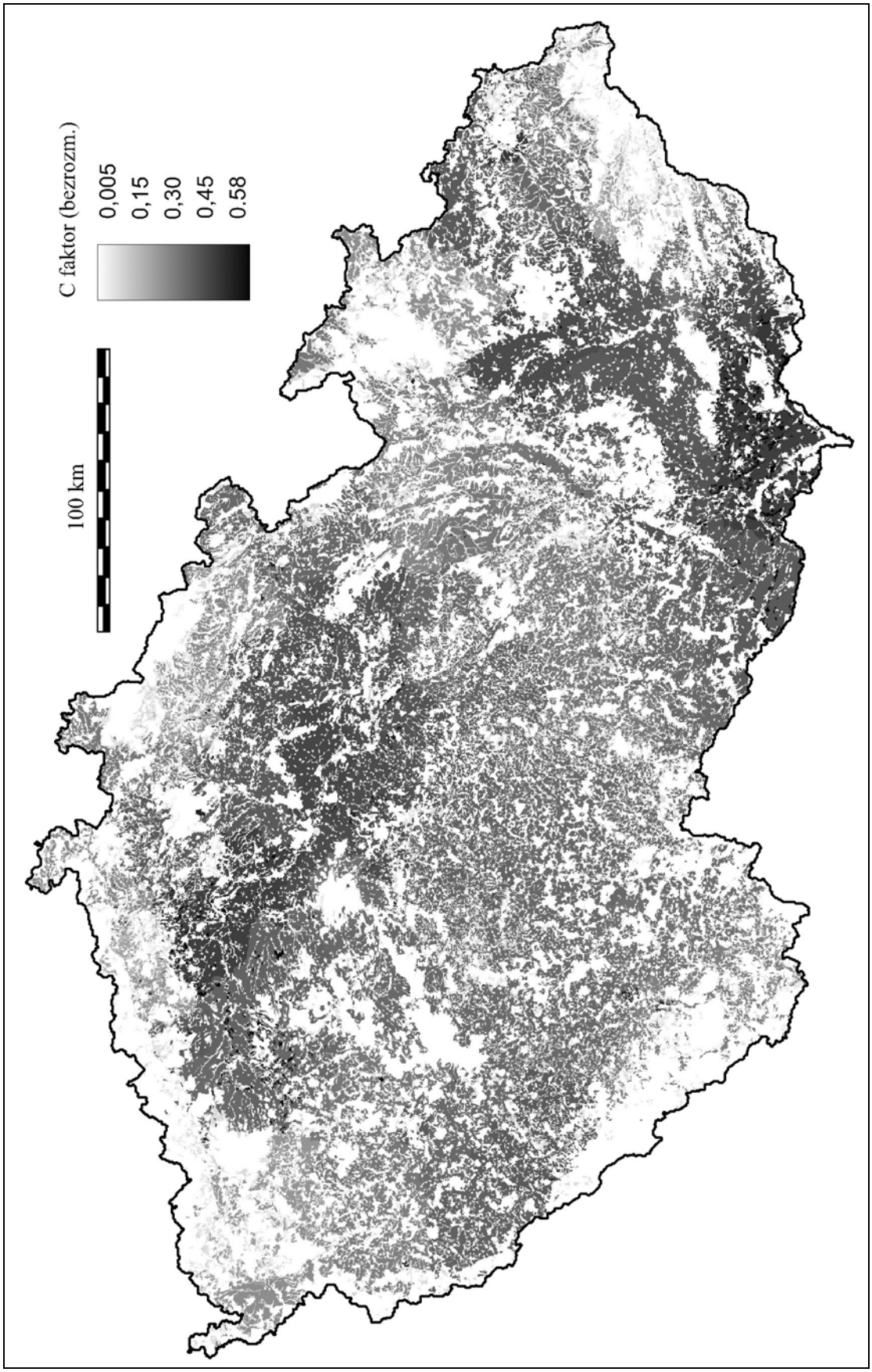
Obr. 4.1.3–3 Mapa K faktoru pro území ČR odvozená podle KPP 1:200 000.



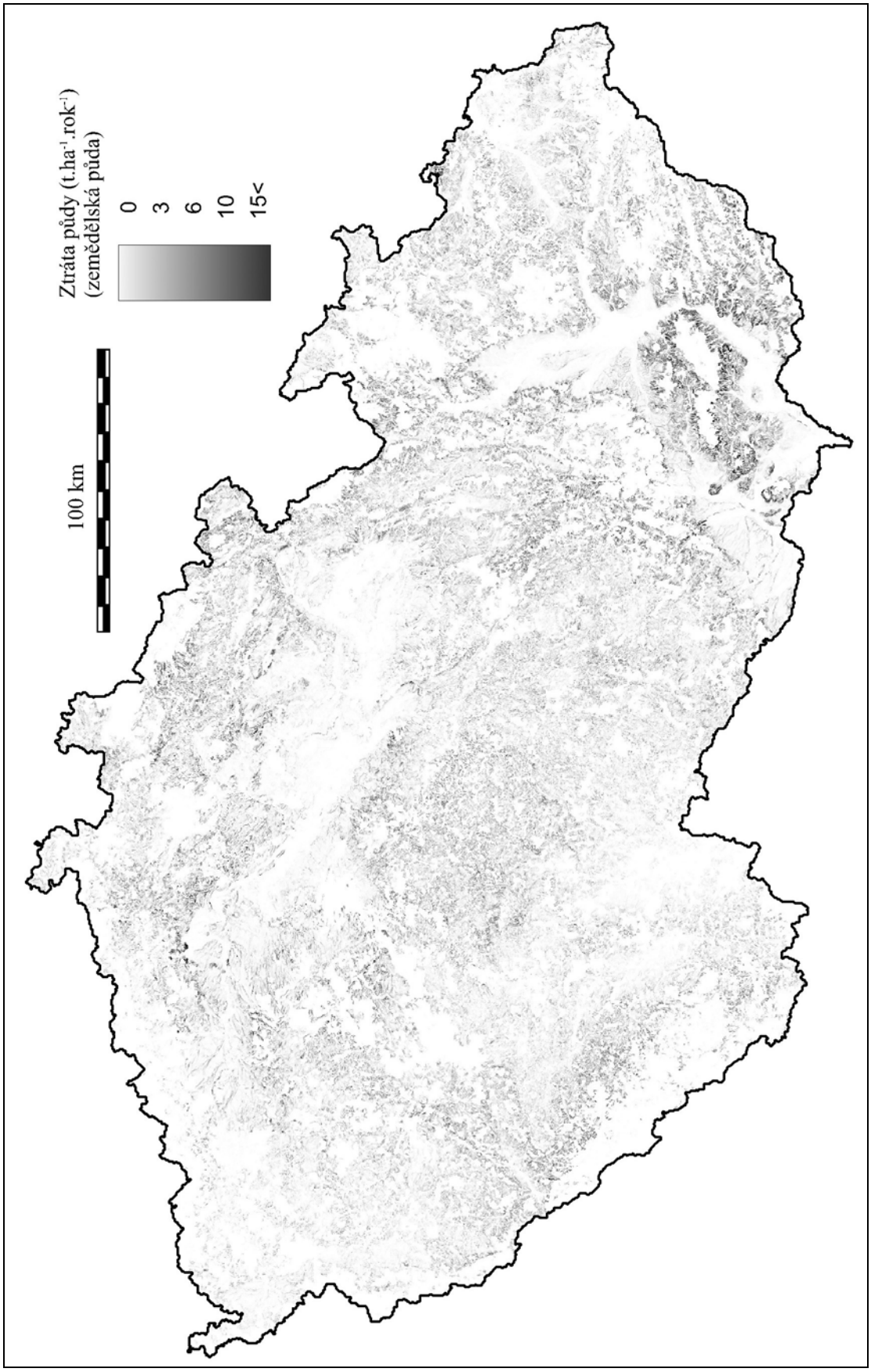
Obr. 4.1.3–4 Mapa LS faktoru pro ČR získaná s využitím programu USLE2D.



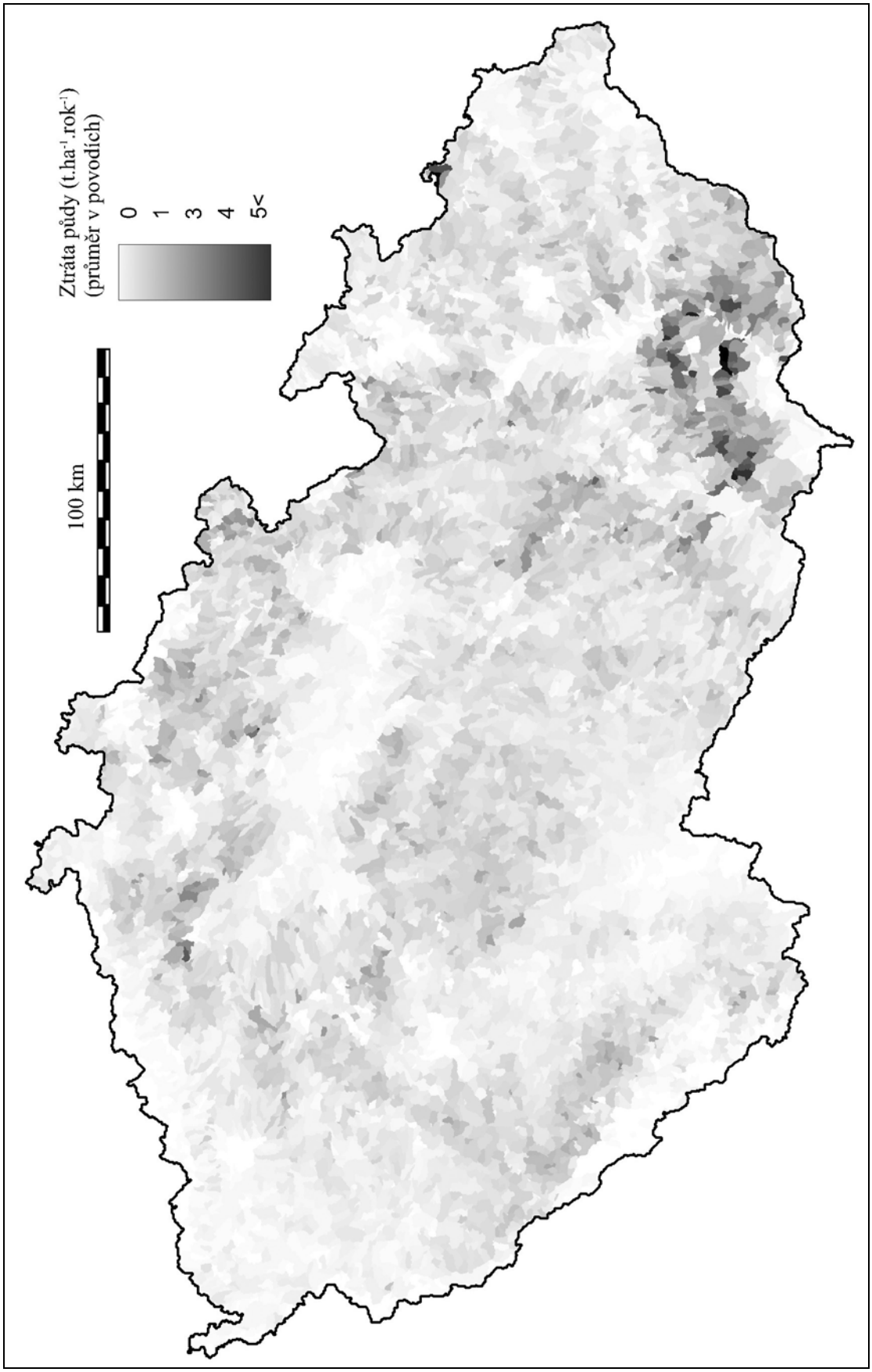
Obr. 4.1.3–5 Mapa C faktoru na základě CORINE a průměrných osevních postupů pro území ČR.



Obr. 4.1.3–6 Výsledná mapa ztráty půdy ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR v rozlišení 50 m.



Obr. 4.1.3–7 Výsledná mapa průměrné ztráty půdy z jednotlivých povodí 4. řádu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR.



4.1.4 Transport sedimentu (SDR)

Transport sedimentu do vodních toků z jednotlivých povodí 4. řádu byl určen jako celková ztráta půdy v daných povodích (t.povodí$^{-1}$.rok^{-1}) redukovaná poměrem odnosu SDR (kapitola 2.1.4.1). Samotný poměr odnosu pro každé dílčí povodí 4. řádu byl potom určen podle vztahu (2.1.4–1). Za tím účelem bylo třeba získat hodnoty reliéfového poměru dílčích povodí, jejich průměrné hodnoty odtokových součinitelů CN a jejich plochy.

4.1.4.1 Plocha povodí

Získání plochy vektorových polygonů nebo rastrových kategorií elementů s jednotným identifikátorem je v prostředí GIS snadnou úlohou.

Pro výpočet byly použity změřené plochy povodí, které proto nebudou korespondovat s plochami, uváděnými ZVM 1:50 000. Po orientačním srovnání se však ukazuje, že rozdíly v plochách se pohybují řádově v jednotkách procent. (Dílčí povodí byla při svém vytváření mírně deformována jednak rastrováním a pak následnou filtrací, nutnou z důvodu vyhlazení chyb – mezer – mezi polygony).

Poznámka: Plochy povodí byly navíc redukovány o neřešené plochy (**Tabulka 4.1.2–1**), které se nepodílejí na transportu sedimentu ze zemědělské půdy a vnášejí do výpočtu při svém zahrnutí chyby. Uvedené plochy byly vypuštěny z řešení i při určování průměrných hodnot CN.

Plochy získané v GIS byly exportovány do tabulky spolu s ostatními charakteristikami, celý výpočet podle rovnice (2.1.4–1) byl proveden tabulkově v prostředí MS Excel.

4.1.4.2 Reliéfový poměr

Reliéfový poměr je jedním ze vstupů do vzorce (2.1.4–1) pro výpočet koeficientu SDR. Je definován jako (4.1.4–1):

$$RP = (H_{rozvodnice} - H_{min}) / L \qquad \textbf{(4.1.4–1)}$$

$H_{rozvodnice}$ *průměrná nadmořská výška rozvodnice (hranice řešeného povodí 4.řádu ČHP)*

H_{min} *nadmořská výška výstupního profilu (minimální výška v rámci řešeného povodí 4.řádu ČHP)*

L *největší délka odtokové dráhy v rámci řešeného povodí 4.řádu ČHP*

$\mathbf{H_{min}}$ bylo získáno extrakcí minimálních hodnot DMT nad rastrovými plochami povodí IV.řádu ČHP.

Pro získání $\mathbf{H_{rozvodnice}}$ (průměrné nadmořské výšky rozvodnice) bylo nejprve třeba v rastru definovat hranici každého řešeného povodí IV.řádu ČHP. Vektorové polygony povodí tedy byly převedeny na linie, zrastrovány a byl jim všem přiřazen pouze jediný identifikátor. Hranice povodí pak byly rozšířeny z 1 na 3 elementy pomocí funkce DISTANCE a opět proloženy s původní rastrovou vrstvou povodí. Tak byly získány souvislé samostatné hranice každého dílčího povodí IV. řádu. Vzhledem k tomu, že hranice musela být rozšířena na 3 elementy (150 m), mohlo dolít k posunu v hranicích povodí v některých případech o 50 m (o 1 element). Z hlediska celkové přesnosti se však jedná o vliv

zanedbatelný. $H_{rozvodnice}$ bylo pak získáno extrakcí průměrných hodnot DMT, nad uvedenými rastrovými hranicemi povodí IV.řádu ČHP.

Poznámka: Převedení vektorových polygonů povodí IV.řádu ČHP na linie (pomocí formátu vektoru IDRISI16) sice vede k vytvoření vektorové vrstvy hranic povodí, při převodu do rastru však jsou hraničním liniím mezi dvěma povodími přiřazeny nahodile identifikátory jednoho z nich. Nevznikají proto uzavřené čáry (řetězce elementů), ale pouze jejich segmenty mezi jednotlivými povodími. Proto bylo nutno nalézt způsob, jak tento problém obejít s minimálním zavlečením chyby.

Délka odtokové dráhy L je definována jako největší délka odtokové dráhy v řešeném povodí – tedy v povodí IV.řádu ČHP. Správný postup by předpokládal nalezení nejdelší dráhy povrchového odtoku v rámci dílčího povodí z uzávěrového profilu až k rozvodnici. Problémem bylo, že v DMT byla bezodtoká místa, proto nebylo možno spolehlivě nalézt uzávěrové body dílčích povodí a stejně tak sledovat z nich údolnici až k rozvodnici (viz. kapitola 2.2.3). Vzhledem k počtu dílčích povodí cca 8500 a nesourodosti jednotlivých vstupních vrstev přitom přichází v úvahu pouze automatické řešení a tam nebylo možno garantovat správnost takového výpočtu.

Po analýze možné chyby bylo přistoupeno ke zjednodušení v tom smyslu, že za nejdelší odtokovou dráhu byla považována maximální přímá vzdálenost v rámci povodí od uzávěrového profilu. Na rozvodnici každého povodí byl nalezen element s nejnižší nadmořskou výškou. Povodí pak bylo izolováno do samostatného souboru a byla spočtena přímá vzdálenost od tohoto bodu. Maximální vzdálenost v rámci povodí pak byla určena extrakcí vypočtených vzdáleností pro každé izolované povodí. Celý postup byl naprogramován a výpočet byl opakován pro každé povodí (celkem 8302) samostatně. Z toho důvodu celý výpočet probíhal v rozlišení 100 metrů, neboť samotný běh programu pro výpočet délek v rozlišení 50 m by trval i po rozdělení na dílčí správní celky povodí ČR řádově 60 dní bez přerušení. (Ze srovnání pro několik set povodí 4. řádu v povodí Berounky je zřejmé, že rozdíl v délkách při změně rozlišení na 100 metrů je zcela zanedbatelný vzhledem k celkové přesnosti vstupních dat). Všechny vrstvy dílčích délek povodí byly následně spojeny do společné mapy délek povodí ČR.

Veškeré získané hodnoty $H_{rozvodnice}$, H_{min} a L (způsob výpočtu viz. níže) byly exportovány do tabulek, převedeny do prostředí MS Excel, kde byl pro jednotlivá čísla povodí IV.řádu ČHP vypočten reliéfový poměr podle vzorce (4.1.4–1).

4.1.4.3 Čísla odtokových křivek CN

Číslo odtokové křivky CN se pohybuje teoreticky v intervalu 0 – 100 a reprezentuje v podstatě hodnoty odtokových součinitelů. Pro povrchy s vysokou retencí jsou hodnoty nízké (kolem 50), pro povrchy s minimální retencí se hodnoty CN blíží 100. Doporučené hodnoty čísel odtokových křivek jsou tabelovány v metodice (Janeček a kol., 1992) a to v závislosti na typu povrchu a charakteru půd. Metodika rozlišuje různé typy povrchů dle využití území, resp. různé druhy zemědělských plodin z hlediska jejich drsnosti a povrchové retence. Půdy jsou děleny do 4 tzv. hydrologických skupin z hlediska jejich propustnosti při plném sycení.

Vytvoření informační vrstvy hodnot čísel odtokových křivek CN v praxi prezentovalo kombinaci vrstvy land-use a půdní mapy. Každé z nich byly předem přiřazeny doporučené hodnoty.

Na podkladě mapy KPP bylo expertním odhadem vytvořeno celkem 9 hydrologických skupin půd. Původní počet byl 4, ale pro lepší popis vzájemných rozdílů bylo prostou interpolací definováno dalších 5 mezilehlých tříd (**Tabulka 4.1.3–1**):

A(B) 0,7*A+0,3*B

(B)C 0,3*B+0,7*C

BC 0,5*B+0,5*C

CD 0,7*C+0,3*D

DC 0,7*D+0,3*C

Poznámka: Hydrologické skupiny půd jsou dle metodiky (Janeček a kol., 1992) definovány následovně:

A půdy s vysokou schopností vsaku i při úplném sycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné štěrky a písky

B půdy se střední schopností vsaku při úplném sycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité

C půdy s malou schopností vsaku při úplném sycení, zahrnující hlavně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu, nebo půdy jílovitohlinité až jílovité.

D půdy s velmi malou schopností vsaku při úplném sycení, zahrnující hlavně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.

Tabulka (**Tabulka 4.1.4–1**) zahrnuje hodnoty CN přiřazené každému z uvedených typů povrchů pro všech 9 možných hydrologických skupin půd.

Tabulka 4.1.4–1: Tabulka hodnot CN pro dle hydrologických skupin půd a kategorií CORINE Land Cover (Dostál a kol., 2001c).

orná půda 211	**A**	**A(B)**	**B**	**(B)C**	**BC**	**C**	**CD**	**DC**	**D**
Pšenice ozimá	64	68	76	82	80	84	85	87	88
Žito	65	69	77	83	81	85	86	88	89
Ječmen jarní	65	69	77	83	81	85	86	88	89
Ječmen ozimý	64	68	76	82	80	84	85	87	88
Oves	65	69	77	83	81	85	86	88	89
Kukuřice na zrno	72	75	81	86	85	88	89	90	91
Luštěniny	66	69	77	83	81	85	86	88	89
Brambory rané	71	74	80	85	84	87	88	89	90
Brambory pozdní	64	67	75	80	79	82	83	84	85
Cukrovka	64	67	75	80	79	82	83	84	85
Ostatní okopaniny	64	67	75	80	79	82	83	84	85
Řepka	64	68	76	82	80	84	85	87	88
Slunečnice	72	75	81	86	85	88	89	90	91
Mák	71	74	80	84	83	86	87	88	89
Ostatní olejniny	71	74	80	84	83	86	87	88	89
Len	71	74	80	84	83	86	87	88	89
Kukuřice na siláž	72	75	81	86	85	88	89	90	91
Ostatní pícniny jednoleté	60	63	71	76	75	78	79	80	81
Ostatní pícniny víceleté	51	55	65	72	70	75	76	78	79

Zelenina	72	75	81	86	85	88	89	90	91
ostatní kategorie CORINE	**A**	**A(B)**	**B**	**(B)C**	**BC**	**C**	**CD**	**DC**	**D**
Sady 222	62	66	74	80	78	82	83	85	86
Chmelnice 222	74	77	83	87	86	88	89	89	90
Vinice 221	74	77	83	87	86	88	89	89	90
Louky a pastviny 231	32	40	59	68	66	72	74	78	80
Jednoleté a trvalé kultury 241	63	66	74	80	78	82	83	84	85
Směsice polí luk a trvalých plodin 242	49	55	68	75	73	78	80	82	84
Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací 243	35	41	56	66	63	70	72	75	77
Lesy listnaté 311	30	38	55	66	63	70	72	75	77
Lesy jehličnaté 312	40	47	63	71	69	74	76	78	80
Lesy smíšené 313	35	42	59	68	66	72	74	76	78
Přírodní louky 321	30	38	58	67	65	71	73	76	78
Stepi a křoviny 322	30	35	48	60	57	65	67	71	73
Nízký porost v lese 324	33	41	58	67	65	71	73	76	78
Skály 332	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Řídká vegetace 333	68	71	79	84	83	86	87	88	89
Spálená vegetace 334	68	71	79	84	83	86	87	88	89
Mokřiny a močály 411	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Rašeliniště 412	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Nesouvislá městská zástavba 112	59	64	74	80	78	82	83	85	86
Silniční a železniční síť s okolím 122	83	85	88	91	90	92	92	93	93
Oblasti současné těžby surovin 131	80	82	85	88	87	89	90	90	91
Haldy a skládky 132	83	85	88	91	90	92	92	93	93
Staveniště 133	80	82	85	88	87	89	90	90	91
Městské zelené plochy 141	75	76	79	83	82	84	86	88	89
Sportovní a rekreační plochy 142	74	75	78	82	81	83	85	87	88

Při **vytvoření rastrové mapy CN** (**Obr. 4.1.4–1**) byl pro třídy orné, sadů a chmelnic zvolen postup analogický tvorbě vrstvy faktoru ochranného vlivu vegetace C – tedy dle osevních postupů, resp. zastoupení sadů a chmelnic po jednotlivých okresech. Ostatním kategoriím byly hodnoty přiřazeny přímo podle mapy využití území (Obr. 4.1.2–1). V dalších krocích bylo nutno přiřadit vzájemně hodnoty čísel odtokových křivek na podkladě příslušné kategorie hydrologické skupiny půd. Tento krok byl mimořádně náročný na prostor disku a strojový čas, protože bylo nutno separovat každou řešenou kategorii povrchů (tedy 25) a dále každou hydrologickou skupinu půd a jednotlivé vrstvy protínat. Vzájemným součtem (protnutím) vzniklých vrstev vznikla výsledná vrstva hodnot CN pro celé území ČR.

Posledním krokem bylo určení průměrné hodnoty CN příkazem EXTRACT pro každé dílčí povodí IV. řádu. Získané hodnoty byly použity v tabelárním výpočtu SDR.

4.1.4.4 Výpočet SDR

Pro všechny potřebné hodnoty byly vytvořeny informační vrstvy. Pro kontrolu však byly ze všech vrstev hodnoty pro jednotlivá dílčí povodí IV. řádu extrahovány do tabulek ve formátu MS EXCEL, kde byl pak rovněž proveden výpočet SDR podle vztahu (2.1.4–1).

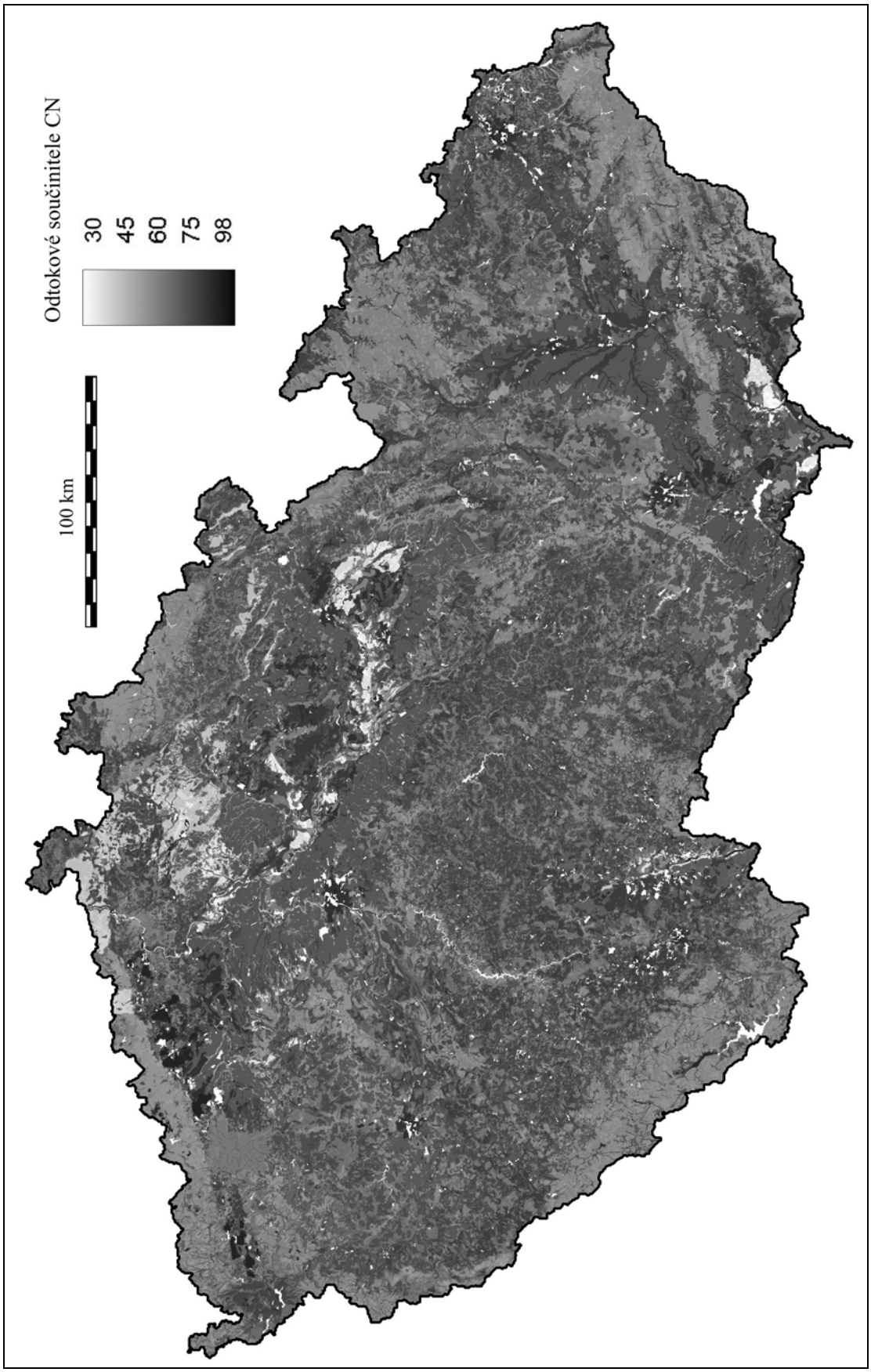
Vypočtené hodnoty poměru odnosu SDR pak byly znovu přiřazeny jednotlivým dílčím povodím IV. řádu, čímž vznikla mapa hodnot SDR pro povodí 4. řádu v celé ČR (**Obr. 4.1.4–2**).

Podobným způsobem pak byla vytvořena i mapa transportu sedimentu. Zdrojem byla informační vrstva celkové ztráty půdy ($t.povodí^{-1}.rok^{-1}$) z jednotlivých dílčích povodí, která byla následně redukována (vynásobena) informační vrstvou poměru odnosu SDR. Rastrová mapa (**Obr. 4.1.4–3**) udává kolik sedimentu (v t/rok) vstupuje v rámci daného povodí do vodotečí.

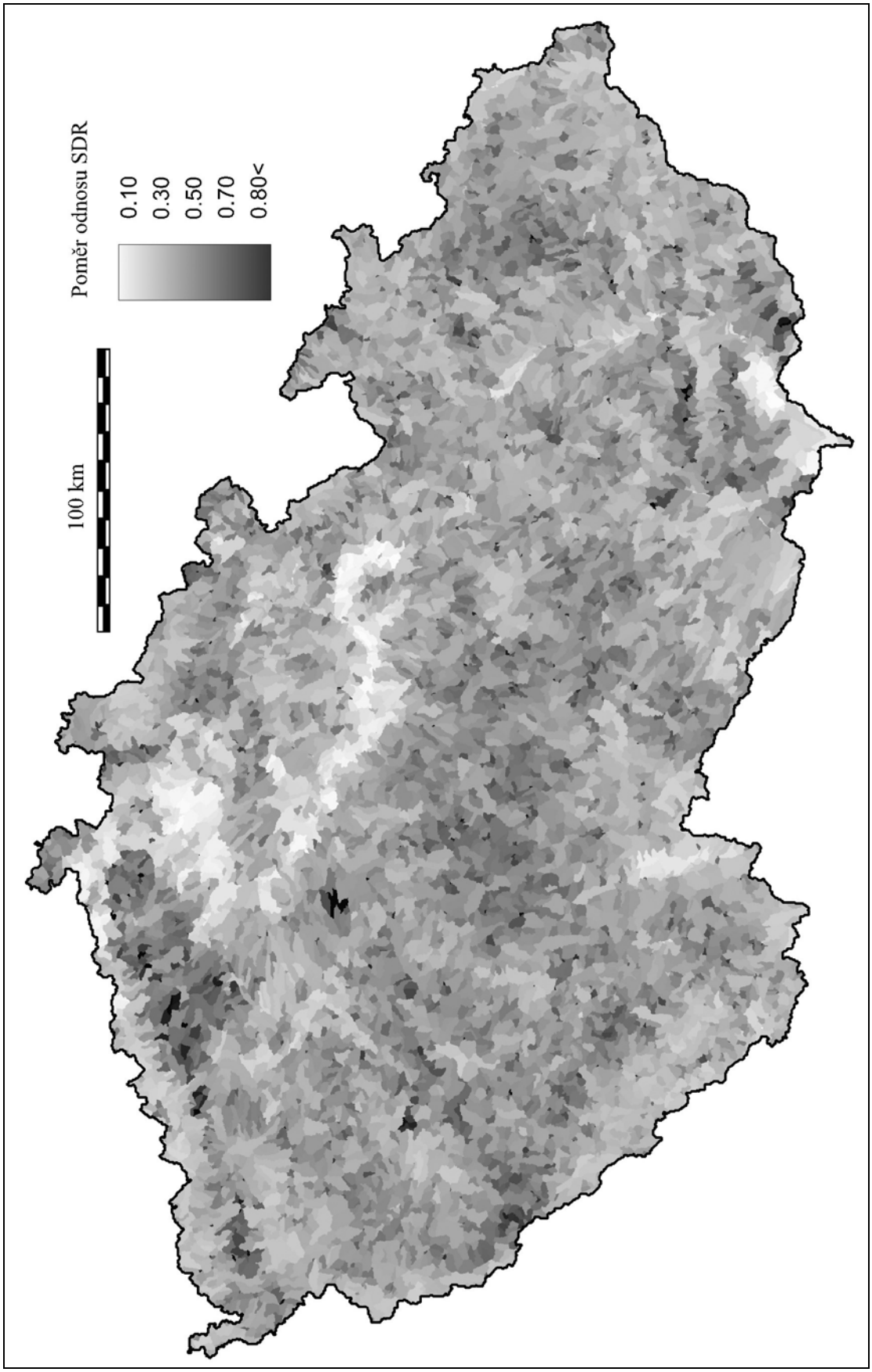
Výsledky jsou vztaženy na celé plochy povodí IV. řádu a nejsou zde zahrnuty redukce zachycení sedimentu ve vodních nádržích v povodí. Hodnoty udávají pouze množství sedimentu, které vstupuje do vodotečí v rámci každého dílčího povodí. V tomto stavu nelze hodnoty načítat ve směru toku a vyvozovat celkový transport sedimentu uzávěrovými profily.

Mapa transportu sedimentu do vodních toků ukazuje skutečná vypočtená množství průměrně transportovaná v rámci jednotlivých povodí. V této podobě ovšem mapa neindikuje erozní ohroženost, ani vzájemně měřitelnou ohroženost daných povodí z hlediska transportovaného množství sedimentu. Jednotlivá povodí 4. řádu ČHP se svou rozlohou značně liší, a je logické, že ve velkých povodích je celkově do vodních toků transportováno větší množství sedimentu než v malých. Proto byla vytvořena též mapa poměrného množství sedimentu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) transportovaného do vodních toků z jednotky plochy (1ha) povodí (**Obr. 4.1.4–4**). Na základě této mapy je možno lépe posoudit vzájemnou ohroženost v jednotlivých územích ČR.

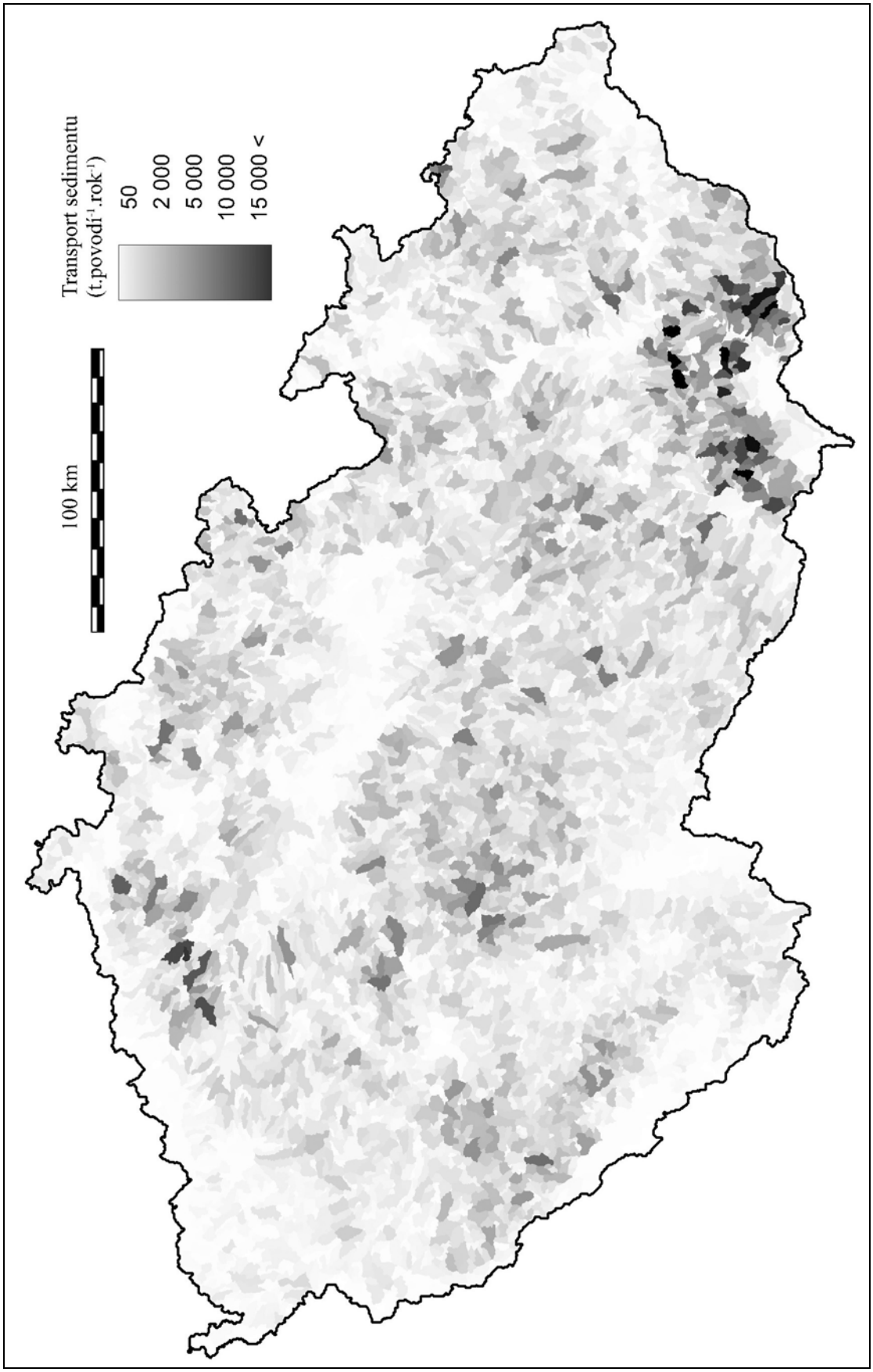
Obr. 4.1.4–1 Výsledná rastrová mapa hodnot čísel odtokových křivek CN (%) pro území ČR.



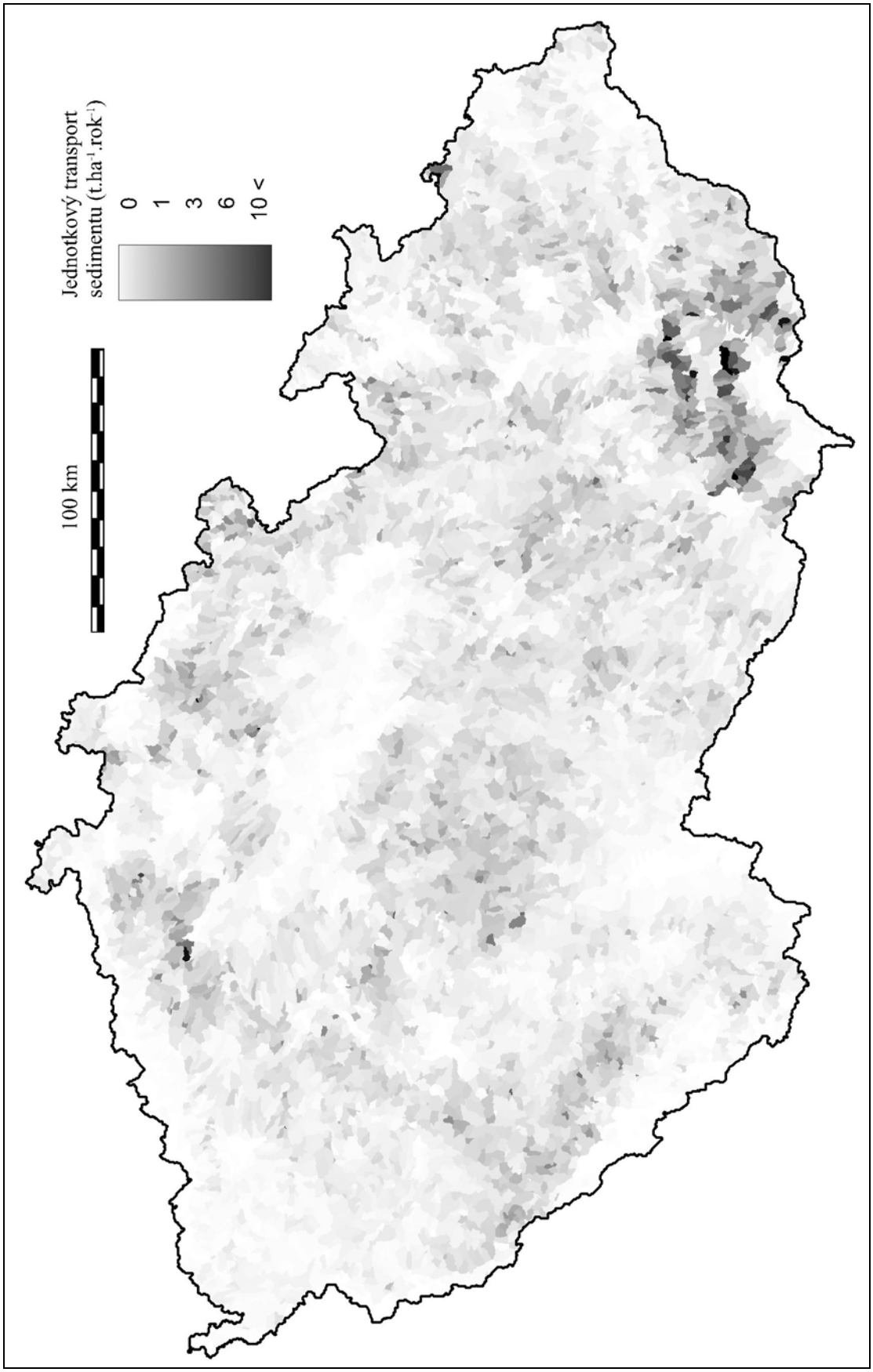
Obr. 4.1.4–2 Výsledná mapa poměru odnosu SDR (%) z jednotlivých povodí 4. řádu v ČR.



Obr. 4.1.4–3 Výsledná mapa transportu sedimentu do vodních toků z povodí 4. řádu (t.povodí$^{-1}$.rok^{-1}) pro území ČR.



Obr. 4.1.4–4 Výsledná mapa poměrného transportu sedimentu do vodních toků z povodí 4. řádu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR.



4.2 USLE + SDR – případová studie VN Vrchlice

Vodní nádrž Vrchlice u Kutné hory a její povodí byly vybrány pro řešení případových studií v projektech VaV/510/4/98 (Omezování plošného znečištění povrchových a podzemních vod v ČR) a VaV/630/4/02 (Výzkum sedimentů přehrad, nádrží a jezer – zhodnocení rizik a návrhy opatření), na kterých jsem se měl možnost podílet v rámci svého doktorského studia (Dostál a kol., 2002b; Dostál a kol., 2003f).

V této kapitole je na případové studii VN Vrchlice představen kompletní postup výpočtu s využitím USLE a SDR (kapitola 2.1.3), jak byl vyvinut během posledních let a aplikován v uvedených projektech. Je předpoklad, že v případě úspěšné verifikace výpočtů pomocí modelu Watem/SEDEM (kapitola 4.3), by mohl Watem/SEDEM dosud využívaný (zde představený) postup nahradit, což by přineslo řadu výhod především vzhledem k podrobnému odhadu vstupu sedimentu do jednotlivých částí vodních toků a sledovaných nádrží a výhodné automatizaci výpočtu v říční síti velkých povodí.

4.2.1 Vstupní data

Povodí VN Vrchlice má celkovou plochu zhruba 97 km^2 a spadá do okresu Kutná Hora. Z hlediska vodohospodářského je povodí VN Vrchlice rozděleno na celkem 11 dílčích povodí 4. řádu. Základní morfologické charakteristiky povodí jsou shrnuty v tabulce (**Tabulka 4.2.1–1**), podrobnosti viz. (Dostál a kol., 2002b). Povodí je intenzivně zemědělsky využíváno.

Vodní nádrž Vrchlice vznikla vybudováním jediné klenbové přehrady v ČR na toku říčky Vrchlice asi 3 km jihozápadním směrem od Kutné Hory, délka vzdutí při Q_{100} je 4,8 km, průměrná šířka hladiny 200 m. Zatopená plocha při hladině normálního nadržení (323,88 m.n.m.) je 93,5 ha. Maximální výška hráze nad terénem činí 34,0 m. Průměrný roční průtok v profilu hráze činí 0,439 m^3/s, zásobní objem vodní nádrže Vrchlice je 7,97 mil. m^3.

Tabulka 4.2.1–1: Základní charakteristiky povodí VN Vrchlice.

Číslo povodí 4. řádu	Plocha povodí (km^2)	Celé povodí VN		
-021	15.457		Plocha (km^2)	Plocha (%)
-022	10.086	Orná půda	58.5	60.1 %
-023	1.664	Trvalé travní porosty	6.27	6.4 %
-024	13.468	Lesy	25.9	26.6 %
-025	0.802	Vodní plochy a intravilán	6.64	6.8 %
-026	9.928			
-027	1.106			
-028	24.940	Nejvyšší bod povodí	550.0 m.n.m.	
-029	2.673	Průměrná n. výška povodí	427.1 m.n.m.	
-030	6.871	Uzávěrový profil povodí (hladina VN)	323.8 m.n.m.	
-031-1	10.293			
celé povodí VN	**97.310**			

Pro řešení bylo vybráno rozlišení rastrových vstupních vrstev 20 m (**Tabulka 4.2.1–2**), jako dostatečné vzhledem k podrobnosti hlavních vstupních dat. Toto rozlišení přímo vychází z rektifikovaného a převzorkovaného výřezu družicové scény Landsat TM, který byl k dispozici jako jeden z podkladů pro mapu využití území.

Tabulka 4.2.1–2: Parametry vstupních vrstev výpočtu transportu sedimentu.

Souřadnice rohových bodů:	Min.	Max.
X (souřadný systém JTSK)	-697310.0	-684290.0
Y (souřadný systém JTSK)	-1082070.0	-1066370.0
Počet sloupců rastru	651	
Počet řádků rastru	785	
Rozlišení (metry)	20	

Pro řešení byly využity následující tématické vrstvy a data:

- Základním zdrojem pro vytvoření mapy vegetačního krytu (Land Cover) byla ortorektifikovaná družicová scéna skeneru Landsat TM (6 spektrálních pásem), pořízená v červnu 1997 a převzorkovaná do rozlišení 20m.
- Při klasifikaci mapy využití území byla využita též data z terénního průzkumu.
- Dále byla k dispozici panchromatická ortofotomapa celého povodí v rozlišení 0,5 m, vytvořená z leteckých snímků pořízených dne 20.4.2000.
- Osevní postupy z let 1995 – 2001 pro dvě největší zemědělská družstva v povodí byla zdrojem stanovení průměrných osevních postupů v celém povodí.
- DMT byl odvozen z vrstevnicových map DMÚ 25.
- Jako zdroj pro popis půdních charakteristik byly využity vektorové mapy BPEJ poskytnuté VÚMOP Praha.
- Charakteristiky srážek byly uvažovány jednotnou hodnotou pro celé povodí bez zahrnutí prostorové variability.
- Hranice povodí a hydrologické členění na povodí IV. řádu bylo převzato z databáze VÚV TGM na základě ZVM 1:50 000.

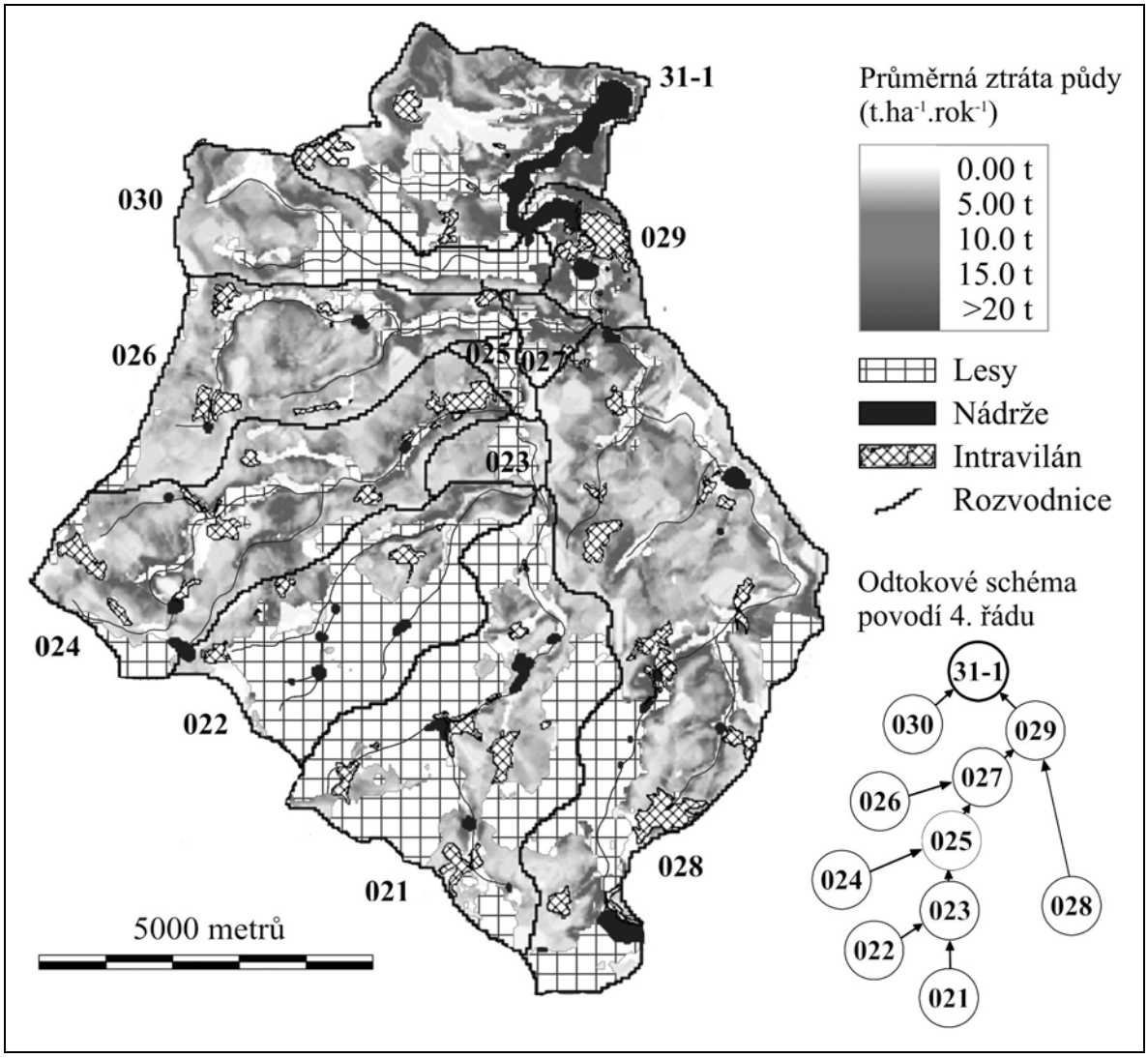
4.2.2 Ztráta půdy

Pro výpočet ztráty půdy i transportu sedimentu byly jednotlivé faktory a parametry použitých rovnic připraveny jako shodně velké a umístěné rastrové vrstvy GIS Idrisi32 v jednotném rozlišení (**Tabulka 4.2.1–2**).

Následně byly vrstvy vynásobeny v prostředí GIS podle vztahu **(2.1.1–1)**, čímž byla vypočtena průměrná roční ztráta půdy v $t.ha^{-1}$ (**Obr. 4.2.2–1**). Hodnoty ztráty půdy byly následně násobeny plochou elementu (20*20 metrů) a tak přepočteny na hodnoty ztráty z jednotlivých elementů ($t.pixel^{-1}.rok^{-1}$). Následným součtem hodnot byla určena vždy celková ztráta půdy v jednotlivých povodích 4. řádu ČHP (**Tabulka 4.2.3–3**).

Celkové ztráty v povodích 4. řádu byly poté redukovány poměrem odnosu SDR (kapitola 4.2.3) a podle transportního schématu (**Obr. 4.2.2–1**) při zahrnutí poměru zachycení v nádržích (kapitola 4.2.4) byl sediment transportován do uzávěrového profilu a vypočteno celkové průměrné zachycené množství sedimentu ve VN Vrchlice.

Obr. 4.2.2–1: Výsledná mapa průměrné ztráty půdy v povodí VN Vrchlice ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) a schéma transportu sedimentu z jednotlivých povodí 4. řádu ČHP.



4.2.2.1 R faktor

Na základě jediných dosud dostupných revidovaných hodnot R faktoru ze stanic Cheb, Praha Karlov, Vír a Olomouc (kapitola 3.5.2). Byla prostou interpolací určena konstantní průměrná roční hodnota R faktoru v povodí VN Vrchlice.

$R = 48\ MJ.ha^{-1}.cm.h^{-1}$.

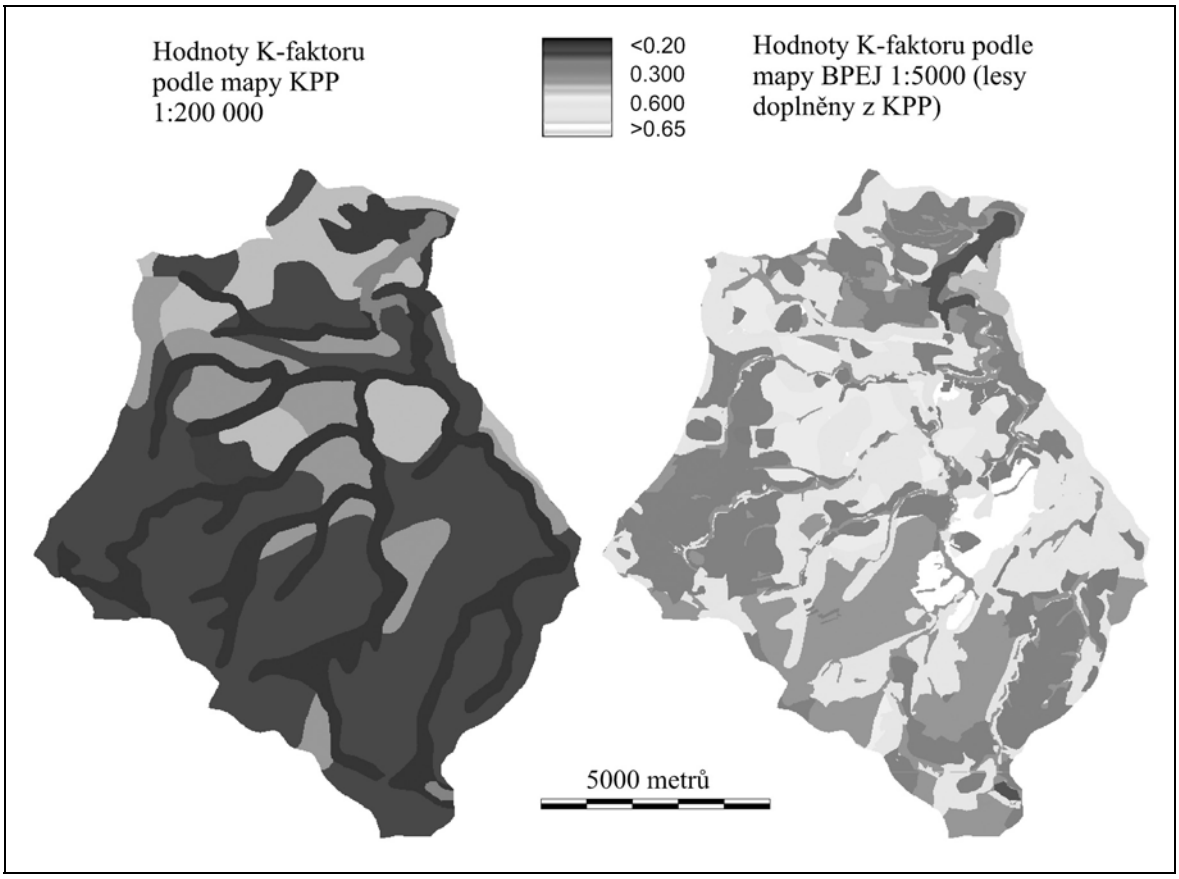
Tato hodnota dosud není ověřena přesným výpočtem dle 30-minutových intenzit pro konkrétní stanici v dosahu řešeného povodí, neboť není k dispozici odpovídající datová řada, nicméně podle všech dostupných údajů nejen pro dosud revidované stanice na území ČR by tato hodnota měla přibližně odpovídat skutečné průměrné erozivitě srážek. Na verifikaci hodnot R v rámci ČR se dále pracuje.

4.2.2.2 K faktor

Pro stanovení hodnot faktoru erodovatelnosti půdy K byl pro řešení získán nejvhodnější podklad v rámci dané přesnosti řešení – mapa BPEJ, která existuje pro celou republiku ve vektorové podobě a byla digitalizována na podkladě map SMO 1:5 000 (kapitola 3.4.1.1).

Nevýhodou mapy BPEJ je nicméně především to, že mapa byla vytvořena pouze pro plochy zemědělské půdy. Lesní pozemky, intravilán a další „ostatní“ plochy jsou v mapě bez údajů. Tyto plochy byly proto doplněny údaji z generelní mapy KPP využité při řešení ztráty půdy z celého území ČR (kapitola 4.1.3.2).

Obr. 4.2.2–2: Mapa K faktoru na základě kombinace dostupných digitálních podkladů (BPEJ a KPP) o půdě v povodí Vrchlice (97 km^2). Porovnání s generelní mapou podle KPP 1:200 000.



Postup tvorby vrstvy faktoru K byl následující:

1. Převod vektorové databáze BPEJ do formátu Idrisi32.
2. Rastrování mapy do připravené vrstvy v odpovídajícím rozlišení 20 metrů.
3. Přiřazení hodnot K faktoru podle HPJ kódu BPEJ (kapitola 3.4.2) na základě metodiky (Janeček a kol., 1992).
4. Doplnění chybějících nepřiřazených ploch hodnotami K faktoru získanými na základě výpočtu, prováděného pro celou ČR podle mapy KPP (kapitola 4.1.3.2). Jedná se především o lesy, které nejsou v rámci map BPEJ (narozdíl od KPP) řešeny. Lesy jsou sice vyčleněny z výpočtu ztráty půdy, ale hranice lesů získaná v rámci vytváření mapy využití území z družicového snímku nemusí vždy přesně souhlasit z hranicí lesů z databáze BPEJ. Proto bylo provedeno toto vyplnění, aby v rámci řešeného území nezůstaly malé neřešené plochy u hranic lesních ploch.

(Jedná se o minimální hraniční plochy, ale nevyplněný faktor K by je zbytečně vyčlenil z řešení).

Takto připravená vrstva byla využita v rámci podrobného řešení i pro výpočet pomocí simulačního modelu Watem/SEDEM.

4.2.2.3 LS faktor

Pro výpočet faktoru LS byl využit software USLE2D (Desmet&Govers, 1996), při využití doporučených parametrů na základě (Krása, 1999 – kapitola 2.1.3.3).

Postup určení faktoru délky a sklonu svahu LS byl následovný:

1. Příprava rastrového digitálního modelu terénu v rozlišení 20 m. Postup vytvoření DMT z vektorové databáze DMÚ25 byl shodný s testovaným postupem generování DMT pomocí TIN (kapitola 3.2.2) při použití následného ošetření filtrem MEAN na matici 3×3 elementy.
2. Příprava rastrové vrstvy pozemků jako další vstupní vrstvy pro výpočet LS. Z mapy využití území (kapitola 4.2.2.4) byly vyčleněny intravilány, lesy a vodní toky a vodní plochy a mapa byla oříznuta hranicí povodí VN Vrchlice na základě ZVM 1:50 000. Ponechány byly celky zemědělsky půdy – TTP a orná rozdělená na jednotlivé lány.
3. Výpočet LS faktoru pomocí USLE2D (parametry: multiple flow, rovnice McCool 1989, prostupnost hranic 0%) na základě obou vstupních vrstev.

4.2.2.4 Land Cover a C faktor

Mapa využití území byla získána vyhodnocením zdrojového družicového snímku (Landsat TM). Jedná se o scénu z června roku 1997. Scéna obsahuje sedm spektrálních pásem v rozlišení 20 metrů, z nichž šest bylo využito pro klasifikaci. Cílem bylo vytvoření mapy využití území obsahující v jednotlivých třídách základní typy povrchu – intravilán (nelze vyhodnotit automaticky, jeho získání je popsáno dále), vodní plochy, les, louky (TTP) a zemědělské pozemky orné půdy (v ideálním případě rozdělené podle jednotlivých plodin).

Poznámka: Ideální předpoklad získání skutečných plodin na jednotlivých pozemcích orné půdy musel být opuštěn, neboť v daném období (začátek léta) kdy byl snímek pořízen nejsou jednotlivé plodiny jednoznačně rozlišitelné. Navíc v rámci osevních postupů se plodiny na pozemcích střídají a stav z roku 1997 se nepodařilo rekonstruovat. Proto byla zvolena cesta získání skutečných osevních postupů (výměr pro jednotlivé roky) a jejich průměrování na celé ploše.

Vyhodnocení snímku bylo provedeno pomocí GIS software PCI Easy/Pace a probíhalo následujícím způsobem (kapitola 3.3.2):

1. Terénní průzkum v povodí – v jeho rámci bylo do mapy 1:25 000 vyznačeno cca 300 pozemků rozprostřených v povodí a zaznamenán jejich skutečný vegetační pokryv v ročním období odpovídajícím době pořízení snímku (červen). Průzkum se soustředil především na jednoznačnou klasifikaci a popis aktuálního stavu základních kategorií využití (TTP, orná, lad,…).
2. Výběr a úprava trénovacích ploch na družicovém snímku (při zobrazení v nepravých barvách vhodně odlišujícím důležité kategorie povrchu) – přitom bylo

podle různého charakteru odrazivosti vybráno 18 různých kategorií trénovacích ploch (1 kategorie vodních ploch, 3 různé kategorie TTP, 12 kategorií orné půdy, 2 kategorie lesa a kategorie nevyhodnocených ploch).

3. Nastavení důležitosti jednotlivých kategorií. Kontrola prolínání a nastavení přesné pozice trénovacích množin.
4. Provedení automatické klasifikace – způsob "Maximum likelihood".
5. Filtrace vytvořené vrstvy za účelem odstranění nahodilých nesrovnalostí ve vyhodnocení nevyrovnaně odrazivých pozemků (pomocí filtru MODE na matici 5x5 elementů).
6. Oříznutí vytvořené mapy využití území podle hranic povodí s přesahem 500 metrů za rozvodnici, pro zachování kontinuity hraničních pozemků.
7. Ruční odstranění špatně vyhodnocených elementů v linii plynovodu – jeho výstavba se v době snímkování výrazně promítla do odrazivosti scény, podle terénního průzkumu přitom v současné době vedení odtokové poměry nenarušuje a na povrchu není patrné. Buňky byly přiřazeny odpovídajícím půdním celkům v jejich okolí.
8. Manuální klasifikace intravilánu (automaticky nelze pro jeho „roztříštěnou" odrazivost) nad leteckou ortofotomapou (rozlišení 1 m) – hranice vesnic byly digitalizovány a příslušné polygony potom rastrovány do mapy využití území jako nová kategorie.
9. Manuální odstranění nahodilých jednotlivých elementů ve větších půdních celcích, které nebyly dostatečně eliminovány předchozí filtrací (například buňky v těsném okolí doplněného intravilánu „zasažené" jeho odrazivostí, elementy orné půdy nesprávně zařazené do odlišné kategorie vlivem zvýšené povrchové vlhkosti, některé špatně vyhodnocené elementy na hranici jednotlivých tříd, apod.)
10. Sloučení některých kategorií (například kategorie TTP byly společně převedeny na jednu kategorii luk, některé kategorie orné byly přiřazeny k jejich zastřešujícím, atd.)
11. Převedení výsledné vrstvy do formátu IDRISI pro další využití v rámci výpočtu.

Výsledkem je mapa využití území (**Obr. 3.3.2–3**) obsahující:

- Vesnice
- Vodní plochy (případně toky z vektorové databáze)
- Louky
- Lesy
- Zemědělské pozemky orné půdy – bez uvedení plodin, ale rozdělené pomocí několika kategorií na jednotlivé oddělené pozemky (lány), s jednoznačně definovanými hranicemi (možno považovat např. za cesty, silnice apod.) takže je možné přiřazovat pozemkům plodiny například v rámci scénářů

Tato vrstva byla následně využita ke třem účelům:

- Jako vrstva pozemků pro výpočet topografického LS faktoru pomocí USLE2D (kapitola 4.2.2.3)
- Pro vytvoření vrstvy faktoru ochranného vlivu vegetace (C faktor)
- Jako jeden ze zdrojů pro vytvoření vrstvy odtokových součinitelů CN v rámci určení poměru odtoku SDR.

Vytvoření **mapy C faktoru** potom probíhalo následujícím způsobem:

Ing. J. Ošlejšková (VÚV TGM, Brno) získala a poskytla k využití skutečné osevní postupy ze dvou klíčových družstev v povodí (Chlístovice a Janovice) z let 1995 až 2001. Z těchto souborů byl vytvořen dlouhodobý průměrný osevní postup na orné půdě v povodí (s nutným předpokladem, že ve zbytku povodí hospodaří obdobným způsobem).

Průměrný osevní postup a hodnoty C-faktoru přiřazené jednotlivým plodinám jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 4.2.2–1**).

Tabulka 4.2.2–1: Průměrný osevní postup a hodnoty C faktoru přiřazené jednotlivým plodinám

plodina	zastoupení na celkové ploše orné půdy	C (bezrozm.)
Pšenice ozimá	35,9%	0,12
Řepka	15,6%	0,22
Kukuřice na siláž	10,9%	0,6
Ječmen ozimý	10,6%	0,17
Jetel	10,4%	0,05
Ječmen jarní	5,2%	0,15
Kukuřice na zrno	1,1%	0,60
Žito	4,1%	0,17
Pšenice jarní	1,6%	0,11
Oves	0,4%	0,10
Brambory pozdní	0,3%	0,44

Poznámka: Nejprve byla snaha přiřadit jednotlivým pozemkům konkrétní plodiny, tak aby jejich celkové zastoupení v povodí odpovídalo průměrnému osevnímu postupu. Při nahodilém rozmístění plodin došlo ale k výrazným nerovnoměrnostem v odtocích z některých menších podpovodí. Řešením by bylo definovat tolik scénářů využití území s rozmístěním plodin, aby každý pozemek byl zatížen každou možnou plodinou a to v poměru, odpovídajícím zastoupení plodiny v osevním postupu. Představovalo by to ovšem mnohonásobné a neadekvátní opakování výpočtu. Proto byla nakonec určena na základě uvedeného osevního postupu určena celková průměrná hodnota faktoru ochranného vlivu vegetace pro ornou půdu a byly zachovány pouze skutečné pozemky TTP (louky) s odlišnou hodnotou C.

Výsledné použité hodnoty C-faktoru tedy jsou:

- Orná půda (v celém povodí): C = 0,200
- TTP (louky) C = 0,005

Lesy, intravilán a vodní plochy jsou z výpočtu ztráty půdy vyloučeny.

Tyto hodnoty byly přiřazeny jednotlivým kategoriím na základě mapy využití území a byla tak vytvořena mapa C-faktoru použitá v dalším výpočtu v rámci podrobného řešení i pro výpočet pomocí simulačního modelu Watem/SEDEM.

Poznámka: V rámci některých scénářů možného využití území byly potom rozšiřovány plochy TTP podle jednotlivých návrhů, a tím zvětšovány plochy s hodnotou faktoru C= 0,005.

4.2.3 Poměr odnosu SDR

Poměr odnosu (SDR) byl určován dle vztahu (2.1.4–1) (Williams, 1977). Výsledné hodnoty poměru odnosu SDR pro jednotlivá povodí uvádí (**Tabulka 4.2.3–1**).

Tabulka 4.2.3–1: Výsledné hodnoty poměru odnosu pro jednotlivá povodí

Číslo povodí	Plocha povodí pro určení CN (km^2)	CN průměrná	Reliéfový poměr	**SDR**
-021	15.457	69.94	7.32	**0.237**
-022	10.086	71.29	7.71	**0.279**
-023	1.664	69.17	12.20	**0.335**
-024	13.468	73.25	11.09	**0.359**
-025	0.802	72.03	24.00	**0.573**
-026	9.928	74.78	11.02	**0.413**
-027	1.106	75.00	25.94	**0.711**
-028	24.940	72.10	6.51	**0.256**
-029	2.673	74.95	14.69	**0.528**
-030	6.871	70.34	14.78	**0.341**
-031-1	9.330	71.65	30.30	**0.475**

Jednotlivé parametry vztahu (2.1.4–1) byly získány následujícím způsobem:

Plocha jednotlivých povodí 4. řádu byla získána výpočtem v GIS na základě rastrové vrstvy jednotlivých povodí, odvozené ze ZVM 1:50 000. Takové plochy se nepatrně liší od hodnot uváděných přímo v ZVM, ale odchylky jsou nepatrné (jednotky %). Výpočet ploch v rastrovém GIS je velmi jednoduchá operace.

Reliéfový poměr (4.1.4–1) byl vypočten v tabulce na základě nadmořských výšek uzávěrových profilů jednotlivých povodí (H_{min}), průměrných výšek jejich rozvodnic ($H_{rozvodnice}$) a nejdelších odtokových drah (L).

Hodnoty H_{min} a $H_{rozvodnice}$ byly získány obdobným způsobem jako v případě řešení pro celou ČR (kapitola 4.1.4.2), pouze pro podrobnější vstupy v rozlišení 20 m.

Hodnoty nejdelších odtokových drah byly pro každé povodí 4. řádu odečteny manuálně nad vrstevnicovou mapou pomocí měřítka v prostředí GIS ArcView. Tyto hodnoty jsou samozřejmě přesnější (a též vyšší) než zjednodušeně získané hodnoty v generelním řešení.

Vytvoření informační vrstvy hodnot **čísel odtokových křivek CN** v praxi znamenalo kombinaci vrstvy Land Cover a půdní mapy BPEJ (resp. mapy hydrologických skupin půd). Každé z nich byly předem přiřazeny doporučené hodnoty z metodiky (Janeček a kol., 1992). Pro kategorii orné půdy v mapě využití území byly určeny průměrné hodnoty CN pro jednotlivé hydrologické skupiny, a to na základě průměrného osevního postupu využitého i při tvorbě vrstvy C faktoru (**Tabulka 4.2.2–1**). Přiřazované hodnoty CN na

základě kombinace vrstev půdní mapy a mapy využití území jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 4.2.3–2**).

Tabulka 4.2.3–2: Přiřazované hodnoty CN na základě kombinace půdní mapy a využití pozemku

hydrologická skupina	A	B	C
orná půda	65	76	84
ttp	32	59	72
vesnice	59	74	82
les	38	60	73
voda	100	100	100

Posledním krokem byla extrapolace průměrné hodnoty CN příkazem EXTRACT pro každé dílčí povodí. Získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 4.2.3–1**).

Na základě poměru odnosu SDR a celkové ztráty v jednotlivých povodích 4. řádu (kapitola 4.2.2) bylo vypočteno průměrné transportované množství sedimentu do vodních toků v rámci jednotlivých povodí (**Tabulka 4.2.3–3**). To bylo dále ještě třeba redukovat poměrem zachycení v průtočných nádržích povodí.

Tabulka 4.2.3–3: Ztráta půdy a transport sedimentu z povodí VN Vrchlice.

číslo povodí	Plocha povodí (km^2)	Celková ztráta půdy ($t.povodí^{-1}.rok^{-1}$)	Poměr odnosu SDR	Transport sedimentu v rámci povodí ($t.povodí^{-1}.rok^{-1}$)
-021	15.457	1 414	0.237	335
-022	10.086	1 249	0.279	349
-023	1.664	296	0.335	99
-024	13.468	3 820	0.359	1 372
-025	0.802	204	0.573	117
-026	9.928	2 712	0.413	1 121
-027	1.106	650	0.711	462
-028	24.940	6 390	0.256	1 633
-029	2.673	1 019	0.528	538
-030	6.871	1 843	0.341	629
-031-1	10.293	3 852	0.475	1 831
Celé povodí VN		**23 451**		**8 486**

4.2.4 Zachycení sedimentu v nádržích

Pro výpočet zachycení sedimentu v nádržích v povodí VN Vrchlice byla využita jednoduchá metoda Bruneho křivek (kapitola 2.1.4.2, Obr. 2.1.4–4).

V prvním kroku bylo třeba odhadnout parametry nádrží v jednotlivých povodích, které budou zahrnuty do výpočtu. Vybrány byly vodní nádrže, které nad sebou mají v povodí alespoň určitý podíl orné půdy, jsou průtočné (nikoliv boční) a z hlediska velikosti povodí jsou významné – mají plochu hladiny alespoň 1 ha. Zanedbány tak byly nádrže s výrazně lesním povodím, nádrže boční, nádrže velmi malé a nádrže pramenní, na hranici povodí.

Pro nádrže zahrnuté do výpočtu bylo třeba zjistit objem zásobního prostoru. Ten byl u větších nádrží odečten přímo ze ZVM 1:50 000, kde je uveden. U nádrží menších pak byl spočten z orientačního vztahu V = 1/3*S*H, kde S je plocha hladiny a H je maximální hloubka vody u hráze. Tyto hodnoty byly buď převzaty ze ZVM 1:50 000 nebo odhadnuty při terénním průzkumu.

Tabulka (**Tabulka 4.2.4–1**) uvádí přehled zahrnutých nádrží včetně jejich odhadnutých parametrů, následující tabulka (Tabulka 4.2.4–2) shrnuje postup určení celkového poměru zachycení v jednotlivých povodích dle (Brune, 1953).

Tabulka 4.2.4–1: Přehled nádrží a rybníků zahrnutých do výpočtu

Číslo povodí	nádrže	Plocha nádrží (ha)	Hloubka vody (m)	Objem vody (m^3)	Celkový objem (m^3)
-021	Vidlák	6,7	3,0	105 000	
	Podvesní	1,6	2,5	18 000	
	Svěcený	8,0	3,0	170 000	293 000
-022					
-023					
-024	Krsovický	3,8	2,0	38 000	
	Chroustkov	1,5	2,0	11 000	49 000
-025					
-026	Podskalák	1,2	3,7	15 000	
	Albrechtice	4,0	3,0	40 000	55 000
-027					
-028	Vačkář	1,7		10 000	
	Pracný	1,3		13 000	
	Opatovický	2,0		20 000	
	Mlýnský	2,3	3,0	23 000	
	Březovský	9,0		130 000	
	Prosík	3,1		37 000	233 000
-029	Hamerský	7,6	3,8	97 000	97 000
-030					
-031-1	Vrchlice			8 400 000	8 400 000

Na základě vypočteného poměru zachycení sedimentu v nádržích bylo celkové transportované množství sedimentu redukováno a pomocí schématu transportu z jednotlivých povodí (**Obr. 4.2.2–1**) bylo určeno celkové množství sedimentu v uzávěrových profilech povodí 4. řádu. Dále bylo na základě daného schématu určeno množství sedimentu zachycené v jednotlivých nádržích povodí, zejména v Hamerském rybníce a ve VN Vrchlice. Vypočtené průměrné roční hodnoty jsou shrnuty v tabulce (Tabulka 4.2.4–2).

Z průměrných ročních hodnot zachyceného množství sedimentu byla dále vynásobením provozní dobou nádrží určena celková předpokládaná zachycená množství sedimentu (**Tabulka 4.2.4–3**). Tyto hodnoty byly poté v rámci verifikace výpočtu porovnávány se skutečným měřeným množstvím sedimentu v obou nádržích (kapitola 5.2.3).

Tabulka 4.2.4–2: Výpočet celkového poměru zachycení jednotlivých povodí 4. řádu dle Bruneho

číslo povodí	F (km^2)	F (%)	Q_a dle plochy (l/s)	Qa kumul. (l/s)	V(m^3)	roční odtok ΣQ (m^3)	poměr V/ΣQ	% zachycení
-021	15,46	0,16	69,8	69,8	293000	2199566	0,13	88,00
-022	10,09	0,10	45,5	45,5	0	1435261	0,00	0,00
-023	1,66	0,02	7,5	122,8	0	3871618	0,00	0,00
-024	13,47	0,14	60,8	60,8	49000	1916537	0,03	68,00
-025	0,80	0,01	3,6	187,2	0	5902272	0,00	0,00
-026	9,93	0,10	44,8	44,80	55000	1412781	0,04	70,00
-027	1,11	0,01	5,0	237,0	0	74724345	0,00	0,00
-028	24,94	0,26	112,5	112,5	233000	3549030	0,07	82,00
-029	2,67	0,03	12,1	361,5	97000	11401828	0,01	45,00
-030	6,87	0,07	31,5	31,5	0	991681	0,00	0,00
-031-1	10,29	0,11	46,5	439,00	8400000	13844304	0,61	97,00

F (km^2) – plochy jednotlivých povodí, určené vypočtené pomocí GIS nad rastrovou vrstvou povodí
F (%) – procentické vyjádření podílu plochy daného povodí k ploše celého povodí VN Vrchlice
Q_a dle plochy – průměrný roční odtok z povodí vypočtený dle poměrné plochy povodí
Q_a kumulovaný – průměrný roční průtok v uzávěrovém profilu daného povodí
V (m^3) – objem vody ve vodních nádržích v celém povodí
Roční odtok ΣQ (m^3) – kumulovaný roční průtok uzávěrovým profilem povodí za rok
Poměr V/ΣQ – vstupní hodnota pro odečet dle Bruneho křivky (
)
% zachycení – odečtená hodnota udávající podíl částic zachycených v nádrži z celkového vstupujícího množství

Tabulka 4.2.4–3: Schéma transportu sedimentu do nádrže. Zvýrazněné řádky označují uzávěrové profily Hamerského rybníka a VN Vrchlice.

číslo povodí	F (km^2)	procento zachycení v nádržích	vstup sedimentu z povodí 4. řádu ($t.rok^{-1}$)	zachyceno ($t.rok^{-1}$)	pokračuje ($t.rok^{-1}$)
-021	15.46	88.00	334.81	294.63	40.18
-022	10.09	0.00	349.05	0.00	349.05
-023	1.66	0.00	99.17	0.00	488.40
-024	13.47	68.00	1 371.77	932.81	438.97
-025	0.80	0.00	116.96	0.00	1044.33
-026	9.93	70.00	1 120.72	784.50	336.22
-027	1.11	0.00	462.26	0.00	1842.80
-028	24.94	82.00	1 633.01	1339.07	293.94
-029	2.67	45.00	538.47	1203.84	1471.37
-030	6.87	0.00	629.19	0.00	629.19
-031-1	10.29	97.00	1 831.42	3814.02	117.96

Tabulka 4.2.4–4: Shrnutí výsledků výpočtu transportu sedimentu a odhadu množství sedimentu v Hamerském rybníce a VN Vrchlice.

Výpočet	VN Vrchlice	Hamerský rybník
Objem sedimentu vstupující ročně do nádrže ($t.rok^{-1}$)	3 931	1 632
Poměr zachycení podle Bruneho	0.97	0.82
Objem zachyceného sedimentu ($t.rok^{-1}$)	3 814	1 339
Sediment pokračující dále po toku ($t.rok^{-1}$)	118	293
Objemová hmotnost sedimentu ($g.cm^{-3}$)	1.1	1.25
Objem ročně uloženého sedimentu ($m^3.rok^{-1}$)	3 468	1 071
Trvání nádrže (rok)	32	31
Celkový objem uloženého sedimentu (m^3)	110 976	33 212
Objem sedimentu na základě měření (m^3)	125 000 až 140 000	32 470

4.3 Watem/SEDEM 2.1.0 – aplikace v povodí VN Vrchlice

Pro účel citovaných projektů (Dostál a kol., 2002b; Dostál a kol., 2003f) byla pro uvedené území shromážděna řada vstupních podkladů. Byl počítán transport sedimentu z povodí pomocí USLE a SDR (kapitola 4.2) a rovněž pomocí původní verze modelu Watem/SEDEM 2.0 (Dostál a kol., 2002b). Koordinátor úkolu VaV/510/4/98 – VÚV TGM – souhlasil s využitím shromážděných dat v rámci dalšího výzkumu a zde je nyní předkládán revidovaný výpočet transportu sedimentu z povodí s využitím nového modelu Watem/SEDEM 2.1.0 (kapitola 2.2), dostupných podkladů a v rámci dizertační práce testovaných postupů přípravy vstupních dat (kapitola 3).

4.3.1 Vstupní data

Model Watem/SEDEM 2.1.0 vyžaduje jako vstupní data rastrové vrstvy formátu GIS Idrisi32. Jedná se zejména o DMT, mapu pozemků se zahrnutím infrastruktury a vodních toků, mapu vodních toků včetně jejich topologie a jednotlivé vrstvy parametrů USLE (kapitola 2.2.4).

Povodí VN Vrchlice je rozděleno na celkem 11 dílčích povodí 4. řádu. Základní morfologické charakteristiky povodí jsou shrnuty v tabulce (**Tabulka 4.2.1–1**).

Pro řešení bylo vybráno rozlišení rastrových vstupních vrstev 20 m (**Tabulka 4.2.1–2**), přičemž pro většinu kroků byly využity vrstvy připravené v rámci řešení pomocí USLE+SDR (kapitola 4.2). Jedná se o následující převzaté vrstvy:

- DMT – na základě DMÚ 25 (kapitola 2.2.4.1)
- R faktor – na základě 4 stanic pro ČR (kapitola 2.2.4.5), převeden do jednotek SI ($MJ\ mm\ m^{-2}\ h^{-1}$)

- C faktor – na základě Landsat TM a průměrných osevních postupů (kapitola 2.2.4.4)
- K faktor – na základě mapy BPEJ (kapitola 2.2.4.4) v jednotkách SI (t.h/MJ.mm)

Z dostupných zdrojů byly nově připraveny vrstvy:

- Pozemky (na základě mapy využití území) podle (kapitola 2.2.4.2)
- Vodní toky (kapitola 2.2.4.3)
- Topologie vodních toků – soubor *.rou připraven manuálním sestavením odtokového schématu toků (kapitola 2.2.3.2)
- Vodní nádrže – na základě mapy využití území, a korigováno podle mapy vodních toků (kapitola 2.2.3)

4.3.1.1 Pozemky

Mapa pozemků vychází plně z mapy využití území (**Obr. 3.3.2–3**) vytvořené pro výpočet pomocí USLE+GIS (kapitola 4.2). Pro výpočet pomocí Watem/SEDEM 2.1.0 bylo nicméně nutno přiřadit jednotlivým kategoriím povrchu požadované identifikátory (kapitola 2.2.4.2) a zahrnout potřebné nádrže a vodní toky.

Pro samotnou vrstvu pozemků není v současné verzi programu kvalita a přesná pozice nádrží klíčová, důležitá je návaznost vodních toků, které nesmí být přerušeny žádnou jinou kategorií (musí být na vrstvu pozemků vloženy jako poslední). Nicméně vzájemná pozice nádrží a vodních toků jako samostatných vrstev zásadně ovlivňuje kvalitu výpočtu, a proto musí být nejprve kvalitně vytvořeny tyto samostatné vrstvy (kapitola 4.3.1.2) a teprve následně těmito opravenými vrstvami doplněna mapa pozemků tak, aby všechny zdrojové vrstvy byly v souladu.

Na základě dosavadního testování lze jednoznačně konstatovat, že nelze bez úprav použít vrstvy vodních toků z dostupných komerčních databází. Při výpočtu pomocí USLE+SDR není kvalita vrstvy vodních toků a nádrží klíčová, při výpočtu pomocí Watem/SEDEM je nejprve nezbytnými úpravami zajistit kompatibilitu zmiňovaných vrstev.

Při původní přípravě vrstvy nebyl využit modul „Create parcelmap“, který Watem/SEDEM 2.1.0 nabízí, pozemky byly vytvořeny OVERLAY procedurou v Idrisi, při dodržení správného pořadí dílčích vrstev. Modul byl nicméně otestován a při dodání správných vstupních vrstev je pro tvorbu pozemků využitelný.

4.3.1.2 Vodní toky a nádrže

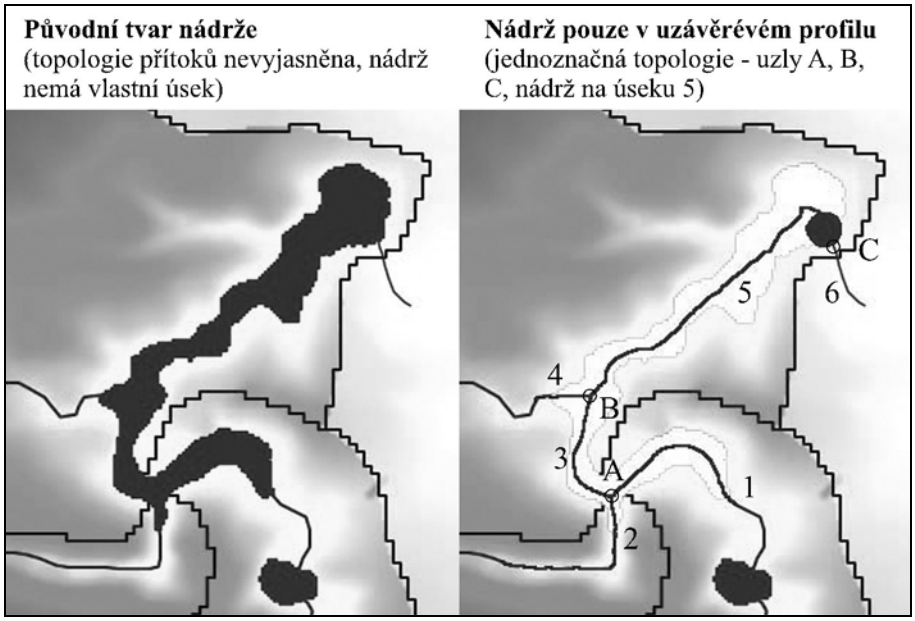
Vodní toky a nádrže byly připraveny přesně v souladu s postupem uvedeným ve vypracované metodice (kapitola 2.2.4.3). Při testování modelu Watem/SEDEM v povodí VN Vrchlice byly zjištěny následující skutečnosti (viz také kapitola 2.2.3.2).

Vodní toky musí mít správně vytvořenou topologii pomocí očíslování uzlů jednotlivých úseků toku. Rastrové toky musí být vytvořeny pouze v rámci řešeného povodí, bez zahrnutí ostatní sítě vodních toků mimo řešené území. Rovněž nádrže (ze souboru „ponds“) musí ležet pouze uvnitř řešeného území.

Před vytvořením topologie je třeba toky i uvažované nádrže upravit tak, aby byly kompatibilní s uvažovanými nádržemi:

- Průtočné nádrže musí spolehlivě protínat své přiřazené úseky toku – v rastru nejméně o 1 element přesahovat příslušný vodní tok v obou směrech. Pokud některé nádrže při využití zdrojových vrstev neodpovídají uvedenému požadavku, je třeba je manuálně upravit.
- Pod průtočnou nádrží je třeba přerušit příslušný úsek vodního toku a pokračovat novým úsekem (pomocí editace vrstvy toků). Přitom ke změně úseku nesmí dojít ještě pod plochou nádrže – úsek a nádrž musí být vzájemně jednoznačně definovány.
- Pokud má nádrž více přítoků, je třeba jejich topologii a jednoznačnost přítoku vyřešit změnou tvaru nádrže a jejím umístěním pouze na uzávěrový profil odtoku z nádrže tak, aby přítoky do nádrže tvořily logickou navazující síť úseků toku a do nádrže ústil pouze jeden výsledný přítok protékající nádrží. To je uvedeno na příkladu VN Vrchlice (Obr. 4.3.1–1). Zde se také ukazuje, že v některých případech program nerozliší územně blízké nádrže, přiřadí několika nádržím společný identifikátor, a tím je chybně řešena návaznost toků a nádrží. Proto je třeba zkontrolovat, že každá nádrž získá při výpočtu unikátní identifikátor, případně upravit tvar (redukovat plochu) nádrží tak, aby je program spolehlivě rozlišil. V případě povodí Vrchlice se jednalo např. o rybník Vidlák. Tvar obou částí nádrže (řešených samostatně) musel být manuálně opětovně ošetřen aby byly části programem rozlišeny.
- Boční nádrže a nádrže mimo vodní tok (poldry) je třeba v rastru jednoznačně oddělit od vodních toků, aby v nich nedocházelo k zachycení sedimentu z příslušného vodního toku.

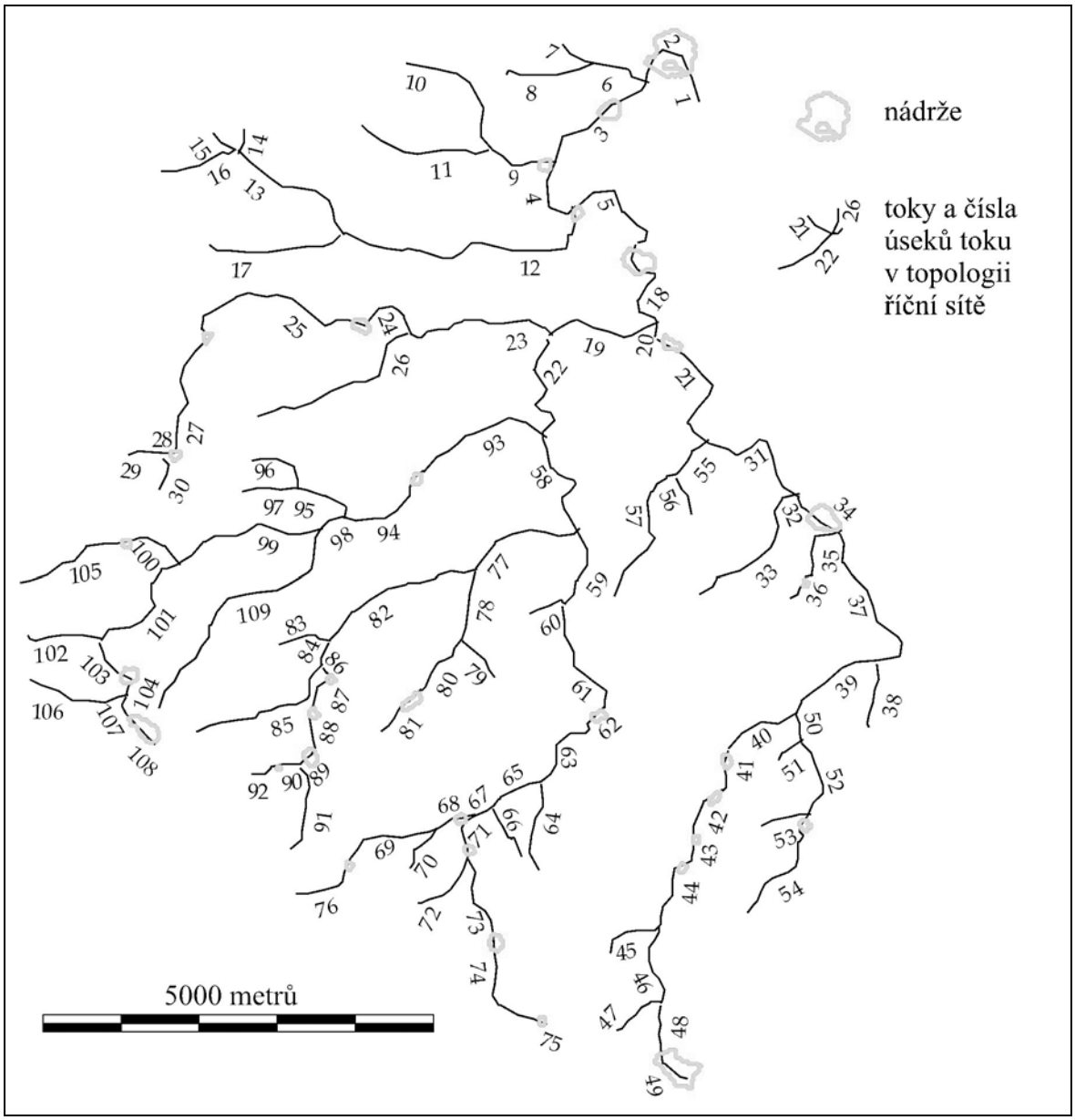
Obr. 4.3.1–1: Úprava tvaru VN Vrchlice a topologie jejích přítoků pro výpočet transportu sedimentu pomocí Watem/SEDEM 2.1.0.



Při výpočtu tedy celé povodí VN Vrchlice není děleno na žádná podpovodí, ale je určován transport sedimentu do příslušných úseků vodních toků v povodí. Kompletní schéma vodotečí s čísly jednotlivých úseků (**Obr. 4.3.1–2**) koresponduje s výsledkovými tabulkami transportu sedimentu z povodí (**Tabulka 4.3.2–2**) a s vypočteným souborem

„vrchlice.rou“, kde je na základě topologie určeno pořadí následovníků a řád jednotlivých vodotečí v rámci povodí.

Obr. 4.3.1–2: Schéma vodních toků v povodí VN Vrchlice a jejich čísel na základě výpočtu topologie (souboru „vrchlice.rou“) v programu Watem/SEDEM 2.1.0.



Připravené vodní toky a nádrže jsou zadány do výpočtu. Nádržím přiřadí Watem/SEDEM jednotlivé identifikátory, jež korespondují s výslednými hodnotami v tabulkách uvedenými v následujících kapitolách.

4.3.2 Výpočet

Po přípravě uvedených vstupních dat byl proveden výpočet ztráty půdy a transportu sedimentu. Při prvním výpočtu byly dosazeny parametry modelu doporučené na základě konzultací s tvůrci modelu (kapitola 2.2.4). Při výpočtu se ukázalo, že novou verzí modelu Watem/SEDEM 2.1.0 při uvedených původních parametrech je výsledné množství

sedimentu transportované vodními toky do nádrží značně nadhodnoceno (**Tabulka 4.3.2–1**). Na základě provedených analýz má uvedené nadhodnocení několik příčin:

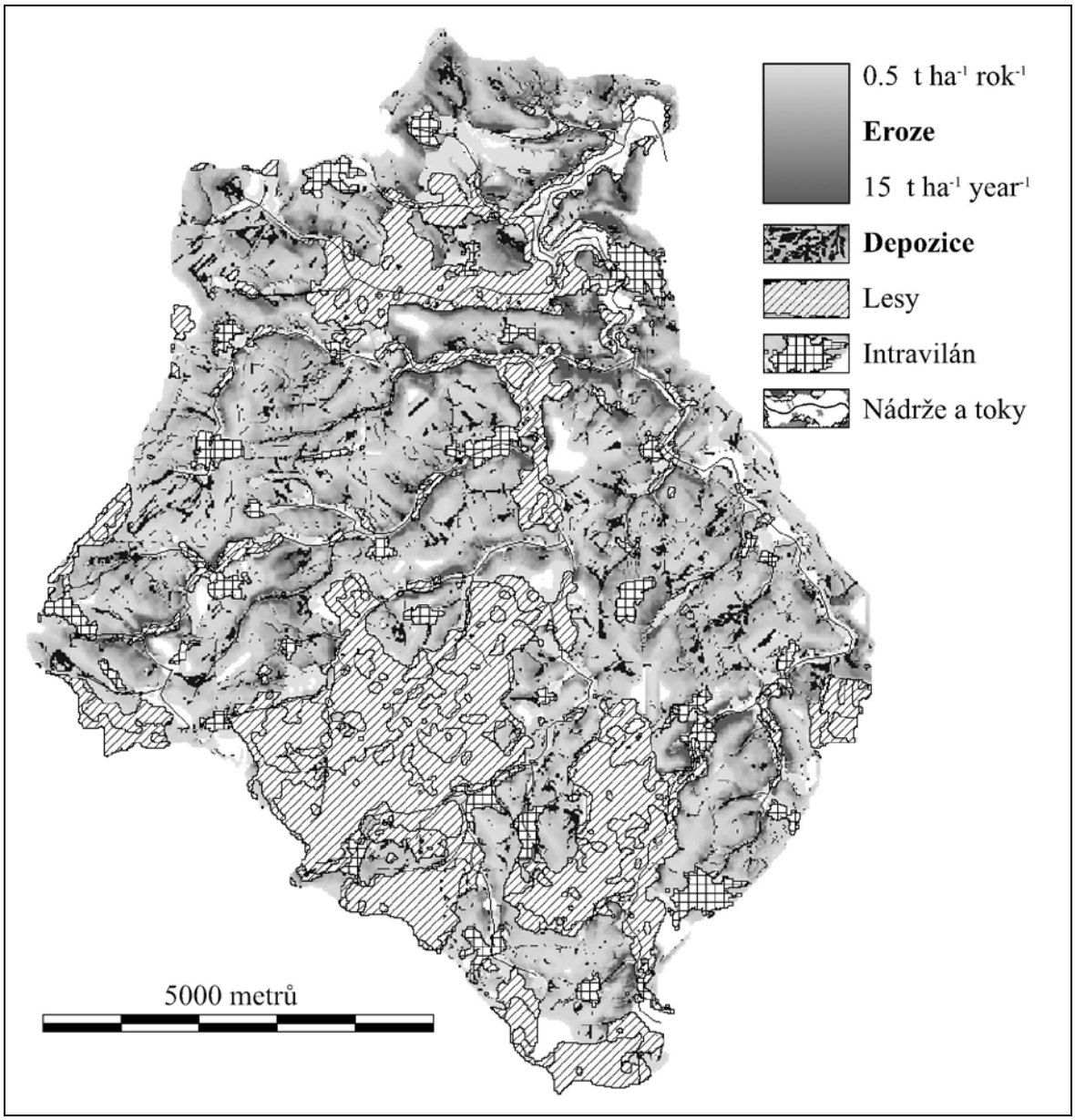
- Modifikovaný algoritmus pro výpočet LS faktoru (nyní i pro výpočet L je preferována rovnice McCool, 1989, a pouze Multiple Flow, oproti dřívějšímu Flux Decomposition) vede k plošně vyšším hodnotám LS faktoru, především vlivem plošně preferovaného odtoku algoritmem Mutiple Flow na bezpečně bezodtokově ošetřeném DMT. Při výpočtu pomocí USLE2D navíc bývá zadána celková neprostupnost hranic pozemků, jež se liší od v Belgii nově používaných hodnot. Dále při výpočtu pomocí USLE2D vůbec není do výpočtu zahrnováno území lesů, jež nyní nepřispívá erozi, ale částečně převádí již nashromážděný odtok. Tuto možnost používaná varianta USLE nepostihuje.
- Dalším důvodem výrazného zvýšení hodnot sedimentu v nádržích, je nově dokonale zabezpečený bezztrátový převod sedimentu vodními toky. Tento systém přináší přehledný a přínosný pohled na úseky toku zatížené vstupem sedimentu, je ovšem třeba zohlednit správně poměr zachycení sedimentu v nádržích, a bylo by vhodné při dalším vývoji modelu zohlednit i zachycení v tocích. Původní verze modelu nedokázala sediment toky úspěšně provést, nová verze to naopak dokáže zcela, a tato změna přístupu si žádá novou důkladnou kalibraci. Počet zahrnutých vodních toků má signifikantní vliv na výsledek, bylo by tedy vhodné model kalibrovat i z hlediska velikosti vodoteče vhodné pro zahrnutí do výpočtu. Pro tento výpočet byly sice toky připraveny zcela nově, neboť dostupné komerční vektorové databáze nevyhovovaly nárokům na kvalitu toků, nicméně nebylo dosud ověřeno v terénu, zda všechny použité toky jsou trvalé a zda se skutečně podílí na „bezztrátovém“ přenosu splavenin. Zde je tedy nutná kalibrace, aby databázový přenos sedimentu vodotečemi nevedl k indukovanému výraznému nadhodnocení množství sedimentu doručeného do nádrží.
- Dále je samozřejmě nutná kalibrace hodnot transportních koeficientů, jež si ovšem žádá velký počet dostupných kalibračních a validačních povodí s měřeným objemem sedimentu na výstupu.
- Na chybách se samozřejmě může podílet i dosavadní míra nejistoty v některých parametrech USLE (zejména R faktoru) odvozených pouze nepřímo z nedostatečných zdrojů přesných dat.
- Zbývá podotknout, že samotný princip empirického výpočtu ve velkých povodích s sebou zákonitě nese značnou míru nejistoty z hlediska absolutních hodnot vypočtených veličin (objemů) a vždy je třeba robustní empirický výpočet využívat zejména k indikaci krizových míst a ohrožených území, k modelování možností zlepšení stavu území a jako podklad pro řešení konkrétních vytipovaných lokalit detailním přístupem.

Tabulka 4.3.2–1: Základní kalibrace parametrů modelu Watem/SEDEM 2.1.0 pro povodí VN Vrchlice. Hlavní výstupy modelu pro celé povodí (t.rok^{-1}) a hodnoty množství zachyceného sedimentu v nádržích (t.rok^{-1}). Původně nadhodnocené hodnoty jsou iterovány k měřeným hodnotám a výpočtu dle USLE+SDR.

Parametry výpočtu		**TSP**	**TSD**	**TSE**	**TRE**	**TPD**
Ptef	0-75-75	**41 159**	**19 960**	**2 298**	**1 082**	**18 902**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	100-200	Vrchlice	97	7 797	234	7 563
		Hamerský	45	6 955	3 825	3 130
Ptef	0-75-75	**39 888**	**21 626**	**1 874**	**827**	**16 389**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	70-100	Vrchlice	97	6 750	203	6 548
		Hamerský	45	6 100	3 355	2 745
Ptef	0-75-75	**38 561**	**22 556**	**1 589**	**672**	**14 416**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	45-70	Vrchlice	97	5 855	176	5 679
		Hamerský	45	5 464	3 005	2 459
Ptef	0-75-75	**37 301**	**22 825**	**1 408**	**579**	**13 067**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	5 246	157	5 089
		Hamerský	45	4 991	2 745	2 246
Ptef	10-85-80	**35 638**	**21 873**	**1 340**	**553**	**12 425**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	4 971	149	4 822
		Hamerský	45	4 744	2 609	2 135
Ptef	15-100-80	**34 716**	**21 386**	**1 299**	**538**	**12 031**
Pcon	10-75		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	4 793	144	4 650
		Hamerský	45	4 594	2 527	2 067
Ptef	15-100-80	**35 080**	**20 662**	**1 393**	**578**	**13 024**
Pcon	5-30		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	5 289	159	5 130
		Hamerský	45	4 918	2 705	2 213
Ptef	15-100-80	**33 257**	**20 933**	**1 188**	**512**	**11 136**
Pcon	50-80		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	4 405	132	4 273
		Hamerský	45	4 263	2 345	1 919
Ptef	15-100-80	**32 555**	**21 230**	**1 106**	**481**	**10 219**
Pcon	70-90		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	3 960	119	3 841
		Hamerský	45	3 933	2 163	1 770
Ptef	15-100-80	**32 217**	**22 397**	**1 019**	**435**	**8 801**
Pcon	80-100		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	3 212	96	3 116
		Hamerský	45	3 367	1 852	1 515
Ptef	15-100-80	**31 910**	**21 562**	**1 024**	**454**	**9 324**
Pcon	90-95		STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	3 545	106	3 438
		Hamerský	45	3 602	1 981	1 621

Ptef	Poměr zachycení typu pozemku (orná – les – TTP)
Pcon	Prostupnost hranic pozemku (na ornou – mimo ornou)
kTc	koeficient transportní kapacity (neerodivní povrchy – orná)
TSP	Celkový transport sedimentu v rámci plochy povodí
TSD	Celková depozice sedimentu v ploše povodí (mimo toky a nádrže)
TSE	Export sedimentu mimo povodí
TRE	Export sedimentu tokem, uzávěrovým profilem povodí
TPD	Celková depozice ve všech nádržích povodí
STE	Poměr zachycení dané nádrže
input	Celkový vstup sedimentu do nádrže
output	Celkový výstup sedimentu z nádrže
deposit	Celkové zachycené množství sedimentu v nádrži

Obr. 4.3.2–1: Export a depozice sedimentu v povodí VN Vrchlice podle programu Watem/SEDEM 2.1.0.



Po základní kalibraci (**Tabulka 4.3.2–1**) byly výsledný srovnávací výpočet využity následující parametry modelu (v závorkách jsou uvedeny výchozí nekalibrované hodnoty):

- PTEF: Orná půda = 15 (0)
  Les = 100 (75)
  TTP = 80 (75)
- Parcel connectivity Orná půda = 90 (10)
  Les a TTP = 95 (75)
- Rovnice pro výpočet LS McCool 1987, 1989
- Exponent délky svahu McCool 1987, 1989.
- kTc low (neerodivní povrchy): 35 (100)
- kTc high (erodivní povrchy): 55 (200)
- kTc limit = 0,1
- jednotky výstupu = $t.ha^{-1}$

Hlavní výsledné hodnoty ($t.rok^{-1}$) zobrazené výstupním menu programu (kapitola 2.2.5.1) poté jsou:

- Total sediment production = 31 910 $t.rok^{-1}$
- Total sediment deposition = 21 562 $t.rok^{-1}$
- Total sediment export = 1 024 $t.rok^{-1}$
- Total river export = 454 $t.rok^{-1}$
- Total pond deposition = 9 324 $t.rok^{-1}$

Výsledkem výpočtu je dále kromě mapy ztráty půdy obdobné výpočtu pomocí USLE zejména mapa transportu sedimentu nebo jeho depozice v jednotlivých elementech povodí (**Obr. 4.3.2–1**). Z této mapy je možno porovnáním z celkovou ztrátou půdy určit rovněž relativní poměr odnosu SDR příslušné části povodí.

Důležité jsou však především hodnoty transportu sedimentu do vodních toků a nádrží (**Tabulka 4.3.2–2**) (**Tabulka 4.3.2–3**). Z tabulek vyplývá i výsledné průměrné zachycené množství sedimentu v Hamerském rybníce a VN Vrchlice ($t.rok^{-1}$).

Tabulka 4.3.2–2: Množství sedimentu vstupující do vodních toků a transportované říční sítí. Přehled všech segmentů toků povodí VN Vrchlice (**Obr. 4.3.1–2**). V posledním sloupci je vždy dopočtena hodnota jednotkového vstupu sedimentu do daného úseku toku přímo z plochy povodí. Tedy množství sedimentu ($t.rok^{-1}$) vstupující do každé buňky daného úseku.

ID	nID	HI	UI	SO	Délka	RHI	ID	nID	HI	UI	SO	Délka	RHI
2	-2	22	3523	106	42	0.52	56	55	110	0	110	23	4.78
3	2	2	3214	3216	68	0.03	57	55	237	0	237	80	2.96
4	3	2	2546	2548	37	0.05	58	22	49	797	845	62	0.79
5	4	202	1981	2184	66	3.06	59	58	99	100	198	47	2.11
6	2	95	212	307	35	2.71	60	59	0	0	0	21	0.00
7	6	133	0	133	21	6.33	61	59	97	2	99	67	1.45

ID	nID	HI	UI	SO	Délka	RHI	ID	nID	HI	UI	SO	Délka	RHI
8	6	79	0	79	54	1.46	62	61	18	94	13	27	0.67
9	3	474	192	666	40	11.85	63	62	19	75	94	31	0.61
10	9	58	0	58	78	0.74	64	63	35	0	35	52	0.67
11	9	134	0	134	81	1.65	65	63	13	28	41	30	0.43
12	4	157	480	638	167	0.94	66	65	19	9	28	34	0.56
13	12	177	98	276	76	2.33	67	66	0	9	9	12	0.00
14	13	3	0	3	15	0.20	68	67	2	16	2	21	0.10
15	13	21	0	21	16	1.31	69	68	15	0	15	56	0.27
16	13	74	0	74	46	1.61	70	68	1	0	1	28	0.04
17	12	205	0	205	83	2.47	71	67	2	56	7	25	0.08
18	5	59	3543	1981	62	0.95	72	71	14	9	23	42	0.33
19	18	395	2908	3304	66	5.98	73	71	41	0	41	47	0.87
20	18	18	221	239	8	2.25	74	72	64	8	9	64	1.00
21	20	384	843	221	73	5.26	75	74	32	0	8	10	3.20
22	19	268	1759	2027	66	4.06	76	69	2	0	0	44	0.05
23	19	328	553	881	87	3.77	77	58	207	391	598	68	3.04
24	23	123	101	225	30	4.10	78	77	22	4	26	41	0.54
25	24	302	37	101	109	2.77	79	78	1	0	1	24	0.04
26	23	328	0	328	109	3.01	80	78	2	1	3	37	0.05
27	25	122	18	42	72	1.69	81	80	3	0	1	28	0.11
28	27	1	59	18	12	0.08	82	77	230	136	365	93	2.47
29	28	35	0	35	21	1.67	83	82	107	0	107	32	3.34
30	28	24	0	24	23	1.04	84	82	0	28	28	14	0.00
31	21	56	353	409	73	0.77	85	84	28	0	28	91	0.31
32	31	3	170	173	7	0.43	86	84	0	1	1	4	0.00
33	31	190	0	180	89	2.13	87	86	1	2	1	23	0.04
34	32	6	936	170	21	0.29	88	87	7	1	2	27	0.26
35	34	41	16	57	38	1.08	89	88	1	3	1	13	0.08
36	35	65	0	16	21	3.10	90	89	0	1	1	11	0.00
37	34	112	767	879	91	1.23	91	89	2	0	2	53	0.04
38	37	14	0	14	40	0.35	92	90	4	0	1	19	0.21
39	37	41	712	753	54	0.76	93	22	382	532	914	74	5.16
40	39	183	2	185	42	4.36	94	93	190	1471	532	59	3.22
41	40	7	3	2	25	0.28	95	94	63	94	157	34	1.85
42	41	14	5	3	30	0.47	96	95	34	0	34	38	0.89
43	42	27	54	15	20	1.35	97	95	60	0	60	33	1.82
44	43	16	284	54	42	0.38	98	94	14	1300	1313	11	1.27
45	44	20	0	20	35	0.57	99	98	175	608	784	90	1.94
46	44	56	208	265	47	1.19	100	99	15	35	49	27	0.56
47	46	158	0	158	29	5.45	101	99	325	234	559	67	4.85
48	46	50	0	50	26	1.92	102	101	96	0	96	49	1.96
49	48	1	0	0	24	0.04	103	101	138	26	164	18	7.67
50	39	46	481	527	17	2.71	104	103	37	45	26	21	1.76
51	50	109	0	109	15	7.27	105	100	109	0	35	73	1.49
52	50	184	188	372	46	4.00	106	104	40	0	40	61	0.66
53	52	146	0	146	30	4.87	107	104	4	1	5	10	0.40
54	52	231	0	42	70	3.30	108	107	3	0	1	19	0.16
55	21	87	348	434	24	3.63	109	98	516	0	516	145	3.56

ID číslo toku z vytvořené databáze segmentů toků

nID	číslo následujícího segmentu toku po proudu
HI	Množství sedimentu vstupující z břehů (Hillslope input)
UI	Množství sedimentu vstupující z předchozího segmentu toku (upstream input)
SO	Množství sedimentu pokračující do následujícího segmentu (sediment output)
Délka	Přibližná délka segmentu vyjádřená počtem elementů v rastru toků
RHI	Dopočtený jednotkový „hillslope input“ ($t.rok^{-1}.buňka\ toku^{-1}$)

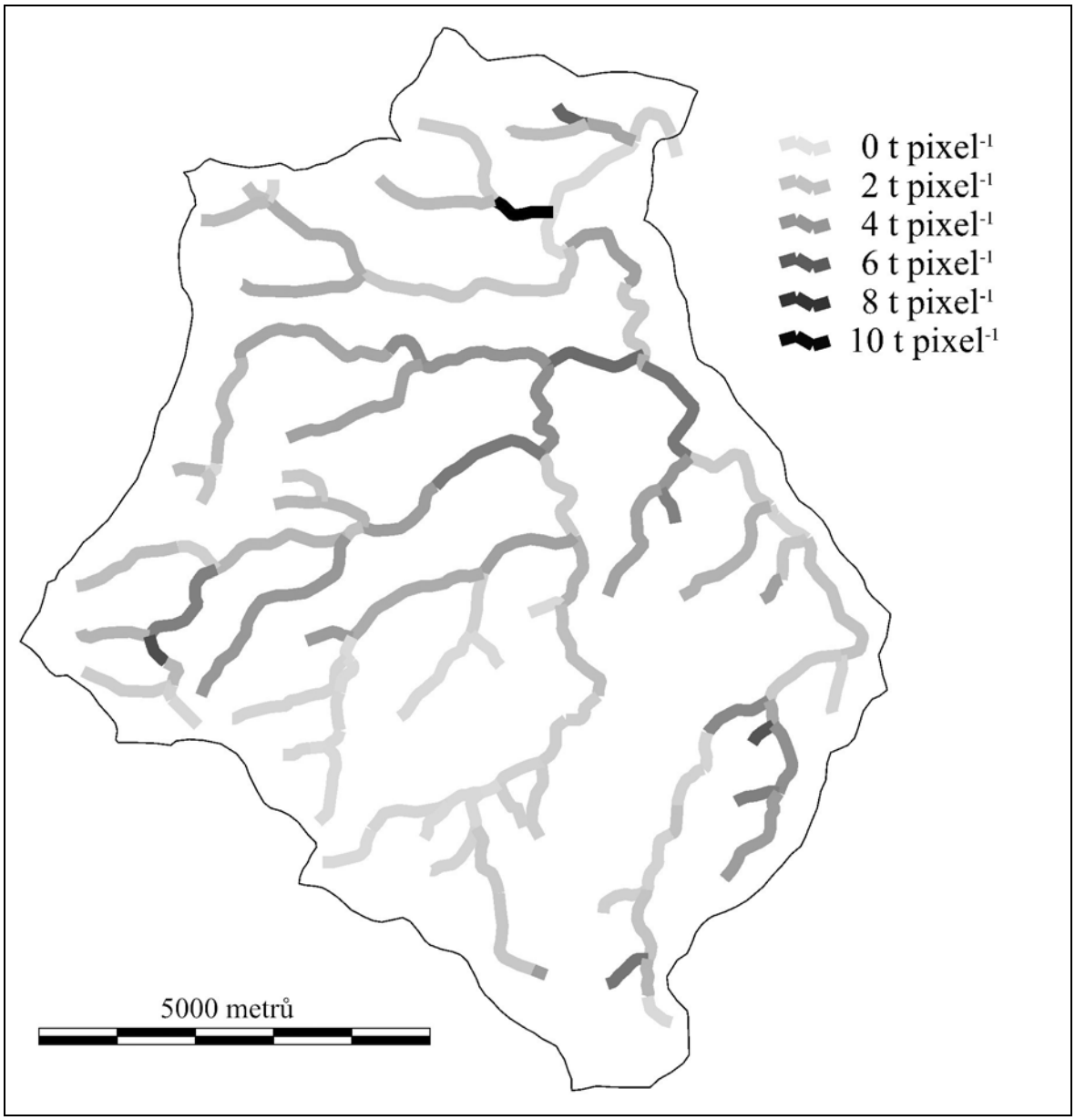
Tabulka 4.3.2–3: Množství sedimentu vstupující do nádrží a umístění nádrží podle modelu Watem/SEDEM 2.1.0.

Pond ID	Pond PTEF	input ton	output ton	deposition ton	on river	RiverID
1	97	3545	106	3438	TRUE	2
2	45	3602	1981	1621	TRUE	18
3	70	338	101	237	TRUE	25
4	70	140	42	98	TRUE	27
5	82	1228	221	1007	TRUE	21
6	70	60	18	42	TRUE	28
7	68	1661	532	1130	TRUE	94
8	82	943	170	773	TRUE	34
9	68	109	35	74	TRUE	105
10	75	65	16	49	TRUE	36
11	68	82	26	56	TRUE	104
12	75	2	1	2	TRUE	87
13	75	3	1	2	TRUE	81
14	75	8	2	6	TRUE	88
15	88	112	13	99	TRUE	62
16	68	3	1	2	TRUE	108
17	75	4	1	3	TRUE	89
18	82	11	2	9	TRUE	41
19	75	4	1	3	TRUE	92
20	82	19	3	16	TRUE	42
21	88	18	2	16	TRUE	68
22	82	231	42	189	TRUE	54
23	82	81	15	66	TRUE	43
24	88	58	7	51	TRUE	71
25	75	2	0	1	TRUE	76
26	82	300	54	246	TRUE	44
27	88	72	9	64	TRUE	74
28	75	32	8	24	TRUE	75
29	82	1	0	1	TRUE	49

Pond ID	Číslo nádrže přiřazené modelem během výpočtu
Pond PTEF	Poměr zachycení v nádrži (stanoven řešitelem)
input ton	Množství sedimentu vstupující do nádrže
output ton	Množství sedimentu vystupující z nádrže
deposition ton	Množství sedimentu zachycené v nádrži
on river	Umístění nádrže
RiverID	Číslo segmentu toku, na kterém leží daná nádrž

Uvedené tabulky mohou být užitečné k dalším analýzám. V tabulce (**Tabulka 4.3.2–2**) je přímo vidět, kolik sedimentu přichází do každého úseku toku z předchozího toku a kolik přímo ze svahů povodí. Lepším indikátorem erozní ohroženosti okolí (mezipovodí) daného úseku je vstup sedimentu na jednotku délky úseku (dlouhé úseky logicky obdrží více sedimentu z břehů). V rastrovém GIS jej lze snadno s poměrnou přesností nahradit množstvím sedimentu vstupujícím do 1 buňky daného úseku v rastru se zdrojovým rozlišením 20m. Tabulka (**Tabulka 4.3.2–2**) a mapa (**Obr. 4.3.2–2**) uvádí i toto porovnání. Účelným zavedením retenčních prvků a ploch kolem nejohroženějších břehových partií by tak bylo možno výrazně snížit zanášení toků a nádrží při minimalizaci nákladů na plošnou protierozní ochranu.

Obr. 4.3.2–2: Porovnání jednotlivých částí vodotečí v povodí VN Vrchlice z hlediska množství sedimentu přímo vstupujícího do toků z povodí (ohroženost na jednotku délky – 1 buňku 20*20m – toku).



Další možnosti využití modelu k odhadu vlivu účelových změn hospodaření na snížení zanášení jsou prezentovány v následující kapitole 4.3.3.

V závěrečné tabulce (**Tabulka 4.3.2–4**) je uvedeno porovnání vlivu podrobnosti vrstvy vodních toků na výpočet pomocí Watem/SEDEM 2.1.0. Závěrečné kalibrované hodnoty celkových výstupů modelu jsou porovnány s hodnotami získanými opakovaným výpočtem na modifikované – zjednodušené – vrstvě vodních toků. Vrstva toků byla upravena tak, že veškeré pramenné úseky toků (tedy nejmenší vodoteče) byly zkráceny na minimum a ve výpočtu byla ponechána hlavní síť toků nezměněna. Z porovnání je zřetelně vidět, že kvalita vrstvy vodních toků výpočet výrazně ovlivní. Při nezahrnutí nejmenších vodotečí je méně sedimentu doručeno až do toku a narůstá celková depozice v ploše povodí. To je dáno tím, že veškerý sediment, který dorazil i do nejmenších původních vodotečí, byl dále bezztrátově transportován říční sítí. Nyní, když se hustota a tedy i dostupnost říční sítě snížila, více sedimentu je zachyceno v povodí. Z toho vyplývá, že model bude třeba správně kalibrovat i pro vhodnou velikost vodotečí, kterou je již třeba zahrnout do výpočtu. V každém případě by do říční sítě měly být zahrnuty pouze trvalé vodoteče, jež jsou schopny transportovat doručený sediment.

Tabulka 4.3.2–4: Porovnání kvality vrstvy vodních toků na výpočet pomocí Watem/SEDEM 2.1.0. Hodnoty transportu sedimentu v $t.rok^{-1}$. Popis sloupců a parametrů tabulky souhlasí s (**Tabulka 4.3.2–1**).

Parametry výpočtu		**TSP**	**TSD**	**TSE**	**TRE**	**TPD**
Výsledný výpočet s původní podrobnou vrstvou vodních toků						
Ptef	15-100-80	**31 910**	**21 562**	**1 024**	**454**	**9 324**
Pcon	90-95	ID	STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	3 545	106	3 438
		Hamerský	45	3 602	1 981	1 621
Výpočet na zjednodušené vrstvě vodních toků						
Ptef	15-100-80	**32 219**	**24 519**	**899**	**319**	**6 801**
Pcon	90-95	ID	STE	input	output	deposit
kTc	35-55	Vrchlice	97	2 702	81	2 621
		Hamerský	45	2 998	1 649	1 349

4.3.3 Scénáře změny hospodaření v povodí

Z hlediska změn hospodaření a využití území může být pomocí rastrového GIS a modelu Watem/SEDEM vypočtena řada scénářů vlivu možných změn na erozní ohroženost a zanášení nádrží.

Uvedené scénáře pak mohou být účinným nástrojem k posouzení vlivu např. dotační politiky státu a regionů na změnu kvality prostředí a krajiny. Vypočtené scénáře (i s vědomím omezené přesnosti a vypovídací schopnosti výpočtu) ukazují, že účelná konverze vybraných kritických míst může vést k výrazné redukci negativního dopadu eroze a transportu sedimentu na krajinu vodní toky a povrchové vodní zdroje.

Možných scénářů je celá řada:

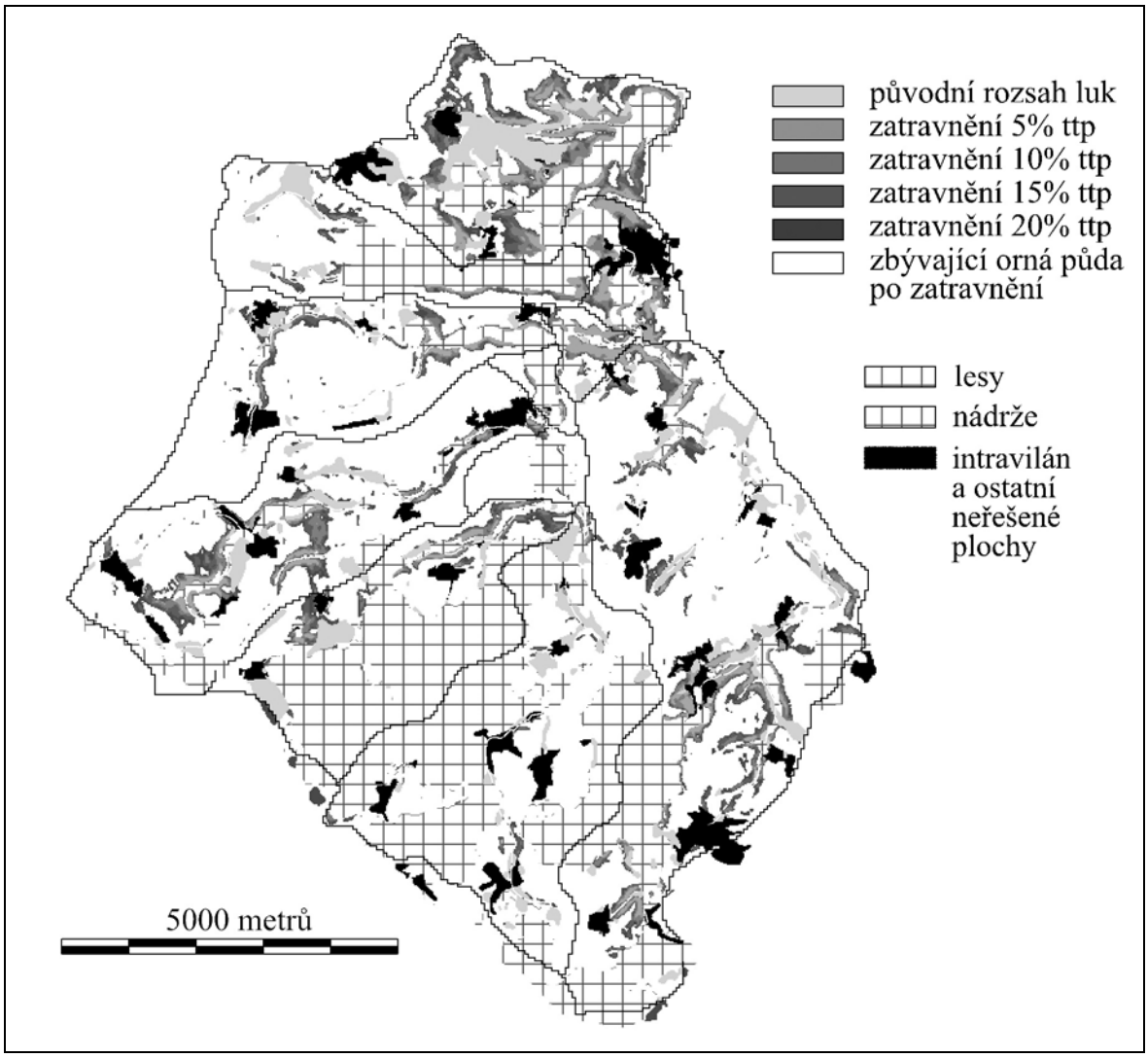
- Modelování plošné změny osevních postupů (tedy změny C faktoru USLE a hodnoty odtokových křivek z povodí) např. na základě subvence nebo jiného finančního zvýhodnění protierozně účinných plodin.
- Modelování konverze orné půdy na TTP nebo lesní plochy podle vybraného klíče, například veškeré plochy orné půdy přesahující určitý sklon (tedy opět erozně náchylných ploch).

- Modelování zatravnění na základě dotační politiky podporující konverzi určitého procenta plochy orné půdy v povodí. Zde lze opět předpokládat zatravnění nejsklonitějších partií pozemků, tedy nejméně vhodných míst k obdělávání.
- Atd.

Pomocí výpočtu USLE+SDR byly scénáře obdobného typu řešeny též v rámci projektu (Dostál a kol. 2002b). Zde bude prezentován vliv zatravnění nejsklonitějších pozemků podle plošného klíče. Výpočet bude proveden testovaným modelem Watem/SEDEM 2.1.0.

Bude hodnocen vliv zatravnění 5, 10, 15 nebo 20 procent veškeré orné půdy v povodí VN Vrchlice při předpokladu konverze nejsklonitějších pozemků. Nejprve je třeba v prostředí GIS Idrisi definovat plochy určené k zatravnění. To je provedeno vytvořením histogramu rastrové vrstvy procentního sklonu (podle DMT). Při získání četnosti elementů DMT (pouze na orné půdě) se změnou sklonu v rozmezí 0.01% stačí následně na základě uvedených celkových kumulovaných četností vybrat hodnoty sklonu přesahující 5 procent všech elementů (tedy řešené plochy), 10 % všech elementů, atd. (**Obr. 4.3.3–1**).

Obr. 4.3.3–1: Nárůst zatravněných ploch v povodí VN Vrchlice podle scénáře zatravnění v závislosti na sklonu pozemku.



Tabulka 4.3.3–1: Podíl orné půdy, přesahující daný sklon.

Procenta zatravněné plochy	sklon
5% plochy orné půdy zatravněno	10.45%
10% plochy orné půdy zatravněno	8.15%
15% plochy orné půdy zatravněno	6.94%
20% plochy orné půdy zatravněno	6.05%

Na základě získaných výměr stačí již v GIS reklasifikovat vrstvu sklonu podle uvedených hodnot do čtyř souborů nově vzniklých ploch TTP. Tyto nové vrstvy jsou poté opravně vloženy do vrstvy pozemků a vrstvy C faktoru s novými hodnotami pro kategorii TTP (**Obr. 4.3.3–1**).

Je vidět, že nejsklonitější pozemky orné půdy jsou obvykle v sousedství půdy již aktuálních luk, případně podél vodotečí a konverze takových ploch (poměrně souvisle narůstajících i při uvedeném automatickém výběru) je poměrně logickým krokem.

Pro uvedené 4 varianty zdrojových vrstev byl poté vždy opakován výpočet transportu sedimentu pomocí Watem/SEDEM 2.1.0. Ostatní vstupní vrstvy zůstaly beze změny.

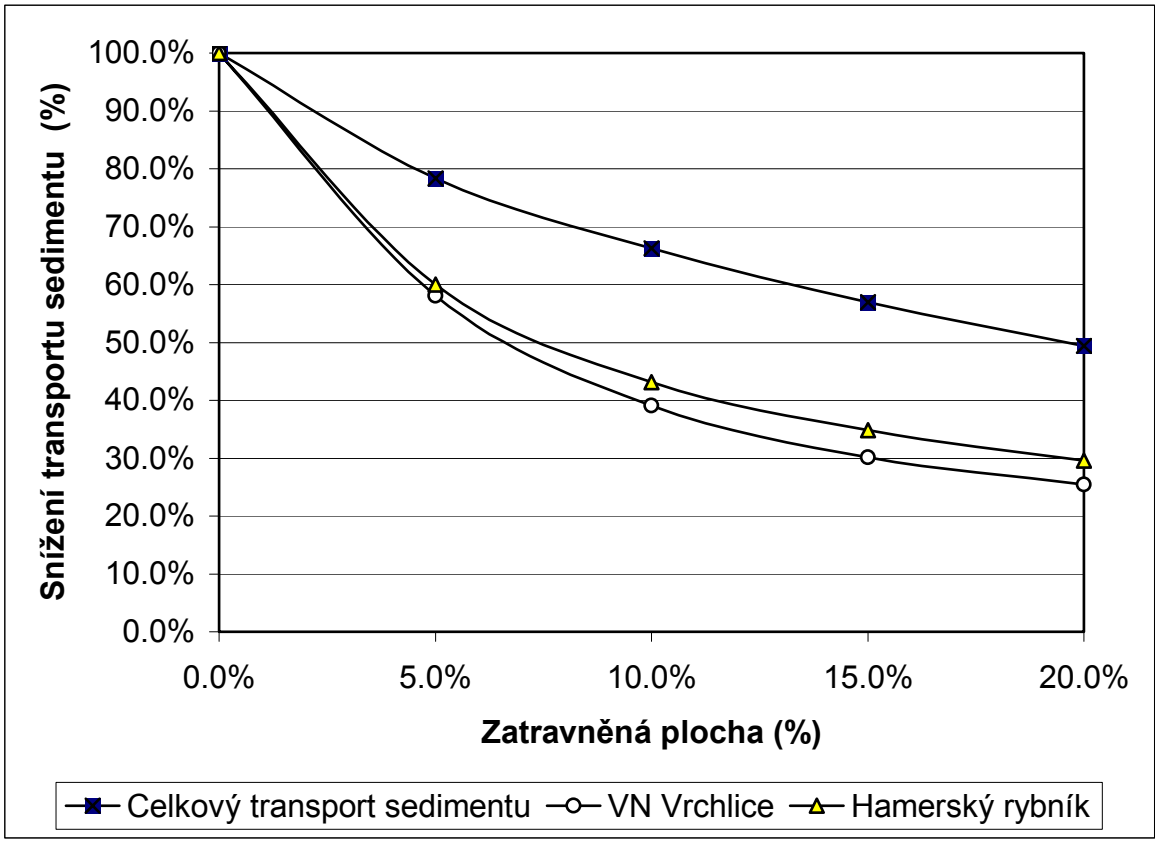
Z vypočtených hodnot (**Tabulka 4.3.3–2**) je zřejmé, že příznivý vliv zatravnění nejsklonitějších partií je velmi výrazný. Při zatravnění pouhých 5% plochy orné půdy může dle výpočtu dojít ke snížení transportu sedimentu z povodí o 20% a ke snížení zanášení o plných 40%. Při zatravnění 20% orné je množství transportovaného sedimentu poloviční a nádrže jsou zanášeny pouze jednou třetinou původního množství splavenin (**Obr. 4.3.3–2**). Toto razantní snížení je způsobeno cílenou konverzí ploch, které nejvíce přispívají k původním erozním smyvům a také zatravněním sklonitých pásů podél vodotečí, jež nyní působí jako vsakovací a záchytné pásy pro transportovaný sediment.

Vypočtená čísla samozřejmě není možno brát absolutně, stále se jedná pouze o robustní empirický výpočet, nicméně výrazný přínos cíleného zatravňování je výpočtem prokázán.

Tabulka 4.3.3–2: Snížení celkových hodnot transportu sedimentu z povodí VN Vrchlice a pokles zanášení VN Vrchlice a Hamerského rybníka v závislosti na zatravněné ploše orné půdy s nejvyšším sklonem.

	Původní výpočet	Zatravněno 5%	Zatravněno 10%	Zatravněno 15%	Zatravněno 20%
TSP	31 910	24 989	21 141	18 183	15 773
TSD	21 562	18 207	16 114	14 096	12 275
TSE	1 024	657	558	480	447
TRE	454	378	315	283	261
TPD	9 324	6 125	4 469	3 607	3 052
VN Vrchlice					
STE			97		
input	3 545	2 057	1 385	1 068	904
output	106	62	42	32	27
deposit	3 438	1 995	1 343	1 036	876
Hamerský rybník					
STE			45		
input	3 602	2 161	1 553	1 256	1 067
output	1 981	1 189	854	691	587
deposit	1 621	972	699	565	480

Obr. 4.3.3–2: Poměrné snížení transportu sedimentu v závislosti na zatravněné ploše s nejvyšším sklonem. Procentní snížení vypočteno dle tabulky (**Tabulka 4.3.3–2**).



5 Část pátá - verifikace empirických metod

5.1 Možnosti verifikace

Pro kalibraci empirických metod je třeba získat skutečné, tedy měřené a nikoli vypočtené hodnoty ztráty půdy. Jednou z cest je provádění experimentů a měření na dešťových simulátorech a testovacích vzorových plochách s definovanými parametry. Na základě takových měření byla ostatně odvozena USLE i metody, jež ji využívají. Simulace erozních procesů má ve výzkumu eroze a transportu sedimentu stále své nezastupitelné místo. Pro výpočet v měřítku celých povodí je ovšem třeba měřit objem sedimentu v přirozených podmínkách, neboť simulace erozních a transportních procesů v takovém rozsahu není možná.

Existuje několik způsobů, jak získat data potřebná pro kalibraci a validaci empirických rovnic a erozních modelů v měřítku povodí. Jsou to zejména:

- Přímá měření dlouhodobého přesunu sedimentu na orné půdě, například pomocí trasování izotopu cesia, tzv. ^{137}Cs metoda (např. Li et al., 2003).
- Měření koncentrace splavenin ve vodních tocích (např. Steegen et al., 2001)
- Metody DPZ – klasifikace snímků s cílem odhadu změn profilu orné půdy (např. Nachtergaele et al., 1999)
- Měření objemu sedimentu zachyceného v průtočných nádržích (např. Bazzoffi et al. 1996)

Každá metoda má své nevýhody a určitá omezení. Některé jsou obtížně aplikovatelné v regionálním měřítku (přímá měření na orné půdě), jiná jsou ekonomicky náročná a obtížně využitelná pro dlouhodobé odhady (přímá měření koncentrace splavenin). Pro kalibrace výpočtů v měřítku povodí v podmínkách ČR je využíváno zejména měření objemu sedimentu v nádržích, které poskytuje dostupná data pro odhad průměrného transportu z povodí v dlouhodobém horizontu.

Předpokladem aplikace této metody je výběr povodí s průtočnou nádrží v uzávěrovém profilu, zachycující převážné množství sedimentu. Následuje odhad objemu sedimentu v nádrži, jeho objemové hmotnosti, určení poměru zachycení sedimentu v nádrži a výpočet ročního přísunu sedimentu (při znalosti doby trvání nádrže, resp. doby přísunu sedimentu). Validace je pak provedena porovnáním výsledku výpočtu transportu sedimentu z povodí a měřeného objemu. V následující kapitole je navržena jednoduchá metodologie měření objemu sedimentu v nádržích.

5.2 Stanovení skutečného objemu sedimentu v nádržích

5.2.1 Přehled metod získání objemu sedimentu

Skutečný objem sedimentu v nádržích lze stanovovat buď výpočtem na základě dostupných zaměření dna nebo na základě zaměření skutečných mocností sedimentu (Dostál a kol., 2003f). V podstatě lze problematiku rozdělit na několik případů:

I. Odečet zaměřených úrovní původního a současného dna nádrže
   A. Přímé geodetické zaměření dna (prázdná nádrž)
   B. Nepřímé zaměření dna z hladiny
II. Výpočet z přímého měření mocností sedimentu
   A. Sondami (vrty) z povrchu sedimentu (prázdná nádrž)
   B. Sondami (vpichy do zvodnělého sedimentu) z hladiny
   C. Nepřímo fyzikálními metodami (sonar) z hladiny
   D. Přímými sondami (vpichy) ve velkých hloubkách za pomoci potápěčů

Přesnost každé použité metody je úměrná kvalitě její aplikace, množství a rozmístění získaných sond nebo záměrných bodů, znalosti dokumentace a charakteru původního dna i následnému zpracování měření. Nelze proto předem říci, že jedna metoda je přesnější než ostatní, nebo že při určité požadované přesnosti jsou některé metody předem vyloučeny. Výběr vhodné metody závisí především na její efektivnosti pro konkrétní nádrž. Zda je metoda ekonomická (nebo vůbec aplikovatelná) pro danou nádrž, závisí na řadě kritérií.

5.2.2 Výběr vhodné metody – charakteristiky nádrží

Na základě dosavadních zkušeností řešitelského týmu lze postup zvolení vhodné metody získání objemu sedimentu do jisté míry algoritmizovat, respektive doporučit vhodnou metodu pro příslušnou nádrž. Při výběru metody je třeba předem získat co nejvíce dostupných údajů o nádrži a zohlednit následující vlivy:

5.2.2.1 Vlastnosti nádrže

- **Plocha** – Např. způsob II.D.(kapitola 5.2.1) je pro malé nádrže neekonomický, pro příliš velké nádrže je třeba počítat s jeho velkou časovou náročností.
- **Hloubka** – jeden z hlavních činitelů – hloubka limituje použití přímého měření z hladiny a omezuje i kvalitu měření nepřímého.
- **Členitost dna** – velká členitost znesnadňuje sestavení vhodných DMT dna pro použití metod I.A., I.B. a II.D.
- **Předpokládaná mocnost sedimentů** – malá mocnost s ohledem na požadovanou přesnost limituje použití metod I.A.B., příliš velká mocnost limituje použití přímých metod II.A.B.D. (ovlivněna velikostí a kvalitou povodí, stářím nádrže, …).
- **Dostupnost nádrže** – může bránit geodetickému zaměření.
- **Velikost povodí** – limituje možnost, resp. kvalitu výpočtu transportu sedimentu.

5.2.2.2 Způsob provozování nádrže

- **Frekvence a období vypouštění nádrže** – limituje použití metod I.A. a II.A. (kapitola 5.2.1), ovlivňuje předpokládané mocnosti sedimentu a následný výběr metody.
- **Možnost vstupu do** vodárenské nebo jiné chráněné **nádrže** – omezuje možnost přímých měření.
- **Kolísání hladiny** – u velkých nádrží je třeba sledovat při dlouhodobém měření.

5.2.2.3 Kvalita dokumentace

- **Kvalita projektové dokumentace** – původní zaměření: ovlivňuje výběr metod I.A.,B (kapitola 5.2.1).
- **Stáří nádrže** – obvykle výrazně ovlivňuje kvalitu a dostupnost projektové dokumentace, resp. původního zaměření dna: metody I.A.,B.
- **Dokumentace o historii nádrže** – Informace o dosavadním odbahňování, původním toku, předchozích zatopených nádržích apod.: ovlivňuje všechny metody, především přímá měření (metody II.ABCD), problém je v odlišení původních aluviálních sedimentů od nových splavenin
- **Dokumentace o historii povodí** – změny v hospodaření, povodně, proměnlivost srážkových událostí, apod. (ovlivňuje kvalitu výpočtu transportu sedimentu)

5.2.2.4 Výběr a kombinace metod

Jeden z možných algoritmů výběru vhodné metody je uveden ve schématu (**Obr. 5.2.2–1**):

Uvedené schéma (**Obr. 5.2.2–1**) samozřejmě nelze brát absolutně, vždy záleží na možnostech řešitele a některé metody mají proto ve výběru přednost. Určitě je možno říci, že z hlediska kvality výsledku je ve většině případů lépe upřednostnit metody přímého měření sedimentu před variantami nepřímého zjišťování objemu odečtem dna. Pokud už je metoda odečtu DMT dna zvolena, nádrž by měla alespoň splňovat podmínky kvalitního původního zaměření a nepříliš proměnlivého reliéfu dna.

Při měření objemu sedimentu z povrchu vypuštěné nádrže je třeba počítat s konsolidací sedimentu a změnami jeho objemové hmotnosti – je lépe proto odebrat vzorky pro posouzení objemové hmotnosti a správný přepočet objemu pro verifikaci výpočetních metod transportu sedimentu. Odběr vzorků za tímto účelem je ostatně užitečný vždy.

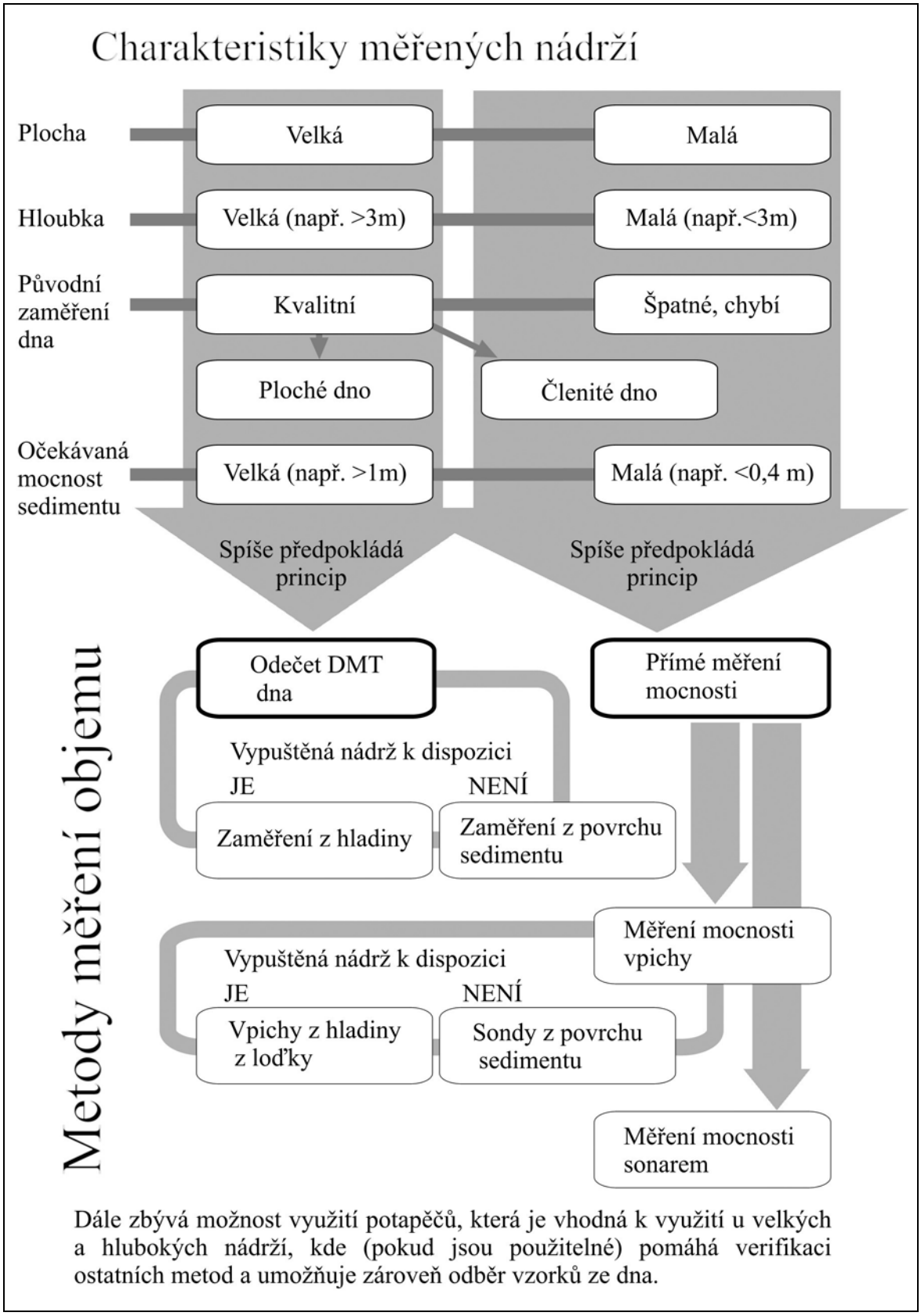
Také platí, že pro řadu větších nádrží je možno uvedené metody s úspěchem kombinovat, využít možnosti přímého měření objemu sedimentu z hladiny v horních, mělkých sedimentačních oblastech nádrží nebo v jejich předzdržích (často s rozhodujícím objemem sedimentu) a nepřímých a dalších pomocných metod při doplnění hodnot v ostatních částech nádrží. Taková kombinace může být v případě velkých hloubek, nedostatečné dokumentace původního dna a jiných obtíží nezbytná také pro vzájemnou verifikaci použitých metod. Kombinací několika způsobů bylo postupováno např. i v případě odhadu množství sedimentu ve VN Vrchlice (kapitola 5.2.3).

Mezi metody zjišťování objemu sedimentu záměrně nebyl zahrnut poslední způsob – zjištění objemu při odbahňování nádrží. Zde nelze hovořit o metodě, nicméně při verifikacích výpočtu transportních procesů je třeba neopomenout tato množství, v případě, že z řešené nádrže byl již sediment odstraňován. Pokud je výpočet kalibrován podle vyvezeného množství, je třeba zjistit, zda se jednalo o skutečné uložené množství sedimentu, nebo zda byl sediment odstraněn jen z části nádrže a v jakém rozsahu.

Poznámka: Perspektivní budoucnost je předpokládána u rozšíření využití metody II.C. – nepřímého měření skutečných mocností sonarem. Dosavadní kalibrace této metody však nebyla úspěšná. V zahraničí jsou s tímto způsobem dobré zkušenosti, pokud se podaří zajistit vhodné technické vybavení (vhodný echolot), je předpoklad, že bude ve spojení s GPS navigací možno touto metodou efektivně změřit větší množství nádrží, než dosud konvenčními postupy. Již dnes je na měření podpovrchových půdních profilů sonarem nebo podobnými technologiemi specializována řada firem, ale jedná se o velmi drahou metodu

(a vybavení), využívanou pro hledání podpovrchových dutin apod. Využití pro měření nádrží je (z důvodu jejich velké rozlohy) obvykle neekonomické.

Obr. 5.2.2–1: Příklad možných kritérií výběru vhodné metody měření objemu sedimentu.

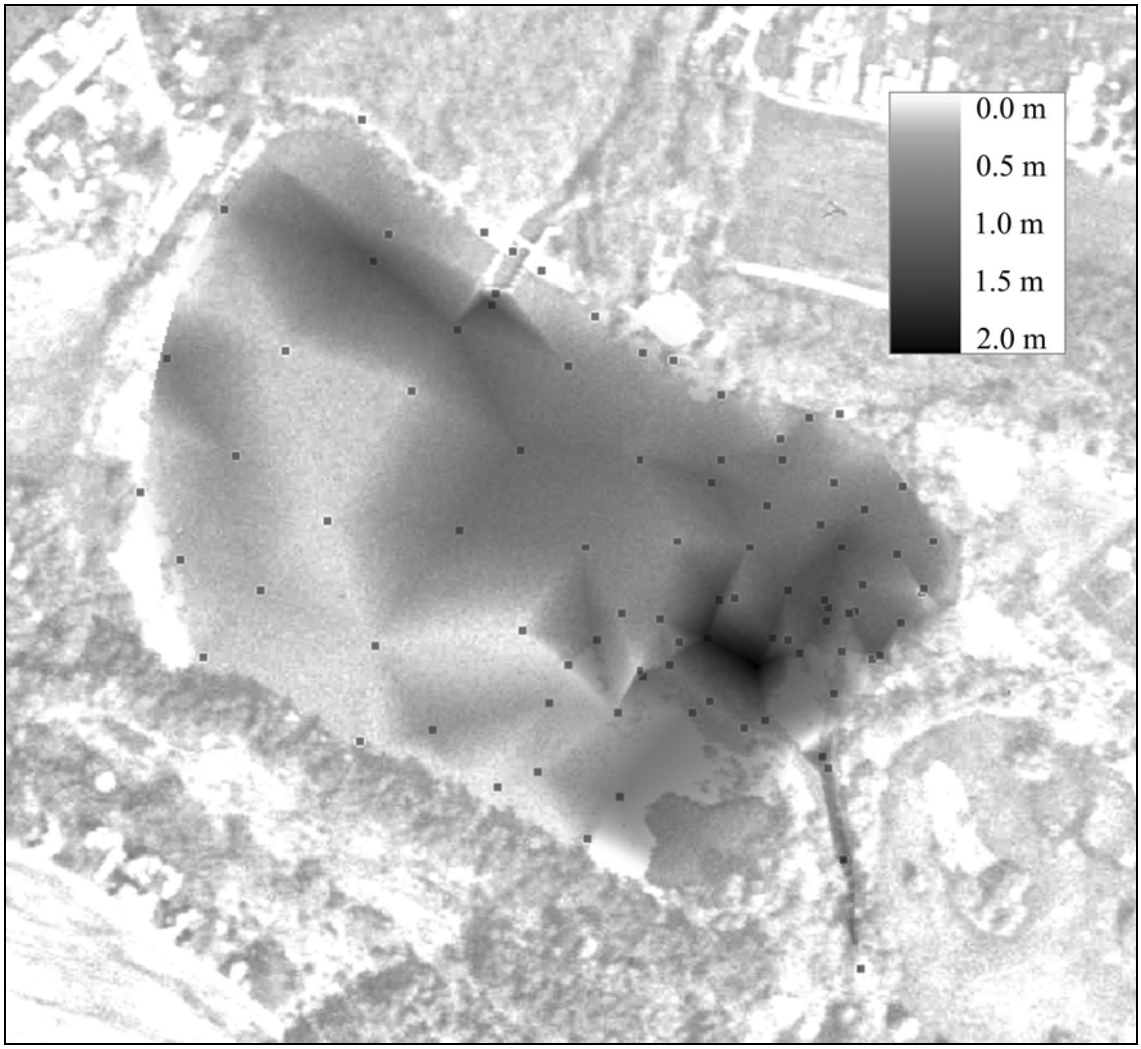


5.2.3 případová studie – VN Vrchlice

V průběhu svého doktorského studia jsem se zabýval odhadem objemu sedimentu v několika nádržích v ČR a v té souvislosti se měl možnost podílet na měřeních objemu i testování používaných metod (např. Dostál a kol., 2002b; Dostál a kol., 2003c). Jako příklad aplikace navržené metodiky (kapitola 5.2.2) je zde uvedena případová studie určení objemu sedimentu vodárenské nádrže Vrchlice u Kutné Hory.

V rámci projektu VaV/630/4/02 (Výzkum sedimentů přehrad, nádrží a jezer – zhodnocení rizik a návrhy opatření) byl v roce 2002 zjišťován objem zachyceného sedimentu v Hamerském rybníce (předzdrž VN Vrchlice) i v samotné nádrži. Objem sedimentu v Hamerském rybníce byl přitom se značnou přesností na základě 92 měřených sond do dna z hladiny rybníka odhadnut na zhruba 32 470 m^3 (**Obr. 5.2.3–1**). Ve VN Vrchlice byl objem sedimentu odhadován na základě původního a nového zaměření dna, jednalo se ovšem o řešení značně problematické (Dostál a kol., 2002b). Proto bylo rozhodnuto ve výzkumu pokračovat a na základě nových měření revidovat původní výsledek (Dostál a kol., 2003f).

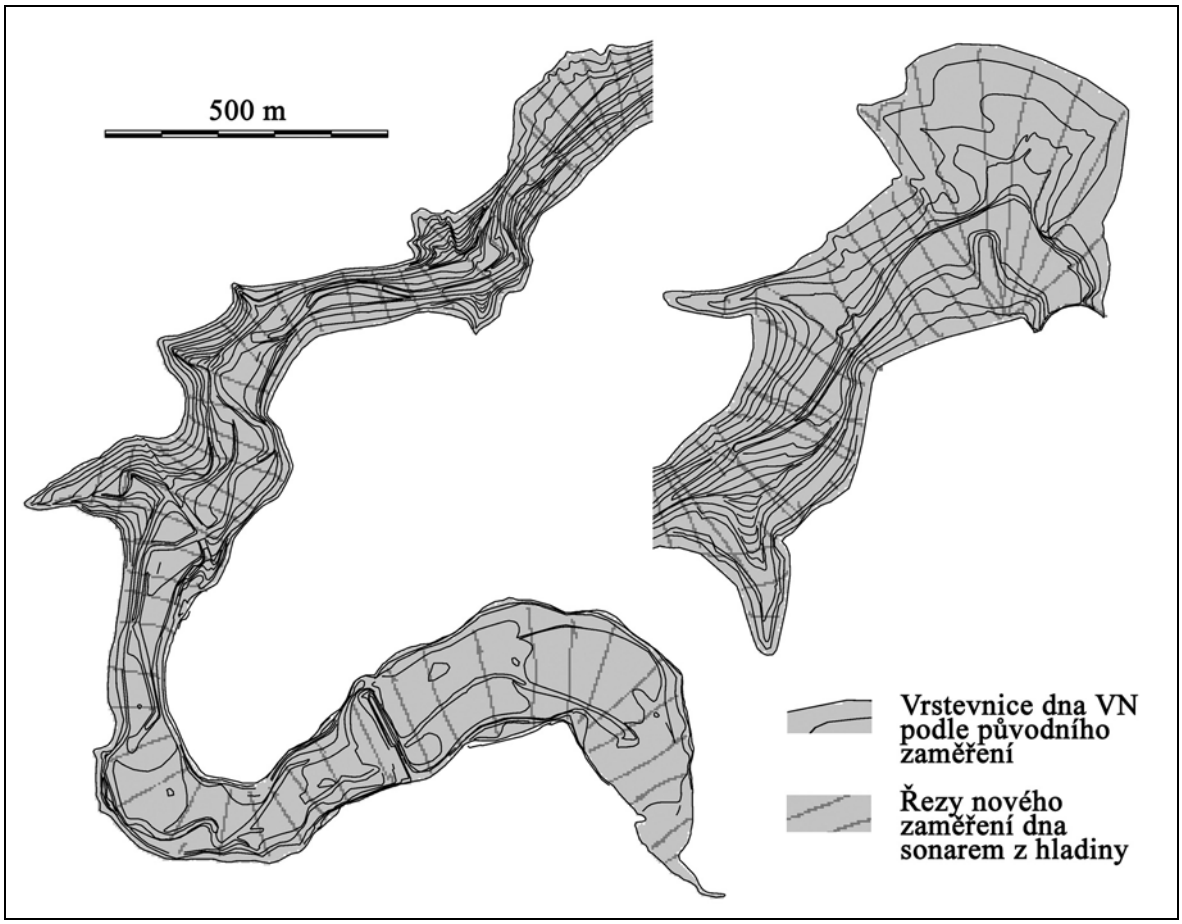
Obr. 5.2.3–1: Záměrné body (sondy) a výsledný DMT objemu sedimentu v Hamerském rybníce.



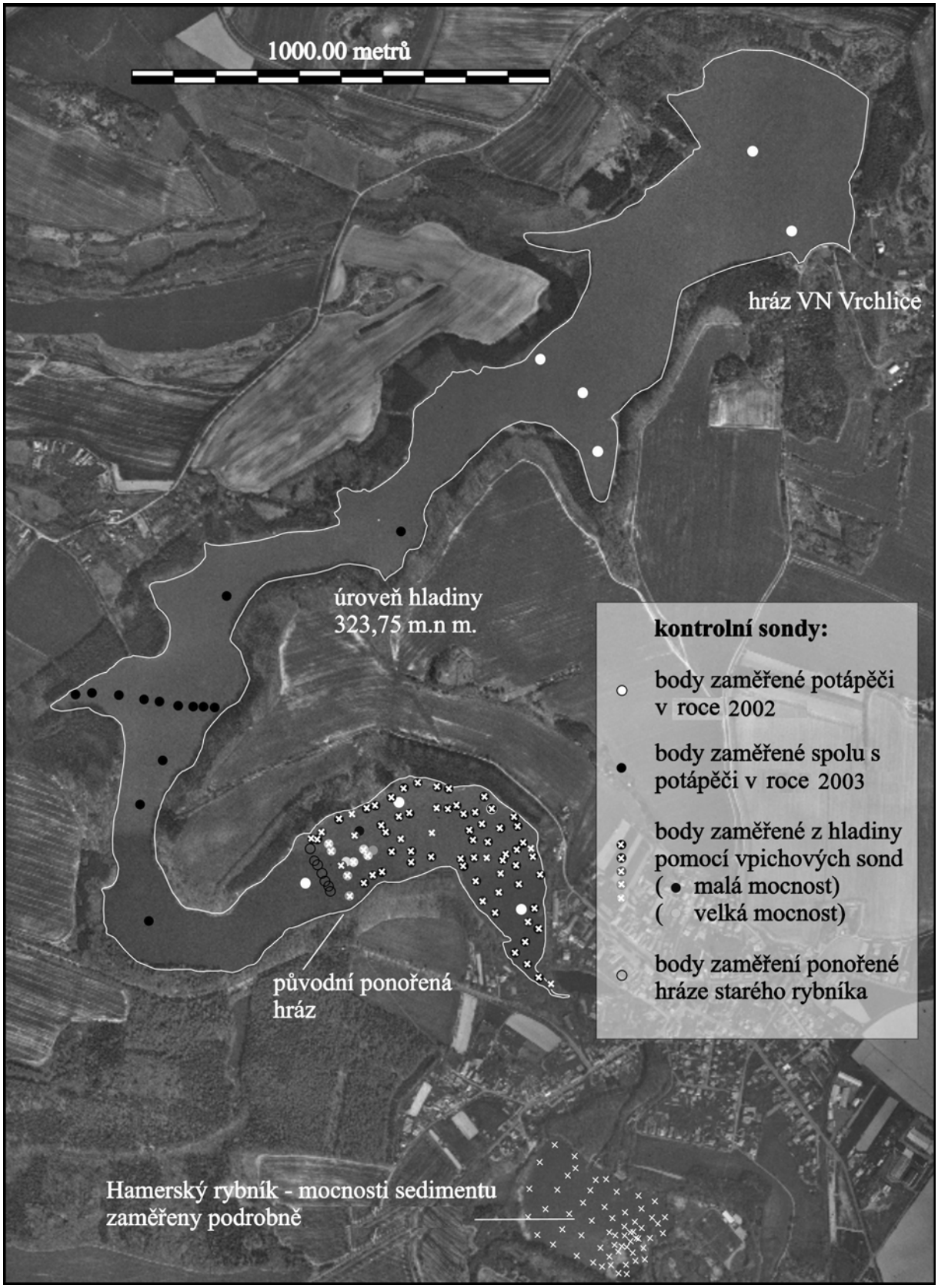
Pro řešení tohoto úkolu byly připraveny následující vstupní vrstvy GIS, které byly dále doplněny na základě nových měření:

- Vrstevnice z původního zaměření dna (Geodetický plán 1:2000 – součást původního projektu), ručně digitalizované a georeferencované podle dostupných podkladů (zejména letecké ortofotomapy) – rektifikace viz (Dostál a kol., 2002b) – výškový rozestup 1m (Obr. 5.2.3–2).
- Rastrový DMT původního dna (rozlišení 1m) připravený na základě uvedené vrstevnicové mapy.
- Vektorová hranice zátopy (hladina v úrovni 323,75 m.n m.).
- Panchromatická ortofotomapa v rozlišení 0,5m.
- Nově sonarem zaměřené dno (zdroj. Povodí Moravy, a.s.) – soustava bodů, měřených profilů. Vektorová vrstva v systému S-JTSK (Obr. 5.2.3–2).
- Rastrový DMT současného dna vytvořený pomocí TIN na základě uvedeného zaměření.
- Přibližný DMT uloženého sedimentu získaný odečtem DMT původního a nově zaměřeného dna. Bohužel se značně omezenou přesností vyplývající z kvality obou vstupních podkladů a z rozdílného typu zdrojových dat (vrstevnice vs. měřené profily) – viz. (Dostál a kol, 2002b).

Obr. 5.2.3–2: Rektifikovaný původní vrstevnicový plán a profily nového zaměření dna VN Vrchlice.



Obr. 5.2.3–3: Přehled bodů zaměření skutečného objemu sedimentu ve VN Vrchlice.



Na podkladě DMT původního dna a vrstvy předpokládaných vyšších mocností sedimentu podle (Dostál a kol., 2002b) byla vybrána horní oblast nádrže nad ponořenou hrází starého zrušeného rybníka, jako oblast s pravděpodobným uložením velké části sedimentu a díky

předpokládaným hloubkám do 4 metrů i oblast měřitelná přímými sondami z loďky. Dále byla vybrána zátoka bezejmenného levostranného přítoku a střední oblast nádrže pro získání alespoň několika pomocných bodů skutečných mocností potápěčskými sondami. Měření objemu sedimentu proběhlo v červnu 2003.

Nejprve bylo z loďky za pomoci potápěčů zaměřeno několik bodů v příčném profilu VN Vrchlice z uvedené zátoky (**Obr. 5.2.3–3**). Poloha byla měřena pomocí GPS (polohová přesnost 4m je v tomto ohledu plně dostačující) a mocnosti sedimentu měřili potápěči na dně vlastní sondou. Na základě vytištěné mapy DMT původního dna byl odhadnut průběh údolnice původního koryta, v níž bylo spolu s potápěči zaměřeno dalších několik bodů.

Dále bylo z loďky pomocí vpichových sond změřeno dalších 86 bodů v horní části nádrže nad ponořenou hrází (**Obr. 5.2.3–3**). Přímo na vtoku do nádrže přitom překvapivě byly zjištěny pouze minimální mocnosti sedimentu zřejmě vyplavovaného dále do nádrže. Větší mocnosti byly nalezeny až v oblasti původního zahloubeného koryta před ponořenou hrází – zde se celková mocnost pohybovala i kolem 2 metrů. Při poměrně prudkém větru a dešti zde při hloubce kolem 4m již bylo měření poměrně obtížné, používanou vpichovou sondu délky 6 metrů lze doporučit jako opravdu maximální – operovat s delší sondou by již na malém člunu bylo velmi náročné. Při měření byla pro kontrolu zaměřena i koruna ponořené zemní hráze, pod hrázkou již nebylo měření mocností sondou možné. Hloubka VN zde přesahuje 6 metrů a směrem po toku rychle narůstá. Z hlediska mocností sedimentu lze oblast nad hrázkou nyní prohlásit za spolehlivě změřenou.

Poznámka: Při měření hloubek bylo využito jak klasického hloubkoměru (olovnice), tak sonaru. Přesnost používaného sonaru je v hloubkách mezi 1,5 – 3 m bohužel ± 20 cm navzdory ujištění dodavatele o přesnosti na 10 cm. Při hloubkách nad 3 metry lze spolu s ohledáním dna vpichovou sondou určit hloubku přesně. Výhoda sonaru je tak především při hledání morfologických změn dna, např. ponořené hráze, které umožní rychle nalézt a přesně polohově zaměřit.

Dalším krokem bylo zpracování naměřených dat a vytvoření uspokojivějšího DMT mocností sedimentu v nádrži. Rozlišení a velikost výpočetních rastrových vrstev byly odvozeny na základě ortofotomapy (Tabulka 5.2.3–1). Postup byl následující (GIS operace prováděny v prostředí Idrisi32, případně PCI Easy/Pace):

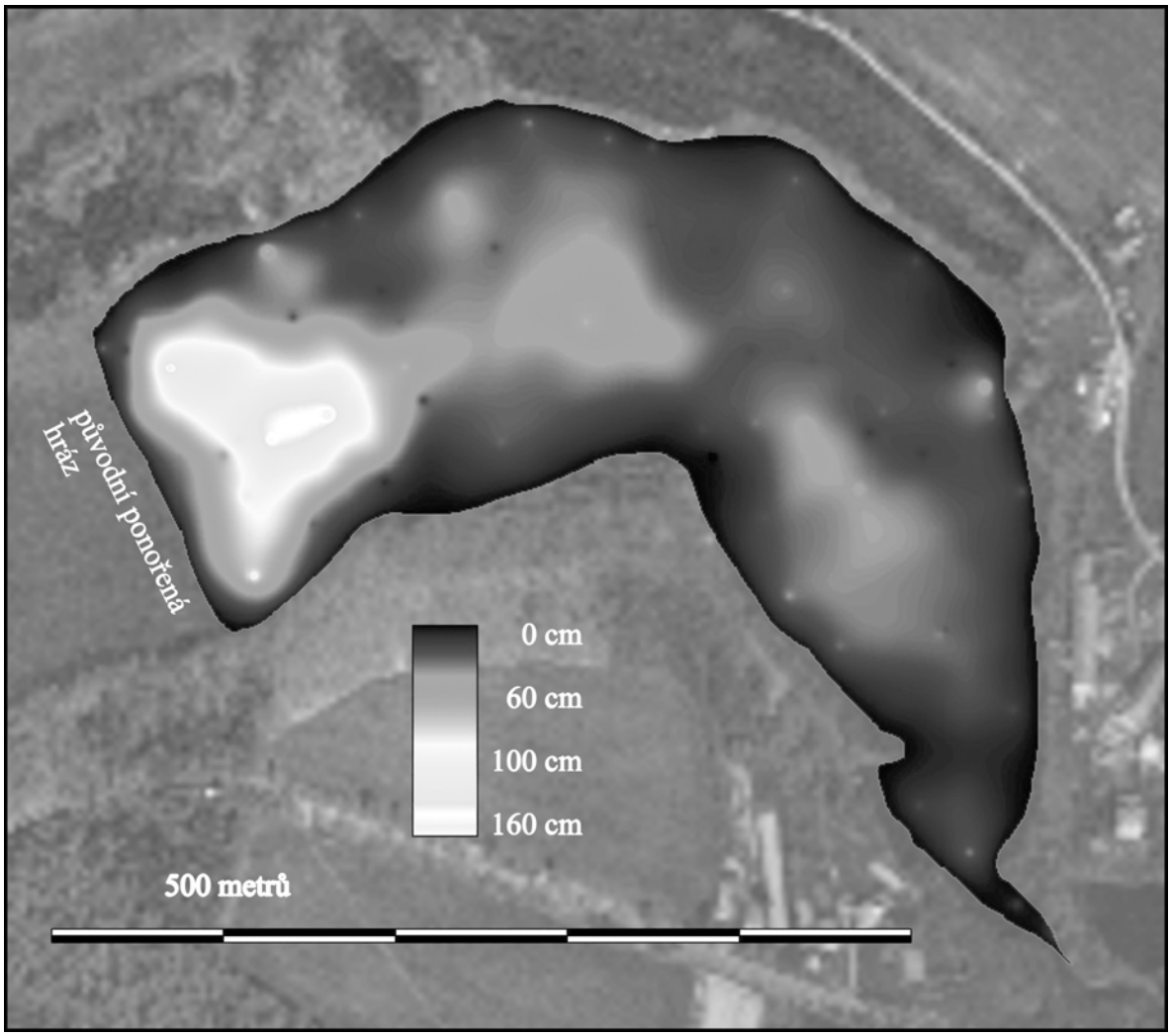
Tabulka 5.2.3–1: Parametry vstupních vrstev výpočtu objemu sedimentu ve VN Vrchlice.

Souřadnice rohových bodů:	Min.	Max.
X (souřadný systém JTSK)	-689876.278	-687700.278
Y (souřadný systém JTSK)	-1070479.336	-1067699.336
Počet sloupců rastru	2176	
Počet řádků rastru	2780	
Rozlišení (metry)	1,00	

1. Převedení naměřených bodů do formátu vektorových souborů Idrisi 32 a kontrola jejich polohy nad ortofotomapou (**Obr. 5.2.3–3**).
2. Digitalizace pomocných bodů břehové čáry a předběžné vygenerování DMT mocností sedimentu v horní části nádrže (nad ponořenou hrází) – v Idrisi32 pomocí TIN sítě zaměřených bodů.
3. Po nespokojenosti s vytvořenou vrstvou nalezení vhodnější procedury generování DMT na základě liniové hranice břehové čáry (přiřazena mocnost 0) a zaměřených

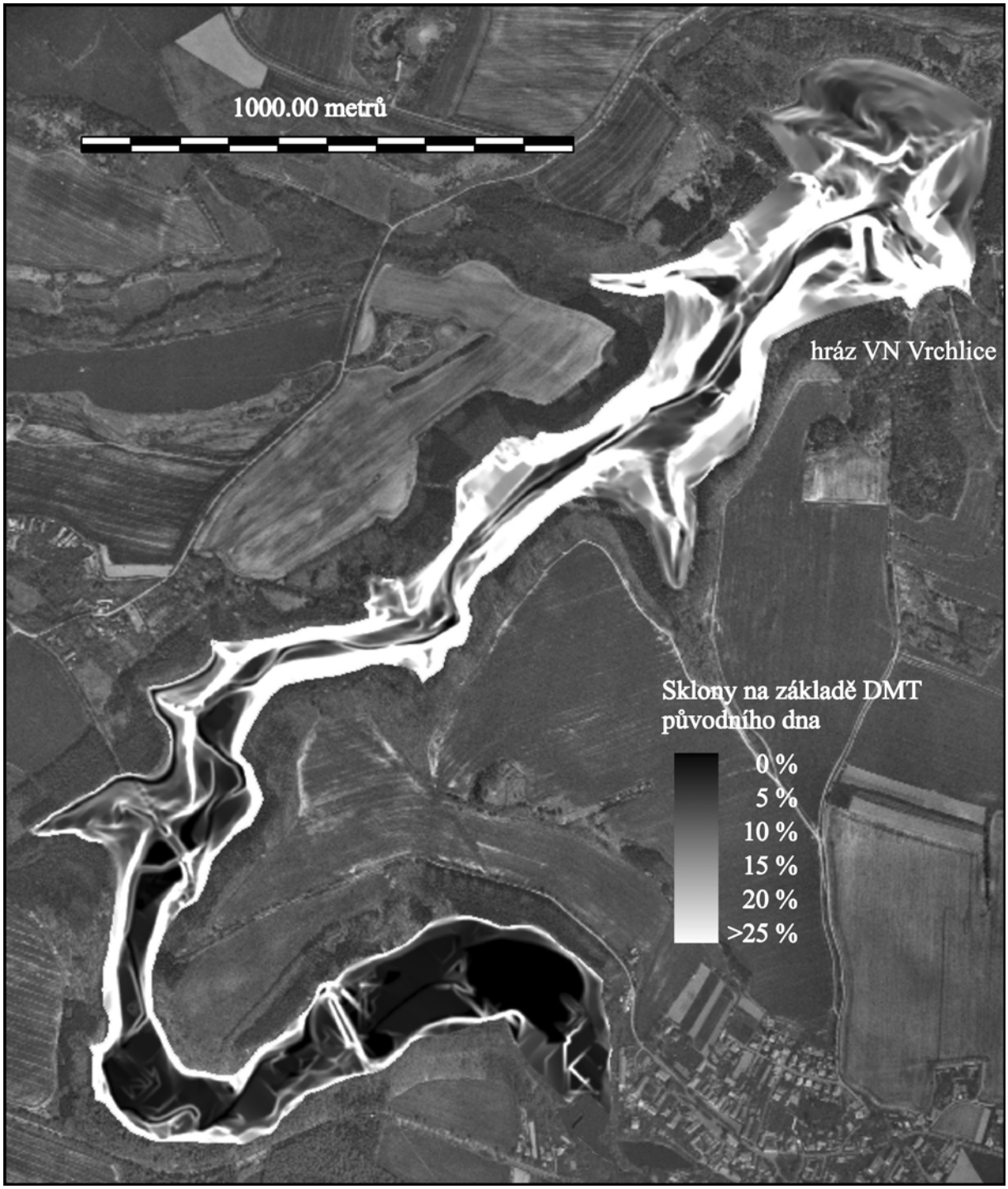
bodů. Využit modul VDEMINT v Easy/Pace – získán DMT mocností sedimentu v rozlišení 1m. (**Obr. 5.2.3–4**)

Obr. 5.2.3–4: DMT mocností skutečného množství sedimentu v horní části VN Vrchlice odvozený na základě vpichových sond.



4. Na základě takto vytvořeného DMT mocnosti sedimentu byly získány kumulované hodnoty objemu sedimentu v horní části nádrže (**Tabulka 5.2.3–2**).
5. Kontrola pozice bodů měřených potápěči a hledání odpovídajícího rozložení sedimentu na základě vrstevnic původního dna.
6. Nejprve využit princip přiřazení mocnosti sedimentu každé sondy odpovídající vrstevnici, přičemž bylo třeba ruční editací odpovídajícím způsobem zjednodušit vrstevnicový plán. Následně byl pomocí VDEMINT vygenerován DMT mocností sedimentu střední (od ponořené hráze pod měřenou zátoku s levostranným přítokem) a dolní (zbytek až k hrázi VN Vrchlice) části nádrže. Po důsledné kontrole se tento přístup ukázal jako nesprávný – nebyly zohledněny sklonové poměry dna a skutečná údolnice nádrže. Sediment byl principem přiřazení hodnoty vrstevnicím vždy směrem po proudu „vynesen vrstevnicemi“ do svahových partií břehů, kde se na základě zjištěných sond již nevyskytuje a hodnota získaná součtem tohoto DMT tak byla nadhodnocená.

Obr. 5.2.3–5: Mapa sklonu dna VN Vrchlice v procentech na základě DMT původního dna.

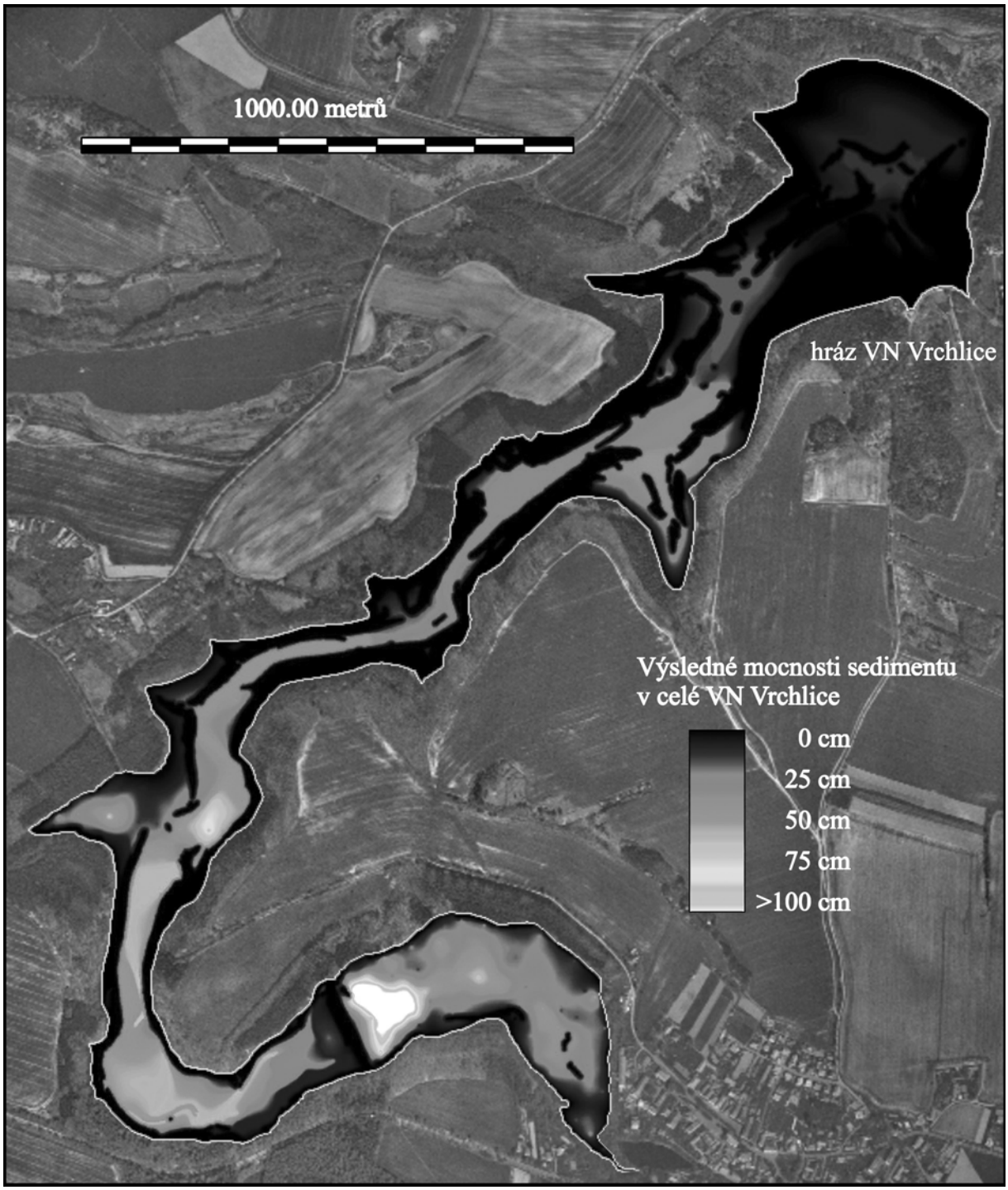


7. Doplnění předchozí metody kontrolou svahových poměrů břehů nádrže. V souladu se zjištěním potvrzeným potápěči sediment ponechán jen v ploché údolnici dna VN, strmé svahy břehů uvažovány bez sedimentu. Na základě DMT původního dna vygenerována vrstva sklonů v procentech v rozlišení 1 m (Obr. 5.2.3–5). Reklasifikace vrstvy podle sklonu 25%. Pro sklon menší než 25% (plochá údolnice dna) ponechán sediment uvažovaný na základě sond. Pro větší sklon břeh předpokládán bez sedimentu. Po kontrole vytvořené vrstvy byl za účelem simulování plynulého nárůstu množství sedimentu od strmých břehů směrem do nádrže pro menší sklon vytvořen 10 metrů široký náběhový pruh (pomocí modulu

DISTANCE) s postupným nárůstem sedimentu na hodnotu původně dosazenou dané oblasti na základě zaměřených sond. Tak byly vyloučeny svažité břehy neúměrně přispívající k nadhodnocení objemu sedimentu, kterým zůstalo zaplněno jen ploché dno nádrže v závislosti na měřených hodnotách (**Obr. 5.2.3–6**)

8. Na základě takto vytvořeného DMT mocnosti sedimentu byly získány kumulované hodnoty objemu sedimentu ve střední a dolní části nádrže. Po sečtení s objemem sedimentu v horní části nádrže byl získán celkový objem sedimentu ve VN Vrchlice (**Tabulka 5.2.3–2**).

Obr. 5.2.3–6: Výsledný DMT rozložení sedimentu v celé VN Vrchlice.



Tabulka 5.2.3–2: Objem sedimentu ve VN Vrchlice.

jednotlivé části VN Vrchlice	**Objem sedimentu (m^3)**	
	dolní mez odhadu	horní mez odhadu
horní část nádrže nad ponořenou hrází, body měřené vpichovými sondami	43 500	44 500
střední část nádrže u bezejmenného přítoku, body měřené potápěči, výpočet	52 000	54 500
dolní část nádrže, nejproblematičtější oblast	30 000	41 000
Objem sedimentu v celé nádrži (m^3)	**125 500**	**140 000**

V tabulce (**Tabulka 5.2.3–3**) je uvedeno porovnání objemů sedimentu v jednotlivých částech nádrže mezi původním výpočtem a novým zpřesňujícím postupem. Jsou zahrnuty hodnoty získané při postupném upřesňování odhadovaného množství.

Tabulka 5.2.3–3: Porovnání vypočtených objemů sedimentu v jednotlivých částech nádrže. Srovnání výsledků původního odhadu a revidovaných výpočtů.

jednotlivé části VN Vrchlice, objem sedimentu (m^3)	horní část nádrže nad ponořenou hrází	střední část nádrže	dolní část nádrže	**celá nádrž**
Původní zjednodušený odhad na základě odečtu DMT původního a stávajícího dna (Dostál a kol., 2002b)	25 525.0	14 718.0	48 106.0	**88 349.0**
Odhad na základně vrstevnicového plánu a zaměřených bodů - nezohledněny svahové poměry	45 138.9	64 673.5	69 705.4	**179 517.8**
Odhad na základě zaměřených bodů při zohlednění svahových poměrů - vyloučeny břehy se sklonem > 25% a vytvořen náběhový pás šířky 10 m	43 507.5	54 055.6	40 061.0	**137 624.1**
Odhad na základě zaměřených bodů při zohlednění svahových poměrů - vyloučeny břehy se sklonem > 15%	43 430.2	54 427.8	31 099.5	**128 957.6**

Je vidět, že při nezohlednění skutečné morfologie a sklonitosti břehů může dojít ke značnému nadhodnocení celkové hodnoty. Otázkou zůstává přesná velikost plochy dna na které je sediment uložen. Při výběru plochého dna kolem údolnice značně ovlivňuje celkovou hodnotu množství sedimentu hodnota sklonu, kterou je omezena zanesená plocha (vytvoření náběhového pruhu šířky 10 m je v ploše nádrže již spíše kosmetickou úpravou, neovlivňující příliš vypočtené celkové množství sedimentu v nádrži). Množství uloženého sedimentu lze na základě odebraných sond a výpočtu odhadovat na 125 000 až 140 000 m^3

(**Tabulka 5.2.3–2**), přičemž pravděpodobnější je hodnota blízká dolní hranici uvedeného rozmezí.

Uvedená hodnota samozřejmě stále vychází z řady zjednodušujících předpokladů a je proto třeba ji brát s jistou tolerancí. Vrchlice je nádrž velmi (při své ploše) hluboká se značně členitým dnem a získání přesného objemu sedimentu v nádrži tak je nesnadnou záležitostí. Přesto lze prezentovaný postup vytvoření DMT množství sedimentu v nádrži považovat za poměrně spolehlivý. Verifikaci by samozřejmě pomohlo získání ještě většího množství bodů zaměřených potápěči, případně pomocí fungující metody měření objemu sedimentu echolotem.

5.2.4 Přehled měřených nádrží a povodí

Tabulka 5.2.4–1: Základní dostupné charakteristiky měřených povodí a nádrží.

Povodí	Plocha (km^2)	Prům. sklon (%)	plocha orné půdy (%)	Doba provozu (rok)	Měření objemu (°)	Celkový objem sedimentu (m^3)	Odhadnutá objemová hmotnost ($t.m^3$)	Roční přísun sedimentu – SY ($t.rok^{-1}$)	Přísun na jednotku plochy – SSY
Bílovice	32	8.4	62.8	21	DH	109150	0.9	4678	1.46
Květoňov (1994)	32	8.6	41.6	4					(*)
Květoňov (1998)	32	8.6	21.1	4	WD	10600	1.3	1723	(*)
Hamry	56	5.3	23.1	32	DH	7650	1.3	311	(**)
Němčice	80	6.7	58.5	16	EX	46950	1.3	3815	(**)
Hostivař	95	5.1	56.0	40	DH	156810	1.2	4704	0.50
Vrchlice	97	4.6	60.1	32	DH,WD	130000	1.1	4469	0.46
Hamerský r.	79	4.1	60.6	31	DH	32470	1.25	1309	0.17
Trnávka	339	7.1	58.0	13	EX	70000	1.3	7000	0.21
Sedlice	412	7.0	54.1	65	EX	350000	1.3	7000	0.17

(°) Měření objemu: DH = vpichové sondy, WD = měření hloubky vody, EX = odtěžené množství.
(*) výrazná změna využití území znemožňuje odhad, (**) Měřen pouze sediment na vtoku do nádrže

V této práci navazuji na předchozí výzkumy provedené na katedře, při kterých byl transport sedimentu určován v následujících povodích:

- Sedlice: 412,0 km^2, (Vrána a kol., 1992)
- Němčice: 85,1 km^2, (Krása, 1999)
- Květoňov: 32,2 km^2, (Jakubíková a kol., 1999)
- Hamry: 56,9 km^2, (Bis, 1999)

Při svém doktorandském studiu jsem se podílel na opakovaných výpočtech v uvedených povodích a dále v povodích:

- Rokytenka: 62,7 km^2, (Dostál a kol., 2001d)
- Tichá a Divoká Orlice: 2 036,8 km^2, (Vrána a kol., 2003b)
- Vrchlice: 97,5 km^2, (Dostál a kol., 2002b)

- Testovací belgická povodí používaná na KU Leuven (Van Rompaey et al., 2002ab)
- Generelní výpočet pro celou ČR, (Dostál a kol., 2001c)
- Bílovice: 35,9 km^2, (Dostál a kol. 2003c)
- Hostivař: 96 km^2 (Bečvář, 2003)

Obr. 5.2.4–1: Základní přehled řešených povodí.

Výpočty ve většině uvedených povodí (**Obr. 5.2.4–1**) jsou porovnávány se změřeným nebo jinak získaným množstvím sedimentu v uzávěrovém profilu. Tato množství i nadále prováděné testy a další měření slouží k verifikaci výpočtů ztráty půdy z povodí uvedenými empirickými způsoby. Opakovaný výpočet jednotnou metodikou pro všechna testovaná povodí není dosud k dispozici, doposud změřená množství sedimentu a základní parametry testovacích povodí jsou uvedeny v tabulce (**Tabulka 5.2.4–1**).

6 Závěr

Tato dizertační práce shrnuje poznatky nabyté během výzkumu erozních procesů a jejich modelování v průběhu mého doktorského studia. Jejím cílem je poskytnout přehled možností určení erozní ohroženosti v regionálním měřítku při použití empirických metod výpočtu. Použití matematických simulačních modelů pro přehledné výpočty v povodích velikosti tisíců kilometrů čtverečních není efektivní a často ani možné.

Nejčastěji používané empirické přístupy určování erozní ohroženosti jsou postaveny na Univerzální rovnici ztráty půdy. Při propojení s prostředky GIS a dostatku kvalitních digitálních mapových podkladů je možné zmodernizovanými postupy efektivně hodnotit rozsáhlá území. Důležitým krokem ke zvýšení vypovídací schopnosti uvedeného postupu byla implementace morfologického směřování odtoku v prostředí rastrového GIS (Desmet&Govers, 1996), stanovení odtokových drah a zdrojových ploch. Tento postup je nyní využíván i při klasickém výpočtu pomocí USLE i při výpočtu ztráty půdy a transportu sedimentu pomocí modelu Watem/SEDEM.

V rešeršní části práce (kapitoly 1 a 2) – teoretickém popisu výpočtu ztráty půdy a transportu sedimentu (kapitola 2.1) – byl po průzkumu dostupné literatury a dalších zdrojů kladen důraz na představení alternativních způsobů získání parametrů, jež jsou dosud zajištěny se značnou mírou nejistoty a u kterých je problém se získáním kvalitních podkladů k výpočtu na velkých územích. Jedná se především o R faktor, K faktor, poměr odnosu a poměr zachycení sedimentu v nádržích. Při případném využití citovaných postupů je ovšem stále pamatovat na jejich zjednodušené empirické odvození a pokusit se o náležitou kalibraci vzhledem k měřeným hodnotám i k hodnotám parametrů určeným podle původní metodiky USLE (Wischmeier et al., 1978).

Jsou zde rovněž ilustrovány rozdíly mezi původním výpočtem podle USLE na bázi charakteristických profilů a výpočtem v rastrovém GIS (kapitola 2.1.3). Jedná se nejen o potřebnou modifikaci řady vztahů, ale především o principiální rozdíl v dosahu výpočtu, jeho zpřesnění, možných analýzách, aplikaci scénářů změny krajiny, atp.

Kapitola 2.2 je věnována modelu Watem/SEDEM, který určuje erozi i depozici v jednotlivých místech povodí. Model dosud nebyl v našich podmínkách představen a tato část je tedy věnována jeho podrobnému popisu i přípravě vstupních dat a parametrů a postupu výpočtu. Model Watem/SEDEM byl od svého uvedení několikrát modifikován, jsou tedy popsány dvě hlavní verze modelu a změny jež přinášejí. Nová verze Watem/SEDEM 2.1.0 přinesla především implementaci topologie říční sítě, která umožňuje sledovat zatížení jednotlivých úseků toku přínosem sedimentu a rovněž odhadovat množství transportované uzávěrovým profilem povodí. Na úpravách této komponenty jsem se mohl podílet při stáži ve vývojovém pracovišti modelu v belgickém Leuvenu. V případě úspěšné kalibrace by současná verze modelu mohla být užitečným nástrojem k hodnocení erozní ohroženosti a odhadu zanášení vodních nádrží.

Další část práce (kapitola 3) je věnována přípravě vstupních dat pro výpočet v prostředí rastrového GIS. Erozní procesy jsou závislé na morfologii, vegetačním krytu, kvalitě půd, srážkách a územním členění. Empirické přístupy poskytují pouze dlouhodobý průměrný odhad erozní ohroženosti. Kvalita a územní přesnost odhadu je však přímo úměrná kvalitě vstupních mapových podkladů. Důležité jsou zejména sklonitostní poměry a tedy kvalitní digitální model terénu (kapitola 3.2). Jsou zde představeny dostupné zdroje DMT pro ČR i úpravy potřebné pro přípravu kvalitního modelu. Obdobně jsou shrnuty dostupné (testované, nebo nalezené v literatuře a v publikovaných databázích hlavních

poskytovatelů dat) zdroje dat pro ostatní mapové vrstvy. Samostatná část je věnována klasifikaci družicových snímků za účelem získání mapy využití území (kapitola 3.3).

Kapitola 4 ukazuje konkrétní aplikaci všech teoreticky probíraných postupů. Na třech vybraných studiích je proveden výpočet ztráty půdy a transportu sedimentu z povodí, jednak pomocí USLE a SDR a rovněž modelem Watem/SEDEM 2.1.0. Uvedené studie a sledovaná území vychází z výzkumných projektů, na kterých jsem se v rámci doktorského studia podílel. V této práci jsou využita zdrojová data i řada vrstev GIS připravených v rámci citovaných studií. V souladu s nově navrženou metodikou přípravy a získání zdrojových datových vrstev jsou mnohé vrstvy nově připraveny a využity další postupy. Aplikace modelu Watem/SEDEM 2.1.0 v povodí VN Vrchlice je zde prvním pokusem o využití tohoto revidovaného modelu na území ČR a další verifikace a výpočty se předpokládají. Watem/SEDEM se přes mnohá zjednodušení vyplývající z jeho empirického přístupu ukazuje jako perspektivní nástroj k modelování transportu sedimentu a vlivu změn krajiny na erozi i zanášení toků.

Nově revidovaný výpočet ztráty půdy a transportu sedimentu pro celé území ČR (cca 78 792 km^2) pomocí USLE a SDR (kapitola 4.1) proběhl pro 8263 povodí 4. řádu ČHP. Průměrná plocha povodí 4. řádu činí 9.42 km^2 při směrodatné odchylce 5,92 km^2. Z výpočtu je možné odvodit následující odhadované dlouhodobé průměrné hodnoty ztráty půdy a transportu sedimentu v České republice:

- Celková odhadovaná plocha zemědělských pozemků: 46 737 km^2 (cca 59% území ČR)
- Celková ztráta půdy na zemědělských pozemcích území ČR: 21 839 200 t.rok^{-1}
- Průměrný poměr odnosu SDR z povodí 4. řádu ČHP: 40%
- Celkový transport sedimentu do toků v rámci povodí 4. řádu ČHP v ČR: 8 595 800 t.rok^{-1}

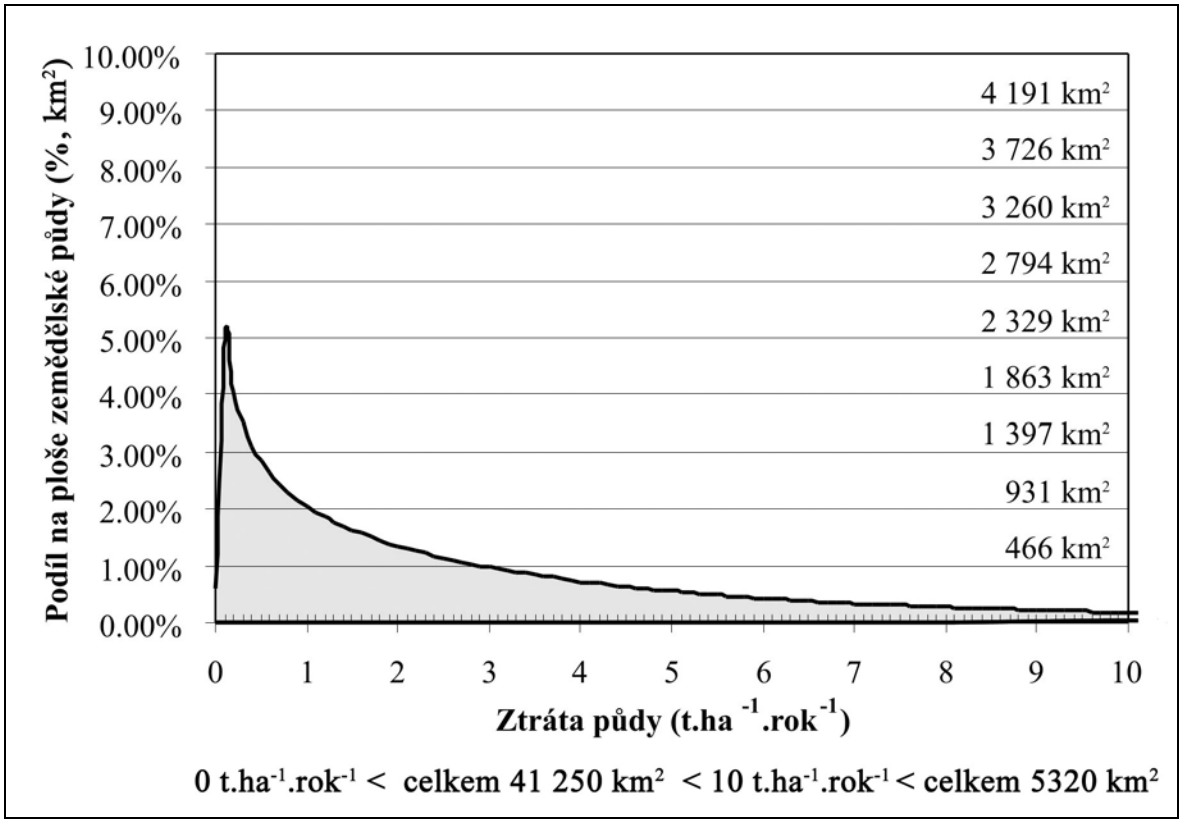
V případě takto velkého území nemá smysl hovořit o průměrné hodnotě ztráty půdy z 1 ha plochy ČR nebo plochy zemědělských pozemků ČR, neboť rozdělení hodnot je vysoce tendenční a průměr tak nemůže vystihnout relativní ohroženost pozemků. O něco větší vypovídající hodnotu má histogram rozdělení hodnot ztráty půdy (), na kterém je zřetelně vidět, že převažují hodnoty ztráty půdy v rozmezí 0,1 až 3 t.ha^{-1}.rok^{-1}. (95% plochy řešeného území je tvořeno hodnotami ztráty půdy v rozmezí 0 – 16 t.ha^{-1}.rok^{-1}). Přesto je dle výpočtu plocha cca 5 000 km^2 ohrožena hodnotami ztráty půdy vyššími než 10 t.ha^{-1}.rok^{-1}. Zhruba 90% z celkové ztráty půdy tvoří dle odhadu eroze na orné půdě, nejohroženější kategorií jsou potom pozemky vinic z průměrnou ztrátou půdy dosahující 30 t.ha^{-1}.rok^{-1}.

Poslední část (kapitola 5) je věnována verifikaci odhadu transportu sedimentu ve velkých povodích. Po výčtu možností verifikace výpočtů ztráty půdy je kapitola zaměřena na měření a výpočty skutečného zachyceného množství sedimentu ve vodních nádržích. Porovnávání výpočtu transportu sedimentu s množstvím zachyceným v nádržích je jeden z mála možných způsobů verifikace dlouhodobých odhadů v měřítku celých povodí. Je zde navržena jednoduchá metodika výběru metody měření v závislosti na parametrech nádrže a postup určení objemu sedimentu z naměřených hodnot. Na konkrétní studii (kapitola 5.2.3) je aplikována uvedená metodika. Na závěr je uveden přehled povodí v ČR dosud hodnocených na katedře hydromeliorací a v průběhu mého doktorského studia.

Hodnocení a modelování erozních procesů je zajímavá práce a význam sledování transportu sedimentu roste spolu s narůstajícími problémy našich nádrží a vodních toků.

Kvalita povrchových vodních zdrojů, čistota nádrží a toků určených k rekreaci, zdravý vývoj krajiny i jejích hospodářských funkcí, to vše je podmíněno i péčí o půdu a krajinnou rozmanitost. Doufám, že tato práce přispívá alespoň malým dílem k porozumění vývoji krajiny a zlepšování péče o prostředí, které nám dává život.

Obr. 6.1.1.–1: Histogram průměrné ztráty půdy na zemědělských pozemcích ČR.



7 Reference

7.1 Výzkumné projekty na kterých se autor podílel

V rámci svého doktorského studia se doktorand podílel na následujících výzkumných projektech:

- grant GA ČR č. 103/00/0384 – Interakce vodních cest a objektů na vodním toku s okolním prostředím, ČVUT, Praha, 2002
- projekt COST OC 623.001 – Soil Erosion and Global Change, 2003
- projekt NAZV QC 0235 – Protierozní a protipovodňová opatření v malých zemědělských a lesních povodích, podklady pro regionální kategorizaci protierozních opatření na území České republiky, VÚMOP, Praha 2000 – 2001
- projekt VaV/510/4/98 – Omezování plošných zdrojů znečištění vody v ČR, VÚV TGM Praha, 2001 – 2001
- projekt VaV/630/4/02 – Výzkum sedimentů přehrad, nádrží a jezer – zhodnocení rizik a návrhy opatření, ČGS Brno, 2002
- grant GA ČR 103/99/1470 – Extrémní hydrologické jevy v povodích, ČVUT, Praha, 2000 – 2002

7.2 Publikace a společné publikace autora

7.2.1 Mezinárodní publikace

- Dostál T., Krása J., Vrána K., Váška J., Krejza M. – The use of GIS for soil erosion and sediment transport assessment in larger watersheds, invited lecture, conference COST Action 623, Almeria, 2000a
- Dostál T., Krása J., Nováková H., Váška J., Vrána K. – Method of determining the transport of soil particles from larger watersheds: Orlice river case study, Slovak Journal of civil Engineering, vol. 11/2, 2003a
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Distributed Approach to Soil Erosion and Sediment Transport Assessment within Large Areas - Map of the Czech Republic. In: Soil Erosion and Global Change. Budapest : Hungarian Academy of Sciences, p. 58-59., 2003b
- Krasa J., Dostal T. – Sediment transport from the watershed of drinking water reservoir. Proceedings of 25 Years of Assessment of Erosion, International Symposium, Ghent, Belgium, p. 417-418, 2003
- Krasa J., Dostal T., Van Rompaey A., Váška J., Vrána K. 2004. Sedimentation in the Czech Republic. Catena – in press
- Van Rompaey, A., Krasa, J., Dostal, T., Govers, G. - Sediment supply to rivers and reservoirs in Eastern Europe. Proceedings of the IASWS symposium, Banff, Canada, 2002a

- Van Rompaey, A., Krasa, K., Dostal, T., Govers, G. - Modelling sediment supply to rivers and reservoirs in the Czech Republic during and after the collectivization period. Proceedings of the BGRG symposium, Leeds, United Kingdom, 2002b
- Van Rompaey, A., Krasa, J., Dostal, T., Govers, G. - Modelling the impact of decollectivization on soil erosion and sediment yield, Hydrobiologia, 2003a
- Van Rompaey, A., Vieillefont V., Jones R., Montanarella L., Verstraeten G., Bazzoffi P., Dostal T., Krasa, J., De Vente J., Poesen J. - Validation of Soil Erosion Estimates at European Scale. European Soil Bureau Research Report No. 13 EUR 20827 EN, 26pp, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2003b

7.2.2 Publikace v ČR

- David V., Dostál T., Krása J., Nykl J., Nováková H., Uhlířová K., Váška J., Vrána K. – Strukturovaný přístup k odhadu produkce povrchového odtoku z území, Povodně: prognózy, vodní toky a krajina, ČVUT v Praze, Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, Praha, 2002
- David, V., Dostál, T., Krása, J., Vrána, K. – Klasifikace odtokových poměrů středočeského kraje In: Workshop 2003 - Extrémní hydrologické jevy v povodích. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2003, s. 295-298. ISBN 80-01-02872-0.
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K., Nováková H., Levitus V. - Stanovení erozní ohroženosti zemědělské půdy a odhad transportu splavenin do vodních toků jako podklad pro určení plošných zdrojů znečištění vody fosforem, dílčí zpráva VaV Omezování plošných zdrojů znečištění vody v ČR, VÚV TGM Praha, 2000b
- Dostál T., Krása J., Váška J. – Podklady pro regionalizaci topografického (morfologického) faktoru (LS faktor) (Řešení USLE za pomoci GIS), výstup z řešení projektu NAZV QC 0235 – Protierozní a protipovodňová opatření v malých zemědělských a lesních povodích, podklady pro regionální kategorizaci protierozních opatření na území České republiky, str. 20-31, VÚMOP a ČVUT Praha, 2000c
- Dostál T., Krása J., Vrána K., Váška J. – Vyhodnocení retenční schopnosti krajiny pro návrh protipovodňové ochrany – 19.regionální konference ICID, BRNO, 2001a
- Dostál T., Krása J., Koudelka P., David V., Nováková H., Váška J., Vrána K. - Strukturovaný přístup k odhadu produkce povrchového odtoku z území - poster, Workshop 2001, ČVUT a ČVVS Praha, 2001b
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Mapa erozní ohroženosti půd a transportu sedimentu v České republice; dílčí zpráva projektu VaV/510/4/98 za rok 2001, koordinátor VÚV TGM Praha; ČVUT, Praha, 2001c
- Dostál T., Krása J., Váška J., Regionalizace topografického (morfologického) faktoru (LS-faktor) s podporou prostředků GIS, výstup z řešení projektu NAZV QC 0235 – Protierozní a protipovodňová opatření v malých zemědělských a lesních povodích, podklady pro regionální kategorizaci protierozních opatření na území České republiky, str. 30-37, VÚMOP a ČVUT Praha, 2001d
- Dostál, T., Krejza, M., Krása, J., Váška, J., Vrána, K. Mapa erozní ohroženosti zemědělské půdy a transportu plavenin - využití digitálních podkladů v měřítku České

republiky. In: Gis ve veřejné správě. Praha : CAGI - TERIS, 2001, s. 215-219. ISBN 80-86143-21-X. 2001e

- Dostál T., Krása J., Koudelka P., David V., Nováková H., Váška J., Vrána K. - Strukturovaný přístup k odhadu produkce povrchového odtoku z území. In: Extrémní hydrologické jevy v povodí. Praha : ČVUT, Fakulta stavební, 2001, s. 147-160. ISBN 80-01-02445-8. 2001f
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Shrnutí hlavních principů vytváření modelů erozních a transportních procesů z povodí vodních nádrží, aplikace v povodí VN Vrchlice, dílčí zpráva projektu VaV/630/4/02 – ČGS Brno, ČVUT Praha, 2002a
- Dostál T., Krása J., Nováková H., Váška J., Vrána K. – Erozní a transportní procesy v povodí VN Vrchlice, dílčí zpráva projektu VaV/510/4/98 – VÚV TGM Praha, 45 s., ČVUT Praha, 2002b
- Dostál T., Krása J., Koláčková J., Nováková H., Nykl J. Váška J., Vrána K. – Metody odhadu erozní ohroženosti a transportu z povodí, dílčí zpráva projektu COST OC 623.001 – Soil Erosion and Global Change, Praha, 2002c
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Mapa erozní ohroženosti půd a transportu sedimentu v České republice, Vodní hospodářství roč. 52, č. 2, s. 46-48. ISBN 1211-0760, Praha, 2002d
- Dostál T., Krása J.,Koláčková J., Nováková H., Váška J.,Veselá J., Vrána K. – Metody odhadu erozní ohroženosti a transportu sedimentu z povodí, Závěrečná zpráva projektu COST OC 623.001, část Fakulta stavební ČVUT v Praze, koordinátor: Dr. Ing. Tomáš Dostál, ČVUT, Praha, 2003c
- Dostál T., Krása J., Vrána K., Strukturovaný přístup k odhadu produkce povrchového odtoku z malých povodí, sborník z mezinárodní konference Protipovodňová prevence a krajinné plánování, ISBN 80-903258-0-7, str. 216-225, ČVUT, Praha, 2003d
- Dostál Tomáš, David Václav, Krása Josef., Vrána Karel, Váška Jiří - Strukturovaný přístup k odhadu produkce povrchového odtoku z území a předpovědní systém povodňové ohroženosti, Vodní hospodářství, roč. 53, č. 10, s. 269-272. ISBN 1211-0760. Praha, 2003e
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Podrobný odhad skutečného množství sedimentu ve VN Vrchlice dílčí zpráva projektu VaV/630/4/02 – ČGS Brno, ČVUT Praha, 32 s., 2003f
- Krása J. – Testování různých algoritmů pro výpočet transportu sedimentu z povodí za podpory GIS, diplomová práce, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 1999
- Krása J. - Vyhodnocení družicových snímků Landsat ETM+ za účelem získání tématické mapy využití území pro modelování erozních procesů, Arcrevue 1/2002, Praha, 2002
- Krása J. - Hodnocení erozních procesů ve velkých povodích za podpory GIS (odhad transportu sedimentu do vodních nádrží a verifikace výpočtu). Doktorandské minimum, Fakulta stavební ČVUT, Praha, 2003
- Vrána K., Dostál T., David V., Krása J. – Studie odtokových na území Středočeského kraje. Výzkumná zpráva – zadavatel Středočeský kraj, Zborovská 11, Praha 5. Fakulta stavební, ČVUT. 75 s., 2003a

- Vrána K., Dostál T., Krása J., Nováková H., Váška J., - Metoda stanovení transportu půdních částic z větších povodí (aplikace v povodí Orlice) – závěrečná zpráva grantu GAČR 103/00/0384 Interakce vodních cest a objektů na vodním toku s okolním prostředím, Praha, 2003b

7.3 Použitá literatura

- Arnoldus H. M. J. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss equation, cit. Gabriels et al., 2003
- Bazzoffi, P.,Baldassarre, G., Vacca, S., 1996. Validation of PISA2 model for automatic assessment of reservoir sedimentation. Proceedings of the International Conference on Reservoir Sedimentation. M.Alberdson Ed. Colorado State Univ.
- Bis, L.: Odhad množství sedimentu ve vodní nádrži Hamry, diplomová práce, ČVUT Praha 1999
- Bečvář, M., 2003. Odhad transportu sedimentu do vodní nádrže Hostivař, diplomová práce, ČVUT, Praha
- Brune G. M. (1953) Trap efficiency of reservoirs. Trans Am. Geophys. Union. Vol., 34, No. 3, p. 407-418
- Brown, C.B. (1944), The control of reservoir silting, United States Department of Agriculture, Misc. Pub. No 521
- Churchill M. A. (1948) Discussion of 'Analysis and use of reservoir sedimentation data', by L. C. Gottschalk. Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Denver, Colorado 1947, pp. 139-140.
- CORINE. 1992. Soil erosion risk and important land resources in the southern regions of the European Community. Brussels, Commission of the European Community EUR 13233 EN, Luxemburg, Office for official Publications of the European Community, pp. 97. Cit. dle (Gabriels et al., 2003)
- Dendy, F.E., and W.A. Champion. Sediment Deposition in U.S. Reservoirs. MP-1362. U.S. Dept. Agr., Agr. Res. Serv., 1978.
- Desmet, P.J.J., Govers, G.: A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, 51 (5): 427-433.1996
- Dostál, T.: Erozní a transportní procesy v povodí, doktorská disertační práce, Praha, 1998.
- Dostál, T., Klik, A., Váška, J., Vrána, K.: Vodní eroze (Soil Erosion), Aktion projekt, ČVUT Praha - BOKU Wien, Praha, 1996.
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K., Nováková H., Levitus V. - Stanovení erozní ohroženosti zemědělské půdy a odhad transportu splavenin do vodních toků jako podklad pro určení plošných zdrojů znečištění vody fosforem, dílčí zpráva VaV Omezování plošných zdrojů znečištění vody v ČR, VÚV TGM Praha, 2000b
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Mapa erozní ohroženosti půd a transportu sedimentu v České republice; dílčí zpráva projektu VaV/510/4/98 za rok 2001, koordinátor VÚV TGM Praha; ČVUT, Praha, 2001c

- Dostál T., Krása J., Nováková H., Váška J., Vrána K. – Erozní a transportní procesy v povodí VN Vrchlice, dílčí zpráva projektu VaV/510/4/98 – VÚV TGM Praha, 45 s., ČVUT Praha, 2002b
- Dostál T., Krása J.,Koláčková J., Nováková H., Váška J.,Veselá J., Vrána K. – Metody odhadu erozní ohroženosti a transportu sedimentu z povodí, Závěrečná zpráva projektu COST OC 623.001, část Fakulta stavební ČVUT v Praze, koordinátor: Dr. Ing. Tomáš Dostál, ČVUT, Praha, 2003c
- Dostál T., Krása J., Váška J., Vrána K. – Podrobný odhad skutečného množství sedimentu ve VN Vrchlice dílčí zpráva projektu VaV/630/4/02 – ČGS Brno, ČVUT Praha, 32 s., 2003f
- Eastman, J.R.: Clark Labs, The Idrisi Project, Clark University Graduate School of Geography, 950 Main St. Worcester, MA 01610-1477 USA, 1987~2003
- Foster, G.R. and Wischmeier, W.H.: Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Transactions of the ASAE, 17: 305-309. 1974.
- Gabriels D., Vermeulen A., Verbist K., Van Meirvenne M. 2003. – Assesment of rain erosivity and precipitation concentration in Europe. Proceedings of 25 Years of Assesment of Erosion symposion. Ghent University, Ghent, Belgium. p. 87 - 92
- Govers G.,Poesen J., 1988. Assessment for interill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot.Geomorphology, 1: 343-354
- Halcrow W., (2001). Sedimentation in Storage Reservoirs, Final Report, Department of Environment Transport and the Regions
- Holý, M., Eroze a životní prostředí, ČVUT, Praha, 1994
- Jakubíková, A., Suchý, H., Váška, J., Žaloudík, J.: Metoda odhadu množství splavenin v povodí. Stavební obzor 7/99. Str. 206 - 213. Praha, 1999
- Janeček, M, a kol.: Ochrana zemědělské půdy před erozí, Metodiky pro zavádění výsledků výzkumu do zemědělské praxe 5/1992, ÚVTIZ Praha, 1992.
- Krása J. – Testování různých algoritmů pro výpočet transportu sedimentu z povodí za podpory GIS, diplomová práce, Praha, 1999
- Krása J. - Vyhodnocení družicových snímků Landsat ETM+ za účelem získání tématické mapy využití území pro modelování erozních procesů, Arcrevue 1/2002, Praha, 2002
- Laflen, J.M.; Elliot, W.J.; Flanagan, D.C.; Meyer, C.R.; Nearing, M.A. 1997. WEPP: predicting water erosion using a process-based model. Journal of Soil and Water Conservation, March-April 1997, p. 96-102.
- Li, Y., Poesen, J., Yang, J.C., Fu, B., Zhang, J.H., 2003. Evaluating gully erosion using 137Cs and 210Pb/137Cs ratio in a reservoir catchment. Soil and Tillage Research, volume 69, p. 107-115
- Mc Cool, D.K., Foster, G.R., Mutchler, C.K. and Meyer, L.D.,: Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. Trans. ASAE, 32, 1571-1576. 1989.
- Nachtergaele, J., Poesen, J., 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. Earth Surface Processes and Landforms, volume 24, p. 693-706

- Nachtergaele, J., Poesen, J., Steegen, A., Takken, I., Beuselinck, L., Vandekerckhove, L., Govers, G. 2001. The value of a physically-based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. Geomorphology, vol. 40, p. 237-252
- Němeček J. a kolektiv. 2001 - Taxonomický klasifikační systém půd České Republiky, ČZU Praha spolu s VÚMOP Praha, 2001
- Olivier, J.E. 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. Professional Geographer 32: 300 – 309., cit. dle (Gabriels et al., 2003)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C.,: Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Draft August 1993. 1993.
- Rekacewicz Philippe. 2004. Soil Degradation, GLASOD, UNEP GRID-Arendal, Norway – zdroj: http://www.soilerosion.net
- Römkens M. J. M., Prasad S. N., Poesen J. W. A.. 1986 – Soil erodibility and properties. Trans 13th congress of th. Int. Soc. of Soil Sci., Hamburg, Germany 5, p. 492 - 504
- Steegen, A., Govers, G., 2001. Correction factors for estimating suspended sediment export from loess catchments. Earth Surface Processes and Landforms, volume 26, p. 441-449
- Šálek, J., Mika, Z., Tresová, A. - Rybníky a účelové nádrže. SNTL Praha, 1989.
- Šeblová V., Egrmajerová L., Vondráček K. – Využití státního mapového díla ZABAGED při simulaci povodní. Arcrevue Praha, vol. 4/2003, p. 25 - 29
- Torri, D., Poesen, J., Borselli, L., 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. Catena 31, 1 – 22.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. – Soil Erosion Risk Assessment in Italy, Space Application Institute, European Soil Bureau, Italy, 1999
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. – Soil Erosion Risk Assessment in Europe, Space Application Institute, European Soil Bureau, Italy, 2000
- Van Dijk P. – Soil Erosion and Associated Sediment Supply to Rivers – seasonal dynamics, soil conservation measures and impacts of climate change – University of Amsterdam, 2001
- Van Rompaey A.J.J., 2001. Geomorphic and Land Use Change Modelling at a Regional Scale, PHd thesis, Department of Geology and Geography, KU Leuven, Belgium
- Van Rompaey A.J.J., Verstraeten G.,Van Oost K.,Govers G.,Poesen J. – Modelling MEAN Annual Sediment Yield Using a Distributed Approach, KU Leuven, Belgium, 2000
- Vrána, K., Dostál, T., Váška, J.: Vyhodnocení erozních a sedimentačních procesů v povodí VN Želivka, ČVUT Praha, 1992
- Williams J.R. – Sediment delivery ratio determined with sediment and runoff models, 1977, In. Janeček a kol., 1992.

- Wischmeier,W.H., Smith, D. D. - Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning. Agr.Handbook No.537, US Dept.of Agriculture, Washington, 1978.

8 Rejstříky a seznamy

8.1 Seznam použitých rovnic

(2.1.1–1) Univerzální rovnice ztráty půdy 16
(2.1.2–1) R faktor 18
(2.1.2–2) Kinetická energie srážky 18
(2.1.2–3) R faktor 19
(2.1.2–4) Modifikovaný Fournierův index 19
(2.1.2–5) Index rozdělení srážek 20
(2.1.2–6) Faktor erodovatelnosti půdy 22
(2.1.2–7) Faktor erodovatelnosti půdy 22
(2.1.2–8) Faktor délky svahu 23
(2.1.2–9) Faktor sklonu svahu 24
(2.1.2–10) Topografický faktor LS 24
(2.1.3–1) Faktor délky svahu pro 2D 27
(2.1.3–2) Faktor sklonu svahu pro krátký svah 28
(2.1.3–3) Exponent sklonu svahu 28
(2.1.3–4) Proměnná exponentu sklonu svahu 28
(2.1.4–1) Poměr odnosu sedimentu 28
(2.1.4–2) Poměr zachycení podle Browna 30
(2.1.4–3) Poměr zachycení podle Browna 30
(2.1.4–4) Poměr zachycení podle Bruneho 32
(2.2.2–1) Transportní kapacita 34
(2.2.2–2) Celkový erozní potenciál 34
(2.2.2–3) Celkový erozní potenciál 34
(2.2.2–4) Potenciál mezirýhové eroze 34
(2.2.2–5) S faktor mezirýhové eroze 35
(2.2.2–6) Transportní kapacita 35
(4.1.4–1) Reliéfový poměr 108

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 2.1.2–1: Klasifikace MFI podle projektu CORINE: 20

Tabulka 2.1.2–2: Klasifikace PCI: 20

Tabulka 2.1.2–3: Výběr z průměrných ročních hodnot C faktoru (Janeček a kol., 1992) 25

Tabulka 2.2.4–1: Příklad souboru *.txt. 43

Tabulka 2.2.4–2: Příklad souboru *.rou. 44

Tabulka 2.2.5–1: Struktura souboru Pond Sediment Deposition.txt 49

Tabulka 2.2.5–2: Struktura souboru projectriversediment.txt. 50

Tabulka 3.2.2–1: Srovnání celkových hodnot ztráty půdy Gpp pro informační vrstvy LS faktoru vytvořené pomocí USLE2D s dosazením DMT upravených v IDRISI pomocí filtrů. 66

Tabulka 3.2.2–2: Porovnání počtu hodnot LS faktoru vyšších než 30 pro výpočet na neupraveném DMT a na DMT upraveném pomocí filtrů. 68

Tabulka 3.3.1–1: Spektrální rozsah skeneru Landsat TM a ETM+ (Pásmo 8 pouze skener ETM+) (Pavelka, 1998): 72

Tabulka 4.1.1–1: Souřadnice rohových bodů řešeného území (zdrojových rastrových vrstev GIS v rozlišení 50 m): 85

Tabulka 4.1.2–1: Kategorie CORINE znázorněné jako neřešené plochy při tvorbě mapy využití území. 86

Tabulka 4.1.2–2: Kategorie CORINE vybrané jako podklad pro C faktor. 86

Tabulka 4.1.3–1: Tabulka hodnot K faktoru ($t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}$) a hydrologických skupin půd podle mapy KPP 1:200 000. 95

Tabulka 4.1.3–2: Plochy řešených území a přehled hodnot C faktoru. 99

Tabulka 4.1.4–1: Tabulka hodnot CN pro dle hydrologických skupin půd a kategorií CORINE Land Cover (Dostál a kol., 2001c). 110

Tabulka 4.2.1–1: Základní charakteristiky povodí VN Vrchlice. 117

Tabulka 4.2.1–2: Parametry vstupních vrstev výpočtu transportu sedimentu. 118

Tabulka 4.2.2–1: Průměrný osevní postup a hodnoty C faktoru přiřazené jednotlivým plodinám 123

Tabulka 4.2.3–1: Výsledné hodnoty poměru odnosu pro jednotlivá povodí 124

Tabulka 4.2.3–2: Přiřazované hodnoty CN na základě kombinace půdní mapy a využití pozemku 125

Tabulka 4.2.3–3: Ztráta půdy a transport sedimentu z povodí VN Vrchlice. 125

Tabulka 4.2.4–1: Přehled nádrží a rybníků zahrnutých do výpočtu 126

Tabulka 4.2.4–2: Výpočet celkového poměru zachycení jednotlivých povodí 4. řádu dle Bruneho 127

Tabulka 4.2.4–3: Schéma transportu sedimentu do nádrže. Zvýrazněné řádky označují uzávěrové profily Hamerského rybníka a VN Vrchlice. 127

Tabulka 4.2.4–4: Shrnutí výsledků výpočtu transportu sedimentu a odhadu množství sedimentu v Hamerském rybníce a VN Vrchlice. 128

Tabulka 4.3.2–1: Základní kalibrace parametrů modelu Watem/SEDEM 2.1.0 pro povodí VN Vrchlice. Hlavní výstupy modelu pro celé povodí (t.rok^{-1}) a hodnoty množství sedimentu zachyceného v Hamerském rybníce a VN Vrchlici (t.rok^{-1}). Původně nadhodnocené hodnoty jsou iterovány k měřeným hodnotám a výpočtu dle USLE+SDR. 133

Tabulka 4.3.2–2: Množství sedimentu vstupující do vodních toků a transportované říční sítí. Přehled všech segmentů toků povodí VN Vrchlice (**Obr. 4.3.1–2**). V posledním sloupci je vždy dopočtena hodnota jednotkového vstupu sedimentu do daného úseku toku přímo z plochy povodí. Tedy množství sedimentu (t.rok^{-1}) vstupující do každé buňky daného úseku..... 135

Tabulka 4.3.2–3: Množství sedimentu vstupující do nádrží a umístění nádrží podle modelu Watem/SEDEM 2.1.0..... 137

Tabulka 4.3.2–4: Porovnání kvality vrstvy vodních toků na výpočet pomocí Watem/SEDEM 2.1.0. Hodnoty transportu sedimentu v t.rok^{-1}. Popis sloupců a parametrů tabulky souhlasí s (..... 139

Tabulka 4.3.3–1: Podíl orné půdy, přesahující daný sklon..... 141

Tabulka 4.3.3–2: Snížení celkových hodnot transportu sedimentu z povodí VN Vrchlice a pokles zanášení VN Vrchlice a Hamerského rybníka v závislosti na zatravněné ploše orné půdy s nejvyšším sklonem. 141

Tabulka 5.2.3–1: Parametry vstupních vrstev výpočtu objemu sedimentu ve VN Vrchlice. 150

Tabulka 5.2.3–2: Objem sedimentu ve VN Vrchlice..... 154

Tabulka 5.2.3–3: Porovnání vypočtených objemů sedimentu v jednotlivých částech nádrže. Srovnání výsledků původního odhadu a revidovaných výpočtů..... 154

Tabulka 5.2.4–1: Základní dostupné charakteristiky měřených povodí a nádrží. 155

8.3 Seznam obrázků

Obr. 1.2.2–1 Celosvětový rozsah degradace půdy (Rekacewicz, 2004). 11

Obr. 2.1.2–1 Hodnoty faktoru K (t.h.MJ^{-1}.cm^{-1}) v závislosti na zrnitostním složení půdy, její struktuře a propustnosti a procentu organické hmoty. 21

Obr. 2.1.2–2 Diagram zrnitosti pro půdní charakteristiky podle DOM 3. 23

Obr. 2.1.4–1 Závislost celkového transportu sedimentu z povodí při použití SDR na průměrné ploše dílčího podpovodí, aplikace v povodí Sedlického potoka (Krejza, 1999)..... 29

Obr. 2.1.4–2 Poměr zachycení v nádržích podle Browna – závislost vyjádřena v US jednotkách. (Brown, 1944). Na vodorovné ose podíl objemu nádrže a plochy povodí, na svislé poměr zachycení..... 30

Obr. 2.1.4–3 Poměr zachycení sedimentu v nádržích podle Browna (Brown, 1944) vyjádřený v metrických jednotkách. 31

Obr. 2.1.4–4 Poměr zachycení v nádržích na základě Bruneho křivky (Brune, 1953)..... 32

Obr. 2.2.3–1 Ukázka vodních toků z databáze VÚV, výřez z povodí Vrchlice. Podkladem je vrstva sklonu (%) odvozená z DMT. Jedná se o příklad poměrně věrně digitalizovaných

toků, přesto evidentně zcela přesně neprochází spádnicí, navíc sklon terénu je v údolnici DMT při dané přesnosti mnohdy příliš malý. 36

Obr. 2.2.3–2 Ukázka vodních toků z databáze KPP a VÚV. Kromě evidentního nesouladu jednotlivých databází, je na podložené rastrové vrstvě generovaných odtokových drah vidět, že vektorové toky se mnohdy rozcházejí s údolnicemi DMT. 37

Obr. 2.2.3–3 Ukázka vodních toků generovaných algoritmem Steepest descent. Problém stanovení vhodné meze – velikosti zdrojové plochy odpovídající vytvoření trvalého toku. 38

Obr. 2.2.3–4 Výsledná topologie vodních toků - ukázka z části povodí Vrchlice. 39

Obr. 2.2.4–1 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 1 pro zadávání vstupních dat. 40

Obr. 2.2.4–2 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Modul pro přípravu vrstvy pozemků. 41

Obr. 2.2.4–3 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Tvorba topologie vodních toků. 44

Obr. 2.2.4–4 : Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 2 pro zadávání vstupních dat. 45

Obr. 2.2.4–5 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Dialog 3 pro zadávání vstupních dat. 47

Obr. 2.2.5–1 Uživatelské rozhraní modelu Watem SEDEM 2.1.0. Hlavní výstupy modelu. . 48

Obr. 3.2.1–1: Přehled základní podrobnosti DMT komerčních databází. 54

Obr. 3.2.2–1 Problém generování rastrového DMT s příliš nízkým rozlišením Při přímém generování DMT v rozlišení 80 m z DMÚ25 (pravý obrázek) vzniká vrstva s chybnou odtokovou sítí – lze si povšimnout několika elementů ve dvou údolnicích zvoleného území, které přerušují údolnicovou linii a zamezují odtokovosti území, těmto buňkám byly vlivem nízkého zdrojového rozlišení přiřazeny chybné hodnoty nadmořských výšek. 59

Obr. 3.2.2–2: Rastrový DMT a mapa sklonů povodí Rokytenky v Orlických horách, zdroj – DMÚ25, cílové rozlišení 50 m, výchozí rozlišení 25 m, vliv agregace na změnu profilu. 60

Obr. 3.2.2–3 Chyby DMT vznikající v místech nízké hustoty vrstevnic při využití přímé interpolace z vrstevnic v Idrisi 32. Ukázka z povodí Prušánky na jižní Moravě, zdroj – DMÚ25. 61

Obr. 3.2.2–4 TIN síť na základě vrstevnic – shodné území z obrázku (Obr. 3.2.2–1). 62

Obr. 3.2.2–5: Porovnání vlivu filtrů na odstranění nerovností z DMT. Na prvním obrázku jsou zřetelně vidět světlejší terénní prohlubně o velikosti 1 nebo několika pixelů. Vzdálenost linií souřadnicové sítě je 500 m. Výškový rozsah území je od 410 do 479 m.n.m. – ukázka z povodí Sedlice. 65

Obr. 3.2.2–6 Vliv úpravy DMT filtry na celkovou ztrátu půdy G z povodí v závislosti na použitém způsobu hledání směru odtoku a rovnici pro výpočet LS. 67

Obr. 3.3.1–1 Porovnání podrobnosti družicových snímků skeneru Landsat ETM+ a snímků družice Ikonos s vysokým rozlišením (panchromatické pásmo s rozlišením 1m odpovídá již podrobností leteckým snímkům) – shodný výřez, Chomutov. 70

Obr. 3.3.1–2 Ukázka různé odrazivosti dané scény v jednotlivých spektrálních pásmech skeneru Landsat ETM+. Za povšimnutí stojí odlišná odrazivost a lepší spektrálně rozlišovací schopnost infračervených pásem (výřez z povodí Rokytenky v Orlických horách). 72

Obr. 3.3.2–1 Scéna Landsat TM, trénovací množiny a výsledná mapa kategorií území. 74

Obr. 3.3.2–2 Znehodnocení družicové scény vysokou a rozptýlenou oblačností a jejími stíny. 75

Obr. 3.3.2–3 Výsledná mapa využití území na základě Landsat TM a letecké ortofotomapy v povodí Vrchlice. 76

Obr. 3.4.1–1 Porovnání rastrových map K faktoru (USLE) vytvořených na základě dostupných digitálních podkladů o půdě v povodí Rokytenky. 79

Obr. 3.5.1–1 Mapa izolinií R faktoru dle původní doporučované metodiky (Janeček a kol., 1992). 82

Obr. 4.1.2–1 Mapa využití území ČR na základě CORINE Land Cover. 89

Obr. 4.1.2–2 Výsledný rastrový DMT ČR na základě DMÚ25 90

Obr. 4.1.2–3 Rastrová mapa sklonů (%) ČR odvozená na podkladě DMT 91

Obr. 4.1.2–4 Detail hranice ČR – nepřesnost vektorových databází. 93

Obr. 4.1.2–5 Chyby v hranicích povodí 4. řádu. 93

Obr. 4.1.3–1 Výřez z pomocné vrstvy pozemků pro výpočet LS faktoru na území ČR – povodí Rokytenky. 97

Obr. 4.1.3–2 Výsledná mapa R faktoru pro ČR 102

Obr. 4.1.3–3 Mapa K faktoru pro území ČR odvozená podle KPP 1:200 000. 103

Obr. 4.1.3–4 Mapa LS faktoru pro ČR získaná s využitím programu USLE2D. 104

Obr. 4.1.3–5 Mapa C faktoru na základě CORINE a průměrných osevních postupů pro území ČR. 105

Obr. 4.1.3–6 Výsledná mapa ztráty půdy ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR v rozlišení 50 m. 106

Obr. 4.1.3–7 Výsledná mapa průměrné ztráty půdy z jednotlivých povodí 4. řádu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR. 107

Obr. 4.1.4–1 Výsledná rastrová mapa hodnot čísel odtokových křivek CN (%) pro území ČR. 113

Obr. 4.1.4–2 Výsledná mapa poměru odnosu SDR (%) z jednotlivých povodí 4. řádu v ČR. 114

Obr. 4.1.4–3 Výsledná mapa transportu sedimentu do vodních toků z povodí 4. řádu ($t.povodí^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR. 115

Obr. 4.1.4–4 Výsledná mapa poměrného transportu sedimentu do vodních toků z povodí 4. řádu ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) pro území ČR. 116

Obr. 4.2.2–1: Výsledná mapa průměrné ztráty půdy v povodí VN Vrchlice ($t.ha^{-1}.rok^{-1}$) a schéma transportu sedimentu z jednotlivých povodí 4. řádu ČHP. 119

Obr. 4.2.2–2: Mapa K faktoru na základě kombinace dostupných digitálních podkladů (BPEJ a KPP) o půdě v povodí Vrchlice (97 km^2). Porovnání s generelní mapou podle KPP 1:200 000. 120

Obr. 4.3.1–1: Úprava tvaru VN Vrchlice a topologie jejích přítoků pro výpočet transportu sedimentu pomocí Watem/SEDEM 2.1.0. 130

Obr. 4.3.1–2: Schéma vodních toků v povodí VN Vrchlice a jejich čísel na základě výpočtu topologie (souboru „vrchlice.rou“) v programu Watem/SEDEM 2.1.0. 131

Obr. 4.3.2–1: Export a depozice sedimentu v povodí VN Vrchlice podle programu Watem/SEDEM 2.1.0. 134

Obr. 4.3.2–2: Porovnání jednotlivých částí vodotečí v povodí VN Vrchlice z hlediska množství sedimentu přímo vstupujícího do toků z povodí (ohroženost na jednotku délky – 1 buňku 20*20m – toku). 138

Obr. 4.3.3–1: Nárůst zatravněných ploch v povodí VN Vrchlice podle scénáře zatravnění v závislosti na sklonu pozemku. 140

Obr. 4.3.3–2: Poměrné snížení transportu sedimentu v závislosti na zatravněné ploše s nejvyšším sklonem. Procentní snížení vypočteno dle tabulky (**Tabulka 4.3.3–2**). 142

Obr. 5.2.2–1: Příklad možných kritérií výběru vhodné metody měření objemu sedimentu. 146

Obr. 5.2.3–1: Záměrné body (sondy) a výsledný DMT objemu sedimentu v Hamerském rybníce. 147

Obr. 5.2.3–2: Rektifikovaný původní vrstevnicový plán a profily nového zaměření dna VN Vrchlice. 148

Obr. 5.2.3–3: Přehled bodů zaměření skutečného objemu sedimentu ve VN Vrchlice. 149

Obr. 5.2.3–4: DMT mocností skutečného množství sedimentu v horní části VN Vrchlice odvozený na základě vpichových sond. 151

Obr. 5.2.3–5: Mapa sklonu dna VN Vrchlice v procentech na základě DMT původního dna. 152

Obr. 5.2.3–6: Výsledný DMT rozložení sedimentu v celé VN Vrchlice. 153

Obr. 5.2.4–1: Základní přehled řešených povodí. 156

Obr. 6.1.1.–1: Histogram průměrné ztráty půdy na zemědělských pozemcích ČR. 159

9 Podrobný obsah

ÚVOD **4**

STRUKTURA DIZERTAČNÍ PRÁCE **5**

1 ČÁST PRVNÍ – ÚVOD DO PROBLEMATIKY VÝZKUMU EROZE **6**

1.1 VODNÍ EROZE A JEJÍ DŮSLEDKY PRO KRAJINU **6**
1.1.1 PRŮBĚH EROZNÍHO PROCESU 6
1.1.2 MECHANIZMUS VODNÍ EROZE 6
1.1.3 FORMY VODNÍ EROZE 7
1.1.4 FAKTORY PODMIŇUJÍCÍ VODNÍ EROZI 8
1.1.5 NEGATIVNÍ DŮSLEDKY VODNÍ EROZE 9
1.2 VÝZKUM VODNÍ EROZE **10**
1.2.1 VODNÍ EROZE V ČESKÉ REPUBLICE 10
1.2.2 VODNÍ EROZE VE SVĚTĚ 11
1.3 METODY VÝPOČTU EROZNÍ OHROŽENOSTI A OBJEMU SPLAVENIN **13**
1.3.1 EMPIRICKÉ METODY 14
1.3.2 MATEMATICKÉ SIMULAČNÍ MODELY 15

2 ČÁST DRUHÁ – POUŽITÉ EMPIRICKÉ MODELY **16**

2.1 UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY (USLE) **16**
2.1.1 ZÁKLADNÍ POPIS 16
2.1.2 MANUÁLNÍ VÝPOČET 17
2.1.2.1 Princip výpočtu – charakteristický profil 17
2.1.2.2 Faktor erozní účinnosti deště R 18
2.1.2.3 Faktor erodovatelnosti půdy K 21
2.1.2.4 Faktor délky a sklonu svahu LS 23
2.1.2.5 Faktor ochranného vlivu vegetace C 24
2.1.2.6 Faktor ochranného vlivu technických opatření P 25
2.1.3 VÝPOČET POMOCÍ GIS 25
2.1.3.1 Princip výpočtu – distributivní přístup 25
2.1.3.2 Faktory R,K,C,P 26
2.1.3.3 Morfologické faktory LS 26
2.1.4 TRANSPORT SPLAVENIN, ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ 28
2.1.4.1 Poměr odnosu sedimentu SDR 28
2.1.4.2 Poměr zachycení v nádržích A 29
2.2 MODEL WATEM/SEDEM **32**
2.2.1 ZÁKLADNÍ POPIS 32
2.2.2 TRANSPORTNÍ KAPACITA 34
2.2.3 NÁVAZNOST VODNÍCH TOKŮ, POMĚR ZACHYCENÍ V NÁDRŽÍCH 35
2.2.3.1 Watem/SEDEM 2.0 35
2.2.3.2 Watem/SEDEM 2.1.0 38
2.2.4 VSTUPNÍ DATA MODELU WATEM/SEDEM 2.1.0 40
2.2.4.1 Digitální model terénu 40
2.2.4.2 Mapa pozemků 41
2.2.4.3 Vodní toky 42

2.2.4.4 Druhý vstupní dialog – K faktor, C faktor, nádrže, hranice pozemků ... 45
2.2.4.5 Třetí vstupní dialog – LS faktor, R faktor, transportní kapacita ... 46
2.2.5 VÝSTUPY MODELU WATEM/SEDEM 2.1.0 ... 47
2.2.5.1 Celkové hodnoty – výstupní dialog ... 47
2.2.5.2 Výstupní tabulky ... 49
2.2.5.3 Výstupní rastrové vrstvy ... 50

3 ČÁST TŘETÍ – VSTUPNÍ DATA PRO VÝPOČET V GIS ... 52

3.1 POUŽÍVANÝ SOFTWARE ... 52
3.2 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU ... 53
3.2.1 KOMERČNÍ DATABÁZE JAKO ZDROJE DMT V ČR ... 54
3.2.1.1 Databáze ZABAGED – Základní báze geografických dat ... 54
3.2.1.2 Databáze DMÚ25 – Digitální model území ... 55
3.2.1.3 Ostatní komerční databáze výškopisu v ČR – DMR2, DMR1, DMÚ200, DVD ... 56
3.2.2 PŘÍPRAVA DMT Z VEKTOROVÉ VRSTEVNICOVÉ MAPY ... 58
3.2.2.1 Základní postupy tvorby rastrového DMT ... 58
3.2.2.2 Úprava DMT filtrací – vliv jednotlivých algoritmů nabízených IRDISI32 ... 63
3.3 LAND COVER - KATEGORIE POVRCHU, VYUŽITÍ PŮDY, VEGETACE ... 69
3.3.1 SNÍMKY DPZ JAKO ZDROJ PRO VYTVOŘENÍ MAPY LAND COVER ... 70
3.3.1.1 Obecné pojednání o datech DPZ ... 70
3.3.1.2 Snímky z Landsat TM a Landsat ETM+ ... 71
3.3.2 KLASIFIKACE ... 72
3.3.2.1 Získávané kategorie využití území ... 73
3.3.2.2 Postup vyhodnocení snímku Landsat TM (ETM+) ... 73
3.3.2.3 Poznámky a praktická doporučení ... 74
3.4 PŮDNÍ DATA ... 77
3.4.1 MAPOVÉ DATABÁZE O PŮDĚ V ČR ... 77
3.4.1.1 Vektorová mapová databáze BPEJ ... 77
3.4.1.2 Vektorová mapová databáze KPP 1:200 000 ... 78
3.4.1.3 Vektorové půdní mapy 1:50 000 ... 80
3.4.2 PŘÍPRAVA RASTROVÝCH VRSTEV Z PŮDNÍCH DATABÁZÍ ... 81
3.5 SRÁŽKY, KLIMATICKÉ VLIVY ... 81
3.5.1 PŮVODNÍ (DOSAVADNÍ) DOPORUČOVANÉ HODNOTY R ... 81
3.5.2 REVIDOVANÉ HODNOTY R VYPLÝVAJÍCÍ Z DOSTUPNÝCH DAT V ČR A OKOLÍ ... 82

4 ČÁST ČTVRTÁ – PŘÍKLADY APLIKACE VÝPOČTU EROZE A TRANSPORTU SEDIMENTU ... 84

4.1 UNIVERZÁLNÍ ROVNICE ZTRÁTY PŮDY PRO CELÉ ÚZEMÍ ČR ... 84
4.1.1 MĚŘÍTKO ... 84
4.1.2 VSTUPNÍ DATA ... 85
4.1.2.1 Land Cover, mapa využití území ... 85
4.1.2.2 Digitální model terénu ... 86
4.1.2.3 Půdy ... 92
4.1.2.4 Srážky ... 92
4.1.2.5 Územní a hydrologické členění ... 92
4.1.3 VÝPOČET ZTRÁTY PŮDY (USLE) ... 94
4.1.3.1 R faktor ... 94
4.1.3.2 K faktor ... 94
4.1.3.3 LS faktor ... 96
4.1.3.4 C faktor ... 99
4.1.3.5 Mapa ztráty půdy ... 100

4.1.4 TRANSPORT SEDIMENTU (SDR) ... 108
4.1.4.1 Plocha povodí ... 108
4.1.4.2 Reliéfový poměr ... 108
4.1.4.3 Čísla odtokových křivek CN ... 109
4.1.4.4 Výpočet SDR ... 112
4.2 USLE + SDR – PŘÍPADOVÁ STUDIE VN VRCHLICE ... 117
4.2.1 VSTUPNÍ DATA ... 117
4.2.2 ZTRÁTA PŮDY ... 118
4.2.2.1 R faktor ... 119
4.2.2.2 K faktor ... 120
4.2.2.3 LS faktor ... 121
4.2.2.4 Land Cover a C faktor ... 121
4.2.3 POMĚR ODNOSU SDR ... 124
4.2.4 ZACHYCENÍ SEDIMENTU V NÁDRŽÍCH ... 125
4.3 WATEM/SEDEM 2.1.0 – APLIKACE V POVODÍ VN VRCHLICE ... 128
4.3.1 VSTUPNÍ DATA ... 128
4.3.1.1 Pozemky ... 129
4.3.1.2 Vodní toky a nádrže ... 129
4.3.2 VÝPOČET ... 131
4.3.3 SCÉNÁŘE ZMĚNY HOSPODAŘENÍ V POVODÍ ... 139

5 ČÁST PÁTÁ - VERIFIKACE EMPIRICKÝCH METOD ... 143

5.1 MOŽNOSTI VERIFIKACE ... 143
5.2 STANOVENÍ SKUTEČNÉHO OBJEMU SEDIMENTU V NÁDRŽÍCH ... 143
5.2.1 PŘEHLED METOD ZÍSKÁNÍ OBJEMU SEDIMENTU ... 143
5.2.2 VÝBĚR VHODNÉ METODY – CHARAKTERISTIKY NÁDRŽÍ ... 144
5.2.2.1 Vlastnosti nádrže ... 144
5.2.2.2 Způsob provozování nádrže ... 144
5.2.2.3 Kvalita dokumentace ... 145
5.2.2.4 Výběr a kombinace metod ... 145
5.2.3 PŘÍPADOVÁ STUDIE – VN VRCHLICE ... 147
5.2.4 PŘEHLED MĚŘENÝCH NÁDRŽÍ A POVODÍ ... 155

6 ZÁVĚR ... 157

7 REFERENCE ... 160

7.1 VÝZKUMNÉ PROJEKTY NA KTERÝCH SE AUTOR PODÍLEL ... 160
7.2 PUBLIKACE A SPOLEČNÉ PUBLIKACE AUTORA ... 160
7.2.1 MEZINÁRODNÍ PUBLIKACE ... 160
7.2.2 PUBLIKACE V ČR ... 161
7.3 POUŽITÁ LITERATURA ... 163

8 REJSTŘÍKY A SEZNAMY ... 167

8.1 SEZNAM POUŽITÝCH ROVNIC ... 167
8.2 SEZNAM TABULEK ... 167
8.3 SEZNAM OBRÁZKŮ ... 169

9 PODROBNÝ OBSAH ... 173